

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ

Група АКП-23-2К

Деніз Хороб

2025

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Хороб Деніз Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681.51

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ БРАГОРЕКТИФІКАЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Нормоконтроль

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

О.В. Кучмистенко

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-23-2К

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

Д.М. Хороб

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

В.С. Борин

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

І.І. Чигур

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

« » 2025 року

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Хороб Деніз Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизоване управління брагоректифікаційною установкою

керівник роботи Чигур Ігор Іванович, доцент, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «07» травня 2025 року № 52/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи матеріали практик, технологічна схема, методичні матеріали, каталоги, стандарти, технічна література, інтернет ресурси.

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

1. Аналіз технології брагоректифікації

2. Аналіз підходів до створення системи керування брагоректифікаційною установкою

3. Розробка системи автоматизації брагоректифікаційною установкою

4. Технічна реалізація розробленої АСК

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

Лист 1 – Технологічна схема БРУ - БР.АКП-19.00.00.000 01. Лист –

Функціональна скма автоматизації - БР.АКП-19.00.00.000 02. Лист 3 –

Варіанти реалізацій систем керування - БР.АКП-19.00.00.000 03. Лист 4 –

Реалізація керування на Schneider Electric Modicon M262- БР.АКП-

19.00.00.000 04. Лист 5 – Основні компоненти та технології - БР.АКП-

19.00.00.000 05. Лист 6 – SCADA система - БР.АКП-19.00.00.000 06 .

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 06.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз технології брагоректифікації	13.05.2025	
2.	Аналіз підходів до створення системи керування брагоректифікаційною установкою	17.05.2025	
3.	Розробка системи автоматизації брагоректифікаційною установкою	25.05.2025	
4.	Технічна реалізація розробленої АСК	08.06.2025	

Студент _____
(підпис)

Д.М. Хороб
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

І.І. Чигур
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 58 сторінок друкованого тексту, 22 рисунки, 5 таблиць, 10 посилань на джерела.

Тема: «Автоматизоване управління брагоректифікаційною установкою».

Об'єкт дослідження: брагоректифікаційна установка як складний динамічний об'єкт автоматизованого управління.

Мета роботи: підвищення ефективності, надійності та енергоощадності технологічного процесу брагоректифікації шляхом розробки та впровадження автоматизованої системи керування на основі сучасних програмованих логічних контролерів та засобів вимірювання.

У процесі дослідження проаналізовано особливості функціонування БРУ, визначено основні параметри, що підлягають автоматичному контролю, та обґрунтовано доцільність впровадження сучасних засобів автоматизації.

Для реалізації автоматизованого управління використано програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M262, який забезпечує гнучке та надійне керування технологічними зонами установки. У якості засобів первинного контролю застосовано датчики температури, тиску, рівня та витрати, сумісні з протоколами промислової автоматики. Розроблено структурну схему системи, алгоритм її функціонування та виконано моделювання процесу в середовищі EcoStructure Machine Expert.

Результати бакалаврської роботи: впровадження автоматизованої системи управління дозволяє підвищити точність регулювання параметрів, знизити вплив людського фактору та забезпечити стабільну роботу брагоректифікаційної установки у різних режимах. Робота є актуальною для малих та середніх підприємств харчової промисловості, що прагнуть підвищити рівень технологічної безпеки та якості продукції за рахунок цифровізації виробничих процесів.

Ключові слова: брагоректифікація, керування, контролер, модель, регулятор.

ABSTRACT

Bachelor's thesis contains: 58 pages of printed text, 22 figures, 5 tables, 10 references to sources.

Topic: "Automated control of a bragorectification plant".

Object of research: a bragorectification plant as a complex dynamic object of automated control.

Purpose of work: increasing the efficiency, reliability and energy saving of the bragorectification technological process by developing and implementing an automated control system based on modern programmable logic controllers and measuring instruments.

In the process of research, the features of the BRU functioning were analyzed, the main parameters subject to automatic control were determined, and the feasibility of implementing modern automation tools was substantiated.

To implement automated control, a Schneider Electric Modicon M262 programmable logic controller was used, which provides flexible and reliable control of the technological zones of the plant. Temperature, pressure, level and flow sensors compatible with industrial automation protocols were used as primary control tools. A structural diagram of the system, an algorithm for its functioning and a process simulation in the EcoStruxure Machine Expert environment were developed.

Results of the bachelor's thesis: the implementation of an automated control system allows to increase the accuracy of parameter regulation, reduce the influence of the human factor and ensure stable operation of the bragorectification unit in different modes. The work is relevant for small and medium-sized enterprises in the food industry, which seek to increase the level of technological safety and product quality through the digitalization of production processes.

Keywords: bragorectification, control, controller, model, regulator.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ БРАГОРЕКТИФІКАЦІЇ	10
1.1 Фундаментальні принципи дистиляції та ректифікації.....	10
1.2 Аналіз брагоректифікаційної установки як керованого об'єкта.....	12
1.3 Параметри контролю і керування.....	15
Висновки до розділу	21
2 АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БРАГОРЕКТИФІКАЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ	22
2.1 Сучасні парадигми автоматизації БРУ	22
2.2 Еволюція алгоритмів управління БРУ.....	24
2.3 Технологічні можливості та практичні аспекти модернізації.....	27
Висновки до розділу	29
3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ БРАГОРЕКТИФІКАЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ	31
3.1 Вибір програмованого логічного контролера (ПЛК) та середовища програмування.....	31
3.2 Платформа SCADA-системи	33
3.3 Ключові протоколи зв'язку	35
3.4 Розробка проекту в Machine Expert.....	37
3.5 Застосування функціональних блоків та бібліотек	40
3.6 Розроблення та налаштування ПІД-регулятора	41

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизоване управління брагоректифікаційною установкою	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Хороб Д.М.					6	61
Перевір.		Чигур І.І.				АКП-23-2К ІФНТУНГ		
Реценз.		Борин В.С.						
Н. Контр.		Кучмистенко О						
Затверд.		Лагойда А.І.						

3.7 Налаштування зв'язку Modbus для частотних перетворювачів	42
3.8 Інтеграція з ПЛК через OPC UA	45
Висновки до розділу	50
4 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ АСК.....	51
4.1 Контролер Schneider Electric Modicon M262.....	51
4.2 Датчики системи автоматизації брагоректифікаційної установки.....	53
Висновки до розділу	55
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	57
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	58

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ВСТУП

Метою бакалаврської роботи є розробка автоматизованої системи керування брагоректифікаційною установкою.

Брагоректифікаційні установки (БРУ) є ключовими технологічними комплексами у харчовій промисловості, зокрема для виробництва етилового спирту, і широко застосовуються у спиртовій, гідролізній та інших галузях промисловості. Типова БРУ складається з трьох основних структурних технологічних одиниць: бражної колони (БК), епіюраційної колони (ЕК) та ректифікаційної колони (РК). Крім цих основних компонентів, до складу БРУ входять допоміжне обладнання, таке як дефлегматори, конденсатори, підігрівачі бражки та холодильники спирту, а також внутрішні структурні елементи, що створюють складну взаємодію в процесі.

В основі функціонування БРУ лежать надзвичайно складні масообмінні, теплообмінні та гідродинамічні процеси, які відбуваються в кожній з колон. Сукупність цих процесів отримала назву "процеси брагоректифікації", що підкреслює їх інтегрований характер. Головна мета управління БРУ як складним об'єктом управління полягає у досягненні певних прийнятих показників, що відповідають заданому критерію управління, який, у свою чергу, відображає цільову функцію управління. Це може включати оптимізацію продуктивності, якості продукту та ефективності використання ресурсів.

Внутрішні властивості БРУ — її багатомірність, багатозв'язність та нестационарність — є основними причинами, що зумовлюють складність її управління. Ці характеристики разом призводять до задачі оптимізації високої розмірності, яку необхідно вирішувати в реальному масштабі часу, що робить традиційні, спрощені методи управління часто неадекватними. Сама природа об'єкта визначає притаманну складність його контролю.

Крім того, наявність численних глибоко взаємопов'язаних підсистем, значна мінливість властивостей сировини, що надходить, а також необхідність балансувати численні, часто суперечливі критерії оптимізації (наприклад,

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

максимізація продуктивності проти мінімізації енергоспоживання) ще більше ускладнюють завдання. Ця складна мережа факторів посилює труднощі досягнення оптимальної та стабільної роботи. Хоча для цілей управління процесу БРУ можуть бути апроксимовані як "псевдобінарна система" "етиловий спирт – вода" через низькі концентрації домішок, це спрощення, хоча й прагматичне для традиційних методів, обмежує точність та оптимальність системи управління, особливо в неідеальних умовах або при роботі з специфічними домішками. Такий вибір спрощеної моделі, зменшуючи обчислювальне навантаження, є компромісом, який безпосередньо впливає на обмеження та субоптимальну продуктивність класичних систем управління.

Проте, це бінарне припущення принципово не відображає справжньої складності багатоконпонентних процесів ректифікації, що відбуваються в колонах БРУ. Воно ігнорує складну та динамічну взаємодію всіх трьох полів — концентрації, температури та тиску — що призводить до субоптимального управління в реальних багатоконпонентних умовах.

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ БРАГОРЕКТИФІКАЦІЇ

1.1 Фундаментальні принципи дистиляції та ректифікації

Процес брагоректифікації є ключовою технологією в хімічній інженерії, спрямованою на ефективне виділення та очищення етилового спирту з ферментованої бражки. Цей складний промисловий процес досягається шляхом багаторазових циклів випаровування та конденсації, що відбуваються в спеціалізованих багатоколонних дистиляційних установках. Головна мета брагоректифікації полягає не лише у відділенні спирту, а й у досягненні високого ступеня його чистоти, що є критично важливим для широкого спектра галузей, включаючи харчову промисловість, виробництво напоїв, фармацевтику та хімічне виробництво.

Дистиляція є базовим термічним процесом розділення сумішей, зазвичай рідин, що ґрунтується на різниці в їхніх температурах кипіння. Процес починається з нагрівання вихідної суміші до температури кипіння, внаслідок чого утворюються пари, збагачені більш летючими компонентами. Ці пари потім охолоджуються в конденсаторі та збираються у вигляді рідини — дистиляту. Важливою перевагою дистиляції є відсутність необхідності додавання допоміжних речовин, таких як адсорбенти або розчинники, для здійснення розділення.

Існують різні типи дистиляції, кожен з яких адаптований до конкретних умов розділення:

- Проста дистиляція застосовується, коли температури кипіння компонентів суміші суттєво відрізняються (наприклад, більш ніж на 25°C). Цей метод зазвичай не вимагає використання внутрішніх структур колони, таких як тарілки або насадки.
- Фракційна дистиляція використовується для сумішей, де температури кипіння компонентів близькі. Для підвищення ефективності розділення цей метод вимагає застосування колон, оснащених тарілками або насадками, які збільшують площу контакту між парою та рідиною.

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Вакуумна дистиляція проводиться за зниженого тиску, що дозволяє знизити температуру кипіння речовин. Це робить її ідеальною для термічно чутливих сполук, які можуть розкладатися за вищих температур.

- Азеотропна та екстрактивна дистиляція спеціально розроблені для розділення азеотропних сумішей (сумішей з постійною температурою кипіння) шляхом додавання розчинників або третіх компонентів, що змінюють відносну летючість.

- Реактивна дистиляція поєднує хімічні реакції та процес дистиляції в одному апараті, дозволяючи одночасно здійснювати перетворення речовин та їх розділення.

Ректифікація є просунутим застосуванням дистиляції, спеціально розробленим для досягнення надзвичайно високих рівнів чистоти та/або великих обсягів виробництва цільової речовини. Вона передбачає багаторазові, безперервні стадії парорідинної рівноваги, що зазвичай відбуваються в протитечійному режимі всередині колони. Ключовим елементом ректифікації є флегма — повернення сконденсованої рідини до колони, що значно підвищує ефективність розділення. Основна відмінність ректифікації полягає в її акценті на повторюваних циклах випаровування та конденсації в колоні, що поступово збагачує бажаний компонент, забезпечуючи значно вищі рівні чистоти порівняно з простою дистиляцією.

Для обох процесів, дистиляції та ректифікації, конфігурація обладнання відіграє вирішальну роль. Зазвичай використовуються тарілчасті колони (з ситчастими, клапанними або ковпачковими тарілками) або насадкові колони (з випадковими або структурованими насадками, такими як кільця Рашига або Палля), які збільшують площу контакту між висхідною парою та низхідною рідиною. До важливих допоміжних компонентів належать кип'ятильник (розташований у нижній частині для випаровування рідини за допомогою зовнішнього тепла), конденсатор (у верхній частині для конденсації висхідної пари в рідину) та флегмова ємність (для зберігання сконденсованої рідини,

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

частина якої відправляється як продукт, а решта повертається як флегма для підвищення чистоти).

1.2 Аналіз брагоректифікаційної установки як керованого об'єкта

Брагоректифікаційна установка (БРУ) структурно складається з трьох ключових колон, спеціально спроектованих для багатостадійного розділення та очищення етилового спирту з бражки. Ця триколонна конфігурація, що включає бражну колону (БК), епюраційну колону (ЕК) та ректифікаційну колону (РК), була обрана як базова для розробки системи автоматизованого управління на основі сценарного підходу. Спрощена принципова технологічна схема (рисунок 1.1) візуально демонструє прямоточну БРУ непрямої дії, ілюструючи послідовний потік матеріалів та енергії між колонами.

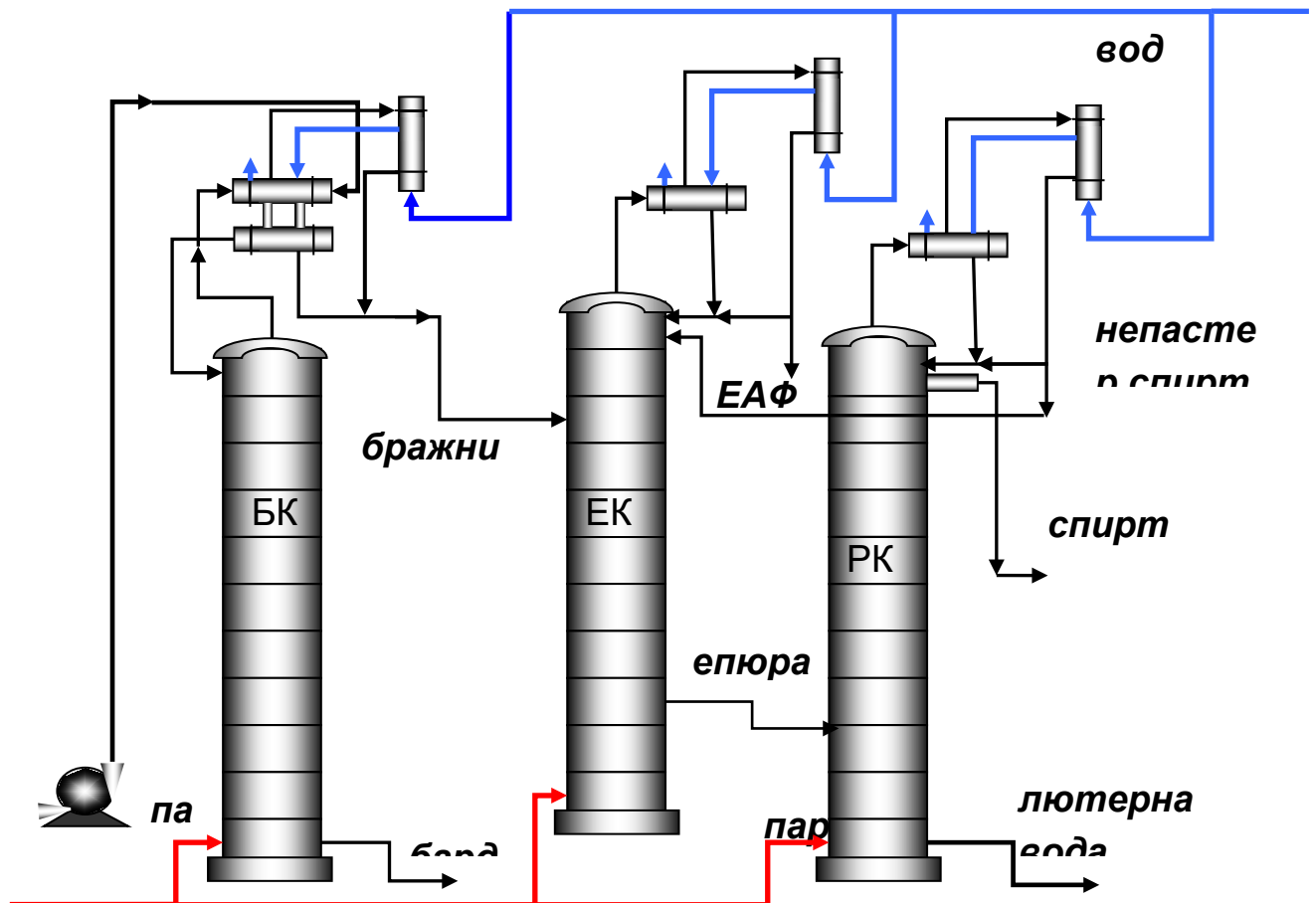


Рисунок 1.1 - Спрощена принципова технологічна схема триколонної прямоточної БРУ непрямої дії

Процес брагоректифікації починається в бражній колоні (БК). Бражка, попередньо нагріта до температури кипіння, подається на верхню тарілку колони. Пари, що піднімаються з бражної колони, віддають тепло бражці та частково конденсуються в підігрівачі. Частина пари, що не сконденсувалася, повністю конденсується в дефлегматорі-конденсаторі, який охолоджується водою. Основна функція цієї колони полягає у відгонці основної маси летючого спирту від менш летючих компонентів бражки.

Основним продуктом, отриманим після БК, є бражний дистилят. Вторинний продукт — барда — безперервно виводиться з нижньої (кубової) частини БК за допомогою бардорегулятора, який підтримує постійний рівень рідини в цій секції, забезпечуючи стабільність процесу. Важливим параметром є вміст спирту в барді, що виводиться, який не повинен перевищувати 0,03% об'ємних, що свідчить про високу ефективність вилучення спирту з відхідного потоку. БК працює з флегмовим числом, що дорівнює нулю. Це означає, що сконденсована рідина не повертається у верхню частину колони, що характерно для відгінних колон, призначених для масового розділення з мінімальними енергетичними витратами на внутрішню рециркуляцію.

Після БК, бражний дистилят, температура якого близька до температури кипіння, надходить на тарілку живлення ЕК, зазвичай на 20-ту тарілку. ЕК відіграє вирішальну роль у точному розділенні та концентрації основних летючих домішок, зокрема ефіро-альдегідної фракції (ЕАФ), яка накопичується у верхній частині колони. Одночасно в нижній частині колони виділяється епюрат — бражний дистилят, очищений від ЕАФ. Частина концентрованої ЕАФ виводиться як кінцевий побічний продукт, тоді як інша частина, разом з флегмою, що надходить з дефлегматора ЕК, повертається на верхню тарілку колони для підвищення ефективності розділення.

Основним продуктом ЕК є епюрат — бражний дистилят, значно очищений від ефіро-альдегідних домішок. Побічним продуктом є ефіро-альдегідна фракція (ЕАФ) — висококонцентрований потік легких домішок. ЕАФ може містити до 50% об'ємних етилового спирту, що вказує на її потенціал для подальшої

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

переробки або рекуперації. Вихід ЕАФ становить близько 0,5% від об'єму отриманого спирту-ректифікату, а сивушних масел — близько 0,3%. Епюраційна колона працює з дуже високим флегмовим числом, що коливається в межах 40-100. Таке винятково високе флегмове число свідчить про складність розділення слідових домішок, температури кипіння яких дуже близькі до етанолу або нижчі за нього, що вимагає значної внутрішньої рециркуляції для досягнення бажаної чистоти.

Епюрат, отриманий з ЕК, самопливом надходить на тарілку живлення РК, зазвичай на 16-ту тарілку, якщо рахувати знизу. Ця тарілка стратегічно ділить РК на дві основні секції: відгінну (нижню) та концентраційну (верхню). Основна функція РК полягає в остаточному очищенні для отримання високоякісного спирту-ректифікату. Флегма, збагачена етиловим спиртом, з дефлегматора РК подається на верхню тарілку колони для забезпечення максимальної чистоти. Частина нестандартного спирту, що конденсується в конденсаторі парів з РК, повертається в ЕК для повторної переробки, тоді як інша частина подається назад у РК, підкреслюючи внутрішню рециркуляцію для оптимальної чистоти.

Основним продуктом є спирт-ректифікат, високоочищений кінцевий продукт, який відбирається з верхніх тарілок (наприклад, 2-ї, 4-ї, 6-ї, рахуючи зверху). Побічним продуктом є сивушні масла (хвостові домішки), які виводяться як готовий продукт з нижньої (кубової) частини колони (наприклад, 7-ї, 9-ї, 11-ї тарілок, рахуючи знизу) після промивання в сивушному декантаторі. РК працює з флегмовим числом, що змінюється в межах 3,5-4,5. Це помірне флегмове число оптимізовано для досягнення кінцевої високої чистоти етанолу при ефективному відділенні важчих домішок. Втрати спирту в лютерній воді (барді) є неприпустимими, що вказує на суворі вимоги до максимального вилучення спирту та мінімізації відходів. Якість отриманого спирту-ректифікату повинна суворо відповідати вимогам ДСТУ 4221:2003.

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Параметри контролю і керування

Ціль керування БРУ як складним об'єктом керування (ОУ) полягає в досягненні деякого прийнятого показника заданого критерію керування, який відповідає деякій цільовій функції керування.

Важливим показником, що характеризує роботу кожної колони є флегмове число, яке визначається через співвідношення кількості флегми(зрошення колони) до кількості дистиляту.

Властивість багатозв'язності БРУ проявляється в складному взаємозв'язку управляючих параметрів та вихідних змінних стану. Підтримка необхідних режимів роботи БРУ потребує врахування узгодженості керування регульованими змінними, оскільки зміна однієї вхідної змінної в більшості випадків приводить до зміни всіх або декількох вихідних змінних. Така властивість відносить БРУ до класу багатозв'язних об'єктів керування.

Змінні, що однозначно визначають стан процесів, які проходять в брагоректифікаційних установках, діляться на вхідні (незалежні), які формують режими колон, і вихідні (залежні), які відображають стан об'єктів.

Залежні змінні (вихідні величини) діляться на три підгрупи:

Витрати бражного дистиляту , епюрату , барди , лютерної води , рівні барди , епюрату , лютерної води ;

Температура та тиск в контрольованих зонах колони;

Концентрація етилового спирту в паровій фазі та в рідинній фазі) на тарілках та готових і проміжних продуктах.

Змінні підгрупи (1) змінюються в кожній колоні в тих межах, що визначаються коливаннями матеріальних потоків на входах та виходах колон, за умови виконання матеріальних балансів. Змінні, які входять до (2) та (3) підгруп мають складний взаємозв'язок.

Концентрація етилового спирту в контрольних верхніх та нижніх частинах колон регламентується технологічними інструкціями ДСТУ 4221:2003.

Управляючі змінні в свою чергу діляться на дві підгрупи:

Незалежні (однозначно визначають стан ОУ): до таких змінних відносять

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

витрату пари на колони: бражну , епюраційну , ректифікаційну , відбір спирту з ректифікаційної колони , відбір ефіро - альдегідної фракції з епюраційної колони , відбір сивушних продуктів з ректифікаційної колони .

Залежні: витрата охолоджувальної води на конденсатори-дефлегматори колон: бражної , епюраційної , ректифікаційної ; відбір барди , відбір лютерної води .

Особливість управляючих змінних полягає в тому, що вони є залежними: зокрема, витрати охолоджувальної води пов'язані з витратами пари та умовами виконання теплових балансів; в свою чергу відбори М1, М2,, М3 визначаються умовами виконання матеріальних балансів, це обумовлене тим, що рівні , , змінюються в невеликих межах в зв'язку з конструктивними особливостями БРУ. В деяких випадках можуть використовуватись інші не вказані вище змінні, зокрема, при управлінні режимом бражної колони або спільно бражна з епюраційною в якості управляючої змінної використовується витрата бражки ; в свою чергу для керування роботою ректифікаційної колони використовується витрата епюрату . Необхідність розгляду нових підходів до синтезу керування процесом брагоректифікації обумовлюється ще й тим, що незалежні змінні можуть зазнавати впливу збурень, і через властивість багатозв'язності параметрів зміна однієї або декількох незалежних змінних приводить до зміни багатьох залежних величин.

В багатьох випадках враховуючи властивість багатозв'язності БРУ при синтезі системи керування основний акцент ставлять на непрямі показники, які однозначно пов'язані з відповідними якісними параметрами [2]. Наприклад, регулюючи температуру на контрольній тарілці можливо однозначно впливати на якісні показники етилового спирту.

Процес приготування спирту піддається дії контрольованих та неконтрольованих збурень зі сторони сировини, що надходить, енергоресурсів, температури в колонах і т. п. Це створює суттєві проблем при підтримці заданих режимів. Визначення джерела збурень часто займає значний відрізок часу та спряжено з аналізом виробничої ситуації.

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

До неконтрольованих збурень слід віднести:

втрати тепла в оточуюче середовище, що є практично майже незмінними і не перевищують 1 - 3%;

зміна ефективності тарілок, теплообмінників і т. п. може бути наслідком таких причин ("загоряння" ковпачків, забруднення трубок дефлегматорів, зміна теплопровідності стінок теплообмінників і т.д.).

До контрольованих збурень слід віднести:

витрата та концентрація живлення колон, що залежить від первинної сировини(меляси, зерна і т.д.);

термодинамічні параметри гріючої пари (тиск, ентальпія і т. п.);

температура охолоджувальної води має випадковий характер зміни, в більшості випадків залежить від пори року;

температура флегми, що подається на зрошення епюраційної та ректифікаційної колон, коливається незначно, тому що після дефлегматорів флегма не встигає охолоджуватись і подається на верхні тарілки колон при температурі, близькій до парової фази;

складна гідродинамічна обстановка в апараті має турбулентний характер поведінки, що зумовлено складною внутрішньою конструкцією колон.

Як показує практика, значна частина збурень є збуреннями процесу і змінюються незначно навіть на протязі великих проміжків часу і можуть прийматися незмінними, але таке припущення є важливим і не відповідає тим вимогам, які ставляться при розробці сучасних систем керування, оскільки ці змінні здійснюють суттєвий вплив на керування установкою. До таких змінних відносяться термодинамічні параметри пари, температура охолоджувальної води, температура флегми. З практичної точки зору суттєвий вплив на проходження процесів брагоректифікації має місце розташування тарілок живлення колонами, відбору спирту ректифікату та хвостових погонів з ректифікаційної колони. Як правило, місце розташування не змінюється, але конструктивно передбачається їх зміна в зв'язку з пуском установки та при налагодженні необхідного режиму розділення.

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Збурення по каналам витрати пари та охолоджувальної води мають суттєвий вплив на процеси брагоректифікації. Ці збурення мають випадковий характер зміни і, як показує практика, надходять з середньою частотою , та в середньому з амплітудою 25% своїх номінальних значень. При цьому термодинамічні параметри пари також мають випадковий характер і в середньому змінюються в таких межах:

при використанні “м’ятої” пари: тиск - Па), температура - ;

при використанні “гострої” пари: тиск - Па), температура - .

З експериментальної практичної точки зору, слід виділити та проаналізувати групу найбільш впливових збурень:

збурення по каналу витрати живлення на колони, суттєво впливає на режими роботи колон, тобто при зменшенні зменшується концентрація спирту у верхніх та нижніх продуктах ректифікації. При перевантаженні колон збільшується відсоток спирту в верхніх продуктах, але при цьому можуть з’явитись втрати спирту з бардою та лютерною водою, також при цьому змінюються поля температури та тиску в колонах. В такій ситуації стабілізувати режим роботи БРУ можна за рахунок зміни витрати пари на колони, або флегмового числа;

збурення по вмісту спирту в живленні колон суттєво впливають на зміну температури, тиску, складу рідинної та парової фази в колонах. Компенсувати таке збурення можна за рахунок зміни витрати пари на колони та, якщо розглядати режим роботи РК, змінювати витрату флегми. Певною “позитивною” особливістю є те, що збурення по вмісту спирту в живленні колон змінюється порівняно повільно;

збурення по температурі живлення колон, як і попередньо розглянуте, змінюється порівняно повільно, але все таки вносить суттєвий вплив на процеси брагоректифікації, тобто якщо живлення не нагріте до температури кипіння, то в зоні тарілки живлення збільшується конденсація парів, а в нижній частині колони рідинний потік;

Вказані зміни приводять до небажаних змін тиску в колоні та температури і

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в зв'язку з цим змін концентрації спирту та домішок в нижній частині колони. В такій ситуації необхідно змінювати витрату пари в колону, що суттєво погіршує економічні показники процесу брагоректифікації;

збурення по швидкості парів в колонах, як попередньо було сказано, має випадковий характер зміни. Суттєві зміни на швидкість парів вносяться режимами роботи дефлегматорів – конденсаторів, менш суттєві зміни вносять рівні рідини на тарілках, та опір тарілок, тому що вони змінюються порівняно повільно. Для тарільчатих колон [3, 7], процеси розділення покращуються з підвищенням швидкості парів, але існує певна допустима швидкість парів в колоні, перевищення якої приводить до небажаних результатів, а саме зменшення інтенсивності тепло-масообміну на тарілках. Така особливість зумовлюється явищем “захльобування” колони, при якому потік пари зменшує потік стікаючої рідини по тарілках, та збільшує бризковинесення з зони найбільш інтенсивнішого тепло-масообміну. Для виходу на нормальний режим роботи (усунення явища “захльобування” колони) необхідно зменшувати швидкість парів, тобто зменшувати тиск пари на вході в колони. В проблемних ситуаціях, які виникають при пуску та роботі БРУ, збурення в зв'язку з непередбачуваним падінням тиску пари можуть призвести до зупинки БРУ та внести дизбаланс в підтримку необхідних значень координат стану: так зване явище “провалу” колон. Таке збурення вноситься нестабільністю роботи котельної установки (особливо в тих випадках, коли котельна агрегат працює на декілька споживачів, що вже підтверджено практичним досвідом роботи на Узинському спиртзаводі).

Важливою особливістю БРУ є те що для даного об'єкта керування можуть бути застосовані методи, що дозволяють зменшити багатомірність ОУ.

Одним з методів зменшення багатомірності та багатозв'язності БРУ є метод технологічної декомпозиції, що вносить суттєво спрощення при розгляді БРУ як складного ОУ. Це дозволяє виділити суттєву особливість технологічної топології БРУ в цілях керування [15].

З аналізу технологічної топології БРУ як складного ОУ розглядувана БРУ є слабкозамкнутою хіміко-технологічною системою [2, 3, 4, 13]. Така особливість

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

БРУ зумовлена тим, що технологічний потік має тільки один зворотний технологічний зв'язок – зв'язок між ректифікаційною і еспораційною колонами по витраті нестандартного спирту. Аналіз проходження технологічного потоку показує що цей зв'язок дуже слабкий, витрата нестандартного спирту не перевищує 2 - 3% від основного технологічного потоку.

Виходячи з вищесказаного, БРУ можна віднести до класу розімкнених хіміко-технологічних систем і розглядати як ланцюжок колон, послідовно з'єднаних одна з одною по технологічному потоку. По паровому потоку між колонами немає зв'язку, оскільки технологічний потік між колонами БРУ знаходиться в рідкому стані [3, 4]. Така особливість суттєво зменшує вплив наступних колон на режими попередніх.

Виходячи з вказаних особливостей, кожну колону (із своїм дефлегматором і конденсатором) можна розглядати як окремий ОУ [1, 2], а з точки зору системного аналізу БРУ являє собою сукупність послідовно з'єднаних підсистем [13].

Робота окремих підсистем БРУ підпорядковується інтересам всієї технологічної системи. Названа особливість враховується в постановці задачі розробки системи автоматизованого керування (САУ) БРУ. Проте наявність змінних параметрів ускладнює задачу оптимізації роботи ОУ, збільшуючи її розмірність через появу великої групи змінних параметрів, що характеризують режим проведення кожної технологічної операції, а також у зв'язку з появою додаткових умов, що накладаються технологією на ці величини та зв'язки між ними.

Відносно велика автономність окремих підсистем БРУ по основному технологічному потоку забезпечується за рахунок наявності проміжного технологічного обладнання, але схеми водопостачання та енергопостачання єдині для всього технологічного процесу, що викликає необхідність координації керування окремими підсистемами БРУ.

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до розділу

Процес брагоректифікації є вершиною хімічної інженерії, що втілює складну багатостадійну систему, призначену для високоточного розділення та очищення етилового спирту. Аналіз технологічної схеми, що включає бражну, епюраційну та ректифікаційну колони, виявив ретельно оптимізовану каскадну стратегію. Кожна колона виконує специфічну функцію, використовуючи адаптовані операційні параметри, такі як флегмові числа, для ефективного видалення різних типів домішок (легких та важких) та максимізації виходу цільового продукту. Відсутність втрат спирту в барді та відповідність ДСТУ 4221:2003 для кінцевого продукту підкреслюють строгі вимоги до ефективності та якості.

Природа брагоректифікаційної установки як складної фізико-хімічної системи, що характеризується багатофазними потоками, безперервним переносом енергії та маси, а також впливом геометричних факторів, вимагає передових підходів до її вивчення та управління. Властивий системі детерміновано-стохастичний характер, що виникає внаслідок випадкових взаємодій компонентів та гідродинамічних особливостей, робить класичні детерміновані моделі недостатніми. Це зумовлює необхідність зміни парадигми на системний аналіз та теорію самоорганізації, що дозволяє враховувати невизначеності та емерджентні властивості.

Математичне моделювання виступає як незамінний інструмент для розуміння, оптимізації та управління БРУ. Застосування багаторівневої ієрархічної структури моделювання, що охоплює рівні від молекулярних взаємодій до економічних критеріїв, є стратегічно важливим. Цей підхід дозволяє інтегрувати фундаментальні наукові принципи з промисловими цілями, забезпечуючи всебічне розуміння процесу. Комп'ютерні експерименти, зокрема з використанням середовища MATLAB, є ключовими для розробки, калібрування та валідації цих моделей, забезпечуючи основу для розробки адаптивних та надійних систем автоматизованого управління.

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

2 АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БРАГОРЕКТИФІКАЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ

2.1 Сучасні парадигми автоматизації БРУ

Типова схема автоматизації триколонних БРУ, як правило, ґрунтується на управлінні за непрямыми показниками, такими як температура, тиск та витрати основних потоків (рисунок 2.1).

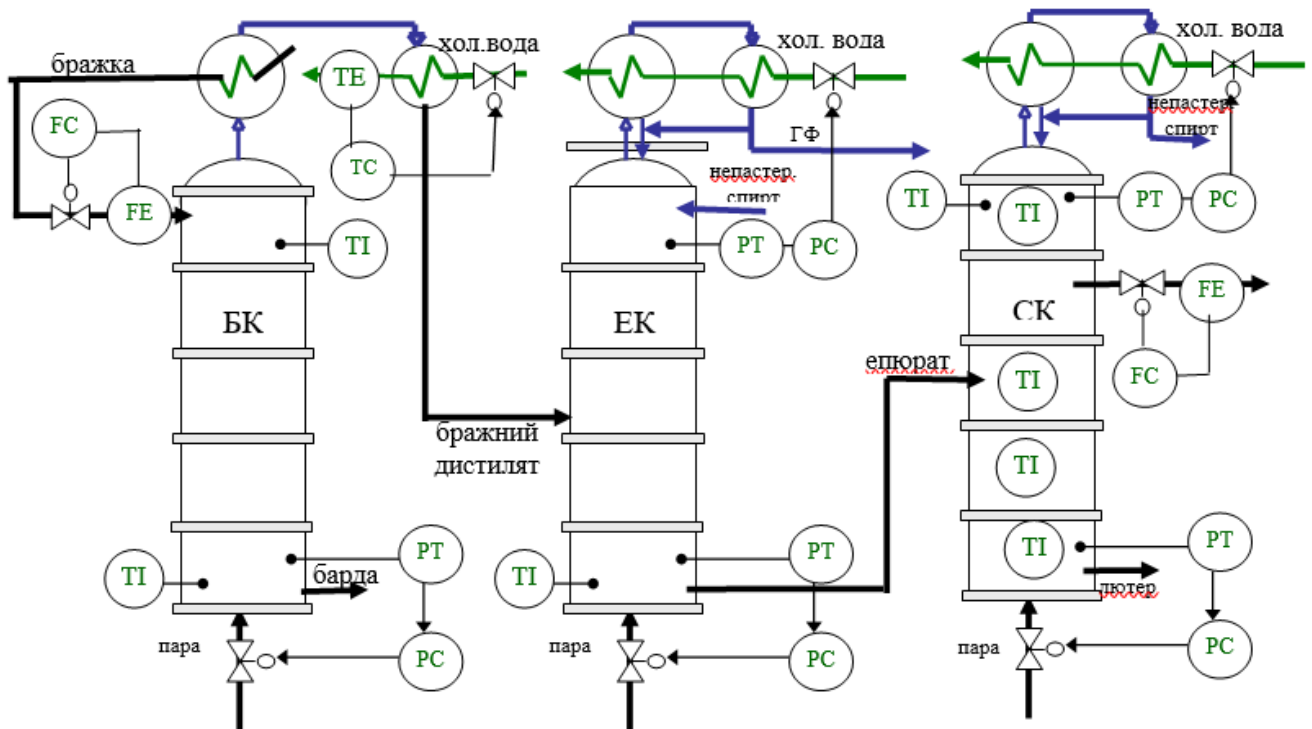


Рисунок 2.1 – Типова схема автоматизації БРУ

Основне завдання цих систем полягає у стабілізації головних технологічних величин на рівні, визначеному конструктивними особливостями колон БРУ. Досвід показує, що такі системи досить надійно виконують поставлені завдання за умови стабільної якості бражки, забезпечуючи стабільний гідродинамічний режим, задану міцність спирту, стабільність основного потоку, необхідні теплові режими дефлегматорів та конденсаторів, а також аварійний захист.

Проте, суттєвим недоліком є практично повна відсутність реакції контурів управління на зміну якісних показників бражки, оскільки вимірювальні величини нечутливі до такого типу збурень. Це створює "прогалину спостережуваності" в системі контролю, оскільки критична інформація про концентрацію домішок залишається недоступною для автоматики. Наприклад, при зміні продуктивності або інших збуреннях у живленні колон, змінюються концентрації домішок по тарілках. У цих умовах необхідно змінювати витрату або тарілку відбору продуктів, таких як сивушний спирт, масло, пастеризований спирт або головна фракція.

В діючих системах це рішення приймає оператор на основі свого досвіду та кваліфікації, аналізуючи продукти колон та показники ліхтарів на погонах. Однак, оператору важко визначити необхідну кількість відбору продуктів, оскільки він не знає їх точної концентрації за ключовими домішками. Це призводить до надмірних відборів, тобто до надмірних втрат спирту з сивушною або головною фракцією, або, навпаки, до недостатніх відборів, що загрожує переміщенню домішок по колоні та їх потраплянню у ректифікований спирт. Таким чином, оператор стає своєрідним "ручним контуром зворотного зв'язку" для контролю якості, що вносить суб'єктивність, ризик помилок та обмежує можливості оптимізації.

Незважаючи на впровадження промислових мікропроцесорних контролерів та SCADA-систем, які значно спрощують розробку алгоритмічної бази та збільшують функціональний потенціал системи, обчислювальні ресурси цих засобів використовуються далеко не повністю. Це пояснюється тим, що алгоритмічно системи мало відрізняються від реалізованих раніше. Така ситуація є серйозним бар'єром на шляху до трансформації у відповідності до концепції Індустрії 4.0. Сучасне апаратне забезпечення, що пропонує зручний людино-машинний інтерфейс, високу інформативність, масштабованість та можливість оперативного корегування програмного забезпечення, не може розкрити свій потенціал, оскільки "інтелект" системи залишається на примітивному рівні. Це

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

перешкоджає досягненню вищих рівнів автоматизації, прогностичного контролю та загальної інтеграції.

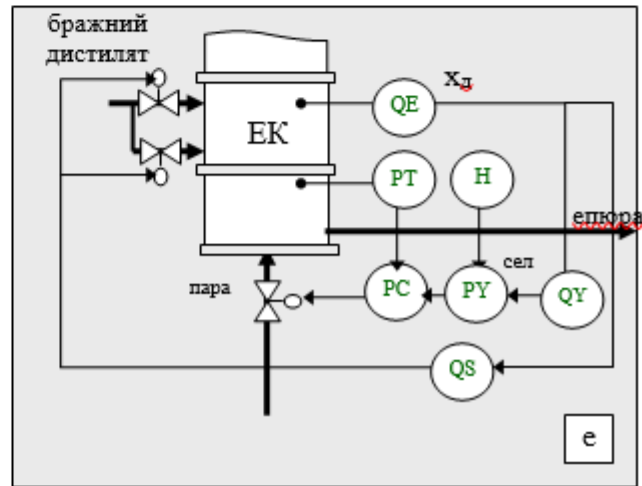
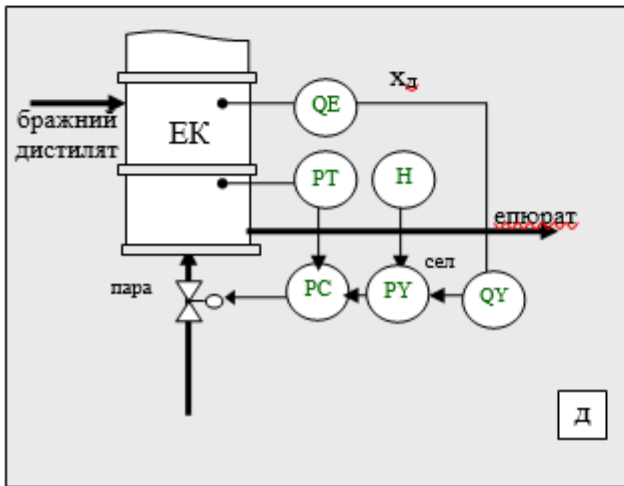
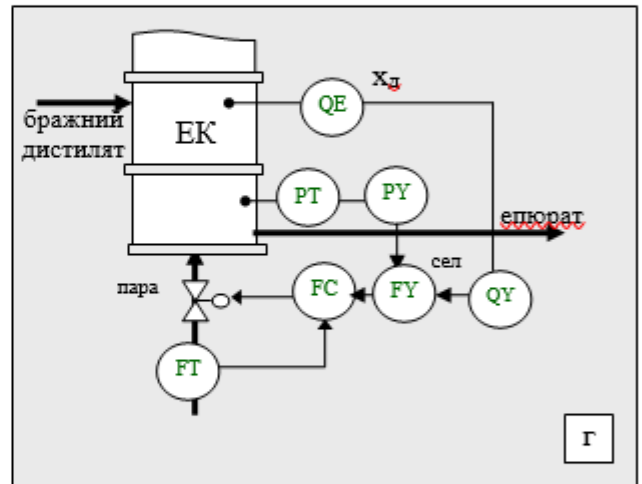
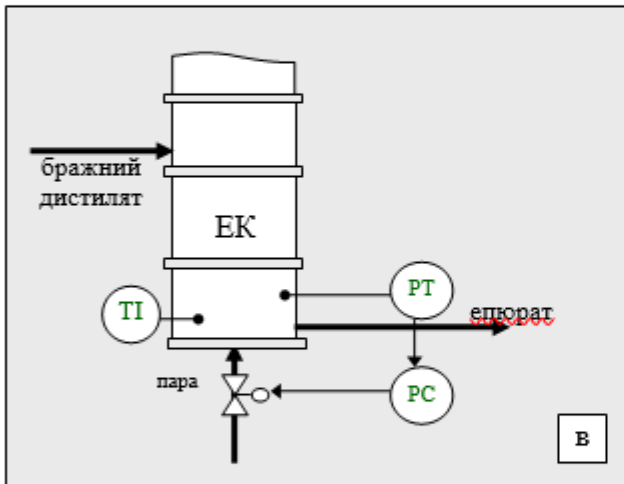
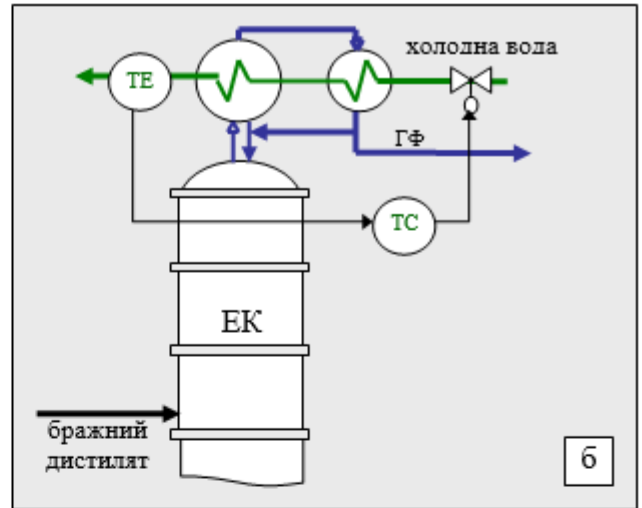
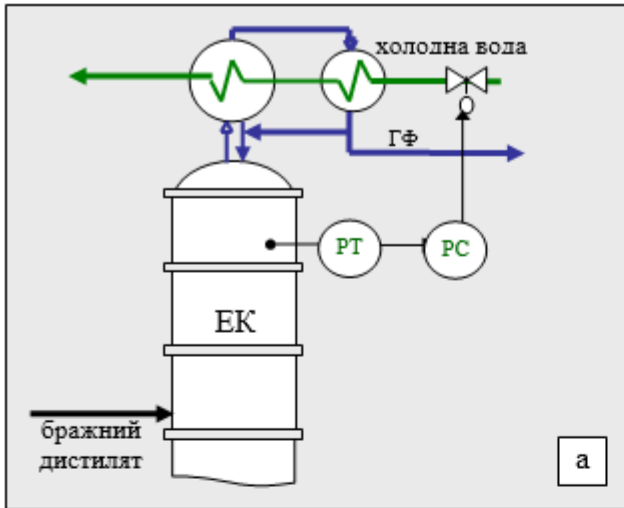
Для кращого розуміння відмінностей між традиційними та бажаними сучасними підходами до автоматизації БРУ, наведено порівняльну таблицю.

Таблиця 2.1 - Порівняння традиційних та пропонованих сучасних підходів до управління БРУ

ХАРАКТЕРИСТИКА/ПАРАМЕТР	ТРАДИЦІЙНІ АСУ БРУ	ПРОПОНОВАНІ СУЧАСНІ АСУ БРУ
Філософія контролю	Непрямий (температура, тиск, витрата)	Матеріальний баланс / Прямий контроль якості
Основні вимірювані змінні	Температура, тиск, витрата потоків	Концентрації домішок (модельовані/виміряні)
Реакція на зміну якості бражки	Низька (потребує ручного втручання)	Висока (автоматична корекція)
Залучення оператора до контролю якості	Високе (ручне коригування/компенсація)	Низьке (наглядний контроль/моніторинг)
Складність/Вік алгоритмів	Прості / Розроблені у 1950-70-х роках	Складні / Модельно-орієнтовані
Фокус оптимізації	Гідродинамічна стабільність / Стабілізація параметрів	Оптимізація якості / Мінімізація втрат

2.2 Еволюція алгоритмів управління БРУ

Основні алгоритми управління БРУ були розроблені в 1950-х – 1970-х роках. Серед усіх джерел, присвячених автоматизованим системам управління брагоректифікаційними установками непрямої дії, особливо виділяється монографія М.Л. Мандельштейна, в якій найбільш повно розглянуті методи та алгоритми управління БРУ. Автор виділяє 7 типів систем управління БРУ та пропонує деякі модифікації до них. Практично всі ці системи базуються на непрямих вимірювальних показниках (температура та тиск) і забезпечують задовільну їх стабілізацію відповідно до завдання. Деякі з них забезпечують поздовжню стабілізацію з голови (при зміні завдання на витрату бражки) або з хвоста (при зміні завдання на витрату спирту), що дозволяє автоматично перевести установку на нову продуктивність.



а, б – управління витратою холодної води; в – управління тиском в низу колони; г, д – управління концентрацією ключової домішки з використанням автоматичних хроматографів; е – управління місцем вводу живлення в ЕК

Рисунок 2.2 - Фрагменти схем автоматизації ЕК

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Додатково до них на деяких спиртових заводах впроваджено декілька контурів управління, наприклад, контур стабілізації витрати води на гідроселекцію, контур управління міцністю епюратору витратою води на гідроселекцію, контур управління тиском у верхній частині колони з корекцією по співвідношенню витрат головної фракції та ректифікованого спирту, а також контур управління витратою головної фракції при безпосередньому зрошенні нею колони.

Метою оптимізації роботи епюраційної колони є досягнення високої якості епюратору при мінімальних витратах пари та втратах етанолу. Це безпосередньо пов'язує ефективність системи управління з операційною ефективністю та прибутковістю. Неефективне видалення домішок призводить або до зниження якості продукту, або до надмірного споживання енергії та втрат спирту. Отже, інновації в управлінні епюраційною колоною обіцяють високу рентабельність інвестицій.

2.3 Технологічні можливості та практичні аспекти модернізації

Перехід до промислових мікропроцесорних контролерів та автоматизованих робочих місць оператора на базі ПЕОМ зі SCADA-програмами створив реальні умови для використання складніших алгоритмів управління та оперативної їх зміни. Сучасні АСУТП БРУ характеризуються зручним людино-машинним інтерфейсом, високою інформативністю, масштабованістю та можливістю оперативного корегування алгоритмічного та програмного забезпечення. Однак, як вже зазначалося, обчислювальні ресурси цих засобів використовуються далеко не повністю, оскільки алгоритмічно системи мало відрізняються від реалізованих раніше.

Використання автоматичних хроматографів, має потенціал для прямого вимірювання якості, що могло б значно покращити управління. Однак, серед суттєвих недоліків цих пристроїв відзначаються їхня складність, невисока надійність, висока вартість та необхідність постійного висококваліфікованого обслуговування. Крім того, такі схеми не повністю вирішують проблему кількості

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відбору головної фракції: при недостатній витраті ключова домішка потрапить в епюратор, а при значних відборах – збільшаться втрати спирту. Також, при зміні якості сировини, ключовою домішкою може стати інший компонент, що призведе до недостатньої витрати пари для очищення епюрату.

Натомість, для збільшення інформаційної потужності системи управління БРУ все частіше встановлюють додаткові вимірювальні перетворювачі витрат, температур, тисків, спиртомірів. Для вимірювання складу домішок у продуктах та напівпродуктах дедалі частіше використовують лабораторні хроматографи та мас-спектрометри. Отримана інформація дозволяє досвідченому оператору вірно та своєчасно реагувати на збурення, які не передбачені автоматикою, але вимагають прийняття оперативних рішень. Крім того, це створює відповідні умови для модернізації системи.

Запропонований шлях модернізації, що полягає в інтеграції підсистеми корекції в існуючі, вже надійні класичні системи управління, є прагматичним інженерним рішенням. Він дозволяє уникнути дорогої та руйнівної повної перебудови, використовуючи "робастність та стабільність" поточних систем, додаючи при цьому інтелект там, де він найбільше потрібен. Такий стратегічний підхід до впровадження технологій, що надає пріоритет поетапним, високоефективним покращенням над радикальними, високоризикованими змінами, є критично важливим для промислових умов.

Очікувані економічні та операційні переваги такої модернізації включають:

- Забезпечення стабільно високої якості епюрату, що є основною вимогою до роботи епюраційної колони.
- Мінімізація втрат етанолу з головною фракцією та сивушною фракцією, що є прямим економічним ефектом.
- Зменшення надмірних відборів, що призводять до втрат спирту.
- Оптимізація витрат пари, що знижує енергоспоживання.

Незважаючи на акцент на автоматизації, роль оператора вдосконаленої системи еволюціонує від реактивного ручного коригування до наглядового моніторингу та інтерпретації даних. Зручний людино-машинний інтерфейс та

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

висока інформативність сучасних АСУ є вирішальними для цього переходу. Здатність системи надавати інформацію, яка дозволяє досвідченому оператору "вірно та своєчасно реагувати на збурення" , підкреслює, що навіть передова автоматизація вимагає інтелектуального людського нагляду та прийняття рішень, особливо для непередбачених подій.

Висновки до розділу

Проведений аналіз показує, що сучасні автоматизовані системи управління технологічними процесами БРУ, незважаючи на використання передових технічних засобів, все ще базуються на управлінні за непрямими показниками. Це робить їх недостатньо чутливими до змін якісного складу бражки та продуктів розділення, оскільки концентрація домішок є надзвичайно малою. Такий підхід призводить до необхідності ручного втручання оператора, потенційних втрат спирту та зниження якості кінцевого продукту.

Історичний огляд показав, що основні алгоритми управління були розроблені десятиліття тому, а значні теоретичні розробки, такі як оптимальні системи управління, залишаються невикористаними у виробництві. Епюраційна колона, яка є критично важливою для якості ректифікованого спирту, залишається найменш дослідженим об'єктом управління, страждаючи від дефіциту управляючих дій та недостатнього вивчення динамічних характеристик домішок.

Майбутнє автоматизації БРУ полягає у фундаментальній зміні парадигми: перехід до систем управління, побудованих на основі цільової функції, що базується на матеріальних балансах по потокам. Це вимагає формування управляючої дії з урахуванням витрат та концентрацій всіх компонентів у вхідних та вихідних потоках, особливо для епюраційної колони. Оскільки пряме та безперервне вимірювання низьких концентрацій домішок є складним та дорогим, найбільш ефективним та прагматичним підходом є інтеграція математичного моделювання для прогнозування поведінки домішок між лабораторними аналізами.

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, запропонована модернізація шляхом включення підсистеми корекції в існуючі, вже надійні системи автоматизації, є оптимальним рішенням з економічної точки зору. Ці вдосконалення призведуть до стабільно високої якості ректифікованого спирту, значного скорочення втрат етанолу, оптимізації споживання пари та загального підвищення операційної ефективності та стабільності процесу.

У перспективі, ці фундаментальні зміни закладають основу для подальшої інтеграції з передовою аналітикою, машинним навчанням та штучним інтелектом для прогностичного обслуговування та ще більш складних оптимізаційних рішень. Впровадження таких передових стратегій управління надасть виробникам спирту значні економічні та конкурентні переваги на ринку.

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ БРАГОРЕКТИФІКАЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ

3.1 Вибір програмованого логічного контролера (ПЛК) та середовища програмування

Програмований логічний контролер (ПЛК) Schneider Electric Modicon M262 був обраний як центральний блок керування для автоматизації відділення ректифікації. Цей вибір був зумовлений численними перевагами M262, зокрема його високою продуктивністю, гнучкістю та, що дуже важливо, підтримкою протоколу передачі даних OPC UA. Акцент на підтримці OPC UA як ключовому критерію вибору ПЛК підкреслює стратегічну важливість відкритих, безпечних та масштабованих протоколів зв'язку в сучасних промислових архітектурах. Це рішення полегшує безперешкодну інтеграцію між інформаційними технологіями (IT) та операційними технологіями (OT). Пріоритет OPC UA вказує на далекоглядну філософію проектування, що передбачає не лише локальне керування, а й безперешкодний, безпечний обмін даними з системами вищого рівня, такими як SCADA, MES або ERP, а також з хмарними аналітичними платформами. Такий вибір позиціонує систему для майбутнього розширення та прийняття рішень на основі даних, що демонструє прихильність принципам Індустрії 4.0, а не закритим, ізольованим рішенням. Програмування та конфігурація Modicon M262 виконувалися в середовищі Machine Expert (рисунок 3.1).

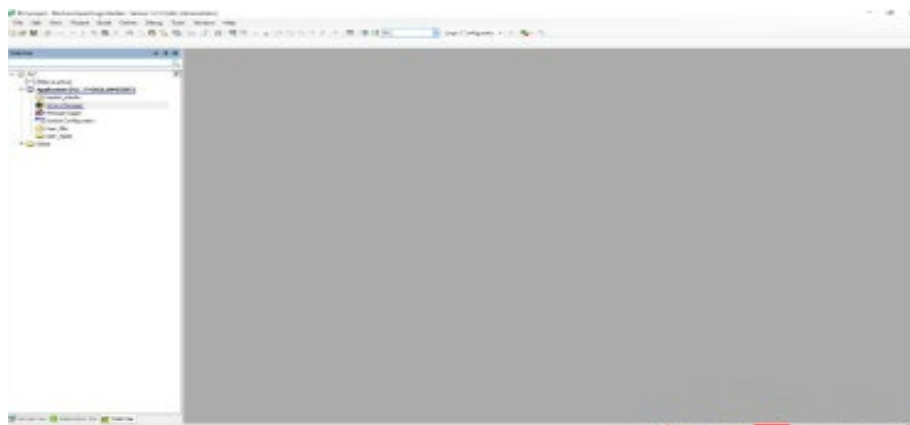


Рисунок 3.1 – Початковий екран Machine Expert

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Для розширення функціональних можливостей системи та підвищення зручності використання були інтегровані дві важливі бібліотеки: SE_Toolbox та oscatbasic (рисунки 3.2, 3.3).

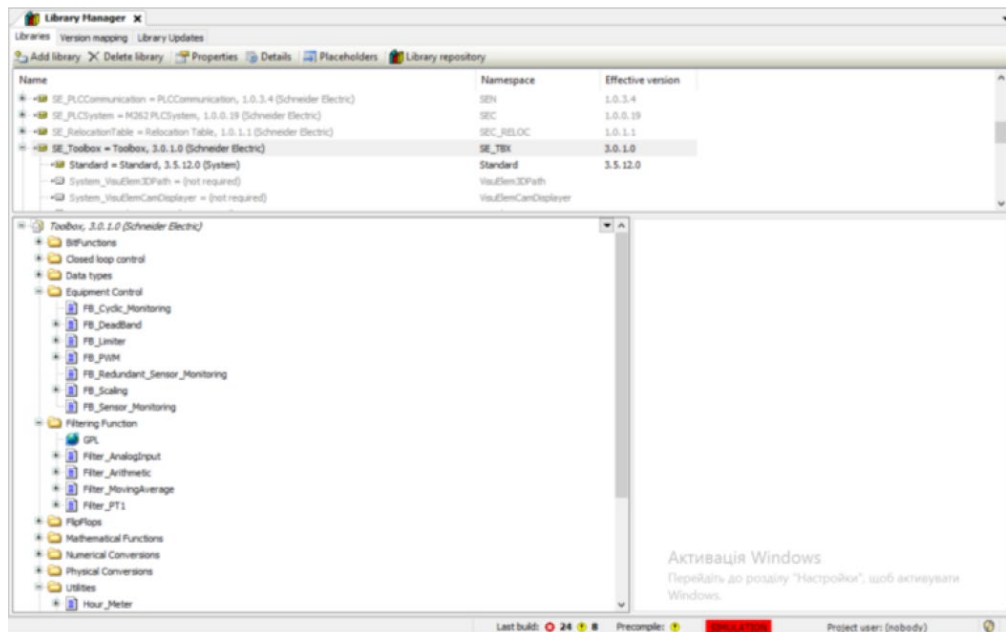


Рисунок 3.2 – Бібліотека функцій SE_Toolbox

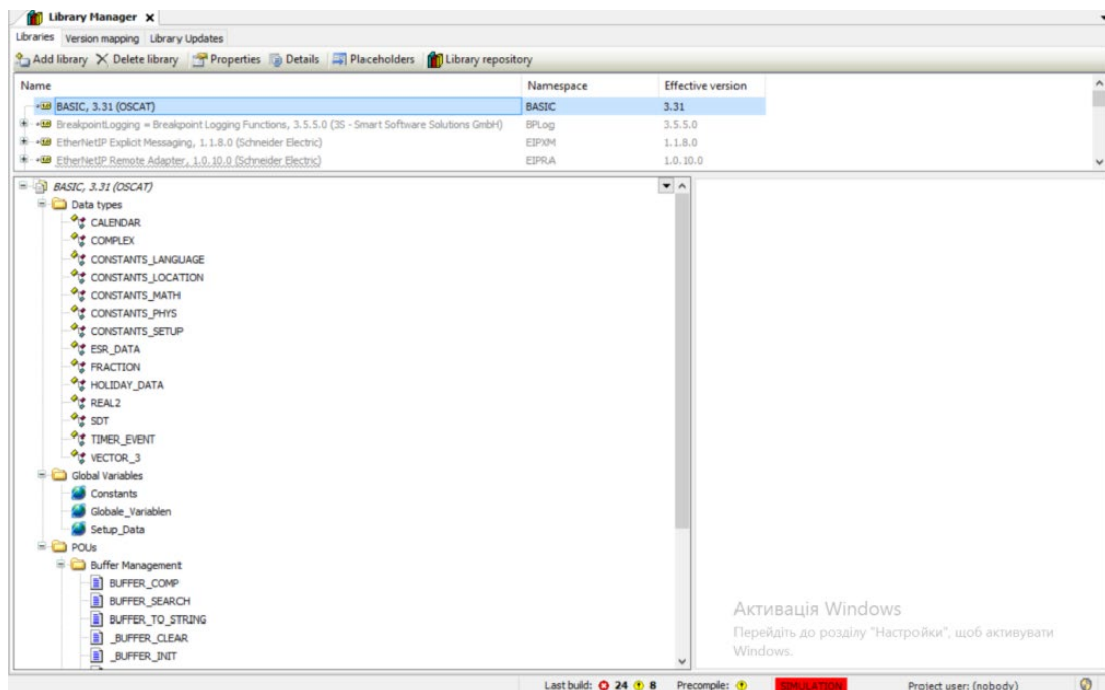


Рисунок 3.3 – Перелік функцій бібліотеки oscatbasic

Ці бібліотеки значно розширюють можливості автоматизації, додаючи нові функції та блоки, що підвищують ефективність і точність керування. Завдяки готовим рішенням, вони спрощують процес розробки, дозволяючи інженерам зосередитися на специфічних завданнях проекту та значно заощадити час і ресурси.

3.2 Платформа SCADA-системи

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) системи є централізованими платформами для моніторингу та керування різноманітними процесами на промислових та інфраструктурних об'єктах. Вони надають графічний інтерфейс, який дозволяє операторам взаємодіяти з системою, отримувати дані в реальному часі та приймати обґрунтовані рішення. Ключові функціональні можливості SCADA-системи включають: візуалізацію виробничих параметрів, збір, зберігання та обробку великих обсягів даних для аналізу та вдосконалення процесів, віддалене керування обладнанням, безперервний моніторинг параметрів, генерацію звітів для виявлення тенденцій, налаштування тривоги для швидкого реагування, а також інтеграцію з іншими системами автоматизації та планування ресурсів підприємства (ERP) для комплексного управління виробництвом. SCADA-система відіграє ключову роль у підвищенні ефективності, безпеки та контролю виробничих процесів, зрештою оптимізуючи виробництво, знижуючи витрати та підвищуючи якість продукції.

Для компонентів людино-машинного інтерфейсу (HMI) та SCADA-системи автоматизації брагоректифікаційної установки було обрано Siemens TIA Portal (рисунок 3.4).

Цей інтегрований програмний комплекс надає широкий спектр інструментів та функцій, що значно спрощують та покращують процес автоматизації. Переваги TIA Portal численні: він пропонує інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для програмування ПЛК Siemens та проектування HMI, підтримує комплексні функціональні можливості SCADA-систем, полегшує інтеграцію за допомогою стандартних протоколів (таких як OPC UA), надає надійні інструменти для збору

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та аналізу даних, включає утиліти для управління проектами та функції контролю доступу та безпеки. Його інтегроване середовище розробки, зручність використання, масштабованість на всьому спектрі обладнання Siemens та здатність скорочувати час розробки ще більше підтверджують його вибір.

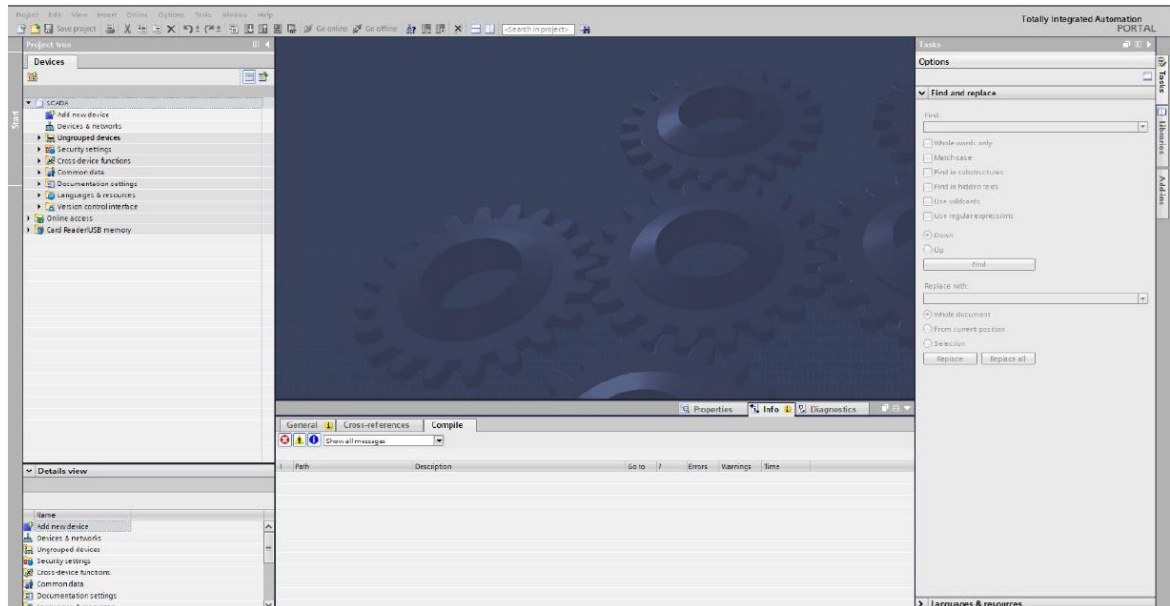


Рисунок 3.4 – Початковий екран TIA Portal

Вибір TIA Portal для SCADA, незважаючи на використання ПЛК від Schneider Electric, демонструє прагматичний підхід до проектування системи, що базується на принципі "краще з кращих". Такий підхід віддає перевагу сильним сторонам конкретної платформи (можливостям HMI/SCADA TIA Portal) над прив'язкою до одного постачальника, покладаючись при цьому на відкриті стандарти (OPC UA) для забезпечення взаємодії. У промисловій автоматизації компанії часто віддають перевагу єдиному постачальнику для ПЛК та SCADA через передбачувану легкість інтеграції та підтримки. Однак, рішення використовувати різних постачальників свідчить про те, що конкретні можливості HMI та SCADA TIA Portal були визнані більш доскональними або придатними для вимог проекту щодо візуалізації, управління даними та операційного інтерфейсу. Ця стратегія "краще з кращих" вказує на зосередженість на оптимізації кожного рівня автоматизації за допомогою найбільш ефективних доступних інструментів,

						БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
							34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

а не на обмеженнях екосистеми одного постачальника. Можливість такої конфігурації критично залежить від надійних, відкритих стандартів зв'язку, таких як OPC UA, що було ключовим фактором при виборі ПЛК.

3.3 Ключові протоколи зв'язку

У архітектурі системи використовуються два основні протоколи зв'язку, кожен з яких виконує свою унікальну роль:

- OPC UA: Цей протокол є фундаментальним для архітектури системи, забезпечуючи високошвидкісну, безпечну та масштабовану передачу даних між контролером Schneider Electric Modicon M262 (налаштованим як OPC UA сервер) та SCADA-системою Siemens TIA Portal (що діє як OPC UA клієнт). Його роль є критичною для безперешкодної вертикальної інтеграції.

- Modbus: Використовується для горизонтального зв'язку між ПЛК та частотним перетворювачем ATV320. Цей протокол полегшує керування робочою частотою та дозволяє контролювати стан перетворювача, фактичну частоту та будь-які помилки.

Подвійне використання OPC UA та Modbus є прикладом поширеної, оптимізованої промислової комунікаційної архітектури. OPC UA використовується для вертикальної інтеграції (від ПЛК до SCADA/підприємства) завдяки його сучасним функціям, таким як безпека, моделювання даних та масштабованість. Modbus, у свою чергу, застосовується для горизонтальної інтеграції (від ПЛК до польових пристроїв) завдяки його простоті, поширеності та продуктивності в реальному часі для керування на рівні пристроїв. Це багатосаровий підхід до комунікації оптимізує її для різних цілей, балансуючи сумісність з застарілими системами та стійкість до майбутніх змін. Це демонструє розуміння оптимізації мережевої архітектури, де OPC UA забезпечує необхідну безпеку, масштабованість та насиченість даними для критичного зв'язку між рівнями керування та нагляду, а Modbus забезпечує надійний, швидкий та простий зв'язок для прямого керування пристроями на польовому рівні, де складність є зайвою, а швидкість має першорядне значення.

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Таблиця 3.2 - Огляд основних компонентів та технологій

КОМПОНЕНТ / ТЕХНОЛОГІЯ	ТИП	ПОСТАЧАЛЬНИК	ОСНОВНА РОЛЬ У СИСТЕМІ	КЛЮЧОВІ ПЕРЕВАГИ / ПРИЧИНА ВИБОРУ
Modicon M262	Апаратне забезпечення (ПЛК)	Schneider Electric	Центральний блок керування процесом ректифікації	Висока продуктивність, гнучкість, вбудовані функції кібербезпеки, підтримка OPC UA.
Machine Expert	Програмне забезпечення (Середовище розробки)	Schneider Electric	Середовище програмування та конфігурації ПЛК Modicon M262	Зручність програмування, інтеграція бібліотек (SE_Toolbox, oscatbasic), розширення функціональності.
SE_Toolbox, oscatbasic	Програмне забезпечення (Бібліотеки)	Schneider Electric (SE_Toolbox), Open Source (oscatbasic)	Розширення функціональних можливостей системи автоматизації	Додавання нових функцій та блоків, підвищення ефективності та точності керування, економія часу розробки.
TIA Portal	Програмне забезпечення (SCADA/HMI)	Siemens	Платформа для людино-машинного інтерфейсу та SCADA-системи	Інтуїтивний інтерфейс, комплексні функції SCADA, підтримка OPC UA, інструменти для аналізу даних, масштабованість.
OPC UA	Протокол зв'язку	OPC Foundation	Вертикальна інтеграція (ПЛК-SCADA)	Висока швидкість, безпека, масштабованість, стандартизований обмін даними між різними постачальниками.
Modbus	Протокол зв'язку	Modicon (Schneider Electric)	Горизонтальна інтеграція (ПЛК-частотний перетворювач)	Простота, поширеність, ефективність для прямого керування польовими пристроями.
ATV320	Апаратне забезпечення (Частотний перетворювач)	Schneider Electric	Керування робочою частотою виконавчих механізмів	Точне керування швидкістю двигунів, оптимізація енергоспоживання.

3.4 Розробка проекту в Machine Expert

Процес починається з обробки вхідного сигналу від датчика, який працює в стандартному діапазоні 4...20 мА і призначений для візуального відображення рівня підсиленої води. Для ефективної та точної маніпуляції сигналом була створена спеціальна структура даних під назвою Struct Aplisens (рисунок 3.5).

```
1  TYPE Struct_Aplisens :
2  STRUCT
3      sens_min: INT;           // масштаб шкали від сенсора мінімум
4      sens_max: INT;           // масштаб шкали від сенсора максимум
5      FN: INT;                 // кількість точок для фільтрування
6      FTime: TIME;            // час для фільтрування
7      den: REAL;              // густина речовини
8      scal_min: REAL;         // масштаб шкали сенсора мінімум
9      scal_max: REAL;         // масштаб шкали сенсора максимум
10     MinLimitPers: REAL;      //рівень при якому буде 0%
11     MaxLimitPers: REAL;      //рівень при якому буде 100%
12     //out_m: REAL;           //рівень у метрах
13     //out_pers: REAL;        //рівень у відсотках
14     L_active: BOOL;          //активувати аварію по нижній межі
15     H_active: BOOL;          //активувати аварію по верхній межі
16     L_limit: REAL;           // нижня аварійна межа
17     H_limit: REAL;           // верхня аварійна межа
18     Hyst: REAL;              // гістерезис
19     Delay: TIME;             //часова затримка для аварій
20     L_alarm: BOOL;           //аварія по нижній межі
21     H_alarm: BOOL;           //аварія по верхній межі
22 END_STRUCT
23 END_TYPE
24
```

Рисунок 3.5 – Структура даних Struct Aplisens

Ця структура призначена для обробки різних параметрів сигналу, включаючи мінімальні та максимальні значення датчика, щільність фільтрації, час фільтрації, густину рідини, межі масштабування (мінімальні та максимальні), аварійні межі (нижні та верхні), гістерезис та затримку.

Усі критичні змінні оголошуються в Pvars, яка є енергонезалежною пам'яттю контролера (рисунок 3.6). Це гарантує, що останні відомі значення цих змінних зберігаються навіть у разі зникнення живлення, забезпечуючи цілісність стану системи.

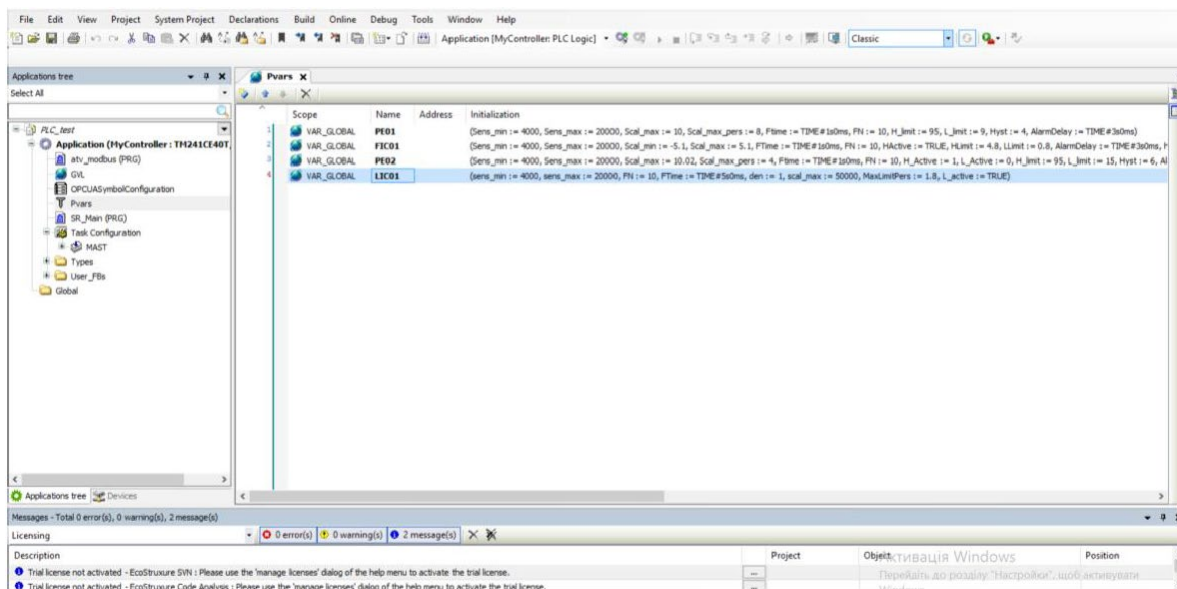


Рисунок 3.6 - Енергонезалежна пам'ять(Pvars)

Перед масштабуванням необроблений вхідний сигнал `iiModule_IWO`, який спочатку має цілочисельний тип, перетворюється на тип `REAL` (з плаваючою комою) за допомогою блоку `TO_REAL`. Це перетворення є критично важливим для точних математичних операцій під час масштабування.

Масштабування сигналу виконується за допомогою функціонального блоку `FB_Scaling`, взятого з бібліотеки `SE_Toolbox` (рисунок 3.7).

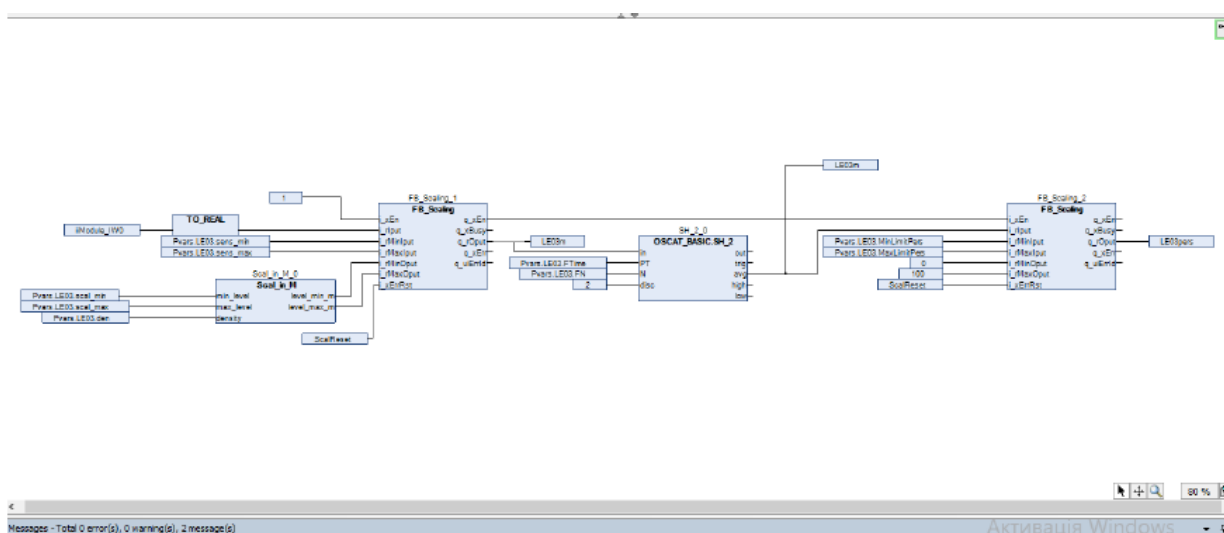


Рисунок 3.7 – Обробка вхідного сигналу

Цей блок застосовується двічі: спочатку для перетворення показань тиску (у Паскалях) на рівень, що відображається в метрах, з межами, які можуть бути безпосередньо присвоєні змінній структури; а потім для отримання рівня, вираженого у відсотках. Був розроблений спеціальний функціональний блок Scal_in_M для динамічного розрахунку меж масштабування в метрах. Цей блок враховує густину рідини, яку можна налаштувати безпосередньо з SCADA-системи, та прискорення вільного падіння, забезпечуючи гнучкі та точні вимірювання рівня.

Для кондиціонування сигналу та зменшення шуму був реалізований фільтр SH_2. Цей фільтр діє як елемент зберігання зі статистичними можливостями, обчислюючи середнє значення з останніх N показань за вказаний час (PT). Параметр disc дозволяє фільтру ігнорувати певну кількість екстремальних значень під час статистичної обробки, що особливо корисно для надійної приглушення перешкод.

Такий комплексний підхід до обробки сигналів, що включає використання спеціальної структури Struct Aplisens для даних датчиків, а також спеціалізованих функціональних блоків для масштабування (FB_Scaling, Scal_in_M) та фільтрації (SH_2), демонструє надійну, модульну та багаторазову методологію програмування. Це свідчить про дотримання передових практик розробки програмного забезпечення в промисловій автоматизації, що сприяє зручності обслуговування, масштабованості та операційній гнучкості (наприклад, можливість налаштування густини рідини зі SCADA). Зокрема, групування пов'язаних параметрів датчиків у структуру покращує читабельність коду та спрощує передачу даних між різними частинами програми. Інкапсуляція специфічної логіки у функціональні блоки робить код модульним, дозволяючи легко використовувати ці блоки для кількох подібних датчиків або процесів, що скорочує час розробки та забезпечує послідовність. Використання фільтра SH_2 з параметром disc відображає розуміння реальних промислових сигналів, які часто є зашумленими, а надійна фільтрація є критичною для стабільного керування та точних даних.

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.5 Застосування функціональних блоків та бібліотек

Основна методологія програмування в Machine Expert значною мірою ґрунтується на структурованому використанні різних програмних конструкцій:

- Структури (Structs): Використовуються для організації та зручного керування пов'язаними змінними, як це показано на прикладі Struct Aplisens.
- Функціональні блоки (Functional Blocks): Це універсальні програмні одиниці, які можуть мати кілька входів і виходів. Вони ідеально підходять для інкапсуляції багаторазово використовуваної логіки, яку необхідно послідовно застосовувати до різних каналів або об'єктів, наприклад, FB_Scaling для перетворення сигналів або FB_limits для керування аварійними сигналами.
- Функції (Functions): Хоча вони схожі на функціональні блоки, функції характеризуються наявністю кількох входів, але суворо одного виходу, тип даних якого визначається під час його створення.

Був розроблений спеціальний функціональний блок FB_limits (рисунок 3.8) для надання критичних сповіщень, коли виміряне значення досягає або перевищує заздалегідь визначені порогові значення аварійних сигналів.

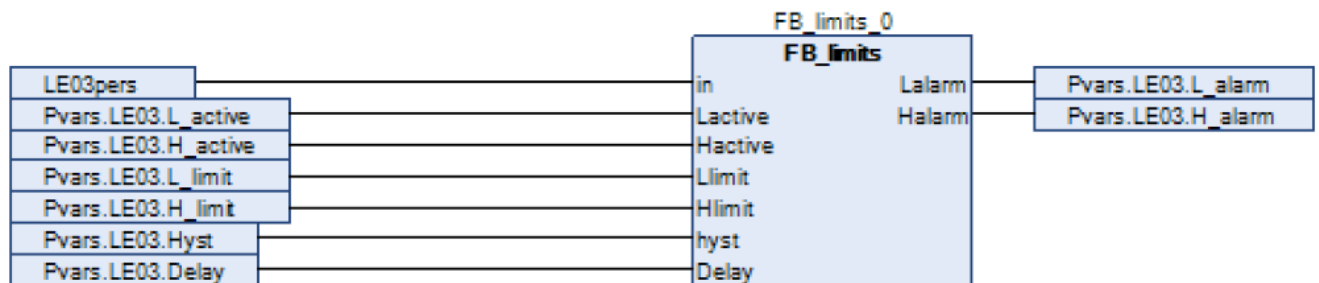


Рисунок 3.8 – Функціональний блок надання критичних сповіщень

Цей блок є важливим для забезпечення своєчасних сповіщень та швидкого втручання оператора. Послідовне та цілеспрямоване використання функціональних блоків (FB_Scaling, Scal_in_M, SH_2, FB_limits) для конкретних, інкапсульованих завдань свідчить про суворе дотримання стандартів програмування IEC 61131-3, зокрема парадигм Function Block Diagram (FBD) або Structured Text (ST). Це сприяє повторному використанню коду, спрощує

усунення несправностей та значно підвищує надійність і зручність обслуговування системи. Розбиття складної логіки керування на менші, самодостатні та багаторазові функціональні блоки забезпечує модульність, що робить загальну програму легшою для розуміння та управління. Після розробки та тестування блоку (наприклад, FB_Scaling для різних датчиків), його можна багаторазово використовувати, значно скорочуючи час розробки та потенційні помилки. Зміни або виправлення помилок у певній функції потрібно вносити лише в одному місці (визначенні функціонального блоку), і вони автоматично поширюються на всі екземпляри. Це робить усунення несправностей легшим, оскільки проблеми часто можна відстежити до конкретного функціонального блоку.

3.6 Розроблення та налаштування ПІД-регулятора

Для точного керування рівнем у збірнику підсивушної води був реалізований Пропорційно-Інтегрально-Диференціальний (ПІД) регулятор за допомогою блоку PID_FIXCYCLE. Важливим параметром у блоці PID_FIXCYCLE є Cycle, який визначає час виконання контуру керування, забезпечуючи послідовне та своєчасне регулювання.

Щоб запобігти збуренням системи, викликаним різкими змінами заданого значення регулятора, був стратегічно інтегрований блок Ramp_Real (рисунок 3.9).

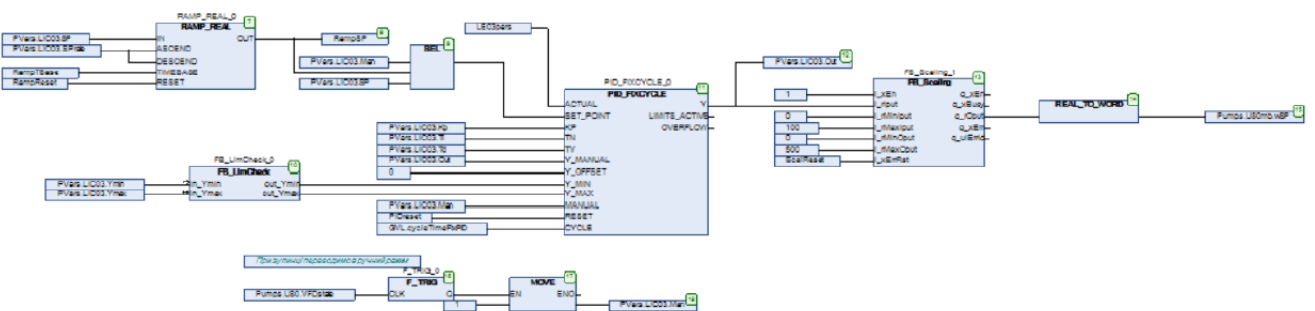


Рисунок 3.9 – ПІД регулятор з блоком Ramp_Real

Параметри Ascend та Descend цього блоку ефективно обмежують швидкість зміни заданого значення протягом визначеного Timebase,

забезпечуючи плавні переходи та запобігаючи збоям у процесі. Включення блоку Ramp_Real перед входом заданого значення ПІД-регулятора є критично важливим проектним рішенням для забезпечення стабільності процесу. У керуванні процесами миттєва зміна заданого значення (стрибкоподібна зміна) може призвести до агресивної реакції ПІД-регулятора, що потенційно спричинить перерегулювання та коливання, надмірне навантаження на виконавчі механізми або небажані перехідні процеси. У чутливих процесах різкі зміни можуть призвести до небажаних хімічних реакцій, стрибків тиску або температури. Блок Ramp_Real згладжує ці зміни заданого значення, дозволяючи заданому значенню поступово зростати або спадати протягом заданого часу. Це гарантує, що ПІД-регулятор коригує свій вихід контрольованим чином, що призводить до значно плавного та стабільнішого переходу до нової робочої точки. Це є найкращою практикою в інженерії керування для надійної та стабільної роботи системи.

Вихідний сигнал з блоку PID_FIXCYCLE, спочатку виражений у відсотках, піддається необхідному масштабуванню для перетворення його у придатну інженерну одиницю. Нарешті, це масштабоване значення, яке має тип Real (з плаваючою комою), перетворюється на тип Word (ціле число) за допомогою блоку REAL_TO_WORD. Це перетворення є важливим, оскільки частотний перетворювач ATV320, який отримує команди через Modbus, вимагає значення саме типу Word.

3.7 Налаштування зв'язку Modbus для частотних перетворювачів

Для забезпечення зв'язку з частотним перетворювачем ATV320 (рисунок 3.10), протокол Modbus був налаштований на контролері.

Це налаштування включає низку кроків у середовищі Machine Expert. Спочатку, в меню Devices tree, обирається опція Serial_Line, після чого додається Modbus_IOScanner. Потім під Modbus_IOScanner додається Generic_Modbus_Slave. Наступним критичним кроком є вказання унікальної Modbus-адреси для частотного перетворювача. Після цього налаштовуються канали для читання та запису регістрів ATV320. Цей крок є вирішальним для

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

двонаправленого потоку даних.

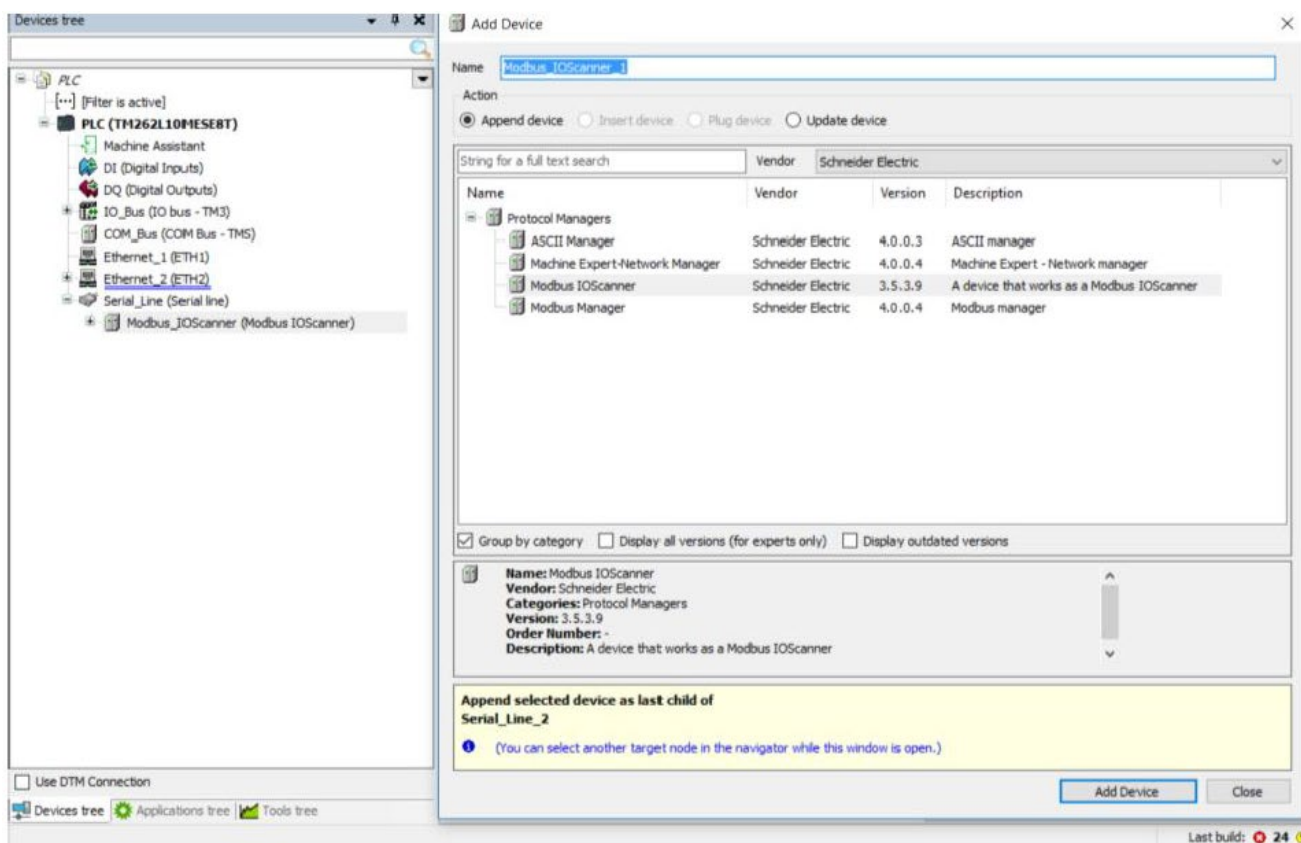


Рисунок 3.10 – Частотний перетворювач ATV320

Ключовим аспектом цього зв'язку є масштабування даних: значення, що передаються до ATV320 через Modbus, масштабуються таким чином, що одна одиниця відповідає 0.1 Гц, а максимальне значення частоти становить 50 Гц. Це пояснює, чому вихідний сигнал з ПД-регулятора масштабується та перетворюється з типу Real на тип Word перед передачею, оскільки ATV320 очікує дані типу Word. Детальне пояснення масштабування даних Modbus (1 одиниця = 0.1 Гц, максимум 50 Гц) підкреслює важливість розуміння протоколів зв'язку та представлення даних, специфічних для пристроїв. Така ретельна увага до деталей є вирішальною для правильної та надійної інтеграції польових пристроїв, запобігаючи неправильній інтерпретації команд керування або зворотного зв'язку та забезпечуючи точну роботу виконавчих механізмів. Промислові пристрої часто мають специфічні формати даних та коефіцієнти масштабування для своїх внутрішніх реєстрів. Проста передача необробленого значення може не призвести до бажаного фізичного результату. Розробники

						Арк.
					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ретельно вивчили специфікації протоколу зв'язку пристрою, що гарантує, що значення WORD, передане з ПЛК, правильно інтерпретується ATV320 для досягнення точної бажаної частоти, і, навпаки, що значення зворотного зв'язку точно зчитуються. Цей рівень деталізації є ознакою надійного проектування промислових систем керування, де точна інтерпретація даних має першорядне значення для продуктивності, безпеки та запобігання пошкодженню обладнання.

Хоча основне керування передбачає встановлення робочої частоти, система зберігає доступ до ширшого діапазону змінних. Рекомендовані параметри для керування ATV320 дозволяють не лише встановлювати частоту, а й контролювати стан частотного перетворювача, фактичну частоту та коди помилок.

Таблиця 3.3 - Регістри Modbus для керування ATV320

АДРЕСА РЕГІСТРА	НАЗВА РЕГІСТРА / ФУНКЦІЯ	ТИП ДАНИХ	КОЕФІЦІЄНТ МАСШТАБУВАННЯ / ОДИНИЦЯ	ДОСТУП (ЧИТАННЯ/ЗАПИС)	ОПИС
8501	Command Word	Word	N/A	R/W	Керуюче слово для команд (наприклад, пуск/стоп, напрямки).
8502	Output Frequency	Word	0.1 Гц/одиниця	R	Фактична вихідна частота перетворювача.
8503	Motor Current	Word	N/A	R	Струм двигуна.
8504	Motor Voltage	Word	N/A	R	Напруга двигуна.
8505	Motor Power	Word	N/A	R	Потужність двигуна.
8506	Drive Status	Word	N/A	R	Поточний статус частотного перетворювача (наприклад, робота, зупинка, помилка).
8507	Fault Code	Word	N/A	R	Код поточної помилки, якщо є.
8508	Setpoint Frequency	Word	0.1 Гц/одиниця	R/W	Задане значення частоти для керування двигуном.

3.8 Інтеграція з ПЛК через OPC UA

Встановлення безперешкодного обміну даними між контролером та SCADA-системою було досягнуто шляхом налаштування з'єднання OPC UA. Цей протокол був обраний за його високу швидкість, безпеку та масштабованість.

Процес налаштування включав конфігурацію контролера Schneider Electric Modicon M262 як OPC UA Server (рисунок 3.11). Це було зроблено шляхом переходу до меню Devices tree, вибору контролера, а потім вибору OPC UA Server Configuration. З боку SCADA, в Siemens TIA Portal, протокол OPC UA був обраний у меню Connections. Для встановлення з'єднання були вказані IP-адреса контролера та призначений порт зв'язку.

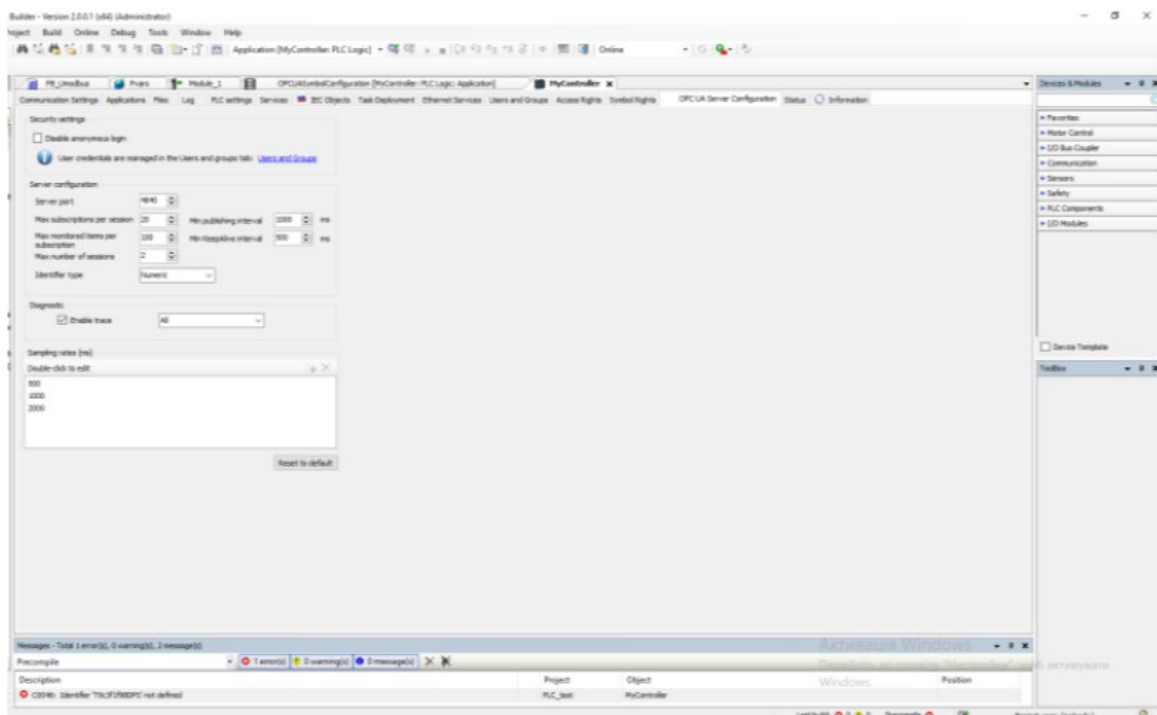


Рисунок 3.11 – Налаштування OPC UA в контролері M262

Для успішної передачі значень тегів через OPC UA було важливо правильно вибрати та налаштувати відповідні теги. Цей процес керувався за допомогою опції OPCUASymbolConfiguration, доступної при натисканні на контролер у меню Tools tree. Після встановлення з'єднання OPC UA та роботи SCADA-системи в режимі Runtime стає можливим повний контроль та моніторинг контролера з інтерфейсу SCADA (рисунок 3.12 і рисунок 3.13).

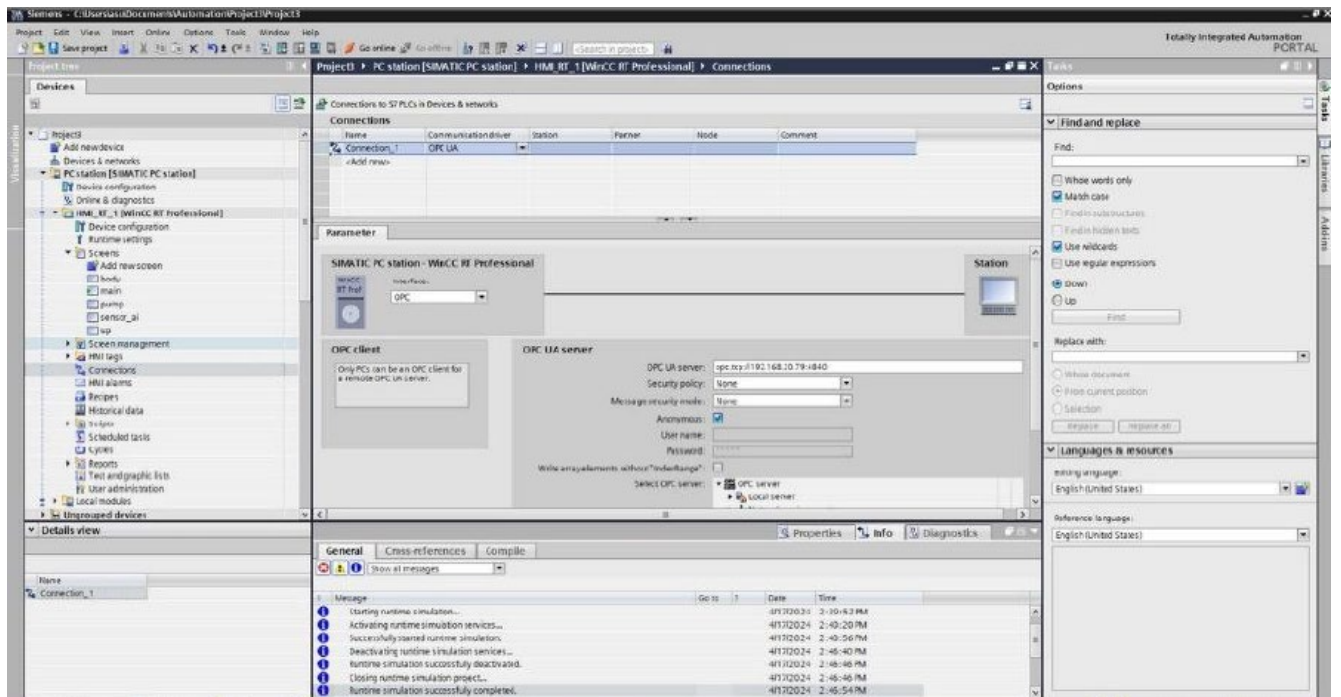


Рисунок 3.12 - Налаштування OPC UA в TIA Portal

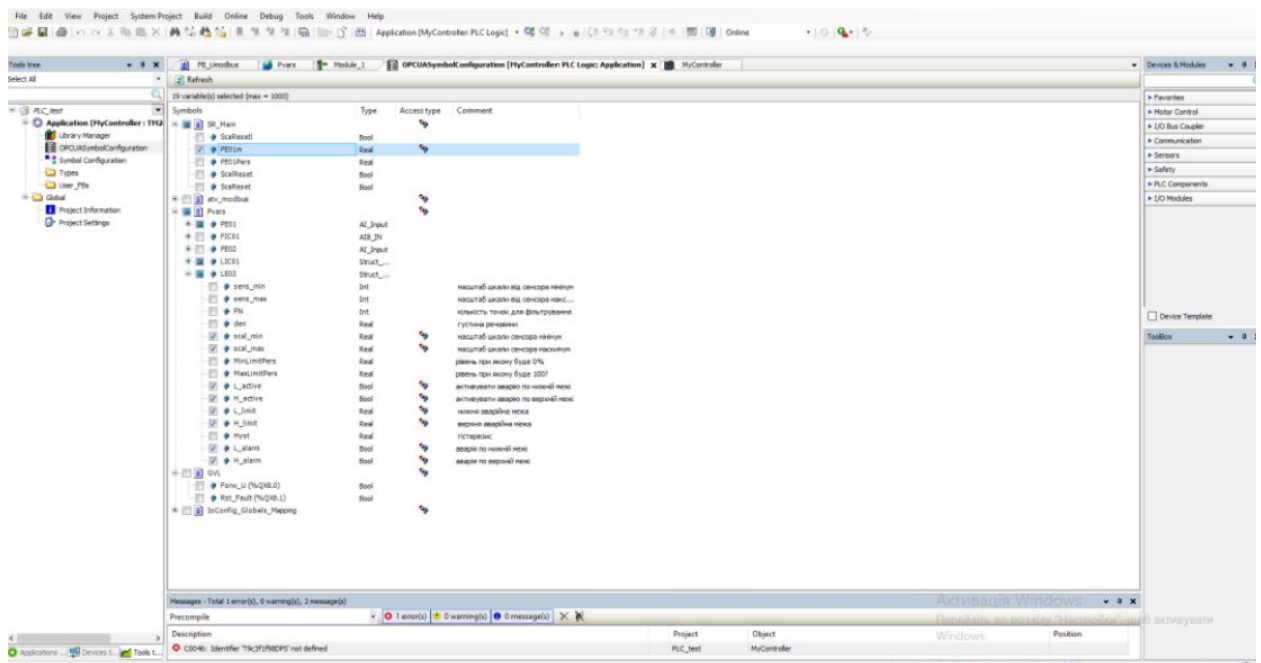


Рисунок 3.13 – Передача тегів по OPC UA

Детальний, покроковий процес налаштування зв'язку OPC UA (сервер, клієнт, вибір тегів) підкреслює складність та критичну важливість встановлення безпечного та надійного обміну даними в багатосторонньому середовищі. Цей рівень деталізації є життєво важливим для успішного розгортання та усунення

та посиленню загальної безпеки виробництва.

Зазначені переваги (підвищення продуктивності, зниження витрат, покращення якості, підвищення безпеки) є прямими, вимірюваними бізнес-результатами успішної автоматизації. Це виходить за рамки простого переліку технічних характеристик, демонструючи відчутну окупність інвестицій (ROI) проекту, що має вирішальне значення для бізнес-обґрунтування. Проекти автоматизації в кінцевому підсумку виправдовуються їхньою здатністю забезпечувати такі кількісні або якісні покращення для прибутковості бізнесу та операційної досконалості. Чітко формулюючи ці переваги, звіт ефективно доносить цінність проекту ширшій аудиторії, включаючи керівництво та фінансових зацікавлених сторін, а не лише технічний персонал. Таким чином, технічні досягнення перетворюються на бізнес-переваги.

Вибір ПЛК Schneider Electric Modicon M262, з його високою продуктивністю, властивою гнучкістю та вбудованими функціями кібербезпеки, створив надійну та стійку основу для керування складними промисловими процесами. Застосування OPC UA як основного протоколу зв'язку забезпечило високошвидкісну, безпечну та масштабовану передачу даних, що є фундаментальним для ефективного обміну даними в реальному часі та підтримання загальної стабільності системи. Інтеграція спеціалізованих бібліотек, SE_Toolbox та oscatbasic, у середовище Machine Expert сприяла ефективній реалізації необхідних функцій автоматизації, що призвело до скорочення як часу розробки, так і витрат.

Зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс SCADA-системи, розроблений у TIA Portal, надає операторам контроль у реальному часі над усіма критичними параметрами системи, значно підвищуючи безпеку виробництва та оперативність реагування. Завдяки ретельному тестуванню та налаштуванню були оптимізовані різні типи регуляторів, включаючи ПД-регулятори. Ця оптимізація забезпечує стабільну та високоефективну роботу системи в широкому діапазоні робочих умов.

Поєднання високопродуктивного ПЛК з вбудованими функціями

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кібербезпеки, безпечного зв'язку OPC UA та надійних алгоритмів керування (ПІД з функцією наростання) створює стійку та надійну систему. Цей багатошаровий підхід до надійності та безпеки є відмінною рисою автоматизації критичної інфраструктури, мінімізуючи операційні ризики та забезпечуючи безперервну, безпечну роботу. У сучасних промислових умовах надійність та безпека системи мають першорядне значення. Зростають кіберзагрози, а прості в роботі можуть бути надзвичайно дорогими. Простого "контролю" недостатньо; контроль має бути безпечним та стабільним. Проектні рішення відображають проактивну стратегію вирішення цих критичних проблем. ПЛК забезпечує безпечну апаратну основу, OPC UA гарантує безпечну передачу даних між рівнями, а оптимізоване ПІД-керування забезпечує стабільність процесу, запобігаючи відхиленням, які можуть призвести до інцидентів безпеки або пошкодження обладнання. Такий багатогранний підхід вказує на всебічне розуміння ризиків, властивих промисловим операціям.

Обрані технічні рішення, включаючи ПЛК Modicon M262, протокол OPC UA та SCADA-систему TIA Portal, спільно забезпечують розробку системи керування, яка є не тільки надійною та безпечною, а й дуже гнучкою. Ця гнучкість дозволяє системі відповідати мінливим вимогам сучасної промислової автоматизації. Позитивні результати, отримані від цієї реалізації, підтверджують обрані підходи та технології, що робить їх дуже рекомендованими для впровадження в подібних майбутніх проектах автоматизації.

Властива TIA Portal підтримка широкого спектру обладнання Siemens, від малих до великих систем автоматизації, забезпечує значну масштабованість. Це дозволяє легко адаптувати та розширювати рішення відповідно до зростаючих потреб виробництва. Крім того, прихильність Siemens до постійних оновлень та підтримки нових моделей обладнання гарантує довгострокову актуальність та захист інвестицій, зроблених у систему автоматизації.

Акцент на "гнучкості", "масштабованості", "сучасних вимогах" та "захисті інвестицій" вказує на стратегічний довгостроковий погляд у проектуванні системи. Система розроблена не лише для поточних операційних потреб, а й для

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

адаптації до майбутнього розширення, технологічних досягнень та мінливих галузевих стандартів, що робить її стійкою та цінною інвестицією. Проекти промислової автоматизації є значними капітальними витратами. Компанії шукають рішення, які залишатимуться життєздатними та ефективними протягом багатьох років, здатними адаптуватися до змін обсягів виробництва, нових технологій та мінливих бізнес-потреб. Вибір широко підтримуваних, галузевих стандартних платформ (Schneider Electric, Siemens) та відкритих протоколів зв'язку (OPC UA) за своєю суттю забезпечує певний ступінь захисту від майбутніх змін. Явне згадування масштабованості та захисту інвестицій вказує на те, що це були свідомі цілі проектування, що гарантують, що система може розвиватися разом з бізнесом та технологічним ландшафтом, тим самим максимізуючи цінність її життєвого циклу.

Висновки до розділу

Застосування протоколу OPC UA для взаємодії між контролером і SCADA-системою в середовищі TIA Portal продемонструвало високу ефективність, забезпечуючи швидкий, надійний і масштабований обмін інформацією, що є критично важливим для оперативного контролю та керування. Налаштування платформи Machine Expert із залученням бібліотек SE_Toolbox та oscatbasic значно полегшило процес розробки та розширило функціонал системи. Розроблений інтерфейс SCADA в TIA Portal виявився зручним та зрозумілим для користувача, дозволивши оперативному персоналу ефективно відстежувати та контролювати ключові параметри технологічного процесу, що сприяло підвищенню загальної продуктивності та рівня безпеки. До того ж, впровадження та вдосконалення різних типів регуляторів, зокрема ПІД-регуляторів, сприяли стабільній та ефективній роботі системи за різноманітних експлуатаційних умов.

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ АСК

4.1 Контролер Schneider Electric Modicon M262

Автоматизація брагоректифікаційної установки (БРУ) вимагає застосування сучасного апаратного забезпечення, здатного забезпечити стабільне, точне та енергоефективне керування технологічним процесом. У зв'язку з цим, актуальним є використання програмованих логічних контролерів, що підтримують інтеграцію з системами верхнього рівня, швидкодію при обробці сигналів та можливість розширення функціональності. Одним з таких рішень є контролер Schneider Electric Modicon M262 (рисунок 4.1), який поєднує у собі високопродуктивну логіку, розвинені мережеві функції та можливості координованого керування.



Рисунок 4.1 - Контролер Schneider Electric Modicon M262

Контролер Modicon M262 оптимально підходить для автоматизації складних технологічних об'єктів, зокрема БРУ, де необхідно одночасно керувати температурними режимами, процесами випаровування та конденсації, а також контролювати рівень і тиск у різних частинах установки. Завдяки високошвидкісному двоядерному процесору пристрій здатний ефективно обробляти сигнали від численних датчиків і здійснювати керування в режимі реального часу. Висока продуктивність у поєднанні з підтримкою таких

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

комунікаційних протоколів, як Modbus TCP, OPC UA, MQTT, дозволяє інтегрувати контролер у складні SCADA- та MES-системи, а також організувати хмарний моніторинг.

Обраний для реалізації системи автоматизації БРУ варіант контролера, модель TM262M, забезпечує як логічне керування, так і можливість реалізації координованих задач руху. Це дозволяє впроваджувати точні схеми регулювання температури у зоні випаровування та ректифікації, а також управляти виконавчими механізмами з мінімальними затримками. Наявність вбудованих Ethernet-портів забезпечує зручність обміну даними між вузлами системи, а вбудований веб-сервер дозволяє здійснювати дистанційний перегляд та налаштування параметрів. Оперативна пам'ять контролера складає 256 мегабайт, а флеш-пам'ять — 1 гігабайт. Також підтримується встановлення карти microSD до 32 гігабайт для збереження журналів подій та історичних даних.

У технологічній схемі БРУ контролер виконує функції збору даних з температурних, тискових, рівневих та витратомірних датчиків, обробки логіки керування, регулювання нагріву ТЕНів, керування насосами та електромагнітними клапанами, а також передачі інформації у SCADA-систему. За необхідності контролер може зберігати критичні параметри на карту пам'яті або надсилати їх на віддалений сервер для обліку та аналізу. Високошвидкісні цифрові входи та виходи, що підтримуються Modicon M262, забезпечують швидкий відгук системи на зміну технологічного стану. Завдяки підтримці різноманітних модулів розширення серій TM3, TM5 та TM7, контролер легко масштабується, що важливо для підприємств, які планують модернізацію чи розширення виробництва.

Використання контролера Schneider Electric Modicon M262 у системі автоматизації брагоректифікаційної установки дозволяє значно підвищити ефективність та надійність виробничого процесу. Система стає більш гнучкою, стабільною та безпечною. Можливість віддаленого доступу до налаштувань і параметрів, а також автоматичне збирання даних про технологічні режими створює передумови для впровадження концепції «розумного виробництва» та

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергоефективного управління. Усе це свідчить про доцільність та перспективність впровадження зазначеного контролера у склад технологічного обладнання БРУ.

4.2 Датчики системи автоматизації брагоректифікаційної установки

Для ефективної роботи системи автоматизації брагоректифікаційної установки необхідно забезпечити постійний та точний контроль технологічних параметрів, таких як температура, тиск, рівень рідини та витрата. Надійне вимірювання цих величин дозволяє точно керувати процесами випаровування, ректифікації, охолодження та подачі сировини. Одним із ключових елементів у цій системі є засоби первинного вимірювання — датчики. Компанія Schneider Electric пропонує широкий асортимент промислових давачів, які можуть бути успішно інтегровані у систему автоматизації БРУ завдяки високій сумісності з контролерами серії Modicon та простоті налаштування (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 - Ємнісний датчик рівня OsiSense XT

Однією з головних вимірюваних величин у процесі ректифікації є температура. Для цього доцільно використовувати термометри опору (RTD) або термопари, які Schneider Electric реалізує у вигляді модулів серії STPT та ZBRN у поєднанні з аналоговими входами контролера. Прикладом таких пристроїв є бездротовий RTD/термопарний температурний датчик WRT10 (WirelessHART) – призначений для бездротового вимірювання температури з високою точністю, наприклад у зоні кипіння, колоні або охолодження. Підтримує АТЕХ-сертифікацію для вибухонебезпечних умов. (рисунок 4.3).

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53



Рисунок 4.3 - Температурний датчик WRT10

Ці датчики забезпечують високу точність, стабільність сигналу і стійкість до високих температур, що дозволяє їх використовувати у зонах кипіння, ректифікаційній колоні та в системах охолодження. Для контролю рівня рідини у ємностях браги, спирту та води Schneider Electric пропонує ємнісні датчики рівня серії OsiSense, які придатні для роботи з рідинами різної електропровідності. Вони мають компактне виконання, можуть працювати у важких умовах (наявність парів, конденсату) та легко підключаються до дискретних входів контролера. У разі необхідності безперервного контролю рівня доцільно застосовувати ультразвукові або гідростатичні датчики рівня, які Schneider також пропонує у межах лінійки OsiSense XX.

Ще однією важливою змінною є тиск, зокрема тиск пари та рідин у трубопроводах. Для цих задач можуть бути застосовані датчики тиску серії XMLP та XMLG (рисунок 4.4), які забезпечують точне вимірювання в діапазоні до 100 бар і мають аналоговий вихід 4–20 мА. Такі пристрої є ідеальними для моніторингу тиску в парових просторах, конденсаторах і насосних лініях. Schneider Electric також пропонує компактні цифрові манометри, які можуть передавати значення безпосередньо до ПЛК або на дисплей оператора.

Контроль витрати рідин, особливо браги та охолоджувальної води, є необхідним для підтримання стабільних режимів процесу. Для цього можуть бути використані індуктивні витратоміри, сумісні з обладнанням Schneider Electric, або імпульсні датчики витрати, що формують частотний або аналоговий сигнал, придатний для обробки на вході контролера Modicon M262.

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54



Рисунок 4.4 - Датчик тиску серії XMLP від Schneider Electric

Крім того, у випадках, де необхідно виявити положення об'єктів або кінцеві положення виконавчих механізмів, ефективними є індуктивні та фотоелектричні датчики серії OsiSense XS і XU. Вони дозволяють здійснювати контроль положення клапанів, наявності тари, положення виконавчих механізмів або виявлення аварійних ситуацій.

Загалом датчики Schneider Electric відзначаються високою якістю виготовлення, широким температурним і тисковим діапазонами, а також сумісністю з інтерфейсами типових ПЛК. Це забезпечує не лише точне та надійне вимірювання технологічних параметрів у процесі ректифікації, але й зручну інтеграцію у вже наявну архітектуру автоматизації. Висока чутливість, швидкий відгук, стійкість до агресивних середовищ та можливість роботи у складних умовах виробництва роблять датчики Schneider Electric оптимальним вибором для системи керування БРУ.

Висновки до розділу

У даному розділі було розглянуто технічні та функціональні можливості програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M262, а також типи промислових датчиків тієї ж компанії, які доцільно застосовувати в системі автоматизації брагоректифікаційної установки. Аналіз показав, що Modicon M262 є високопродуктивним, гнучким та сучасним рішенням для реалізації автоматизованого управління складними технологічними процесами з

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

підтримкою IoT-функціоналу, координованого керування та відкритих протоколів зв'язку.

Контролер забезпечує надійне збирання, обробку і передачу даних від датчиків до системи візуалізації або хмарного середовища, що дозволяє здійснювати оперативне керування параметрами процесу ректифікації у режимі реального часу. Завдяки підтримці широкого спектру входів/виходів, високошвидкісних інтерфейсів і модульності, контролер адаптується до специфіки конкретної установки та легко масштабується.

Датчики Schneider Electric, зокрема температурні, тискові, рівневі та індуктивні, продемонстрували високу точність, стабільність та сумісність із контролером M262. Їх застосування дає змогу здійснювати повноцінний контроль критичних параметрів процесу, забезпечуючи енергоефективність, стабільність вихідного продукту та безпеку експлуатації обладнання.

Загалом інтеграція рішень Schneider Electric у систему автоматизації БРУ дозволяє вивести керування технологічним процесом на якісно новий рівень, що відповідає сучасним вимогам до цифрових виробництв, енергоощадності та гнучкого керування.

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Практична реалізація автоматизованої системи керування для брагоректифікаційної установки принесла кілька значних результатів. Ключові досягнення включають оптимальний вибір та успішне розгортання ПЛК Schneider Electric Modicon M262, який був високо оцінений за його високу продуктивність, гнучкість та інтегровані можливості кібербезпеки, що забезпечило надійну основу для складних промислових процесів.

Використання протоколу OPC UA для передачі даних між контролером та SCADA-системою TIA Portal виявилось високоефективним, забезпечуючи високошвидкісний, безпечний та масштабований обмін даними, що має вирішальне значення для моніторингу та керування в реальному часі. Конфігурація середовища програмування Machine Expert, посилена інтеграцією бібліотек SE_Toolbox та oscatbasic, спростила процес розробки та розширила функціональні можливості. Створення зручного та інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу SCADA в TIA Portal надало операторам можливість контролювати та моніторити всі критичні параметри процесу в реальному часі, значно підвищуючи продуктивність та безпеку. Крім того, тестування та оптимізація різних регуляторів, включаючи ПД-регулятори, забезпечили стабільну та ефективну роботу системи в широкому діапазоні робочих умов.

Підсумовуючи, обрані технічні рішення продемонстрували високу ефективність, що призвело до створення надійної, безпечної та гнучкої системи керування, яка відповідає сучасним вимогам промислової автоматизації. Позитивні результати підтверджують правильність обраних підходів та технологій, що робить їх дуже рекомендованими для подібних майбутніх проектів автоматизації. Це твердження виходить за рамки простого опису, пропонуючи сильну, позитивну оцінку. Вона надає дієві поради іншим організаціям або проектам, які розглядають подібні ініціативи з автоматизації, підтверджуючи інвестиції та прийняті проектні рішення.

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Вивчар О. В. Розробка системи автоматизації брагоректифікаційної установки : магістерська робота / О. В. Вивчар. — Тернопіль, 2024. — 120 с.
2. Ковальчук В. П. Технологія ректифікації спирту : навч. посібник / В. П. Ковальчук. — Київ : Наук. думка, 2018. — 256 с.
3. Іваненко С. М. Автоматизація технологічних процесів у харчовій промисловості : підручник / С. М. Іваненко. — Львів : ЛПУ, 2020. — 312 с.
4. Петренко М. В. Основи хімічної технології спиртового виробництва / М. В. Петренко. — Харків : ХНТУ, 2019. — 198 с.
5. Сидоренко Л. І. Сучасні методи контролю і автоматизації ректифікаційних процесів / Л. І. Сидоренко // Вісник харчової промисловості. — 2021. — № 3. — С. 45–52.
6. Бондаренко О. В. Цифрові технології в автоматизації харчового виробництва / О. В. Бондаренко. — Київ : КНУ, 2022. — 278 с.
7. Мельник Т. П. Технологічні аспекти брагоректифікації / Т. П. Мельник // Хімічна промисловість України. — 2020. — № 5. — С. 22–28.
8. Шевченко І. В. Промислова автоматизація та управління : навчальний посібник / І. В. Шевченко. — Харків : ХПІ, 2019. — 344 с.
9. Романенко В. І. Методи підвищення ефективності ректифікаційних процесів / В. І. Романенко // Технології харчової промисловості. — 2023. — № 1. — С. 14–20.
10. Гриценко А. М. Інтелектуальні системи керування в харчовій промисловості / А. М. Гриценко. — Київ : НТУУ «КПІ», 2021. — 260 с.

					БР.АКП-19.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58