

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ПОГОДЖЕНО
Директор ІНІ енергетики,
автоматики і енергозбереження
(назва ІНІ)

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

проф., д.т.н. _____ **В.В. Каплун**
(підпис) (ПІБ)

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

« ____ » _____ 2026 р.

« ____ » _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «РОЗРОБЛЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЦУКРУ»**

Спеціальність:
174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
(шифр і назва)

Освітня програма:
Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(назва)

Орієнтація освітньої програми: освітньо-наукова
(назва)

Гарант освітньої програми

_____ **д.т.н., професор**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Івашук В.В.
(П.І.Б)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ **к.т.н., доцент**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Дудник А. О.
(П.І.Б)

Виконав

_____ (підпис)

Гережа Д.О.
(П.І.Б студента)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

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

К.Т.Н., доц. _____ **О.О. Опришко**
« ____ » _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ
Гережі Дмитру Олександровичу

Спеціальність:

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

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Орієнтація освітньої програми: освітньо-наукова

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Розроблення експертної системи керування технологічними параметрами при виробництві цукру»,
затверджена наказом від 22.10.2025 № 2440 «С»

Термін подання студентом магістерської роботи 22.05.2026 року

Вихідні дані магістерської кваліфікаційної роботи: завдання кафедри на виконання магістерської кваліфікаційної роботи; нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації; матеріали дослідження, аналізу та моделювання; наукова література з тематики магістерської роботи.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Провести системний аналіз багатокорпусної випарної установки як об'єкта керування з визначенням основних збурень та взаємозв'язків.
2. Розробити математичну модель теплових процесів у випарному апараті для ідентифікації динамічних характеристик каналів регулювання.
3. Обґрунтувати та синтезувати алгоритм інтелектуального керування на основі нечіткої логіки (алгоритм Сугено).
4. Інтегрувати розроблене програмне ядро в діючу SCADA-систему для підтримки прийняття рішень персоналом.

Дата видачі завдання «22» жовтня 2025 року

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(Підпис)

Дудник А. О.
(Прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(Підпис)

Гережа Д.О.
(Прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерську роботу присвячено вирішенню актуальної науково-прикладної задачі автоматизації багатокорпусних випарних установок цукрового виробництва в умовах високої динамічної нестабільності та нелінійності процесів. Розроблено архітектуру інтелектуальної експертної системи на основі нечіткої логіки (алгоритм Сугено), що інтегрується в існуючі АСУТП як рівень «цифрового радника» для підтримки прийняття рішень оператором у реальному часі. Теоретичне обґрунтування та результати імітаційного моделювання підтверджують здатність системи адаптивно стабілізувати теплові режими, мінімізувати ризики аварійних ситуацій та підвищити енергоефективність технологічного циклу. Практична реалізація запропонованих алгоритмів в середовищі SCADA забезпечує суттєве зниження когнітивного навантаження на персонал та оптимізацію споживання енергоресурсів під час переробки цукрових буряків

Ключові слова: імітаційне моделювання, алгоритм Сугено, інтелектуальне керування.

ABSTRACT

The master's thesis is dedicated to solving an urgent scientific and applied problem of automating multi-effect evaporation plants in sugar production under conditions of high dynamic instability and process nonlinearity. An architecture of an intelligent expert system based on fuzzy logic (sugeno algorithm) has been developed, which integrates into existing industrial automation systems as a "digital advisor" level to support real-time operator decision-making. Theoretical justification and simulation results confirm the system's ability to adaptively stabilize thermal regimes, minimize risks of emergency situations, and increase the energy efficiency of the technological cycle. The practical implementation of the proposed algorithms in the scada environment ensures a significant reduction in cognitive load on personnel and optimization of energy resource consumption during sugar beet processing.

Keywords: Simulation modeling, sugeno algorithm, intelligent control

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ В ЦУКРОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ	7
1.1 Технологічний процес цукроваріння	7
1.2 Аналіз існуючих систем	8
1.3 Технологічний процес випарювання цукрового соку	9
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ВИПАРЮВАННЯ В ЦУКРОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ	13
РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ СОКУ В ТЕПЛООБМІННИКУ	21
3.1 Вибір первинного вимірювального перетворювача	21
3.2 Вибір виконавчого механізму:	24
3.3 Визначення передатних функцій	26
3.4 Синтез системи автоматичного регулювання за заданими показниками якості.....	34
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ	37
4.1 Обґрунтування доцільності застосування нечіткої логіки	37
4.2 Вибір математичної моделі системи нечіткого виведення	37
4.3 Формування інформаційного простору та процедура фазифікації.....	39
4.4 Синтез бази знань та експертних правил.....	42
4.5 Імітаційне моделювання та верифікація результатів	44
4.6 Інтеграція експертної системи в SCADA	46
РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ.....	48
ВПРОВАДЖЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ	48
5.1 Загальна користь від впровадженої системи.....	48
5.2 Математична оцінка зменшення технологічних ризиків	48
5.3 Розрахунок очікуваного економічного ефекту.....	49
ВИСНОВОК	51
СПИСОК ДЖЕРЕЛ	52

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний стан цукрової промисловості України вимагає переходу до нових методів управління технологічними процесами, здатних забезпечити стабільність виробництва в умовах значної динамічної нестабільності. Багатокорпусні випарні установки (БВУ) є енергоємними вузлами, ефективність функціонування яких безпосередньо впливає на собівартість кінцевого продукту [4]. Існуючі системи автоматизації часто не забезпечують належної адаптивності при зміні якісних та кількісних характеристик сировини, що зумовлює актуальність розробки інтелектуальних експертних систем, здатних підтримувати прийняття рішень оператором у реальному часі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано в межах науково-дослідницької діяльності кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення енергоефективності та стабільності роботи випарних установок цукрового виробництва шляхом розроблення експертної системи автоматичного керування технологічними параметрами. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

5. Провести системний аналіз багатокорпусної випарної установки як об'єкта керування з визначенням основних збурень та взаємозв'язків.
6. Розробити математичну модель теплових процесів у випарному апараті для ідентифікації динамічних характеристик каналів регулювання.
7. Обґрунтувати та синтезувати алгоритм інтелектуального керування на основі нечіткої логіки (алгоритм Сугено).
8. Інтегрувати розроблене програмне ядро в діючу SCADA-систему для підтримки прийняття рішень персоналом.

Об'єкт дослідження: технологічні процеси багатокорпусних випарних установок цукрового виробництва. **Предмет дослідження:** методи, алгоритми та програмні засоби експертної системи керування технологічними параметрами випарної станції.

Наукова новизна одержаних результатів: вперше розроблено архітектуру інтелектуального «цифрового радника» на базі нечіткої логіки, що адаптується до змінних навантажень БВУ;

вдосконалено алгоритм стабілізації теплових режимів завдяки інтеграції 45 продукційних правил, що мінімізує імовірність аварійних ситуацій.

Практичне значення одержаних результатів: Практична реалізація системи в середовищі SCADA дозволяє знизити когнітивне навантаження на операторів, оптимізувати витрати енергоресурсів на випарювання соку та підвищити загальну продуктивність технологічної лінії. Розроблене програмне забезпечення може бути масштабоване для впровадження на підприємствах цукрової галузі України

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ В ЦУКРОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

1.1 Технологічний процес цукроваріння

Технологічний цикл розпочинається з очищення коренеплодів від домішок мінерального та органічного походження у спеціалізованих мийних агрегатах. Механічне подрібнення буряків на бурякорізках забезпечує утворення стружки з розвиненою питомою поверхнею, що є необхідною умовою для інтенсифікації процесу дифузії. Екстракція сахарози відбувається в дифузійних апаратах за рахунок градієнта концентрації між клітинним соком та екстрагентом (гарячою водою) [1, 3].

Отриманий дифузійний сік характеризується наявністю високої концентрації нецукрів. Для їх видалення застосовується хімічне очищення – дефекація (обробка вапном) та сатурація (адсорбція домішок на осаді карбонату кальцію при продуванні діоксидом вуглецю), що супроводжується подальшою фільтрацією для відокремлення суспензій.

Даний етап є ключовою енергоємною ланкою АСУТП, де здійснюється концентрування сухих речовин ($Brix$) до рівня, необхідного для кристалізації. Термодинамічна схема базується на принципі багатократного використання теплоти вторинної пари, де пара, що генерується в попередньому корпусі, слугує робочим агентом для наступного. Технологічний процес випарювання характеризується високою інерційністю та нелінійністю, зумовленою змінами коефіцієнта теплопередачі, температурною депресією та фізико-хімічними властивостями сиропу. Для забезпечення стійкості випарної установки необхідне прецизійне керування витратними характеристиками пари та матеріальними потоками соку між корпусами.

Концентрований сироп надходить у вакуум-апарати для проведення процесу кристалізації. Шляхом створення перенасиченого розчину відбувається зародження та ріст кристалів сахарози, внаслідок чого утворюється утфель. Фінальні стадії передбачають розділення утфелю в центрифугах, сушіння кристалів та пакування готової продукції.

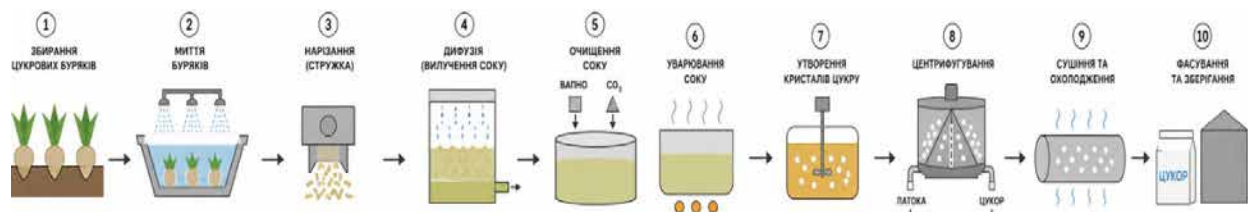


Рис. 1.1 Схема процесу цукроваріння

1.2 Аналіз існуючих систем

Сучасний рівень автоматизації цукрових заводів в Україні та світі базується на розподілених АСУТП із дворівневою або трирівневою архітектурою. Нижній рівень представлений програмованими логічними контролерами провідних виробників – Siemens (S7-300, S7-1500), Schneider Electric (TSX P57), Віра тощо, які реалізують збір даних з датчиків та локальні алгоритми П-, ПІ-, ПІД-регулювання. Верхній рівень забезпечується SCADA-системами (WinCC, Trace Mode тощо), що відповідають за візуалізацію, архівування та інтерфейс оператора. Типовим прикладом є система дистанційного автоматизованого управління цукровим заводом (СДАУ-Ц), яка контролює роботу обладнання, дотримання технологічних режимів та облік напруцювання кожної одиниці.

На цукрових заводах України: Горохівському, Радехівському, Шамраївському, Жданівському, Дубенському впроваджено автоматизацію багатокорпусних випарних установок. Автоматизовано регулювання витрати соку, рівнів у корпусах, розрідження в концентраторі, температури перед випаркою, контролюється тиск, температура вторинної пари та густина сиропу. Приміром, на Каіндинському цукровому заводі використовується контролер TSX P572634M для п'ятикорпусної установки, а витрата ретурної пари вимірюється вихровими датчиками ДРГ-МЗ.

Незважаючи на значний прогрес, більшість існуючих систем автоматизації випарних установок спираються на класичні ПІД-регулятори, налаштовані на певний типовий режим. Дослідження показують, що при різких технологічних збуреннях тобто коливаннях тиску пари, зміні концентрації або витрати соку ефективність таких регуляторів суттєво падає через велику інерційність об'єкта, нелінійність та сильні перехресні зв'язки між корпусами. Оператор змушений самотійно аналізувати десятки параметрів, що призводить до високого когнітивного навантаження та підвищує ризик помилок.

1.3 Технологічний процес випарювання цукрового соку

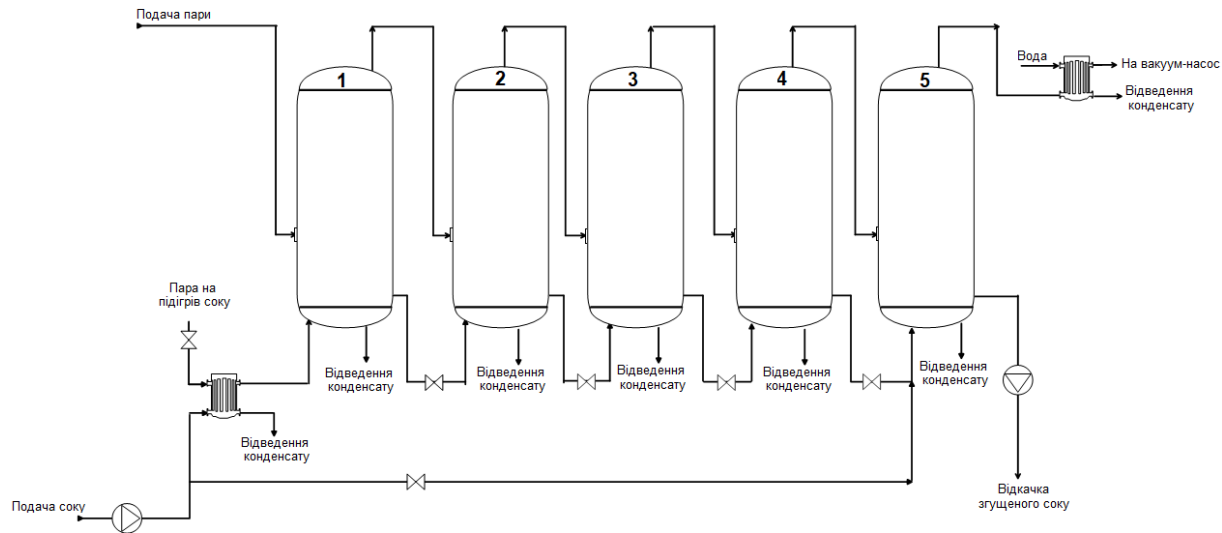


Рис. 1.2 Технологічна схема випарювання соку на цукровому виробництві

П'ятикорпусна випарна установка є однією з найважливіших і найбільш енергоємних складових технологічного процесу цукрового виробництва. Її головна функція – видалення надлишкової вологи з очищеного соку для підвищення концентрації розчинених сухих речовин та отримання кондиційного згущеного сиропу. Цей процес ґрунтується на принципі багатократного використання теплової енергії: утворена при кипінні соку вторинна пара попереднього корпусу виступає теплоносієм (гріючою парою) для наступного. Термодинамічна схема дозволяє суттєво знизити питомі витрати палива на підприємстві [4].

Технологічно установка являє собою складну гідродинамічну та теплообмінну систему. Очищений сік, попередньо нагрітий до температури, близької до точки кипіння, безперервно подається у перший корпус. Рух продукту між апаратами відбувається каскадно, переважно завдяки перепаду робочого тиску між суміжними корпусами, що створює умови для перетікання рідини.

Процес випаровування супроводжується поступовим зниженням тиску та температури кипіння від першого корпусу до останнього. У п'ятому корпусі, завдяки роботі барометричного конденсатора та вакуум-насоса, створюється глибоке розрідження. У міру просування соку випарною станцією його

густина та кінематична в'язкість нелінійно зростають. Це призводить до зниження коефіцієнтів теплопередачі, збільшення фізико-хімічної (температурної) депресії та підвищує ризик термічного розкладання сахарози у випадку порушення теплового балансу або збільшення часу перебування продукту в апараті.

Як об'єкт керування, багатокорпусна випарна установка характеризується значною інерційністю, наявністю сильних перехресних зв'язків між технологічними параметрами та впливом постійних зовнішніх збурень (зміна витрати або початкової густини соку, коливання тиску ретурної пари). Навіть незначне порушення матеріального або теплового балансу в одному з корпусів миттєво порушує гідродинаміку всієї станції. Це може призвести до критичних наслідків: оголення гріючих трубок, перекидання соку з вторинною парою у наступні апарати або отримання сиропу нестандартної концентрації.

Враховуючи високу чутливість процесу до технологічних збурень, згущення цукрового соку вимагає жорсткої стабілізації матеріальних і теплових потоків. Оскільки традиційні методи ручного контролю або ізольовані локальні контури не здатні забезпечити оптимальний режим роботи такої багатовимірної системи, виникає об'єктивна технологічна необхідність у впровадженні комплексної автоматизованої системи управління з використанням алгоритмів експертної оцінки ситуацій

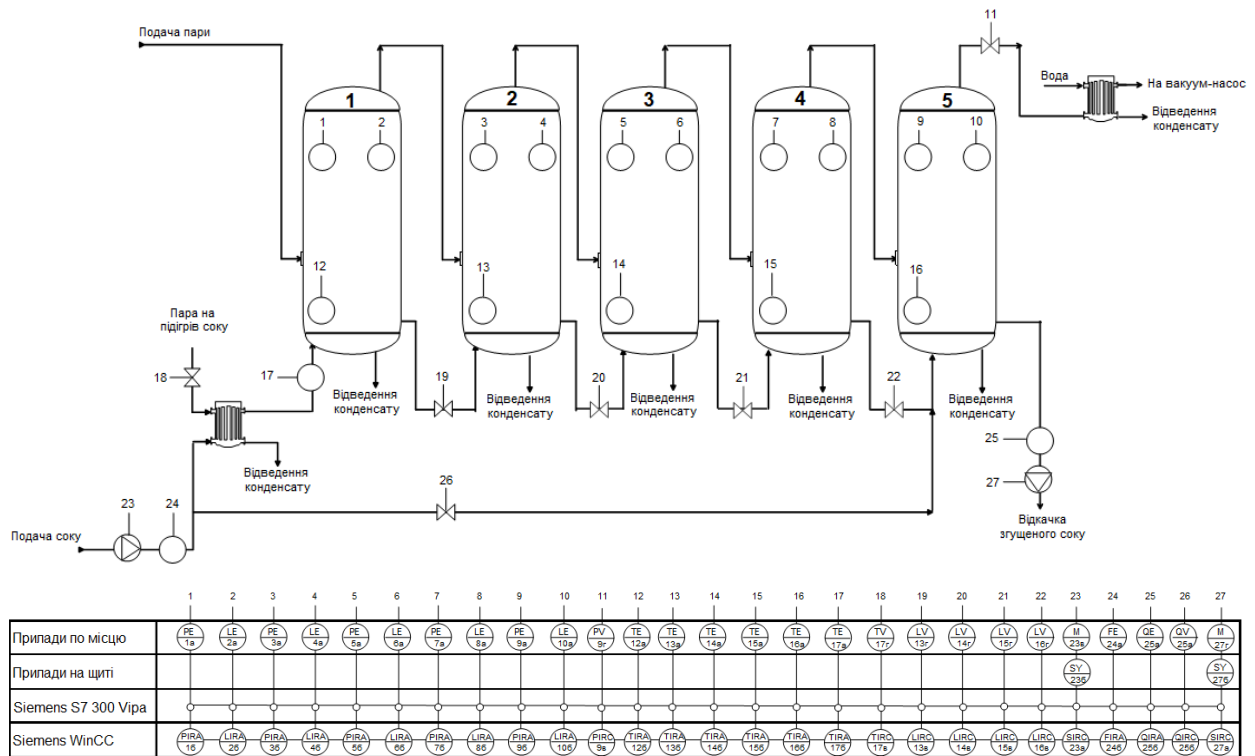


Рис. 1.3 Фрагмент Функціональної схеми автоматизації

Процес розпочинається з надходження очищеного соку, який подається в систему насосом (22). Об'ємна витрата сировини на вході контролюється витратоміром (23), сигнал від якого у вигляді аналогової величини надходить на вхід ПЛК для обліку та реєстрації у SCADA-системі. Перед надходженням у перший корпус випарної установки сік проходить через підігрівач (17), де підігрівається паром. Для підтримки оптимальної температури соку передбачено автоматичний контур: датчик температури, встановлений після теплообмінника, передає сигнал на контролер. Залежно від відхилення температури від заданої уставки, ПЛК формує керуючий вплив на регулюючий клапан (16), який плавно змінює кількість пари, що подається на підігрів [10, 14].

Для забезпечення заданого температурного графіка випарювання у паровому просторі кожного з п'яти корпусів (корпуси 1–5) здійснюється безперервний моніторинг тиску гріючої та вторинної пари. Для цього

використовуються первинні перетворювачі тиску і розрідження (1-10). Уніфіковані сигнали з цих датчиків надходять на аналогові входи ПЛК і транслюються на верхній рівень у WinCC [9]. Отримані дані є критично важливими для експертної системи, яка на їх основі аналізує тепловий баланс установки, розраховує температурну депресію та оптимізує споживання енергоресурсів.

Важливим параметром є підтримка стабільного рівня соку в кожному апараті, що запобігає оголенню гріючих трубок (призводить до пригорання) або перекиданню рідини з парою в наступні корпуси. Рівень контролюється системою датчиків (11, 12, 13, 14, 15), встановлених у нижній частині кожного корпусу. Рух соку через установку здійснюється послідовно. Контролер, безперервно опитуючи рівнемір, обчислює необхідну витрату продукту і через аналогові виходи керує ступенем відкриття перепускних регулюючих клапанів (18, 19, 20, 21). Така каскадна система автоматичного регулювання забезпечує рівномірний перетікання соку від першого до п'ятого корпусу відповідно до швидкості випарювання вологи.

На фінальній стадії з п'ятого корпусу відводиться готовий продукт це згущений сироп. Головним показником якості на цьому етапі є густина сиропу (вміст сухих речовин в сиропі). Вона безперервно вимірюється потоковим густиноміром (25), встановленим на трубопроводі відкачки. Для стабілізації показника густини застосовується контур автоматичного регулювання продуктивності відкачування. Залежно від показників датчика, ПЛК формує керуючий сигнал на частотний перетворювач, який плавно змінює швидкість обертання двигуна насоса відкачки згущеного соку (26). Якщо густина падає нижче норми, насос знижує оберти, затримуючи сироп в апараті для додаткового згущення; якщо густина перевищує норму відповідний насос пришвидшує відкачку. Всі параметри цього процесу архівуються у WinCC для формування звітів та аналітики експертною системою.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ВИПАРЮВАННЯ ВЦУКРОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Таблиця 2.1 Дані для виведення математичної моделі

Довжина теплообмінника L_t , м	Діаметр теплообмінника D_t , м	Діаметр трубок, d_{tr} , м	Кількість трубок, n_{tr} , шт.	Кількість ходів, N , од.	Тиск насиченої пари P , бар.	Витрати соку, G_p , т/год.	Вміст сухих речовин в соку CP , %	Матеріал трубок
6	0,35	0,02- 0,026	100	3	1,2	120	16	латунь

Для побудови динамічної моделі необхідно знати залежність питомої теплоємності (C) від температури (t) для заданої концентрації [2].

$$C_i = C_{30_i} + \frac{(30 - 16) \cdot (C_{20_i} - C_{30_i})}{30 - 20}$$

$$C^T = (3610, 3676, 3702, 3736, 3741, 3741, 3741) \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Для нелінійної моделі

$$C(t) = a_0 \cdot e^{a_1/t}$$

Проводиться лінеаризація через логарифмування

$$\ln(C) = \ln(a_0) + a_1/t$$

Вводимо змінні

$$u = \ln(C) \text{ та } v = 1/t$$

$$A = \begin{pmatrix} n & \\ \sum v & \sum v^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 & 0.171 \\ 0.171 & 0.0054 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} \sum u \\ \sum(v \cdot u) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 57.54 \\ 1.405 \end{pmatrix}$$

Розв'язок:

$$a = A^{-1} \cdot B$$

$$a = \begin{pmatrix} 7 & 0.171 \\ 0.171 & 0.0054 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 57.54 \\ 1.405 \end{pmatrix}$$

Результат:

$$a_0 = 3798.68$$

$$a_1 = -1.0018$$

Тепер розрахуємо значення які визначають фізичний стан середовища під час теплообміну

Густина соку:

$$\rho_s = 1129.02 - 0.3676 \cdot t_p = 1110.46 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Теплопровідність:

$$\lambda_s = 0.197 \cdot \frac{t_p}{100} + 0.32 = 0.419 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Теплоємність соку:

$$C_s = 3798.68 \cdot \exp\left(-\frac{1.0018}{50.5}\right) = 3724.07 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Далі необхідно врахувати масові показники обладнання. Прорахуємо параметри які визначають інерційність і площу контакту.

Площа теплообміну:

$$F_{tr} = \pi \cdot d_{tr} \cdot n_{tr} \cdot L_t = \pi \cdot 0.022 \cdot 100 \cdot 6 = 41.47 \text{ м}^2$$

Маса трубок:

$$G_{tr} = n_{tr} \cdot L_t \cdot d_{tr} \cdot \delta_{tr} \cdot \rho_{brass} = 718.24 \text{ кг}$$

Маса соку в апараті:

$$G_{tr} = V_s \cdot \rho_s = 0.1527 \cdot 1110.46 = 169.55 \text{ кг}$$

Наступним кроком в розрахунках повинен бути розрахунок гідродинаміки та інтенсивності тепловіддачі. Тут ми проаналізуємо і з'ясуємо наскільки швидко передається енергія від металу до продукту, для цього розрахуємо:

Швидкість потоку:

$$\omega = \frac{G_p}{S_{\text{витрат}} \cdot \rho_s} = \frac{33.33}{0.00848 \cdot 1110.46} = 3.54 \text{ м/с}$$

Число Рейнольдса(Турбулентний режим):

$$Re = \frac{\omega \cdot d_{in} \cdot \rho_s}{\mu_s} = 58946.28$$

Критерій Нуссельта:

$$Nu = 0.021 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43} \cdot 1.7^{0.25} = 434.52$$

Коефіцієнт тепловіддачі:

$$a = \frac{Nu \cdot \lambda_s}{d_{in}} = 10126.46 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

На основі рівнянь енергетичного балансу можемо визначити коефіцієнт передачі, постійну часу та час запізнення

коефіцієнт передачі(K)

$$K = \frac{a \cdot F_{tr}}{G_p \cdot c_s} = K = \frac{10126.46 \cdot 41.47}{33.33 \cdot 3724.07} = 3.38$$

постійну часу(T)

$$T = \frac{V_p \cdot \rho_s}{G_p} = \frac{0.1527 \cdot 1110.46}{33.33} = 5.08 \text{ c}$$

Час запізнення(τ):

$$\tau = \frac{L_t}{\omega} = \frac{6}{3.54} = 1.69 \text{ c}$$

Імітаційна модель, розроблена в середовищі Simulink, є нелінійною динамічною системою, що описує теплові процеси у випарному апараті. Вона базується на розв'язанні диференціальних рівнянь енергетичного балансу для двох основних контурів: металевих стінок трубок та потоку цукрового соку [2, 12, 16] .

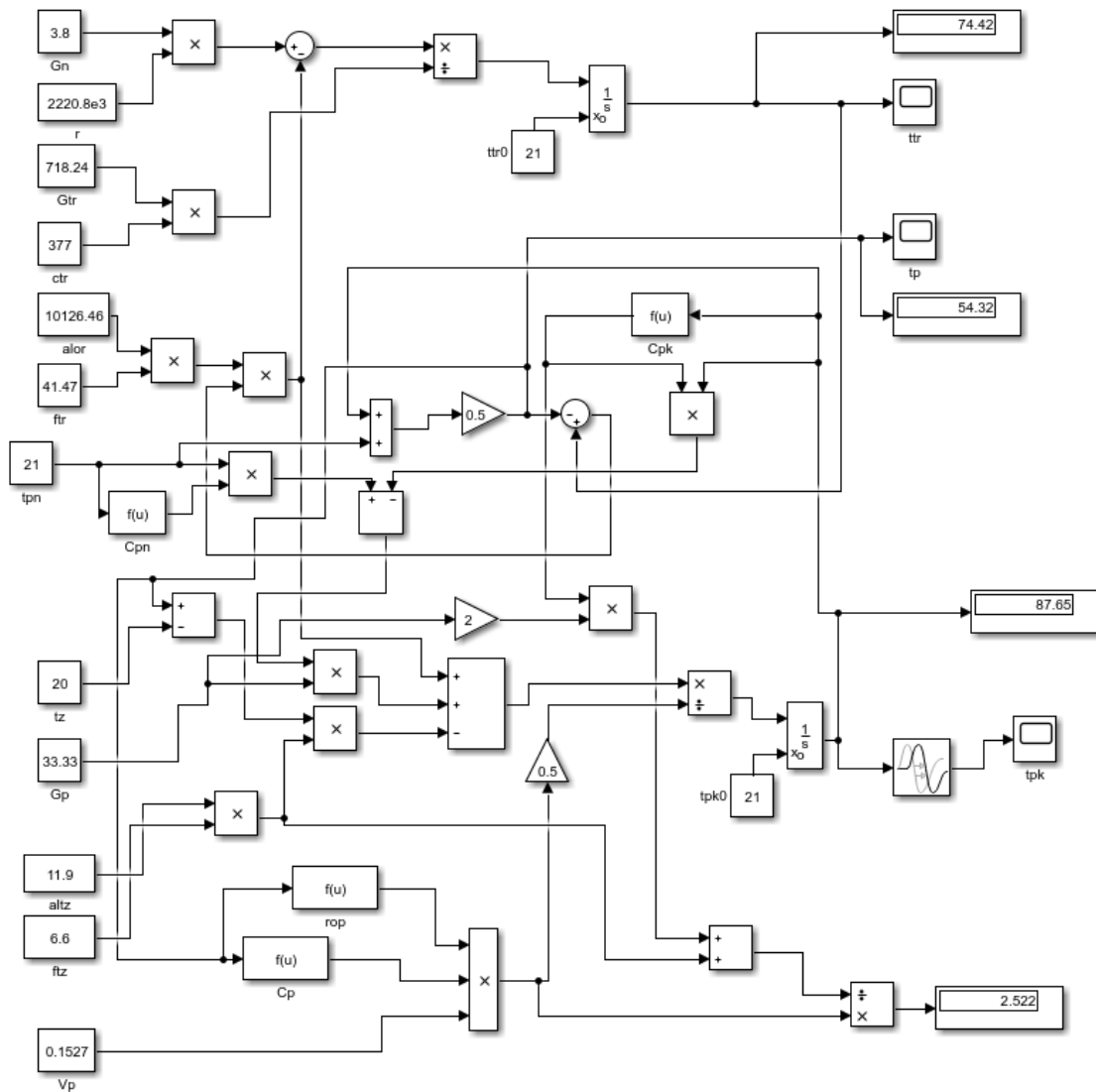


Рис. 2.1 Імітаційна модель кожухотрубного теплообмінника випарного апарата

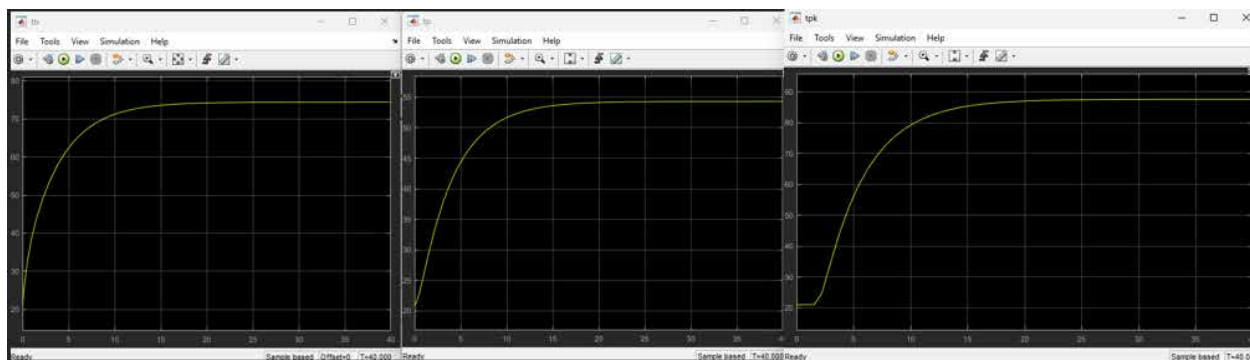


Рис. 2.2 Результати імітації моделі

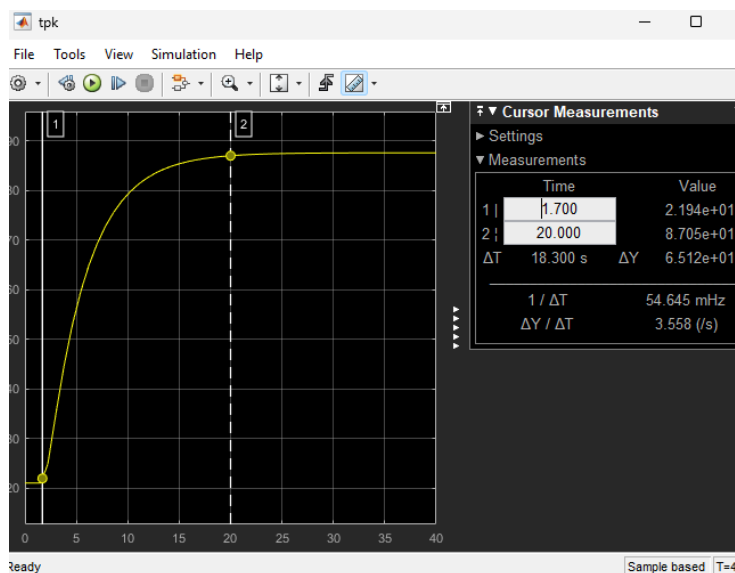


Рис. 2.3 Визначення показників за допомогою імітаційної моделі

Аналіз кривої розгону (Рис. 2.2) підтверджує адекватність обраної постійної часу $T_{OK} = 5$ с. Перехідний процес завершується за час $T_{рег} = 20$ с, що відповідає теоретичному співвідношенню $T_{рег} = 4T_{OK}$.

Коефіцієнт передачі об'єкта вираховується за наступною формулою:

$$K_{OK} = \frac{X_{уст} - X_{поч}}{\%}, \quad \left[\frac{^{\circ}C}{\%} \right]$$

де:

$X_{уст}$ – усталене значення температури (87.65 °C);

$X_{поч}$ – початкове значення температури (21 °C);

% – відсотки повороту регулювального органа (20 %).

Підставивши у формулу всі значення, прорахуємо коефіцієнт передачі об'єкта:

$$K_{OK} = \frac{87.65 - 21}{20} = 3.38 \quad \left[\frac{^{\circ}C}{\%} \right]$$

Час запізнення: $\tau = 1.69$ с

Для верифікації імітаційної моделі було проведено порівняння її показників у сталому режимі з результатами аналітичного розрахунку при вхідних параметрах: $G_p = 120$ т/год, $CP = 16\%$, $G_n = 3.8$ кг/с.

Таблиця 2.1 Порівняння розрахункових даних та імітаційних

Параметр	Математична модель	Імітаційна модель	Відхилення (Похибка)
Температура на виході, t_{pk}	87.60 °C	87.65 °C	0.06 %
Температура стінки, t_{tr}	74.40 °C	74.42 °C	0.03 %
Середня температура соку, t_p	54.30 °C	54.32 °C	0.04 %
Коефіцієнт передачі, K	3.38	3.38	0.0 %
Постійна часу, T	5.08 с	5 с	1.6 %
Час запізнення, τ	1.69 с	1.7 с	0.02 %

Розроблена імітаційна модель демонструє високу адекватність, оскільки розбіжність між теоретичними розрахунками та результатами моделювання не перевищує 3%. Завдяки врахуванню нелінійних властивостей соку та інерційності конструкції, модель дозволяє точно прогнозувати поведінку

об'єкта в перехідних режимах. Так ми створили надійний фундамент для синтезу алгоритмів експертної системи, здатної вчасно реагувати на технологічні збурення у цукровому виробництві

Отже, після того, як ми отримали всі необхідні значення, можемо подати передатну функцію в такому вигляді:

$$W_o(s) = \frac{3.38}{5.08s + 1} \cdot e^{-1.69s}$$

$$W^f(s) = \frac{2.03}{5.08s + 1} \cdot e^{-1.69s}$$

РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ СОКУ В ТЕПЛООБМІННИКУ

3.1 Вибір первинного вимірювального перетворювача

ВП – первинний вимірювальний перетворювач. Він являє собою сприймаючий елемент. Умовою вибору ПВП є

$$T_{CE} < 0.1 T_{об}$$

$$T_{CE} < 0.508$$

Для задовільнення цієї умови ми обираємо ПВП – Pt100 WІКА TR10-K

Таблиця 3.1 Основні технічні характеристики

Градуювання	Опір при 0 °C = 100 Ом
Границі виміру	-50...+150, °C
Теплова інерція	0.5 секунд ($T_{CE} = 0.5$ секунд)
Діаметр	3 мм

$$T_{CE}(0.5 \text{ сек}) < 0.1 T_{об} (5.08 \text{ с})$$

$$0.5 < 0.508$$

$$W_{CE} = \frac{K_{CE}}{T_{CE} \cdot s + 1}$$

$$K_{CE} = R_0 \cdot \alpha$$

В залежності від матеріалу, з якого виконано термометр опору, Державний стандарт України ДСТУ ГОСТ 6651: 2014 визначає такі залежності опору чутливого елемента термоперетворювача від температури: для платинового чутливого елемента із значенням $\alpha = 0,003851 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$$K_{CE} = R_0 \cdot \alpha = 100 \cdot 3.851 \cdot 10^{-3} = 0.3851$$

Інерційна ланка:

$$W_{CE} = \frac{0.3851}{0.5s + 1}$$



Рис 3.1 Платиновий термометр опору

Характеристика	Опис
Тип сенсора	Pt100 (платиновий термометр опору)
Діапазон вимірювань	-50...+150, °C
Схема підключення	2-провідна, 3-провідна або 4-провідна
Кількість сенсорів	Одинарний (1 x Pt100) або подвійний (2 x Pt100)
Клас точності	Клас А або Клас В згідно з ІЕС 60751

Матеріал вставки	Кабель з мінеральною ізоляцією (МІ-кабель), нержавіюча сталь
Конструкція	Гнучка, підпружинена (для щільного контакту з гільзою)
Діаметр вставки	Стандартно 3 мм або 6 мм (інші розміри за запитом)
Сумісність	Призначена для встановлення в термометри серії TR10-L
Вибухозахист	Доступні версії АTEX, IECEx (Ex i, Ex d, Ex e)

3.2 Вибір виконавчого механізму:

Динамічні властивості ВМ описуються інерційною ланкою першого порядку, оскільки переміщення штока клапана та стабілізація потоку пари відбуваються з певною часовою затримкою, зумовленою опором пневматичної або електричної системи привода.

Розрахунок параметрів для об'єкта підігріву соку

Для забезпечення точності моделювання параметри ВМ розраховуються на основі номінальних характеристик витрати пари, визначених у другому розділі ($G_n = 3.8$ кг/с)

Коефіцієнт передачі ($K_{\text{вм}}$) розраховується як відношення максимально можливої витрати робочого середовища до повного діапазону зміни керуючого сигналу (приймаємо діапазон 0–100%):

$$K_{\text{вм}} = \frac{G_{n \text{ макс}}}{100\%} = \frac{3.8}{100} = 0.038 \frac{\text{кг/с}}{\%}$$

Постійна часу виконавчого механізму $T_{\text{вм}}$ обґрунтовується виходячи з динамічних характеристик пневматичного мембранного привода. Враховуючи використання позиціонера для покращення динаміки, номінальний час повного ходу штока для клапана типорозміру DN150 становить $t_{\text{ход}} = 6$ с.

Згідно з теорією автоматичного керування, для інерційної ланки першого порядку час досягнення 95% усталеного значення дорівнює $3T-5T$. Звідси розрахункове значення постійної часу виконавчого механізму становить:

$$T_{\text{вм}} = \frac{t_{\text{ход}}}{3} = \frac{6}{3} = 2 \text{ с}$$

На основі проведених розрахунків та технічних характеристик обладнання, математична модель виконавчого механізму за каналом керування має вигляд:

$$W_{\text{вм}}(s) = \frac{K_{\text{вм}}}{T_{\text{вм}}s + 1}$$
$$W_{\text{вм}}(s) = \frac{0.038}{2s + 1}$$

Згідно необхідних параметрів в якості виконавчого механізму обрано регулювальний клапан **ARI-STEVI 470 DN150** з пневмоприводом та позиціонером. Вибір обґрунтований необхідністю регулювання потоку насиченої пари з максимальною витратою 3.8 кг/с. Використання позиціонера

дозволяє апроксимувати динаміку клапана інерційною ланкою першого порядку з постійною часу $T_{vm} = c$, що відповідає вимогам швидкодії системи



Рис 3.2 Клапан регулюючий для високого тиску Ari-Stevi 470

Характеристика	Опис
Модель клапана	Ari-Stevi 470
Номінальні діаметри	DN 25 ... 150
Номінальний тиск, бар	PN 63, 100, 160
Діапазон значень Kvs	0,8 ... 400
Витратна характеристика	Рівновідсоткова (починаючи з Kvs 100 – модифікована) або лінійна
Діапазон регулювання	• 50 : 1 – для параболічного затвора • 30 : 1 – для шліцьового та перфорованого затворів
Клас герметичності	III / IV / IV-S1 / VI відповідно до ІЕС 60534-4 (залежно від виконання затвора)

Розробка структурно-функціональної схеми системи автоматичного регулювання

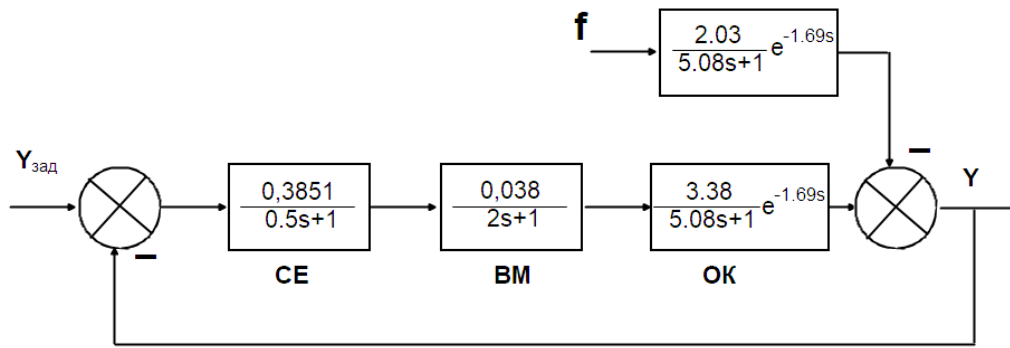


Рис. 3.3 Структурна схема

Обґрунтування та вибір алгоритму регулювання парою

3.3 Визначення передатних функцій

а) Розімкнutoї системи ($f=0$):

$$W_{roz}(s) = \frac{0.3851}{(0.5s + 1)} \cdot \frac{0.038}{(2s + 1)} \cdot \frac{3.38 e^{-1.69s}}{(5.08s + 1)} =$$

$$\frac{0.3851 \cdot 0.038 e^{-1.69s}}{(0.5 \cdot 2 \cdot 5.08) \cdot s^3 + (0.5 \cdot 2 + 2 \cdot 5.08 + 0.5 \cdot 5.08) \cdot s^2 + (0.5 + 2 + 5.08) \cdot s + 1}$$

$$W_{roz}(s) = \frac{0.049 e^{-1.69s}}{5.08s^3 + 13.7s^2 + 7.58s + 1}$$

б) Передатна функція замкнутої системи за керуванням ($f=0$):

$$W_{zam}(s) = \frac{0.049 e^{-1.69s}}{5.08s^3 + 13.7s^2 + 7.58s + 1 + 0.049 e^{-1.69s}}$$

в) Замкнутої системи за збуренням ($Y_{\text{зад}}=0$)

$$W^F(s) = \frac{\frac{2.03}{5.08s + 1} \cdot e^{-1.69s}}{1 + \left[\frac{0.3851}{(0.5s + 1)} \cdot \frac{0.038}{(2s + 1)} \cdot \frac{3.38e^{-1.69s}}{(5.08s + 1)} \right]} = \frac{\frac{2.03}{5.08s + 1} \cdot e^{-1.69s}}{\frac{0.049e^{-1.69s}}{(0.5s+1) \cdot (2s+1) \cdot (5.08s+1)}}$$

$$= \frac{-\left[2.03 \cdot 0.5 \cdot 2s^2 + 2.03(0.5 + 2)s + 2.03\right] \cdot e^{-1.69s}}{\frac{0.049e^{-1.69s}}{(0.5s+1) \cdot (2s+1) \cdot (5.08s+1)}} = \frac{-\left(2.03s^2 + 5.075s + 2.03\right) \cdot e^{-1.69s}}{\left(5.08s^3 + 13.7s^2 + 7.58s + 1 + 0.049e^{-1.69s}\right)}$$

Побудова АФЧХ розімкнутої системи, аналіз замкнутої системи на стійкість та визначення запасів стійкості за амплітудою і за фазою

$$\alpha_0 = 5.08$$

$$\alpha_1 = 13.7$$

$$\alpha_2 = 7.58$$

$$K = 0.049$$

$$\tau = 1.69$$

```
>> W=tf([0.049],[5.08 13.7 7.58 1], 'inputdelay', 1.69)
```

W =

$$\exp(-1.69s) * \frac{0.049}{5.08 s^3 + 13.7 s^2 + 7.58 s + 1}$$

Continuous-time transfer function.

Model Properties

```
>> nyquist(W)
```

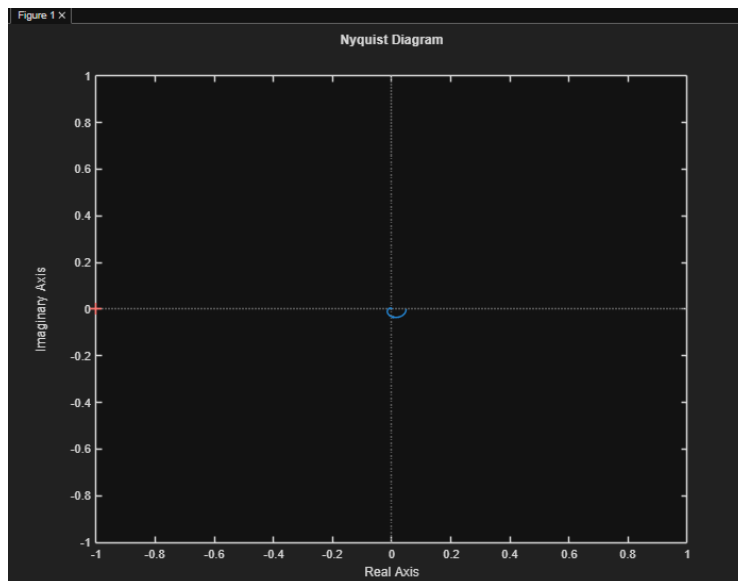


Рис.3 4 Годограф АФЧХ для автоматичної системи

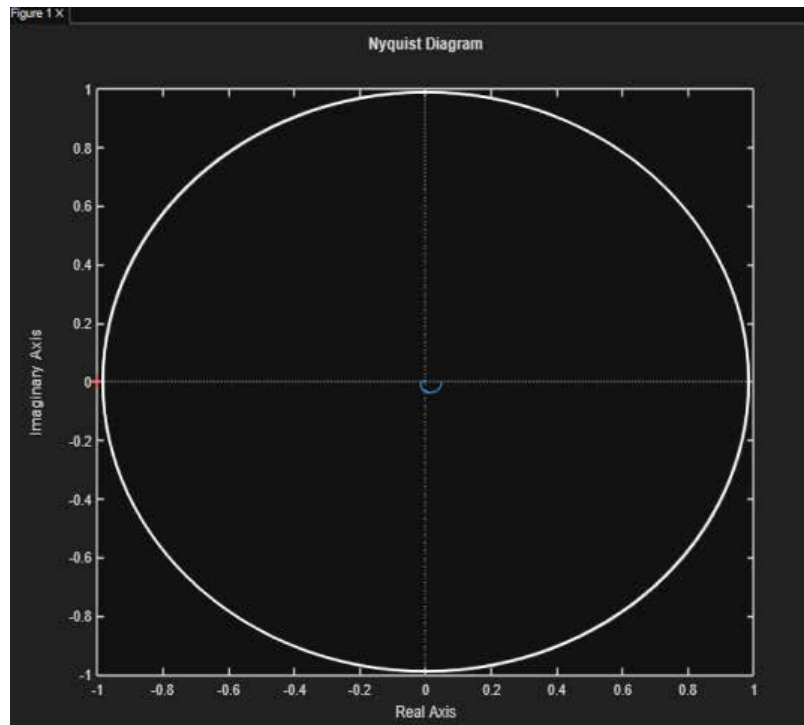


Рис.3.5 Запас стійкості за фазою

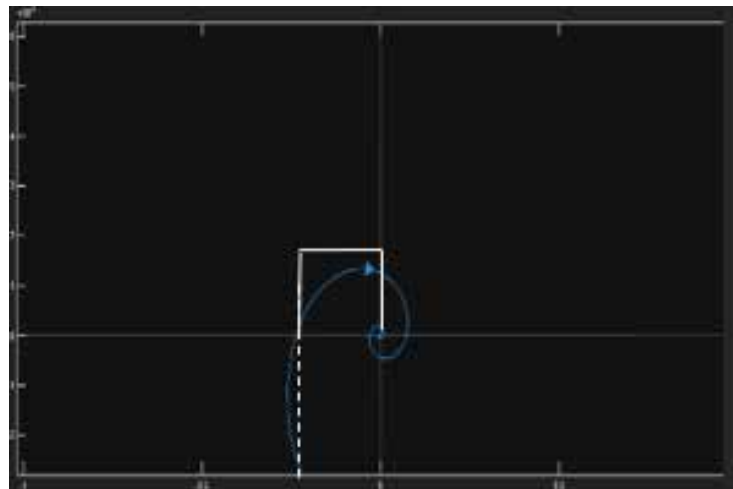


Рис.3.6 Запас стійкості за амплітудою

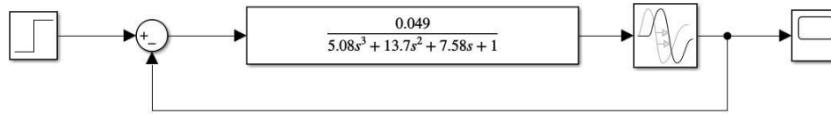


Рис.3.7 Simulink-модель системи

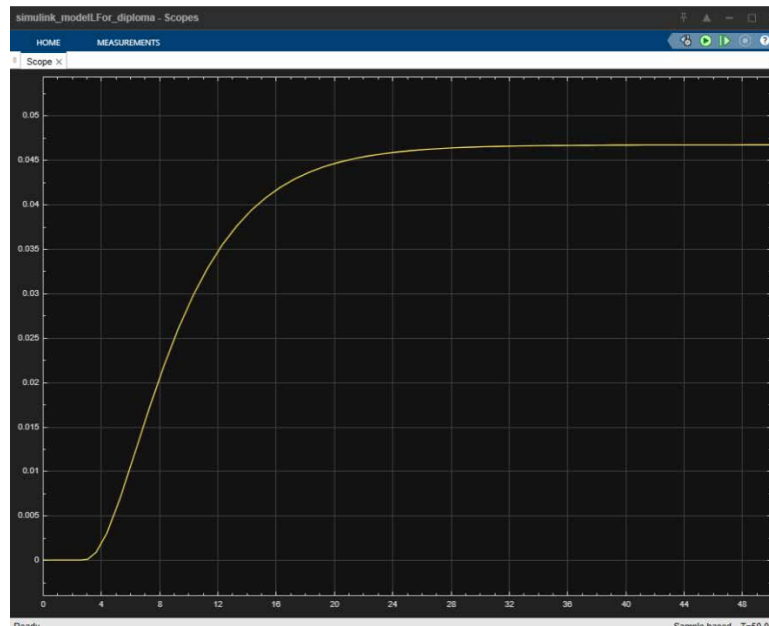


Рис.3.8 Перехідний процес нескоректованої САР

Розрахувати показники якості перехідного процесу:

Статична похибка
$$\delta = \frac{\gamma_{\text{zad}} - \gamma_{\text{ust}}}{\gamma_{\text{zad}}} \cdot 100\% = \frac{1 - 0.046}{1} \cdot 100 = 95.4$$

Час регулювання
$$t_p = 27 \text{ c}$$

Перерегулювання
$$\sigma = \frac{\gamma_{\text{max}} - \gamma_{\text{ust}}}{\gamma_{\text{max}}} \cdot 100\% = \frac{0.046 - 0.046}{0.046} \cdot 100 = 0$$

Коливальність
$$n = 0$$

Показники якості системи з П-регулятором (статична похибка, час регулювання) не задовольняють технічне завдання, отже треба ввести додатковий регулятор.

**Отримання формули та побудова АЧХ неперервної замкнутої системи.
Визначення допустимого періоду дискретизації цифрового регулятора
при заданій похибці квантування $\theta = 1\%$**

$$W_{roz}(s) = \frac{0.049 \text{ä}^{-1.69s}}{5.08s^3 + 13.7s^2 + 7.58s + 1}$$

$$W_{zam}(s) = \frac{0.049 \text{ä}^{-1.69s}}{5.08s^3 + 13.7s^2 + 7.58s + 1 + 0.049 \text{ä}^{-1.69s}}$$

Необхідно знайти допустимий період квантування, що забезпечує максимальну похибку відтворення первинного неперервного сигналу $\theta_{зад} = 1\%$.

Передатна функція неперервної частини замкненої системи:

$$W_{zam_nch}(jw) = \frac{0.049 \text{ä}^{-1.69jw}}{5.08(jw)^3 + 13.7jw^2 + 7.58jw + 1 + 0.049 \text{ä}^{-1.69jw}} = \blacksquare$$

$$\blacksquare = \frac{0.049 \text{ä}^{-1.69jw}}{j \cdot 5.08w^3 - 13.7w^2 + j \cdot 7.58w + 1 + 0.049(\cos(1.69w) - j \sin(1.69w))} = \blacksquare$$

$$\blacksquare = \frac{0.049 \text{ä}^{-1.69jw}}{\left(1 - 13.7w^2 + 0.049 \cos(1.69w)\right) + j\left(7.58w - 5.08w^3 - \sin(1.69w)\right)} = \blacksquare$$

Амплітудно-частотну характеристику неперервної частини замкненої системи знайдемо як модуль АФЧХ цієї системи [12]:

$$A(w) = |W_{zam}(jw)| = \frac{0.049}{\sqrt{\left(1 - 13.7w^2 + 0.049 \cos(1.69w)\right)^2 + \left[7.58w - \left(5.08w^3 - \sin(1.69w)\right)\right]^2}}$$

Знайдемо значення амплітудно-частотної характеристики неперервної частини замкненої автоматичної системи при нульовій частоті $A(0)$

$$A(0) = \frac{0.049}{\sqrt{(1 - 13.7 \cdot 0^2 + 0.049 \cos(1.69 \times 0))^2 + [7.58 \cdot 0 - (5.08 \cdot 0^3 - \sin(1.69 \times 0))]^2}} = \frac{0.049}{\sqrt{(1 + 0.049)^2}} = \frac{0.049}{(1 + 0.049)} = 0.047$$

Визначаємо праву частину рівняння:

$$A(0) \cdot \theta = 0.047 \cdot 0.01 = 0.00047$$

$w := -1$

Given

$$A(w) = 0.00047$$

$$\text{Find}(w) = -2.507$$

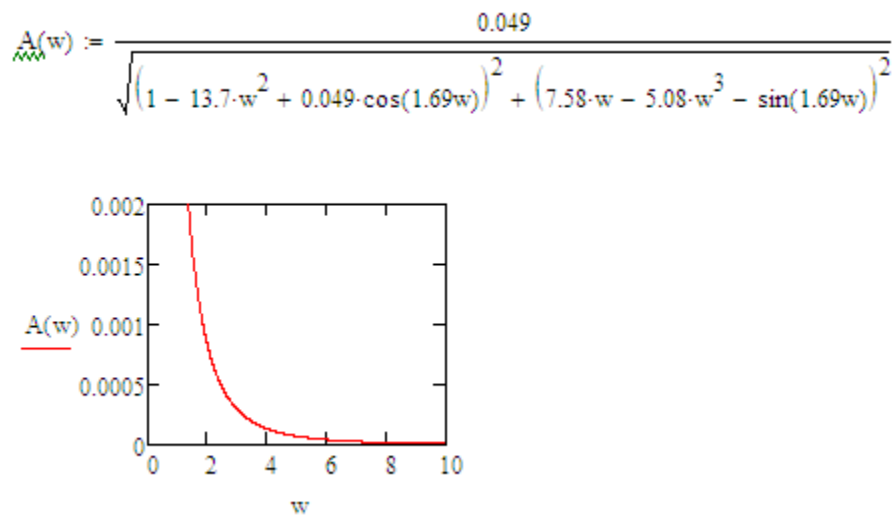


Рис.3.9 Амплітудно-частотна характеристика неперервної частини системи.
Фрагмент з програмного засобу MathCad

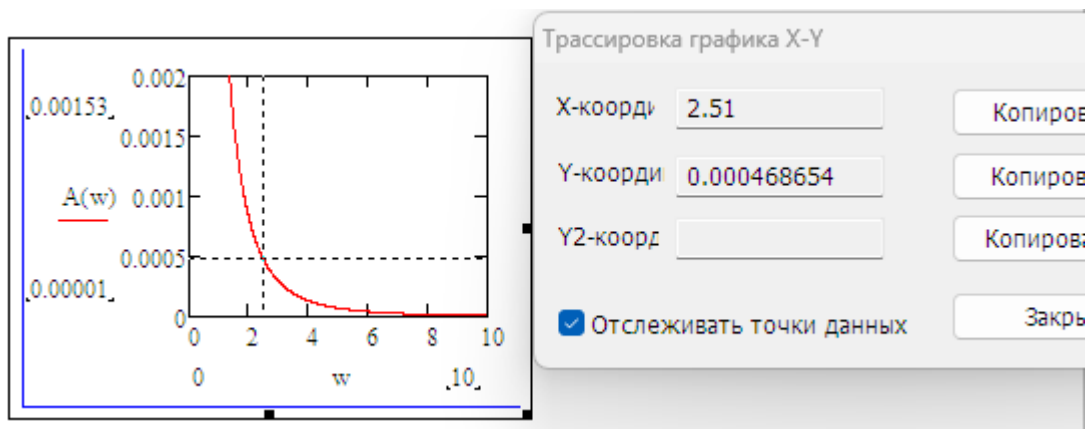


Рис.3.10 Визначення параметрів трасування на амплітудно-частотній характеристиці неперервної частини системи

Найбільша суттєва частота: $\omega_c = 2.51$ с

Максимально допустимий період квантування, що забезпечує максимальну похибку $\theta_{\text{зад}} = 1\%$.

$$T_{cz} = \frac{\pi}{2.51} = 1.252 \text{ с}$$

Приймаємо що $T_c = 1$ с

3.4 Синтез системи автоматичного регулювання за заданими показниками якості

Визначення параметрів ПІД-регулятора за методикою компенсації великих постійних часу:

Незмінна частина складається з об'єкта керування з передатною функцією

$$W_{OK}(s) = \frac{3.38}{5.08s + 1} e^{-1.69s}$$

та виконавчого механізму з передатною функцією

$$W_{BM}(s) = \frac{0.038}{2s + 1}$$

сприймаючого елементу з передатною функцією

$$W_{CE}(s) = \frac{0.3851}{0.5s + 1}$$

Передатна функція незмінної частини

$$W_{nch} = \frac{0.3851 \cdot 0.038 \cdot 3.38 e^{-1.69s}}{(0.5s + 1) \cdot (2s + 1) \cdot (5.08s + 1)} = \frac{0.0495}{(0.5s + 1) \cdot (2s + 1) \cdot (5.08s + 1) \cdot (1.69s + 1)}$$

У випадку ПІД-регулятора компенсуються дві постійні часу $T1=5.08$ с та $T2=2$ с. Сумарна некомпенсована постійна часу тут є сумою часу запізнення та постійної часу сприймаючого елемента $T\mu = \tau_0 + T_{CE} = 1.69 + 0.5 = 2.19$ с. Параметри налаштування регулятора:

$$K_p = \frac{T1 + T2}{K \cdot 2 \cdot T\mu} = \frac{5.08 + 2}{0.0495 \cdot 2 \cdot 2.19} = 32.655$$

$$K_i = \frac{1}{K \cdot 2 \cdot T\mu} = \frac{1}{0.0495 \cdot 2 \cdot 2.19} = 4.612$$

$$K_d = \frac{T1 \cdot T2}{K \cdot 2 \cdot T\mu} = \frac{5.08 \cdot 2}{0.0495 \cdot 2 \cdot 2.19} = 46.861$$

Створення структурно-алгоритмічної схеми скоректованої системи

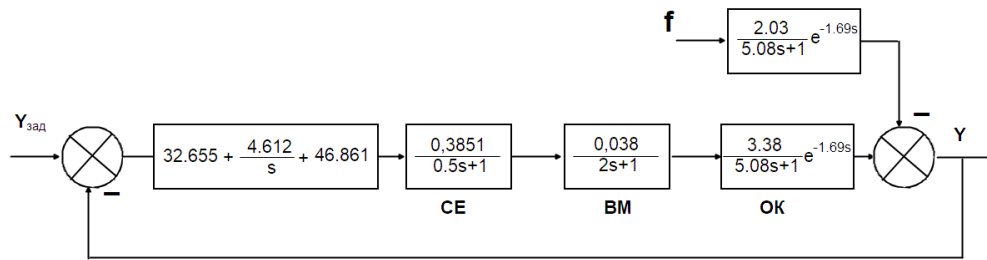


Рис 3.11 Структурна алгоритмічна схема скоректованої САР

**Створення Simulink-моделі неперервної скоректованої системи,
отримання перехідної характеристики скоректованої системи та оцінка
її показників якості**

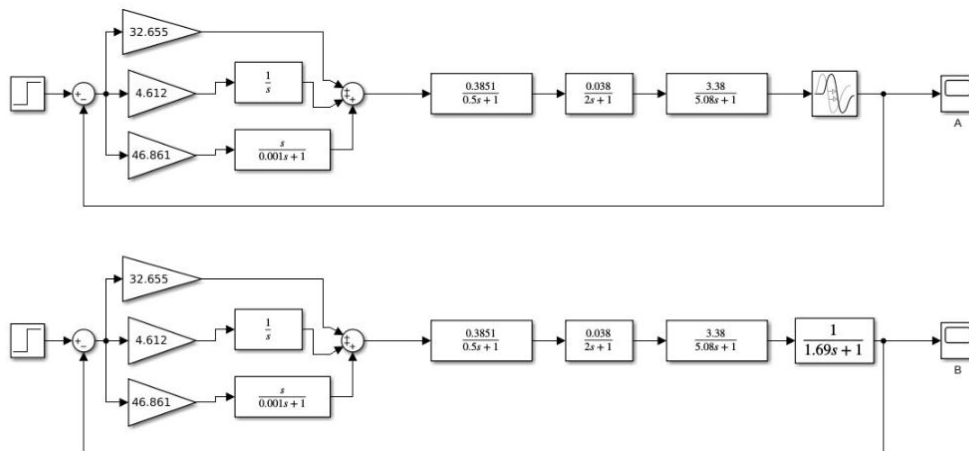


Рис.3.12 Імітаційна модель СК при апроксимації об'єкта інерційною ланкою із запізненням (зверху) та двома інерційними ланками (знизу)

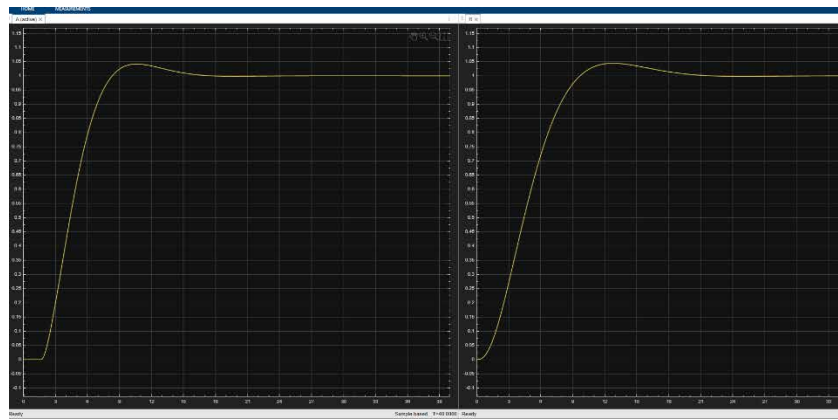


Рис.3.13 Перехідні характеристики системи з ПІД-регулятором при апроксимації об'єкта інерційною ланкою із запізненням (А) та двома інерційними ланками (В)

Показники якості скоректованої системи визначені за рис. 3.4. а:

статична похибка	$\delta = \frac{\gamma_{\text{zad}} - \gamma_{\text{ust}}}{\gamma_{\text{zad}}} \cdot 100\% = \frac{1 - 1}{1} \cdot 100 = 0$
час регулювання	$t_p = 20 \text{ с}$
перерегулювання	$\sigma = \frac{\gamma_{\text{max}} - \gamma_{\text{ust}}}{\gamma_{\text{max}}} \cdot 100\% = \frac{1.05 - 1}{1.05} \cdot 100 = 4.762\%$
коливальність	$n = 1$

Провівши оцінку показників якості скорегованої системи можна побачити, що після введення ПІД-регулятора система почала задовольняти показникам якості, задані технічним завданням.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

4.1 Обґрунтування доцільності застосування нечіткої логіки

Багатокорпусна випарна установка характеризується складною взаємодією технологічних параметрів, де зміна температурного або гідродинамічного режиму в одному корпусі безпосередньо впливає на стан інших. Встановлено, що класичні автоматичні регулятори (зокрема ПД-регулятори) виявляють низьку ефективність під час різких технологічних збурень, таких як коливання тиску пари або витрати соку. Для вирішення цієї проблеми було розроблено інтелектуальну експертну систему підтримки прийняття рішень. Дана система функціонує як цифровий радник, який у режимі реального часу аналізує показники датчиків та генерує рекомендації щодо керування виконавчими механізмами, що дозволяє запобігати аварійним ситуаціям та оптимізувати витрати енергоресурсів.

4.2 Вибір математичної моделі системи нечіткого виведення

Для побудови системи нечіткого виведення (Fuzzy Inference System) було обрано алгоритм типу Sugeno. Такий вибір зумовлений тим, що класичний алгоритм Mamdani потребує значних обчислювальних ресурсів для виконання процедури дефазифікації складних нечітких множин, що за наявності 17 вхідних параметрів може призвести до затримок у роботі контролера. Натомість модель Sugeno використовує лінійні функції або константи на виході, що забезпечує високу швидкодію обчислень [5, 6]. Завдяки цьому система формує чіткі дискретні керуючі команди: «-1» (закрити), «0» (зберігати поточний стан) або «1» (відкрити). Для цього в даній роботі використовується ПЗ Matlab. Щоб почати роботу з розробки в командному рядку ми задаємо команду “fuzzy” та відкриваємо робоче середовище.

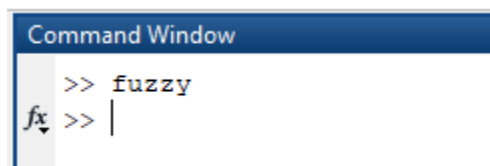


Рис.4.1 Команда “fuzzy”

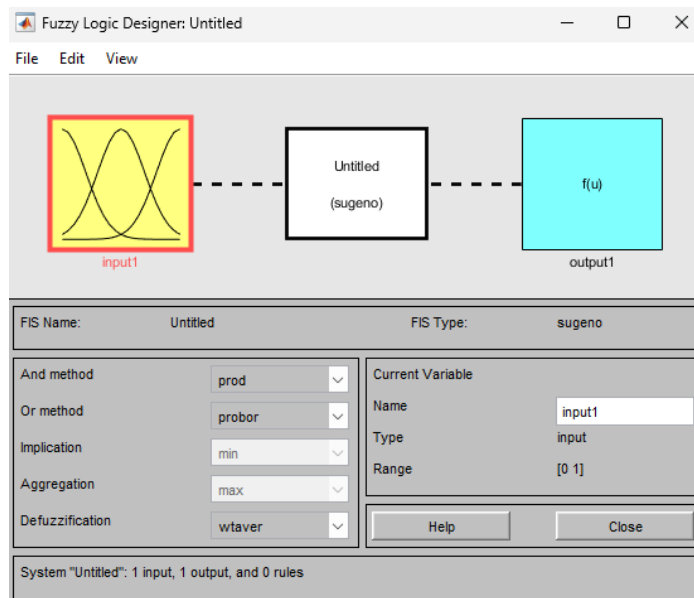


Рис.4.2 Новостворений файл в Fuzzy Logic Designer

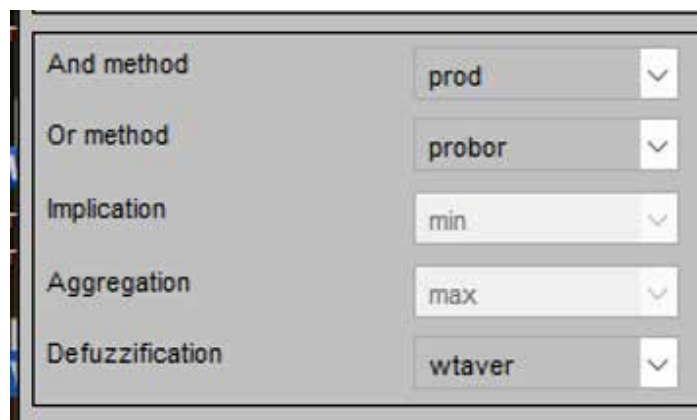


Рис.4.3 Налаштування системи

And method: prod (алгебраїчний добуток забезпечує більш гладку поверхню відгуку, ніж min).

Or method: probor (ймовірнісне АБО).

Defuzzification: wtaver (зважене середнє – ідеально для лінійних виходів Сугено).

4.3 Формування інформаційного простору та процедура фазифікації

Інформаційне забезпечення експертної системи формується на основі 17 вхідних сигналів, що включають дані про рівень соку в п'яти корпусах, температурні режими, тиск пари та концентрацію сухих речовин (Brix). Процес фазифікації – перетворення чітких фізичних величин у лінгвістичні змінні – реалізовано за допомогою гаусових функцій належності. Використання саме гаусових кривих забезпечує плавність переходу між логічними станами («Низький», «Нормальний», «Високий»), що дозволяє уникнути різких коливань керуючих впливів на виконавчі механізми під час перехідних процесів.

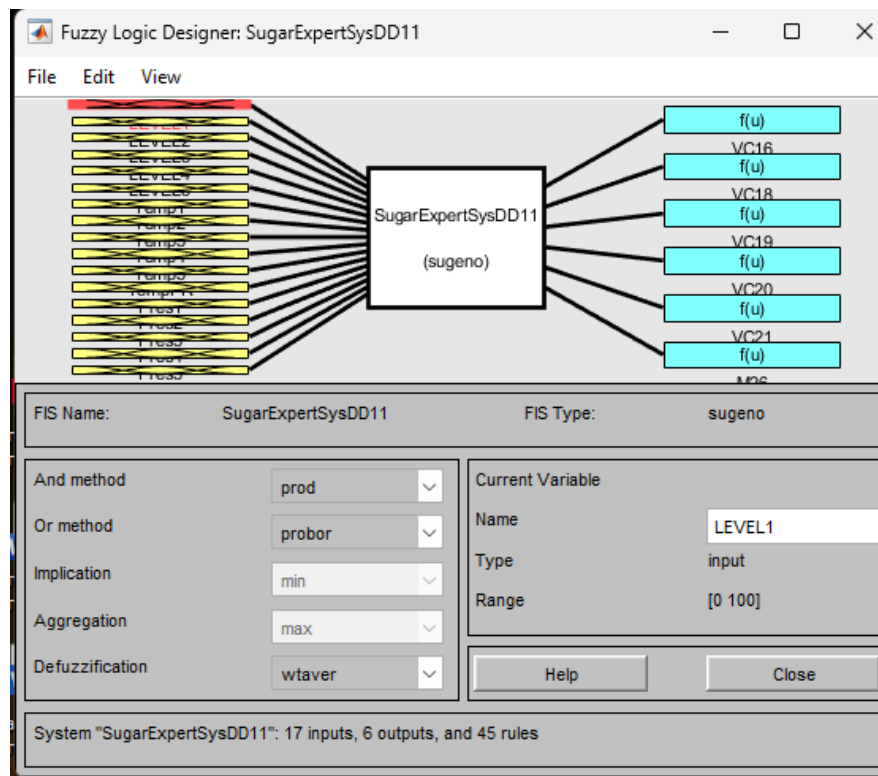


Рис.4.4 Заведені вхідні та вихідні параметри

Де:

LEVEL1 – рівень у 1-му корпусі.

LEVEL2 – рівень у 2-му корпусі.

LEVEL3 – рівень у 3-му корпусі.

LEVEL4 – рівень у 4-му корпусі.

LEVEL5 – рівень у 5-му корпусі.

TempPR – температура соку на вході (в підігрівачі).

Temp1 – температура у 1-му корпусі.

Temp2 – температура у 2-му корпусі.

Temp3 – температура у 3-му корпусі.

Temp4 – температура у 4-му корпусі.

Temp5 – температура у 5-му корпусі.

Pres1 – тиск у 1-му корпусі.

Pres2 – тиск у 2-му корпусі.

Pres3 – тиск у 3-му корпусі.

Pres4 – тиск у 4-му корпусі.

Pres5 – тиск у 5-му корпусі.

Brix_OUT – концентрація сухих речовин (густина сиропу на виході).

VC16 – клапан подачі пари на підігрівач.

VC18 – клапан відтоку з 1-го у 2-й корпус.

VC19 – клапан відтоку з 2-го у 3-й корпус.

VC20 – клапан відтоку з 3-го у 4-й корпус.

VC21 – клапан відтоку з 4-го у 5-й корпус.

M26 – насос відкачки згущеного соку (готового сиропу)

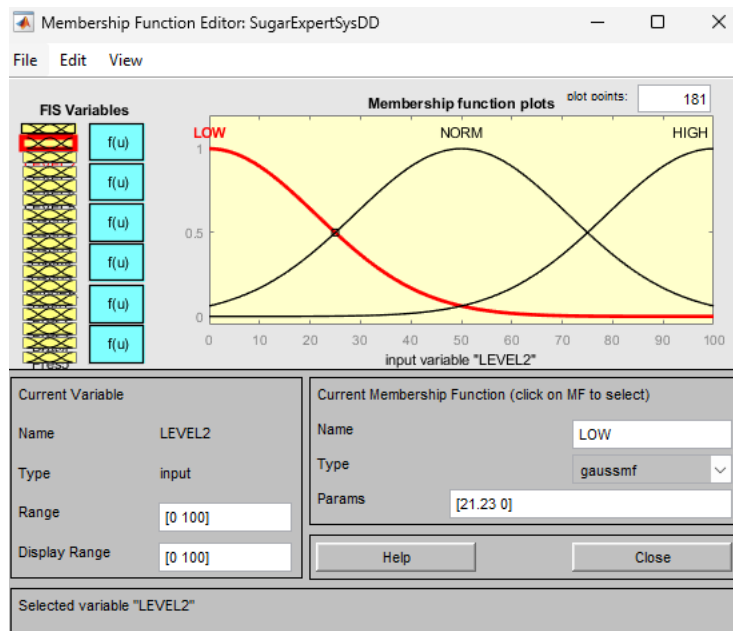


Рис.4.5 Налаштування вхідних параметрів

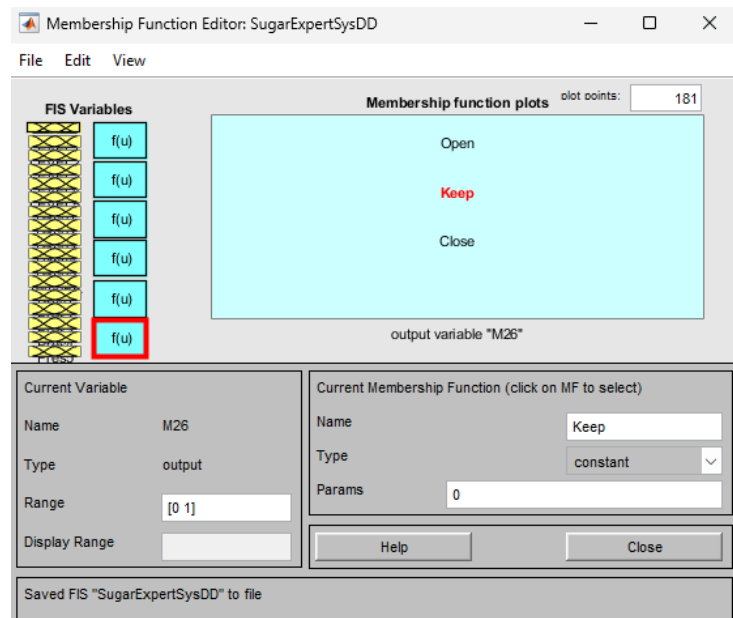


Рис.4.6 Налаштування вихідних параметрів

4.4 Синтез бази знань та експертних правил

Оснoву інтелектуальної системи становить база знань, понад 45 продукційних правил у форматі «ЯКЩО... ТО...» [7, 8, 17, 18]. Для коректного вирішення конфліктів при одночасному спрацьовуванні кількох правил було запроваджено систему вагових коефіцієнтів. Стандартним правилам стабілізації режиму присвоєно вагу 0.5, тоді як протиаварійним алгоритмам – пріоритетну вагу 1.0, що гарантує першочергове виконання захисних дій.

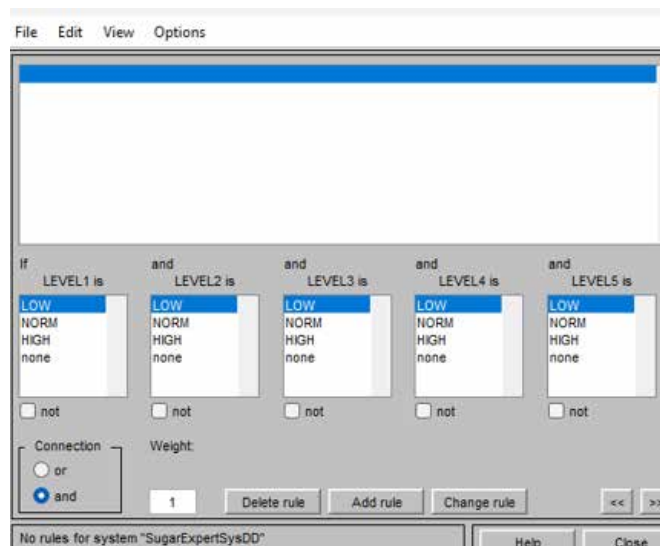


Рис.4.7 Пуста база знань, де знаходитимуться всі правила

Відмінною рисою розробленої бази знань є застосування багатовимірних правил для оцінки ситуації на випередження.

Перед генеруванням команди на відкриття перепускного клапана система аналізує стан не лише наступного, а й подальших корпусів. Це дозволяє запобігти ланцюговому перепоповненню апаратів.

За умов критичного зниження рівня соку та одночасного зростання температури система автоматично блокує відтік продукту. Це сприяє накопиченню рідини в апараті та запобігає пригорянню сахарози на нагрівальних трубках.

Алгоритм керування насосом відкачки сиропу диференціює причини падіння густини. Система розпізнає, чи викликано зниження показника $Brix$ припиненням кипіння через низький тиск, чи надмірним надходженням свіжого соку, і формує відповідні специфічні рекомендації

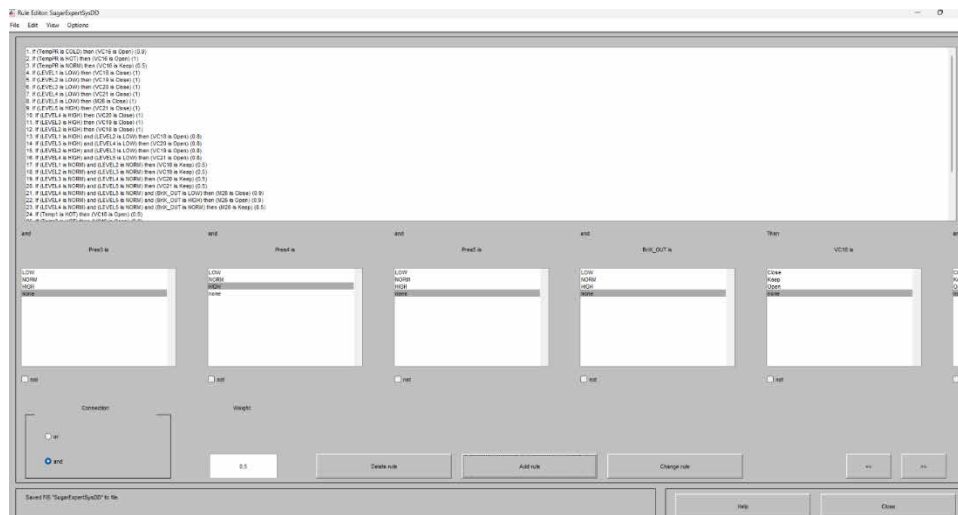


Рис.4.8 Наповнена база знань правилами. Частина 1

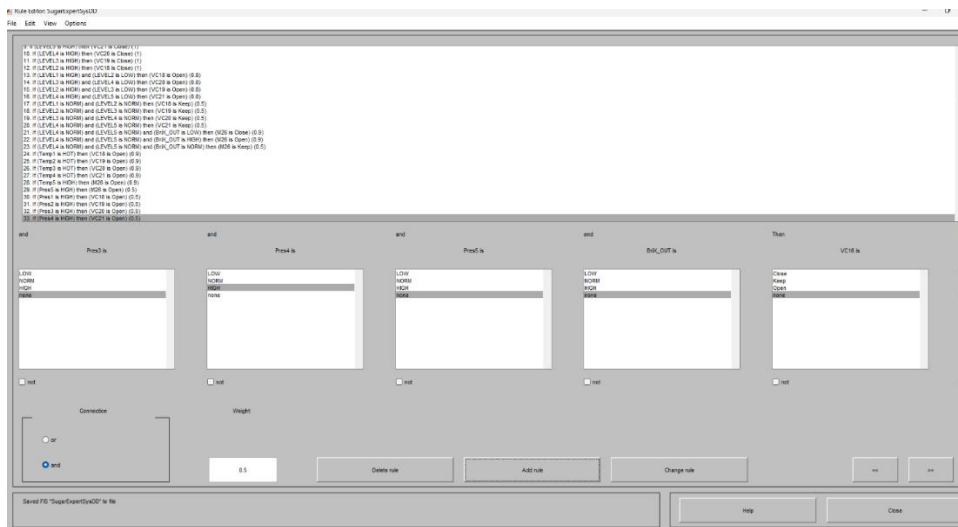


Рис.4.9 Наповнена база знань правилами. Частина 2

4.5 Імітаційне моделювання та верифікація результатів

Верифікацію розробленої системи було здійснено шляхом імітаційного моделювання у середовищі Rule Viewer (MATLAB). Аналіз показав, що за нормальних технологічних умов вихідні значення радника наближаються до нуля, що відповідає рекомендації збереження поточного стабільного режиму. При імітації передаварійних станів (різке падіння рівня, термічний перегрів) зафіксовано миттєве спрацювання пріоритетних правил із генерацією чітких команд на зміну положення регулюючих клапанів. Отримані результати підтверджують адекватність та працездатність розробленої експертної системи для використання в АСУТП цукрового виробництва.

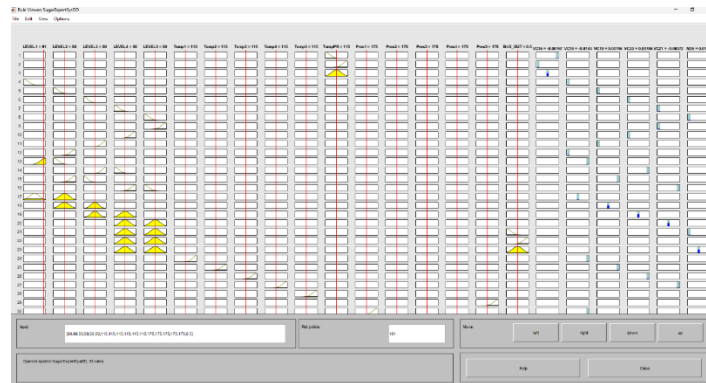


Рис.4.10 Середовище Rule Viewer (MATLAB)

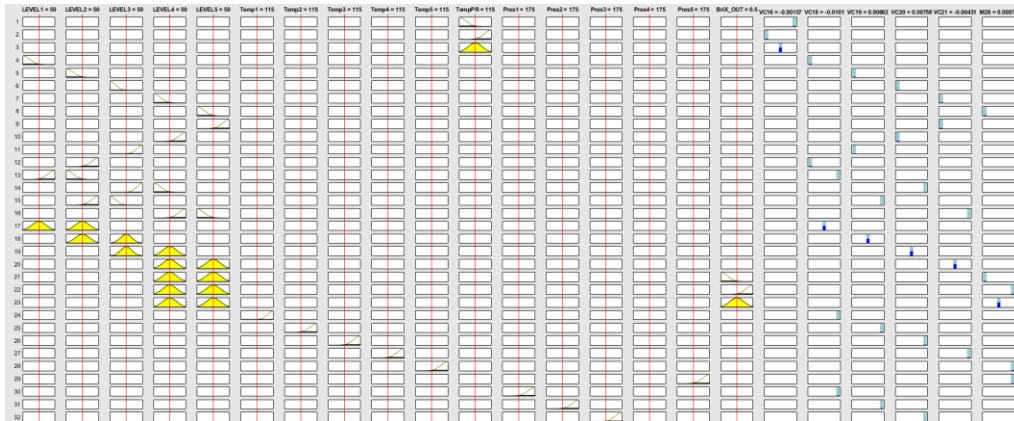


Рис.4.11 Реакція системи в номінальному режимі

Як видно з результатів дефазифікації, при знаходженні параметрів у межах регламенту, радник генерує нульові керуючі сигнали (порада «Кеер»)

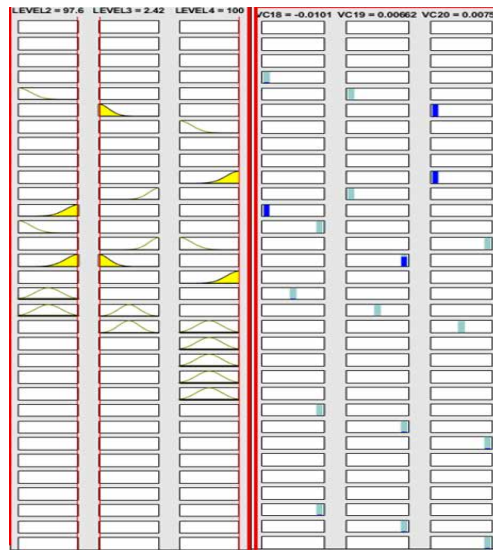


Рис.4.12 Імітація роботи каскадного передбачення

Незважаючи на низький рівень у 3-му корпусі, система забороняє перетікання з 2-го корпусу, оскільки діагностує переповнення наступного (4-го) апарата. Радник генерує команду на розвантаження хвостової частини станції.

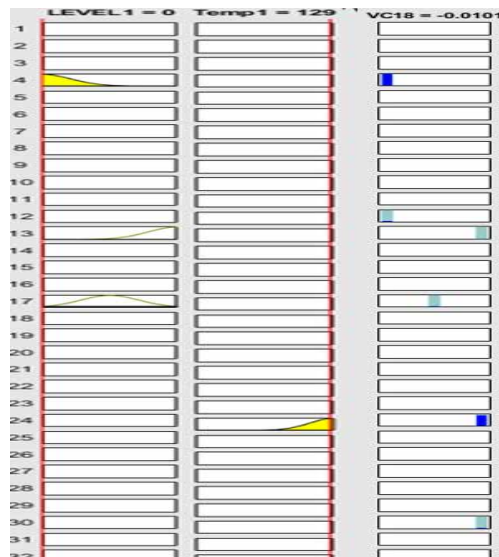


Рис.4.13 Блокування відтоку при загрозі термічної деструкції сахарози

При імітації критичного зниження рівня на фоні перегріву, система вмикає найбільший пріоритет температурного захисту та жорстко перекриває випускний клапан для накопичення маси соку

4.6 Інтеграція експертної системи в SCADA

Розроблена експертна система не замінює існуючі локальні ПІД-регулятори, а функціонує на рівні APC (Advanced Process Control) як інтелектуальна надбудова над базовим рівнем автоматизації. Система інтегрується в існуючу IT-інфраструктуру заводу як цифровий радник, що дозволяє уникнути витрат на нове апаратне забезпечення та мінімізувати ризики впровадження

На мнемосхемі відображаються лише «сирі» дані з датчиків. Оператор змушений самостійно аналізувати велику кількість параметрів, що призводить до високого когнітивного навантаження та ризику помилок при складних збуреннях.

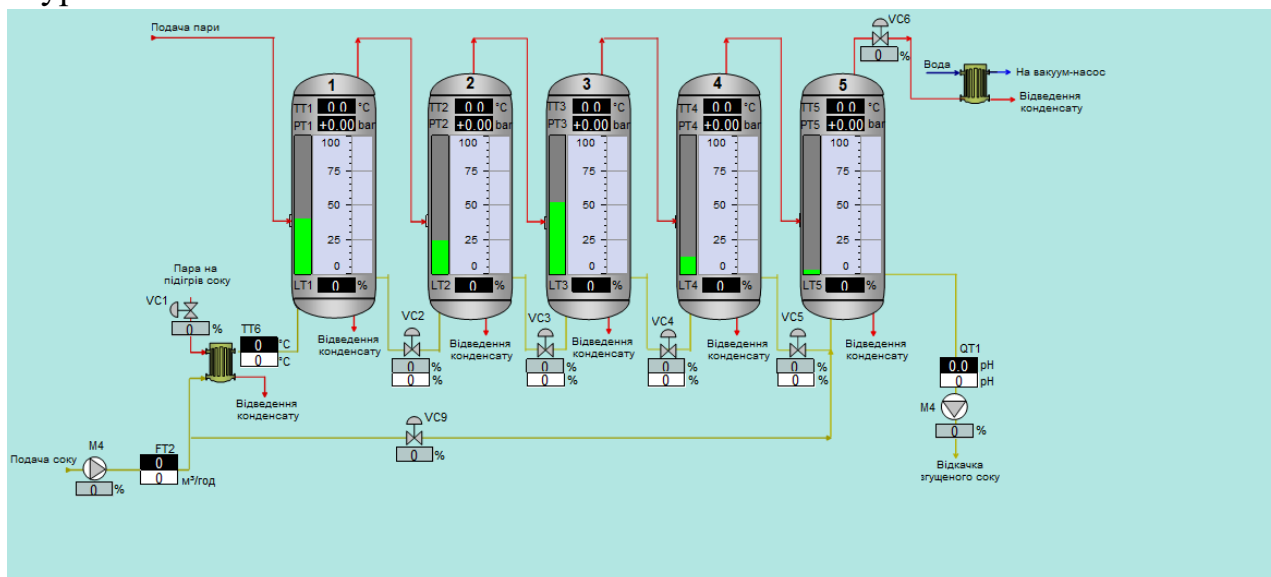


Рис.4.14 Базовий інтерфейс SCADA-системи з надмірним інформаційним навантаженням

Ядром розробленої системи є FIS-файл (Fuzzy Inference System), створений у середовищі MATLAB, що містить базу з 45 продукційних правил та налаштований алгоритм Сугено. Для компіляції нечіткої моделі у незалежний програмний код використовується зазначений у технічному завданні інструмент Simulink Coder. Це дозволяє виконувати розрахунки безпосередньо на промисловому сервері без необхідності встановлення повного пакета MATLAB. У свою чергу, промисловий протокол OPC UA забезпечує надійний обмін даними в режимі реального часу між сервером SCADA та математичним ядром експертної системи [13]. Кожну секунду система зчитує 17 поточних вхідних параметрів (рівні, температури, тиск) і генерує 6 обчислених експертних порад для виконавчих механізмів

На мнемосхему додано інтелектуальний інформаційний блок з індикаційними підказками та коментарями до них [11].

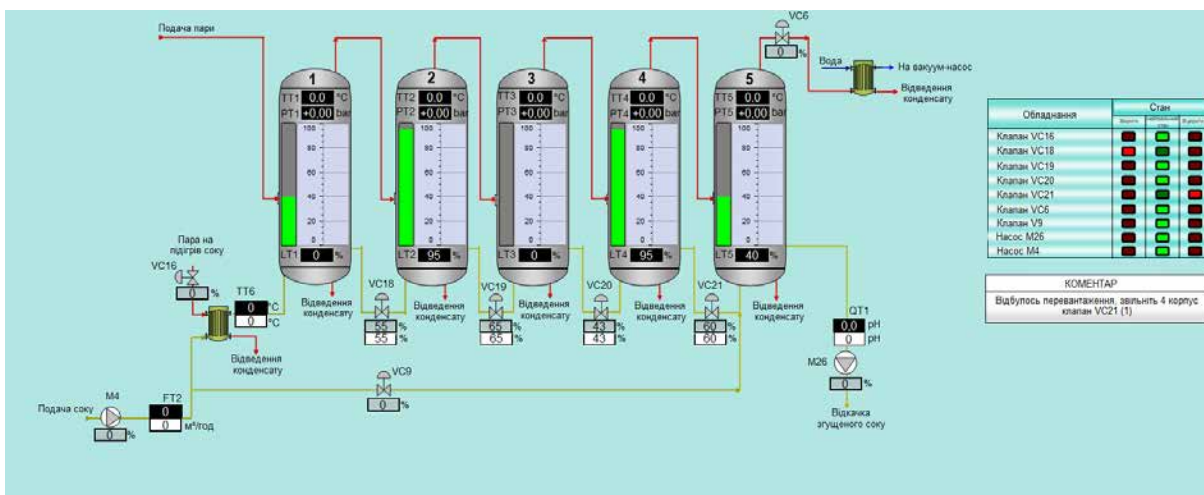


Рис.4.15 Інтерфейс SCADA з інтегрованими модулями підтримки прийняття рішень

SCADA-система зчитує фізичні значення з датчиків ПЛК і через OPC-сервер передає їх у скомпільоване ядро експертної системи, після чого алгоритм Сугено виконує фазифікацію (використовуючи гаусові функції) та логічне виведення на основі бази знань.

Обчислені значення (-1, 0, 1) трансформуються у текстові команди («Close», «Keep», «Open») та відображаються у вікнах підказок разом із вагою правила (Weight), що вказує оператору на пріоритетність дії. Де 0 це найнижчий пріоритет, а 1 найвищий.

РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ

5.1 Загальна користь від впровадженої системи

Впровадження розробленої експертної системи на базі нечіткої логіки (алгоритм Сугено) як інтелектуальної надбудови в існуючу SCADA-систему забезпечує комплексний позитивний вплив на технологічний процес випарювання цукрового соку. По-перше, відбувається суттєве зниження когнітивного навантаження на оператора, оскільки автоматичний аналіз 17 вхідних параметрів та генерація чітких порад звільняє персонал від необхідності вручну інтерпретувати складні взаємозв'язки між корпусами [15]. По-друге, забезпечується жорстка стабілізація гідродинамічного та теплового балансу, де превентивний аналіз ситуації на випередження унеможливорює ланцюгове переповнення апаратів або їхнє критичне спустошення. По-третє, гарантується запобігання термічній деструкції сахарози завдяки швидкодіючим алгоритмам пріоритетного захисту, які миттєво блокують відтік продукту при падінні рівня та перегріві, запобігаючи оголенню гріючих трубок і пригорянню сиропу. По-четверте, досягається оптимізація якості кінцевого продукту, оскільки точне керування насосом відкачки залежно від густини та тиску забезпечує отримання сиропу стабільної концентрації.

5.2 Математична оцінка зменшення технологічних ризиків

Оцінку зменшення ризиків формалізовано через ймовірність виникнення аварійної ситуації, наприклад, термічного розкладання соку через несвоєчасне перекриття клапана. Нехай ймовірність виникнення критичного відхилення параметра за час t під ручним управлінням оператора становить $P_{\text{man}}(t)$, а з експертною системою – $P_{\text{exp}}(t)$. Завдяки тому, що цикл зчитування та реакції експертної системи через OPC-сервер становить $T_{\text{exp}} = 1$ с, а середній час реакції оператора при множинному інформаційному навантаженні становить $T_{\text{man}} = 60$ с, зміна часу перебування системи в небезпечному стані визначається різницею:

$$\Delta T_{\text{risk}} = T_{\text{man}} - T_{\text{exp}}$$

Ризик настання незворотної аварійної події (псування продукту) R описується експоненціальним законом надійності:

$$R = 1 - e^{(-\lambda \cdot T)}$$

Де:

λ – інтенсивність технологічних збурень.

Зниження ймовірності аварії ΔR завдяки впровадженню інтелектуального радника становить:

$$\Delta R = e^{(-\lambda \cdot T_{\text{exp}})} - e^{(-\lambda \cdot T_{\text{man}})}$$

Ця математична залежність доводить, що миттєва реакція бази знань і швидкість відпрацювання 45 продукційних правил експоненційно знижує ризик втрати сировини та аварійної зупинки багатокорпусної випарної установки.

5.3 Розрахунок очікуваного економічного ефекту

Економічний ефект від впровадження експертної системи формується переважно за рахунок економії гріючої пари шляхом зменшення коливань у перехідних процесах та усунення людського фактора. Завдяки оптимізації каскадного перетікання, система дозволяє заощадити близько 3% енергоресурсів на випарювання. За розрахованою математичною моделлю, номінальна витрата пари становить $G_n = 3.8$ кг/с, що дорівнює 13.68 т/год. Річна економія пари ΔE_{steam} за середній сезон цукроваріння, який становить близько 100 діб безперервної роботи ($N_h = 2400$ годин), розраховується за формулою:

$$\Delta E_{\text{steam}} = G_n \cdot N_h \cdot k_{\text{save}}$$

Де:

$k_{\text{save}} = 0.03$ – ефект енергозбереження завдяки впровадженню інтелектуальних алгоритмів.

$$\Delta E_{\text{steam}} = 13.68 \cdot 2400 \cdot 0.03 = 984.96 \text{ тонн.}$$

У грошовому еквіваленті при середній вартості генерації однієї тонни технологічної пари на підприємстві $C_{\text{steam}} = 1200$ грн/т:

$$\Delta E_{\text{money}} = \Delta E_{\text{steam}} \cdot C_{\text{steam}}$$

$$\Delta E_{\text{money}} = 984.96 \cdot 1200 = 1181952 \text{ грн}$$

Таблиця 5.1 Ефект від впровадження

Критерій	ДО впровадження експертної системи	ПІСЛЯ впровадження експертної системи
Аналіз параметрів	Самостійний моніторинг великої кількості даних оператором.	Автоматичний аналіз 17 сигналів та видача готових підказок.
Час реакції	Сповільнений через людський фактор та когнітивне навантаження.	Миттєвий (розрахунок команд відбувається кожену секунду).
Захист від аварій	Високий ризик пригорання сахарози та переливу апаратів.	Автоматичне передбачення небезпечних режимів за 45 правилами.
Витрата пари	Базове споживання пари (3.8 кг/с) без гнучкої адаптації.	Зменшення коливань та оптимізація витрат пари на 3%.
Фінансовий результат	Високі питомі витрати палива та втрати при збуреннях.	Пряма економія понад 1,18 млн грн за один робочий сезон.

Орієнтовний прямий економічний ефект від зниження енергоспоживання становить понад 1.18 млн грн за один виробничий сезон. Оскільки система інтегрується як програмна надбудова в існуючу ІТ-інфраструктуру без необхідності закупівлі додаткового апаратного забезпечення, капітальні витрати на її реалізацію є мінімальними. Це забезпечує надзвичайно короткий термін окупності проекту, який становить менше ніж один місяць стабільної роботи заводу. Додатковий прихований економічний ефект формується за рахунок суттєвого подовження міжремонтного ресурсу технологічного обладнання.

ВИСНОВОК

У магістерській кваліфікаційній роботі на тему «Розроблення експертної системи керування технологічними параметрами при виробництві цукру» розроблено експертну систему для підвищення ефективності керування випарною установкою цукрового заводу.

Проведено аналіз п'ятикорпусної випарної установки як об'єкта автоматизації, визначено основні збурення та взаємозв'язки між технологічними параметрами. Розроблено математичну модель теплообмінника випарного апарата та перевірено її адекватність за допомогою моделювання в MATLAB/Simulink. Отримано динамічні характеристики об'єкта, необхідні для побудови системи керування.

Для підвищення якості регулювання створено експертну систему на основі нечіткої логіки Сугено. Сформовано базу знань із понад 45 правил, що дозволяє аналізувати стан технологічного процесу та надавати оператору рекомендації щодо його оптимізації. Розроблене програмне забезпечення інтегровано до SCADA-системи через протокол OPC UA. Система обробляє 17 вхідних сигналів та формує 6 керуючих рекомендацій.

Проведено оцінку економічної ефективності впровадження розробленої системи. Результати показали можливість зниження витрат гріючої пари на 3 %, що забезпечує економію 984,96 т енергоресурсів за виробничий сезон. Очікуваний економічний ефект становить понад 1,18 млн грн на рік, а термін окупності проєкту не перевищує одного місяця.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Ладанюк А. П. Автоматизовані системи керування технологічними процесами цукрового виробництва. Київ : НУХТ, 2014. 294 с.
2. Власенко Л. О., Мироненко Т. Г. Моделювання та оптимізація технологічних процесів у цукровій промисловості. Харків : НТУ «ХПІ», 2018. 186 с.
3. Бубнік Р., Кадлец П., Урбан Д. Виробництво цукру: стратегія та технології. Берлін : Бартенс, 2013. 412 с.
4. Хоменко В. М., Ельперін І. В. Комплексна автоматизація випарних установок цукрових заводів. Наукові праці НУХТ. 2019. Т. 25, № 3. С. 45–53.
5. Субботін С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень : навч. посібник. Запоріжжя : ЗНТУ, 2008. 341 с.
6. Джексон П. Вступ до експертних систем. 3-тє вид. Нью-Йорк : Еддісон-Веслі, 1998. 542 с.
7. Глибовець М. М., Олецький О. В. Штучний інтелект : підручник. Київ : КМ Академія, 2002. 366 с.
8. Рассел С., Норвіг П. Штучний інтелект: сучасний підхід. 4-те вид. Нью-Йорк : Пірсон, 2020. 1168 с.
9. Сіменс АГ. Автоматизована система SIMATIC S7-1500, ET 200MP : системне керівництво. Нюрнберг : Siemens AG, 2023. 420 с.
10. Сіменс АГ. STEP 7 Professional V18 / TIA Portal V18 : системне керівництво. Нюрнберг : Siemens AG, 2022. 380 с.
11. Сіменс АГ. SIMATIC WinCC V7.5 SP2: загальна інформація про продукт та встановлення. Карлсруе : Siemens AG, 2020. 780 с.
12. Федоришин Р. М. Моделювання технологічних процесів та систем автоматизації в середовищі MATLAB. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2017. 240 с.
13. Пупена О. М., Ельперін І. В., Ладанюк А. П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах : навч. посібник. Київ : Ліра-К, 2017. 520 с.
14. ДСТУ ІЕС 61131-3:2018. Програмовані контролери. Частина 3. Мови програмування (ІЕС 61131-3:2013, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 188 с.

15. ДСТУ ISO 9241-210:2017. Ергономіка взаємодії людина-система. Частина 210. Проектування людино-орієнтованих інтерактивних систем (ISO 9241-210:2010, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 34 с.
16. Піттга П., Кінг Р. Е. Інтелектуальний контролер для багатокорпусної випарної установки в цукровій промисловості. Міжнародний журнал комп'ютерних додатків. 2005. Т. 41. С. 12–18.
17. Джордж С., К'ятанавар Д. Н. Оптимізація процесу випарювання в цукровій промисловості на основі нечіткої логіки. Матеріали Міжнародної конференції з електротехніки та комп'ютерних наук. 2012. С. 28–32.
18. Еморі Е., Раваньяні М., Коста К. Застосування нечіткого керування на стадії випарювання на біорефінерії тростинного етанолу. Повідомлення з хімічної інженерії. 2021. Т. 208, № 5. С. 654–667

Додаток А. Таблиця створених правил та подій

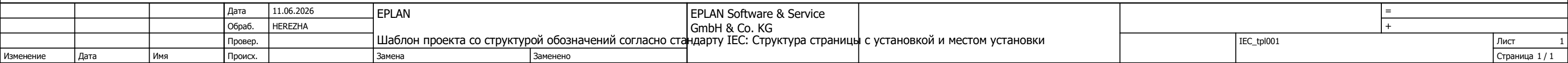
№	Логічне правило	Опис події та логіка радника
1	IF (TempPR is COLD) THEN (VC16 is Open)	Температура соку на вході недостатня. Радник радить відкрити клапан підігрівача, щоб довести сік до температури кипіння.
2	IF (TempPR is HOT) THEN (VC16 is Close)	Сік на вході перегрітий. Радник радить перекрити пару на підігрівачі, щоб уникнути передчасного закипання і гідроудару в трубах.
3	IF (TempPR is NORM) THEN (VC16 is Keep)	Температура на вході ідеальна. Порада: утримувати поточне положення клапана подачі пари.
4	IF (LEVEL1 is LOW) THEN (VC18 is Close)	Рівень у 1-му корпусі критично впа. Радник перекриває відтік у 2-й корпус, щоб накопичити сік і врятувати трубки 1-го від пригару.
5	IF (LEVEL2 is LOW) THEN (VC19 is Close)	Рівень у 2-му корпусі критично впа. Радник перекриває відтік у 3-й корпус для збереження рідини в апараті.
6	IF (LEVEL3 is LOW) THEN (VC20 is Close)	Рівень у 3-му корпусі критично впа. Радник перекриває відтік у 4-й корпус для збереження гріючих трубок.
7	IF (LEVEL4 is LOW) THEN (VC21 is Close)	Рівень у 4-му корпусі критично впа. Радник перекриває відтік у 5-й корпус для недопущення термічної деструкції.
8	IF (LEVEL5 is LOW) THEN (M26 is Close)	Рівень у 5-му (останньому) корпусі критичний. Радник зупиняє насос відкачки готового сиропу.
9	IF (LEVEL5 is HIGH) THEN (VC21 is Close)	5-й корпус переповнений. Радник перекриває подачу з 4-го корпусу, щоб уникнути аварійного переливу.
10	IF (LEVEL4 is HIGH) THEN (VC20 is Close)	4-й корпус переповнений. Радник перекриває притік соку з 3-го апарата.

11	IF (LEVEL3 is HIGH) THEN (VC19 is Close)	3-й корпус переповнений. Радник перекриває притік соку з 2-го апарата.
12	IF (LEVEL2 is HIGH) THEN (VC18 is Close)	2-й корпус переповнений. Радник перекриває притік соку з 1-го апарата.
13	IF (LEVEL1 is HIGH) AND (LEVEL2 is LOW) THEN (VC18 is Open)	1-й корпус переповнений, а в 2-му соку мало. Ідеальна ситуація для перетікання. Радник каже відкрити перепускний клапан.
14	IF (LEVEL3 is HIGH) AND (LEVEL4 is LOW) THEN (VC20 is Open)	У 3-му корпусі багато соку, у 4-му мало. Радник радить відкрити клапан для транзиту маси.
15	IF (LEVEL2 is HIGH) AND (LEVEL3 is LOW) THEN (VC19 is Open)	У 2-му корпусі надлишок соку, 3-й потребує доповнення. Радник підказує відкрити клапан перетікання.
16	IF (LEVEL4 is HIGH) AND (LEVEL5 is LOW) THEN (VC21 is Open)	У 4-му корпусі багато соку, 5-й апарат порожніє. Радник радить перекачати масу в фінальний корпус.
17	IF (LEVEL1 is NORM) AND (LEVEL2 is NORM) THEN (VC18 is Keep)	Рівні між 1-м та 2-м корпусами ідеально збалансовані. Порада: нічого не змінювати.
18	IF (LEVEL2 is NORM) AND (LEVEL3 is NORM) THEN (VC19 is Keep)	Рівні між 2-м та 3-м корпусами збалансовані. Радник рекомендує утримувати поточний режим.
19	IF (LEVEL3 is NORM) AND (LEVEL4 is NORM) THEN (VC20 is Keep)	Рівні між 3-м та 4-м корпусами стабільні. Порада: утримувати поточне положення арматури.
20	IF (LEVEL4 is NORM) AND (LEVEL5 is NORM) THEN (VC21 is Keep)	Рівні між 4-м та 5-м корпусами стабільні. Радник рекомендує нічого не змінювати.

21	IF (LEVEL4 is NORM) AND (LEVEL5 is NORM) AND (Brix_OUT is LOW) THEN (M26 is Close)	Рівні в нормі, але сироп рідкий (Brix впав). Радник каже призупинити насос відкачки, щоб продукт довше випаровувався.
22	IF (LEVEL4 is NORM) AND (LEVEL5 is NORM) AND (Brix_OUT is HIGH) THEN (M26 is Open)	Рівні в нормі, сироп досяг високої (готової) густини. Радник радить пришвидшити відкачку, щоб уникнути кристалізації.
23	IF (LEVEL4 is NORM) AND (LEVEL5 is NORM) AND (Brix_OUT is NORM) THEN (M26 is Keep)	Усі показники в кінці станції (включаючи густину) ідеальні. Насос працює в оптимальному режимі.
24	IF (Temp1 is HOT) THEN (VC18 is Open)	В 1-му корпусі зафіксовано перегрів. Радник каже терміново скидати сік у 2-й корпус, щоб уникнути потемніння сахарози.
25	IF (Temp2 is HOT) THEN (VC19 is Open)	В 2-му корпусі перегрів. Радник сигналізує про необхідність термінового скидання соку в 3-й апарат.
26	IF (Temp3 is HOT) THEN (VC20 is Open)	В 3-му корпусі перегрів. Система радить екстрено відкрити перепускний клапан у 4-й корпус.
27	IF (Temp4 is HOT) THEN (VC21 is Open)	В 4-му корпусі перегрів. Радник підказує терміново перекачати перегріту масу в 5-й апарат.
28	IF (Temp5 is HIGH) THEN (M26 is Open)	У 5-му корпусі перегрів сиропу. Радник каже пришвидшити відкачку насосом, щоб готовий продукт не зіпсувався.
29	IF (Pres5 is HIGH) THEN (M26 is Open)	Тиск у 5-му корпусі завищений (занадто інтенсивне кипіння). Система радить пришвидшити відкачку маси для стабілізації тиску.
30	IF (Pres1 is HIGH) THEN (VC18 is Open)	Аварійний тиск в 1-му корпусі. Порада: відкрити випускний клапан для швидкого баричного розвантаження апарата.

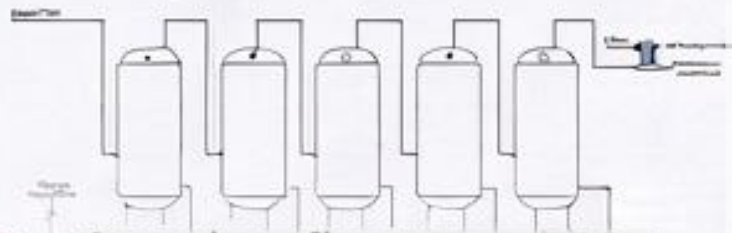
31	IF (Pres2 is HIGH) THEN (VC19 is Open)	Аварійний тиск в 2-му корпусі. Порада: відкрити випускний клапан для скидання тиску та маси.
32	IF (Pres3 is HIGH) THEN (VC20 is Open)	Аварійний тиск в 3-му корпусі. Система радить розвантажити апарат через перепускний клапан.
33	IF (Pres4 is HIGH) THEN (VC21 is Open)	Аварійний тиск в 4-му корпусі. Порада: скинути частину соку та тиску у фінальний корпус станції.
34	IF (LEVEL1 is NORM) AND (LEVEL2 is NORM) AND (Temp1 is HOT) THEN (VC18 is Open)	Рівні нормальні, але 1-й корпус перегрівся. Температурний захист "перебиває" звичайну логіку: радник каже терміново скидати сік.
35	IF (LEVEL1 is LOW) AND (TempPR is COLD) THEN (VC16 is Open) AND (VC18 is Close)	Станція порожня, сік на вході холодний. Дія: закрити відтік з 1-го корпусу для накопичення об'єму і дати максимум пари для прогріву.
36	IF (LEVEL1 is HIGH) AND (TempPR is HOT) THEN (VC16 is Close) AND (VC18 is Open)	1-й апарат залитий, сік на вході закипає. Захист від гідроудару: повністю закрити подачу пари і максимально зливати сік далі.
37	IF (LEVEL1 is HIGH) AND (LEVEL2 is NORM) AND (LEVEL3 is LOW) THEN (VC18 is Open) AND (VC19 is Open)	Логіка "на випередження" (Транзит): 1-й повний, 3-й порожній. Щоб 2-й не переповнився, радник каже відкрити одразу два клапани підряд.
38	IF (LEVEL2 is HIGH) AND (LEVEL3 is LOW) AND (LEVEL4 is HIGH) THEN (VC18 is Close) AND (VC19 is Keep) AND (VC21 is Open)	Логіка "на випередження" (Блокування): 2-й повний, 3-й порожній, але 4-й забитий! Радник забороняє перелив у 3-й і терміново вимагає звільнити 4-й корпус.
39	IF (LEVEL3 is HIGH) AND (LEVEL4 is NORM) AND (LEVEL5 is LOW) THEN (VC20 is Open) AND (VC21 is Open)	Логіка "Транзит" у хвості станції: відкриття подвійного проходу для швидкого наповнення 5-го корпусу з 3-го.

40	IF (LEVEL5 is LOW) AND (Temp5 is HIGH) AND (Brix_OUT is HIGH) THEN (VC21 is Open) AND (M26 is Open)	Загроза швидкої кристалізації! Сироп гарячий, густий, апарат порожніє. Радник миттєво включає відкачку і доливає свіжий сік для розбавлення.
41	IF (LEVEL5 is HIGH) AND (Temp5 is NORM) AND (Brix_OUT is LOW) THEN (VC21 is Close) AND (M26 is Close)	Сироп рідкий через те, що 5-й апарат просто «залило» водою (соком). Радник перекриває подачу соку і зупиняє відкачку, чекаючи випаровування.
42	IF (LEVEL5 is NORM) AND (Pres5 is LOW) AND (Brix_OUT is LOW) THEN (VC21 is Keep) AND (M26 is Close)	Сироп рідкий, бо він перестав кипіти (впав тиск). Радник радить зупинити насос відкачки, але не перекривати подачу, чекаючи відновлення кипіння.
43	IF (LEVEL1 is LOW) AND (Temp1 is HOT) THEN (VC16 is Keep) AND (VC18 is Close)	Найвищий пріоритет (Порятунок 1-го корпусу): Рівень падає, температура росте (труби оголюються). Рекомендація жорстко перекрити вихід соку.
44	IF (LEVEL1 is NORM) AND (LEVEL2 is LOW) AND (Temp2 is HOT) THEN (VC18 is Open) AND (VC19 is Close)	Порятунок 2-го корпусу від пригару: Радник дає пораду перекрити відтік з 2-го і примусово "проливати" в нього сік із 1-го апарата.
45	IF (LEVEL3 is HIGH) AND (Temp3 is HOT) AND (Pres3 is HIGH) THEN (VC19 is Close) AND (VC20 is Open)	Ізоляція аварійного 3-го корпусу: Апарат переповнений, перегрітий і під тиском. Радник блокує притік у нього і повністю відкриває злив аварійної маси.



Розроблення експертної системи керування технологічними параметрами при виробництві цукру

Проблематика



Складність об'єкта:
5 взаємопов'язаних корпусів
(висока інерційність, нелінійність)

Обмеження ПІД:
Реактивність. Автоколивання та велика ймовірність ефекту доміно

Когнітивне перевантаження:
Час реакції оператора 5-10 хв
(одночасний аналіз 17+ датчиків)

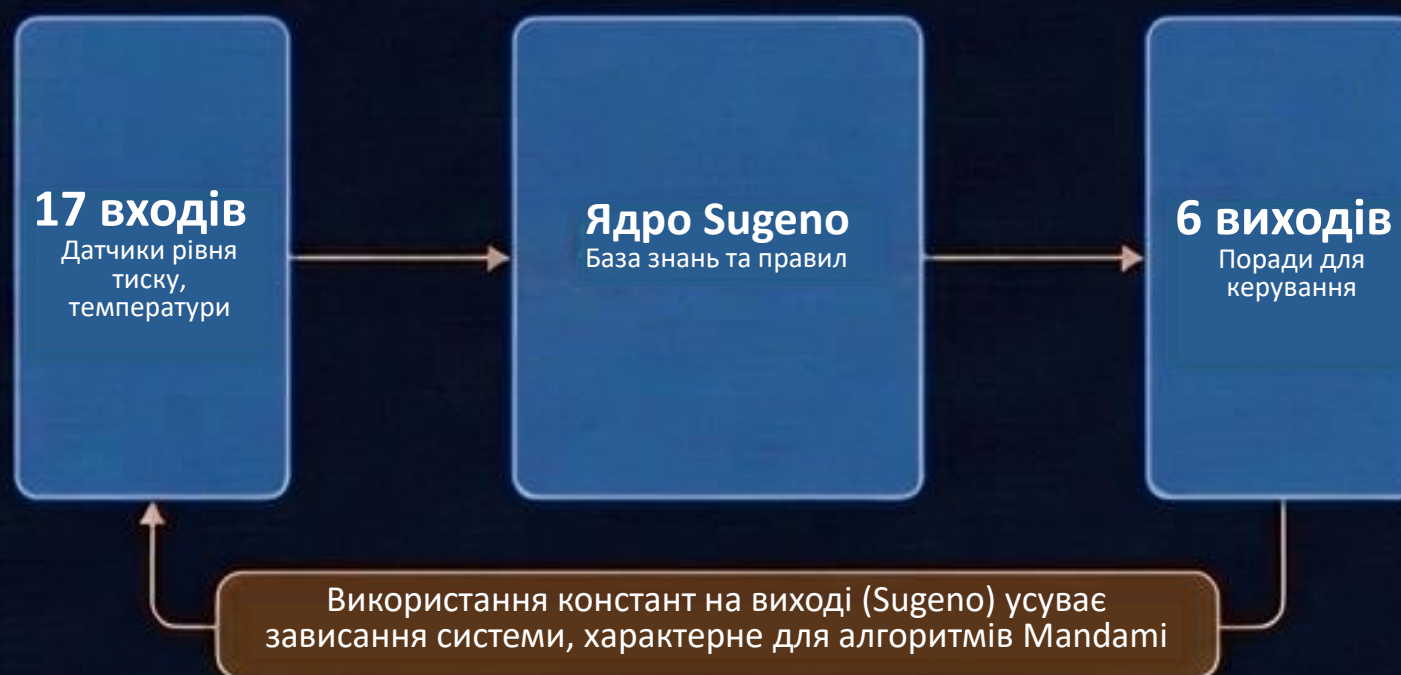
Концепція рішення



Цифровий радник:

Не втручається в апаратну частину ПЛК.
Аналізує масиви даних та видає оператору прецизійні підказки на екран SCADA. Низькі витрати на впровадження.

Архітектура MIMO-контролера (Sugeno)



Унікальна база знань



Порівняльна матриця

Характеристика	Традиційна САР	Fuzzy Радник
Тип керування	Реактивне (Реагує на помилки)	Проактивне (запобігає помилкам)
Точність Вгіх	Низька (великі коливання)	Висока (мінімальні відхилення)
Час реакції	Повільний (хвилини)	Миттєвий (секунди)
Знос арматури	Високий (є коливання)	Низький (плавна робота)

Розробка та впровадження

Етапи розробки:

- Аналіз даних та моделювання
- Тренування Sugeno ядра
- Інтеграція через OPC UA

Технологічний стек



Ефект від впровадження

Значна економія
Економія пари (відсутність значної кількості коливань клапанів)
Збереження цукру
Збереження цукру (мінімізація термічної деструкції)
Суттєва річна економія
Дуже малий термін окупності, близько 2 тижнів (основні витрати спрямовані на впровадження програмного забезпечення)