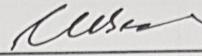


НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) Автоматизації і комп'ютерних систем
Кафедра Автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління
Освітній ступінь магістр
Спеціальність 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"
(код і назва)
Освітньо-професійна програма Інтелектуальні комп'ютерні системи
керування (назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Актис Ельперін І.В.


"09" листопада 2020 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Зваричука Дениса Едуардовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема Розробка системи автоматизації вакуум апаратів І продукту з підсистемою моніторингу технологічного процесу

керівник роботи доц. Івашук В'ячеслав Віталійович, д.т.н., професор,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "09" листопада 2020 року №933-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 08 лютого 2021 року

3. Вихідні дані до роботи вакуум апарат І продукту з циркулятором, викристалізовування сахарози з сиропу, виконання алгоритмів керування процесом кристалізації відповідно до рецептів, ПЛК МІК-52Н, панель оператора MT8101iE, SCADA TraceMode,

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

1. Характеристика об'єкта дослідження, аналітичний огляд літератури та постановка задач дослідження, 1.1 Аналіз вакуум-апарату І продукту як об'єкта керування, 1.2 Аналіз систем автоматизації уфельних вакуум-апаратів, 1.3 Аналіз нештатних ситуацій при роботі вакуум-апарату, 1.4 Аналіз каналів керування системи автоматизації вакуум-апарату, 2. Загальносистемні рішення, 2.1 Розробка підсистеми управління процесом кристалізації у вакуум-апараті, 2.2 Опис функцій, що інтелектуалізуються, 2.3 Розробка діаграми вимог до ІСК вакуум-апарату, 2.4 Визначення функцій користувачів (Use Case diagram), 2.5 Розробка BDD технічної складової АСК вакуум-апарату, 2.6 Розробка алгоритмічного забезпечення ІСК, 3. Розробка інформаційного та програмного забезпечення ІСК, 3.1 Вибір програмного забезпечення для всіх компонентів системи, 3.2. Розробка міжпрограмної взаємодії ІСК (Internal Block diagram), 3.3 Розробка та моделювання ІСК, 3.4 Обробка експериментальних даних процесу кристалізації цукру,

Висновок

5. Перелік графічного матеріалу Схема автоматизації. Схема електрична принципова управління, регулювання та сигналізації. Алгоритм роботи системи. Програма користувача для ПЛК.

ис. дата
завдан
прийн

Анотація

Данна магістерська робота ставить за мету підвищення ефективності цукрового виробництва шляхом створення автоматизованої системи технологічного моніторингу вакуум-апаратів I продукту і на основі оперативної аналітичної обробки даних реалізувати ефективні ресурсноощадні стратегії управління з використанням інтелектуальних механізмів та сценарного підходу. Об'єктом дослідження в кваліфікаційній роботі є масообмінні, теплообмінні і фізико-хімічні процеси, що відбуваються під час уварювання утфелю у вакуум-апараті I продукту періодичної дії фірми DSSE.

У роботі подана характеристика та системний аналіз вакуум-апаратів I продукту, їх систем автоматизації, опис нештатних ситуацій. Розроблені та досліджені методи оперативного моніторингу стану складних технологічних комплексів на базі вейвлетного і фрактального аналізу вхідної інформації. На базі розроблених методів та алгоритмів технологічного моніторингу та оптимального сценарного управління розроблена система автоматизованого управління вакуум-апарату продуктового відділення цукрового заводу.

Ключові слова: цукрове виробництво; вакуум-апарат; утфель; DSSE; автоматизація; вейвлетний та фрактальний аналіз.

риміт

Annotation

In master work is for the purpose to increase the efficiency of sugar production by creating an automated system of technological monitoring of vacuum devices and product and on the basis of operational analytical data processing to implement effective resource-saving management strategies using intelligent mechanisms and scenario approach. The object of research in the qualification work are mass transfer, heat transfer and physicochemical processes that occur during the boiling of the massecuite in the I product vacuum apparatus of periodic action of the company DSSE.

The paper presents the characteristics and system analysis of the First product vacuum devices, their automation systems, description of abnormal situations. Methods of operative monitoring of a condition of difficult technological complexes on the basis of the wavelet and fractal analysis of the input information are developed and investigated. Based on the developed methods and algorithms of technological monitoring and optimal scenario management has been developed a system of automated control of the vacuum apparatus of the food department of the sugar factory.

Key words: sugar production; vacuum apparatus; massecuite; DSSE; automation; wavelet and fractal analysis.

ВСТУП

Розвиток усіх областей техніки в теперішній час характеризується широкою автоматизацією різних виробничих процесів. При цьому звільняється праця людини, підвищується точність і швидкість виконання операцій, що значно підвищує продуктивність виробництва.

Цукрове виробництво, як одна з галузей харчової промисловості, є одним з лідерів по впровадженню інтелектуальних комп'ютерних систем керування технологічними процесами.

Основні відділення цукрового заводу володіють характерними ознаками складних систем управління, а саме: багатокритеріальність, значний рівень шумів, висока ступінь невизначеності різних форм, нелінійний характер поведінки. Прийняття управлінських рішень в таких умовах є важкою задачею, а в деяких випадках здійснюється лише на основі досвіду та інтуїції обслуговуючого персоналу. Через значну інерційність об'єктів більшості апаратів та агрегатів цукрового заводу ефективність прийнятих лінійних управляючих дій на об'єкт управління може бути недостатньою, бо при цьому не враховуються особливості проявів складної поведінки.

Обладнання, що використовується в харчовій промисловості, повинне випускати не тільки продукцію високої якості, але і відповідати ряду технічних та економічних вимог. Випарне обладнання в цукровій промисловості характеризується великою продуктивністю, високою матеріало- та енергоємністю, високими тепловими навантаженнями, роботою при підвищених температурах, підвищених або понижених тисках.

Вакуум-апарати періодичної дії, як об'єкти автоматизації відносяться до об'єктів з неповною інформацією. Неповнота інформації про об'єкт спричинена відсутністю інформації про всі складові вектор-функції обмежень. Невідомими найчастіше є обмеження, пов'язані, насамперед, з критичними значеннями рушійної сили, перевищення яких приводить до критичних ситуацій в апараті. Зокрема, при кристалізації цукру перевищення пересиченням міжкристального

розчину критичних значень призводить до інтенсифікації процесів вторинного кристалоутворення, що суттєво змінює гранулометричний склад цукру і робить його непридатним для подальшої обробки. А збурення об'єкта керування зумовлені: змінами технологічних властивостей сировини; змінами характеристик обладнання (знос, забруднення); впливом рівня організації виробництва, кваліфікацією виробничого персоналу [1].

Актуальність дослідження: для підвищення ефективності роботи системи управління вакуум-апаратами періодичної дії необхідно проводити оперативний аналіз інформації, що отримується під час протікання технологічного процесу. Оперативну обробку вхідної-вихідної інформації та прогнозування розвитку об'єкта управління повинна здійснювати підсистема технологічного моніторингу. Впровадження підсистеми створить необхідні передумови для поліпшення самого процесу прийняття рішень по управлінню. Відповідно, розробка алгоритмів обробки інформації і розробка підсистеми технологічного моніторингу з використанням сучасних методів аналізу інформації є актуальною науково-технічною проблемою.

Наукова новизна: розроблені та досліджені методи оперативного моніторингу стану складних технологічних комплексів на базі вейвлетного і фрактального аналізу вхідної інформації, які забезпечують підвищення достовірності та точності оцінки виробничих ситуацій; запропоновані алгоритми прогнозування розвитку об'єкта управління з різною глибиною прогнозу на основі інтелектуальних технологій та принципів нелінійної динаміки; вперше на основі ситуаційного аналізу розроблені сценарії управління процесами кристалізації, які дозволяють організувати у виділених ситуаційно-значущих зонах оптимальне управління вакуум-апаратами I продукту; здійснений синтез структури автоматизованого управління технологічного комплексу продуктового відділення цукрового заводу з використанням інтелектуальної підсистеми технологічного моніторингу.

Метою роботи є підвищення ефективності цукрового виробництва шляхом створення автоматизованої системи технологічного моніторингу

вакуум-апаратів І продукту і на основі оперативної аналітичної обробки даних реалізувати ефективні ресурсноощадні стратегії управління з використанням інтелектуальних механізмів та сценарного підходу.

Основні задачі для забезпечення досягнення мети роботи:

- на основі сучасних методів аналізу інформації розробити ефективні алгоритми оперативної обробки вхідної інформації, ситуаційної класифікації, системних динамічних змінювань, прогнозування поведінки об'єкта управління;
- побудувати сценарії управління вакуум-апарату І продукту цукрового заводу, які забезпечують організацію ефективних стратегій управління в умовах ситуаційної невизначеності та хаотичної поведінки об'єкта управління;
- здійснити постановку та розв'язати задачу багатоцільового управління вакуум-апарату І продукту, що забезпечить покращення якості продукції, підвищення продуктивності обладнання та зниження питомих витрат ресурсів;
- розробити алгоритмічне та програмне забезпечення системи управління дифузійним відділенням цукрового заводу з підсистемою технологічного моніторингу.

Об'єктом дослідження є масообмінні, теплообмінні і фізико-хімічні процеси, що відбуваються під час уварювання утфелю і задачі автоматизованого управління ними.

Предмет дослідження – розробка методів, моделей та алгоритмів, які можуть бути покладені в основу створення підсистеми технологічного моніторингу в автоматизованій системі управління вакуум-апаратами І продукту.

Методологія дослідження. Для розв'язку поставлених задач використовуються методи системного аналізу (для встановлення закономірностей та залежностей між необхідними даними змінних), категорійно-функторного аналізу (виділення категорії якості, продуктивності та втрат), вейвлет-аналізу (фільтрація часових рядів), карти, що самоорганізуються (визначення інтенсивності впливу того чи іншого значення технологічного параметру на хід технологічного процесу), базових принципах

сценарного підходу (організація ефективних стратегій управління), багатокритеріальної оптимізації, інженерії знань, імітаційного моделювання. Вірогідність основних теоретичних положень і результатів досліджень підтверджувалась шляхом використання математичного моделювання та експериментальних даних.

Практичне значення одержаних результатів. На базі розроблених методів та алгоритмів технологічного моніторингу та оптимального сценарного управління розроблена система автоматизованого управління вакуум-апарату продуктового відділення цукрового заводу, реалізована на сучасних комп'ютерних технологіях.

Розроблені алгоритми та методи технологічного моніторингу можуть бути використані в системах управління складними технологічними комплексами.

РОЗДІЛ 1

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ, АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз вакуум-апарату I продукту як об'єкта керування

1.1.1 Опис процесу кристалізації

Виробництво цукру з буряка складається з наступних основних стадій:

- очищення буряка від домішок (землі, піску, залишків бадилля),
- різання буряка в стружку і отримання з нього дифузійного соку (бурякопереробне відділення);
- очищення дифузійного соку вапном і діоксидом вуглецю від нецукрів (сокоочисне відділення);
- згущування соку випарюванням - отримання сиропу (випарне відділення);
- викристалізовування сахарози з сиропу, відділення цукру - піску від міжкристального розчину, сушка і упаковка (продуктове відділення).

Мета кристалізації - виділити розчинений в сиропі цукор у вигляді кристалів. В процесі вапняно-вуглекислої очистки з дифузійного соку видаляють біля третини нецукрів; ті, що залишились разом з цукрозою надходять в продуктове відділення, де сироп згущують до пересичення і з нього викристалізовують цукрозу, а нецукри залишаються в міжкристалічній суміші [2, 3].

Цукровими заводами, як типова, використовується трикристалізаційна схема, що включає афінацію цукру III кристалізації розбавленим першим відтоком утфелю I кристалізації до масової частки сухих речовин від 74% до 76%

і забезпечує одержання цукру відповідної якості згідно з ДСТУ 4623:2000 при мінімальному вмісті цукру в мелясі [4].

Випарювання проводять у вакуум-апаратах, з конденсуванням парів - в конденсаторах. Постійне розрідження в системі підтримується за допомогою сухо- або волого-повітряного насоса або системи ежекторів для відсмоктування повітря з системи. Переваги випарювання у вакуум-апаратах в порівнянні з випарюванням при атмосферному тиску:

- випарювання у вакуумі при температурі кипіння близько 60°C рідин, кипіння яких при атмосферному тиску має температуру кипіння 100°C і супроводжується фізико-хімічними змінами з втратою біологічної цінності продукту;

- зменшення втрат тепла в навколишнє середовище, і як наслідок - витрат пари, що гріє;

- можливість використання вторинної пари, що призводить до економії тепла, зменшенню витрат гострої пари;

- менший час згущення і більше знімання продукту з 1 кг площі нагріву, завдяки більшому перепаду температур між теплоносієм і рідиною, що випарюється.

Утфель І кристалізації уварюють з прозорої суміші сиропу з клеровкою, яка містить не менше ніж 65% масової частки сухих речовин (СР), рН від 7.0 до 8.2; вміст солей кальцію до 0.5% СаО на 100% СР і забарвленість не більше ніж 30 умовних одиниць.

Для рівномірного споживання сиропу, відтоків і нагрівної пари, а також нормального навантаження конденсаторних установок потрібно уварювати утфелі за заздалегідь розробленим графіком, що складають відповідно до якості буряків і тривалості уварювання.

Збірники для сиропів і відтоків забезпечують регуляторами для автоматичного підтримання заданої температури.

Найбільше розповсюдження в промисловості отримали апарати що мають центральну циркуляційну трубу та внутрішню нагрівальну камеру [5]. В

нижній частині вертикального корпусу агрегату (рис. 1.1) є спеціальна нагрівальна камера. Вона включає в себе циркуляційну трубу великого діаметру, яку встановлюють по осі камери, та дві трубні решітки, в яких закріплюють розвальцьовані труби приблизної довжини 3 - 4 м. В простір між нагрівальною камерою та трубою подають гарячу пару.

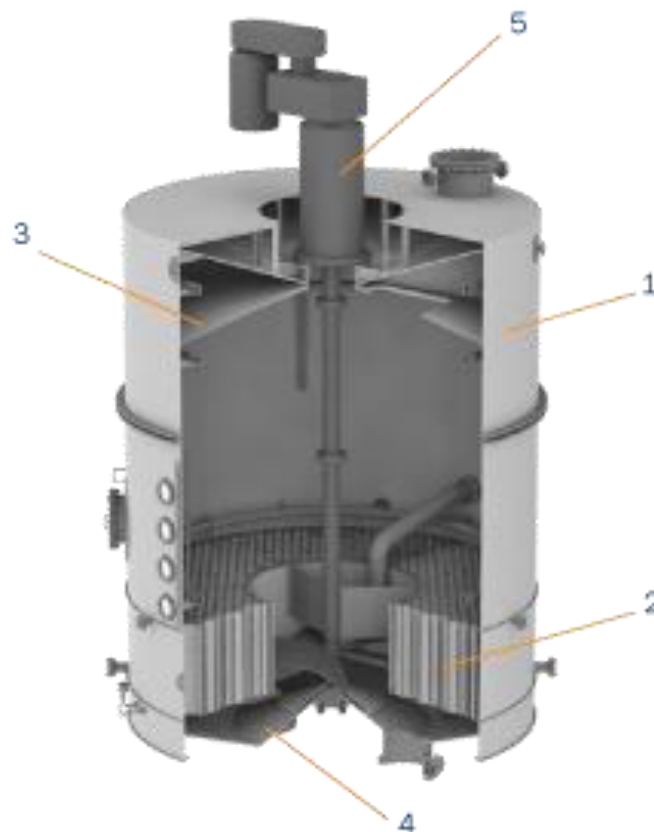


Рис. 1.1. Вакуум-випарний апарат періодичної дії

Апарат складається з корпусу 1, нагрівальної камери 2, сепаратора 3, опорного дна 4 та циркулятора механічного з приводом 5.

Робочий цикл вакуум-апарату періодичної дії, в якому в якості початкового продукту використовують сироп цукру або патоку, в якості кінцевого – кристали цукру в невеликій кількості міжкристалічної суміші (уфелю), складається з чотирьох стадій: наповнення апарату, робоча стадія, вивантаження уфелю, пропарювання апарату. В свою чергу робоча стадія включає в себе чотири операції: згущення сиропу, кристалоутворення, нарощування кристалів, уварювання уфелю. Тривалість окремих операцій робочої стадії і особливості

технологічного режиму залежать від ступеня чистоти початкового сиропу, який характеризується відношенням масової частки в ньому цукру (в відсотках) S_x і масової частки сухих речовин (в відсотках) CB , доброякісністю сиропу $Дб$, а також складу нецукрів [4].

Рухома сила основного робочого процесу пересичення – створюється і підтримується за рахунок випаровування частини розчинника (води). З виснаженням міжкристалічного розчину апарат підживлюють сиропом або патокою. Робоча стадія процесу закінчується при досягненні визначеного об'єму утфелю, який має необхідні масові частки сухих речовин і кристалів. Для зменшення втрат цукрози внаслідок її розкладу і карамелізації під дією значних температур, уварювання утфелю ведеться під вакуумом. Для уварювання утфелю використовуються в основному вертикальні вакуум-апарати корисною ємністю 30- 40, 50 - 60 і 70 - 80 тон звареного утфелю з підвісною підігрівною камерою, яка має конічну трубну решітку.

1.1.2 Системний аналіз об'єкта керування

Відділення кристалізації, на відміну від попередніх до нього ділянок цукрового виробництва, розташованих по ходу технологічного процесу, має більш складну, розгалужену схему матеріального потоку, велике число буферних збірників сиропу і відтоків, обладнання періодичної дії (вакуум-апарати, центрифуги). Цією особливістю матеріального потоку поряд із застосуванням значного числа апаратів періодичної дії пояснюється використання в кристалізаційному відділенні різноманітної арматури, за допомогою якої в ході технологічного процесу здійснюють перемикання потоків, регулювання їх інтенсивності, допоміжні операції. Все це ускладнює управління кристалізаційним відділенням і перш за все - його матеріальним потоком. Дуже

складний в управлінні також процес кристалізації при уварюванні утфелей у вакуум-апаратах. При заповненні верхніх збірок сиропу і відтоків контролюють рівень в збірниках. Витрата цих продуктів, попередньо підігрітих паром, на уварювання в вакуум-апаратах ведуть відповідно до вимог технологічного процесу.

Системний аналіз технологічного комплексу (ТК) кристалізаційного відділення.

Технологічний комплекс відділення кристалізації цукрового заводу є складною системою: виділено підсистеми шляхом складання структурної схеми ТК з виділенням технологічних процесів та матеріальних (енергетичних) потоків. Приклад структурної схеми ТК кристалізаційного відділення показано на рис. 1.2.

Головною метою функціонування ТК є отримання суміші кристалів та міжкристального розчину (утфелю).

Продуктивність ТК (3 вакуум-апарати) – орієнтовно 1400 т утфелю/добу.

Апаратурно-технологічна схема технологічного процесу кристалізаційного відділення (рис. 1.2).

На рис. 1.3 показана апаратурно - технологічна схема вакуум-апаратів першого продукту цукрового заводу. З випарної станції в проміжний збірник об'ємом 16 м³ надходить сироп. Завантаження вакуум-апаратів першого продукту відбувається послідовно, причому другий вакуум-апарат першого продукту починає заповнюватись після початку кристалізації в першому апараті, а третій - після початку кристалізації в другому вакуум-апараті. Вивантаження відбувається послідовно, так як утфелемішалка розрахована на об'єм 1.5 вакуум-апарату. При необхідності здійснюються підкачки зеленою та білою патокою або аміачною водою зі збірників.

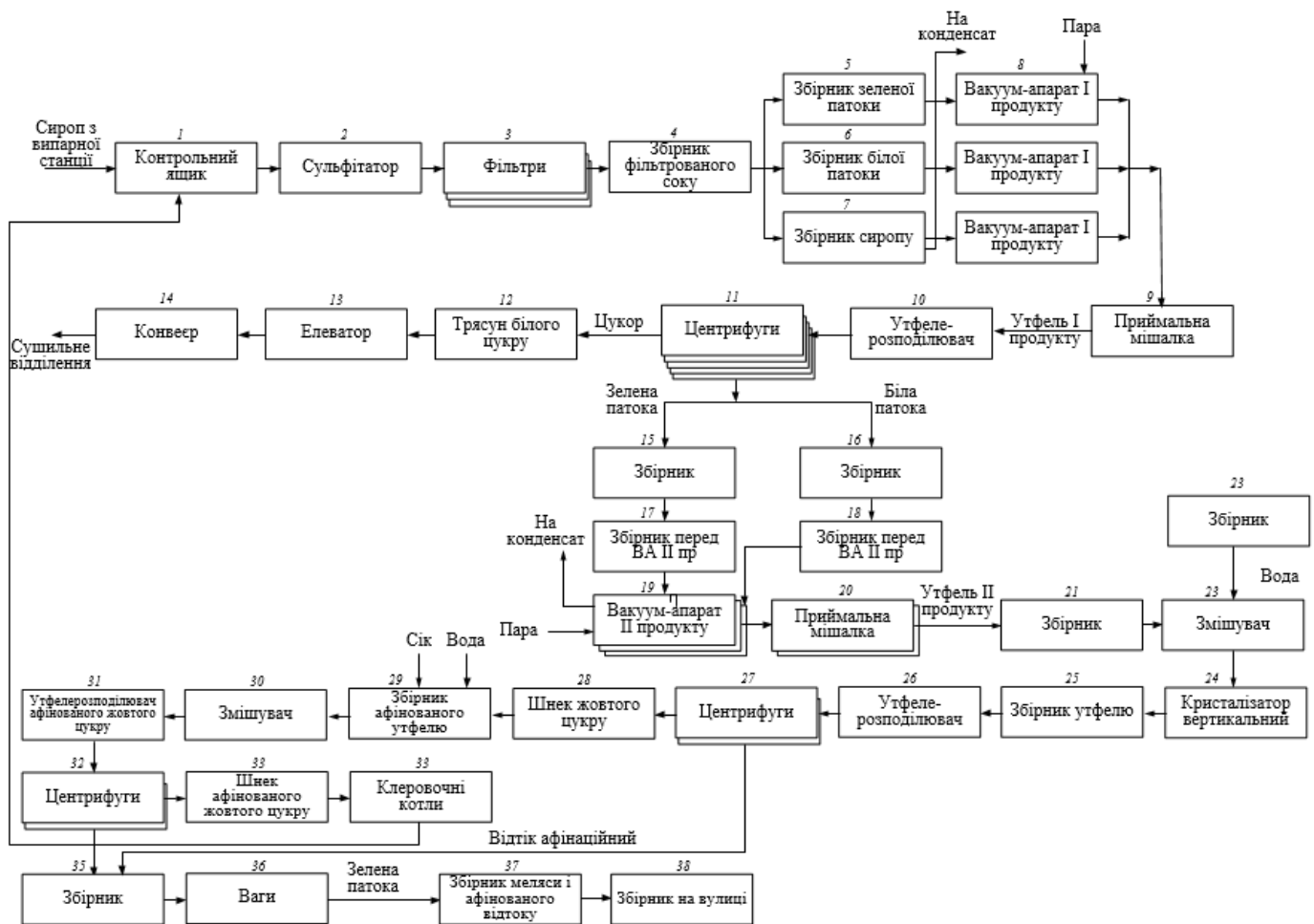


Рис. 1.2. Апаратурно - технологічна схема технологічного процесу кристалізаційного відділення

1. Контрольний ящик. 2. Сульфататор сиропу. 3. Фільтри (3 шт.). 4. Збірник фільтрованої соку. 5. Збірник зеленої патоки. 6. Збірник білої патоки. 7. Збірник сиропу. 8. Вакуум апарат I продукту (3 шт.). 9. Приймальна мішалка.
10. Утфелерозподільювач. 11. Центрифуги (4 шт.). 12. Трясун білого цукру.
13. Елеватор цукру. 14. Стрічковий конвеєр. 15. Збірник. 16. Збірник. 17. Збірник перед ВА II продукту. 18. Збірник перед ВА II продукту. 19. Вакуум-апарат II продукту (3 шт.). 20. Приймальна мішалка. 21. Збірник барометричної води.
22. Збірник. 23. Змішувач. 24. Кристалізатор вертикальний. 25. Збірник утфелю.
26. Утфелерозподільник. 27. Центрифуги (2шт). 28. Шнек жовтого цукру.
29. Збірник афінірованого утфелю. 30. Мішалка; 31. утфелерозподільників афінірованого жовтого цукру. 32. Центрифуги (2 шт.). 33. Шнек афінірованого жовтого цукру. 34. Клеровочні котли. 35. Збірник. 36. Ваги меляси. 37. Збірник меляси і афінаційні відтоку. 38. Збірник зовнішній.

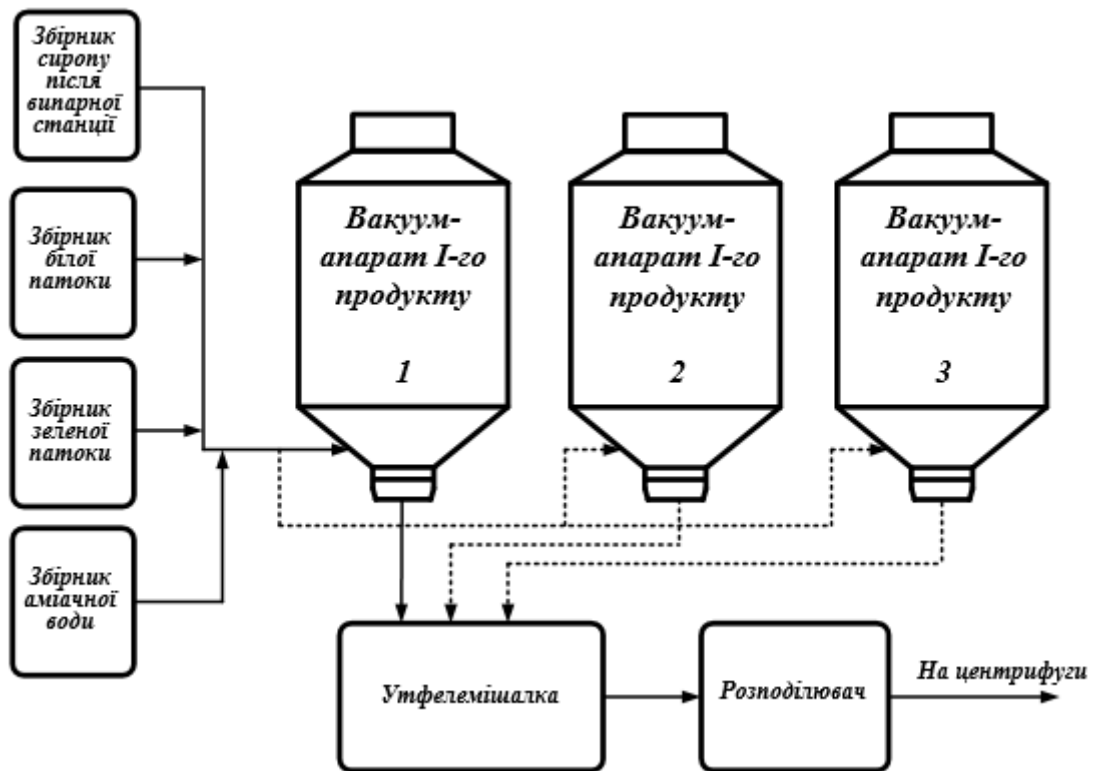


Рис. 1.3. Апаратурно - технологічна схема вакуум-апаратів першого продукту цукрового заводу

Об'єктом автоматизації, в даній роботі, є технологічний процес уварювання утфелю першої кристалізації в вакуум-апараті періодичної дії з мішалкою фірми DSSE (Данія) сумісно з ємнісним господарством:

- збірник сиропу (повна висота 2.2 м);
- збірник білої патоки (повна висота 2.2 м);
- збірник зеленої патоки (повна висота 2.2 м);
- збірник аміачної води (повна висота 2.5 м);
- утфелемішувач (горизонтально розташований апарат коритного типу).

Вакуум-апарат DSSE має парову камеру з центральною трубою і розрахований на оптимальну циркуляцію. Кип'ятильні труби виконані з нержавіючої сталі. Утфельна пара виводиться з апарату через ефективний сепаратор відцентрового типу. Патрубок введення сиропу розташований по центру під трубою.

Вакуум-апарат DSSE забезпечений двошвидкісною мішалкою, розташованою в циркуляційній трубі. Розрахунковий гідродинамічний дизайн пропелера мішалки забезпечує найкращу циркуляцію утфелю при мінімальних витратах енергії.

Технічні характеристики вакуум-апарату наведено в таблиці:

- кількість утфельної маси - 60 т;
- діаметр – 4.5 м;
- висота – 7 м;
- поверхня нагріву - 300 м²;
- діаметр труб - 102 мм;
- довжина труб - 910 мм.

На рис.1.4 наведена технологічна схема вакуум-апарату.

На схемі зображені наступні матеріальні і енергетичні потоки:

- продукту, що подається в апарат: сироп/патока/вода (витрата F_{cn} ; виконавчий пристій – $ВП_1$; команда на зміну положення $ВП$ - U_1);
- сиропу зі збірника ($ВП_2$, U_2);
- патоки зі збірника ($ВП_3$, U_3);
- аміачної води зі збірника ($ВП_4$, U_4);
- затравки: цукрова пудра або паста кристалоутворення ($ВП_5$, U_5);
- пари для пропарювання ($ВП_6$, U_6);
- пари, що гріє (F_n , $ВП_7$, U_7);
- повітряного середовища або вторинної пари до барометричного конденсатора (F_{en} , $ВП_8$, U_8);
- скидання розрідження при вивантаженні апарату ($ВП_9$, U_9);
- утфелю (F_y , $ВП_{10}$, U_{10}).

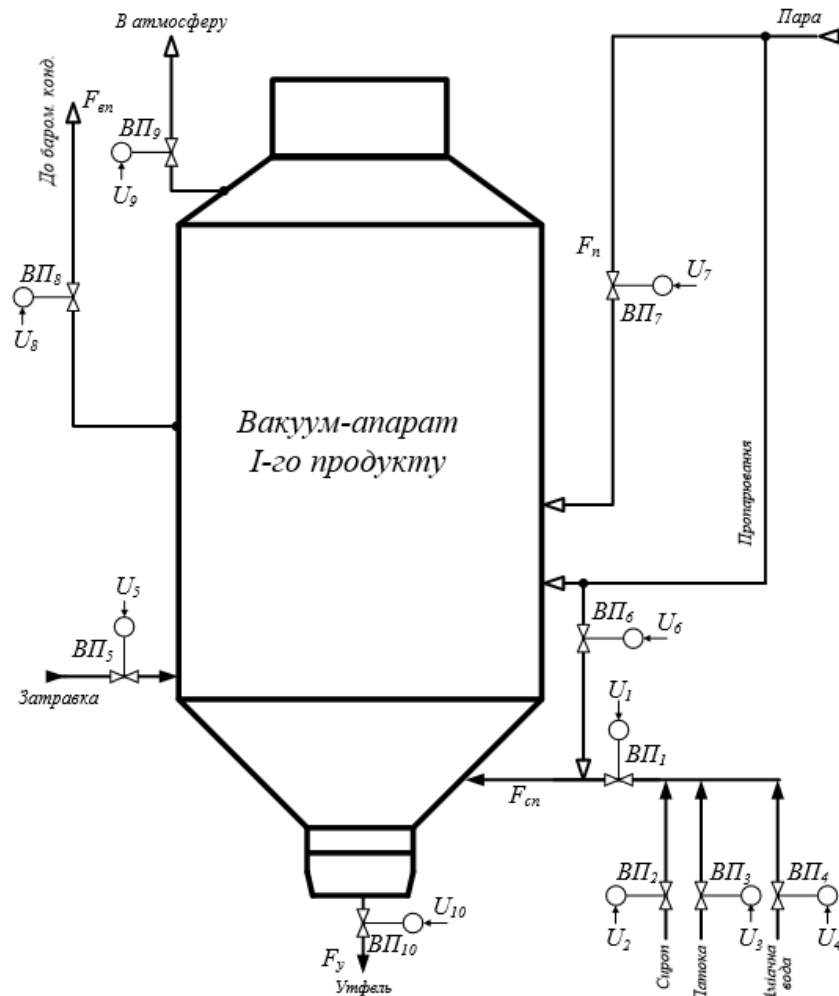


Рис.1.4. Технологічна схема вакуум-апарату I продукту

На першій стадії роботи апарату відкриттям $ВП_8$, що вбудований в основний повітряний вентиль та з'єднаний із загальною системою розрідження через сепаратор, в вакуум-апараті створюється розрідження. При досягненні розрідження 64 кПа починається набір продукту в апарат через $ВП_1$. Коли апарат заповнений на 15 % висоти парової камери, поступово відкривається $ВП_7$ на паропроводі і починається прогрів камери. Вторинна пара, що виникає при кипінні сиропу, що називається утфельною парою, під дією розрідження виводиться через сепаратор, де звільнюється від капель сиропу, поступає в вакуум-конденсаційну установку. При досягненні потрібного коефіцієнта пересичення через пробний кран $ВП_5$ вводиться затравка у вигляді цукрової пудри або пасти. Після закінчення подачі затравки апарат підживлюється сиропом або патокою (залежно від технологічного

регламенту) і починаються нарощування кристалів. При досягненні кристалами необхідних розмірів, процес уварювання припиняється і апарат вивантажується.

Управління продуктивним відділенням і вакуум-апаратом періодичної дії є досить складною задачею, для успішного вирішення якої треба враховувати велику кількість параметрів і вплив як зовнішніх (робота випарної станції, відділення центрифуг, відділення клеровки сиропів) так і внутрішніх параметрів роботи вакуум-апарата (якість сиропу, вміст сухих речовин в сиропі, температура у вакуум-апараті, рівень, електропровідність і в'язкість сиропу) та багато інших. Задачу якісного управління вакуум-апаратом періодичної дії надзвичайно ускладнюють відсутність приладів для вимірювання важливих параметрів (доброякісність сиропу, електропровідність), а також відсутність загальної теорії кристалізації цукру [6].

Уявлення про взаємозв'язок параметрів утфельного вакуум-апарату дає параметрична схема (рис.1.5).

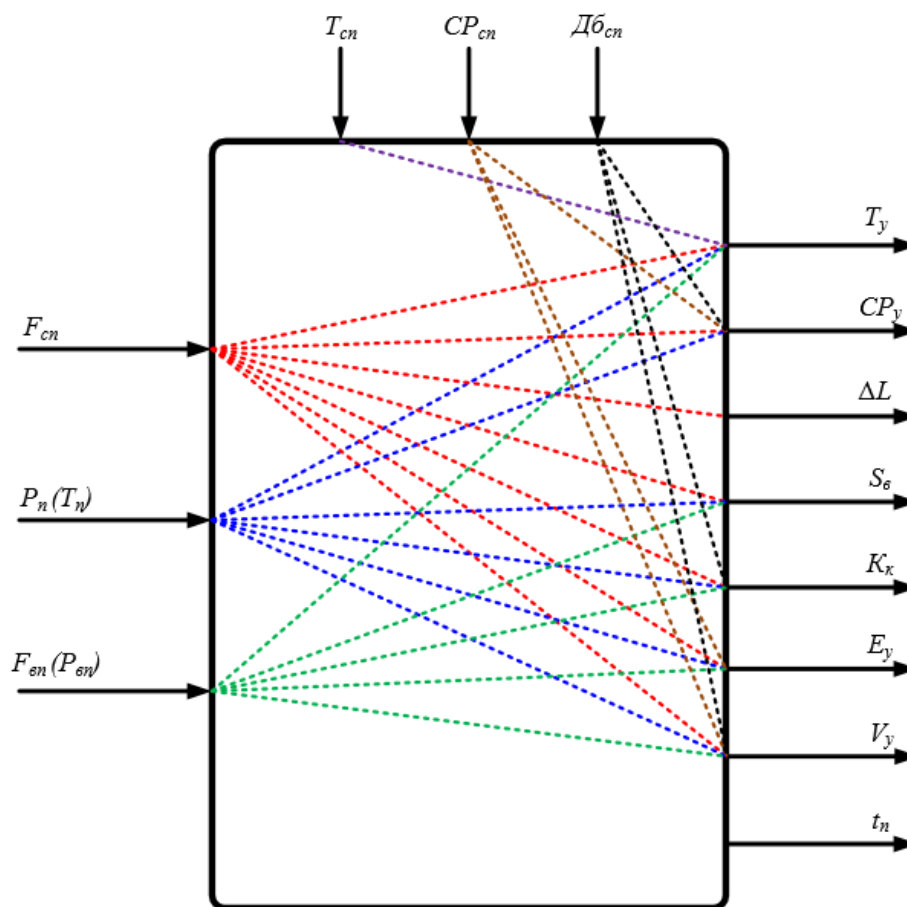


Рис.1.5. Параметрична схема вакуум-апарату

Отже, на параметричній схемі змінними керуваннями є кількість сиропу (продукту), що підкачується $F_{cn}(t)$, а також температура в гріючій камері T_n , що залежить від тиску пари P_n (витрата пари F_n) в апарат та тиск вторинної пари (розрідження в апараті) P_{en} (витрата вторинної пари F_{en}). Змінні стану: температура утфелю T_y , концентрація сухих речовин в утфелі CP_y , приріст гідростатичного рівня ΔL , швидкість випаровування S_6 , масовий вміст кристалів цукру K_k , електропровідність утфелю E_y , в'язкість утфелю V_y , тривалість процесу кристалізації t_n . Збурення: температура сиропу (продукту), що поступає з випарної станції (збірників) T_{cn} , вміст сухих речовин CP_{cn} та доброякісність продукту $Дб_{cn}$, що підкачується [7].

Зміна хоча б одного із вхідних параметрів на недопустиму величину негативно впливає на вихідні параметри готового продукту.

Значення параметрів, що вимірюються та регулюються наведені в таблиці 1.1 [8].

Таблиця 1.1.
Параметри процесу, що вимірюються та регулюються

Параметр	Регламентоване значення		Аварійне значення	
	нижнє	верхнє	нижнє	верхнє
Рівень у вакуум-апараті, %	15	95	0	100
Температура утфелю у вакуум-апараті, °С	74	78	70	82
Розрідження у вакуум-апараті, МПА	0.084	0.089	0.08	0.092
В'язкість утфелю, Па·с	10	60	5	70
Питома електропровідність утфелю, мкСм/см	50	100	40	110

За способом функціонування досліджуваний ТК – періодичний.

За кількістю виконуваних функцій досліджуваний ТК – однофункціональний.

До складу ТК (вакуум-апарати першого продукту входить 9 підсистем (ланок).

За ступеню однорідності – неоднорідне виробництво (збірники та вакуум-апарати).

За способом з'єднання елементів обраний технологічний процес має зустрічно-направлений характер.

Виробництво з накопичувальними ємностями.

Інформаційна потужність ТК – мала.

1.2 Аналіз систем автоматизації утфельних вакуум-апаратів

На сьогоднішній день існує велика кількість систем автоматизації утфельних вакуум-апаратів періодичної дії. Опис деяких з них, що впроваджені в останні роки, наведено нижче.

Через відсутність вимірювальних пристроїв здатних безпосередньо у вакуум-апаратах вимірювати концентрації сухих речовин і кристалічного цукру, а також коефіцієнт пересичення, користуються різними методами непрямого контролю [9, 10]. Найчастіше для цих цілей застосовують кондуктометричні, реометричні й ебуліоскопічні датчики.

При кристалізації цукру у вакуум-апаратах періодичної дії складається з ряду послідовно виконуваних стадій. Перехід до чергової стадії відбувається при досягненні заданих значень змінних. При автоматизованому варінні їх поточні значення визначаються за допомогою датчиків: аналогових, дискретних, часових. Керування процесом здійснюється за допомогою дискретних і аналогових клапанів.

Найбільш відомі розробки систем автоматизованого керування ВА, котрі були впроваджені починаючи з 70-х років ХХ ст.. як в НВО

«Харчопромавтоматика» (м. Одеса), так і в НВО «Цукор» (м. Київ). Перші, створювались на основі вимірювання рівня та, так званої, структурної в'язкості (консистенції) продукту у ВА, з врахуванням необхідності вимірювання (із використанням ротаційного віскозиметра) характеристик двофазного середовища: кристалів цукру і міжкристального розчину. Другі, пропонували використовувати для контролю концентрації продукту, так звану температурну депресію, тобто різницю між температурою кипіння цукрового розчину та розчинника, яка зростає зі збільшенням концентрації речовини (цукру), що розчинена, та зовнішнього тиску у ВА. Розробка, виготовлення та впровадження ротаційного віскозиметра (Піменов В.В., Ковбасюк П.П.) дозволило вимірювати консистенцію продукту за всім діапазоном змін впродовж всього циклу уварювання [11].

Система автоматичного управління вакуум-апаратами (ВА) І продукту з механічним циркулятором і збірниками та підігрівачами продуктів продуктового відділення, розроблена ТОВ "УКРМЕТСІТКА", призначена для управління і налагодження технологічного процесу, візуального відображення стану уварювання утфелів та роботи ВА і збірників та підігрівачів продуктового відділення.

Основний режим роботи системи – автоматичний. У цьому режимі кожен ВА працює в циклічному режимі, використовуючи технологічні налаштування процесу, індивідуальні для кожного ВА та автоматичне управління підігрівачами та збірниками продуктів продуктового відділення. Для збільшення надійності системи передбачено ручне управління всіма виконуючими механізмами зі SCADA системи та з окремого щита управління кожного вакуум-апарата [12].

Можливості системи автоматизації (рис. 1.6):

- автоматичне регулювання температури, обертів циркулятора у вакуум-апараті протягом всього циклу варіння;
- повністю автоматичний цикл від набору апарату до вивантаження і пропарки. Затравочний матеріал також вводиться автоматично;

- накопичення історичних трендів у БД та можливість перегляду їх за будь-який термін і в будь-який час;
- автоматичне ведення журналу зварених і вивантажених готових апаратів;
- є можливість реалізувати систему автоматизації на різних датчиках і принципах вимірювання якості і стану матеріалу у вакуум-апараті (НВЧ-аналізатор, кондуктометр, віскозиметр).

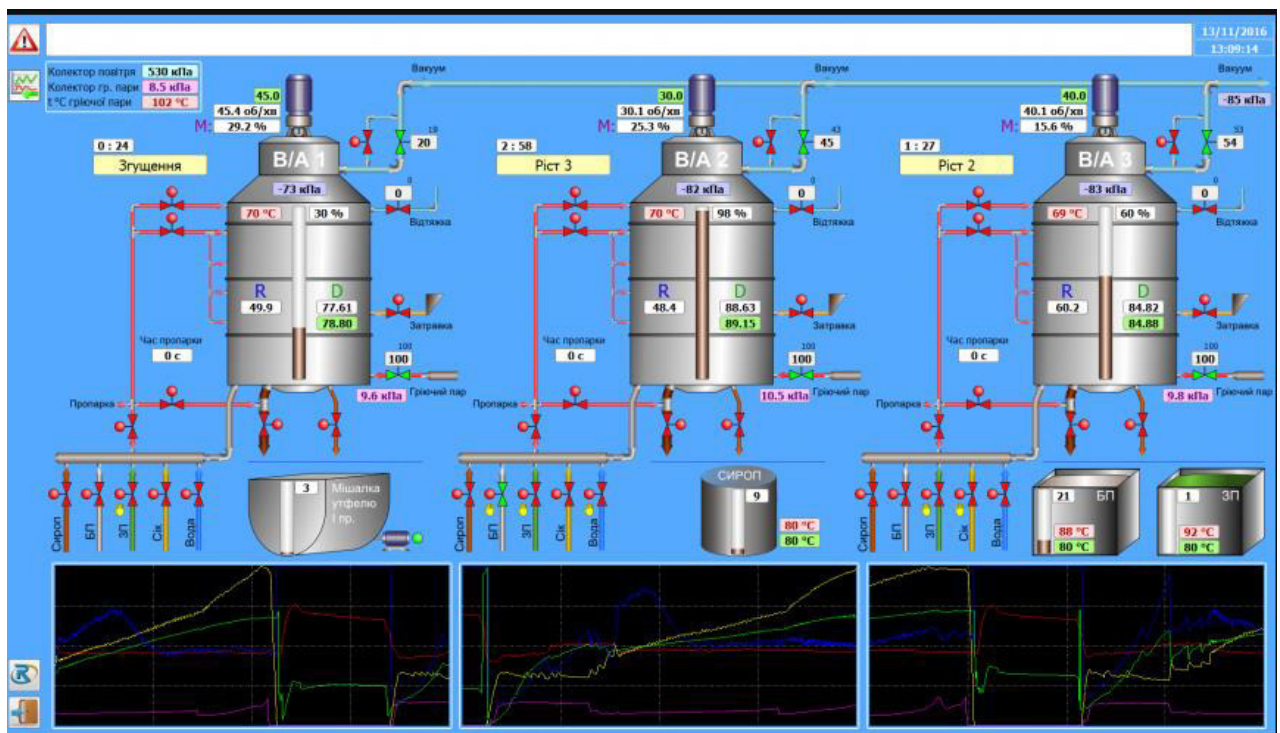


Рис. 1.6. Система автоматичного управління вакуум-апаратами, розроблена ТОВ "УКРМЕТСІТКА"

Системи були впровадженні на наступних підприємствах: ТОВ "Бучач-цукор", ОАО "Шелтон", ТОВ "Ланівці-цукор", Ланнівський цукровий завод, Іллінецький цукровий завод, Бужанський цукровий завод, ПАТ Линовицький ц/к «Красний», Юзефо-Миколаївська АПК.

Система автоматизації вакуум-апаратів I продукту розроблена та впроваджена в 2016 р. на Агарському цукровому заводі ТОВ "Магмас-Автоматик" (рис. 1.7) [13].

Особливості системи:

- виконана автоматична варка на усьому циклі роботи вакуум-апарата;
 - вимірювання СР виконується датчиками μ -ICSS 2.45;
 - вимірювання рівня виконано з допомогою двох окремих датчиків РС-28 (верхнього й нижнього) з відніманням сигналу "електричним" способом.
- Верхній датчик виконує також вимірювання розрідження в апараті.

В основі системи - контролери Modicon M340 з портом Ethernet, об'єднані мережею Modbus/TCP/Ethernet.

На щитах розташовані станції управління СУИМ 0/20-05 (аналогове управління), тумблери (дискретне управління), світлодіодні індикатори положення затворів.

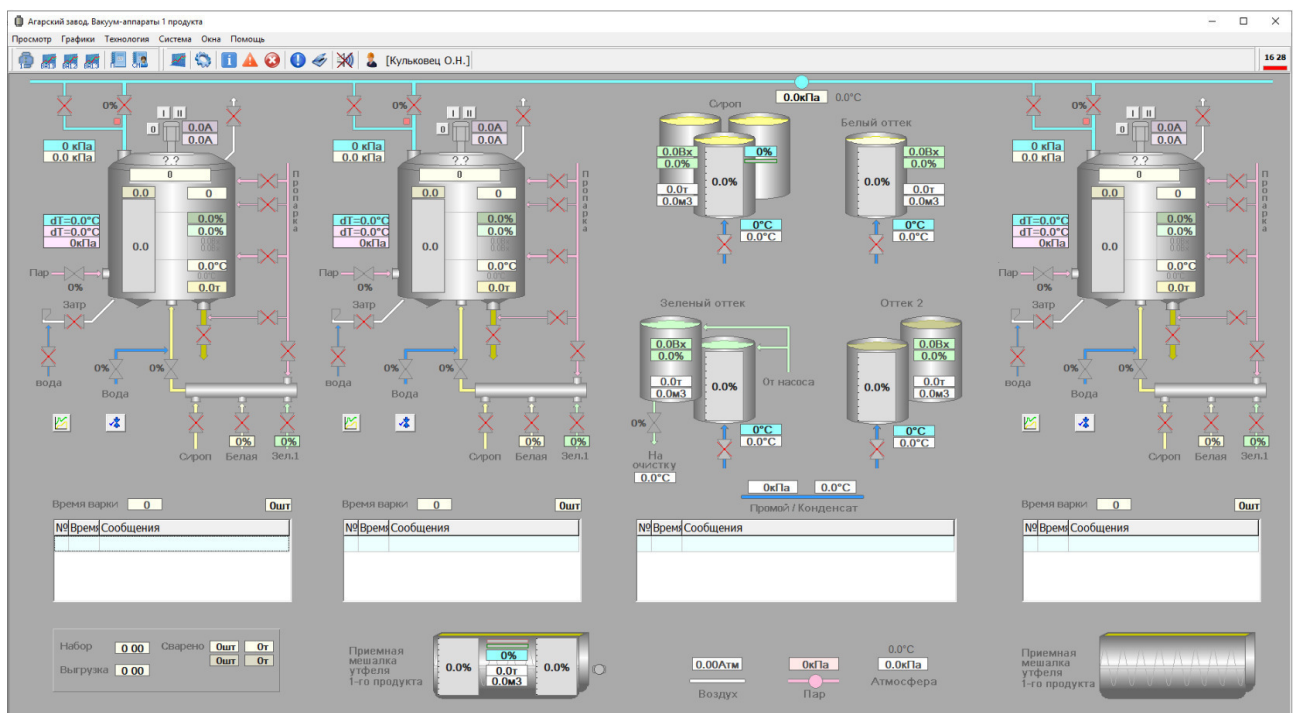


Рис. 1.7. Система автоматизації вакуум-апаратів I продукту ТОВ "Магмас-Автоматик"

Система автоматичного управління продуктивним відділенням «Тораз» компанії «Техінсервіс» на Буїнському цукровому заводі (рис. 1.8) [14].

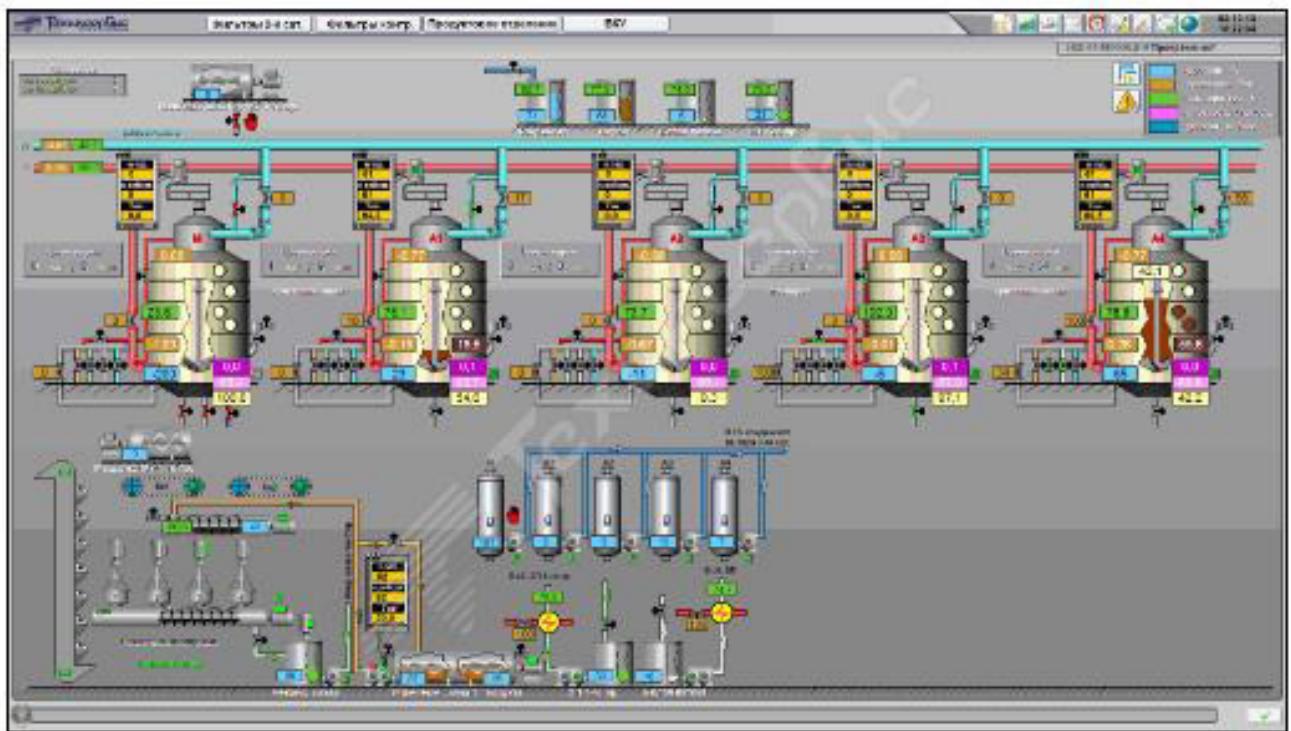


Рис. 1.8. Система автоматичного управління продуктивним відділенням «Тораз» компанії «Техінсервіс» на Буїнському цукровому заводі

Основні функції системи:

- завдання розміру основних фракцій цукру (дозволяє налаштувати варіння на певний розмір кристала в залежності від кон'юнктури ринку цукру);
- завдання часу варіння вакуум-апаратів;
- режим автостарту вакуум-апаратів (дозволяє згладити пікові навантаження споживання пара);
- автоматичне керування кристалізаційною у шляхом підтримання в ній балансу температур між утфелем і охолоджуючою водою, забезпечуючи тим самим кращий ефект кристалізації і, як наслідок, збільшення виходу цукру;
- повний контроль і управління периферійними параметрами роботи продуктового цеху:
 1. регулювання концентрації приготованих клеровок;
 2. підтримання необхідної температури оттеков і патока;

3. управління центрифугами безперервного і періодичної дії;
4. управління та сигналізація роботи насосів;
5. реєстрація технологічних параметрів і накопичення інформації за заданий період;
6. можливість дистанційного керування регулюючими органами, що входять в систему, з панелі оператора або клавіатури комп'ютера (графічні мнемосхеми представляють наочну інформацію про хід технологічного процесу, стан механізмів, режимах роботи, аварійних ситуаціях).

Одним з основних критеріїв роботи даної системи управління є висока живучість системи (тобто збереження працездатності системи управління при відмові деяких пристроїв). Для цього передбачено декілька пунктів управління:

- операторське приміщення з робочими станціями;
- операторські панелі безпосередньо біля вакуум-апаратів;
- пневматичний пульт управління.

На встановлених в операторському приміщенні операторських станціях представлена візуалізація для моніторингу та управління продуктовим відділенням з дружнім інтерфейсом. Для настройки програми варіння створені спеціальні екрани, на яких оператор або головний технолог можуть змінювати параметри варіння.

У складі системи автоматичного керування компанією «Техінсервіс» розроблена і впроваджена база знань позаштатних ситуацій для продуктового відділення. Вона описує дії системи при різкому зменшенні вакууму в колекторі, відсутності сиропу в збірнику, вільного об'єму в утфелезмішувачі, пневмо-електроживлення і т.д. Це дозволяє системі адекватно реагувати на виникаючі обставини, повністю стабілізувати технологічний процес і мінімізувати ризик помилки оператора, тим самим підвищуючи ефективність виробництва.

Недоліком є те, що однією з умов зниження питомої витрати палива – вміст сухих речовин у сиропі (клеровки) після випарної станції 72...75%. Однак, при цьому виникають додаткові труднощі в роботі вакуум-апаратів від вторинного кристалоутворення, доводиться частіше вдаватися до водних або сокових

підкачувань для ліквідації вторинних центрів кристалоутворення ("борошна"). В той же час від підкачувань неминуче розмивається "корисний" кристал, збільшуються час варіння і витрата пари. Одержання цукру у вакуум-апараті є періодичним процесом, значною мірою залежним від суб'єктивних факторів, що не може гарантувати постійної високої якості кінцевого продукту.

Одним з інноваційних впроваджень останніх років можна вважати сумісну роботу ТОВ "САУТКОМ" та команди викладачів-практиків кафедри ІАСУ Національного університету харчових технологій по впровадженню АСУ ТП приготування 1-го продукту та афінації на Чортківському цукровому заводі [15].

Система побудована на базі ПЛК Modicon M580 (Шнейдер Електрик) та SCADA Citect.

Розроблене прикладне програмне забезпечення базується на власному функціональному каркасі, який вже неодноразово використовувався для побудови АСУТП у 2017 році. Оскільки вакуум-апарати періодичної дії відносяться до класу т.з. "Batch"-процесів (рецептурні процеси), при розробці ПЗ були використані ідеї ISA-88 (IEC 61512), а саме:

- виділення процедур із формальним описом автоматів станів;
- використання двох типів режимних карт ("recipe" в термінології ISA88): активної ("Control Recipe" в термінології ISA88) та шаблону варки ("Master Recipe" в термінології ISA88), що дало змогу змінювати режимні карти за необхідності для конкретної варки, не змінюючи типові;
- запровадження Batch-архівів, де кожна варка зберігалася окремим записом, що дозволило переглядати тренди та події для кожної виділеної варки а також використану режимну карту.

Серед новинок у каркасі та людино-машинному інтерфейсі були впроваджені та апробовані:

- групове налагодження каналів, що дало змогу діагностувати (контроль працездатності/достовірності, прив'язки до змінної, перевірка значення) та

конфігурувати велику кількість каналів (порядку 120 AI, 60 AO, 300 DI, 200 DO) використовуючи невелику кількість змінних вводу/виводу SCADA;

- керування серводвигунними виконавчими механізмами з контролем та блокуванням по обриву датчиків кінцевого положення, можливістю самовизначення часу ходу при конфігуруванні;

- контекстні налагоджувані вікна, що дають можливість змінювати конфігурацію технологічної змінної, форсувати її, виводити з експлуатації і т.п.

- контекстні тренди з параметру відображення.

Розглянуті системи автоматизації utfельних вакуум-апаратів мають один суттєвий недолік, всі вони не вирішують задачу оптимізації процесу уварювання, а тільки дозволяють стабілізувати технологічні параметри процесів кристалізації.

1.3 Аналіз нештатних ситуацій при роботі вакуум-апарату

Система управління кожного вакуум-апарата працює по своїй програмі, яка аналогічна для всіх апаратів. В процесі роботи вакуум-апарата можуть виникати ситуації відхилення технологічних параметрів, які ідентифікуються як конфліктні [16]. Їх утворення призводить до зменшення ефективності виробничого процесу не тільки в вакуум-апараті, а і в самому технологічному комплексі [17]. Складність виявлення та ідентифікації таких ситуацій полягає в тому, що процес масової кристалізації цукру відноситься саме до складних систем, які характеризуються такими параметрами:

- кількість вхідних параметрів більше восьми;
- кількість вихідних параметрів (керування) п'ять;
- відсутня формальна модель масової кристалізації цукру;

– система має всі ознаки динамічної. Постійна зміна параметрів продукту, гріючої пари, розрідження в апараті, що змінює головні засади процесу кристалізації [18, 19].

Нештатні ситуації в роботі вакуум-апарата періодичної дії розділяються на такі типи [16]:

1) аварійні – відмова виконавчих приладів і датчиків контролю технологічних параметрів процесу. Виникнення таких ситуацій робить неможливим подальше ведення процесу і потребує втручання оперативного персоналу для їх усунення;

2) конфліктні – не призводять до аварійного стану системи, а значно погіршують технологічні і якісні параметри технологічного процесу, а також знижують ефективність використання технологічного комплексу.

Особливість конфліктних ситуацій відзначається їх поступовим виникненням в роботі вакуум-апарата періодичної дії і подальших поширенням на весь технологічний комплекс.

Виходячи з агентної структури пріоритетним виявленням конфліктів є контроль за роботою вакуум-апарата періодичної дії як агента технологічного комплексу. А на аналізі стану вакуум-апарата можна проводити і аналіз всього технологічного комплексу.

В якості системи контролю за виникненням нештатних ситуацій використовується фреймова структура, яка розглянута в роботі [20, 21] для управління вакуум-апаратом періодичної дії, але з деякими відмінностями.

Доцільно фреймову систему виявлення конфліктних ситуацій створити як групу фреймів конфліктних ситуацій для кожної стадії роботи вакуум-апарата де індивідуальний фрейм контролює призначену стадію роботи.

Для уніфікації структури фрейму конфліктів і зменшення розмірів загальної системи фреймів в його структуру вводяться і функції виявлення аварійних ситуацій.

Для виявлення аварійних ситуацій відмови в роботі виконавчих пристроїв формується система продукційних правил. Її основна функція – це відстеження положення виконуючого пристрою до відповідності управляючої команди.

Більш складною задачею є виявлення і ідентифікація конфліктних ситуацій. Така складність обумовлена тим, що виникнення конфліктної ситуації спричинене відхиленням декількох технологічних параметрів від заданого регламенту.

Нижче наведена структура фрейму конфліктних ситуацій для стадії «НАБІР АПАРАТУ». Так як фрейм окрім контролю конфліктних ситуацій також включає в себе функції контролю аварійних ситуацій, то він буде мати багаторівневу структуру: *перший рівень* – контроль аварійних ситуацій; *другий рівень* – контроль конфліктних ситуацій; *третій рівень* – сервісний.

Нижче приведений фрагмент опису середовища об'єкта, який складається з п'яти пунктів.

1. При готовності вакуум-апарату до роботи і отриманні сигналу на початок роботи (може видаватися автоматично або оператором) відкривається дискретний клапан подачі сиропу в апарат і запускається інтервальний таймер підрахунку часу набору. При досягненні значення рівня набору 15 % необхідно ввімкнути циркулятор на мінімальні обороти при його наявності. При досягненні 99 % заданого рівня набору поступово відкривається клапан подачі гріючої пари, щоб «не зірвати» тиск пари на випарній станції. При досягненні заданого рівня набору закривається клапан подачі сиропу і зупиняється таймер набору. Система переходить на наступну стадію технологічного процесу із використанням відповідного, до стадії, фрейму конфліктних ситуацій.

2. Визначення основних і додаткових технічних параметрів. Основні параметри: заданий рівень початкового набору в апараті, поточний рівень в апараті. Додаткові параметри: температура у вакуум-апараті, розрідження, тиск гріючої пари, швидкість обертів циркулятора, момент на валу циркулятора.

3. Визначення інтервальних параметрів. Час набору апарату граничний, час набору поточний.

4. Визначення додаткових відомостей. Клапан подачі сиропу – дискретний, клапан подачі пари гріючої – аналоговий, клапан регулювання температури (розрідження) – аналоговий, пар подається повільно, оберти циркулятора на даному етапі – постійні, момент на валу циркулятора не повинен перевищувати 30 % від максимального (регулюється обертами).

5. Додатковий опис середовища об'єкта при нештатних ситуаціях. При виникненні аварійної ситуації стану виконуючих пристроїв, яка ідентифікується фреймом конфліктної ситуації *першого* рівня – робота вакуум-апарата припиняється. При виникненні нештатної ситуації «Недостатній рівень на наборі» фрейм конфліктної ситуації *другого* рівня ідентифікує причину виникнення ситуації і інформує систему про причину виникнення ситуації.

Причини виникнення вказаної ситуації:

– недостатня пропускна можливість колектора підводу продуктів в вакуум-апарат, як наслідок інкрустації цукру на внутрішній поверхні колектора;

– відхилення технологічних параметрів в вакуум-апараті (температура, розрідження) від робочих значень. Внаслідок зниження розрідження в вакуум-апараті зменшується швидкість набору до заданого рівня сиропом. При зниженні розрідження температура в вакуум-апараті підвищується.

На основі фрагменту опису середовища об'єкта на стадії «НАБІР АПАРАТУ» створюється фрейм конфліктних ситуацій дворівневого типу.

Перший рівень – контроль аварійних ситуацій.

Другий рівень – контроль конфліктних ситуацій.

Аналогічно розробляються фрейми для інших стадій.

1.4 Аналіз каналів керування системи автоматизації вакуум-апарату

Під час виконання передпроектних досліджень використовувались методи порівняльного аналізу варіантів структури системи із застосуванням різних технічних та програмних засобів, з урахуванням факторів, що викладені вище, стосовно попередньо створених на заводі систем керування.

Кожну стадію технологічного процесу можна вважати окремим локальним об'єктом управління, а сукупність змінних, що впливають на продукцію, можна поділити на вхідні та вихідні змінні. Зміна хоча б одного із вхідних параметрів на недопустиму величину негативно впливає на вихідні параметри готового продукту.

Наприклад, недостатній час уварювання сиропу, розрідження усередині вакуум-апарату та якість кристалів затравки впливають на розмір кристалів.

На рис. 1.9 наведена структурна схема АСР розрідження у вакуум-апараті, в якому основним збурюючим впливом є тиск вторинної пари (витрата).

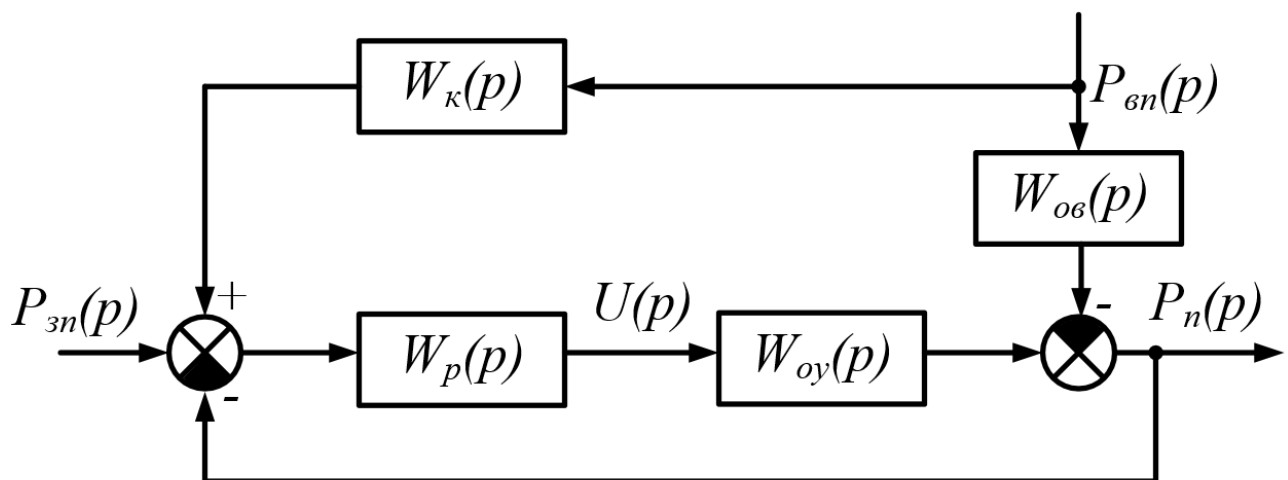


Рис. 1.9. Структурна схема комбінованої АСР розрідження:

$W_{oy}(p)$, $W_{ov}(p)$ – передатні функції об'єкту по управляючому і збурюючому впливам; $W_p(p)$ – передатна функція регулятора; $W_k(p)$ - передатна функція компенсатора; $P_{zn}(p)$, $P_n(p)$ – поточне значення розрідження і його завдання; $P_{vn}(p)$ – витрата вторинної пари

На підставі структурної схеми можна записати вираз для зображення розрідження $P_n(p)$:

$$P_{\Pi}(p) = \frac{W_p(p) \cdot W_{Oy}(p)}{1 + W_p(p) \cdot W_{Oy}(p)} \cdot P_{3\Pi}(p) + \frac{W_{OB}(p) - W_K(p) \cdot W_p(p) \cdot W_{Oy}(p)}{1 + W_p(p) \cdot W_{Oy}(p)} \cdot F_{B\Pi}(p) \quad (1.1)$$

Ця формула може бути переписана в такому вигляді:

$$P_{\Pi}(p) = W_{3.c.}(p) \cdot [P_{3\Pi}(p) + W_{OB}(p) \cdot P_{B\Pi}(p)] \quad (1.2)$$

Частина системи з передатною функцією замкненої системи по управляючому впливу

$$W_{3.c.}(p) = \frac{W_p(p) \cdot W_{Oy}(p)}{1 + W_p(p) \cdot W_{Oy}(p)} \quad (1.3)$$

визначає стійкість, а частина системи з передатною функцією

$$W_{3OB}(p) = \frac{W_{OB}(p)}{W_p(p) \cdot W_{Oy}(p)} - W_K(p) \quad (1.4)$$

є фільтром, через який проходить і-е збурення, перш ніж увійти на вхід регулятора у вигляді управляючого впливу. Як бачимо з рівняння (1.3), передатна функція обладнання введення впливів по збуренням не входить у вираз для передатної функції замкненої системи, тому збільшення точності роботи системи можна робити, не впливаючи на її стійкість. Зокрема, якщо передатну функцію обладнання введення, довільного і-ого збурення вибрати з умови

$$W_K(p) = \frac{W_{OB}(p)}{W_p(p) \cdot W_{Oy}(p)} \quad (1.5)$$

тоді, з формул (1.1) і (1.4) випливає, що відхилення регульованої величини при дії цього збурення буде зовсім відсутнє, тому що фільтр у цьому випадку зовсім не пропускає впливів. Рівняння (1.5) є умовою абсолютної інваріантності регульованої величини щодо обраного і-ого, збурюючого впливу.

Якщо регулятор розрідження є ПІІ-регулятором з передатною функцією

$$W_p(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_{up}} \right) = \frac{K_p(T_{up}p + 1)}{T_{up}p} \quad (1.6)$$

а передатні функції об'єкта з управління і збурюючих дій однакові, тобто $W_{OB}(p) = W_{OY}(p)$, то згідно з рівнянням (1.5) передатна функція компенсатора $W_K(p)$ дорівнює:

$$W_K(p) = \frac{1}{W_p(p)} = \frac{T_{up}}{K_p(T_{up}p + 1)} \quad (1.7)$$

Таким чином, для виключення впливу на розрідження коливання витрати вторинної пари, компенсатор має бути реальною диференціюючою ланкою.

Згідно з попередніми міркуваннями структурна схема АСР температури у вакуум-апараті, в якій основним збурюючим впливом є тиск пари, наведена на рисунку 1.10, тобто вона аналогічна схемі (рис. 1.9). Тому усі положення та вирази відносно АСР розрідження стосуються і АСР температури.

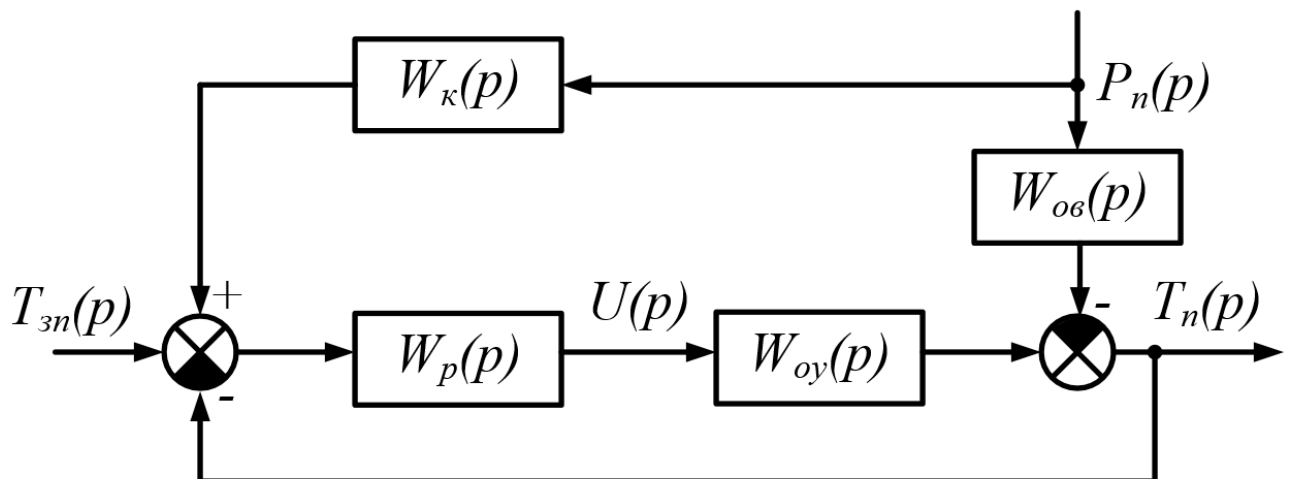


Рис. 1.10. Структурна схема комбінованої АСР температури:

$W_{oy}(p)$, $W_{ov}(p)$ – передатні функції об'єкту по управляючому і збурюючому впливам; $W_p(p)$ – передатна функція регулятора; $W_K(p)$ – передатна функція компенсатора; $T_{zn}(p)$, $T_n(p)$ – поточне значення температури і її завдання; $F_n(p)$ – витрата пари в апарат

Узагальнену структуру САК уварювання утфелю можна представити у вигляді схеми, що наведена на рис. 1.11.

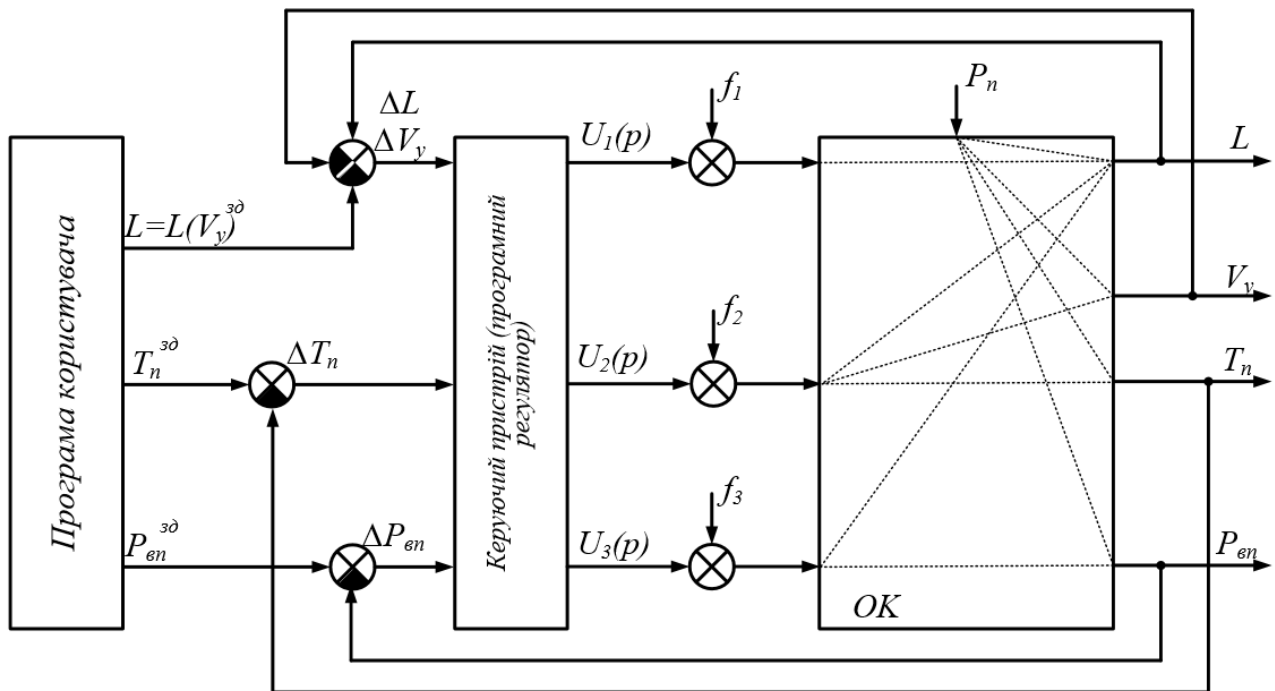


Рис. 1.11. Узагальнена структура САК уварювання утфелю

ВА як об'єкт керування має ряд особливостей. У ньому присутні перехресні зв'язки змінних та велика кількість збурюючих впливів, автоматичний контроль значної кількості котрих є дуже утрудненим, оскільки пов'язаний із якісним складом вихідного продукту. Суттєвий вплив на вихідні змінні оказує тиск гріючої пари, що йде як вторинна із другого корпусу ВС. Крім того, в циклі кристалізації, витрата пари, що гріє, є нерівномірною і залежною від стадії уварювання та конструктивних особливостей ВА [11].

В [22] наведені подібні залежності, котрі були отримані експериментально, для конкретної модифікації ВА продуктового відділення цукрорафінадного заводу, але розповсюджувати їх для всіх аналогічних конструкцій ВА бурякоцукрового виробництва є недоцільним без дослідження індивідуальних характеристик ВА та процесів варки в них утфелю. У тому ж джерелі наведені рекомендації щодо зменшення коливань тиску гріючої пари для групи ВА періодичної дії, котра базується на оптимальному керуванні моментом запуску в роботу кожного окремого апарата в групі. Проведення аналогічних експериментальних досліджень для кожного ВА є достатньо витратними та технічно складними.

Відомі також дослідження з пошуку оптимальних змін заданої температури в просторі ВА в процесі уварювання утфелю у ВА з метою скорочення загального часу циклу варки утфелю. В той же час на ці залежності також суттєво впливають індивідуальні особливості конструкції ВА та складу вихідних продуктів, тому оцінювання параметрів цих залежностей доцільно проводити експериментально під час роботи САК, що здійснює автоматичну варку.

На процес варки утфелю впливають збурення, а саме CP_{cn} , T_{cn} , $Дб_{cn}$, які є стохастичними. Реальна частота зміни збурень дозволяє зробити припущення, що для кожного варіння збурення змінюються один раз на її початку. Аналізуючи експериментальні дані, встановлені такі межі зміни збурень: CP_{cn} - вміст сухих речовин в сиропі, який підкачується, змінювався в межах [62 – 66] %СР; T_{cn} - температура сиропу (продукту), який поступає з випарної станції, в межах [72-78] °С; $Дб_{cn}$ - доброякісність сиропу, який підкачується; в межах [90-93] од. Дб.

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНОСИСТЕМНІ РІШЕННЯ

2.1 Розробка підсистеми управління процесом кристалізації у вакуум-апараті

2.1.1 Опис функціональної схеми автоматизації

Таким чином, для створення модернізованої САК процесом кристалізації у вакуум-апараті потрібно було, використовуючи досвід останніх розробок, враховуючи досвід робітників служби КВПіА заводу з роботи і обслуговування мікропроцесорних контролерів та регуляторів "МІКРОЛ" (м. Івано-Франківськ), а також сенсорних панелей Weintek, що встановлені на інших ділянках заводу, розробити АРМ оператора варщика для нового ВА.

Схема автоматизації технологічного процесу кристалізації зображена на 1 креслені (функціональна схема автоматизації).

Алгоритм автоматичної варіння.

Виконується при виборі режиму роботи АВТ на екрані операторської станції на кадрі ВА.

Стадії процесу.

Порожній - стадія 0.

Оператор на екрані операторської станції (кадр ВА) або на щиті управління натискає кнопку СТАРТ (SB1). Перехід в стадію 1.

1. ГОТОВНІСТЬ (початок циклу) - стадія 1.

Проходить команда на закриття всіх клапанів: обертові заслінки Vanessa серії 30.000 з позиціонерами EaziCal (поз. 2в, 4б, 7а); крани шарові TYCO F190 2P DN 25, PN 40 з двійковими пневмоприводами PremiAir-002 та електромагнітними клапанами 5/2 F791N 24VDC (поз. 4а, 5а, 6а, 11а, 12а, 14а, 15а, 16а), зупинка циркулятора (керування двигуном частотним перетворювачем Веспер EI-7011 (поз.

8а), відкриття крану шарового TУСО (поз. 13а) скидання вакууму. Перевіряється готовність клапанів: всі клапана повинні бути закриті, крім клапана скидання вакууму. Зауважень до системи автоматики немає.

Автоматична перевірка достатності сиропу для набору $L_{зс} \geq 65\%$.

Вимірювання рівня здійснюється перетворювачем тиску РС-28 з фланцевим плоским роздільником типу S-P (поз. 1а). Сигнал з перетворювача передається до мікропроцесорного індикатора ІТМ-111 (поз. 1б). З індикатора сигнал поступає до ПЛК МІК-52Н, де програмно обробляється.

При готовності клапанів і достатньому рівні сиропу в збірнику на екрані операторської станції відображається готовність апарату до набору, звукове повідомлення «АПАРАТ ГОТОВИЙ ДО НАБОРУ». Клапан скидання вакууму (поз. 13а) закривається. Перехід в стадію 2.

2. НАБІР ВАКУУМУ - стадія 2.

Розрідження у вакуум-апараті вимірюється за допомогою перетворювача тиску РС-28 (поз. 2а), з якого уніфікований струмовий сигнал надходить до ІТМ-111 (поз. 2б). Індикатор містить вбудований блок живлення для датчика. Далі сигнал поступає до МІК-52Н.

Оператор, клапаном малого вакууму починає створювати розрідження у ВА. Після падіння розрідження в апараті до заданого значення $R_{вп} = - 0.62 \text{ кгс/см}^2$, відкривається вакуумний клапан (поз. 2в), регулятор переводиться в режим АВТ, завдання $= - 0.80 \text{ кг/см}^2$. При досягненні заданого розрідження $R_{вп} = - 0.68 \text{ кг/см}^2$, перевіряється стабільність витримування вакууму в апараті по $R_{вп}$. Якщо протягом 1 хв. розрідження не падає нижче $- 0.76 \text{ кг/см}^2$ і рівень сиропу в збірнику $L_{зс} \geq 40\%$, відбувається перехід в стадію 3.

3. НАБІР ПРОДУКТУ - стадія 3.

Одночасно відкриваються клапани: дискретні подачі продукту (поз. 5а), подача сиропу (поз. 4а) і аналоговий (поз. 4б) - підкачка сиропу.

Для вимірювання рівня у ВА застосовується інтелектуальним перетворювачем перепаду тиску APR-2200 з дистанційними роздільниками (поз.

3а). Сигнал з перетворювача передається до ІТМ-111 (поз. 3б) та до МІК-52Н. При досягненні рівня $L_{ва} = 5\%$ включається циркулятор в режимі "ШВИДКО" (поз. 8а).

При досягненні рівня $L_{ва} = 15\%$ включається в автоматичний режим контур стабілізації тиску пари на завданні $R_{п_завд1}$ (згідно графіку варіння). Для вимірювання тиску пари, в трубопроводі встановлено перетворювач тиску РС-28 (поз. 21а). Сигнал, пропорційний тиску, подається до індикатора ІТМ-11 (поз. 21б) та до МІК-52Н.

Автоматично підтверджується достатність сиропу $L_{зс}$ для набору. При рівні в збірнику сиропу $< 5\%$ клапан (поз. 4а) - подача сиропу і (поз. 4б) - підкачка сиропу закриваються. При рівні в збірнику сиропу $> 10\%$ клапан подачі сиропу і підкачки сиропу відкриваються.

По досягненню рівня $L_{ва} = 27\%$ клапан подачі сиропу (поз. 4а) закривається, збільшується завдання подачі пари на вакуум-апарат до значення $R_{п_завд2}$.
Перехід в стадію 4.

4. ЗГУЩЕННЯ - стадія 4.

Переводиться в автоматичний режим утримання рівня (стабілізація) $L_{ва} = 27\%$ за допомогою клапана підкачки (поз. 4б). Заведення й початкове нарощування кристалів ведеться по кондуктометру НПЭ-04, що складається з електрода (поз. 9а) та нормуючого перетворювача (поз. 9б), а закінчення росту кристалів й уварювання утфелю - по віскозиметру (ротаційний датчик віскозиметра РДВ-02 (поз. 10а) та нормуючий перетворювач віскозиметра НВП-03 (поз. 10б). Така послідовність обумовлена специфікою роботи кожного з датчиків. Кондуктометр добре відслідковує пересичення сиропу з невеликим масовим вмістом кристалів (поки кристали дрібні) й дає можливість вести варку на початкових стадіях. З ростом кристалів його покази припиняють об'єктивно відображати стан міжкристального розчину, і варка ведеться по віскозиметру, який надійно відслідковує зміни в'язкості утфелю з кристалами 0.2 мм і більше.

При досягненні значення, відповідному зоні "Підготовка зерноутворення", виконуються наступні дії:

- 1) плавно зменшуються завдання за парою ВА до величини $R_{п_зад3}$;

- 2) припиняються підкачки сиропом (завдання регулятора $K_{подк} = 0\%$);
- 3) оператору видається повідомлення "Закладіть затравку".

Мета - плавне наближення до моменту затравки. Плавне наближення до точки зерноутворення забезпечить своєчасне введення центрів кристалізації. Після заповнення затравкою ємності крана (поз. ба), автоматично короткочасно відкривається клапан затравки. При цьому вводяться центри кристалізації, заздалегідь підготовлені у вигляді затравочної пудри або суспензії. Перехід в стадію 5.

5. РОЗКАЧКА – стадія 5.

Для утворення рівномірних кристалів одночасно з введенням затравки пудри підкачують невелику кількість сиропу або паток (іноді води). Після введення цукрової пудри через кран починають відбирати проби сиропу на скло і спостерігають за кількістю уворених кристалів. Для отримання кристалів середнього розміру (близько 3000 в 1 г цукру-піску) потрібно, щоб на 1 мм довжини скла розміщувалося 5 - 6 кристалів (зародків).

Своєчасна заводка кристалів і припинення їх утворення мають важливе значення для процесу уварювання і якості готового утфеля. Чим більше центрів кристалізації утворюється у момент заводки, тим будуть менше розміри кристалів цукру, і навпаки, чим менше введено центрів кристалізації, тим крупніші кристали в готовому утфелі. Утфель з крупними кристалами легше центрифугується і пробілюється, але довше уварюється, в ньому більше випадає «борошна». В сиропи з низкою доброякісністю затравки вводять приблизно в 2 рази більше, оскільки швидкість кристалізації сахарози в таких сиропах нижче, і якщо площа поверхні кристалізації буде недостатньою, то при згущуванні утфеля сахароза не встигає викристалізуватися, що приводить до підвищення пересичення розчину і випадання «борошна».

Як тільки в уварюваній масі після введення затравки з'явиться достатня кількість зародків (5—6 на 1 мм), у вакуум-апарат підкачують деяку кількість сиропу для зниження коефіцієнта пересичення до 1.08 - 1.12, тобто пересичення сиропу переводять в метастабільну зону, коли нові кристали не утворюються, а

ростуть ті, що вже є. Підкачки сиропу, зроблені в цей час, називаються закріпними, оскільки кристали швидко ростуть (закріплюються).

Сироп на закріпні підкачки беруть невеликими порціями і вводять так, щоб не розбавити міжкристальний розчин до ненасиченого стану і не розчинити кристалів, що утворилися [22].

Керування підкачками здійснюється згідно алгоритму клапанами поз. 5а, 4б. При необхідності подачі у вакуум-апарат паток або води задіюються клапани поз. 11а, 12а, 16а.

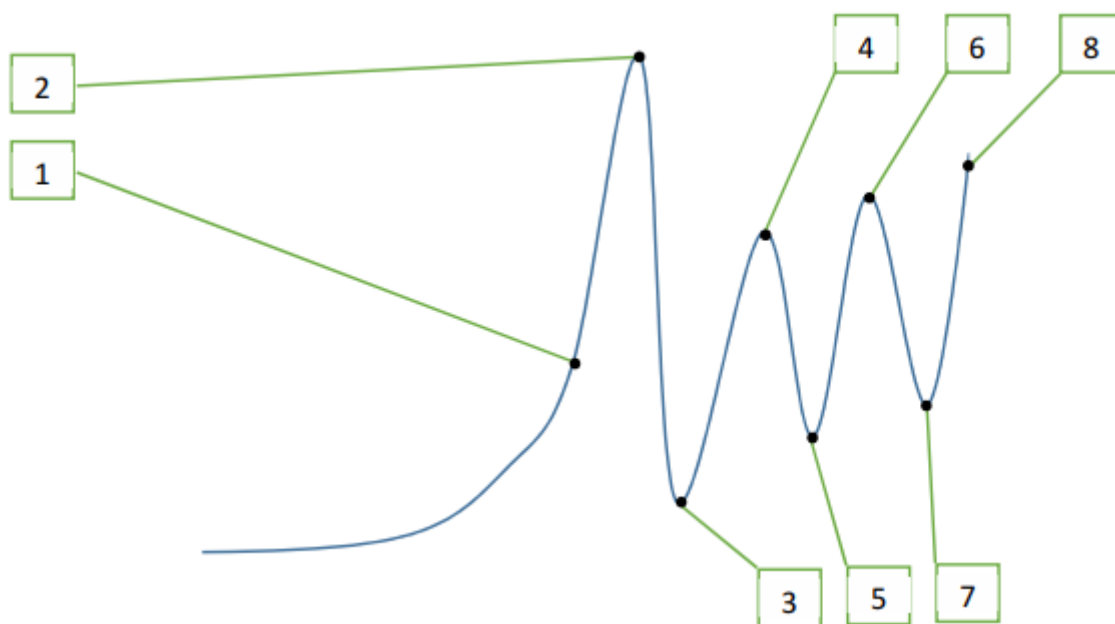


Рис. 2.1. Графік розкачок

- 1 – точка введення затравочного матеріалу (Затравка при E[%])
- 2 – точка, до якої відбувається згущення після введення затравочного матеріалу перед початком розкачок (Згущення до [E])
- 3 – точка, до якої відбувається Розкачка №1
- 4 – точка, до якої відбувається Згущення №1
- 5 – точка, до якої відбувається Розкачка №2
- 6 – точка, до якої відбувається Згущення №2
- 7 – точка, до якої відбувається Розкачка №3
- 8 – точка, до якої відбувається Згущення №3

6. РІСТ - стадія 6 (нарощування кристалів до заданих розмірів без утворення нових).

Завдання контуру підтримки пара R_p плавно піднімається до заданого значення $R_{p_завд4}$.

Пересичення міжкристального розчину шляхом своєчасних підкачок підтримується в межах 1.05 – 1.10, що запобігає утворенню нових кристалів і розчинення вже утворених.

В'язкість вимірюється віскозіметром, який складається з ротаційного датчика РДВ-02 (поз. 10а) і нормуючого перетворювача НВП-03 (поз. 10б). Сигнал про величину в'язкості відображається на перетворювачі та передається до ПЛК.

Стадія проводиться в три етапи: РІСТ 1, РІСТ 2, РІСТ 3.

На етапі РІСТ 1 процес ведеться за рівнем і в'язкістю за програмою.

На етапі РІСТ 2 уварювання також проводиться по в'язкістю.

На етапі РІСТ 3 уварювання утфелю проводиться по в'язкості. При цьому визначається по команді оператора і за наявністю відтоків в збірнику характер ведення подальшого процесу - уварювання до готовності тільки на сиропі (перехід на стадію 8) або із застосуванням відтоків (перехід на стадію 7, відбір паток до встановлених в настроювальному кадрі рівнів ВА, перехід на стадію 9).

Перемикання програми по етапам сходами відбувається за рівнем в вакуум апараті, необхідні завдання встановлюються в процесі технологічної наладки системи.

Підкачки сиропу в вакуум-апарат виробляються безперервно, а відтоків - в дискретному режимах.

7. ВІДТІК - стадія 7. (подальше нарощування кристалів при підкачування зеленої і білої паток клапанами (поз. 11а, 12а) відповідно. По команді оператора стадія може ігноруватися і процес уварювання до готовності проводиться на сиропі. Перехід на стадію "відтік" проводиться за заданим рівнем Lва. Підкачка відтоку проводиться по в'язкості і за рівнем.

Стадія проводиться в два етапи: Відтік 1 і Відтік 2.

На етапі Відтік 1 підкачуються біла патока клапаном 11а після досягнення заданого рівня в вакуум-апараті або при значенні рівня в збірнику білої патоки Lбп нижче мінімального заданого. Рівень в збірниках білої та зеленої паток вимірюється перетворювачами тиску РС-28 з фланцевим плоским роздільником

типу S-P (поз. 17а, 18а). Сигнали, пропорційний рівню, подаються до індикаторів ІТМ-11 (поз. 17б, 18б) та до МІК-52Н.

Перехід на етап Відтік 2 проводиться, якщо оператор дозволяє цей перехід.

На етапі Відтік 2 підкачуються зелена патока клапаном (поз. 11а) за тією ж програмою, при наявності достатнього рівня Лзп. Після досягнення рівня в ВА значення рівня закінчення зростання - перехід на стадію 8.

Необхідність підкачок зеленої патоки визначається змінним технологом за якістю цього відтоку.

8. УВАРЮВАННЯ - стадія 8.

Завдання тиску пари підвищується до значення $P_{пар_зад5}$.

Підкачка продуктів припиняється і проводиться уварювання по в'язкості до заданого значення готовності. Після досягнення в'язкістю значення готовності або по команді оператора видається сигнал "АПАРАТ ГОТОВИЙ", закривається клапан пари (поз. 7а), клапан розрідження (поз. 2в). Система знаходиться в стані очікування команди оператора приступити до вивантаження, яка дається за допомогою кнопки затравки на пульті управління. Перехід на стадію 9.

9. ВИВАНТАЖЕННЯ - стадія 80.

Зупиняється циркулятор. Відкривається клапан скидання вакууму (поз. 13а) і при досягненні вакууму в апараті значення мінус 0.12 кг/см^2 - відкривається клапан вивантаження (поз. 14а).

10. ПРОПАРЮВАННЯ - стадія 10.

Після спорожнення апарату $L_{ва}=0$ відкривається клапан пропарювання ВА (поз. 12а), і клапан введення затравки (поз. 6а). Стадія проводиться за часом або по досягненню заданої температури $T_{ва}$ ($104 \text{ }^\circ\text{C}$). Температура у вакуум-апараті контролюється перетворювачем температури СТР-4 (поз. 20а). З датчика уніфікований сигнал відображається на індикаторі ІТМ-111 (поз. 20б) та подається для обробки на МІК-52Н. Час пропарювання встановлюється при налагодженні системи.

11. КІНЕЦЬ циклу - перехід на стадію 00.

Паровий клапан пропарювання ВА (поз. 12а), клапан введення затравки ба і

вивантаження ВА (поз. 11а) закриваються. Відкритою залишається тільки задвижка скидання вакуума (поз. 13а). Апарат готовий до наступного циклу.

При розрідженні $P < 55\%$ блокуються підкачки (закриваються всі продуктові клапани).

При розрідженні $P < 50\%$ або високій температурі $T_{ва}$ блокується подача пари.

Вищеописана послідовність операцій уварювання утфелю першої кристалізації в вакуум-апаратах періодичної дії є орієнтовною і повинна уточнюватися в процесі реальних варок.

При цьому в режимі дистанційного керування оператор веде процес варіння, а система автоматично фіксує її параметри. За допомогою лабораторних аналізів оцінюються якісні та кількісні характеристики кожної варки. За кращих результатів приймається уточнена послідовність і технологічний алгоритм процесу.

Системою також передбачено контроль температури в збірниках сиропу, білої та зеленої паток, аміачної води, пари. Контроль реалізовано комплектом: перетворювачі температури СТР-4 (поз. 22а - 27а), індикатори ІТМ – 111 (поз. 22б - 27б).

Мета процесу варіння (і відповідно системи автоматики) - планомірне зародження і подальше нарощування кристалічної маси з якісним гранулометричним складом. Тому для правильного управління процесом варіння необхідний прямий контроль кристалів сахарози на всіх етапах кристалізації.

Існуючі системи варіння керують процесом, ґрунтуючись на вимірюванні непрямих показників (в'язкість, низькочастотна провідність, провідність в НВЧ-діапазоні - так звані мікрохвильові густиноміри).

Надвисокочастотні (НВЧ) аналізатори концентрації.

Їх також називають "бріксометрами". Використовуються такі аналізатори для вимірювання вмісту сухих речовин в багатоконпонентних середовищах.

Основні застосування датчика на цукровому заводі:

- вимірювання % сухих речовин (Вх) сиропу після випарної установки;
- вимірювання Вх клеровки цукру;
- вимірювання Вх утфелю у вакуум-апараті.

В системі використано НВЧ – аналізатор Berthold LB-565, що складається з зонду (поз. 20а) та перетворювача (поз. 20б).

Для оперативного керування та контролю на щиті встановлено панель оператора Weintek MT8101 iE.

Вся інформація, про протікання технологічного процесу передається до ЕОМ, де встановлена SCADA-система TraceMode.

Таблиця 2.1

Специфікація на прилади та засоби автоматизації

№ пор.	№ поз. за схемою	Найменування і технічна характеристика виробу	Тип, марка	Одиниця	Потреба за проектом	Примітка
1	2	3	4	5	6	7
1	1а	Вимірювальний перетворювач тиску з фланцевим плоским роздільником типу S-P. Уніфікований вих. сигнал 4-20 мА. Діапазон вимірювання (0÷1.6 МПа)	РС-28	шт.	1	APLISENS
2	1б	Індикатор технологічний мікропроцесорний. Вх. сигнал 4-20 мА.	ІТМ-111	шт.	1	"Мікрол"
3	2а	Вимірювальний перетворювач тиску. Уніфікований вих. сигнал 4-20 мА. Діапазон вимірювання (-100 ÷ 250 кПа)	РС-28	шт.	1	APLISENS
4	2б	Індикатор технологічний мікропроцесорний. Вх. сигнал 4-20 мА.	ІТМ-111	шт.	1	"Мікрол"
5	2в	Обертова заслінка серії 30.000 з позиціонером EaziCal. Вх. сигнал 4-20 мА.	Vanessa	шт.	1	TYCO
6	3а	Інтелектуальний перетворювач перепаду тиску з дистанційними	НПЭ	шт.	1	APLISENS

№ пор.	№ поз. за схемою	Найменування і технічна характеристика виробу	Тип, марка	Одиниця	Потреба за проектом	Примітка
		роздільниками S-РК. Уніфікований вих. сигнал 4-20 мА. Діапазон вимірювання (-160 ÷ 1600 кПа)				
7	3б	Індикатор технологічний мікропроцесорний. Вх. сигнал 4-20 мА.	ІТМ-111	шт.	1	"Мікрол"
8	4а, 5а	Кран шаровий з двійковим пневмоприводом PremiAir-002 та електромагнітним клапаном 5/2 F791N 24VDC	F190	шт.	2	ТУСО
9	4б, 7а	Обертова заслінка серії 30.000 з позиціонером EaziCal. Вх. сигнал 4-20 мА.	Vanessa	шт.	2	ТУСО
10	6а	Кран шаровий з пневмоприводом та соленоїдним електропневмоклапаном Camozzi	СФ-25	шт.	1	Интер-АРМ
11	8а	Перетворювач частоти (380 В, 50 кВт)	Веспер ЕІ-7011	шт.	1	Веспер
12	9а	Електрод кондуктометра	НПЭ-04	шт.	1	Магмас - Автоматік
13	9б	Нормуючий перетворювач кондуктометра НПЭ-04. Уніфікований вих. сигнал 4-20 мА.	НПЭ-04			Магмас - Автоматік
14	10а	Ротаційний датчик віскозіметра	РДВ-02	шт.	1	Магмас - Автоматік
15	10б	Нормуючий перетворювач віскозіметра. Уніфікований вих. сигнал 4-20 мА.	НВП-03	шт.	1	Магмас - Автоматік
16	20а, 20б	Комплект НВЧ – аналізатора Уніфікований вих. сигнал 4-20 мА.	LB-565	шт.	1	Berthold
17	11а - 16а	Кран шаровий з двійковим пневмоприводом PremiAir-002 та електромагнітним клапаном 5/2 F791N 24VDC	F190	шт.	6	ТУСО
18	17а	Вимірювальний перетворювач тиску з фланцевим плоским роздільником типу S-Р. Уніфікований вих. сигнал 4-20 мА.	РС-28	шт.	1	APLISENS

№ пор.	№ поз. за схемою	Найменування і технічна характеристика виробу	Тип, марка	Одиниця	Потреба за проектом	Примітка
		Діапазон вимірювання (0÷1.6 МПа)				
19	17б	Індикатор технологічний мікропроцесорний. Вх. сигнал 4-20 мА.	ІТМ-111	шт.	1	"Мікрол"
20	18а	Вимірювальний перетворювач тиску з фланцевим плоским роздільником типу S-P. Уніфікований вих. сигнал 4-20 мА. Діапазон вимірювання (0÷1.6 МПа)	РС-28	шт.	1	APLISENS
21	18б	Індикатор технологічний мікропроцесорний. Вх. сигнал 4-20 мА.	ІТМ-111	шт.	1	"Мікрол"
22	19а	Вимірювальний перетворювач тиску з фланцевим плоским роздільником типу S-P. Уніфікований вих. сигнал 4-20 мА. Діапазон вимірювання (0÷1.6 МПа)	РС-28	шт.	1	APLISENS
23	19б	Індикатор технологічний мікропроцесорний. Вх. сигнал 4-20 мА.	ІТМ-111	шт.	1	"Мікрол"
24	21а	Вимірювальний перетворювач тиску. Уніфікований вих. сигнал 4-20 мА. Діапазон вимірювання (0÷1.6 МПа)	РС-28	шт.	1	APLISENS
25	21б	Індикатор технологічний мікропроцесорний. Вх. сигнал 4-20 мА.	ІТМ-111	шт.	1	"Мікрол"
26	22а	Перетворювач температури для харчової промисловості з цифровим перетворювачем АТ. Уніфікований вих. сигнал 4-20 мА. Діапазон вимірювання (-40 ÷ 140 °С)	СТР-4(6,8)/_/PZ	шт.	1	APLISENS
27	22б	Індикатор технологічний мікропроцесорний. Вх. сигнал 4-20 мА.	ІТМ-111	шт.	1	"Мікрол"

№ пор.	№ поз. за схемою	Найменування і технічна характеристика виробу	Тип, марка	Одиниця	Потреба за проектом	Примітка
28	23а	Перетворювач температури для харчової промисловості з цифровим перетворювачем АТ. Уніфікований вих. сигнал 4-20 мА. Діапазон вимірювання (-40 ÷ 140 °С)	CTR-4(6,8)/_/PZ	шт.	1	APLISENS
29	23б	Індикатор технологічний мікропроцесорний. Вх. сигнал 4-20 мА.	ІТМ-111	шт.	1	"Мікрол"
30	24а	Перетворювач температури для харчової промисловості з цифровим перетворювачем АТ. Уніфікований вих. сигнал 4-20 мА. Діапазон вимірювання (-40 ÷ 140 °С)	CTR-4(6,8)/_/PZ	шт.	1	APLISENS
31	24б	Індикатор технологічний мікропроцесорний. Вх. сигнал 4-20 мА.	ІТМ-111	шт.	1	"Мікрол"
32	25а	Перетворювач температури для харчової промисловості з цифровим перетворювачем АТ. Уніфікований вих. сигнал 4-20 мА. Діапазон вимірювання (-40 ÷ 140 °С)	CTR-4(6,8)/_/PZ	шт.	1	APLISENS
33	25б	Індикатор технологічний мікропроцесорний. Вх. сигнал 4-20 мА.	ІТМ-111	шт.	1	"Мікрол"
34	26а	Перетворювач температури для харчової промисловості з цифровим перетворювачем АТ. Уніфікований вих. сигнал 4-20 мА. Діапазон вимірювання (-40 ÷ 140 °С)	CTR-4(6,8)/_/PZ	шт.	1	APLISENS
35	26б	Індикатор технологічний мікропроцесорний. Вх. сигнал 4-20 мА.	ІТМ-111	шт.	1	"Мікрол"
36	27а	Перетворювач температури для харчової промисловості з цифровим перетворювачем АТ. Уніфікований вих. сигнал 4-20 мА. Діапазон вимірювання (-40 ÷ 140 °С)	CTR-4(6,8)/_/PZ	шт.	1	APLISENS

№ пор.	№ поз. за схемою	Найменування і технічна характеристика виробу	Тип, марка	Одиниця	Потреба за проектом	Примітка
37	276	Індикатор технологічний мікропроцесорний. Вх. сигнал 4-20 мА.	ІТМ-111	шт.	1	"Мікрол"
38		Програмуємий логічний контролер	МІК-52Н	шт.	1	"Мікрол"
39		Модуль розширення	МР-51Н-18	шт.	1	"Мікрол"
40		Блок перетворення інтерфейсів	БПІ-485	шт.	1	"Мікрол"
		Панель оператора 10.1"	МТ 8101iE	шт.	1	Weintek Labs., Inc.

2.1.2 Опис принципів схем контролю та регулювання

Контур контролю та регулювання розрідження у вакуум-апараті. Тиск вимірюється за допомогою перетворювача тиску РС-28 (поз. 2а), з якого уніфікований струмовий сигнал надходить до ІТМ-111 (поз. 2б). Індикатор містить вбудований блок живлення для датчика. Далі сигнал поступає до аналогового входу МІК-52Н (ХР 5), а потім до процесорного модуля АТmega256, в якому реалізована програма користувача. Після виконання програми сигнал надходить до аналогового виходу (активного) модуля розширення МР-51Н-18 (ХР 2). Перетворений уніфікований сигнал надходить до клем позиціонера EaziCal обертової заслінки Vanessa серії 30.000 (поз. 2в), встановленої на трубопроводі вторинної пари до барометричного конденсатора.

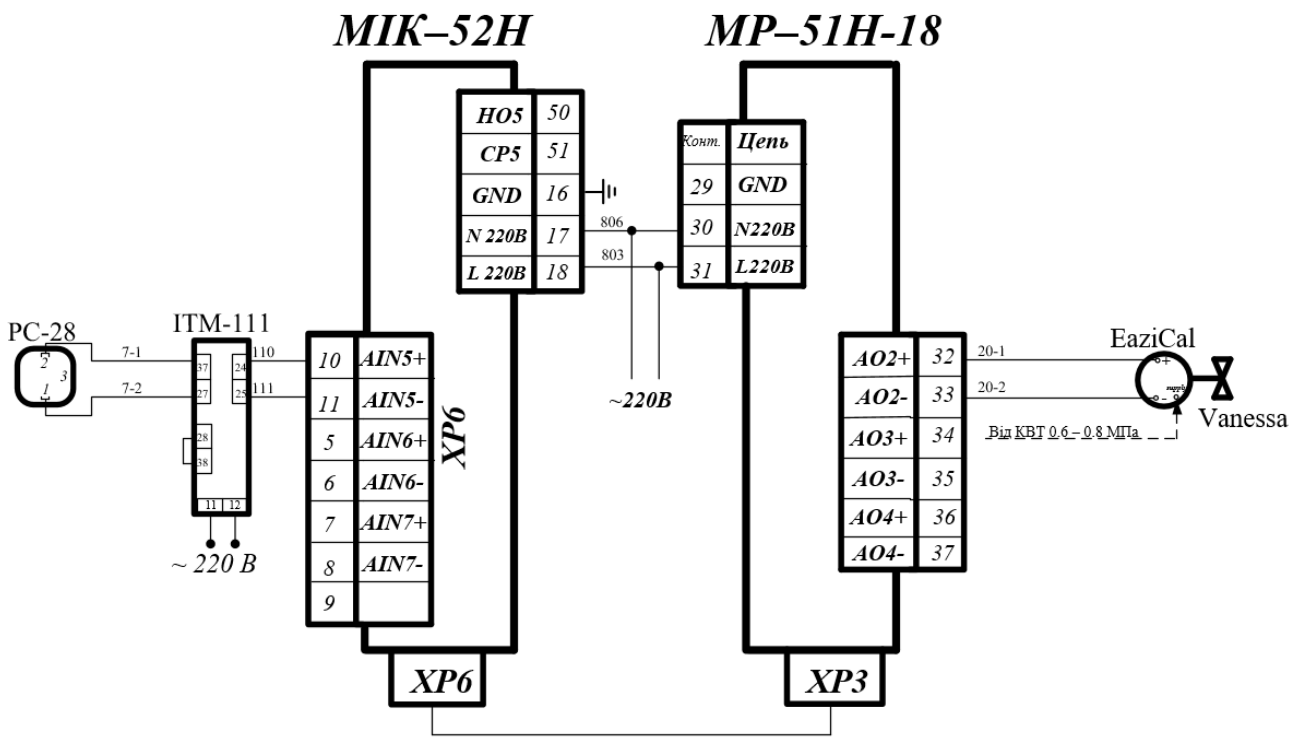


Рис. 2.2. Принципова схема підключення технічних засобів автоматизації (контур контролю та регулювання розрідження)

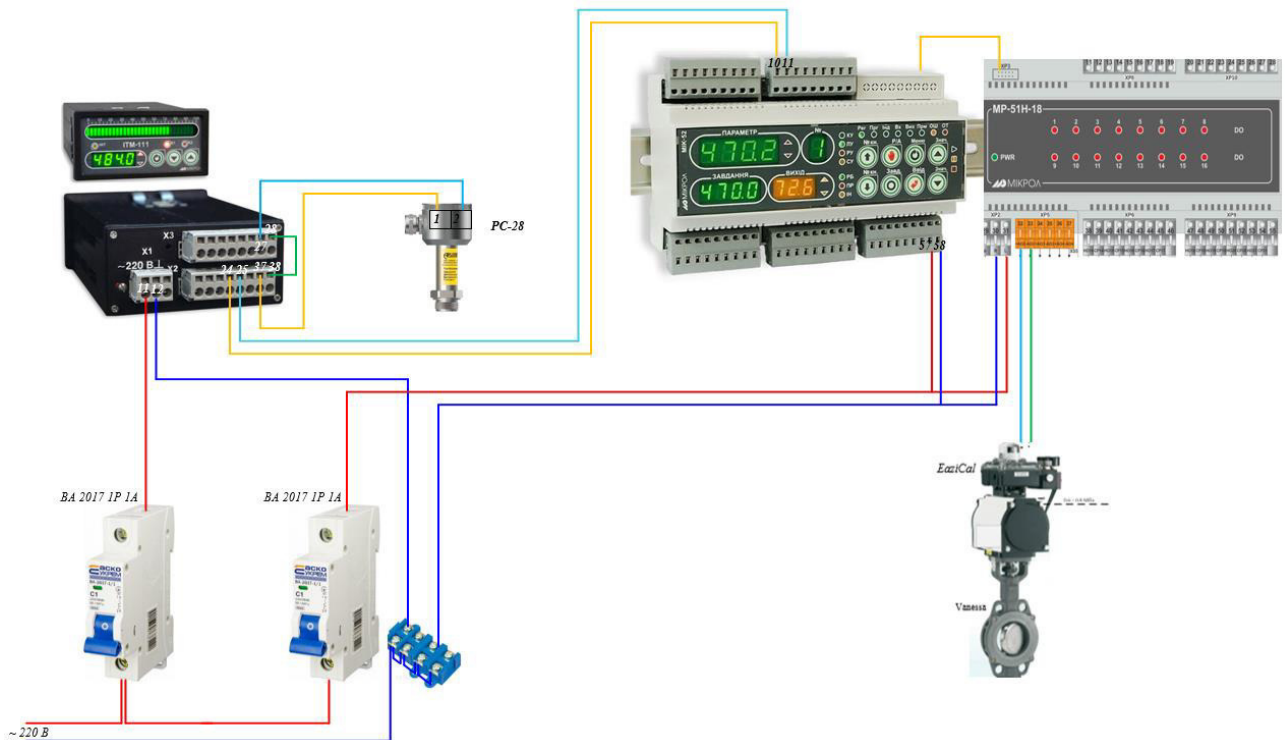


Рис. 2.3. Графічне зображення технічних засобів автоматизації (контур контролю та регулювання розрідження)

Система керування стадією 4 "ЗГУЩЕННЯ".

Переводиться в автоматичний режим утримання рівня (стабілізація) $L_{ва} = 27\%$ за допомогою клапана підкачки (поз. 4б). Заведення й початкове нарощування кристалів ведеться по кондуктометру НПЭ-04, що складається з електрода (поз. 9а) та нормуючого перетворювача (поз. 9б).

При досягненні значення, відповідному зоні "Підготовка зерноутворення", виконуються наступні дії:

- 1) плавно зменшуються завдання за паровою ВА до величини $R_{пар_зад3}$;
- 2) припиняються підкачки сиропом (завдання регулятора $K_{подк} = 0\%$);
- 3) оператору видається повідомлення "Закладіть затравку".

Мета - плавне наближення до моменту затравки. Плавне наближення до точки зерноутворення забезпечить своєчасне введення центрів кристалізації. Після заповнення затравкою ємності крана (поз. 6а), автоматично короткочасно відкривається клапан затравки.

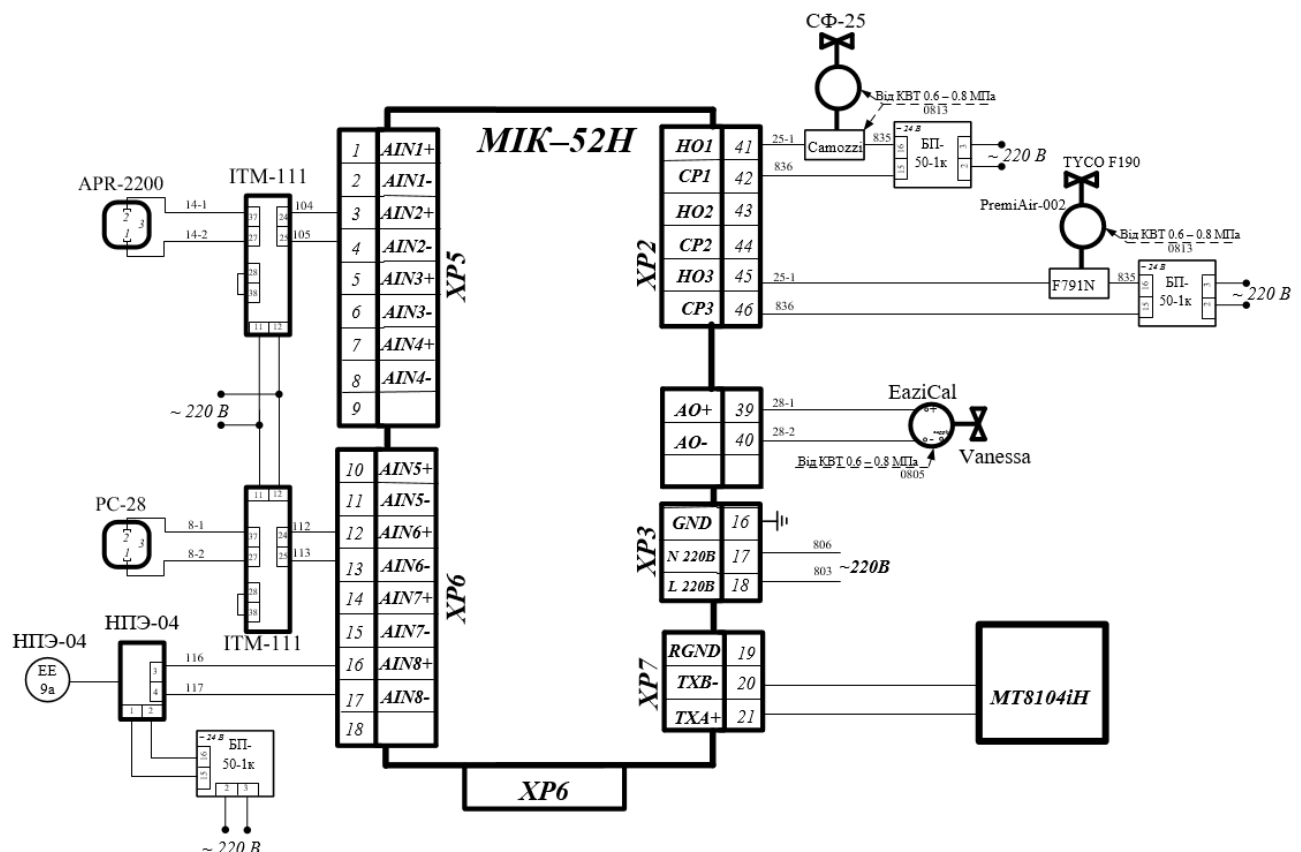


Рис. 2.4. Принципова схема підключення технічних засобів автоматизації (контур контролю та регулювання на стадії "ЗГУЩЕННЯ")

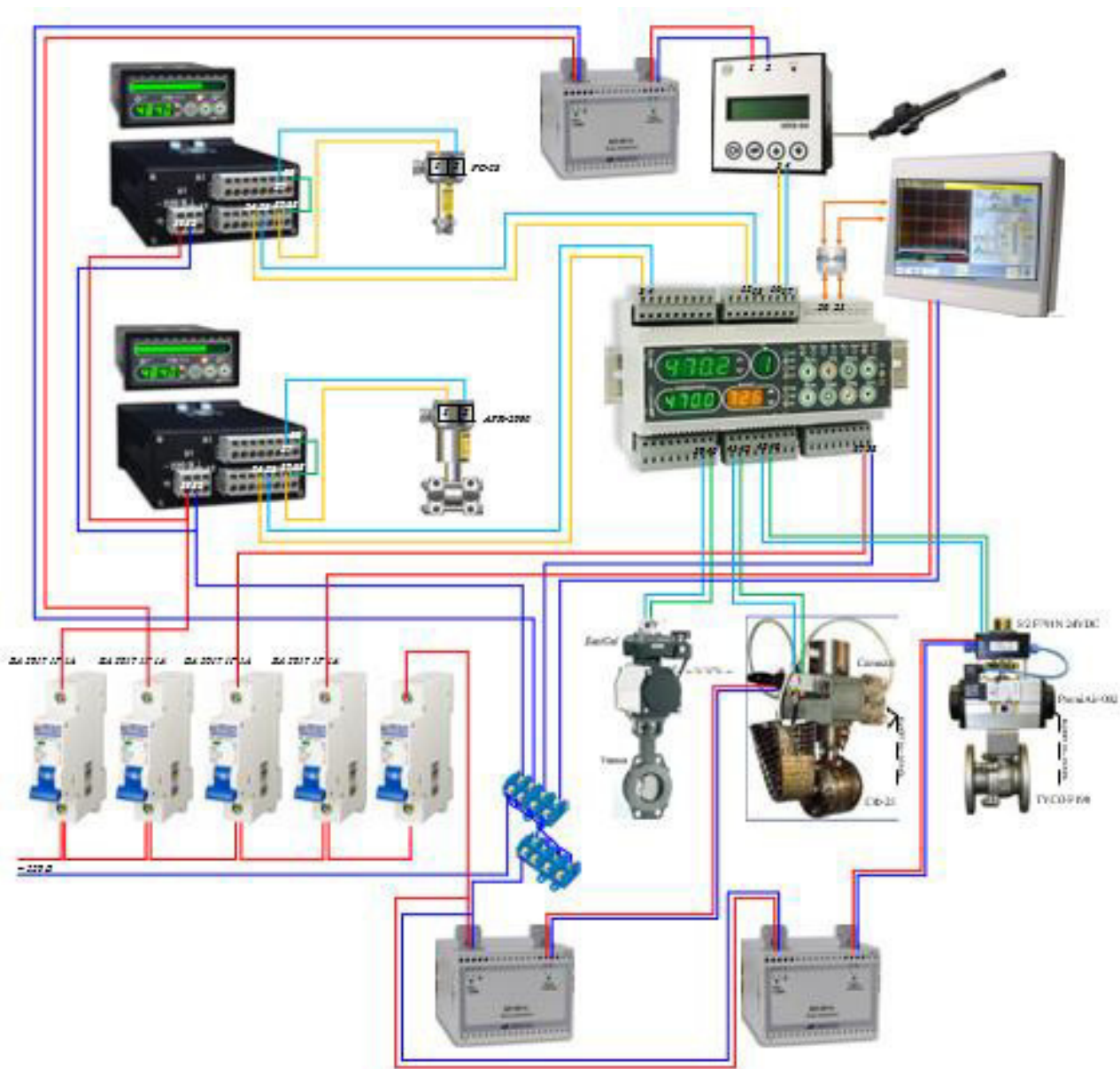


Рис. 2.5. Графічне зображення технічних засобів автоматизації
(контур контролю та регулювання на стадії "ЗГУЩЕННЯ")

2.1.3 Обґрунтування стандартних алгоритмів керування

В графічній частині роботи (аркуш 3) наведена блок-схема алгоритму роботи системи автоматизації вакуум-апарату.

Нижче розглянуто процедурні функціональні схеми (діаграми) або Procedure Function Charts (PFC) [23]. PFC – метод зображення процедурної логіки майстер рецепту і керівного рецепту. Тематика процедурного керування дещо схожа на SFC (це графічна мова, що призначена для написання програм послідовного керування технологічним процесом, яка описує процес у формі близькій до діаграми станів), але має зовсім інший зміст. PFC використовується в тих випадках, коли SFC не може описати процес в силу своїх особливостей (описує виключно операції з виробничим обладнанням).

Початок одного циклу роботи вакуум-апарату (рис. 2.6) починається з пропареного вакуум-апарату в якому відсутній утфель. Всі клапани закриті, крім клапану скидання вакууму, що є початковою точкою відліку роботи системи [24].

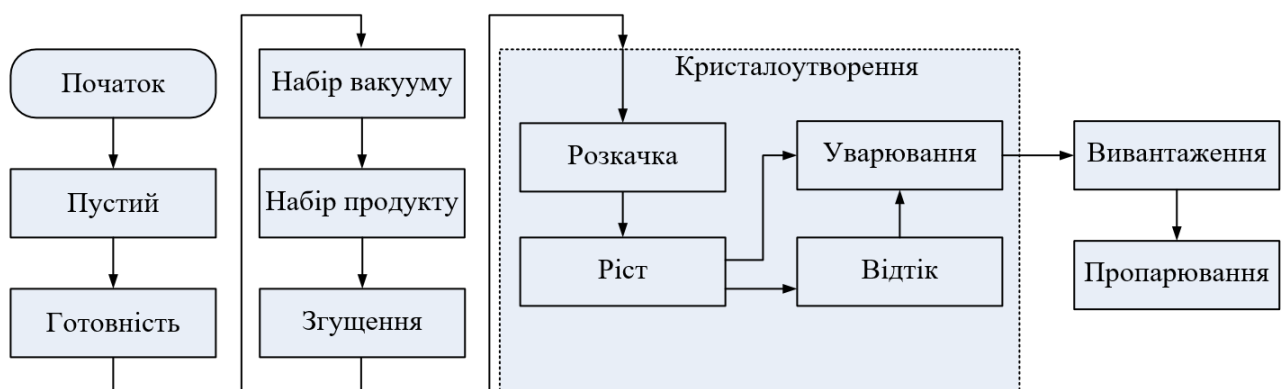


Рис. 2.6. Цикл роботи вакуум-апарату

Наступна стадія – "ГОТОВНІСТЬ", на даній стадії контролюється стан всіх клапанів та відбувається перехід на наступну стадію – "НАБІР ВАКУУМУ".

Після набору вакууму до заданого значення апарат в апарат подається продукт (стадія "НАБІР ПРОДУКТУ"). Згущення сиропу до необхідної консистенції (заданої в рецепті) триває певний час (стадія "ЗГУЩЕННЯ"), потім апарат переходить до стадії кристалотворення шляхом введення сировини (затравки) для утворення кристалів та їх подальшого росту. Рецепти кристалотворення та росту кристалів виділяються як Control Recipe.

Стадія "РОЗКАЧКА" присутня в Master Recipe, проте може бути відсутня в Control Recipe залежно від наявних об'ємів білої та зеленої патоки, а також від

обраного рецепту із рисунку 2.6. Наступною є стадія "РІСТ", "ВІДТІК" (при необхідності), "УВАРЮВАННЯ". Після того як показник СР (сухих речовин) досяг позначки зазначеної в рецепті, апарат відвантажує готовий утфель, який подається на наступний технологічний етап виробництва цукру (стадія "ВИВАНТАЖЕННЯ"). Після цього апарат пропарюється (стадія "ПРОПАРЮВАННЯ ") та знову готовий до наступного циклу, тобто наступного рецепту.

Нижче описано рецептуру виробництва, а саме Master Recipe.

Стадія "ГОТОВНІСТЬ" необхідна для перевірки положень клапанів та роботи датчиків. Далі слідує "НАБІР ВАКУУМУ" до розрідження приблизно - 80 кПа. Після цього згідно рецептури система набирає 27% рівня сиропу у вакуум-апарат. Одночасно з цим починається нагрівання (при 15% рівня) та контроль температури в апараті, параметр температури та тиску система утримує регуляторами на заданому рівні протягом стадій "НАБІР ПРОДУКТУ – УВАРЮВАННЯ". Далі в рецепті вказано "ЗГУЩЕННЯ", під час якого доводимо частку сухих речовин в сиропі до 81%. Коли концентрація СР досягла передбаченого для утворення кристалів рівня, починається етап кристалоутворення, що включає в себе стадії "РОЗКАЧКА", "РІСТ", "ВІДТІК", "УВАРЮВАННЯ". Під час даного етапу необхідно додати порцію затравки для утворення кристалів в вакуум-апараті. Новоутворені кристали повинні вирости, по мірі википання води рецептом передбачено додати сиропу до 80% рівня апарату. Якщо під час стадії "РІСТ" у збірнику вакуум-апарату не вистачає сиропу можна замість сиропу додавати воду, чекаючи доки не набереться достатній об'єм сиропу. Якщо установка тільки почала роботу або ж з інших причин відсутня біла та зелена патоки в необхідному об'ємі щоб доповнити апарат до 95%, то стадія "РОЗКАЧКА" пропускається. Таким чином вихід готового продукту з рецепту без патоки буде менший ніж з рецепту з патокою. Щоб отримати фінальний готовий утфель необхідна фаза уварювання під час якої контролюється СР. Коли утфель готовий, тобто масова частка сухих речовин дорівнює 92%, починається Відвантаження яке триває деякий час доки рівень у вакуум апараті не досягне 0%. Порожній апарат

пропарюється доки температура не досягне позначки в 110 °С, тепер апарат готовий до нового рецепту.

Таким чином відбувається рецептурне виробництво утфелю у вакуум-випарному апараті в залежності від наявності патоки та кількості сиропу на виробництві [25].

Існує два продукти, що виробляються вакуум-апаратами: А - продукт – це цукор-пісок який надходить до споживачів, в його виробництві наявні 3 рецепти; В – продукт – це утфель другого продукту, в результаті маємо дрібні кристали цукру, який не відповідає споживчим нормам, тому його розчиняють у воді або сиропі і знову подають на переробку. Ієрархія рецептів зображена на рисунку 2.7.

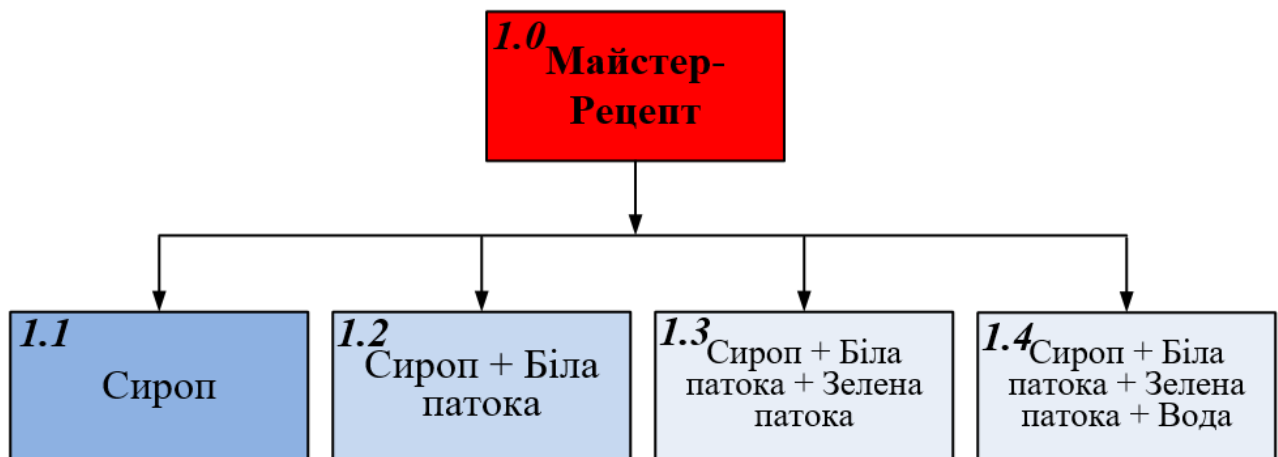


Рис. 2.7. Рецепти виробництва утфелю

На рис. 2.8 відображені майстер - рецепт (блок 1.0), це незмінний рецепт роботи програми керування устаткуванням для кожного модуля незалежно, та об'єднаний в єдину систему.

Товарний цукор виробляється за рецептурою, для реалізації якого необхідна програма майстер рецепту, яка задовольняє всім потребам чотирьох рецептів що входять до рецептури. Технолог, в залежності від виробничої ситуації, вирішує по якому рецепту буде виконуватись процес кристалізації що необхідно.

Нижче наведено алгоритми стадій роботи вакуум апарату відповідно до рецепту 1.3 мовою PFC.

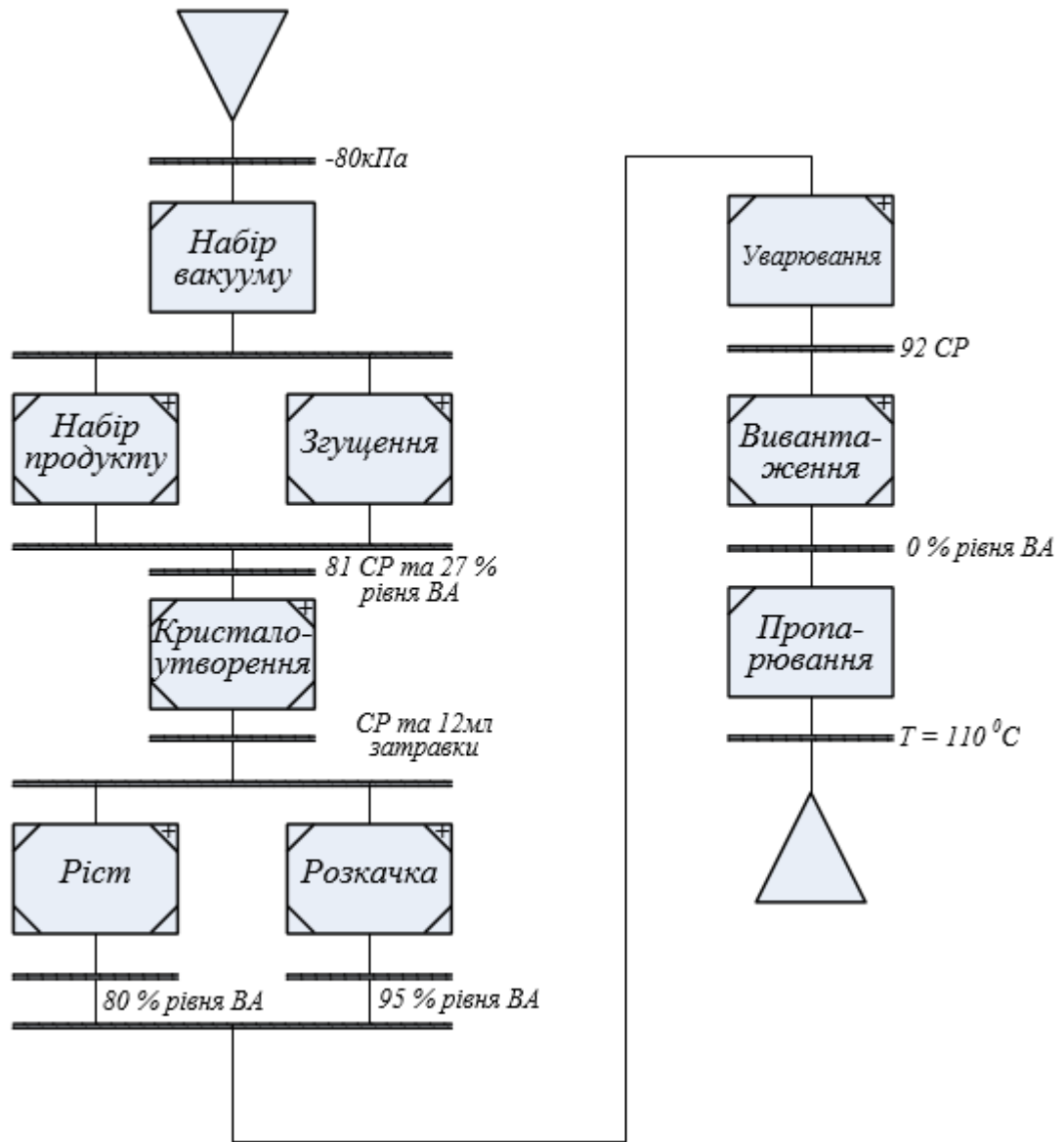


Рис. 2.8. Майстер рецепт мовою PFC

Розглянемо майстер рецепт описаний мовою PFC на рисунку 2.8.

Першим етапом роботи такої комірки виробництва як кристалізація є "НАБІР ВАКУУМУ" у вакуум-випарний апарат. Коли тиск всередині вакуум-випарного апарату досягне -80 кПа, система переходить до одночасного виконання двох етапів рецепту, а саме: "НАБІР ПРОДУКТУ" – подача сиропу у вакуум-випарний апарат; "ЗГУЩЕННЯ" – випарювання води із сиропу під впливом парового нагрівача, необхідне для збільшення концентрації сухих речовин (СР).

Умовою переходу до наступного етапу рецепту є рівень вакуум-випарного апарату рівний або більше 27% та концентрація сухих речовин на рівні 81%.

Наступним етапом являється "КРИСТАЛІЗАЦІЯ" – при необхідних умовах у вакуум-випарний апарат подається затравка – подроблені кристали цукру, які стануть в подальшому процесі роботи повноцінними кристалами цукру. Після того як була введена затравка та рівень сухих речовин перебуває в допустимій зоні, рецепт передбачає перехід до наступних двох етапів, які можуть виконуватись одночасно, а саме: "РОЗКАЧКА" – процедура поступової подачі сиропу одночасно з випарюванням. Замість сиропу можуть подаватись вторинні продукти: біла патока та зелена патока (пціонально). "РІСТ" – ріст кристалів цукру навколо затравки за рахунок подачі порцій сиропу та випарювання води; Процедура розкачки закінчується по досягненню 48% рівня вакуум апарату, а процедура росту – коли рівень вакуум-випарного апарату досяг значення 95%. Наступна процедура відповідно до рецепту – це "ВІДТІК" (може ігноруватись за командою оператора). Наступна процедура "УВАРЮВАННЯ" – зменшення кількості сиропу та міжкристальної речовини в утфелі, доведення його до готовності під дією розрідження та нагрівання. Процедура завершується по досягненню концентрації сухих речовин 92. На даному етапі утфель вважається готовим, тому можна вивантажувати утфель, тобто починається процедура "ВИВАНТАЖЕННЯ" – необхідно вирівняти тиск та вивантажити вакуум-випарний апарат. Процедура вивантаження контролюється датчиком рівню, а коли рівень досягає низького значення, вмикається таймер вивантаження. Потім вакуум-випарний апарат очищається парою – процедура "ПРОПАРЮВАННЯ". У вакуум апарат подається пара, вона змиває залишки. Після цього апарат готовий до нового рецепту, до виробництва нової партії.

Представлений в попередньому розділі майстер рецепт варки утфелю описаний мовою PFC складається з блоків вищого рівня, більшість з них в своїй роботі потребують декілька модулів обладнання. Таке представлення необхідне для опису рецепту, щоб він був не перевантажений інформацією про процес, алгоритми та детальні маніпуляції над сировиною.

Нижче, більш детально, розглянуто блоки майстер рецепту. Реалізація блоків майстер рецепту також описана мовою PFC.

Алгоритм "НАБІР ВАКУУМУ" зображено на рисунку 2.9.

Початок роботи вакуум-випарного апарату – це набір вакууму, вакуум буде підтримуватись протягом всієї роботи вакуум-випарного апарату. Для цього необхідно відкрити клапан утфельної пари великого діаметру ("малий вакуум"), та відкрити клапан утфельної пари меншого діаметру ("великий вакуум") – саме цим клапаном буде в подальшому підтримуватись стабільний рівень розрідження. По досягненню розрідження (тиск ≤ -80 кПа) закривається великий клапан утфельної пари та починається ПІД-регулювання клапану утфельного тиску меншого діаметру. Кольором виділено позначення елемента на функціональній схемі.

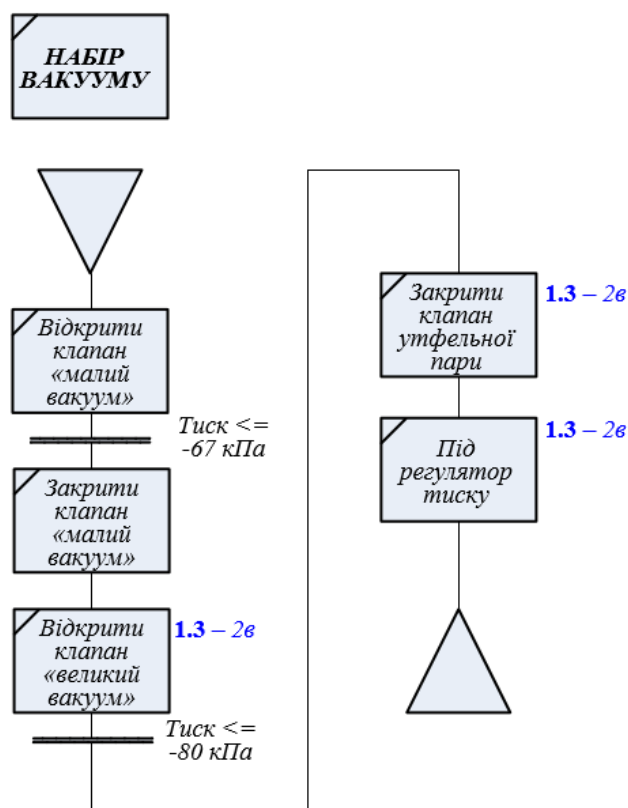


Рис. 2.9. Алгоритм "НАБІР ВАКУУМУ"

На рисунку 2.10 зображений алгоритм процедури "НАБІР ПРОДУКТУ" в більш детальному представленні для формування алгоритму керування на базі рецепту. Процедура починається з перевірки рівню сиропу у збірнику. При значенні рівня більше 40% починається заповнення апарату. При досягненні рівнем значення у вакуум-апараті 5% включається циркулятор та регулюються його

швидкість, а при досягненні рівня 15% починається подача пари і регулювання температури в апараті ПД-регулятором пари. Наступним кроком є керування клапаном подачі продукту по якому подається сироп у вакуум- апарат. Далі повторюються вище описані дії, поки рівень наповненості вакуум-випарного апарату не сягне 27%, після чого система керування завершить процедуру набору продукту та перейде до іншої, згідно з рецептом керування процедурним виробництвом.

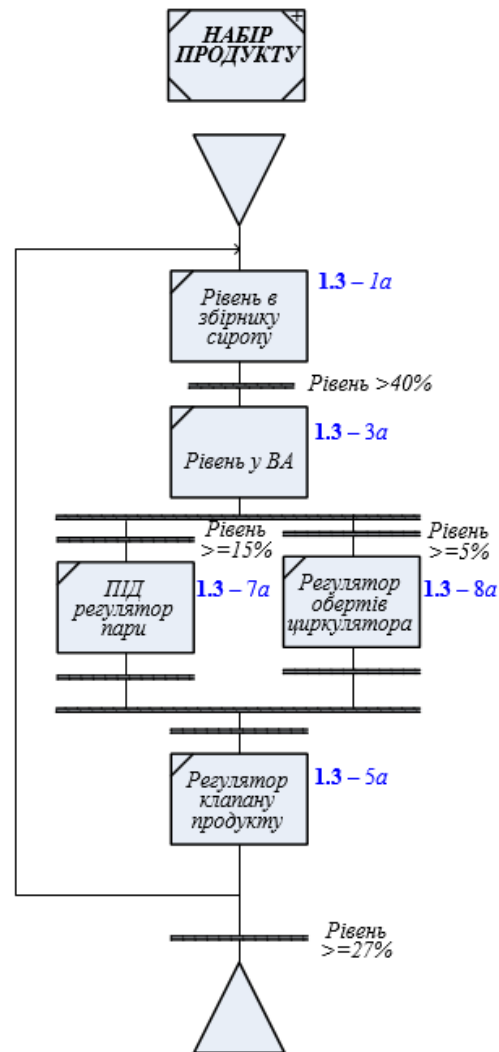


Рис. 2.10. Алгоритм "НАБІРУ ПРОДУКТУ"

Процедуру "ЗГУЩЕННЯ" (рисунок 2.11). Згущення необхідно для підготовки сиропу до введення затравки та процедури кристалоутворення. Якщо ввести пудру із кристалів (затравку) усироп то вона просто розчиниться. Процедура починається з перевірки рівню сиропу у збірнику, якщо він більший за 10%, то далі

перевіряється рівень у вакуум-апараті та регулюється за допомогою ПДД регулятора клапану подачі продукту. Коли значення рівню перевищило 35% починається згущення ПДД регулятором пари при підтримці рівню у вакуум-апараті на позначці 26%. подача пари та сиропу закривається, коли значення рівня сухих речовин у вакуум апараті досягає 81. Апарат готовий до переходу на процедуру кристалоутворення.

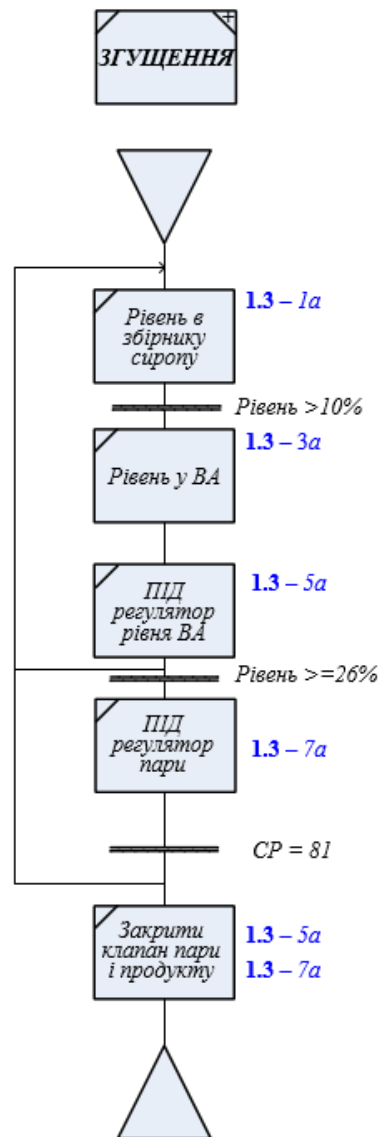


Рис. 2.11. Алгоритм "ЗГУЩЕННЯ"

Процедура кристалоутворення зображена на рисунку 2.12. На даній стадії процесу відбувається перехід від сиропу до утфелю шляхом введення затравки. Починається з перевірки рівню сиропу у збірнику, коли перевірка закінчилась,

перевіряється рівень у вакуум-апараті та вводиться затравку (дрібна пудра із приготовленого раніше цукру або суспензія) – це необхідно для утворення центру росту кристалів. Після цього одночасно починається регулювання температури за допомогою ПІД регулятора клапана пари, регуляція рівню продукту у вакуум апараті за допомогою ПІД-регулятора клапану впускного колектору та регулювання обертів циркулятора.

При цьому, при досягненні концентрації сухих речовин рівній позначці 85 закривається подача сиропу та пари, а система керування переходить на наступну процедуру.

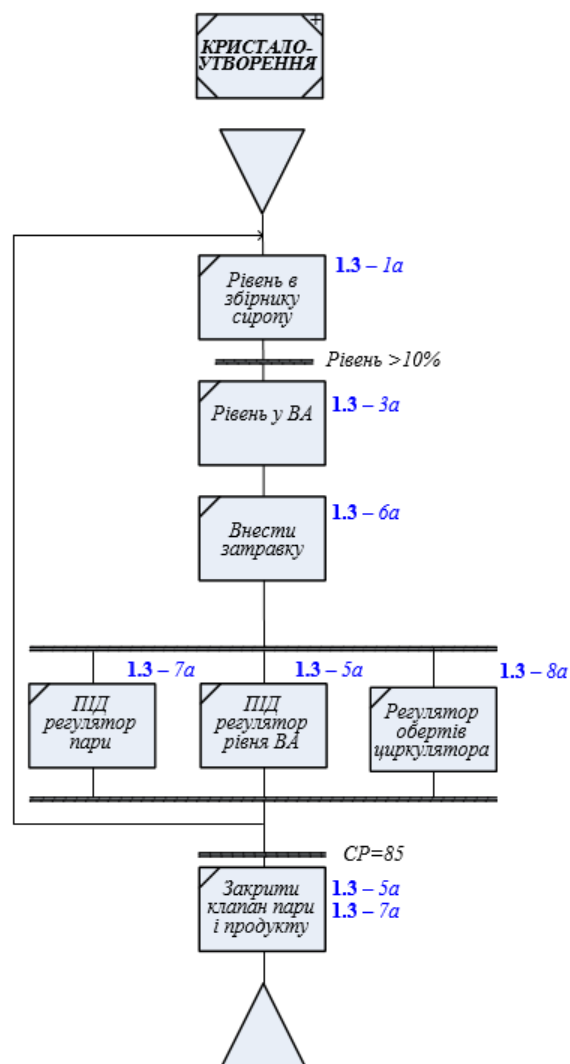


Рис. 2.12. Алгоритм "КРИСТАЛОУТВОРЕННЯ"

Процедура розкачки, описана на рисунку 2.13. Дана процедура завжди використовується на всіх виробництвах для збільшення продуктивності, прибутку та мінімізації витрат. На першому етапі процедури перевіряється рівень обраної сировини у відповідному баці. Це може бути Біла та/або Зелена патока. Після цього одночасно починається регулювання температури за допомогою ПІД регулятора клапана пари, регулювання рівня продукту у вакуум апараті за допомогою ПІД регулятора клапану впускного колектору і клапану білої та/або зеленої патоки (в залежності від обраної сировини) та регулювання обертів мішалки. Коли рівень продукту у вакуум-апараті досягає 48% завершується процедура розкачки, закриваються клапани подачі пари та сиропу, а система керування переходить на наступну процедуру згідно з описаним майстер рецептом.

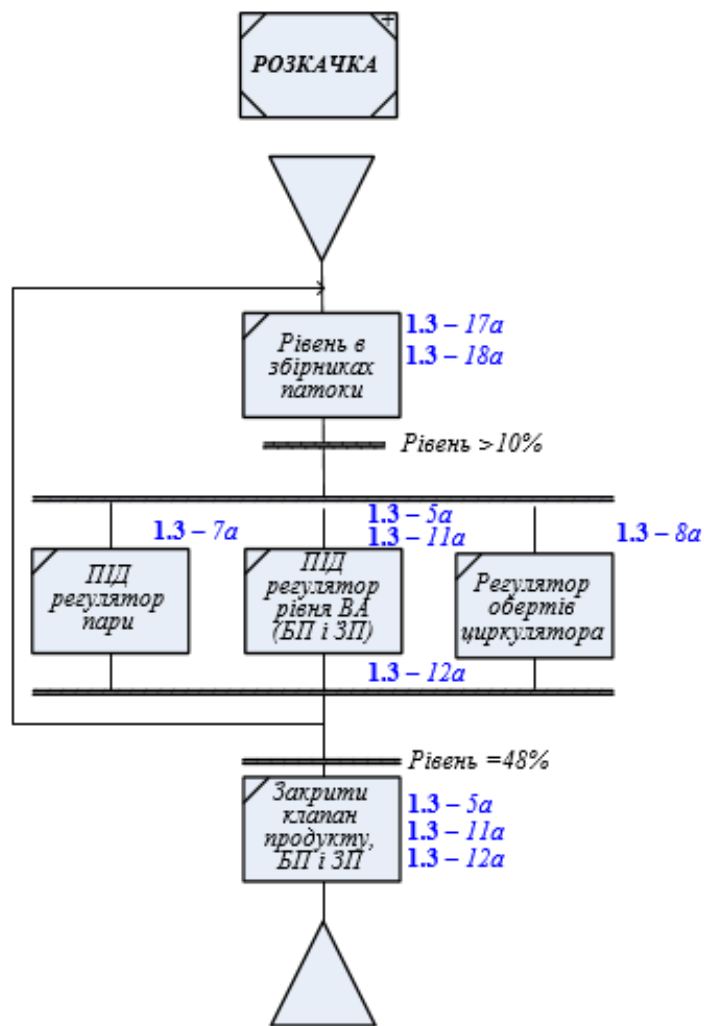


Рис. 2.13. Алгоритм "РОЗКАЧКА"

Процедуру росту кристалів зображена на рисунку 2.14. Дана стадія процесу характерна подачею сиропу та нагрівання, що забезпечує сталий і рівномірний ріст кристалів цукру.

Необхідно щоб між кристалами було достатньо сиропу, щоб цукри осідали на кристалах, а зайва «пуста» волога випарювалась. Спочатку перевіряємо рівень сиропу у баку Сироп, потім рівень продукту у вакуум- апараті.

Після цього одночасно починається регулювання температури за допомогою ПІД регулятора клапана пари, регуляція рівню продукту у вакуум апараті за допомогою ПІД регулятора клапану впускного колектору та регулювання обертів мішалки. Коли рівень продукту у вакуум-випарному апараті досягає 95% завершується процедура росту, закриваються клапани подачі пари та сиропу, а система керування переходить на наступну процедуру згідно з описаним майстер рецептом.

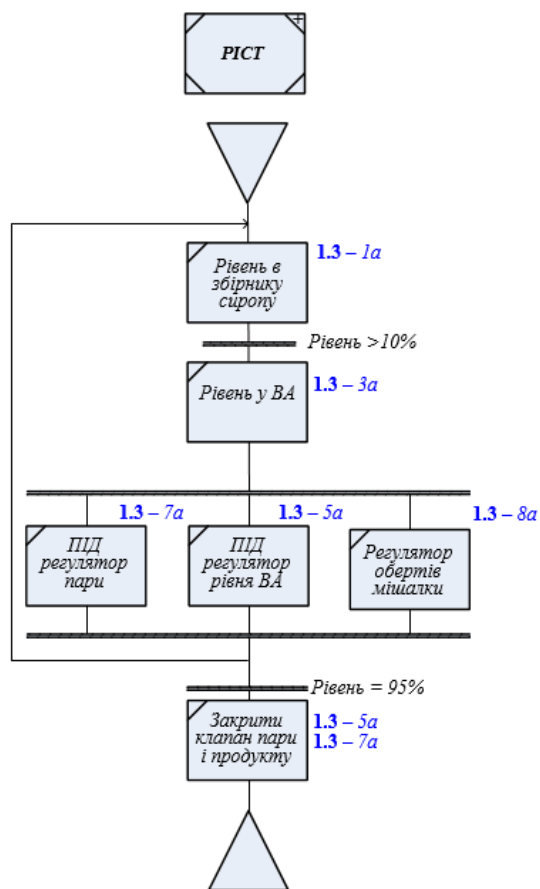


Рис. 2.14. Алгоритм "PICT"

Процедура уварювання зображена на рисунку 2.15 необхідна для фінального приготування утфелю, а саме – випарювання зайвої міжкристальної речовини. На початку процедури уварювання дається завдання на ПІД регулятор клапану пари та на регулятор циркулятора, коли рівень концентрації сухих речовин сягає 92 або струм приводу циркулятора досягає 72 А, утфель вважається готовим. Алгоритм закриває клапан пари, вимикає циркулятор, закриває клапани утфельної пари (клапани створення розрідження) та відкриває клапан тиску (клапан подачі повітря), тобто нормалізує тиск в кінці, перед наступною процедурою. Коли тиск стає більшим за -20 кПа процедура уварювання закінчується, а система керування виробництвом переходить до виконання наступної процедури – вивантаження.

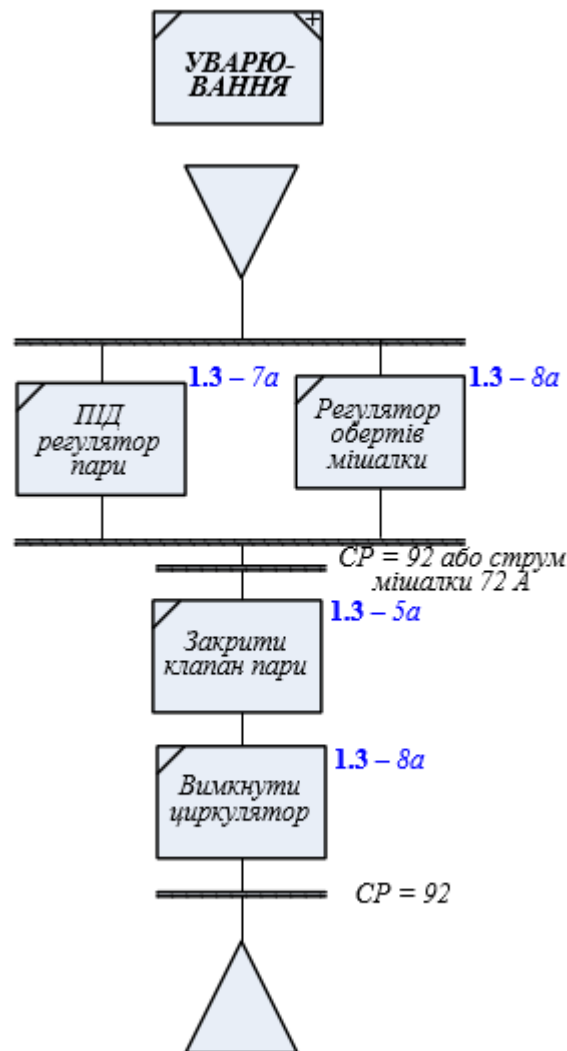


Рис. 2.15. Алгоритм "УВАРЮВАННЯ"

Процедура вивантаження (рисунок 2.16) - проста, її мета - вивантажити утфель із вакуум-апарату до утфелезмішувача.

Спочатку система керування відкриває клапан вивантаження, далі слідкує за рівнем продукту у вакуум-апараті. При повному вивантаженні апарату система керування переходить на наступну процедуру – пропарка.

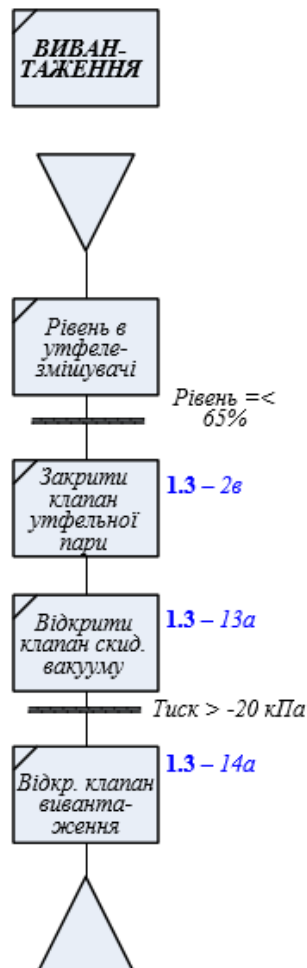


Рис. 2.16. Алгоритм "ВІВАНТАЖЕННЯ"

Процедура "ПРОПАРЮВАННЯ" (рисунок 2.17) необхідна для очищення вакуум-апарату після варки. Спочатку система керування повинна закрити клапан вивантаження, потім закрити клапан тиску (повітря), відкрити клапан пропарювання, через який пара подається всередину апарату. Далі запускається таймер пропарки. Після кінцю таймеру закривається клапан пропарки (клапан пари), відкривається клапан повітря та відкривається клапан збросу пропарки. В кінці цієї процедури вакуум-випарний апарат чистий та готовий до нового рецепту.

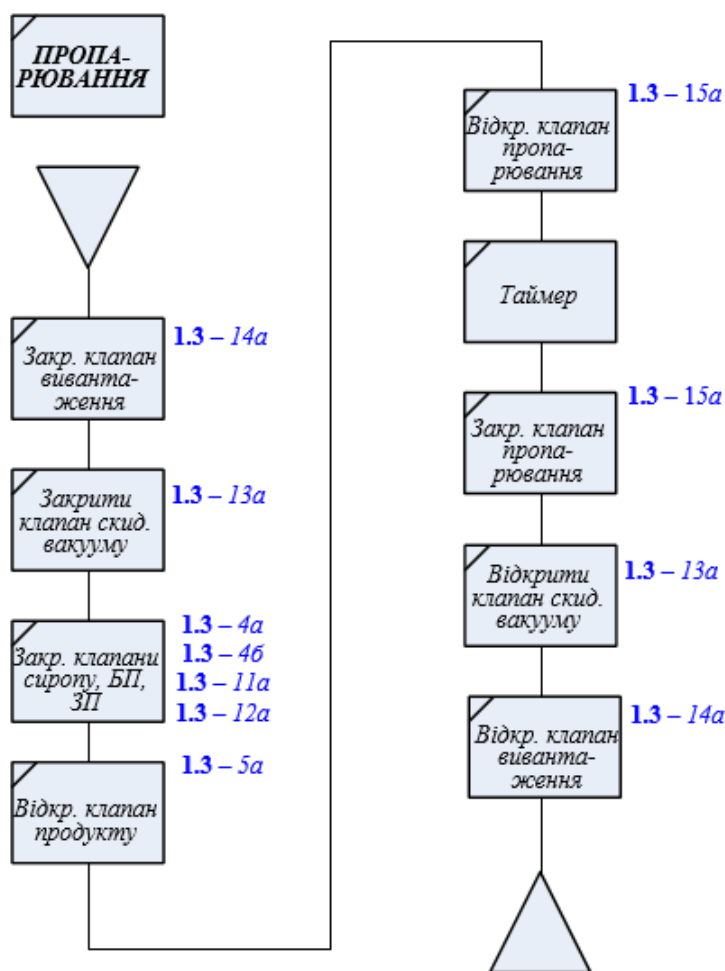


Рис. 2.17. Алгоритм "ПРОПАРИЮВАННЯ"

2.1.4 Характеристика пристроїв зв'язку з об'єктом

Архітектура контролера МІК-51 описує інформаційну організацію контролера і характеризує його як ланку системи керування. Частина архітектурних елементів структури реалізована апаратно, частина - програмно. Все програмне забезпечення, яке формує архітектуру, зашите в постійному пристрої, що запам'ятовує і користувачеві недоступно. Незалежно від того, як реалізовані елементи архітектури - апаратно або програмно - користувач може представляти

контролер як виріб, в якому всі елементи реально існують у вигляді окремих вузлів [26]. До складу архітектури контролера входить (рис. 2.18):

- апаратура вводу-виводу інформації (базової моделі і модулів розширення);
- апаратура оперативного керування і налаштування;
- апаратура інтерфейсного каналу;
- функціональні блоки;
- бібліотека функціональних блоків.

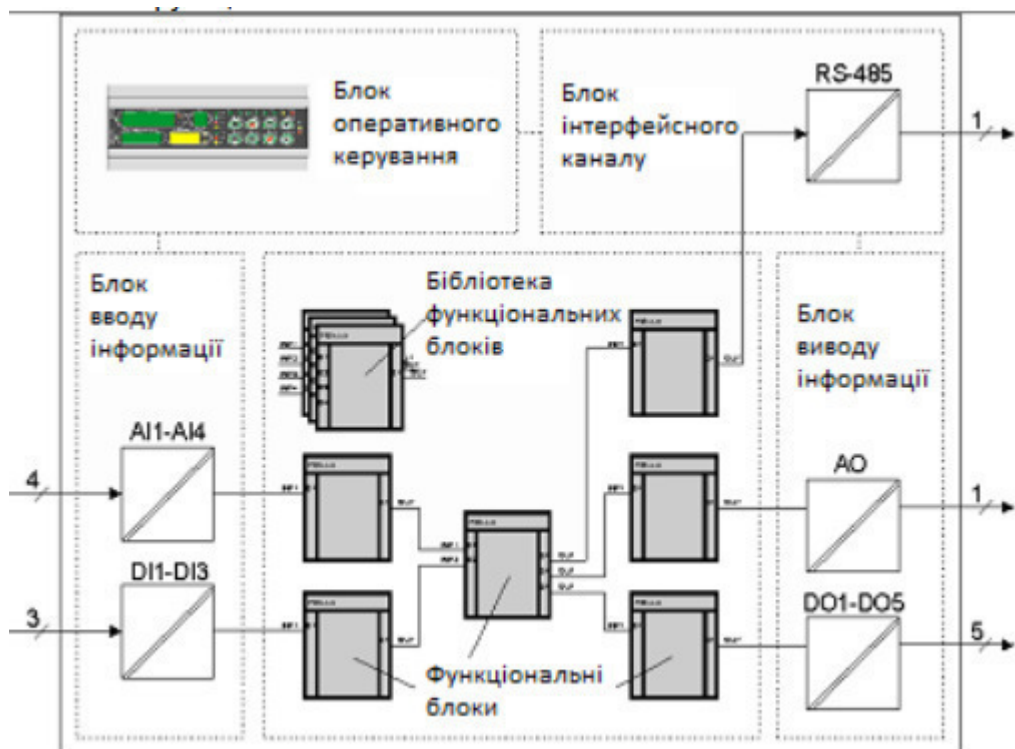


Рис. 2.18. Архітектура контролера МІК-51

Зовнішні сигнали і апаратура вводу-виводу.

Контролер розрахований на прийом і видачу двох видів сигналів: аналогових та дискретних. Формування імпульсних сигналів на виході імпульсного регулятора виконується програмно, і ці сигнали надходять на виконавчі механізми через дискретні виходи контролера. Апаратура вводу (вхідні ПЗО) перетворює аналогові й дискретні сигнали, що надходять на вхід контролера, в цифрову форму. Апаратура виводу (вихідні ПЗО) здійснює зворотне перетворення. Зовнішні кола

підключаються до контролера через зовнішній роз'єм і роз'єми для підключення кіл вводу-виводу. Всі аналогові й дискретні входи і виходи контролера повністю універсальні в такому сенсі, що в початковому стані вони не «прив'язані» до будь-яких функцій контролера. Така прив'язка здійснюється користувачем і реалізується в процесі програмування.

Апаратура оперативного керування і налаштування.

Апаратура оперативного керування (лицьова панель) розрахована на оператора-технолога і оператора-наладчика. Лицьова панель має набір клавіш, світлодіодних і цифрових індикаторів, за допомогою яких оператор-технолог «веде» технологічний процес: контролює його параметри, змінює режими керування, змінює уставки, пускає, зупиняє і скидає програму і т. д. За допомогою лицьовій панелі можна програмувати контролер та здійснювати налаштування його параметрів, а також контролювати значення перемінних у внутрішніх точках структури. У загальному вигляді лицьову панель (пульт налаштування) можна розглядати як інтерфейс з людиною.

Апаратура інтерфейсного каналу.

У контролері є інтерфейсний канал послідовного зв'язку. Цей канал має приймач-передавач, що перетворює вхідний потік послідовних біт інформації в цифрову інформацію, представлену у вигляді байтів (тобто перетворює послідовний код в паралельний), а також здійснює зворотнє перетворення. Прийняті і передані повідомлення хоч і є цифровими, але вони можуть «представляти» будь-які сигнали, які обробляються контролером: аналогові, тимчасові, числові і т.д. Всі сигнали передаються через інтерфейс послідовно, але швидкість їх передачі досить велика для того, щоб для процесів великої і середньої швидкодії можна було вважати, що всі сигнали передаються одночасно.

Типи сигналів, параметрів і типи даних.

Незважаючи на те, що вхідні і вихідні сигнали контролера можуть бути тільки двох видів - аналогові і дискретні, функціональні блоки розраховані на обробку сигналів, які мають великі різноманітності. Наявність більш різноманітних сигналів пов'язана з двома обставинами. По-перше, в складі бібліотеки є

функціональні блоки, пов'язані з відліком реального часу (таймери, програмні задатчики і т. п.) І з рахунком числа подій (лічильники). По-друге, параметри налаштування функціональних блоків задаються за допомогою сигналів на його налаштованих входах, а параметрів налаштування, з точки зору їх формату, існує велика різноманітність. Перелік сигналів, що обробляються функціональними блоками, включає наступні типи: аналоговий (вимірювані параметри, значення аналогових входів-виходів, технічні одиниці, коефіцієнт, швидкість зміни параметра і т.п.); дискретний, імпульсний; числовий; часовий (уставка часу, тривалість імпульсу). У контролері МІК-52Н все описане вище різноманіття типів сигналів і параметрів налаштування обслуговується загальноприйнятим набором типів даних. При цьому забезпечується простий інтерфейс з базами даних інших мов програмування, що сприяє уніфікації і розвитку програмного забезпечення контролера.

Загальний опис мережі.

Контролер МІК-52Н має інтерфейсний канал послідовного зв'язку, за допомогою якого контролери можуть об'єднуватися в локальну або розподілену керуючу мережу. У мережі контролери можуть обмінюватися інформацією, як з комп'ютером, так і між собою.

Логічна організація мережі має наступні можливості мережевого обміну інформацією:

- 1) обмін інформацією між контролерами (комп'ютер є диспетчером мережевого обміну);
- 2) обмін інформацією між контролерами і комп'ютером;
- 3) комбінована організація обміну, яка об'єднує всі переваги двох перших способів мережевого обміну.

Фізична організація мережі.

Контролери в мережі зв'язуються один з одним за допомогою крученої пари проводів. Довжина лінії зв'язку може досягати 1200 м (на одному сегменті мережі) в залежності від встановленої швидкості передачі даних. Для збільшення довжини лінії зв'язку, а також кількості сегментів використовують магістральні підсилювачі.

Мережа має багатоточкову конфігурацію і шинну топологію. Для побудови мережі контролерів (до 31), призначених для обміну інформацією з комп'ютером, необхідний додатковий пристрій, який використовується для перетворення інтерфейсів USB в RS-485 - БПІ-52 (RS-232 в RS-485 - БПІ-485, Ethernet в RS485 - SDS-485). Структурна схема підключення інтерфейсних кіл показана на рис. 2.19.

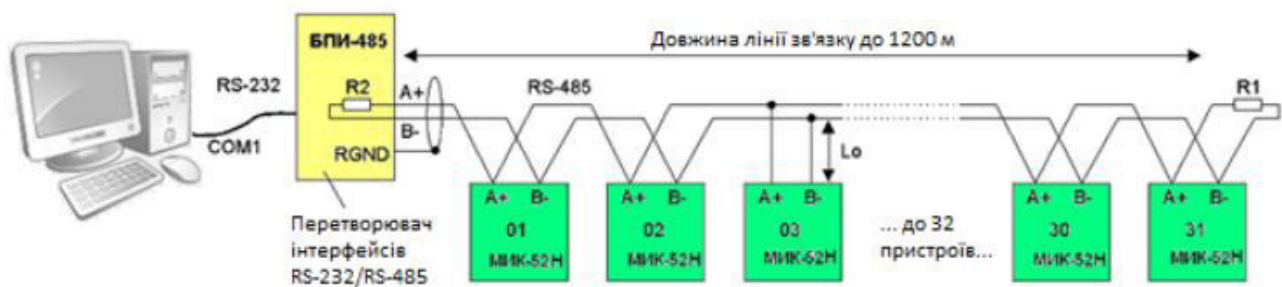


Рис. 2.19. Структурна схема підключення інтерфейсних кіл

Логічна організація мережі.

Мережева адресація контролерів.

Кожному контролеру МПК-52Н, підключеному до мережі, присвоюється унікальний логічний номер - мережева адреса або номер приладу в мережі. Цей номер встановлюється в процесі програмування на рівні конфігурування в процедурі «системні параметри». Порядок мережевих адрес в мережі ніяк не пов'язаний з фізичним порядком включення контролерів. Мережеві адреси можуть встановлюватися в будь-якій послідовності або мати пропуски.

Комунікаційні функції.

Зв'язок комп'ютера з мережею контролерів організовується на трьох рівнях: фізичному, інформаційному і транспортному. Фізичний рівень призначений для електричного зв'язку між комп'ютером і контролерами. На фізичному рівні використовується інтерфейс RS-485. Інформаційний рівень надає переданим повідомленням певний формат переданого кадру: на передавальній стороні додає до повідомлень адресу пристрою, функціональний код операції і байти контрольної суми, а на приймальній стороні виділяє дані і контролює контрольну суму повідомлення. Сенс повідомлення на інформаційному рівні не розшифровується.

Транспортний рівень формує смисловий зміст повідомлення при передачі і розшифровує сенс цих слів при прийомі. Інтерфейс контролера призначений для програмування і конфігурування приладу, для використання в якості віддаленого контролера при роботі в сучасних мережах керування та збору інформації (прийому/передачі команд і даних), SCADA системах і т.п. Протоколом зв'язку по інтерфейсу RS-485 є протокол Modbus режим RTU (Remote Terminal Unit). Для роботи необхідно налаштувати комунікаційні характеристики контролера таким чином, щоб вони співпадали з налаштуваннями обміну даними комп'ютера та інших контролерів. Технічні характеристики мережного обміну налаштовуються на відповідному рівні конфігурування.

2.2 Опис функцій, що інтелектуалізуються

Зважаючи на те, що в даній роботі розглядається моніторинг технологічного процесу, під моніторингом розуміється процес збору необхідної для технологічного процесу інформації з метою її оцінки і контролю.

У типовому випадку, принципи обробки залишаються попередніми, оскільки будь-яка SCADA-система або засоби НМІ допускають груповий контроль P , а також і автоматизацію керуючих впливів. Розглянутий груповий контроль P є найпростішим випадком процедури автоматизованого аналізу стану процесу і наступного перетворення технологічного інформаційного потоку в скорочений вигляд, зручний для сприйняття людиною. Закладена в типову архітектуру SCADA-системи функціональність формування наборів зведених сигналів, по суті являє собою можливість задати правило F відображення множини P у якусь множину V , що характеризується меншим кардинальним числом:

$$F : P \rightarrow V = \{v_j : j \in J\} \Rightarrow \sum i > \sum j \quad (2.1)$$

Таким чином, навіть значний обсяг параметрів ТП, що перевершує можливості сприйняття оператора, успішно контролюється в автоматизованому режимі стандартними методами з використанням НМІ (рис. 2.20) [27].



Рис. 2.20. Типова задача автоматизованого керування технологічним процесом

При зміні одного з контрольованих параметрів система автоматизації формує керуючі впливи на виконавчі механізми, чим забезпечує підтримку їх у встановлених межах. Якісні показники роботи вакуум-апарату (концентрація сухих речовин в утфелі CP_y , та розміри кристалів цукру) можуть змінюватись навіть при незмінних контрольованих та регульованих параметрах [28]. З точки зору організації стандартного автоматизованого контролю засобами НМІ, ситуація залишається в нормі і оператор не отримує ніяких попереджувальних повідомлень.

Лише при сумісному аналізі параметрів технологічного процесу та даних, що отримуються лабораторним або експериментальним шляхом (вміст сухих речовин в сиропі CP_{cn} та доброякісність продукту $Дб_{cn}$, що підкачується), можна судити про зміни в технологічному процесі. Наприклад, при зміні доброякісність продукту $Дб_{cn}$ необхідно передбачити зміну корекції росту, а при зміні вмісту сухих речовин в сиропі CP_{cn} змінюється кількість підкачок і відповідно - тривалість процесу.

Наведений приклад демонструє, що значний об'єм інформації знаходиться у взаємозв'язках технологічних параметрів, наскільки важливою може бути ця інформація, і наскільки актуальна задача автоматизації етапу попередньої обробки технологічних даних та представлення інформації в оптимальному вигляді для особи, що приймає рішення.

Інформаційний процес аналітичної задачі технологічного моніторингу представлений на рисунку 2.21 [29].

Можна припустити, що аналітичні задачі виникають тим частіше в ході моніторингу стану ТП, чим складніші ці процеси. З ростом складності ТП кількісні зміни в об'ємі параметрів процесу переходять у якісні, породжуючи новий клас задач системи технологічного управління. На противагу простим, для складних ТП характерне виконання великого числа з перерахованих особливостей: значна різноманітність і складність застосованого обладнання; велика кількість технологічних об'єктів, задіяних у процесі; велике число вхідних і контрольованих параметрів; суттєва взаємодія функціональних підсистем; просторове розподілення технологічних об'єктів; аналітично складний взаємозв'язок параметрів процесу. Особливості подібних ТП суттєво ускладнюють задачі оперативного технологічного керування.

Наявність впливових взаємозв'язків, а також складність, різноманітність і розподілення технологічних об'єктів, що реалізують процес, найчастіше не дозволяє представити весь процес як сукупність послідовних стадій і однозначно зв'язати ці стадії з окремими технологічними об'єктами.



Рис. 2.21. Інформаційний процес аналітичної задачі технологічного моніторингу

Таким чином, керування складними технологічними процесами вимагає розглядання всього процесу як цілого, одноразового аналізу сукупності параметрів і взаємозв'язків. Інакше кажучи, якщо для простих процесів первинним (системою)

є технологічний об'єкт, що реалізує процес, то для складних процесів як системи логічно розглядати сам ТП.

Це дозволяє виділити дві важливі властивості інформаційного потоку складних ТП, а саме:

- інформаційний потік складних технологічних процесів не піддається ефективній декомпозиції щодо технологічних об'єктів;
- синтез адекватного реальному процесу інформаційного потоку на основі сукупності інформаційних потоків технологічних об'єктів, залучених у процес, неможливий.

Ці особливості перебувають у контексті загальних результатів дослідження складних систем [30], які показують, що з ростом складності систем, частка інформації, що міститься у зв'язках системи, значно зростає. Саме необхідність врахування інформації, що привноситься складними зв'язками системи, і породжує новий клас аналітичних задач моніторингу стану складних ТП, а врахування фактору оперативності даного аналізу, приводить до необхідності його автоматизації в рамках сучасної технологічної інформаційної системи (ІС).

Існуючі архітектури технологічних ІС оптимізовані на первинний контроль і керування технологічними об'єктами, що реалізують ТП.

Новий клас систем можна охарактеризувати як системи попередньої обробки, систематизації, і аналізу технологічної інформації.

Розглядаючи весь інформаційний процес у цілому, можна сказати, що для підвищення ефективності керування виробничим процесом, необхідна єдина узагальнена система моніторингу. Дана система повинна включати як підсистему відображення технологічних даних по об'єктах, так і підсистему представлення даних за аналітичними задачами моніторингу стану технологічного процесу. Ця підсистема вибирає з вихідної технологічної інформації необхідний об'єм для розв'язання відповідної задачі і представляє на етап ситуаційного аналізу результати обробки вихідних даних в оптимальному вигляді для прийняття рішення. Це дозволяє представляти персоналу найбільш важливу інформацію більш компактно і систематично щодо конкретних виробничих задач. При цьому

за простим і зрозумілим кінцевим представленням стоїть складний, багатоступінчастий етап обробки вхідної технологічної інформації, і завдяки автоматизації даного етапу, ефективність контролю стану технологічного процесу багаторазово зростає [31].

Задачі типових підсистем вирішує промислова SCADA-система, відображаючи дані відповідно до набору відеограм об'єктів автоматизації, для вирішення задач другого типу необхідна інша за функціональністю і архітектурі система, інтегрована зі стандартною SCADA-системою.

Пропонована концепція може бути представлена як розширення достатньо добре дослідженого класу систем, що отримав широке практичне поширення при аналізі процесів з використанням оперативних даних стосовно до задач керування складними ТП.

Крім того, для підприємств, що реалізують єдиний складний цикл ТП все більшу актуальність представляє впровадження систем моніторингу на координаційному рівні виробничого процесу.

Розробка принципів побудови систем подібного класу і наступне їхнє впровадження може суттєво підвищити оперативність і якість обробки технологічної інформації, а в результаті підвищити ефективність і безпеку керування промисловими об'єктами.

Функції АСУ ТП та ІСК. Загальний перелік функцій наведено в таблиці 2.2 умовних позначень відповідно до схеми автоматизації вакуум-апарату.

Таблиця 2.2

Перелік функцій та задач АСУ ТП та ІСК

Позна-чення	Найменування функції/задачі	Закон/алгоритм	Період	Примітка
ТС	Стабілізація температури у вакуум-апараті, °С	ПД	1 с	
РС	Стабілізація розрідження у вакуум-апараті, кПа	ПД	1 с	
LC	Регулювання рівня у вакуум-апараті, %	програмний регулятор	1 с	у складі майстер-рецепту
VC	Регулювання в'язкості утфелю, Па·с	програмний регулятор	1 с	у складі майстер-рецепту
EC	Регулювання електропровідності утфелю, мкСм/см	програмний регулятор	1 с	у складі майстер-рецепту
SC	Керування швидкістю циркулятора	програмний регулятор	1 с	у складі LC

Метою створення системи керування утфельним вакуум-апаратом з підсистемою моніторингу технологічного процесу є поліпшення техніко-економічних показників його роботи за рахунок:

- зменшення часу проходження процесу;
- скорочення втрат кінцевого продукту;
- ведення технологічних процесів в оптимальних або близьких до них режимах;
- підвищення оперативності контролю процесу.

Критеріями оцінки досягнення поставлених цілей будуть, відповідно: вихід готового продукту та тривалість проходження процесу.

Оптимальне керування за цими критеріями, при умові врахування обмежень на змінні стану та керувальні дії, згідно з технологічним регламентом є основною задачею керування.

Апаратно-програмна реалізація системи оптимального керування вакуум-апаратом повинна враховувати ситуаційний підхід до вирішення цієї задачі. На рис.

2.22 показана структурна схема системи керування вакуум-апаратом з підсистемою моніторингу технологічного процесу [32].

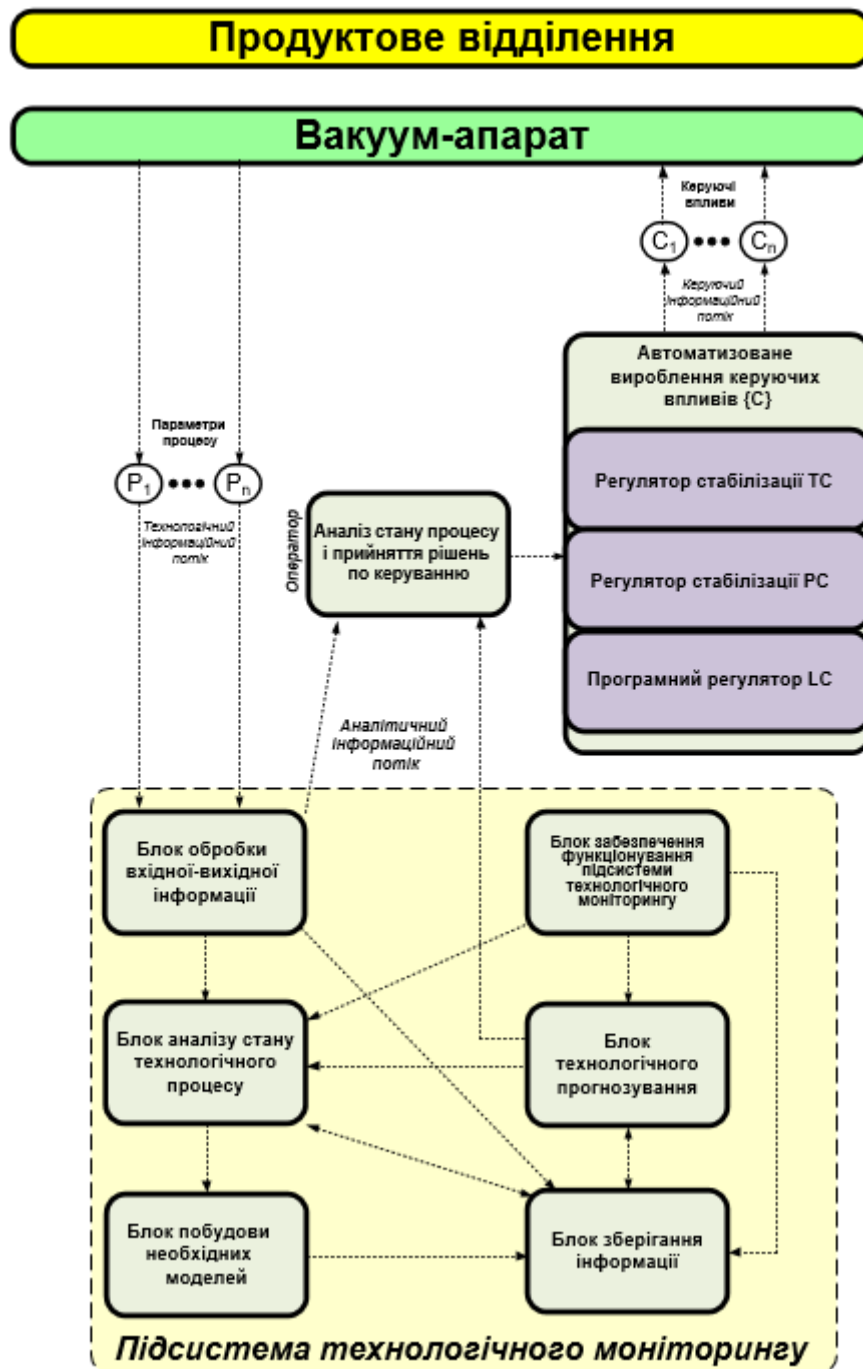


Рис. 2.22. Структурна схема системи керування вакуум-апаратом з підсистемою моніторингу технологічного процесу

Критерій оптимізації повинен змінюватися в залежності від поточної ситуації, що виникла на виробництві, тобто автоматична система керування вибирає необхідний режим в залежності від ситуації, що визначається за вхідною

поточною інформацією. Отже, в блоці критеріїв в даному випадку існує два критерія оптимізації: тривалість проходження процесу та вихід готового продукту.

2.3 Розробка діаграми вимог до ІСК вакуум-апарату

Проектування будь-якої системи починають з формування вимог до неї, а саме:

- бізнес-вимоги;
- функціональні вимоги;
- нефункціональні вимоги.

Для моделювання ІСК застосовано мову Systems Modeling Language (SysML). Моделювання здійснювалося в середовищі Microsoft Visio - редакторі діаграм для Windows і редактор векторної графіки. SysML — мова моделювання загального призначення і застосовується в системній інженерії, є розвитком мови UML. Підтримує специфікацію вимог, аналізу, проектування, верифікацію та валідацію широкого діапазону систем [33]. Сформуємо функціональні вимоги до системи когнітивного моделювання. Пропонуються наступні функціональні вимоги до системи, подані на рисунках 2.23 – 2.24. Діаграми наведені для основних контурів регулювання.

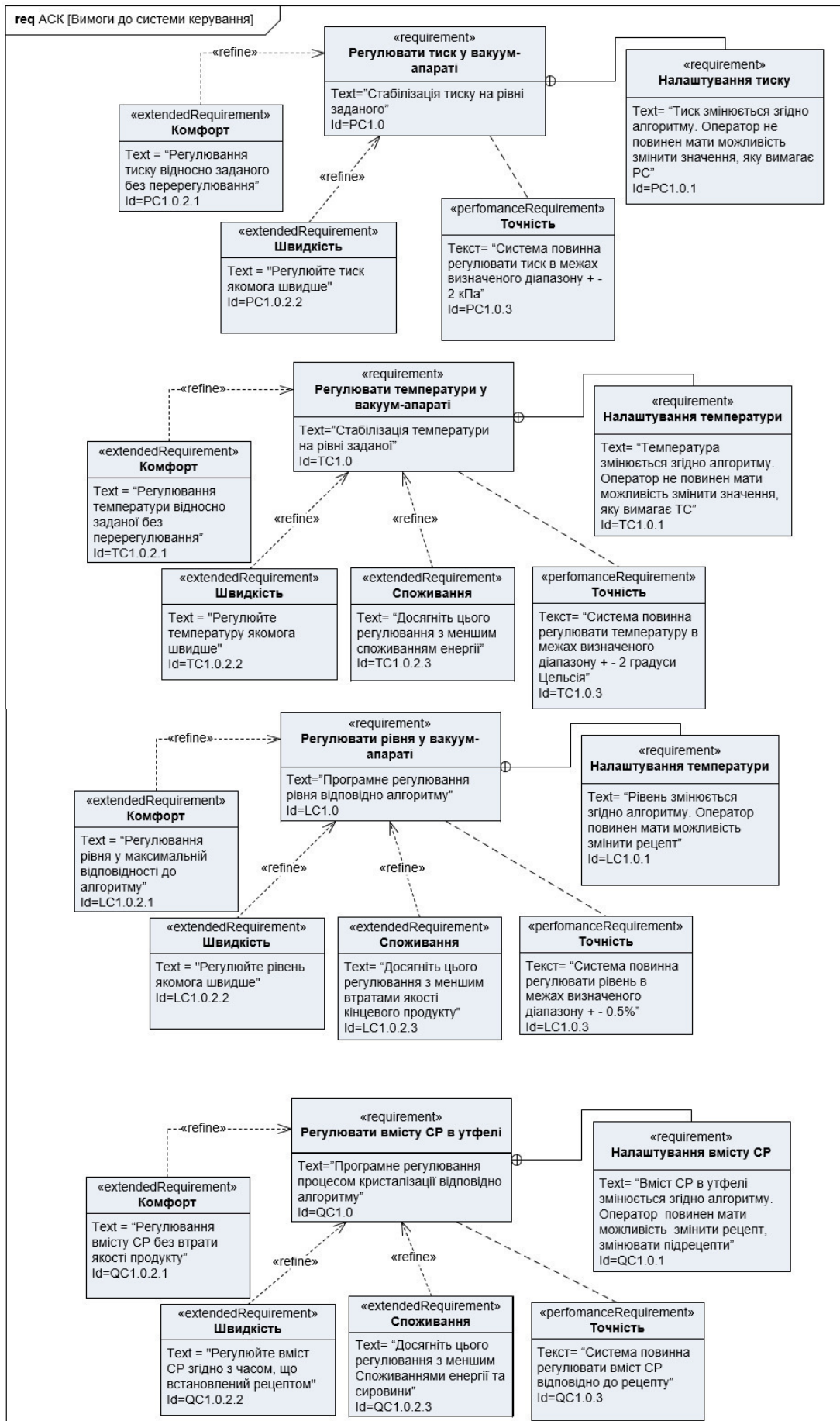


Рис. 2.23. Діаграма вимог для регуляторів АСК

2.4 Визначення функцій користувачів (Use Case diagram)

Користувачів системи представлено у вигляді акторів, що взаємодіють з системою за допомогою варіантів використання. Варіанти використання надають опис можливостей, які система надає акторам. На діаграмі використані наступні типи відношень між варіантами використання та актором:

- відношення асоціації – відображає зв'язок між актором та варіантом використання. Відображається лінією зі стрілкою між актором і варіантом використання;

- відношення розширення – визначає взаємозв'язок базового варіанта використання з іншим варіантом використання, функціональна поведінка якого задіється базовим не завжди, а тільки при виконанні додаткових умов, позначається пунктирною стрілкою з поміткою «extend»;

- відношення включення – показує, що варіант використання включається в базову послідовність, позначається пунктирною стрілкою з поміткою «include»;

Користувачі підсистеми технологічного моніторингу можуть виконувати наступні варіанти взаємодії з програмою (рис. 2.25):

- проєктант підсистеми технологічного моніторингу - розробляє методи та алгоритми обробки та фільтрації даних; основні налаштування системи та регуляторів;

- програміст підсистеми моніторингу - реалізує алгоритми аналізу стану технологічного процесу; формує базу знань; забезпечує загальну працездатність системи;

- оператор - забезпечує функціонування підсистеми технологічного моніторингу, а саме: обирає рецепт процесу в залежності від вимог технологічного процесу, переглядає статистику; вносить корегуючі діє в разі необхідності.

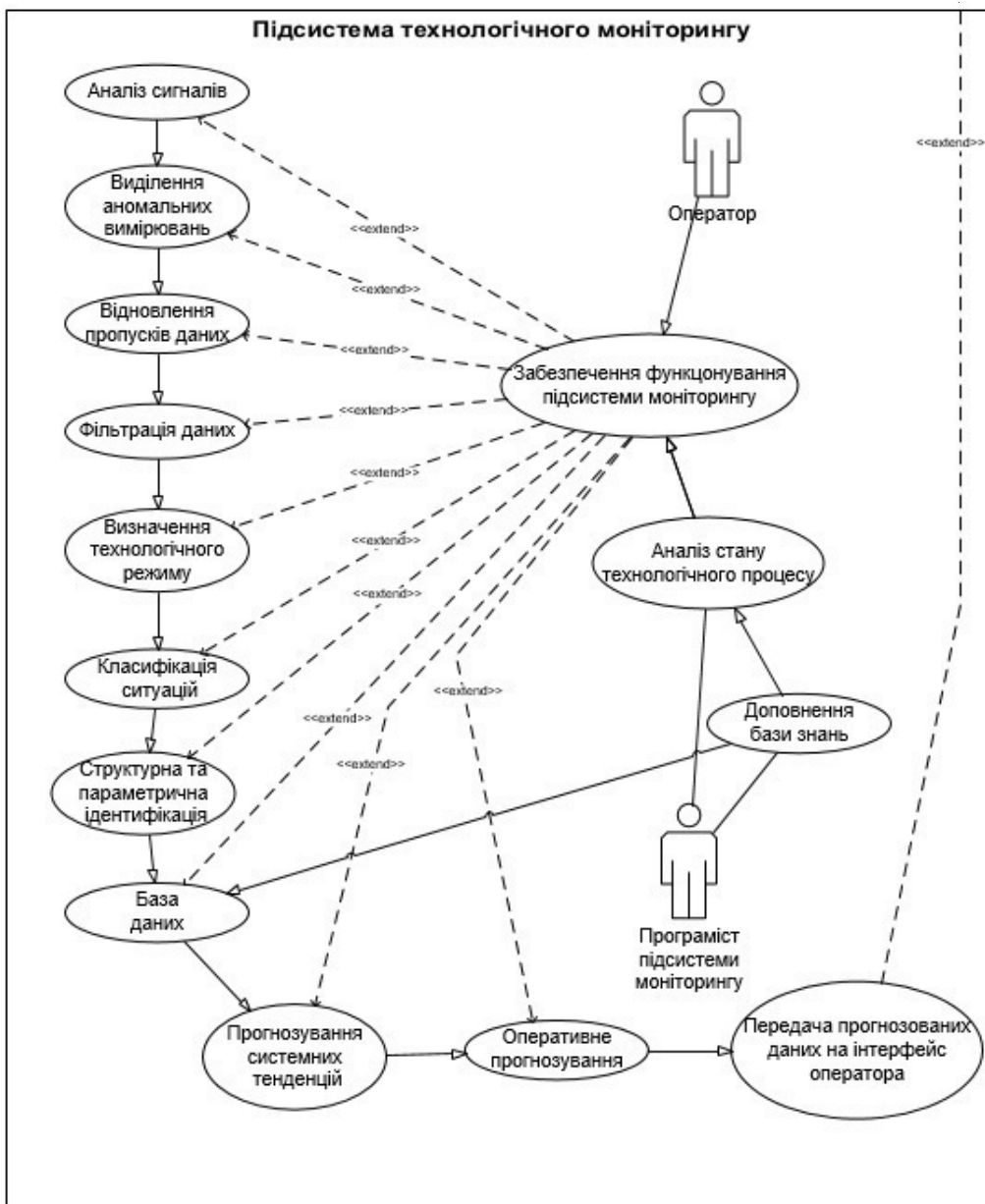


Рис. 2.25. Use Case diagram

2.5 Розробка BDD технічної складової АСК вакуум-апарату

Керована поведінкою розробка, це розширення керованої тестами розробки, яка використовує прості предметно-орієнтовані мови програмування. Ці мови перетворюють запити природною мовою у виконувані тести. Результатом є більш тісний зв'язок з критеріями прийнятності для конкретної функції та тестами, які використовуються для перевірки цієї функціональності.

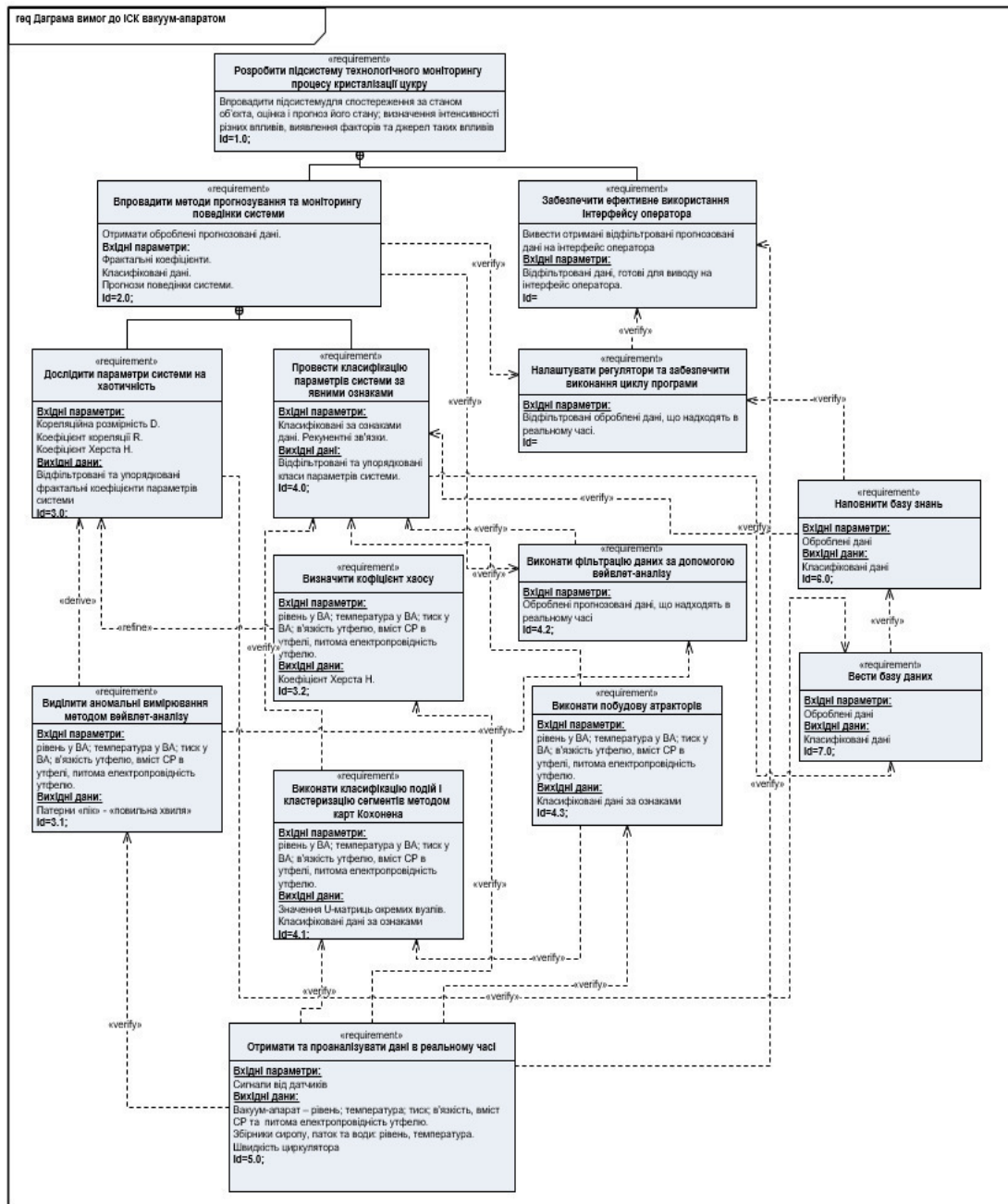


Рис. 2.26. Функціональні вимоги до підсистеми системи технологічного моніторингу

2.6 Розробка алгоритмічного забезпечення ІСК

2.6.1 Визначення життєвого циклу ІСК та її процесів (State Machine diagram, Activity diagram)

Діаграми станів (state machine diagrams) - це відома технологія опису поведінки системи. У тому чи іншому вигляді діаграми станів існують з 1960 року, і на зорі об'єктно-орієнтованого програмування вони застосовувалися для подання поведінки системи. В об'єктно-орієнтованих підходах зображується діаграма станів єдиного класу, щоб показати поведінку одного об'єкта протягом його життя.

На рис. 2.27 наведена діаграма активності підсистеми технологічного моніторингу СА вакуум-апарату.

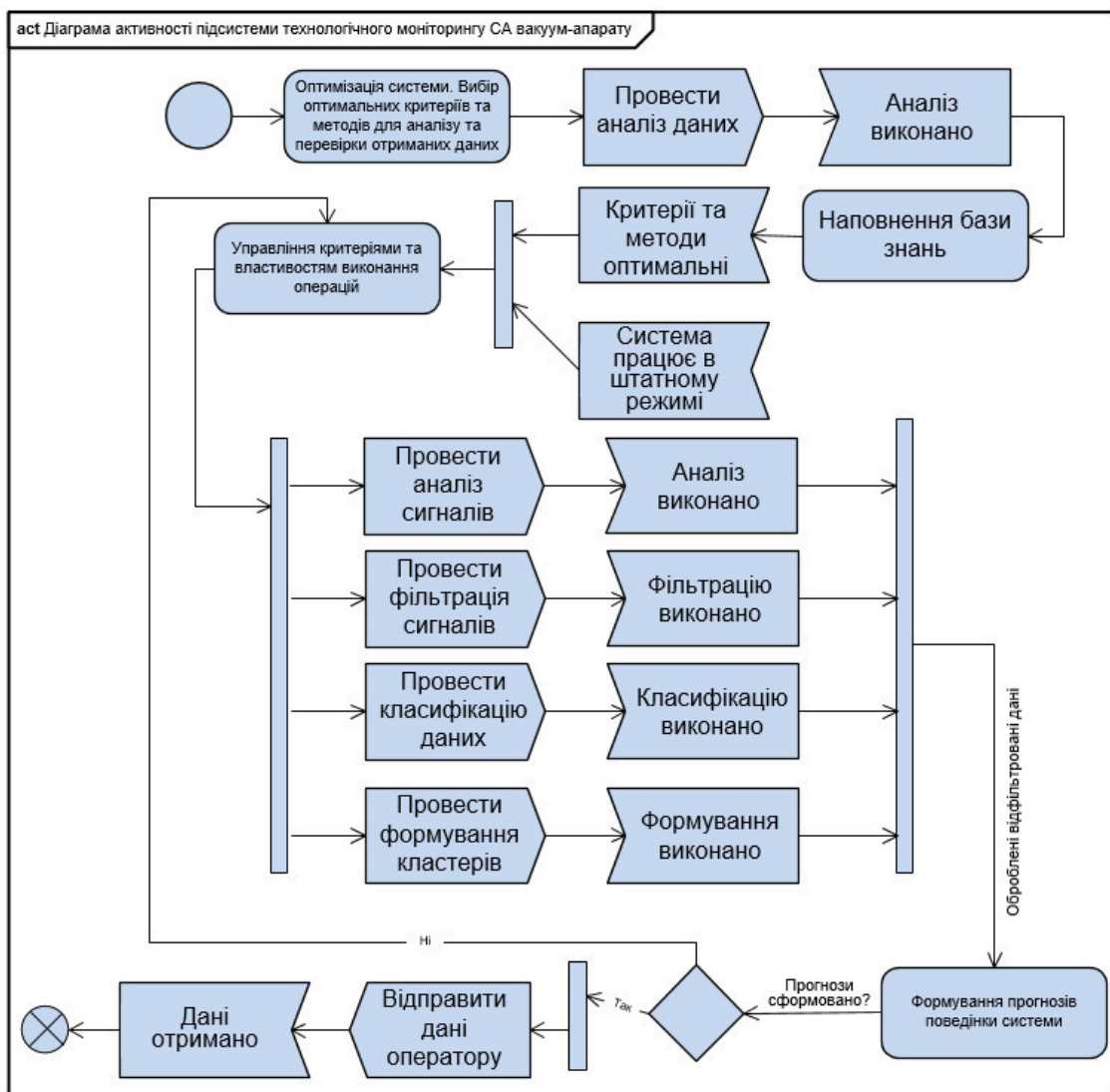


Рис. 2.27. Діаграма активності підсистеми моніторингу СА ВА

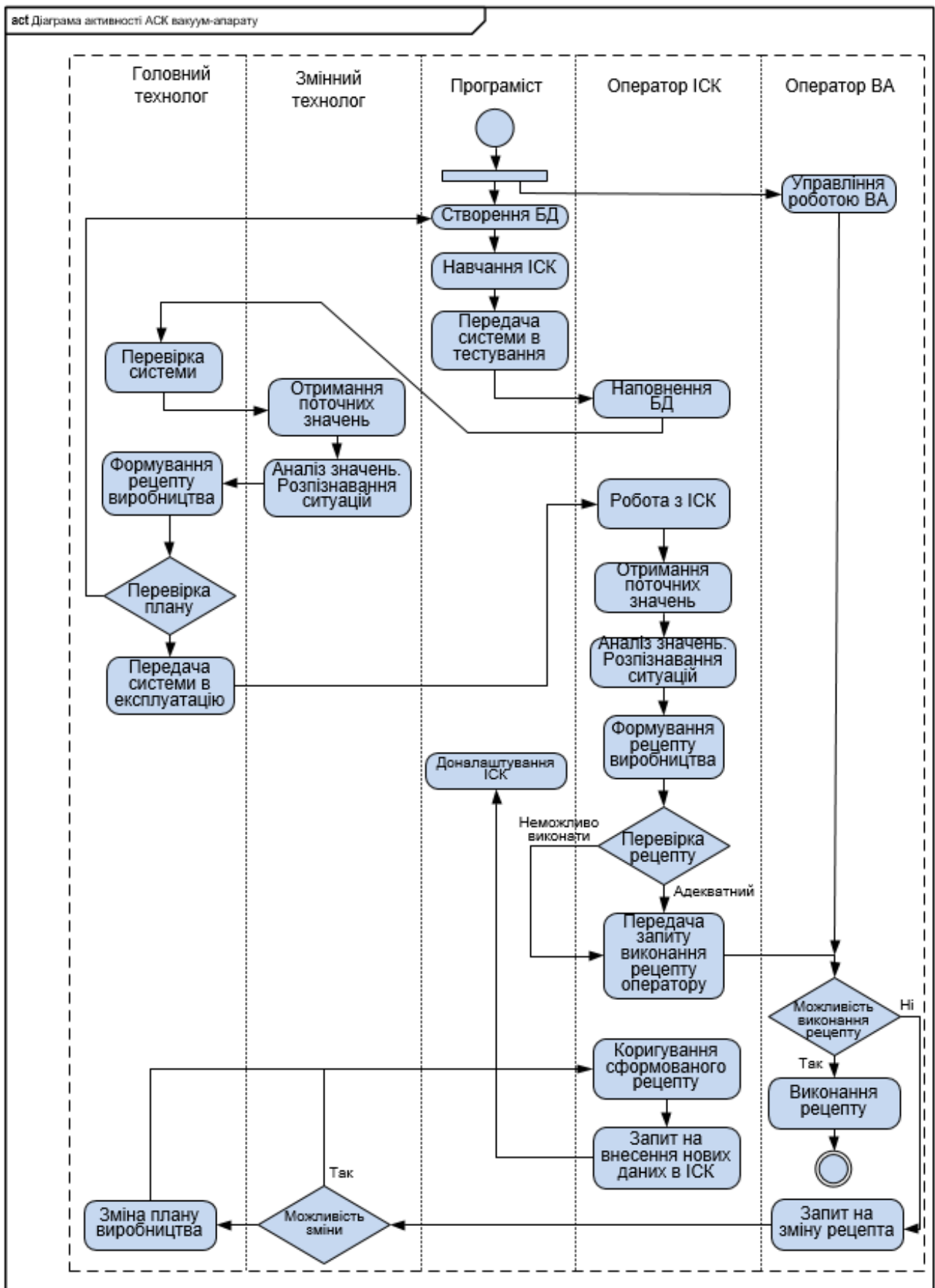


Рис. 2.28. Діаграма активності АСК ВА

2.6.2 Вирішення проблеми синхронізації підсистем (Sequence diagram)

Діаграма послідовності (Sequence diagram) показує інформацію про взаємодію блоків на часовій послідовності. Діаграма має два виміри: вертикальну вісь, що представляє час і горизонтальну вісь, що представляє об'єкти-учасники.

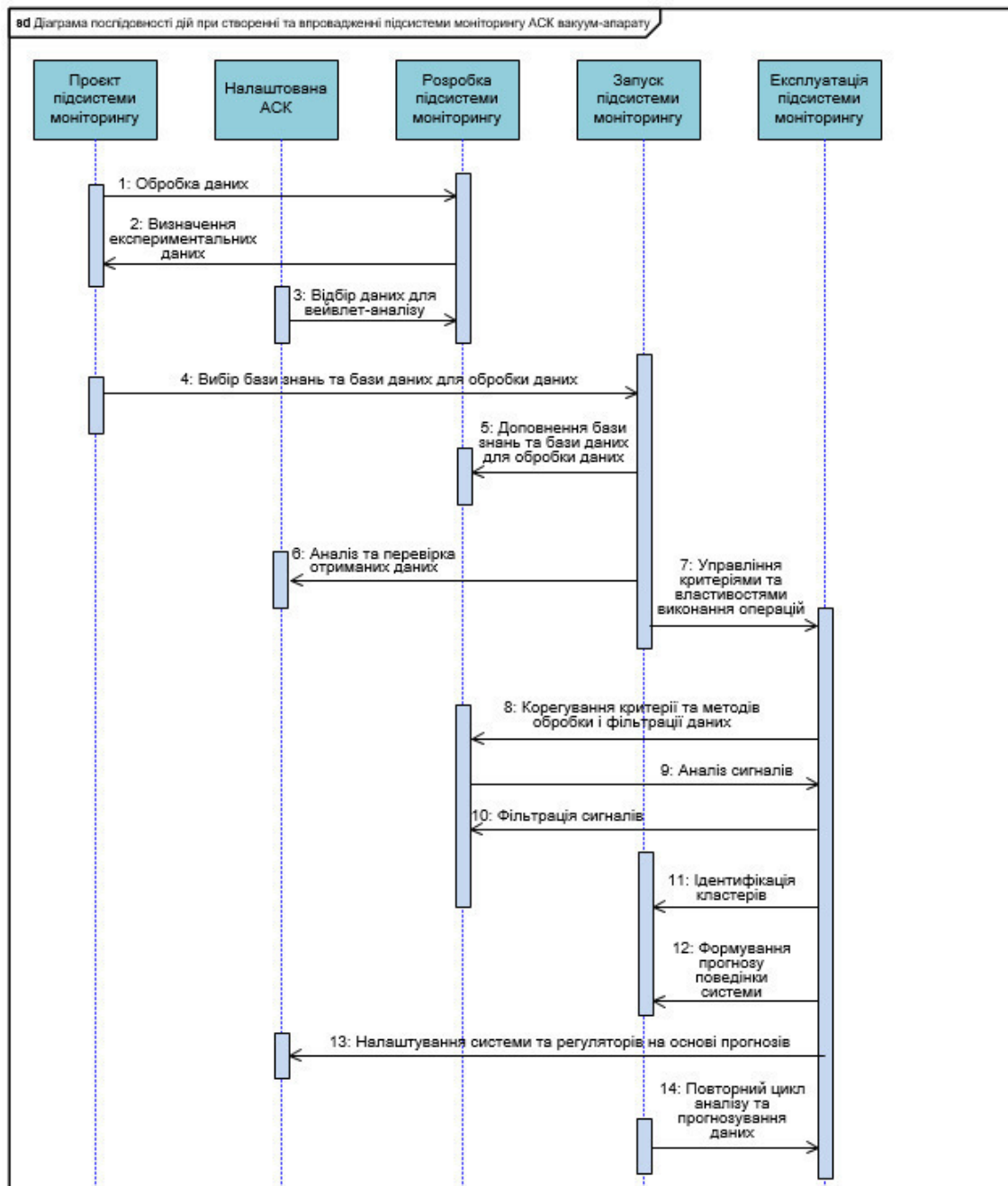


Рис. 2.29. Діаграма послідовності дій при створенні та впровадженні підсистеми моніторингу АСК вакуум-апарату

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОГО ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІСК

3.1 Вибір програмного забезпечення для всіх компонентів системи

Програмний пакет-редактор FBD-програм Alfa призначений для програмування функціональними блоками мікропроцесорних контролерів МІК-52 виробництва підприємства "Мікрол" [34].

Функціональні можливості пакета:

- а) розробка FBD-програми для контролера в спеціальному редакторі;
- б) запис FBD-програми в контролер;
- в) читання FBD-програми з контролера для збереження в комп'ютері, перевірки, друку на принтері або редагування;
- г) емуляція й налагодження роботи програми;
- д) додаткові сервісні можливості.

Програмування виконується за допомогою функціональних блоків.

Фрагменти FBD-програми, які були створені для контролера, запропонованої системи автоматизації представлені нижче та в графічній частині проєкту.

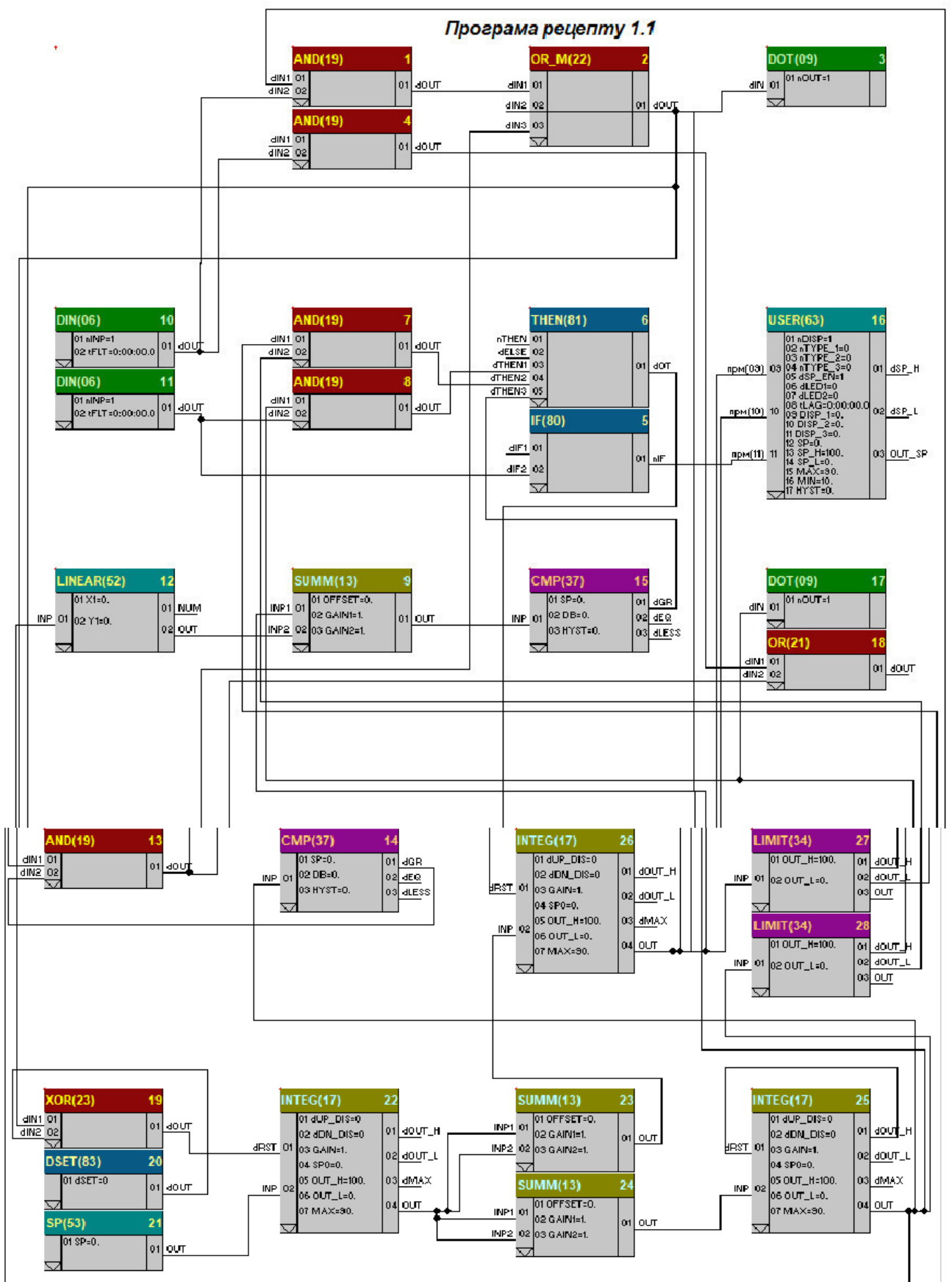


Рис. 3.1. Програма користувача для ПЛК МІК-52Н ("виконання рецепту 1.1")

Панелі оператора Weintek оснащені інтерфейсом Ethernet, декількома портами RS-232/485, деякі моделі портами CAN. Підтримується більше 250 протоколів обміну даними.

Також у Weintek реалізувана функція вільного протоколу: в разі, якщо необхідний користувачеві протокол передачі даних не підтримується за замовчуванням, користувач сам може описати формат команд-запитів і задати спосіб розшифровки відповідей.

Панелі Weintek оснащені процесором Cortex A8 з тактовою частотою від 600 МГц до 1 ГГц. Висока продуктивність панелі дозволяє реалістично анімувати зображення, миттєво відкривати JPEG-файли, виконувати багатовіконний додатків, ефективно працювати з базами даних.

Середовище розробки HMI-інтерфейсів для панелей оператора Weintek - EasyBuilder Pro. Розробником є компанія Weintek Labs, виробник графічних панелей оператора [35].

У новій версії EasyBuilder Pro оновлені як інтерфейсна частина, так і функціональні характеристики. При цьому зберігається повна підтримка напрацювань: проекти, зроблені в середовищі розробки попереднього покоління, можуть бути вільно імпортовані в нове середовище.

EasyBuilderPro використовує стрічковий інтерфейс, в якому все значки згруповані за категоріями, що, укупі з новим інтуїтивним дизайном іконок, дозволяє легко відшукати потрібну опцію. Такий інтерфейс добре знайомий користувачам по роботі з продуктами Microsoft. У середовищі розробки підтримується російський інтерфейс.

Присутня можливість з'єднання і обміну інформацією HMI-панелі з SQL-сервером і використання SQL-запитів. Результат таких запитів можна вивести прямо на панель.

При включенні нового режиму швидкого відображення вид деяких елементів зберігається в кеш, внаслідок чого вони швидше відображаються при зміні екрану. Підтримується швидке відображення наступних елементів: анімація,

лампа (біт / слово), динамічна шкала, гістограма, що рухається фігура, цифровий і ASCII дисплей.

Нижче наведено скріншоти інтерфейсу оператора вакуум-апарату.

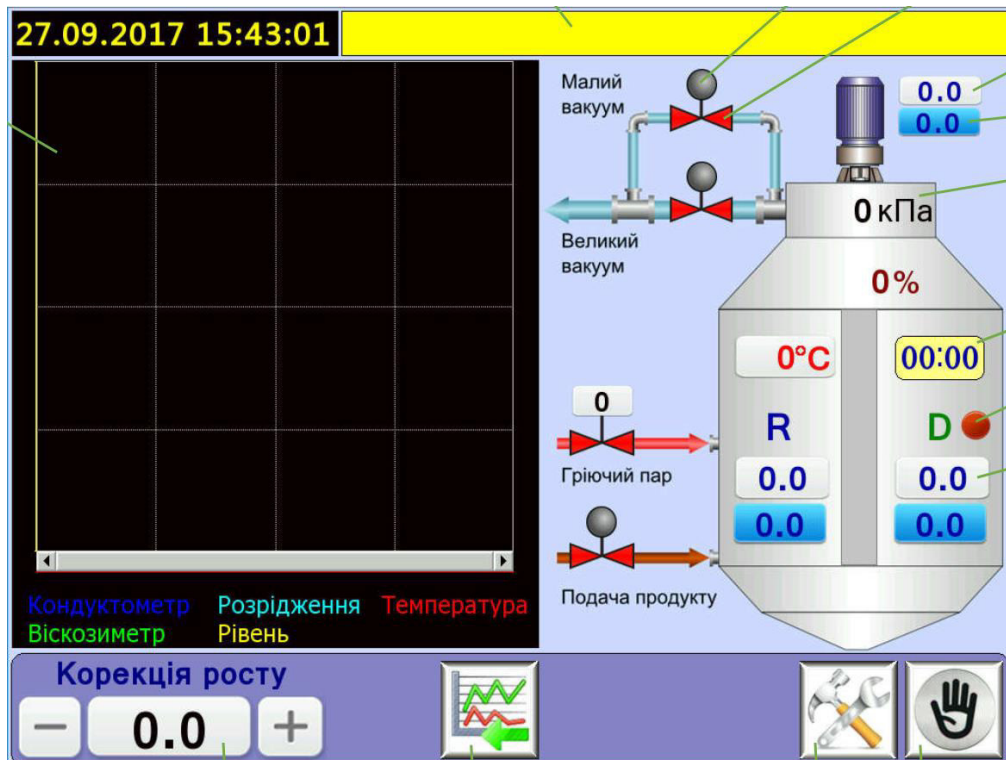


Рис. 3.2. Головна мнемосхема

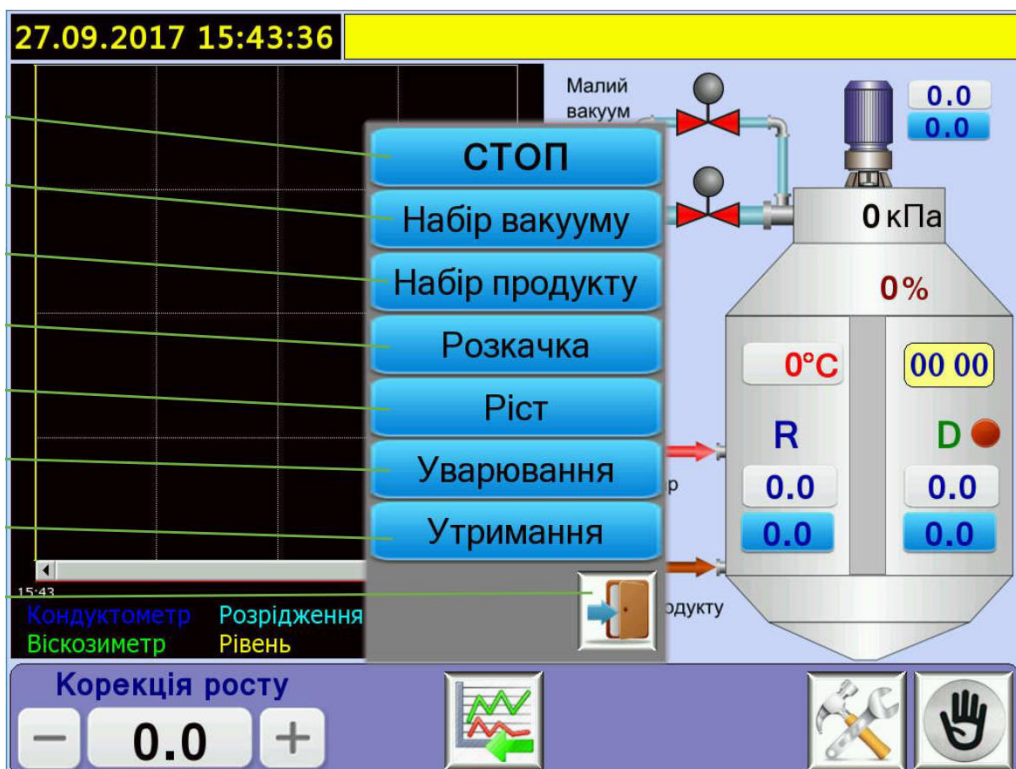


Рис. 3.3. Екран "Вибір стадії"



Рис. 3.4. Екран "Інженерні параметри"

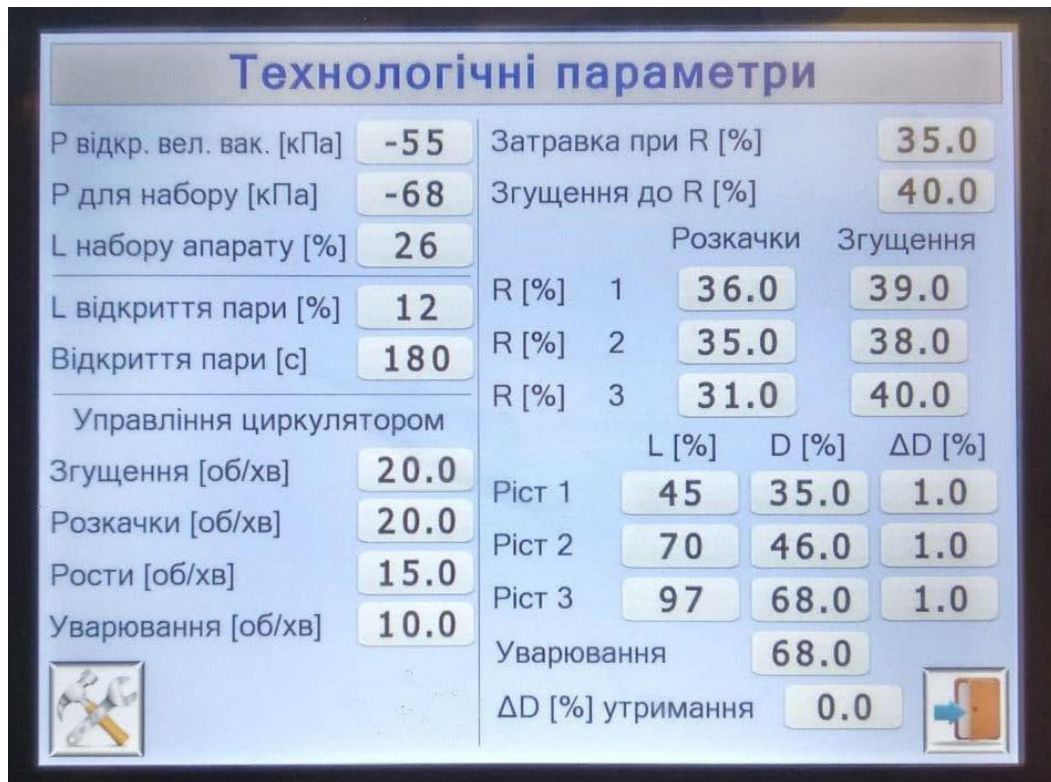


Рис. 3.5. Екран "Технологічні параметри"

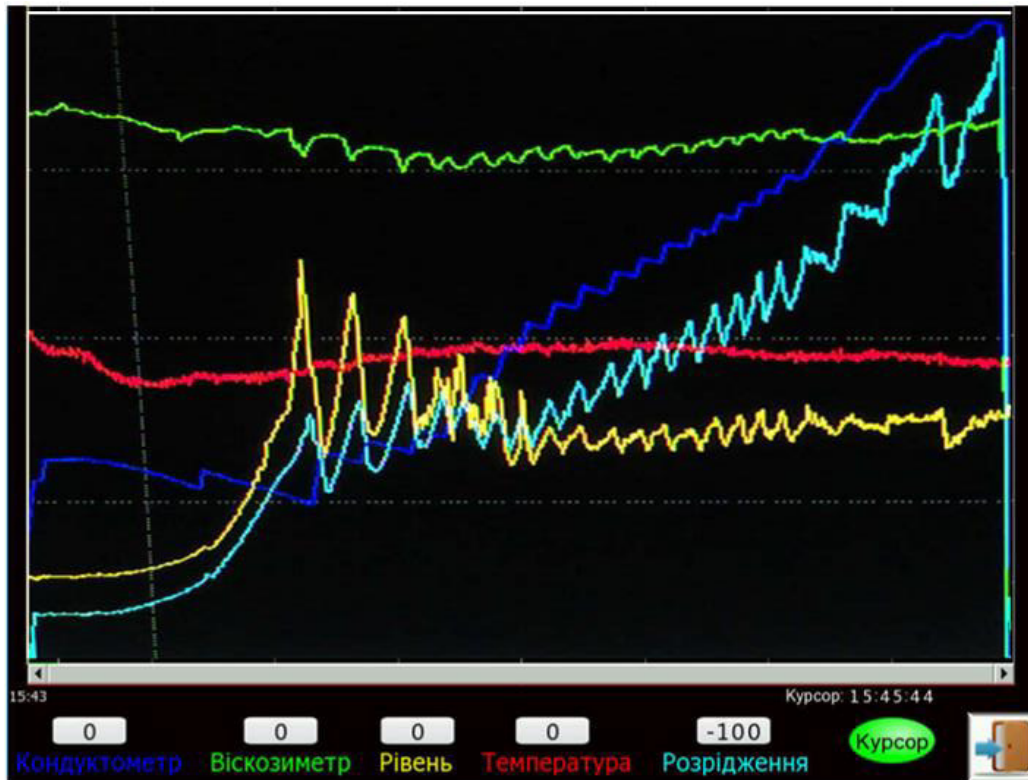


Рис. 3.6. Екран "Технологічні тренди"

TRACE MODE 6 є потужною виконавчою системою, що використовується в промислових контролерах для безпосереднього цифрового управління технологічними процесами будь-якої складності [36].

Система TRACE MODE 6 підтримує практично будь-які формати даних, в цьому вона стала більш схожа на універсальне середовище візуального програмування.

Платформа для управління виробництвом TRACE MODE 6 складається з інтегрованого середовища розробки, в якій здійснюється створення проектів АСУ та набору виконавчих модулів, що забезпечують функціонування системи в реальному часі. Інтегроване середовище включає повний набір засобів розробки систем автоматизації технологічних процесів, а саме створення:

- 1) операторського інтерфейсу;
- 2) розподілених операторських комплексів;
- 3) промислової бази даних реального часу;
- 4) програм для промислових контролерів.

Робота TRACE MODE в режимі реального часу здійснюється через виконавчі модулі (монітор реального часу) під управлінням яких запускається автоматизована система управління. Монітори реального часу системи циклічно виконують такі операції:

- 1) обмін даними з контролерами;
- 2) збереження даних;
- 3) обмін даними з іншими додатками.

Система паролів і прав доступу TRACE MODE 6 контролює до 4096 користувачів з індивідуальними паролями в рамках одного проекту. Користувачі, що мають доступ до системи, можуть бути розбиті на вісім груп, але максимальне число користувачів не повинно перевищувати 32 000.

Інтегроване середовище розробки TRACE MODE 6 це унікальне поєднання функціональності та інтерфейсу. Практика показує, що використання інтегрованого середовища розробки дозволяє економити до 30% робочого часу в порівнянні з застосуванням розрізнених редакторів SCADA і систем програмування контролерів. А інтеграція економічних модулів SCADA системи TRACE MODE відкриває раніше недоступні можливості для оптимізації виробництва в цілому.

3.2. Розробка міжпрограмної взаємодії ІСК (Internal Block diagram)

Діаграма внутрішнього блоку фіксує внутрішню структуру блоку з точки зору характеристик та зв'язків між характеристиками. Блок включає характеристики, такі як значення, частини та посилання на інші визначені блоки. Внутрішня блокова діаграма, створена для блоку (як внутрішнього елемента), відобразить лише внутрішні елементи класифікатора (частини, порти та

з'єднувачі), внутрішня блокова діаграма, створена для пакета, відобразить додаткові елементи (форми, примітки та коментарі).

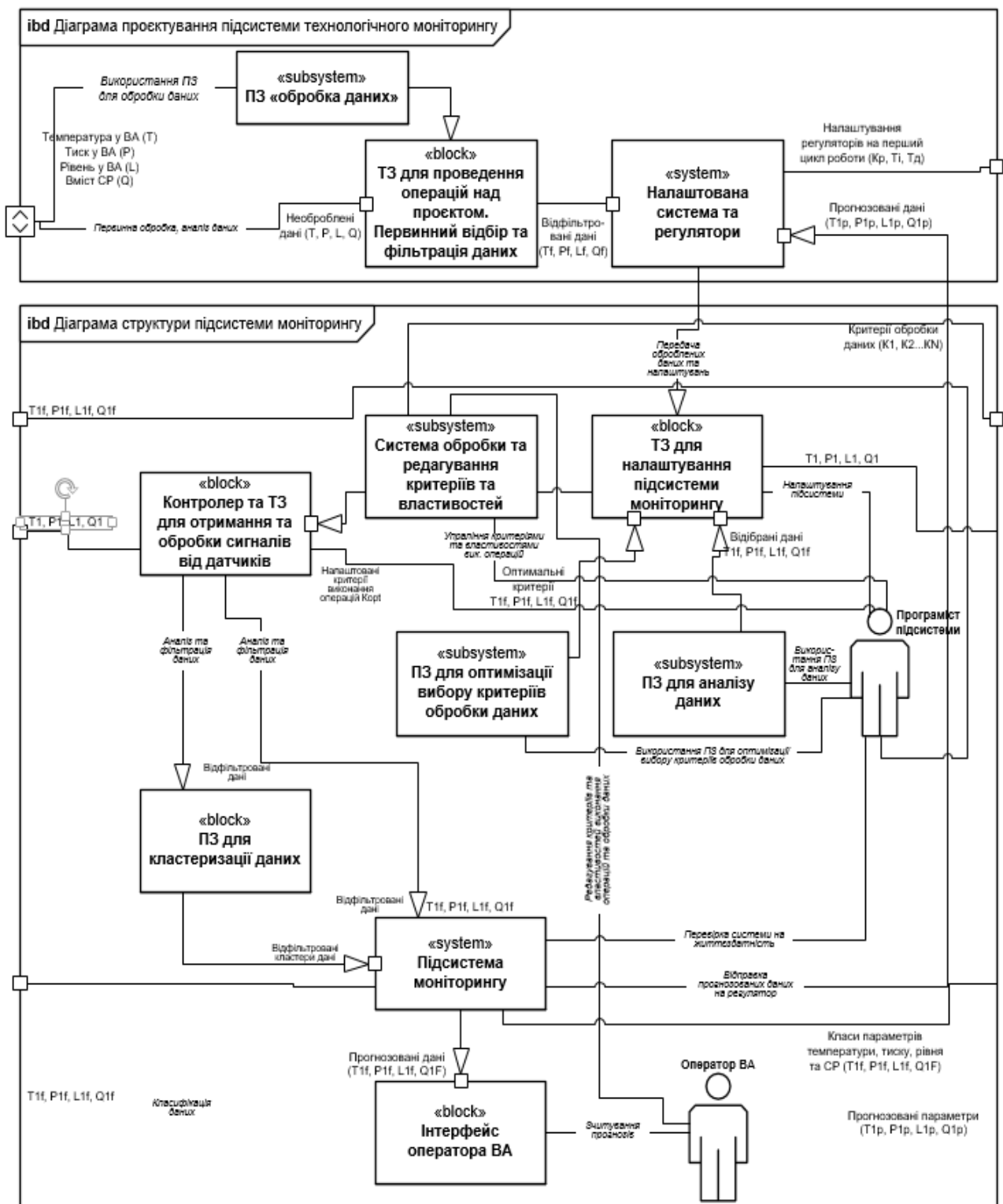


Рис. 3.7. Внутрішня блокова діаграма IBD підсистеми технологічного моніторингу

3.3 Розробка та моделювання ІСК

Одним з новітніх методів управління технологічними процесами виробництва є використання інтелектуальних систем управління на основі нечіткої логіки. Використання нечіткої логіки забезпечує відносно простий шлях управління складних для опису слабоформалізованих процесів, які характеризуються суттєво нелінійною поведінкою [37].

За допомогою нечіткої логіки існує можливість імітації розумових здібностей людини для опису управління процесами, в основі яких є опис набору правил виду:

П1: Якщо $X \in A1$, тоді $Y \in B1$,

П2: Якщо $X \in A2$, тоді $Y \in B2$,

... ..

Пn: Якщо $X \in An$, тоді $Y \in Bn$,

де X – вхідна змінна, Y – вихідна змінна, A та B – функції належності, визначені відповідно на X та Y .

Під нечітким управлінням (Fuzzy Control) у даному випадку розуміється стратегія управління, яка заснована на емпірично набутих знаннях відносно функціонування об'єкта, які представлені у лінгвістичній формі у вигляді сукупності правил. В якості передумов до застосування нечітких регуляторів зазвичай називають:

- велика кількість вхідних параметрів;
- велика кількість керуючих параметрів;
- нелінійність;
- неточність математичної моделі;

- сильні збурення. На рис. 3.8 представлена блок-схема нечіткого регулятора [38]. Нечіткий регулятор складається з чотирьох взаємопов'язаних блоків, причому формування бази знань базується на методах представлення та пошуку знань. Основна роль у цьому процесі віддається оператору-експерту, який здійснює наповнення бази знань набором правил.



Рис. 3.8. Блок-схема нечіткого регулятора

T_n - температура у ВА, $P_{ен}$ - розрідження в апараті, ΔL – рівень в апараті, V_y - в'язкість утфелю, t_n - тривалість процесу кристалізації

Важливою умовою ефективного функціонування нечіткого регулятора є побудова несуперечливої і оптимально повної бази знань. Функціонування бази знань здійснюється надбудованою машиною логічного виводу, яка представляє собою механізм міркувань, які оперують знаннями і з метою отримання нових знань. Використання нечітких регуляторів в умовах невизначеності призводить до формування керуючих сигналів управління, які залежать не тільки від експертів та фіксованих факторів, але і від слабо визначених показників, які не контролюються експертами та/або недостовірно відомих їм в момент прийняття рішень [37].

3.3.1. Лінгвістична апроксимація вхідних та вихідних змінних

На основі декомпозиції процесу уварювання утфелю і кристалізації визначені основні контролюючі та управляючі змінні вакуум-апарату і продукту, які наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Основні контролюючі та управляючі змінні вакуум-апарату I кристалізації

Параметр	Позначення	Оптимальне значення	
		min	max
Рівень у вакуум-апараті, %	ΔL	15	95
Температура утфелю у вакуум-апараті, °C	T_n	74	78
Розрідження у вакуум-апараті, кПА	P_{en}	84	89
В'язкість утфелю, Па·с	V_y	10	60
Тривалість процесу кристалізації, хв	t_n	180	210

Множина факторів, які впливають на режими роботи вакуум-апарату I кристалізації, представлено у вигляді лінгвістичних змінних [39] (табл. 3.2).

Таблиця 3.2.

Фактори впливу на процес кристалізації у вакуум-апараті		
	Позначення	Зміст
Ф1	Ф1.1	В'язкість утфелю низька
	Ф1.2	В'язкість утфелю нижче норми
	Ф1.3	В'язкість утфелю в нормі
	Ф1.4	В'язкість утфелю вище норми
	Ф1.5	В'язкість утфелю висока
Ф2	Ф1.1	Температура в апараті низька
	Ф1.2	Температура в апараті нижче норми
	Ф1.3	Температура в апараті в нормі
	Ф1.4	Температура в апараті вище норми
	Ф1.5	Температура в апараті висока
Ф3	Ф1.1	Розрідження в апараті низьке
	Ф1.2	Розрідження в апараті ю нижче норми
	Ф1.3	Розрідження в апараті в нормі
	Ф1.4	Розрідження в апараті вище норми
	Ф1.5	Розрідження в апараті високе
Ф4	Ф1.1	Рівень в апараті низький
	Ф1.2	Рівень в апараті нижче норми
	Ф1.3	Рівень в апараті утфелю в нормі
	Ф1.4	Рівень в апараті утфелю вище норми
	Ф1.5	Рівень в апараті утфелю високий
Ф5	Ф1.1	Тривалість процесу кристалізації низька
	Ф1.2	Тривалість процесу кристалізації нижче норми
	Ф1.3	Тривалість процесу кристалізації в нормі
	Ф1.4	Тривалість процесу кристалізації вище норми
	Ф1.5	Тривалість процесу кристалізації висока

Фактори, які впливають на виконання простих цілей управління вакуум-апаратом, визначають режими роботи та можливість оптимізації процесів уварювання утфелю I кристалізації. Визначальними факторами впливу на стабільність роботи вакуум-апарату є забезпечення управління оптимальних режимів його роботи. Реалізація нечіткого моделювання здійснюється за допомогою інструментального середовища Matlab та його додатку Fuzzy Logic [40].

Програмно сценарій представлено за допомогою нечітких продукційних правил. Загалом система нечіткого виводу для управління вакуум-апаратом охоплює 3 вхідні та 2 вихідні змінні (рис. 3.9).

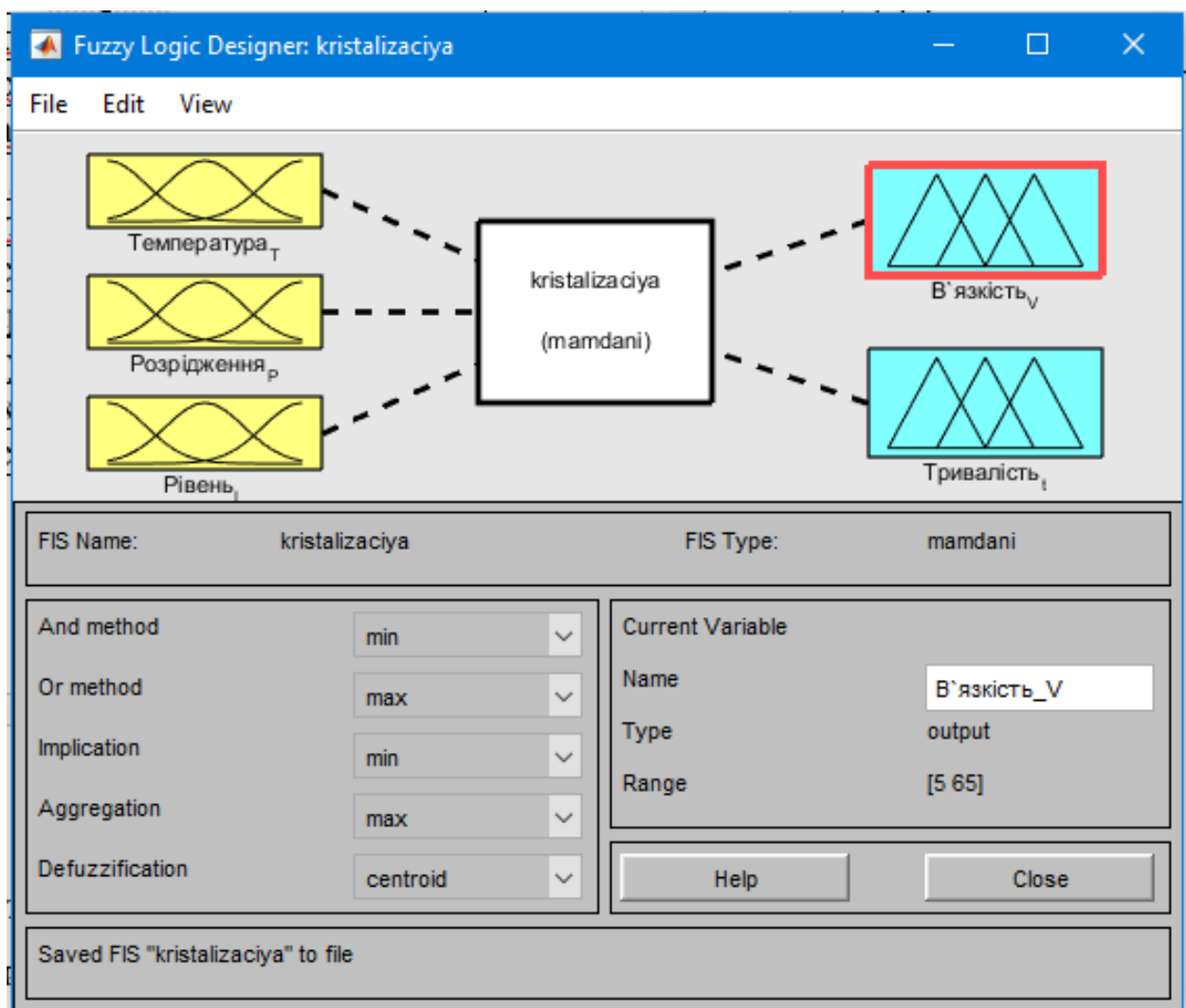


Рис. 3.9. Структура підсистеми аналізу та управління вакуум-апаратом

Для реалізації алгоритмів управління роботою вакуум-апарату необхідною є формалізація змінних, які характеризують процес уварювання.

Для цього здійснюється вирішення задачі лінгвістичної апроксимації.

Як приклад, розглядається апроксимація функцій належності в'язкості утфелю. Побудова функцій належності в'язкості утфелю оцінюється п'ятьма термами з чітко визначеним робочим діапазоном, даний фактор визначений на універсальній множині Φ_1 в діапазоні від 10 до 60 Па·с. Для лінгвістичної апроксимації сухих речовин в сиропі використовується аналітичний підхід. При цьому діапазон в'язкості утфелю розбитий на піддіапазони, враховуючи при цьому експертну інформацію, отриману в результаті експертного опитування. На рис. 3.10 наведено налаштування функцій належності входів та виходів.



Рис. 3.10. Налаштування функцій належності

На рис. 3.11 наведений приклад лінгвістичної апроксимації змінної – «в'язкості утфелю».

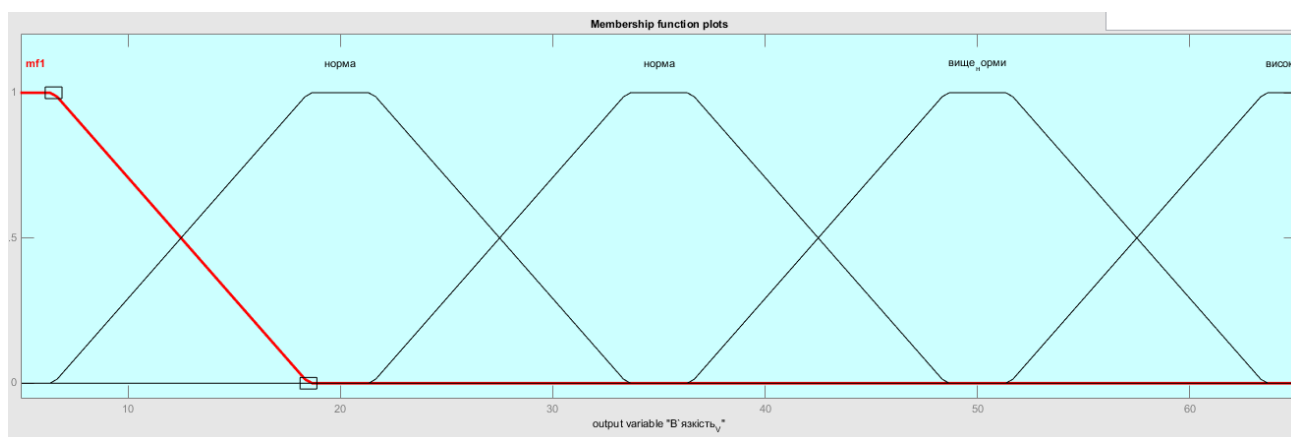


Рис. 3.11. Лінгвістична апроксимація в'язкості утфелю

3.3.2 Лінгвістична апроксимація вхідних та вихідних змінних

Послідовність управляючих дій визначається на множині вхідних та вихідних змінних представлених як нечіткі величини. Вибір необхідного сценарію, як блоку нечіткої моделі сценаріїв, здійснюється модулем вибору сценаріїв управління із бази знань в результаті аналізу та розпізнавання ситуацій і прогнозу розвитку об'єкта. На програмному рівні кожний блок являє собою окрему автономну підсистему загальної системи бази знань, представлених за допомогою продукційних правил типу If ... then (Якщо ,Тоді). База знань складається з максимально можливої кількості правил). На рис. 3.12 наведено перелік продукційних правил, які містить база знань вибору оптимального режиму роботи вакуум-апарату.

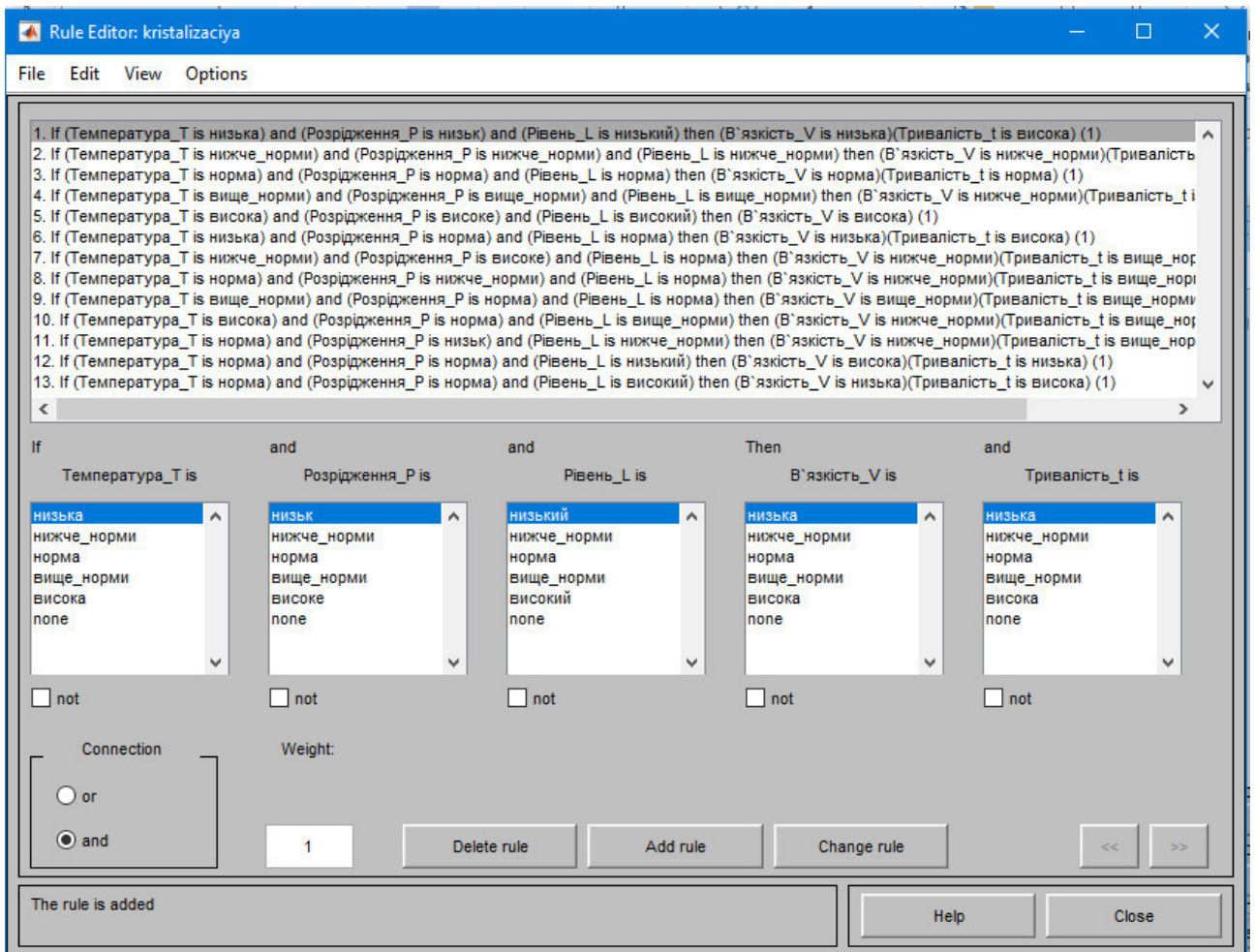


Рисунок 3.12 – Правила для нечіткої системи

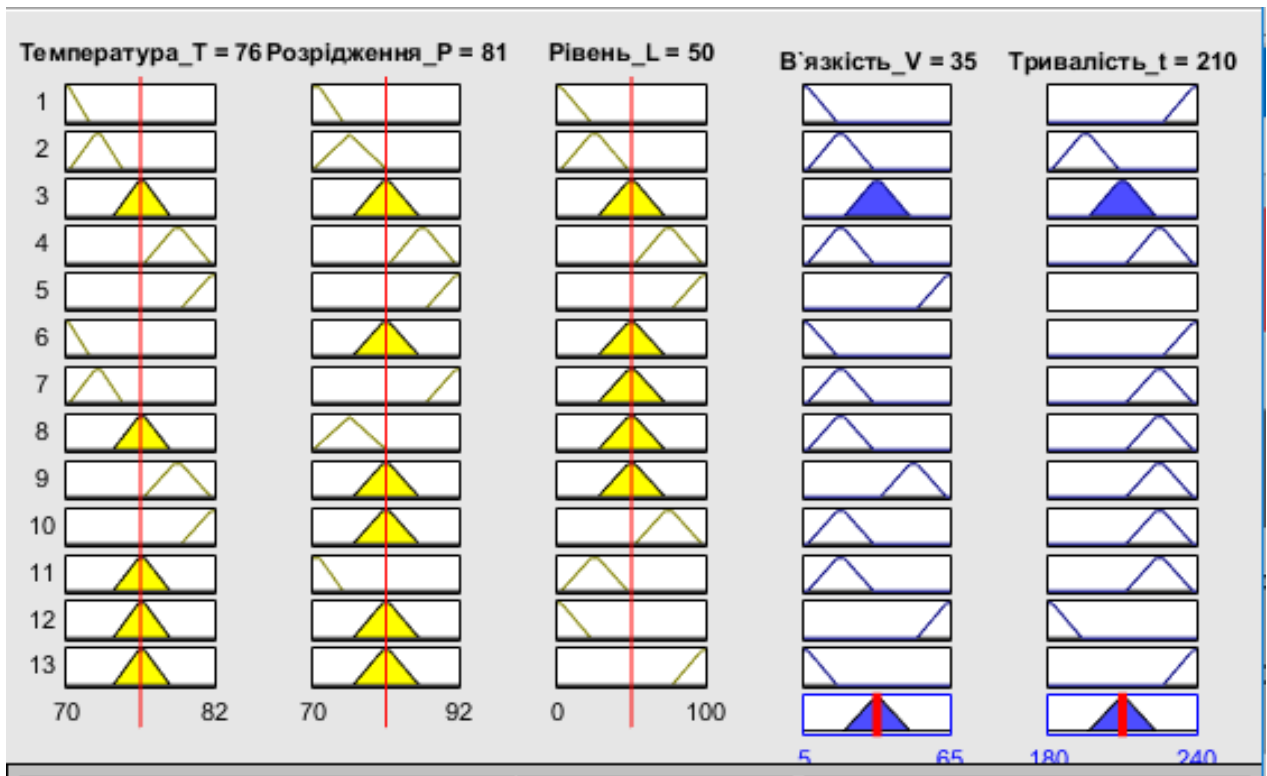


Рис. 3.13. Графічне відображення роботи алгоритму нечіткого висновку

В результаті побудови бази знань отримано поверхні нечіткого виводу. Приклади отриманих поверхонь відгуку представлені на рис. 3.14 – 3.18. Наведені поверхні нечіткого виводу представляють собою залежності між значеннями основних вхідних та вихідних лінгвістичних змінних (табл. 3.2). За їх допомогою можна перевірити настройку алгоритму виводу, а також адекватність при реалізації управління вакуум-апаратом за допомогою нечіткого логічного регулятора.

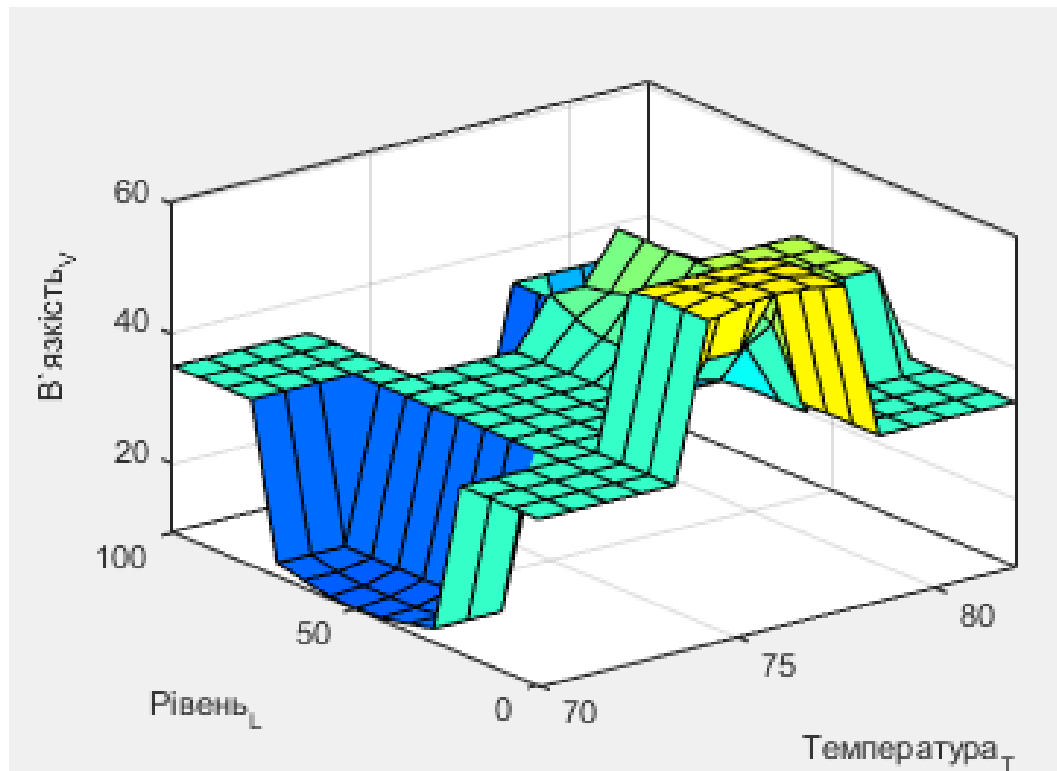


Рис. 3.14. Поверхня нечіткого виводу: залежність регулювання в'язкості утфелю від рівня і температури в апараті

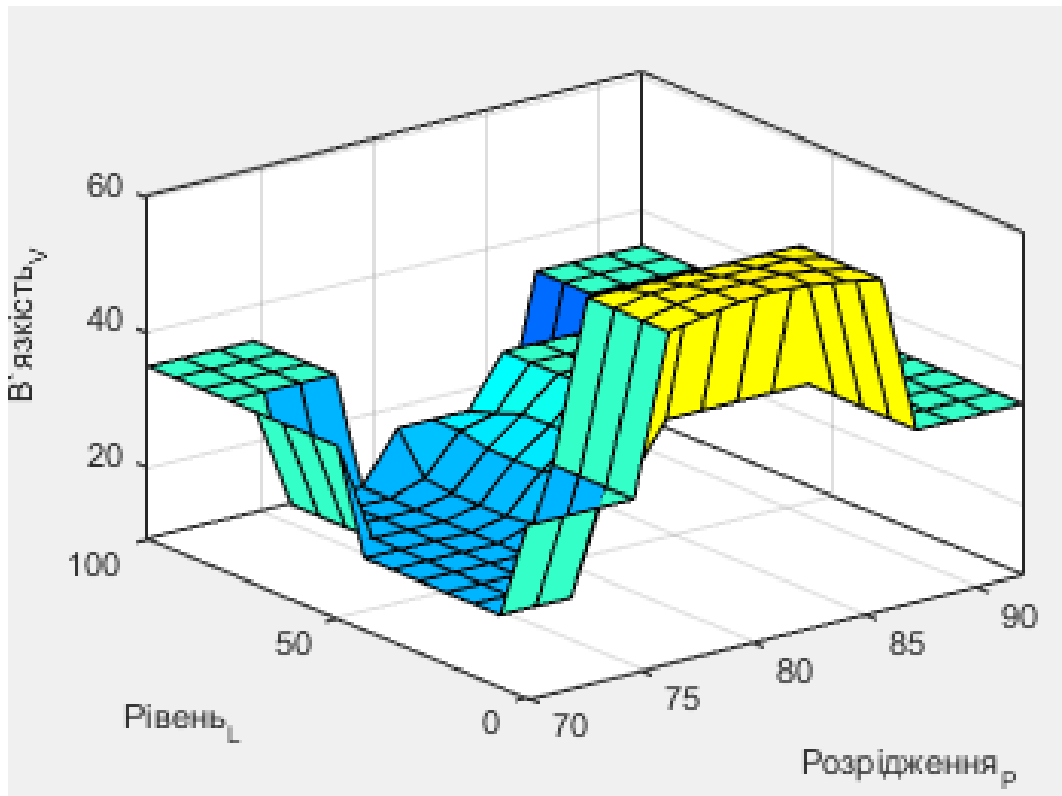


Рис. 3.15. Поверхня нечіткого виводу: залежність регулювання в'язкості утфелю від рівня і розрідження в апараті

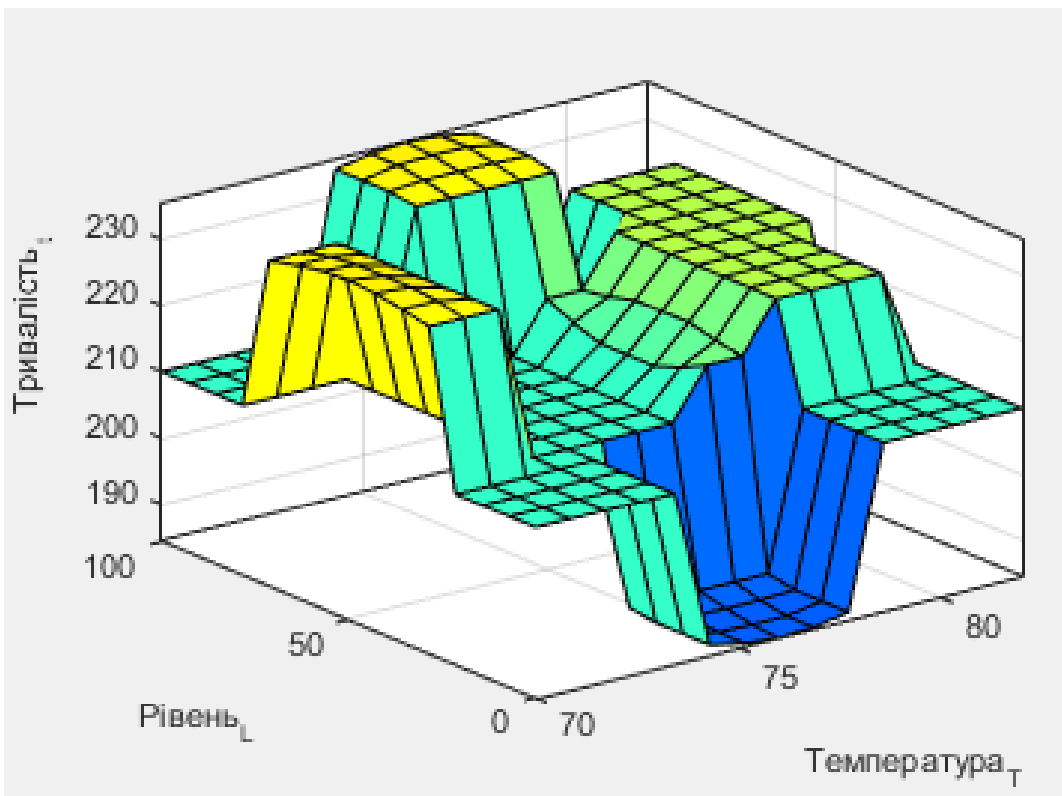


Рисунок 3.16. Поверхня нечіткого виводу: залежність регулювання тривалості процесу кристалізації від рівня і температури в апараті

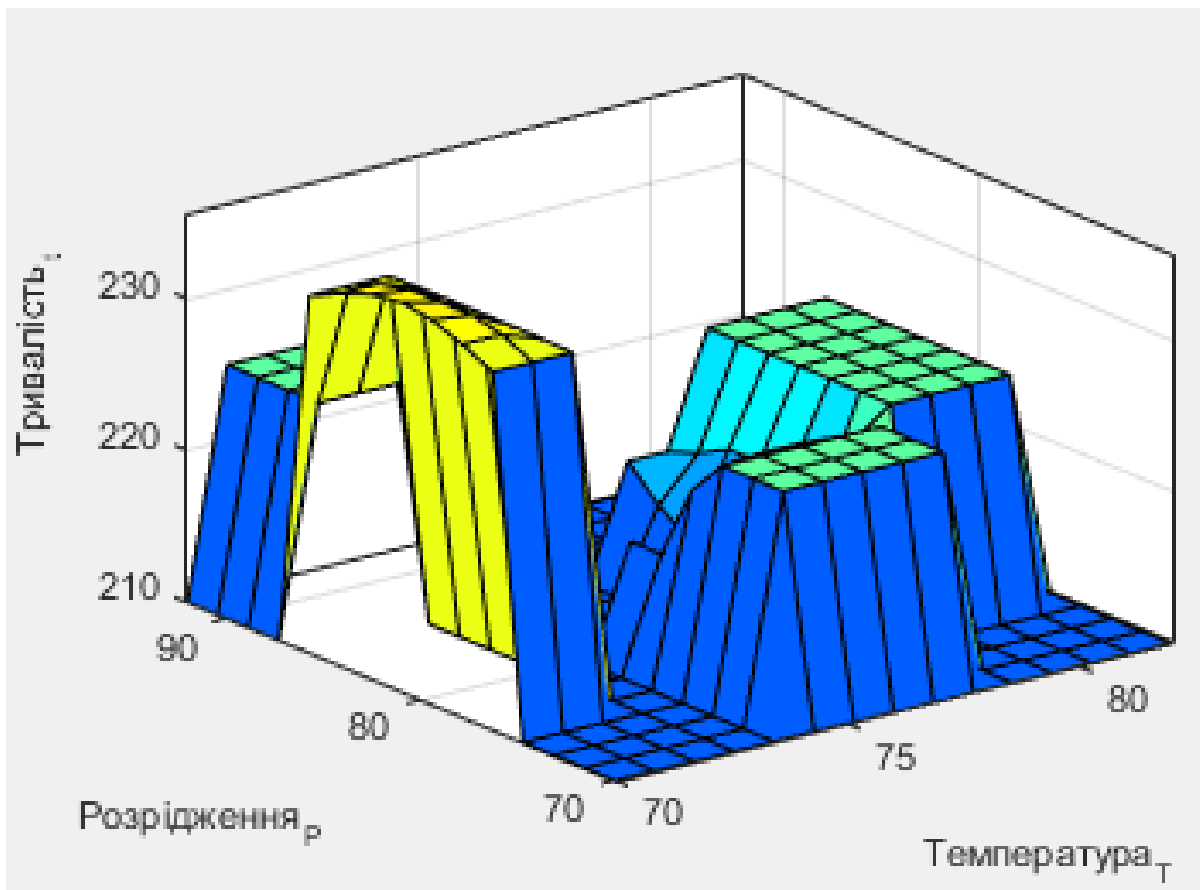


Рис. 3.17. Поверхня нечіткого виводу: залежність регулювання тривалості процесу кристалізації від розрідження і температури в апараті

3.4 Обробка експериментальних даних процесу кристалізації цукру

При дослідженні часових рядів, що описують технологічні об'єкти, з метою автоматизації процесу виявлення подій і станів таких об'єктів, сигнал спотворюється впливом найрізноманітніших шумів. До таких сигналів можливе застосування технології Data Mining [41]. Дослідження сигналів методом Data Mining проводиться в кілька етапів.

Використання методів виділення особливостей сигналів на підставі застосування методів сегментації і подальша уніфікація сегментів є ключовим етапом. Після отримання підготовленого матеріалу необхідно його систематизувати з виділенням класів, які відповідають основним групам подій.

Оскільки для сегментів не існує апіорі заданих класів, то до них потрібно застосувати методику кластеризації. Зіставлення подій кластерам сегментів відбувається в хронологічному порядку, ґрунтуючись на гіпотезі, що в один момент часу відбувається одна подія.

Заключним етапом є побудова і навчання нейронної мережі, здатної в реальному часі обробляти дані технологічного часового ряду і класифікувати події та стану технологічного відділення, і подальше тестування і оцінка працездатності такої моделі.

Нижче представлена узагальнена схема роботи системи виявлення та ідентифікації подій (рис. 3.18).

Попередня обробка вихідних даних. Мета попередньої обробки - зменшити сторонні шуми [42]:

- усунення основного тренду і перехід до незміщеної оцінки ряду;
- нормалізація вихідних даних;
- проведення кратномасштабного вейвлет-аналізу.

Все частіше застосовується вейвлет-аналіз, що дає уявлення про сигнал у частотно-часовій області.

Впровадження в механізми обробки даних методів вейвлет-аналізу наочно показує їхню здатність комплексно підходити до рішення завдань. Найбільш відомі застосування вейвлет-аналізу для подавлення шуму наведені в роботі [43].

Реальні дані часто містять випадваючі ділянки; для обробки таких сигналів розроблені адаптивні вейвлет-методи. Реалізація всіх цих притягальних властивостей вейвлетів іноді стримується значним обсягом необхідних обчислень, що приводить до низької швидкості обробки даних.

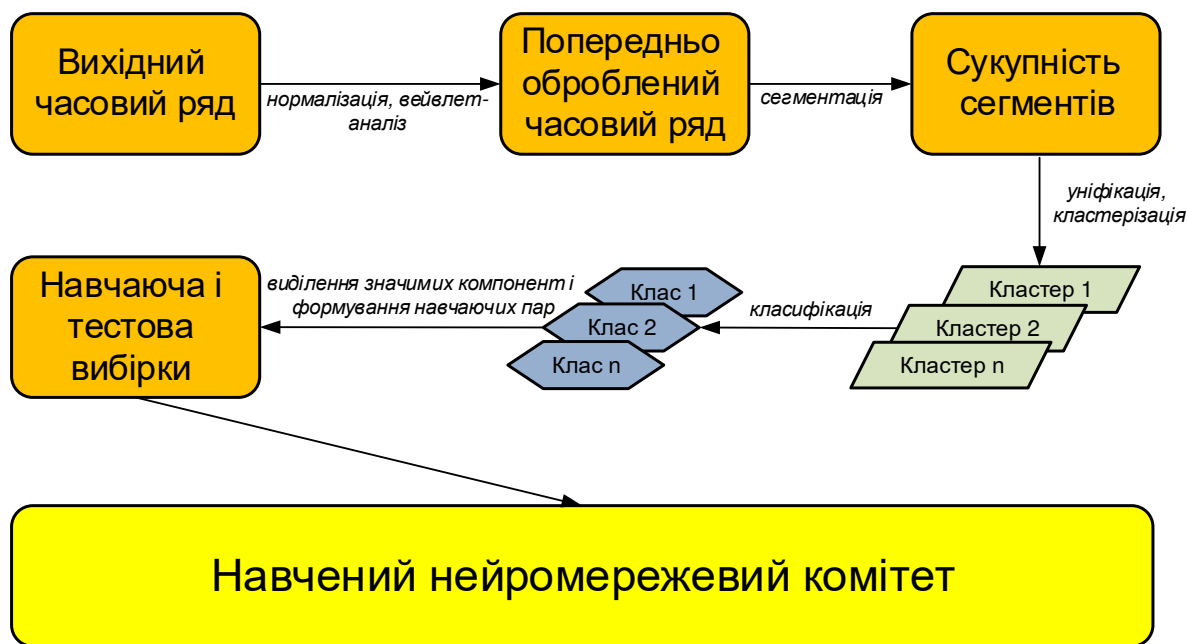


Рис. 3.18. Узагальнена схема роботи системи виявлення та ідентифікації подій

Результатом виконання вейвлет-перетворення передбачається одержати образ у вигляді вектора властивостей, що відповідає поточному стану технологічного процесу.

Методи вейвлет-аналізу можливо застосувати до даних різної природи. Це можуть бути, наприклад, одномірні функції або двовимірні зображення. Грубу класифікацію вейвлет-алгоритмів можна зробити, виділивши безперервне (CWT - Continuous Wavelet Transform) і дискретне (DWT - Discrete Wavelet Transform) вейвлет-перетворення.

Вибір того або іншого методу залежить від поставленої задачі та типу наявних даних, які необхідно обробити, від можливостей обчислювальної техніки і від того, у якому виді необхідно представити результат.

Термін вейвлет-перетворення поєднує два види перетворень - пряме і зворотне, які, відповідно, переводять досліджувану функцію $f(x)$ у набір вейвлет-коефіцієнтів $W_{\psi_i}(a,b)f$ і зворотно. Розрізняють безперервне і дискретне перетворення, надалі ми обмежимося в основному розглядом безперервного варіанта.

Вибір того або іншого класу функцій, що аналізують, диктується специфікою завдання, тим, яку інформацію потрібно витягти із сигналу. У ряді випадків за допомогою різних вейвлетів можна більш повно виявити особливості аналізованого сигналу.

Спектр вейвлет-перетворення одномірного сигналу представляє поверхню в тривимірному просторі. Звичайне зображення спектра виконується шляхом проектування ліній постійного рівня поверхні на площину зі змінними параметрами зсуву (по осі абсцис) і масштабом (по осі ординат), із градієнтним заливанням відтінками сірого кольору між лініями.

Реальні дані, отримані в результаті вимірювання деяких величин, практично завжди піддані перекручуванням - у більшому або меншому ступені. Зокрема, крім корисного сигналу, виміру містять небажаний додатковий шум.

В результаті досліджень були одержані графіки зміни температури у вакуум апараті (рис. 3.19) та в'язкості утфелю (рис.3.20).

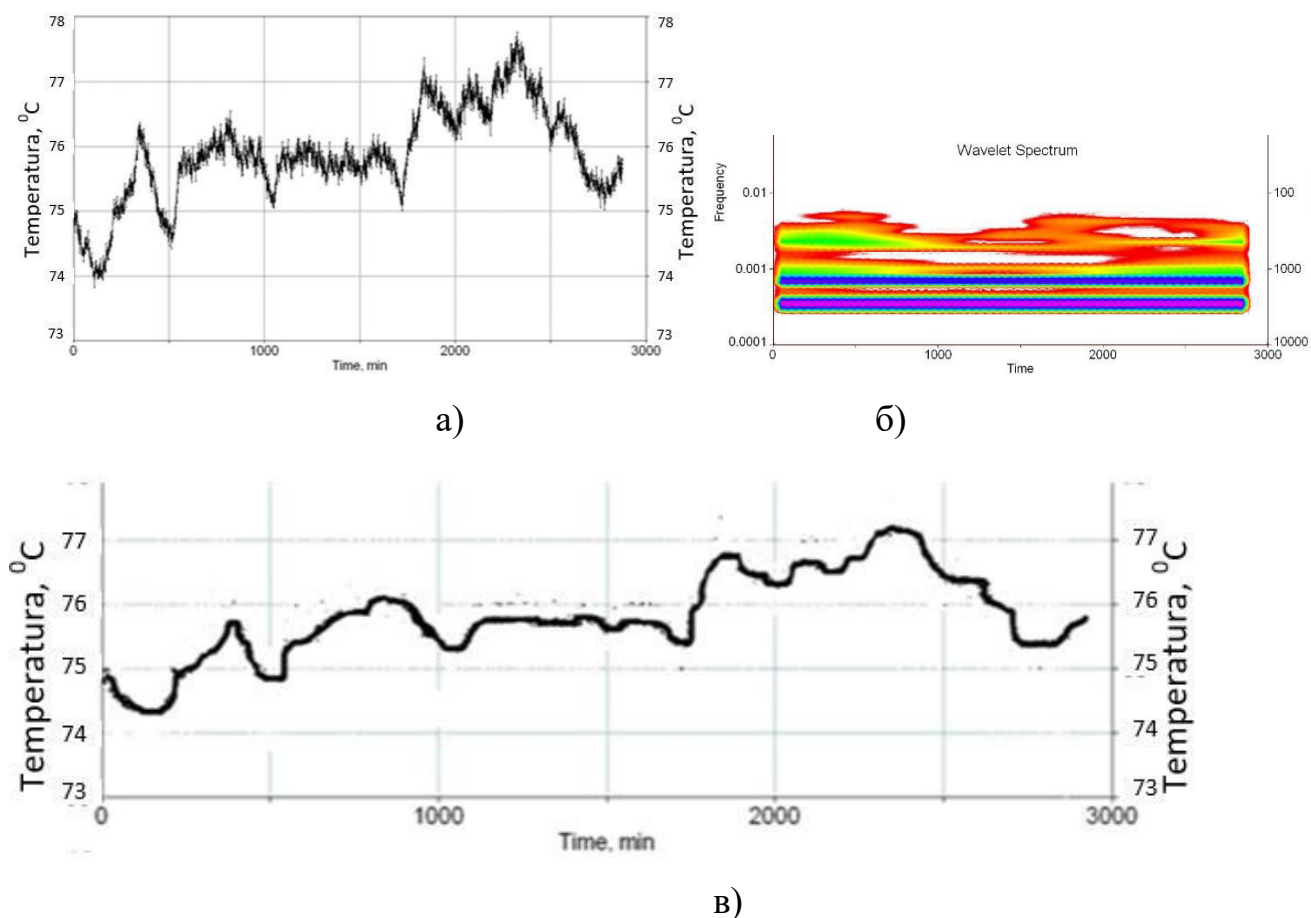


Рис. 3.19. Температура у вакуум-апараті

а) сигнал з перешкодами, б) спектограма вейвлета Морле, в) відфільтрований сигнал.

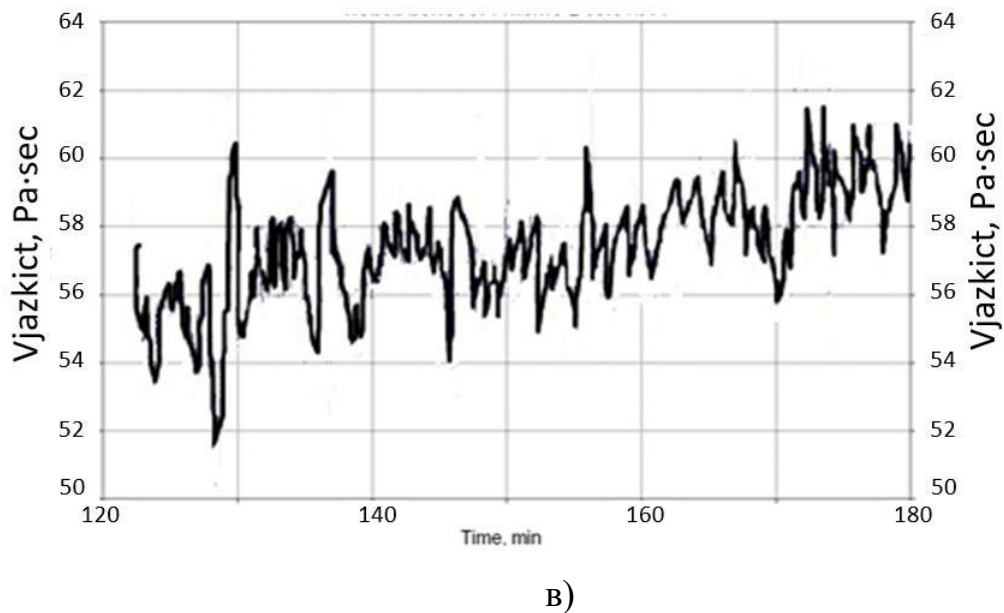
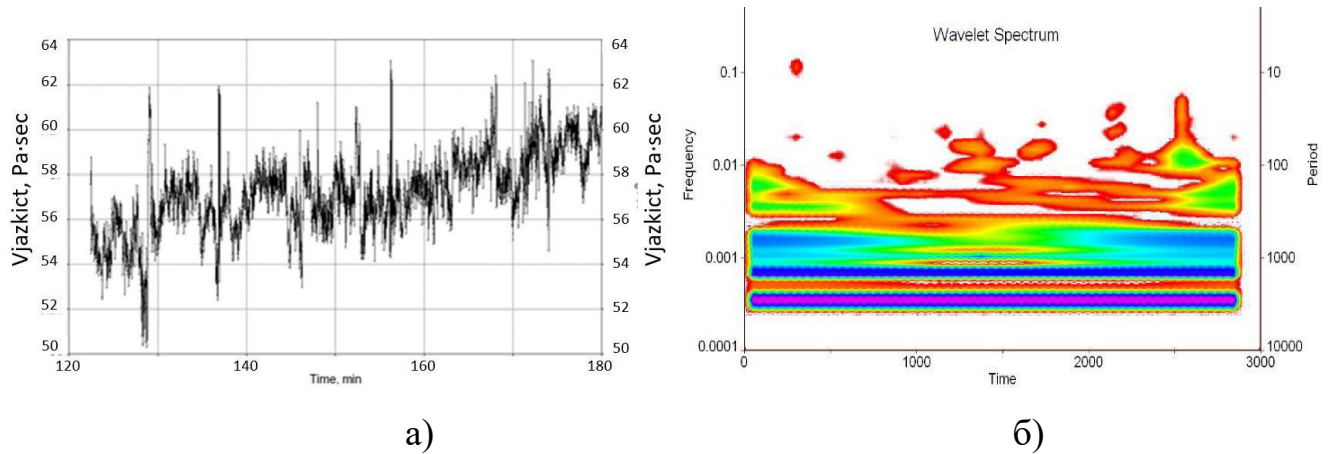


Рисунок 3.20. Сигнал в'язкості утфелю

а) сигнал з перешкодами, б) спектограма вейвлета Морле, в) відфільтрований сигнал.

Використаємо вейвлет Морле для фільтрації часових рядів.

Аналітичне представлення вейвлета Морле і його перетворення задається наступними виразами [44]:

$$\psi(t) = e^{-t^2/a^2} \left[e^{ik_0 t} - e^{-k_0^2 a^2 / 4} \right] \quad (3.1)$$

$$\hat{\psi}(\omega) = a\sqrt{\pi} \left[e^{a^2(k_0 - \omega)^2 / 4} - e^{-a^2(k_0 + \omega)^2 / 4} \right] \quad (3.2)$$

Діагностика на основі аналізу вхідної інформації в підсистемі технологічного моніторингу вимагає виявлення певних характерних рис - патернів. Їхня кількість і вид дозволяють судити про наявність або відсутність відхилень. Кожний патерн визначається набором ознак: частотою, амплітудою, тривалістю, повторюваністю [45].

Розглянемо виявлення патернів типу «пік» і «повільна хвиля» за вейвлет-спектрами.

У якості вихідних даних використовувалися дані від датчиків системи автоматизації вакуум-апарату цукрового заводу, до складу якої входить підсистема технологічного моніторингу.

Розрахунок вейвлет-спектрів виконувався з використанням пакету Interactive Wavelets [46]. Оцінювалася можливість виявлення особливостей вейвлет-спектрів, що відповідають різним патернам.

Характерним для ряду станів є поява в часовому ряді комбінації "пік" – "повільна хвиля". На рис. 3.18 виділені ділянки сигналу з характерною рисою типу "пік" і ділянки вейвлет-спектра, що їм відповідають. Патерни типу «пік» мають високу частоту і тому відповідні їм ділянки вейвлет-спектру розташовані в області малих значень масштабного коефіцієнту a , який визначає величину розтягання вейвлету.

Очевидно, що використання вейвлет-спектру може істотно спростити пошук піків у вхідних даних.

Підвищення наочності може бути досягнуте шляхом побудови ліній рівня вейвлет-спектру. Математично це означає, що при певному рівні здійснюється перетин поверхні в тривимірному просторі, що являє вейвлет-перетворення, площиною. У результаті формуються лінії рівня - ізолінії.

Іншим найважливішим типом патерна, який необхідно визначати в досліджуваних часових рядах - є повільна хвиля. Використання різних

материнських вейвлетів показує, що найкращі результати по виявленню повільних хвиль досягаються при використанні Симлет-вейвлета 4-го порядку.

Запропонований підхід до виявлення патернів і певні параметри вейвлет-спектрів дозволяють здійснювати часову локалізацію патернів і обчислювати їхню кількість на заданому часовому інтервалі.

Розглянута принципова можливість ефективного розпізнавання патернів типу "пік" і "повільна хвиля" за вейвлет-спектрами часових рядів (рис 3.21).

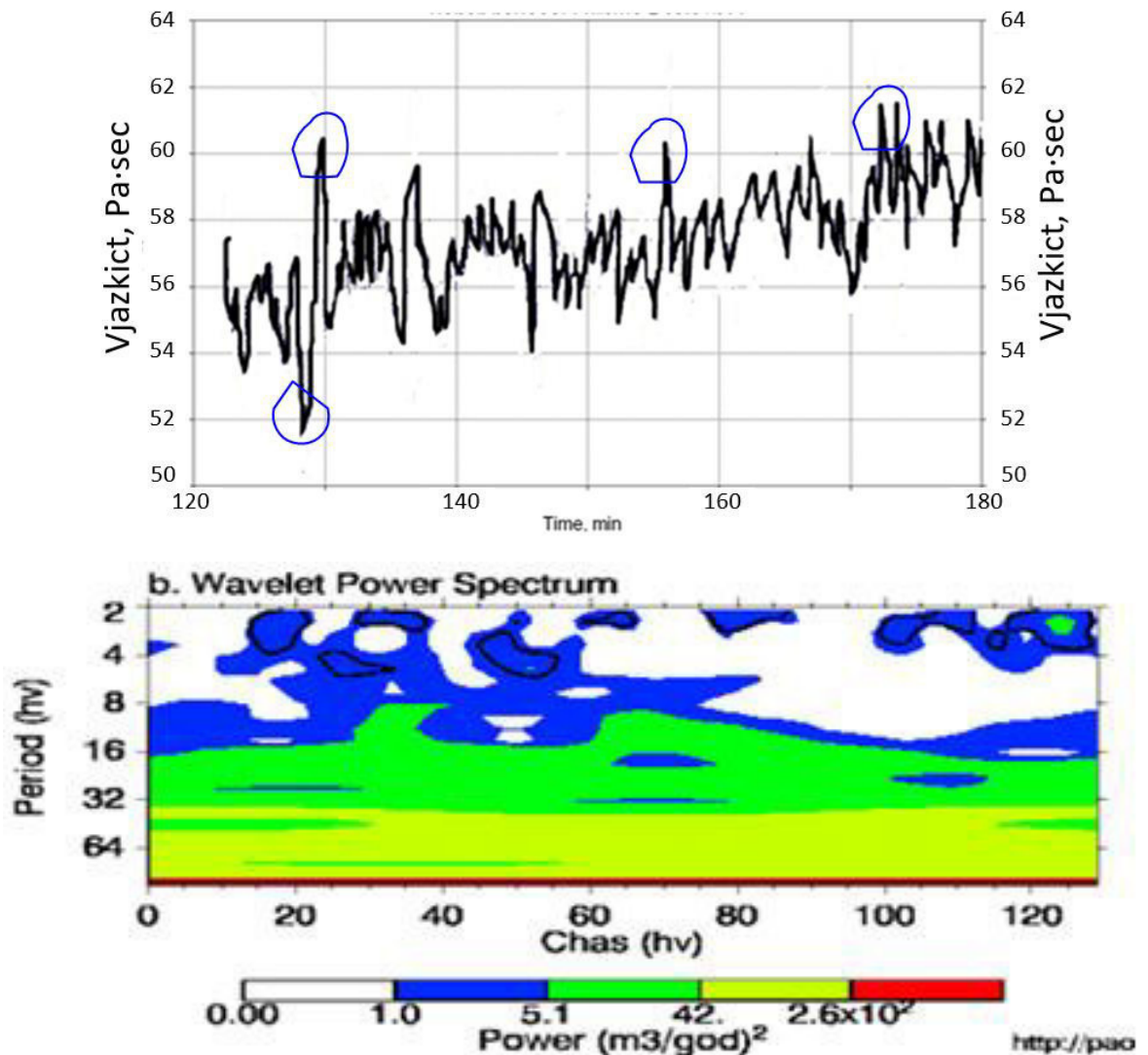


Рис. 3.21. Виділення патерну "пік" в сигналі в'язкості та його вейвлет-спектр: а) часовий ряд; б) вейвлет-спектр

На рис. 3.22 наведено результати визначення "повільних хвиль".

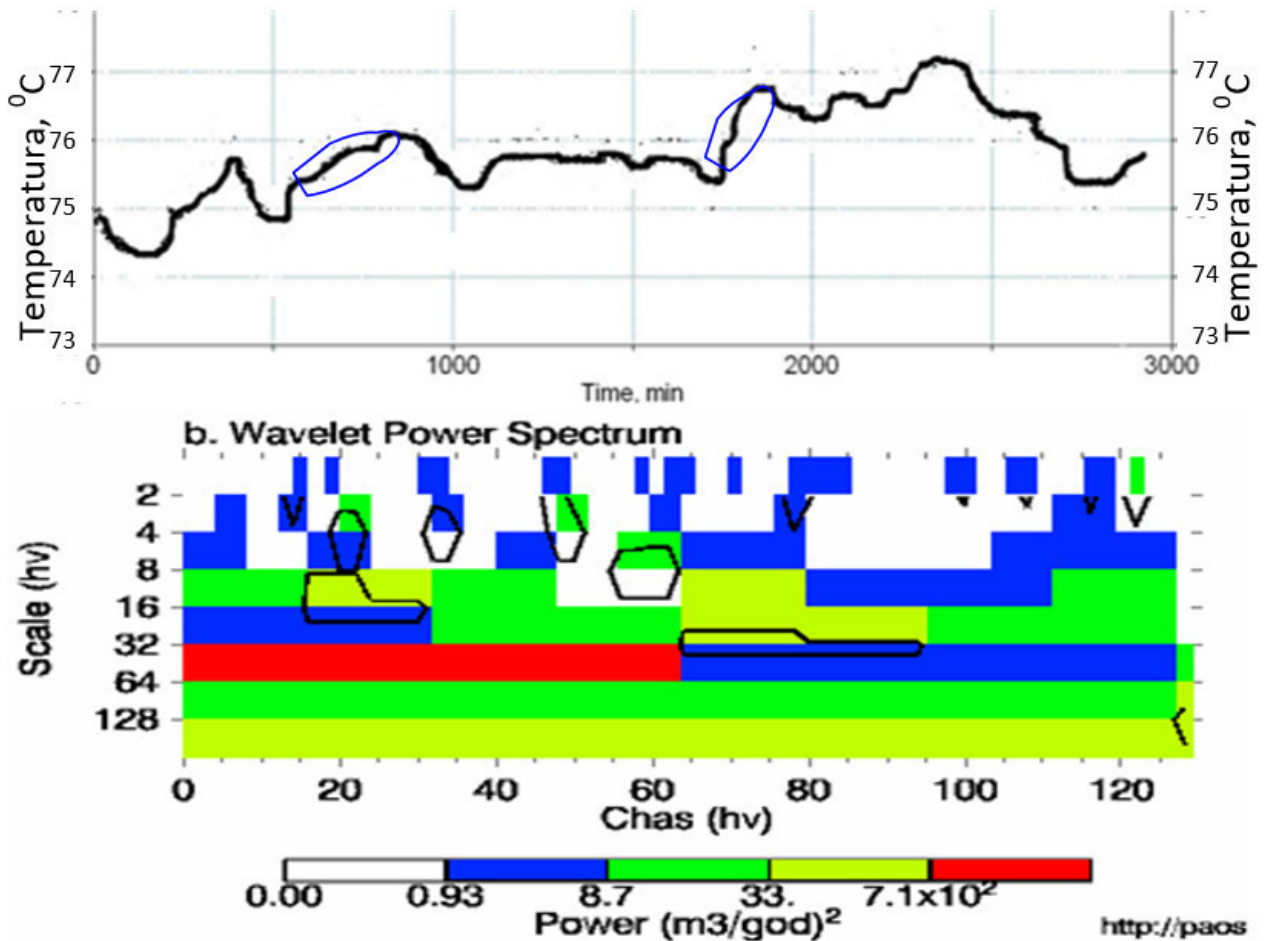


Рис. 3.22. Виявлення патерну типу "повільна хвиля" в сигналі температури у вакуум-апараті та його вейвлет-спектр: а) вихідні дані; б) вейвлет-спектр.

Також показано, що перехід від вейвлет-спектру до ізоліній, які представляють собою лінії перетину поверхні в тривимірному просторі, що зображує вейвлет-спектр, площинами, дозволяє виявити зазначені патерни, здійснити їхню часову локалізацію і визначити кількість. Крім того, були визначені чисельні значення масштабних коефіцієнтів, необхідні для автоматизації розпізнавання кожного з аналізованих патернів. Подальшим напрямком роботи є аналіз інших патернів, таких як "гострі хвилі", а також розробка спеціального програмного забезпечення для обробки часових рядів на основі вейвлет-перетворення.

Наступним етапом обробки часового ряду є етап уніфікації різнорідних за довжиною сегментів і подальша їх кластеризація. Довжина сегментів усереднюється за критеріями значущості кордону [47].

В теперішній час для вирішення різних класів завдань (апроксимація функцій, класифікація даних, кластеризація даних, стискання інформації, відновлення втрачених даних і т.п.) широко застосовуються штучні нейронні мережі (ШНС).

Метод карт Кохонена, що самоорганізуються, є одним з варіантів навчання змаганням [48].

Нейронні мережі Кохонена характеризуються тим, що в них нейрони являють собою двовимірний масив, кожному вузлу i якого поставлений у відповідність вектор $m_i = [\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{in}]^T$, що має розмірність рівну розмірності простору вхідних векторів R^n .

Навчання можна розділити на два етапи - грубого і тонкого настроювання координат векторів, що відповідають вузлам карти [49]. У цьому випадку під час першого етапу вектори впорядковуються, у другому - вектори в кожній групі уточнюються. Другий етап звичайно має меншу швидкість навчання і більше число ітерацій. Обидва етапи навчання тривають задане заздалегідь число кроків T , а $\alpha(t)$, як правило, підбирають так, щоб $\alpha(T)=0$, наприклад $\alpha(t) = \alpha(1-t/T)$, де α - задана константа.

По закінченню навчання ми одержуємо навчену карту, що представляє собою впорядкований двовимірний масив векторів, що відповідають вузлам, що розподілилися в просторі нейронів R^n відповідно до поданої на вхід множини векторів X . Даний метод нагадує натягування еластичної мембрани на дану множину векторів X , причому еластичність її поступово збільшується в процесі натягування (зменшується $h_{ci}(t)$) для все більш і більш тонкого настроювання.

Упорядкування векторів у вигляді двовимірної карти полягає в тому, що чим ближче координати двох векторів на карті, тим ближче вони і у просторі R^n , але не навпаки [50]. Значення векторів у вузлах мережі відповідають характерному значенню для відповідного класу.

Основними типами завдань, розв'язуваними за допомогою карт Кохонена, є візуалізація багатомірних нелінійних даних і попередня обробка даних. Вони застосовуються в задачах розпізнавання мови, зображень, у керуванні роботами, при аналізуванні технологічних процесів, медичній діагностиці, класифікації фінансових даних і багатьох інших областях [51].

Програмне забезпечення, що дозволяє працювати з картами Кохонена, зараз представлено множиною інструментів. Це можуть бути як інструменти, що включають тільки реалізацію методу карт, що самоорганізуються, так і нейропакети із цілим набором структур нейронних мереж, серед яких - і карти Кохонена; також даний метод реалізований у деяких універсальних інструментах аналізу даних.

Програмне забезпечення, що імітує роботу нейронної мережі, називають нейросимулятором або нейропакетом.

Розглянемо можливість застосування карт Кохонена в підсистемі моніторингу процесу екстрагування цукру з бурякової стружки, що є складовою систем керування виробничими комплексами, тому що інформація про існуючий стан технологічного процесу та тенденції його зміни повинні бути покладені в основу розробки заходів по прийняттю рішень та враховуватись при прогнозуванні розвитку об'єкта [45].

В якості навчаючого набору виступає база даних, яка містить інформацію про протікання технологічного процесу кристалізації, а саме: температура, тиск, в'язкість, рівень. На основі цих даних необхідно побудувати модель, яка показує взаємозв'язок вищезазначених параметрів та їх вплив на хід технологічного процесу.

Для вирішення задачі будемо використовувати аналітичний пакет Deductor Studio Academic 5.1 [52].

Першим етапом побудови є завантаження даних (рис. 3.23).

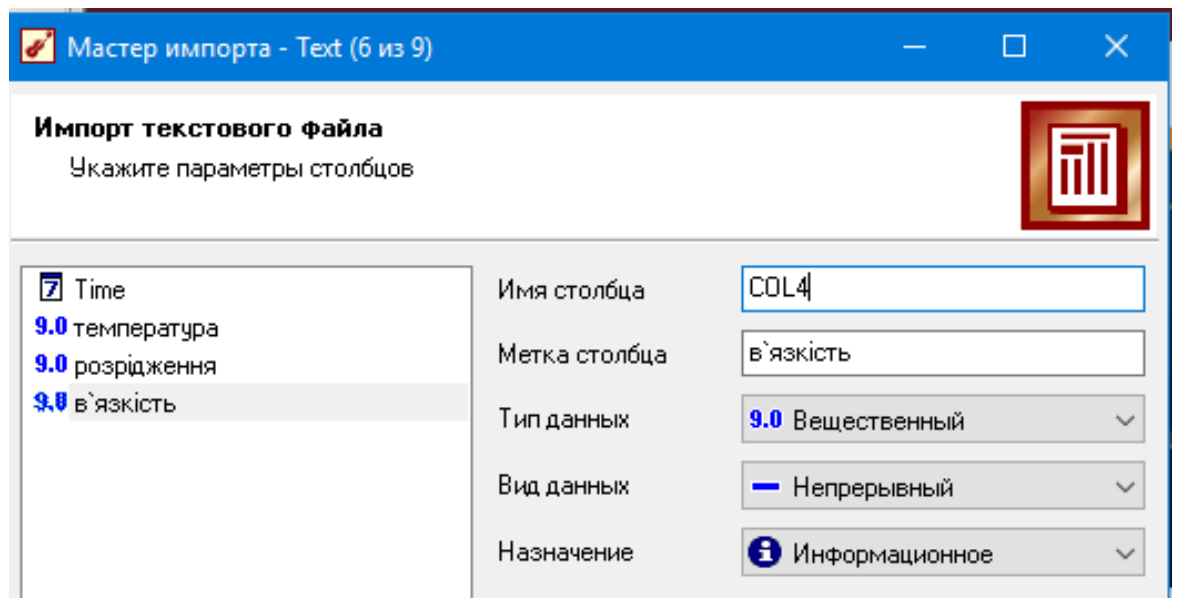


Рис. 3.23. Завантаження даних в Deductor

Наступний крок - запуск майстра обробки і вибір із списку методу обробки "Карта Кохонена". Далі варто настроїти призначення стовпців, тобто для кожного стовпця вибрати одне із призначень: вхідне, вихідне, не використовується і інформаційне.

Третій крок пропонує розбити вихідну множину на навчальну, тестову й валідаційну. На четвертому етапі запускаємо процес навчання мережі та спостерігаємо за зміною величини похибки і процентом розпізнаних прикладів в навчаючій і тестовій множинах. В даному випадку в навчаючій множині розпізнано 84.25%, а на тестовій – 86.40% прикладів. Фрагмент даного процесу проілюстровано на рис. 3.24.

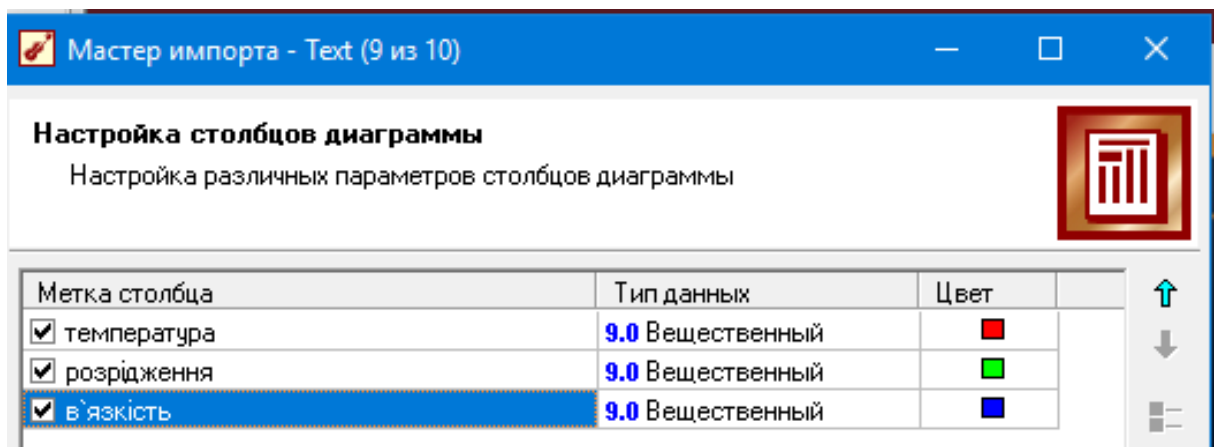


Рис. 3.24. Настроювання значень

При аналізі карт входів рекомендується використовувати відразу кілька карт. Досліджуємо фрагмент карти, що складається з карт трьох входів, що наведений на рис. 3.25.

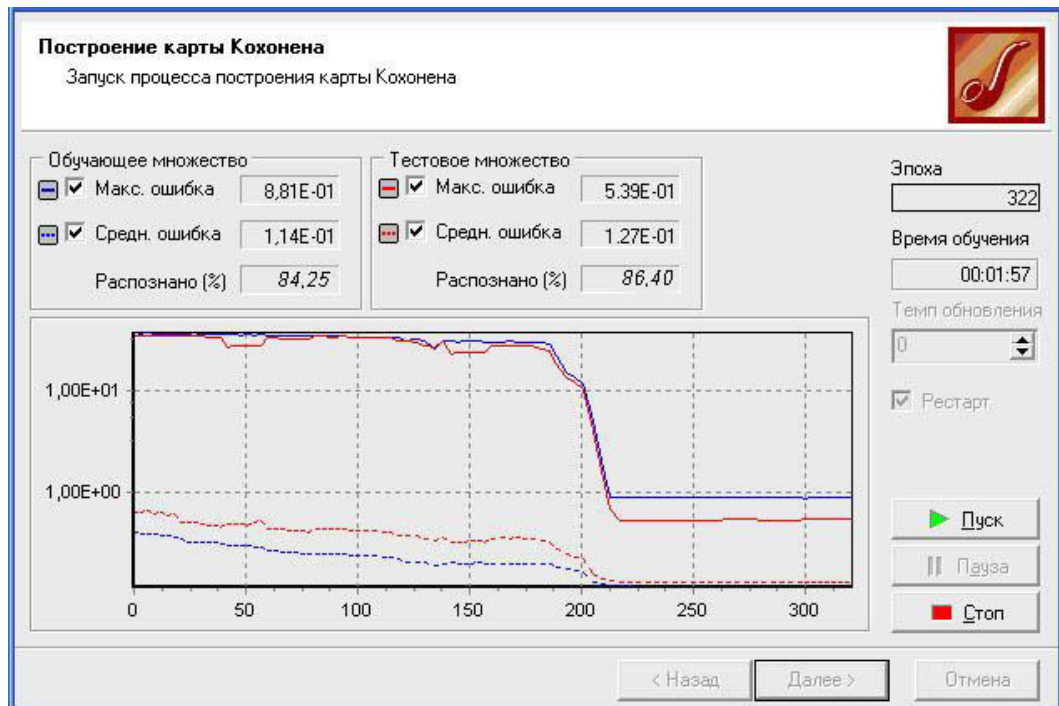


Рис. 3.25. Навчання мережі

На одній з карт виділяємо область з найбільшими значеннями показника. Далі необхідно вивчити ці ж нейрони на інших картах.

На першій карті найбільші значення мають об'єкти, розташовані в правому верхньому куті. Розглядаючи одночасно п'ять карт, ми можемо сказати, що ці ж об'єкти мають найбільші значення показника, зображеного на чотирьох картах, що залишилися. Також по розфарбуванню карт можна зробити висновок, що існує взаємозв'язок між цими показниками.

На наступному рисунку (рис. 3.26) наведена ілюстрація карт входів і виходів, остання - ця карта кластерів. Тут ми бачимо кілька карт входів (показників технологічного процесу) і сформовані кластери, кожний з яких виділений окремим кольором.

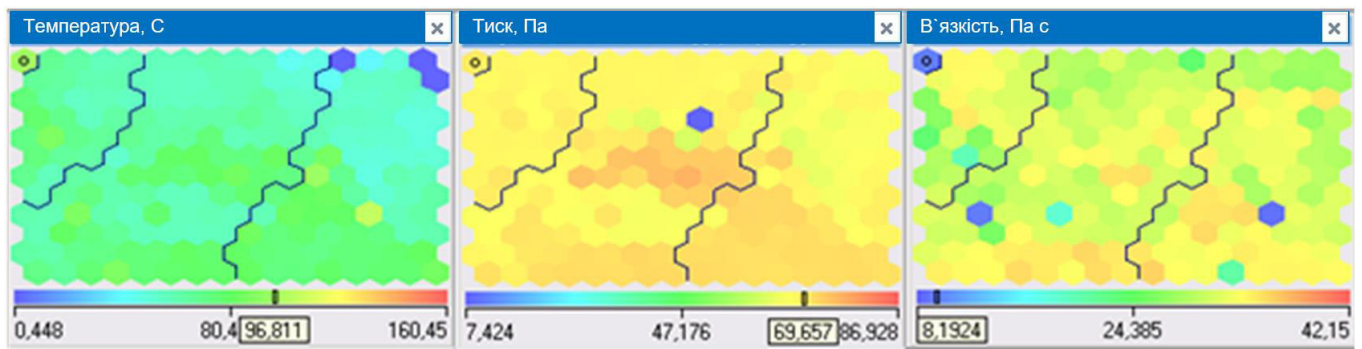


Рис. 3.26. Карти входів

Для знаходження конкретного об'єкта на карті необхідно натиснути правою кнопкою маніпулятора на досліджуваному об'єкті і вибрати пункт "Знайти комірку на карті". Виконання цієї процедури показано на рис. 3.27.

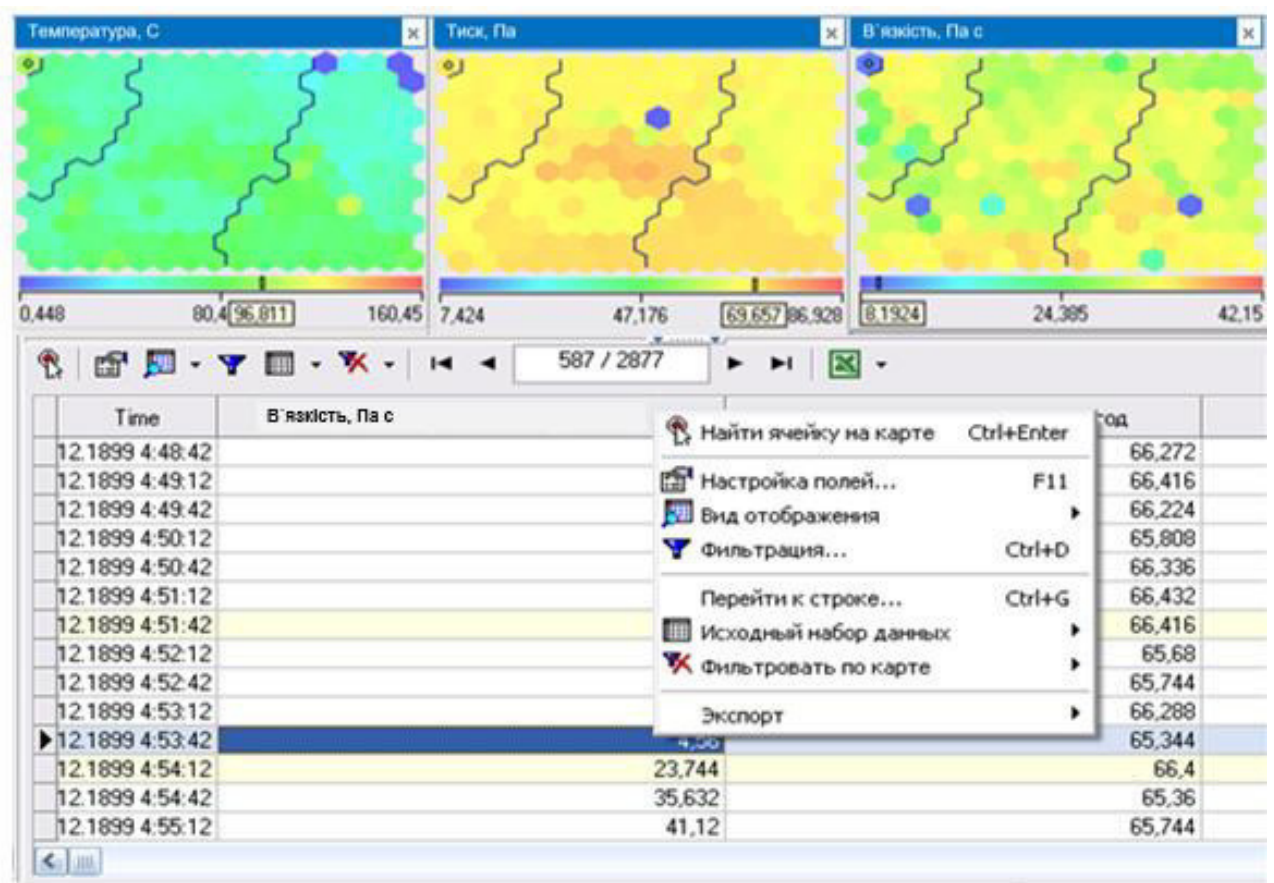


Рис. 3.27. Комірка на карті Кохонена

У результаті бачимо як сам об'єкт, так і значення того вимірювання, що ми переглядаємо. Таким чином, ми можемо оцінити положення аналізованого об'єкта, а також порівняти його з іншими об'єктами.

Як приклад, можна розглянути окремі значення часових рядів, які виходять за допустимі межі технологічного режиму. Визначивши ці об'єкти на картах Кохонена, можна прогнозувати поведінку системи в часі.

Використання карт Кохонена в системах технологічного моніторингу, зокрема в підсистемі технологічного моніторингу продуктового відділення цукрового заводу, дає можливість визначити інтенсивності впливу того чи іншого значення технологічного параметру на хід технологічного процесу, оцінити взаємозв'язок основних технологічних параметрів.

У результаті застосування карт, що самоорганізуються, багатомірний простір входних факторів був представлений у двомірному вигляді, в якому його досить зручно аналізувати. Основна відмінність цих мереж від інших моделей полягає в наочності і зручності використання. Ці мережі дозволяють спростити багатомірну структуру, їх можна вважати одним з методів проектування багатомірного простору в простір з більш низькою розмірністю. Інтенсивність кольору в певній точці карти визначається даними, які туди потрапили: комірки з мінімальними значеннями зображуються темно-синім кольором, комірки з максимальними значеннями - червоним.

Інша принципова відмінність карт Кохонена від інших моделей нейронних мереж - інший підхід до навчання, а саме - некероване або неконтрольоване навчання. Цей тип навчання дозволяє даним навчальної вибірки містити значення тільки входних змінних. Мережа Кохонена вчиться розуміти саму структуру даних і вирішує завдання кластеризації.

Класифікація подій технологічної легенди. За наявною легендою, яка описує сукупність технологічних подій, що відбуваються в вакуум-апараті, можна виділити наступні групи:

- сервісні події, пов'язані з регламентованим впливом на систему реєстрації (пропуски даних);

- зовнішні події на лініях вузлів-донорів;
- внутрішні події у вакуум-апараті.

Нейромережевий класифікатор подій часового ряду. Заключним етапом створення системи виявлення та розпізнавання технологічних ситуацій є створення та навчання комітету нейронних мереж, здатного обробляти дані технологічного часового ряду і класифікувати події та стани вакуум-апарату.

Комітет нейронних мереж, кожна з яких представляє собою багатошаровий персептрон, навчається на множині доступних даних з метою класифікації технологічних подій, що виявляються шляхом аналізу часового ряду, за заданими класами. Кожен багатошаровий персептрон містить K нейронів у вхідному шарі і M в прихованому. Функції активації нейронів прихованого шару - гіперболічний тангенс. Вихід мережі утворює L (за кількістю виділених класів подій) нейронів з лінійною функцією активації. Виходи мережі нормуються в діапазоні $[-1; 1]$, остаточно гіпотеза формується голосуванням трьох комітетів.

Генеральна сукупність навчальних прикладів є множина пар $\{x_i, y_i\}$, де x_i - вектор, що належить i -му кластеру етапу сегментації, а y_i - бінарний вектор, що визначає приналежність до типу події, відповідного i -му кластеру.

На попередньому етапі було виділено 13 кластерів. Для побудови нейромережевої моделі вакуум-апарату і виявлення технологічних ситуацій необхідно виділити фактори в описі сегментів. При цьому необхідно зменшити число таких факторів, тому що це приводить до зниження чутливості моделі до шуму. З цією метою виконані наступні кроки:

- обраний граничний масштаб історії ряду;
- для уніфікованого сегменту довжиною 1024 проведений кратномасштабний вейвлет-аналіз, здійснено дискретне вейвлет-перетворення на масштабах, кратних ступеню двійки;
- виділені 64 найбільш значущі компоненти вектору вейвлет-коефіцієнтів.

Архітектура нейронних мереж, що входять в склад комітету, наведена в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

Архітектура нейронних мереж.

	Вхідний шар	Прихований шар	Вихідний шар
Кількість нейронів	64	15	15
Функція активації		гіперболічний тангенс	лінійна

В ході виконання роботи побудована нейромережева модель виявлення технологічних подій, що дозволяє здійснювати аналіз технологічних часових рядів з метою моніторингу процесів у вакуум-апараті.

Розроблена система дозволяє:

- розширити кількість класів подій, що розпізнаються;
- подолати обмеження прийняття гіпотези (умовної) стаціонарності процесу;
- отримати кількісний опис і характеристики технологічних подій.

ВИСНОВОК

Об'єктом дослідження в кваліфікаційній роботі є масообмінні, теплообмінні і фізико-хімічні процеси, що відбуваються під час уварювання утфелю у вакуум-апараті І продукту періодичної дії фірми DSSE.

Під час виконання передпроектних досліджень використовувались методи порівняльного аналізу варіантів структури системи із застосуванням різних технічних та програмних засобів, з урахуванням факторів, що були виявлені при проведенні аналізу раніше створених систем керування.

Для створення модернізованої САК процесом кристалізації у вакуум-апараті були використані сучасні технічні засоби автоматизації вітчизняних і закордонних виробників.

Розроблені та досліджені методи оперативного моніторингу стану складних технологічних комплексів на базі вейвлетного і фрактального аналізу вхідної інформації, які забезпечують підвищення достовірності та точності оцінки виробничих ситуацій; запропоновані алгоритми прогнозування розвитку об'єкта управління з різною глибиною прогнозу на основі інтелектуальних технологій та принципів нелінійної динаміки; на основі факторно-цільового та ситуаційного аналізу розроблені сценарії управління процесами кристалізації, які дозволяють організувати у виділених ситуаційно-значущих зонах оптимальне управління вакуум-апаратами І продукту; здійснено синтез структури автоматизованого управління технологічного комплексу продуктового відділення цукрового заводу з використанням інтелектуальної підсистеми технологічного моніторингу.

На базі розроблених методів та алгоритмів технологічного моніторингу та оптимального сценарного управління розроблена система автоматизованого управління вакуум-апарату продуктового відділення цукрового заводу реалізована на сучасних комп'ютерних технологіях.

Розроблені алгоритми та методи технологічного моніторингу можуть бути використані в системах управління складними технологічними комплексами.

Список використаної літератури

1. Луцька Н.М. Сучасні технології проектування інтелектуальних систем керування [Електронний ресурс] конспект лекцій для здобувачів освітнього ступеня «Магістр» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньо-професійної програми «Інтелектуальні комп'ютерні системи керування» денної та заочної форм навчання / Н.М. Луцька, А.П. Ладанюк К.: НУХТ, 2019. – 117 с.
2. Ицкович Э.Л. Методы комплексной автоматизации производства предприятий технологических отраслей / Э.Л. Ицкович. – М.: КРАСАНД, 2013. – 232 с.
3. Методичні рекомендації до виконання випускної кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня «магістр» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Інтелектуальні комп'ютерні системи керування» денної та заочної форм навчання / Уклад.: А.П. Ладанюк, Н.М. Луцька, Я.В. Смітюх, В.Д. Кишенько.[Електронний ресурс]. – К. : НУХТ, 2020. – 70 с.
4. Проектування систем автоматизації галузі [Електронний ресурс]: Метод. рекомендації до викон. курс. проекту для студ. освітнього ступеня «магістр» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціалізації «Інтелектуальні комп'ютерні системи керування» ден. форм навч. / уклад.: Трегуб В.Г., Луцька Н.М., А.П. Ладанюк. – К.: НУХТ, 2017. – 48 с.
5. Нестеров А. Л. Проектирование АСУТП. Книга 1 / А.Л. Нестеров. – СПб.: ДЕАН, 2006. –552 с.
6. Нестеров А. Л. Проектирование АСУТП. Книга 2 / А.Л. Нестеров. – СПб.: ДЕАН, 2009. – 944 с.
7. Про КРІ та ОЕЕ. Загальні розрахунки згідно ISO 22400-2. URL: <http://www.slideshare.net/pupenasan/kpi-oee>.

8. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах: Навч. посібник / О.М. Пупена, І.В. Ельперін, Н.М. Луцька, А.П. Ладанюк. – К.: Ліра-К, 2011. – 552 с.
9. Пупена О.М. [Електронний ресурс]: Автоматизовані системи управління виробництвом (MES-рівень): курс лекцій для студ. освіт. ст. "магістр" спец. 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" спеціалізації "Інтегровані автоматизовані системи управління " денної та заочної форм навчання / О.М. Пупена, Р.М. Міркевич. – К.: НУХТ, 2016. – 135 с.
10. Трегуб В.Г. Автоматизація об'єктів періодичної дії: [підручник] / В.Г. Трегуб. – К.: Ліра-К, 2016. – 136 с.
11. Фёдоров Ю.Н. Справочник инженера по АСУТП: Проектирование и разработка. Учебно-практическое пособие / Ю.Н. Фёдоров. – М.: Инфра-Инженерия, 2008. – 928 с.
12. A Practical Guide to SysML. The Systems Modeling Language. 2-d ed/ /Sanford Friedenthal, Alan Moore, Rick Steiner, Elsevier Inc. 2012.
13. Буч Г., Рамбо Д., Якобсон И. Б90 Язык UML. Руководство пользователя. 2-е изд.: Пер. с англ. Мухин Н. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 496 с.
14. Трегуб В.Г. Проектування систем автоматизації: навч. посібник / В.Г. Трегуб. – К.: Ліра-К, 2014.
15. Нестеров А.Л. Проектирование АСУТП. Книга 1 / А.Л. Нестеров // СПб.: Издательство ДЕАН. – 2006. – 844 с.
16. Нестеров А.Л. Проектирование АСУТП. Книга 2 / А.Л. Нестеров // СПб.: Издательство ДЕАН. – 2009. – 944 с.
17. Ельперін І.В. Промислові контролери: Навчальний посібник / І.В. Ельперін // К.: НУХТ. – 2003. – 320 с.
18. Ладанюк А.П. Автоматизація технологічних процесів та виробництв харчової промисловості: Підручник / Ладанюк А.П, Трегуб В.Г., Ельперін І.В., Цюцюра В.Д. // К.: Аграрна освіта. – 2001. – 224 с.