

Міністерство освіти і науки України

Одеський національний технологічний університет

Кафедра Автоматизації технологічних, електромеханічних і робототехнічних систем



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

на тему: «Автоматизація процесу керування бездимним копченням риби»

Здобувач: Кучеренко Є.Г.

4 курсу, групи А-40

Керівник: доц. Муратов В.Г.

Консультант:

доц. Світий І.М.

доц. Левінський В.М.

доц. Степанов М.Т.

Кваліфікаційна робота допускається до захисту.

Рішення кафедри від _____, 2026 р., протокол № ____.

В.о. завідувача кафедри АТЕіРС _____ О.М. Жигайло
(підпис)

Одеса – 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут	<u>Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування ім. П.М. Платонова</u>
Кафедра	<u>Автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем</u>
Ступінь вищої освіти	<u>Бакалавр</u>
Спеціальність	<u>151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології</u>
Освітньо-професійна програма	<u>Комп'ютерні системи та програмна інженерія в автоматизації</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри АТПіРС

І.М. Світий

«5» січня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Здобувач **Кучеренко Євгеній Григорович**

1. Тема роботи **«Автоматизація процесу керування бездимним копченням риби»**
2. Керівник кваліфікаційної роботи Муратов Віктор Георгійович, к.т.н., доцент.
Пункти 1 і 2 затверджені наказом ОНТУ № 743-03 від 31.12.2025 р.
3. Строк подання здобувачем випускної кваліфікаційної роботи на кафедру **«12» червня 2026 р.**
4. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: комплексне кваліфікаційне завдання.
5. Зміст кваліфікаційної роботи (розділи, які потрібно розробити):
Розділ 1. Опис ділянки технологічного процесу, його агрегатів та існуючого рівня автоматизації керування ними. Виявлення потенційних джерел економічної ефективності і конкретизація задачі модернізації САК.
Розділ 2. Розробка концептуальної моделі об'єкта управління, структурна та параметрична ідентифікація математичних моделей його компонентів, їх реалізація у середовищі імітаційного моделювання.
Розділ 3. Розробка і параметрична оптимізація алгоритмів автоматичного регулювання, порівняльний аналіз САР.
Розділ 4. Конкретизація задачі і розробка алгоритмів автоматичного логічного керування технологічною ділянкою.
Розділ 5. Вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізації керуючих впливів, розробка технічної структури контролерно-комп'ютерної мережі.
Розділ 6. Параметризація технічних засобів, контролера і мереж, програмування алгоритмів логічного керування та регулювання САК.
Розділ 7. Розробка SCADA для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика САК.
Розділ 8. Розробка фрагментів документації технічного забезпечення САК та заходів з охорони праці.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Номер розділу	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Муратов В.Г., доц. каф. АТП і РС		
Розділи 2, 3	Світий І.М., доц. каф. АТП і РС		
Розділ 4	Світий І.М., доц. каф. АТП і РС		
Розділ 5	Левінський В.М., доц. каф. АТП і РС		
Розділ 6	Степанов М.Т., доц. каф. АТП і РС		
Розділ 7	Степанов М.Т., доц. каф. АТП і РС		
Розділ 8	Левінський В.М., доц. каф. АТП і РС		

7. Дата видачі завдання « 09 » січня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер розділу	Строк виконання етапів роботи	Примітка
Розділ 1	«24» березня 2026 р.	виконано
Розділ 2	«31» березня 2026 р.	виконано
Розділ 3	«10» квітня 2026 р.	виконано
Розділ 4	«15» квітня 2026 р.	виконано
Розділ 5	«23» квітня 2026 р.	виконано
Розділ 6	«30» квітня 2026 р.	виконано
Розділ 7	«08» травня 2026 р.	виконано
Розділ 8	«22» травня 2026 р.	виконано

Здобувач Кучеренко Є.Г.

Керівник роботи Муратов В.Г.

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач Кучеренко Є.Г.

Прізвище, ініціали

Підпис

Реферат

Кваліфікаційна робота бакалавра Кучеренка Євгенія Григоровича «Автоматизація процесу керування бездимним копченням риби» викладена на 157 сторінках, кількість таблиць 12, рисунків – 134, додатків – 2, джерел з переліку посилань – 21.

В даній кваліфікаційній роботі розглянуто питання модернізації системи автоматичного керування (САК) технологічного процесу бездимного гарячого копчення риби. В якості об'єкта дослідження було обрано процес бездимного гарячого копчення риби в універсальній коптильній камері періодичної дії. Основною метою роботи є підвищення ефективності роботи установки за рахунок зменшення енерговитрат та втрат від браку готової продукції.

При виконанні роботи було проведено підвищення якості регулювання температури риби за рахунок побудови системи автоматичного регулювання каскадної структури. Для вирішення задачі регулювання було отримано математичну модель процесу. Задачу логічного керування було вирішено за рахунок розробки алгоритму автоматичного керування циклом роботи універсальної коптильної камери. Програмно-технічну реалізацію процесу проведено на базі контролерно-комп'ютерної мережі, основу якої складає програмований логічний контролер Siemens S7-1500 і середовище програмування TIA Portal. Розроблено фрагмент проектної документації на модернізовану систему керування. Опрацьовано питання охорони праці при експлуатації системи.

Ключові слова: бездимне гаряче копчення риби, універсаль, контролерно-комп'ютерна мережа, SCADA.

Зміст

Перелік умовних позначень.....	9
Вступ.....	10
1. Опис ділянки технологічного процесу, його агрегатів та існуючого рівня автоматизації керування ними. Виявлення потенційних джерел економічної ефективності і конкретизація задачі модернізації САК.....	12
1.1. Автоматизована ділянка технологічного процесу: локалізація, перехід від аналізу сутності технології до її формалізованого подання у формі взаємозв'язків параметрів.....	12
1.2. Виявлення існуючого рівня автоматизації ділянки ТП та технічних засобів, що використовуються для цього.....	24
1.3 Аналіз впливу функцій керування технологічним процесом на техніко-економічні та екологічні показники. Конкретизація економічної та інших цілей модернізації САК.....	25
1.4 Висновки за розділом.....	26
2. Розробка концептуальної моделі об'єкта управління, структурна та параметрична ідентифікація математичних моделей його компонентів, їх реалізація у середовищі імітаційного моделювання.....	28
2.1 Розробка концептуальної моделі (структурної схеми) об'єкта регулювання.....	28
2.2 Структурна та параметрична ідентифікація математичних моделей каналів перетворення об'єкта регулювання.....	30
2.3 Ідентифікація моделей збурень об'єкту керування.....	41

2.4 Реалізація математичних моделей у середовищі комп'ютерного імітаційного моделювання, проведення з ними комп'ютерних експериментів для обґрунтування їх адекватності об'єкту-оригіналу.....	47
2.5 Висновки за розділом.....	60
3. Розробка і параметрична оптимізація алгоритмів регулювання, порівняльний аналіз САР.....	61
3.1 Формулювання задач керування, вимог до їх розв'язку і вибір основних принципів побудови автоматичних систем.....	61
3.2 Параметричний синтез і аналіз САР базової структури.....	65
3.3 Синтез і аналіз САР підвищеної динамічної точності.....	74
3.4 Порівняльний аналіз перехідних процесів у параметрично оптимальних САР базової структури та підвищеної динамічної точності.....	79
3.5 Висновки за розділом.....	83
4. Конкретизація задачі і розробка алгоритмів логічного керування технологічним агрегатом.....	85
4.1 Розробка алгоритмів автоматичного управління нормальним пуском та зупинкою установки.....	85
4.2 Розробка алгоритму автоматичного керування технологічним циклом процесу сушіння солоду.....	87
4.3 Висновки за розділом.....	90
5. Вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізації керуючих впливів, розробка технічної структури контролерно-комп'ютерної мережі.....	91
5.1 Характеристики середовищ, з якими взаємодіють засоби автоматизації та обслуговуючий персонал, які повинні бути враховані при виборі технічних засобів і місць їх розміщення.....	91

5.2 Вибір технічних засобів збору інформації про хід технологічного процесу і стан обладнання.....	92
5.3 Вибір технічних засобів для реалізації керуючих впливів технологічного процесу.....	95
5.4 Вибір технічної структури і технічних засобів для реалізації контролерно-комп'ютерної мережі.....	97
5.5 Висновки за розділом.....	102
6. Параметризація технічних засобів, контролера і мереж, програмування алгоритмів логічного керування та регулювання САК.....	103
6.1 Параметризація технічних засобів, контролера і мереж.....	103
6.2 Розробка програм для реалізації алгоритмів логічного керування.....	105
6.3 Розробка програм для реалізації алгоритмів регулювання.....	112
6.4 Висновки за розділом.....	115
7. Розробка SCADA для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика САК.....	116
7.1 Встановлення зв'язку між контролером та панеллю оператора, її конфігурування.....	116
7.2 Конкретизація функцій і структури екранів АРМ оператора-технолога.....	118
7.3 Розробка екранів АРМ оператора-технолога.....	118
7.4 Тестування системи керування.....	125
7.5 Висновки за розділом.....	128
8. Розробка фрагментів документації технічного забезпечення САК та заходів з охорони праці.....	129
8.1 Опис основних технічних рішень із побудови САК та склад документації її технічного забезпечення.....	129

8.2 Розробка схеми автоматизації	131
8.3 Розробка принципової електричної схеми керуванням електроприводом	133
8.4 Розробка принципової електричної схеми живлення.....	133
8.5 Розробка принципової схеми мережевих підключень.....	134
8.6 Розробка принципових електричних схем підключення до модулів ПЛК.....	134
8.8 Охорона праці.....	135
8.9 Висновки за розділом.....	139
Висновок.....	140
Перелік джерел.....	143
Додатки.....	146
Додаток А Документація до схеми автоматизації	147
Додаток Б Документація до принципової електричної схеми.....	149

Перелік умовних позначень

АСУТП – автоматична система управління технологічним процесом;

ПК – персональний комп'ютер;

МПК – мікропроцесорний контролер;

САУ – система автоматичного управління;

ФФ – формуючий фільтр;

СП – стохастичний процес;

ОР – об'єкт регулювання;

ТП – технологічний процес;

САР – система автоматичного регулювання;

ЗНВ – зона незначущих відхилень;

КЗ – коригувальний зв'язок;

ЦДП – цифрово-диференційний перетворювач;

ДЦП – диференційно-цифровий перетворювач;

ЦАП – цифрово-аналоговий перетворювач;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

АРМ – автоматизоване робоче місце;

ОП – операторський пункт.

Вступ

Копчення риби – це процес обробки риби димом або коптильними препаратами з метою надання продукту специфічного смаку, аромату, кольору та підвищення стійкості під час зберігання. Основними цілями процесу є формування характерного смаку й аромату, надання копченому продукту золотисто-коричневого забарвлення, часткове зневоднення продукту, пригнічення розвитку мікроорганізмів та подовження терміну зберігання.

Бездимне гаряче копчення риби – це спосіб термічної обробки, коли рибу готують у гарячому середовищі з ароматичними речовинами, але без прямого контакту з димом від горіння деревини. Такий метод часто використовують у сучасному харчовому виробництві, щоб отримати смак копченості без великої кількості продуктів згоряння. Переваги бездимного гарячого копчення: менше шкідливих речовин, ніж при традиційному копченні; рівномірний смак; швидший процес; легше контролювати якість; менше забруднення повітря. Недоліки: аромат може бути менш «живим», ніж від натурального диму; деякі гурмани вважають смак менш насиченим.

Одним із способів апаратної реалізації процесу є обробка риби в універсальних коптильних камерах, зокрема в Н10-ИДЦ, де зокрема реалізується і процес гарячого бездимного копчення.

Для якісної реалізації процесу слід розробити, налаштувати і дослідити якісну систему регулювання температурних режимів процесу.

Керування процесом здійснюється з використанням традиційної апаратної автоматики. Отже є значний резерв підвищення ефективності процесу за рахунок використання досконаліших алгоритмів керування на базі сучасної елементної бази на основі контролерно-комп'ютерних мереж.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення конкурентоздатності підприємства за рахунок підвищення ефективності процесу бездимного гарячого копчення риби в універсальній коптильній камері шляхом розробки

обґрунтованих технічних рішень зі створення модернізованої САР процесом. Для досягнення поставленої мети визначенні завдання:

- проаналізувати процес бездимного гарячого копчення риби в універсальній коптильній камері як об'єкту керування;
- розробити комплекс його моделей як об'єкту регулювання і провести моделювання для підтвердження відповідності отриманих моделей експериментальним даним;
- розробити варіанти алгоритмів регулювання, провести їхню параметричну оптимізацію, порівняльний аналіз САР, що забезпечують підвищену динамічну точність регулювання регламентованих змінних;
- скласти регламент функціонування та алгоритми автоматичного керування циклом технологічного процесу;
- провести вибір технічних засобів, які зможуть забезпечити належне та якісне керування процесом;
- розробити технічну структуру мікропроцесорного ядра системи керування процесом;
- обрати промисловий контролер та його блоки вводу/виводу;
- розробити програми в середовищі TIAPortal, які реалізують алгоритми логічного керування та регулювання;
- виконати роботи в середовищі SCADA - системи розробити програмне забезпечення АРМ оператора і наладчика САК процесом сушіння бездимного гарячого копчення риби в універсальній коптильній камері;
- розробити варіант комплексу технічної документації САК.

Рішенню перерахованих вище завдань і присвячена ця кваліфікаційна робота.

1. Опис ділянки технологічного процесу, його агрегатів та існуючого рівня автоматизації керування ними. Виявлення потенційних джерел економічної ефективності і конкретизація задачі модернізації САК

1.1. Автоматизована ділянка технологічного процесу: локалізація, перехід від аналізу сутності технології до її формалізованого подання у формі взаємозв'язків параметрів

Сировиною для виготовлення риби гарячого копчення можуть служити зубан, хек сріблястий, ставрида океанічна, скумбрія океанічна і інші види риб. Коптильним середовищем є пари препарату Вахтоль. Належну кількість препарату можна ввести або одноразовим диспергуванням, або двома порціями. Технологічна схема виробництва риби гарячого копчення наведена на рис. 1.1.

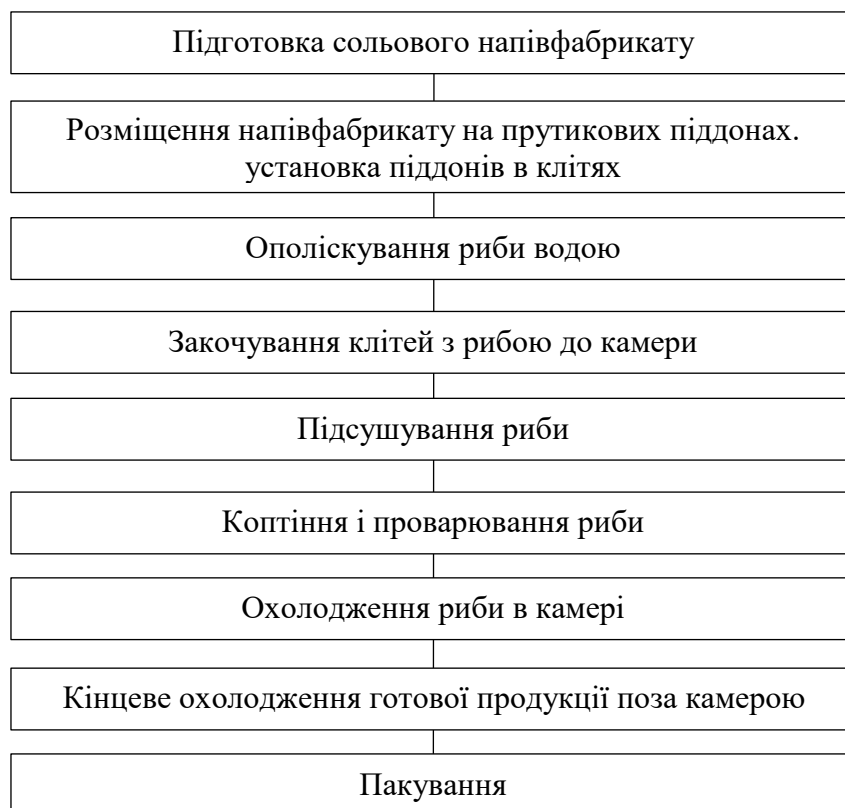


Рис. 1.1 – Технологічна схема виробництва риби гарячого копчення

Підготовка солоного напівфабрикату здійснюється у відповідності до діючих технологічних інструкцій, при розміщенні його на решетах не допускається торкання окремих екземплярів риби один з одним. Після ополіскування напівфабрикату водою надлишкाम води дають стекти на протязі 15...30 хвилин. Для недопущення білково-жирових натікань на поверхні риби в процесі копчення (теплової обробки) через кожні 2 решета з нерозділеною рибою встановлюють піддони.

Перед завантаженням риби установку попередньо прогрівають до 100°C на протязі 15...30 хв. Підсушку риби проводять на протязі 10...20 хв. при температурі 40...50°C. Диспергування коптільного препарату здійснюють в кількості 2,5 – 3% до маси оброблюваного напівфабрикату на протязі 30 хв. при температурі 80... 100°C. Копчення і проварювання здійснюється при температурі 100...110°C. процес проварювання закінчують, коли температура в товщині риби досягає 80°C за час 40...60 хв.

Загальна тривалість процесів в коптільній камері складаю 90...110 хв.

Коливання в тривалості і температурі операцій залежать від виду і розміру риби. Наприклад максимальна температура для хека сріблястого, ставриди і скумбрії океанічної – 100°C, для зубана – 110°C .

Після закінчення копчення температуру в камері установки знижують до 40...45°C і витримують рибу при цій температурі біля 20 хв. Остаточне охолодження риби проводять на клітках в виробничих приміщеннях при температурі 20°C.

Одним зі способів апаратної реалізації процесу гарячого бездимного копчення риби є реалізація процесу в універсальних коптільних камерах. Прикладом такої камери може слугувати універсальна камера для копчення і вялення риби Н10-ИДЦ. Технологічна схема процесу гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптільній камері наведена на рис. 1.2.

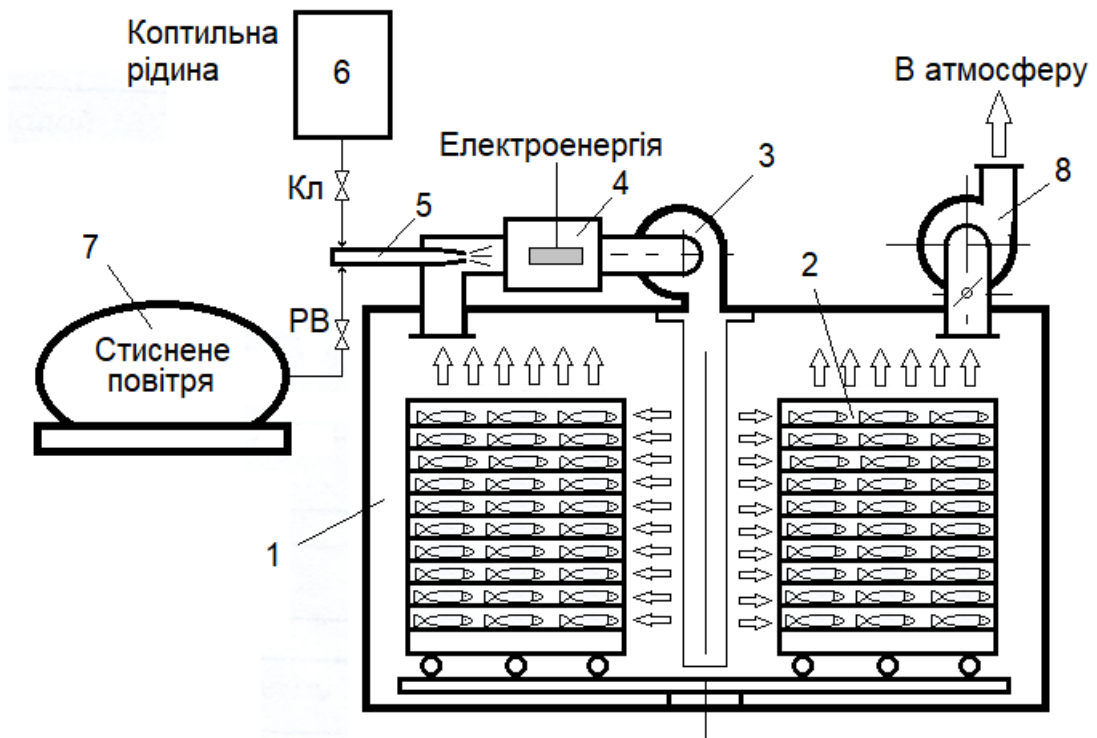


Рис. 1.2 – Технологічна схема процесу гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптільній камері

Рибу розміщують в один шар на сітку рамок які в свою чергу ярусами розміщуються на полицях клітей 2. Після цього кліті заочуються в камеру 1 на платформу каруселі в відповідні секції, де вони фіксуються спеціальними засобами. Надалі двері камери зачиняються, вмикають привод обертання каруселі і всі інші діючі елементи установки (вентилятори, калорифер), які працюють автоматично у відповідності до заданої програми на щиті керування. Карусель обертається з частотою 16 об/хв, при якому риба утримується на сітках, а в камері виникає циркуляція робочого середовища від центру до її стінок. В результаті відбувається достатньо рівномірний контакт робочого середовища з рибою за усім обсягом камери. Відцентрові сили, що виникають в результаті обертання клітей, сприяють відведенню соків, що рясно виділяються з риби при гарячому копченні. Щоб запобігти білковим натіканням на рибі, під кожную третю сітку розміщуються алюмінієві листи.

Для роботи з застосуванням коптільних препаратів установка комплектується нескладною системою подачі коптільної рідини. Коптільний

препарат (Вахтоль та ін.) після підсушки риби через пневматичну форсунку в диспергованому вигляді подається на нагрівальні елементи калорифера (ТЕНи). Пари, що утворюються, всмоктуються вентилятором і нагнітаються в камеру через щілини повітророзподільника. Оскільки процес гарячого копчення ведеться у середовищі з підвищеною температураю (більше 100°C) пароподібний стан рециркулюючого препарату має стійкий характер на протязі всього циклу копчення. Основними факторами, що впливають на якість риби гарячого копчення, є концентрація парів коптільного препарату в камері в період обробки, швидкість циркуляції і температура робочого середовища.

Суттєве значення для отримання стабільної за якістю риби і стабільних невисоких витрат коптільного препарату (не більше 3% до маси оброблюваної риби) має за інших умов правильне диспергування коптільного препарату. Для цього, зокрема, слід подавати в форсунку пневматичного типу стиснене повітря з тиском 294кПа при відповідному підведенні трубопроводів.

Реалізація процесу гарячого бездимного копчення риби здійснюється в коптільній установці Н10-ИДЦ, сконструйованій ЦПКТБ ВРПО «Азчерриба» (м. Севастополь). Схема установки зображена на рис. 1.3.

Установка Н10-ИДЦ для копчення риби в парах препарату Вахтоль складається з камери 1, призначеної для проведення процесів теплової обробки коптільним середовищем, щита керування 11 і системи подачі коптільного середовища, в якості якого використовується або димоповітряна суміш, або аерозоль коптільного препарату. Система подачі димоповітряної суміші включає в себе димогенератор і димопідвідну трубу. Камера 1 виконана зі сталевих листів, між якими розміщено теплоізоляційний матеріал і має у перерізі форму восьмигранника. На одній стороні восьмигранника розміщено дверний блок.

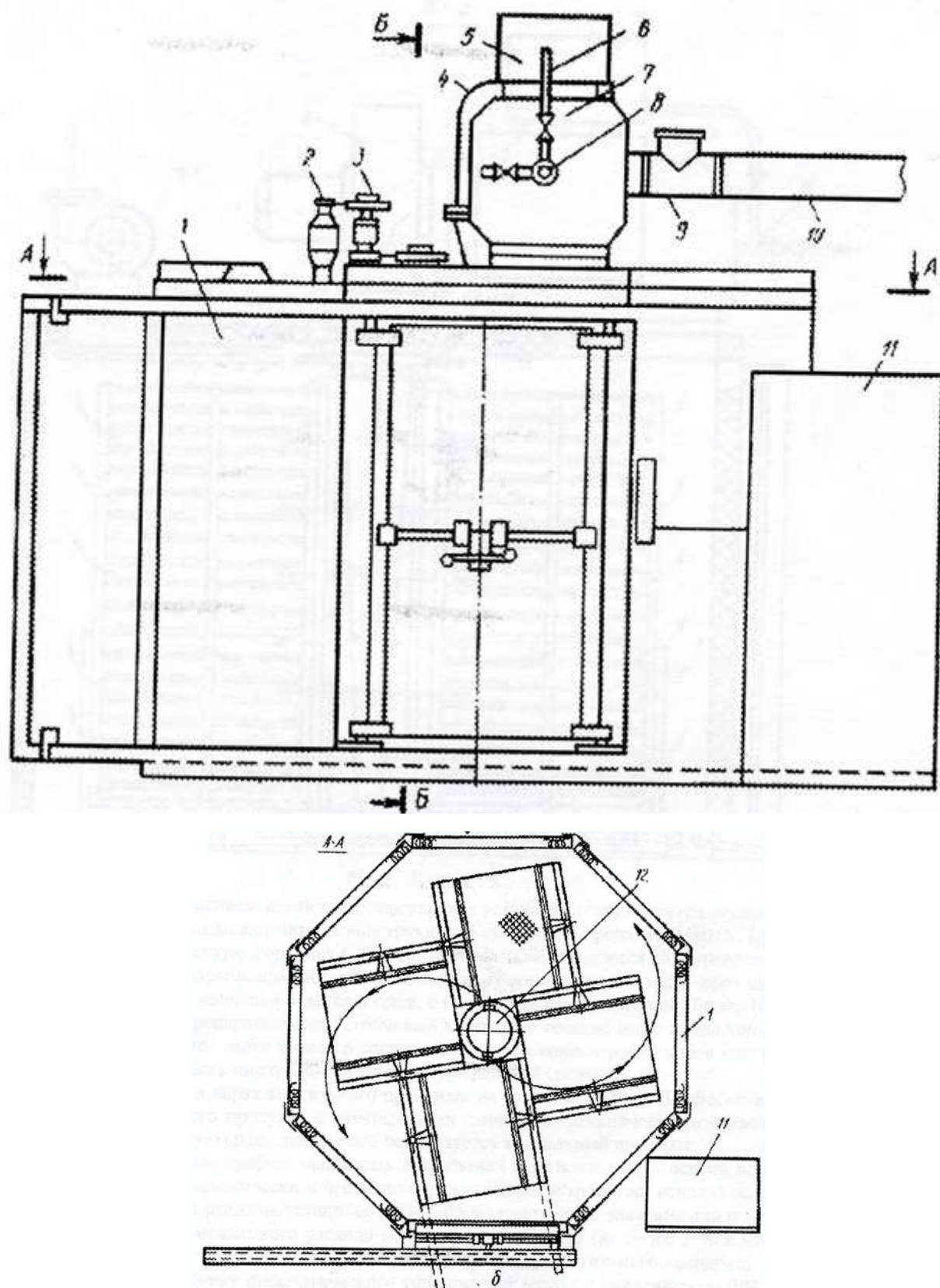


Рис. 1.3 – Універсальна автоматизована установка для копчення і вялення риби Н10-ИДЦ

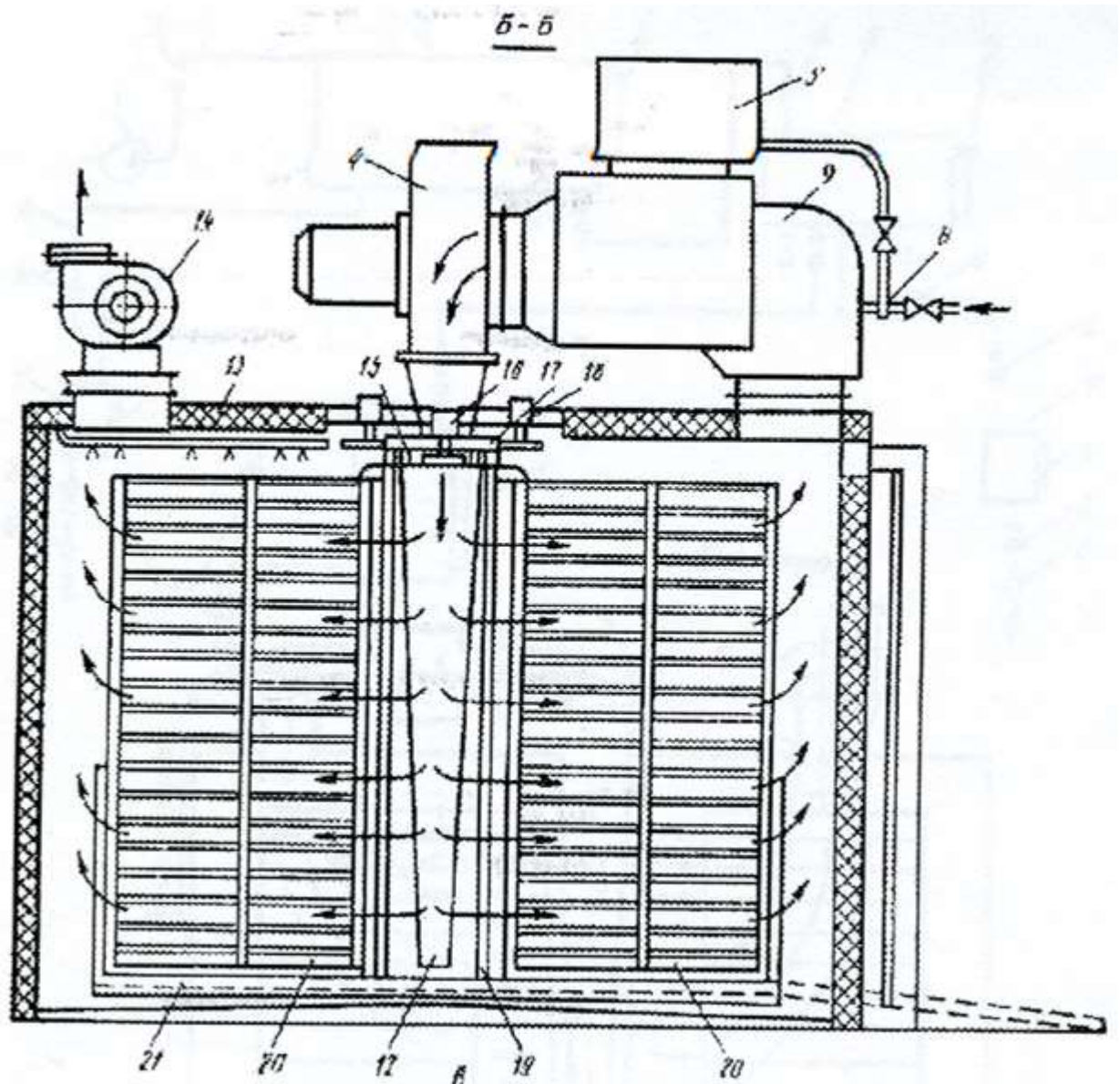


Рис. 1.3 (закінчення)– Універсальна автоматизована установка для копчення і вялення риби Н10-ИДЦ: а – загальний вигляд; б – вид зверху (розріз по А-А); в – вид збоку (розріз по Б-Б): 1 – камера теплової обробки; 2 – електропривод; 3 – муфта фрикційна; 4 – вентилятор циркуляційний; 5 – бак коптільного препарату; 6 – система подачі коптільного препарату; 7 – електрокалорифер; 8 – форсунка; 9 – патрубок з засувкою; 10 – труба від димогенератора Н10-ИДГ-2; 11 – щит керування; 12 повітророзподільник; 13 – колектор мийний; 14 – вентилятор витяжний; 15 – втулочно-роликовий ланцюг; 16 – приводний вал; 17 – обечайка; 18 – роликова опора; 19 – стійка; 20 – кліть; 21 - карусель

Відмінними особливостями камери копчення установки Н10-ИДЦ є: обектання клітей 20 з рибою в процесі обробки, що розміщуються на спеціальній каруселі 21; подача робочого середовища через спеціальний дифузор 12, розміщений в центрі камери; можливість обробки коптільним середовищем або димоповітряною сумішшю, що поступає з димогенератора через трубопровід 10, або аерозолем коптільного препарату, що поступає з бака 5 на форсунку 8, вмонтовану у калорифер 7. Калорифер з'єднаний з циркуляційним вентилятором 4, що нагнітає нагріте робоче середовище до дифузора, через дві протилежно розміщені щілини якого воно проникає до камери.

При копченні риби в парах коптільного препарату на установці Н10-ИДЦ забезпечується стабільна якість копченого продукту з покращеними санітарно-гігієнічними показниками, різко скорочується викидання газів в навколишнє середовище, повністю використовується коптільний препарат.

При комплектуванні системи подачі розчину коптільного препарату має бути передбачено резервну ємність для зберігання 1...3-добового запасу коптільного препарату, витративий бак або колектор коптільного препарату, з якого препарат поступає на дозатор або робочу ємність, розміщену безпосередньо на установці.

В установці можливо одночасно бробляти 700...80 кг риби.

Мета ведення процесу сушіння гарячого бездимного копчення риби – отримання готового продукту із заданими показниками якості. При промисловому виробництві досягнення мети може бути виправдано тільки тоді, коли технологічний процес має сенс реалізувати, коли виконується цілий ряд вимог до технологічного процесу.

Технологічний процес гарячого бездимного копчення риби доцільно реалізовувати, якщо:

- є достатній запас риби для одноразового завантаження камери, тобто, не менше, ніж 700 кг;

- в збірнику копильної рідини має бути не менше 20 л продукту;
- тиск повітря в ресивері повинне бути не меншим 0,35МПа;
- повинна бути електроенергія в колах живлення вентиляторів і електрокалорифера із середньостатистичними параметрами мережі.

Проведемо параметризацію схеми технологічного процесу, загальна характеристика параметрів і їх взаємозв'язків.

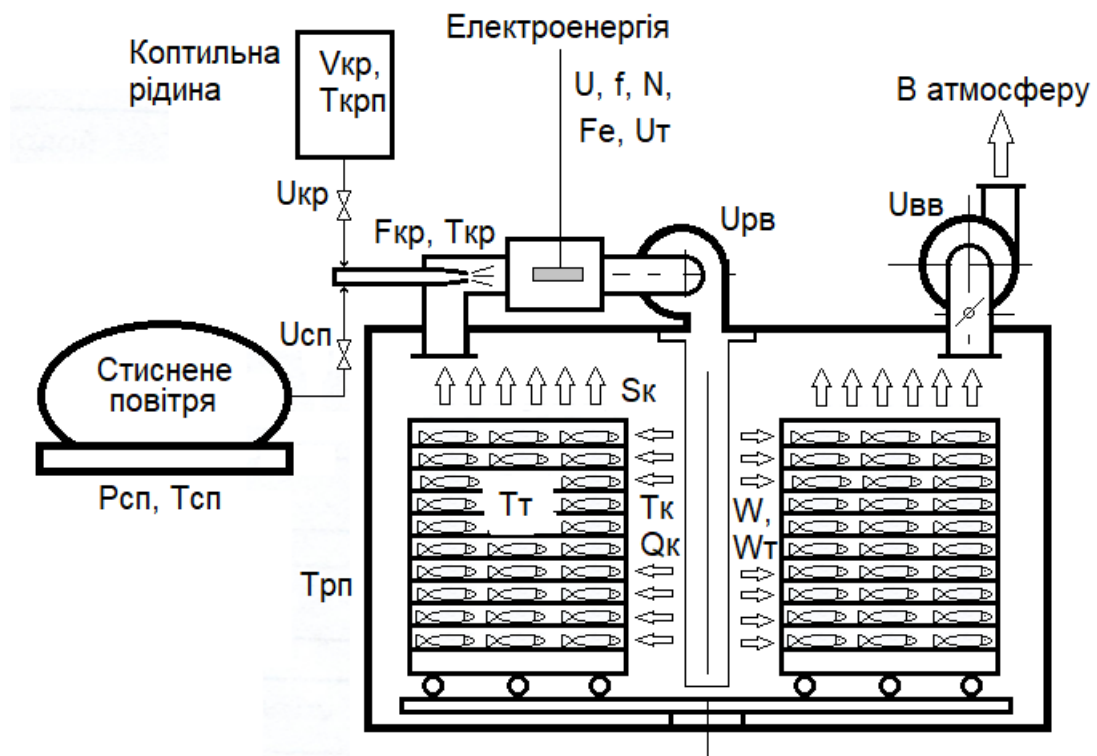


Рис. 1.4 – Параметризована технологічна схема процесу гарячого бездимного копчення риби в універсальній копильній камері

T_k – температура в камері, $^{\circ}\text{C}$;

Q_k – концентрація парів копильної рідини в камері, г/м^3 ;

S_k – швидкість циркуляції середовища в камері, м/с ;

T_t – температура в центрі тушки, $^{\circ}\text{C}$;

T_{rp} – температура риби початкова, $^{\circ}\text{C}$;

W – маса риби в камері, кг ,

W_T – маса однієї тушки, кг;

$V_{кр}$ – об'єм копильної рідини в напірному баку, л;

$T_{крп}$ – початкова температура копильної рідини, °C;

$U_{кр}$ – положення регулюючого органу подачі копильної рідини, %х.р.о.;

$P_{сп}$ – тиск стисненого повітря в ресивері, МПа;

$T_{сп}$ – температура стисненого повітря в ресивері, °C;

$U_{сп}$ – положення регулюючого органу подачі стисненого повітря на розпилювач, %х.р.о.;

$T_{кр}$ – температура копильної рідини, °C;

$F_{кр}$ – витрати копильної рідини, л/хв;

U – напруга в електромережі, В;

f – частота в електромережі, Гц;

N – номінальна потужність ТЕНу, кВт;

F_E – витрати електроенергії, кВт · год;

U_T – потужність, що підводиться до ТЕНу, %х.р.о.;

$U_{рв}$ – потужність, що підводиться до рециркуляційного вентилятора, %х.р.о.;

$U_{вв}$ – потужність, що підводиться до витяжного вентилятора, %х.р.о.

Основу нормативів складають три основних регламенти.

Технологічний регламент – визначає умови, при яких у результаті технологічного процесу буде отримано продукт із заданими властивостями. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення від номіналу технологічних параметрів. Для технологічного процесу гарячого бездимного коптіння риби такими параметрами є:

T_k – температура в камері, °C;

Q_k – концентрація парів копильної рідини в камері, г/м³;

S_k – швидкість циркуляції середовища в камері, м/с;

T_t – температура в центрі тушки, °C;

$T_{кр}$ – температура копильної рідини, °C;

Експлуатаційний регламент – визначає умови нормальної безаварійної роботи технологічного обладнання. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення експлуатаційних параметрів технологічного обладнання.

Техніко-економічний і екологічний регламент визначає умови ефективності ведення процесу і його екологічності. Він являє собою набір номінальних та гранично-припустимих значень техніко-економічних і екологічних параметрів. Для технологічного процесу гарячого бездимного копчення риби такими параметрами є:

W – маса риби в камері, кг,

$F_{кр}$ – витрати копильної рідини, л/хв;

F_E – витрати електроенергії, кВт · год;

Відхилення параметрів технологічного процесу від регламентних значень, що викликані зміною параметрів, характеризують умови ведення процесу навіть при досить ефективному керуванні процесом, можуть перевищувати встановлені допуски.

Відхилення температури в камері і температурою контрольної тушки нижче гранично припустимих значень може призвести до його недоварювання риби, недостатнього мікробіологічного знезараження і, в кінці кінців, до браку готової продукції, що екологічно і економічно небезпечно. Перевищення температурою верхнього гранично припустимого значення може призвести до пересушування продукту і, навіть, до його пригорання, що економічно невигідно. В обох випадках порушення регламенту веде до погіршення якості готового продукту, до збільшення виходу браку, а перевищення температур призводить до нерегламентованих надмірних витрат електроенергії.

Допуски на відхилення поточних (режимних) значень регламентованих параметрів від номінальних прийнято розділяти і задавати у вигляді допусків на тривалі та короточасні відхилення. Аналіз нормативів ведення

технологічного процесу та експлуатації обладнання оформимо у вигляді таблиці регламентів 1.1.

Таблиця 1.1 – Таблиця регламентів

Назва параметрів	Позначення	Одиниці вимірювання	Номинальне значення параметру	Припустимі відхилення від номіналу		
				Тривалі	Короткочасні	
				величина	величина	час, сек
Температура середовища в камері	Тк	°С	100	±2	±5	400
Температура контрольної тушки	Тт	°С	$0,67 \cdot t + 20$	±1	±5	400

Поточні значення нормативних параметрів завжди відрізняються від номінальних (і можуть виходити за межі допусків) внаслідок зміни умов, у яких ведеться процес. Ці умови також характеризуються визначеними параметрами і можуть бути (для зручності) згруповані за деякими ознаках.

Поточні значення нормативних параметрів завжди відрізняються від номінальних (і можуть виходити за межі допусків) внаслідок зміни умов, у яких ведеться процес. Ці умови також характеризуються певними параметрами і можуть бути (для зручності) згруповані за деякими ознаками.

Сировинні параметри характеризують властивості продукту, що йде на переробку. Для технологічного процесу гарячого бездимного копчення риби до цієї групи параметрів віднесемо:

Трп – температура риби початкова, °С;

Wт – маса однієї тушки, кг;

Vкр – об'єм копильної рідини в напірному баку, л;

Ткрп – початкова температура копильної рідини, °С.

Енергетичні параметри характеризують енергію, що підводить до технологічного встаткування ззовні й витрачається на зміну властивостей продуктів. Для технологічного процесу гарячого бездимного копчення риби до цієї групи параметрів віднесемо:

$P_{сп}$ – тиск стисненого повітря в ресивері, МПа;

$T_{сп}$ – температура стисненого повітря в ресивері, °С;

U – напруга в електромережі, В;

f – частота в електромережі, Гц.

Механічні (або інші специфічні) параметри технологічного обладнання характеризують стан її робочих органів. Для технологічного процесу гарячого бездимного копчення риби до цієї групи параметрів віднесемо:

$U_{кр}$ – положення регулюючого органу подачі коптильної рідини, %х.р.о.;

$U_{сп}$ – положення регулюючого органу подачі стисненого повітря на розпилювач, %х.р.о.;

N – номінальна потужність ТЕНу, кВт;

U_t – потужність, що підводиться до ТЕНу, %х.р.о.;

$U_{рв}$ – потужність, що підводиться до рециркуляційного вентилятора, %х.р.о.;

$U_{вв}$ – потужність, що підводиться до витяжного вентилятора, %х.р.о.

Параметризована схема технологічного процесу має змістовний характер. Формалізація опису взаємозв'язків між параметрами технологічного процесу досягається за рахунок переходу до формалізованої параметричної схеми (рис. 1.5). При цьому ті параметри, що відбивають мету функціонування об'єкта моделювання і додаткові вимоги до нього, тобто ті параметри, що регламентовані, будуть вихідними, а параметри, що відбивають умови функціонування об'єкта - вхідними. Зв'язок між вхідними і вихідними параметрами - причинно-наслідковий.

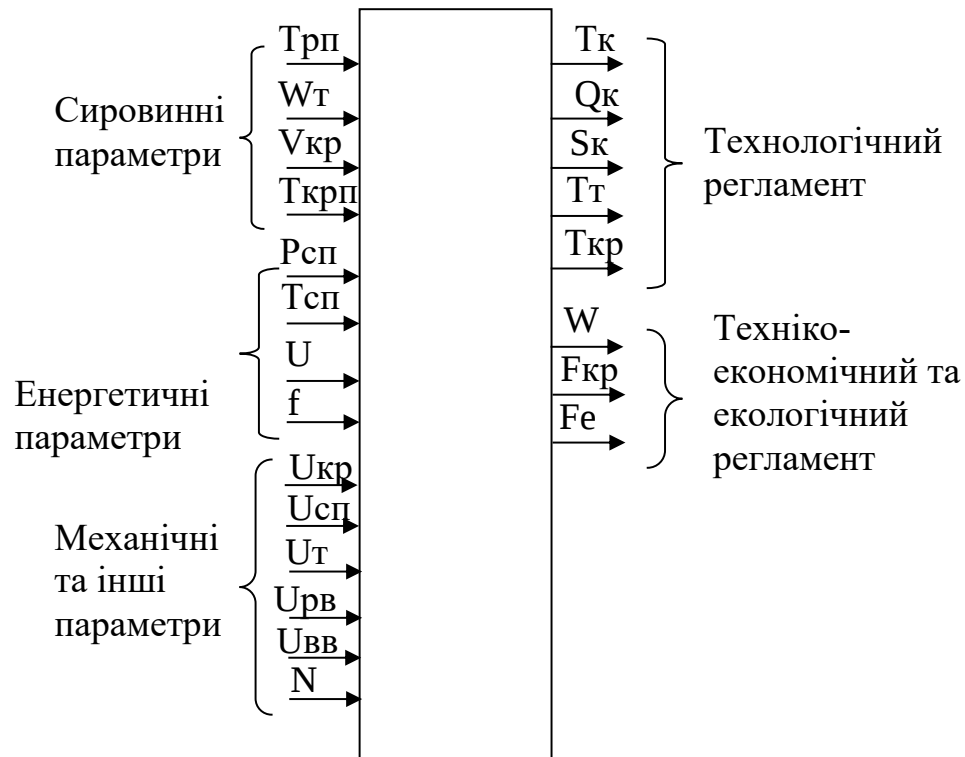


Рис. 1.5 – Параметрична схема процесу гарячого бездимного копчення риби

1.2. Виявлення існуючого рівня автоматизації ділянки ТП та технічних засобів, що використовуються для цього

Для копильно-сушильної установки Н10-ИДЦ керування процесом здійснюється автоматично за трьома режимами: підсушування, проварювання-копчення та охолодження.

Основні контрольовані параметри: температура в камері, температура димогенератора, вологість у камері, витрати димоповітряної суміші, розрідження в камері, положення заслінки диму, положення витяжної заслінки. Сигнали керування формуються на роторний механізм, циркуляційний вентилятор, витяжний вентилятор, засувки подачі диму, витяжну засувку, електрокалорифер, димогенератор.

Процес керування здійснюється наступним чином. ПЛК запускає роторний механізм і циркуляційний вентилятор. Вмикається електрокалорифер, підтримується температура 30–80 °С. Засувка диму закрыта. Періодично відкривається витяжна засувка для видалення вологи.

Режим проварювання та копчення здійснюється наступним чином. Після досягнення заданої температури запускається димогенератор. За сигналом від датчика температури димогенератора відкривається засувка диму. Температура підтримується в межах 80–140 °С. Регулюється витяжка через витяжну засувку і витяжний вентилятор.

Режим охолодження здійснюється наступним чином. Вимикається димогенератор і електрокалорифер. Працюють циркуляційний і витяжний вентилятори. Відкривається витяжна засувка. Після охолодження до приблизно 45 °С процес завершується автоматично.

У процесі реалізації процесу здійснюється регулювання температури в камері, яка вимірюється датчиком Pt100 з перетворювачем сигналу 4...20 мА. Регулятор температури формує сигнал керування через тиристорний регулятор потужності на електронагрівачі (ТЕНи). Регулювання вологості реалізує регулятор вологості, що отримує сигнал зворотного зв'язку від датчика відносної вологості через вимірювальний перетворювач. Регулятор вологості формує сигнал керування на електропривод витяжної засувки. Підтримання розрідження в камері здійснює регулятор розрідження, що отримує сигнал зворотного зв'язку від датчика тиску через перетворювач тиску. Регулятор розрідження формує сигнал автоматичного керування через частотний перетворювач на витяжний вентилятор. Керування подачею диму здійснює регулятор димоутворення за сигналом від датчика температури димогенератора. Регулятор керує димогенератором і засувкою подачі диму.

1.3 Аналіз впливу функцій керування технологічним процесом на техніко-економічні та екологічні показники. Конкретизація економічної та інших цілей модернізації САК

У процесі функціонування системи управління процесом гарячого бездимного копчення риби в універсальній копильній камері основним

джерелом підвищення ефективності процесу є зменшення енерговитрат на процес та зменшення втрат від браку готової продукції. Порушення технологічного регламенту на температурні режими процесу призводить до втрати якості готового продукту, а значить і до втрат від браку готової продукції.

Економічною метою кваліфікаційної роботи є підвищення конкурентоспроможності підприємства за рахунок зменшення собівартості продукції і підвищення рівня його рентабельності при впровадженні модернізованої системи управління.

Система управління процесом гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері реалізується на базі технічних засобів, ПК та МПК.

Система повинна реалізовувати наступні функції:

а) інформаційні:

- збір та обробка інформації;
- оперативне відображення інформації;
- зберігання інформації;

б) керуючі:

- стабілізація технологічних параметрів;
- логічне керування ходом технологічного процесу;
- ручне (дистанційне) керування технологічним процесом;
- вибір режимів керування.

1.4 Висновки за розділом

Технологічний процес гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері є одним з ключових процесів виробництва копченої риби. Підвищення ефективності саме цього процесу здатне дати суттєвий економічний ефект. Тому саме цей процес було обрано в якості об'єкту для модернізації системи керування. Провівши аналіз ходу

технологічного процесу, можна зробити висновок , що саме на цій ділянці технологічної схеми, можна істотно змінити техніко-економічні показники виробництва в цілому, такі як зменшення питомих енерговитрат та втрат від браку готової продукції.

Виходячи з вище викладеного, при впровадженні для процесу гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері модернізованої системи керування на базі мікропроцесорної техніки, яка буде ефективно контролювати і керувати процесом, потрібно домогтися: зниження витрат електроенергії та виходу браку готової продукції. Для цього слід буде поліпшити якість регулювання температури продукту в камері, удосконалити існуючі алгоритми логічного керування, замінити існуючу елементно-технічну базу на більш нові засоби керування.

2. Розробка концептуальної моделі об'єкта управління, структурна та параметрична ідентифікація математичних моделей його компонентів, їх реалізація у середовищі імітаційного моделювання

2.1. Розробка концептуальної моделі (структурної схеми) об'єкта регулювання

Загальною метою функціонування підприємства в цілому є виконання планових завдань або договірних зобов'язань щодо номенклатури та обсягу продукції, а також отримання при цьому певного економічного ефекту.

Декомпозиція загальної мети функціонування підприємства для більш низьких рівнів виробничої ієрархії приводить до наступних цілей:

а) на рівні окремого технологічного процесу – координація роботи технологічного обладнання, на якому реалізується процес;

б) на рівні окремих одиниць технологічного обладнання – виконання технологічних, експлуатаційних і техніко-економічних регламентів, зокрема – оптимізація роботи окремих одиниць обладнання.

Звідси задачу керування можна розділити на:

а) задачу регулювання, коли необхідно забезпечити виконання вимог регламенту;

б) завдання умовної оптимізації, коли при дотриманні вимог регламенту додатково відповідно до наперед сформульованим критерієм, вирішуються задачі оптимізації процесу.

Для процесу гарячого бездимного копчення риби в якості регульованих координати доцільно обрати температуру в камері T_k і температуру контрольної тушки T_t .

Необхідною умовою вирішення задач керування є наявність управляючих дій, що повинні бути вхідними змінними (координатами) ОК. Для задач регулювання, такими управляючими діями, насамперед, є дії, що цілеспрямовано можуть змінювати витрати матеріальних і енергетичних

потоків, а саме – положення регулювальних органів. Кількість управляючих дій повинно бути рівним кількості регульованих змінних.

Для процесу бездимного копчення риби до керуючих дій доцільно віднести положення регулюючого органу підведення потужності до ТЕНу.

Після того, як визначені управляючі дії, всі інші вхідні змінні відносять у розряд збурень, тобто таких дій середовища, зміна яких порушує хід технологічного процесу і режими роботи технологічного агрегату.

Для процесу гарячого бездимного копчення риби, контроль яких суттєво б підвищив якість регулювання температур в камері і контрольної тушки, виявлено не було. Тому всі вхідні дії, крім керуючих дій, віднесемо до неконтрольованих збурень. Детерміновану складову цих збурень адитивно прикладемо до керуючих дій, а стохастичну складову – до регульованих координат.

Структурна схема ОК є черговим і останнім етапом формалізації подання технологічного процесу як ОК. Структурна схема ОК, по суті, є найбільш загальною (концептуальною) моделлю технологічного процесу як ОК.

Структурна схема процесу гарячого бездимного копчення риби наведена на рис. 2.1.

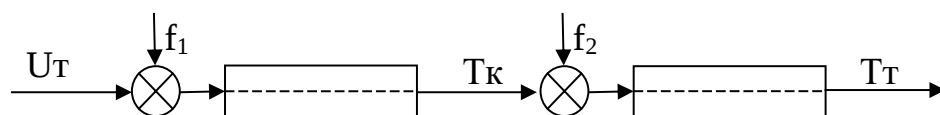


Рис. 2.1– Структурна схеми об'єкту регулювання

На рисунку:

T_K – температура в камері, °C;

T_T – температура в центрі тушки, °C;

U_T – потужність, що підводиться до ТЕНу, %х.р.о.;

f_1, f_2 – неконтрольовані збурення.

2.2 Структурна та параметрична ідентифікація математичних моделей каналів перетворення об'єкта регулювання

Перед початком експериментів доцільно на основі апріорних даних, виходячи з фізичної суті об'єкту, оцінити, нехай попередньо, властивості каналів, моделі яких підлягають ідентифікації.

Кожен канал ОК має властивість самовирівнювання. Збільшення керуючої дії (положення регулюючого органу підведення потужності до ТЕНа) призведе до збільшення температури в камері та температури контрольної тушки.

Виходячи з фізичної суті теплових та тепломасообмінних процесів, що протікають в універсальній копильній камері, відомо, що відносно у повній мірі математично ці процеси можуть бути описані нелінійними диференціальними рівняннями. Але також відомо, що номінальний режим функціонування ОК пов'язаний з порівняно вузьким діапазоном зміни температур в камері та контрольної тушки як регульованої координати. А в такому діапазоні процеси можуть бути описані лінійними диференціальними рівняннями, тобто припустимою є лінеаризація моделі ОК.

Ідентифікацію лінеаризованих моделей динаміки каналів управління об'єкта регулювання проведемо на основі активного експерименту, попередньо його спланувавши.

План активного експерименту

1. За допомогою зміни управляючої дії домагаємося значень регульованих координат, що перебували б в околицях їх номінальних значень. Для нашого ОК значенню $U_t = 70 \text{ \%x.p.o.}$ будуть відповідати значення регульованих координат $T_k = 100^\circ\text{C}$, $T_t = 80^\circ\text{C}$.

2. Чекаємо закінчення перехідних процесів в каналах та настання сталих режимів, при яких вихідні змінні перестануть змінюватися.

3. Змінимо управляючу дію U_t ступінчастим чином на $10\%\text{x.p.o.}$, відзначивши при цьому момент початку його зміни.

4. Реєструємо зміну вихідних змінних до настання нових сталих режимів.

Результати активного експерименту наведені на рис. 2.2 і 2.3.

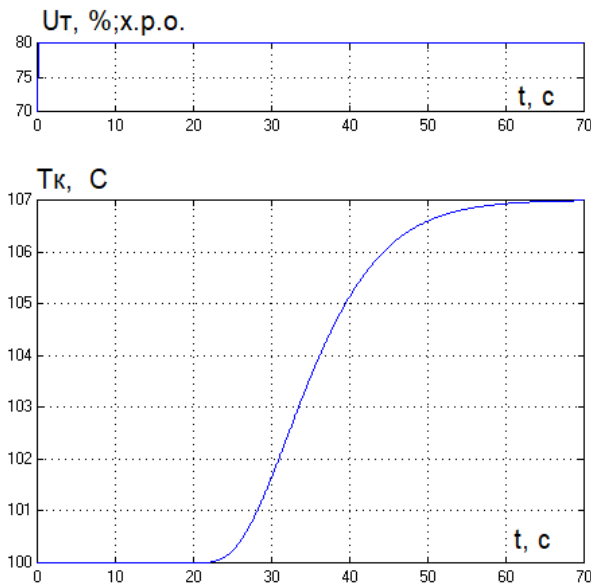


Рис. 2.2 – Результат активного експерименту за каналом «Uт – Tк»

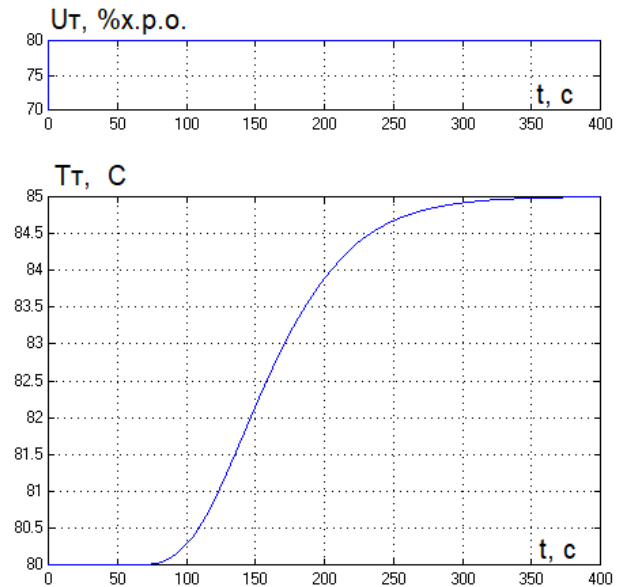


Рис. 2.3 – Результат активного експерименту за каналом «Uт – Tт»

За результатами активного експерименту (рис. 2.2, 2.3) можна зробити висновок, що за всіма канал наш ОК має властивість самовирівнювання, а тому може бути описаний передаточними функціями такого вигляду:

$$W_O(p) = \frac{K_O \cdot e^{-\tau_O p}}{T_O p + 1}; W_O(p) = \frac{K_O \cdot e^{-\tau_O p}}{(T_O p + 1)^2}$$

Для параметричної ідентифікації моделей ОК зі статичними властивостями необхідно знайти коефіцієнт передачі ОК (K_0), сталу часу (T_0) і час запізнення (τ_0).

Канал «Uт – Tк»

$$k = \Delta T_k / \Delta U_t = (107 - 100) / (80 - 70) = 7 / 10 = 0,7 \text{ } ^\circ\text{C} / \% \text{x.p.o.}$$

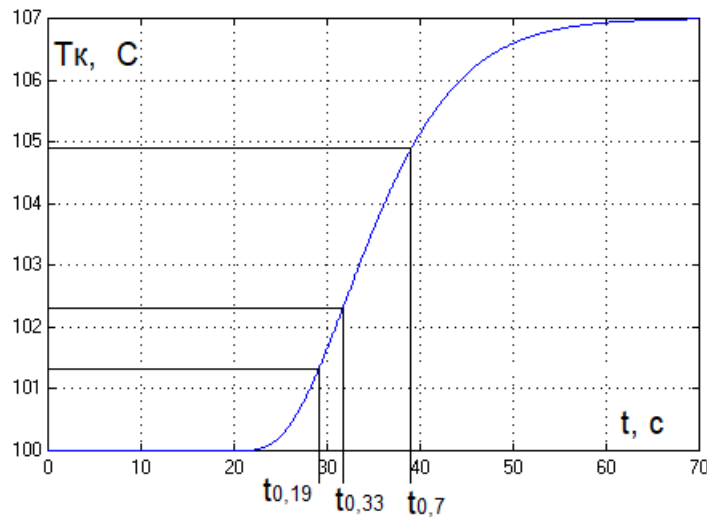


Рис. 2.4 – Параметрична ідентифікація моделі ОК за каналом «УТ – Тк»

Модель 1-го порядку

$$\tau = (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) / 2 = (3 \cdot 31,7 - 39,06) / 2 = 28 \text{ c}$$

$$t_{0,33} = 31,7 \text{ c}$$

$$t_{0,7} = 39,06 \text{ c}$$

$$T = (t_{0,7} - \tau) / 1,2 = (39,06 - 28) / 1,2 = 9,2 \text{ c}$$

$$W_{U_T-T_K}^O(p) = \frac{0,7 \cdot e^{-28p}}{9,2p + 1}$$

Модель 2-го порядку

$$\tau = (3 \cdot t_{0,19} - t_{0,7}) / 2 = (3 \cdot 29,13 - 39,06) / 2 = 24,2 \text{ c}$$

$$T = (t_{0,7} - \tau) / 2,4 = (39,06 - 24,2) / 2,4 = 6,2 \text{ c}$$

$$t_{0,19} = 29,13 \text{ c}$$

$$W_{U_T-T_K}^O(p) = \frac{0,7 \cdot e^{-24,2p}}{(6,2p + 1)^2}$$

Канал «УТ – Тк»

$$k = \Delta T_T / \Delta U_T = (85 - 803) / (80 - 70) = 5 / 10 = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C} / \% \text{x.p.o.}$$

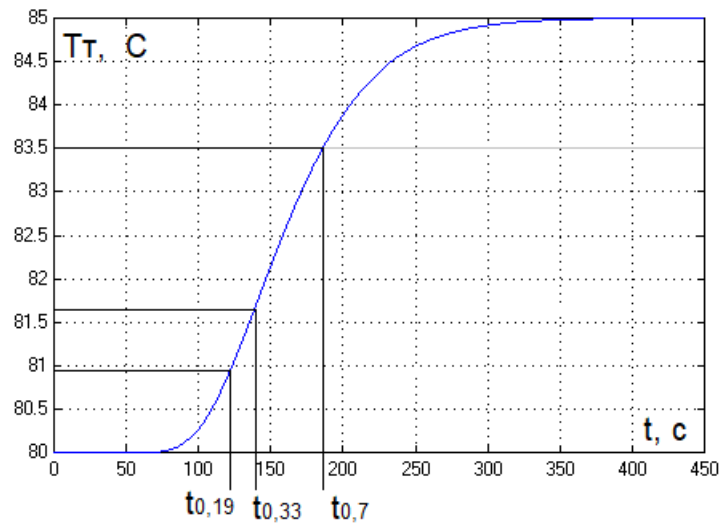


Рис. 2.5 – Параметрична ідентифікація моделі ОК за каналом « $U_T - T_T$ »

Модель 1-го порядку

$$\tau = (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) / 2 = (3 \cdot 138,46 - 185,53) / 2 = 114,9 \text{ с}$$

$$t_{0,33} = 138,46 \text{ с}$$

$$t_{0,7} = 185,53 \text{ с}$$

$$T = (t_{0,7} - \tau) / 1,2 = (185,53 - 114,9) / 1,2 = 58,8 \text{ с}$$

$$W_{U_T-T_T}^O(p) = \frac{0,5 \cdot e^{-114,9p}}{58,8p + 1}$$

Модель 2-го порядку

$$\tau = (3 \cdot t_{0,19} - t_{0,7}) / 2 = (3 \cdot 121,83 - 185,53) / 2 = 90 \text{ с}$$

$$T = (t_{0,7} - \tau) / 2,4 = (185,53 - 90) / 2,4 = 39,8 \text{ с}$$

$$t_{0,19} = 121,83 \text{ с}$$

$$W_{U_T-T_T}^O(p) = \frac{0,5 \cdot e^{-90p}}{(39,8p + 1)^2}$$

Канал « $T_K - T_T$ »

$$W_{T_K-T_T}^O(p) = \frac{k \cdot e^{-\tau p}}{Tp + 1}; \quad W_{T_K-T_T}^O(p) = \frac{k \cdot e^{-\tau p}}{(Tp + 1)^2}$$

$$W_{U_T-T_T}^O(p) = W_{U_T-T_K}^O(p) \cdot W_{T_K-T_T}^O(p)$$

$$W_{T_K-T_T}^o(p) = \frac{W_{U_T-T_T}^o(p)}{W_{U_T-T_K}^o(p)}$$

$$k_{T_K-T_T} = \frac{k_{U-T_T}}{k_{U-T_K}} = \frac{0,5}{0,7} = \frac{5}{7}$$

$T_{T_K-T_T}$ і $\tau_{T_K-T_T}$ знайдемо за результатами розв'язку оберненої задачі:

$$\{T_{T_K-T_T}; \tau_{T_K-T_T}\}^* = \arg \min I(W_{U_T-T_T}^o(p), W_{U_T-T_K}^o(p), k_{T_K-T_T}, T_{T_K-T_T}; \tau_{T_K-T_T})$$

Схема моделювання наведена на рис. 2.6.

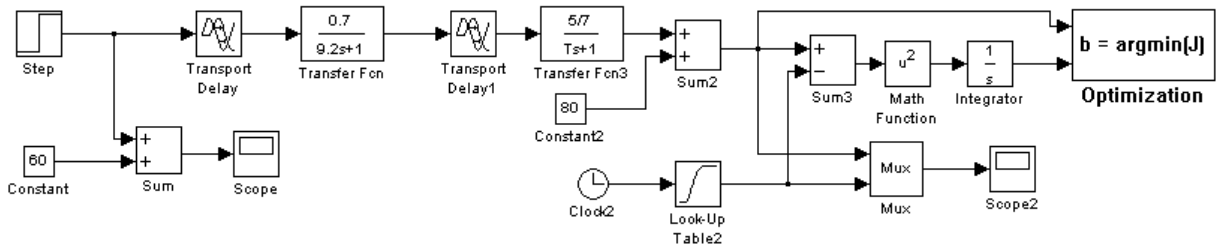
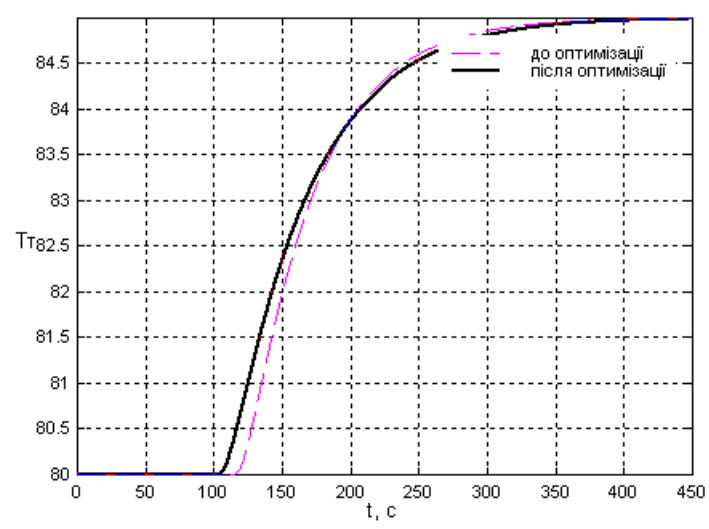


Рис. 2.6 – Параметрична ідентифікація моделі ОК 1-го порядку за каналом «Тк – Тт»



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
tau	75.0799	0	86.9	100	до - 15.6066
T	57.8981	1	49.6	200	після - 5.9708
					оптимізації.
					Кількість кроків процедури оптимізації:
					максимальна - 1500
					фактична - 60

Рис. 2.7 – Результати параметричної ідентифікації моделі ОК 1-го порядку за каналом «Тк – Тт»

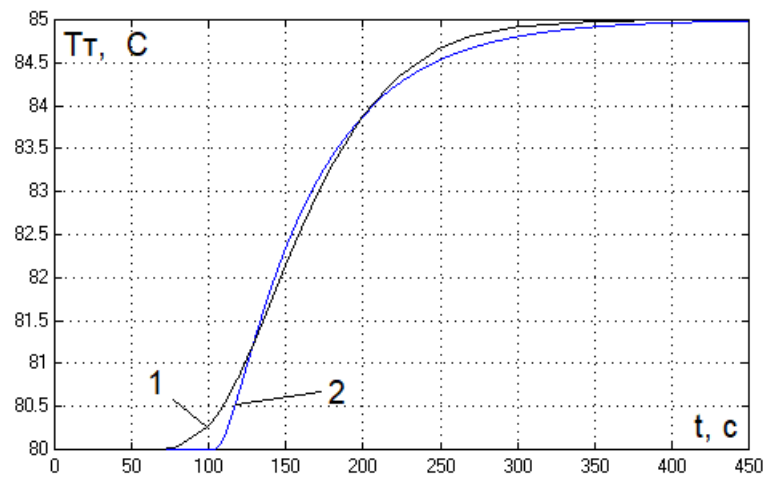


Рис. 2.8 – Результати моделювання ОК 2-го порядку за каналом «Тк – Тт»:

1 – експериментальні дані, 2 – модель 1-го порядку

$$W_{Тк-Тт}^o(p) = \frac{5/7 \cdot e^{-75,1p}}{57,9p + 1}$$

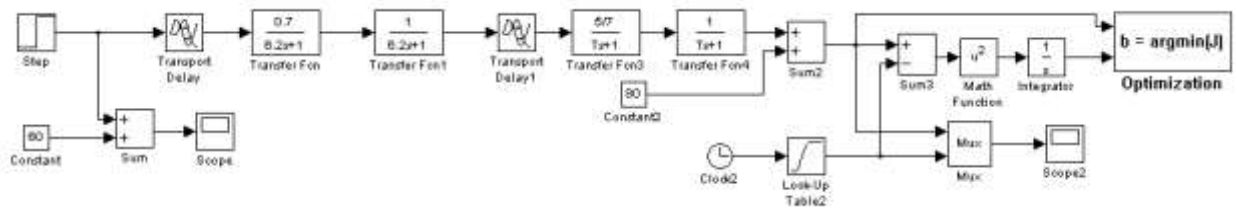


Рис. 2.9 – Параметрична ідентифікація моделі ОК 2-го порядку за каналом «Тк – Тт»

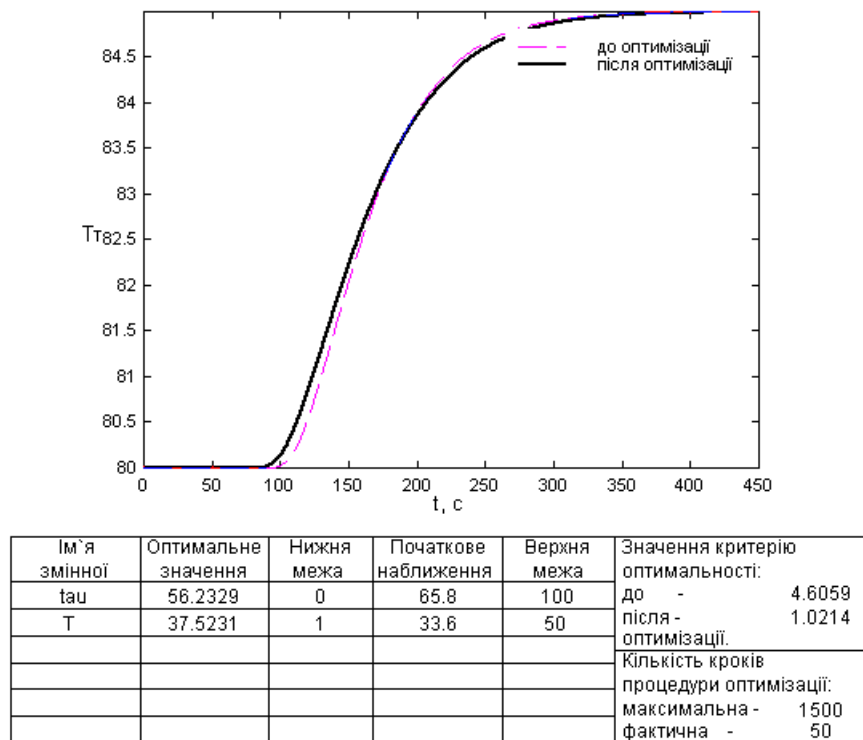


Рис. 2.10 – Результати параметричної ідентифікації моделі ОК 2-го порядку за каналом «Тк – Тт»

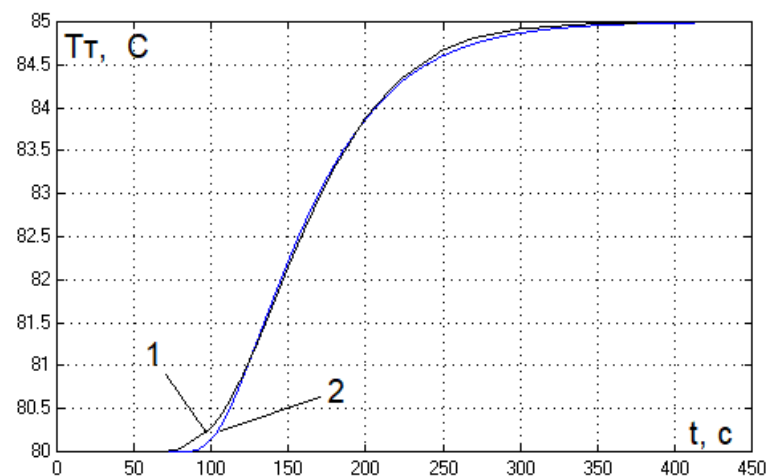


Рис. 2.11 – Результати моделювання ОК 2-го порядку за каналом «Тк – Тт»: 1 – експериментальні дані, 2 – модель 2-го порядку

$$W_{Тк-Тт}^o(p) = \frac{5/7 \cdot e^{-56,2p}}{(37,5p + 1)^2}$$

Отримання моделей статики для побудови моделей динаміки в абсолютних величинах.

Статичні властивості ОК описуються статичними характеристиками (моделями) каналів. Вони відбивають взаємозв'язок між вхідними і вихідними координатами (перемінними) каналів ОК в статично сталих режимах, тобто після загасання всіх перехідних складових цих перемінних.

Кінцевим результатом ідентифікації математичної моделі статики є установлення функціональної залежності виду $y = \Phi(\vec{x})$ на основі експериментальних даних, де $\vec{x} \in \{ \vec{u}, \vec{f} \}$ – вхідні змінні ОУ.

Значення y , отримані в результаті експерименту, завжди мають випадкову складову, обумовлену дією некерованих і неконтрольованих змінних, похибками вимірювання y та $\vec{x}$. У цьому випадку залежність розум = $y^M = \hat{y} = \Phi(\hat{\vec{x}})$ визначається з використанням статистичних ("усредняющих") методів, і вона називається регресією, регресійною залежністю або рівнянням регресії.

У теорії експерименту вхідні змінні ОК називають факторами, а регульовані координати – відгуком. Відповідно до цієї термінології експеримент, проведений для ідентифікації моделі, де функція залежить від однієї змінної, називають однофакторним, а функція багатьох змінних – багатофакторним.

Експерименти для отримання математичних моделей статики можуть бути пасивному або активними (як і при отриманні моделей динаміки). Для отримання моделей статики у нашому випадку будемо використовувати активний експеримент.

Суть планування експерименту полягає у виборі діапазонів зміни факторів, кроку збільшення факторів, послідовності їх зміни та числа повторів цих змін.

А. Діапазони зміни факторів в експерименті фактично визначає діапазон, де отримана модель може коректно використовуватися. Тому вони повинні відповідати реальним діапазонам зміни змінними, обумовлених факторами.

Б. Крок факторів повинен бути такими, щоб при перекритті необхідного діапазону їх зміни кількість дослідів не була б занадто великою або малою – найчастіше рекомендується 3...6 дослідів.

В. Кількість повторів (для компенсації випадкової складової) визначається інтенсивністю випадкових складових у вхідних і вихідних змінних ОК, кількістю факторів (цілеспрямовано змінюваних вхідних змінних) витратами часу та інших обставин. Кількість повторів приймається рівною 3...5. У деяких випадках повторів можна не робити взагалі.

Г. Послідовність зміни факторів особливо при їх великій кількості доцільно вибрати такою, щоб рандомизувати експеримент, тобто додати випадкові властивості ходу експерименту. Це можна зробити за рахунок запланованої заздалегідь випадкової зміни послідовності зміни факторів і, можливо, величин їх збільшень. Така організація експерименту дозволить “не пропустити” особливостей властивостей об'єкту, що при однакових з'єднаннях факторів при повторах можуть не виявитися. У найпростіших випадках можна використовувати і регулярні плани.

Результати експерименту для визначення статичної характеристики ОК зведено в таблицю 2.1 і на рис. 2.12.

Табл. 2.1 – Результати експерименту для визначення статичних характеристик ОК

№ експерименту	U_T , %х.р.о.	T_k , °C	T_T , °C
1	70	100	80
2	80	107	85
3	60	93	75
4	50	86	70
5	40	79	65

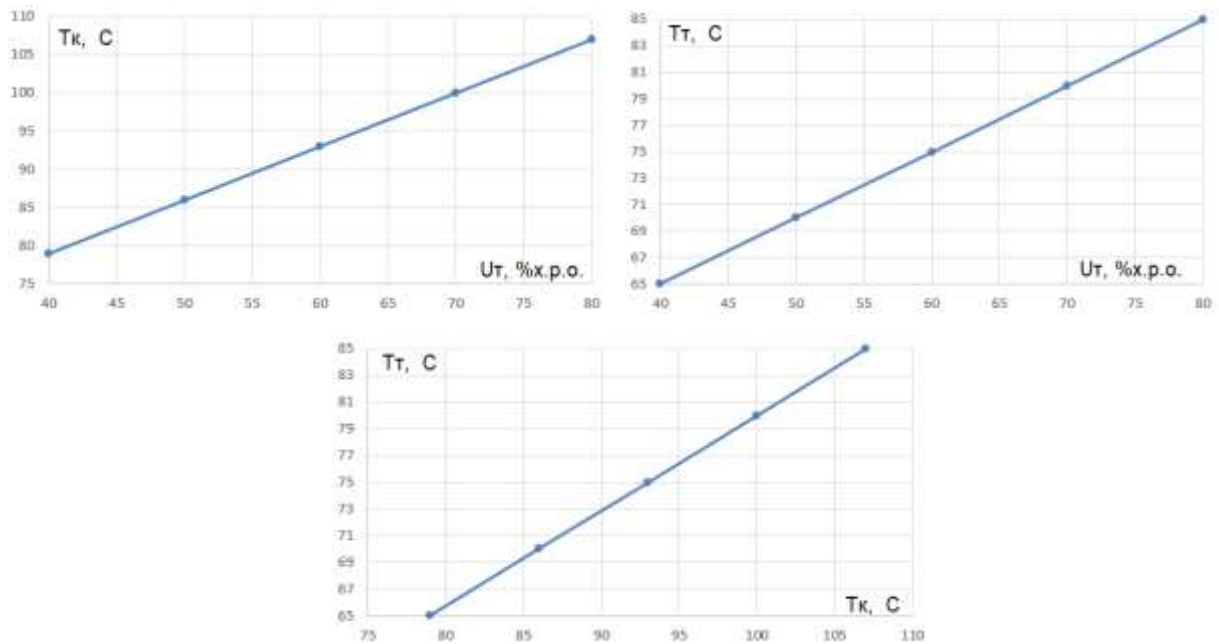


Рис. 2.12 – Статичні характеристики ОК

Структурна ідентифікація моделей статички зводиться до вибору виду рівняння регресії $y = \Phi(\bar{x})$. Структурна ідентифікація є вихідним пунктом загального завдання ідентифікації моделей статички. Але, як показує практика, вибрати вид моделі відразу, як правило, не вдається. Причому недоліки вибраної моделі стають очевидними тільки після етапу її параметричної ідентифікації. Усунення недоліків моделі вимагає повернення до процедури структурної ідентифікації. Таких кроків може бути кілька, тобто процедура ідентифікації носить ітераційний характер.

Для проведення параметричної ідентифікації моделі статички ОК доцільно використовувати метод найменших квадратів. Суть методу полягає в пошуку такого вектора параметрів $\bar{a}^*$ вибраної моделі, що забезпечував би мінімальну суму квадратів розходження між значеннями вихідної змінної об'єкта y , отриманих у результаті експерименту y_i , $i = \overline{1, n}$ при значеннях вхідних змінних $\bar{x}_i$, і вихідної змінної моделі об'єкту y_m , обчисленої при тих же значеннях $\bar{x}$, тобто

$$\vec{a}^* = \arg \min \left\{ I(\vec{a}) = \sum_{i=1}^n (y_i(\vec{x}_i) - y^M(\vec{a}, \vec{x}_i))^2 \right\}$$

Проводимо структурну ідентифікацію моделей каналів ОК.

$$T_K = a_1 \cdot U_T + a_0$$

$$T_T = b_1 \cdot T_K + b_0$$

Проводимо параметричну ідентифікацію моделей каналів ОК.

$$a_1 = \Delta T_K / \Delta U_T = (107 - 100) / (80 - 70) = 7 / 10 = 0,7^\circ\text{C} / \% \text{x.p.o.}$$

$$a_0 = T_K - a_1 \cdot U_T = 100 - 0,7 \cdot 70 = 100 - 49 = 51^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{T_K = 0,7 \cdot U_T + 51}$$

$$b_1 = \Delta T_T / \Delta T_K = (85 - 80) / (107 - 100) = 5 / 7$$

$$b_0 = T_T - b_1 T_K = 80 - 5 / 7 \cdot 100 = 60/7^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{T_T = 5 / 7 \cdot T_K + 60/7}$$

2.3 Ідентифікація моделей збурень об'єкту керування

Слід зазначити, що неконтрольовані збурення на ОК не є чітко певними фізичними параметрами. Вони є певною математичною абстракцією, про яку відомою є лише реакція системи на них. Діапазон їх зміни доцільно прив'язувати до фізичного діапазону зміни управляючих дій. З теорії автоматичного керування відомо, що фізичний діапазон зміни управляючої дії лежить у межах $0...100\% \text{ x.p.o.}$, а діапазон зміни неконтрольованих збурень може становити приблизно $10...15\%$ від діапазону зміни управляючої дії, тобто становить приблизно $10...15\% \text{ x.p.o.}$ (якщо неконтрольовані збурення прикладені до управляючої дії), або $(10...15) \cdot K_0$ (якщо неконтрольовані збурення прикладені до регульованої координати).

В інженерній практиці стохастичні моделі вхідних дій звичайно представляють у формі випадкового процесу з декількома адитивними складовими, наприклад

$$f(t) = \bar{f}(t) + \tilde{f}^{\text{II}}(t) + \tilde{f}^{\text{C}}(t) + \tilde{f}^{\text{III}}(t)$$

де $\bar{f}(t)$ – детермінована повільно змінювана складова;

$\tilde{f}^{\text{II}}(t)$ – квазидетермінована складова;

$\tilde{f}^{\text{C}}(t)$ – стохастична центрована складова – центрований випадковий процес;

$\tilde{f}^{\text{III}}(t)$ – високочастотна стохастична складова – шум.

Варто враховувати, що складові $\bar{f}(t)$, $\tilde{f}^{\text{II}}(t)$, $\tilde{f}^{\text{C}}(t)$ і їх сума є відносно низькочастотними діями, несприятливі наслідки яких САК повинна і може компенсувати. Складова $\tilde{f}^{\text{III}}(t)$ пов'язана або із шумами у вимірювальних каналах, або з високочастотними збуреннями, наслідки яких, у силу особливостей каналів керування ОК, скомпенсовані бути не можуть. В обох випадках $\tilde{f}^{\text{III}}(t)$ в САК повинні бути відфільтровані (не «пропущені» на вхід

управляючого пристрою). Для вирішення цього завдання і повинні бути отримані властивості $\tilde{f}^{\text{ш}}(t)$.

Початок ідентифікації пов'язаний з тим, що відповідно до обраної моделі $f(t)$ прийнято рішення про віднесення складових реального сигналу до тієї або іншої складової моделі.

Для того, щоб зробити це відносно надійно, необхідно мати апіорну інформацію про властивості об'єкту за каналами керування. Якщо представити їх моделлю першого порядку із запізненням τ_0 , то за співвідношенням середніх періодів $T_{\text{п}}$ цих складових і τ_0 , можна провести поділ сигналу:

- якщо для складової $T_{\text{п}} < 4\tau_0$, то її доцільно віднести до $\tilde{f}^{\text{ш}}(t)$;
- якщо для складової $40\tau_0 > T_{\text{п}} > 4\tau_0$, то її доцільно віднести до $\tilde{f}^{\text{с}}(t) + \tilde{f}^{\text{п}}(t)$
- якщо для складової $T_{\text{п}} > 40\tau_0$, то її доцільно віднести до $\bar{f}(t)$

Моделі неконтрольованих збурень доцільно представляти як суму чотирьох складових. Причому, детерміновану складову (f_1 , f_2) доцільно привести до управляючої дії, а квазидетерміновану та стохастичну складові (f_c) доцільно привести до регульованої координати.

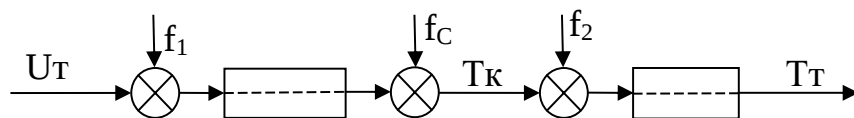


Рис. 2.13 – Структурна схема додання координатних збурень

Оскільки можливості отримати реальні експериментальні дані немає, то з навчальною метою можна скористатися генератором даних. Для генерації результатів пасивного експерименту з метою дослідження неконтрольованих збурень треба бути готовими до відповіді на наступні питання.

Номер в журналі викладача – 8

$T_K (u = 0\% \text{х.р.о.}) = 20^\circ\text{C}$

$$T_K^{3ДН} = 100^{\circ}\text{C}$$

$$\tau_{U_T-T_K} = 28 \text{ с.}$$

Результати генерації випадкового процесу, що відповідає реакції ОК на неконтрольовані збурення, наведені на рис. 2.14.

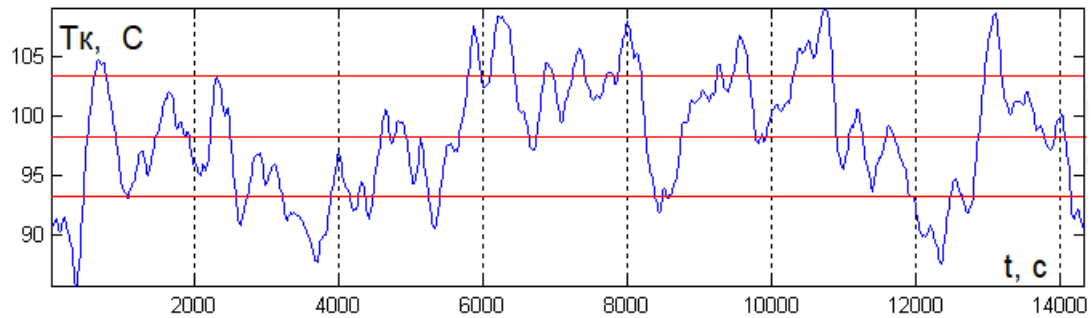


Рис. 2.14 – Результати генерації випадкового процесу за T_K

Для ідентифікації моделей неконтрольованих координатних збурень можна використовувати програму IdSoft середовища Матлаб.

Першим етапом ідентифікації моделі неконтрольованих збурень є оцінювання імовірнісних характеристик відповідних випадкових процесів, а саме щільності імовірності, математичного очікування, дисперсії, середньоквадратичного відхилення, середньоквадратичного періоду (СКП), кількості СКП у реалізації випадкового процесу, нормованої кореляційної функції і спектральної щільності випадкового процесу.

Результати оцінювання імовірнісних характеристик випадкового процесу, що відповідає неконтрольованим збуренням, наведені на рис. 2.15.

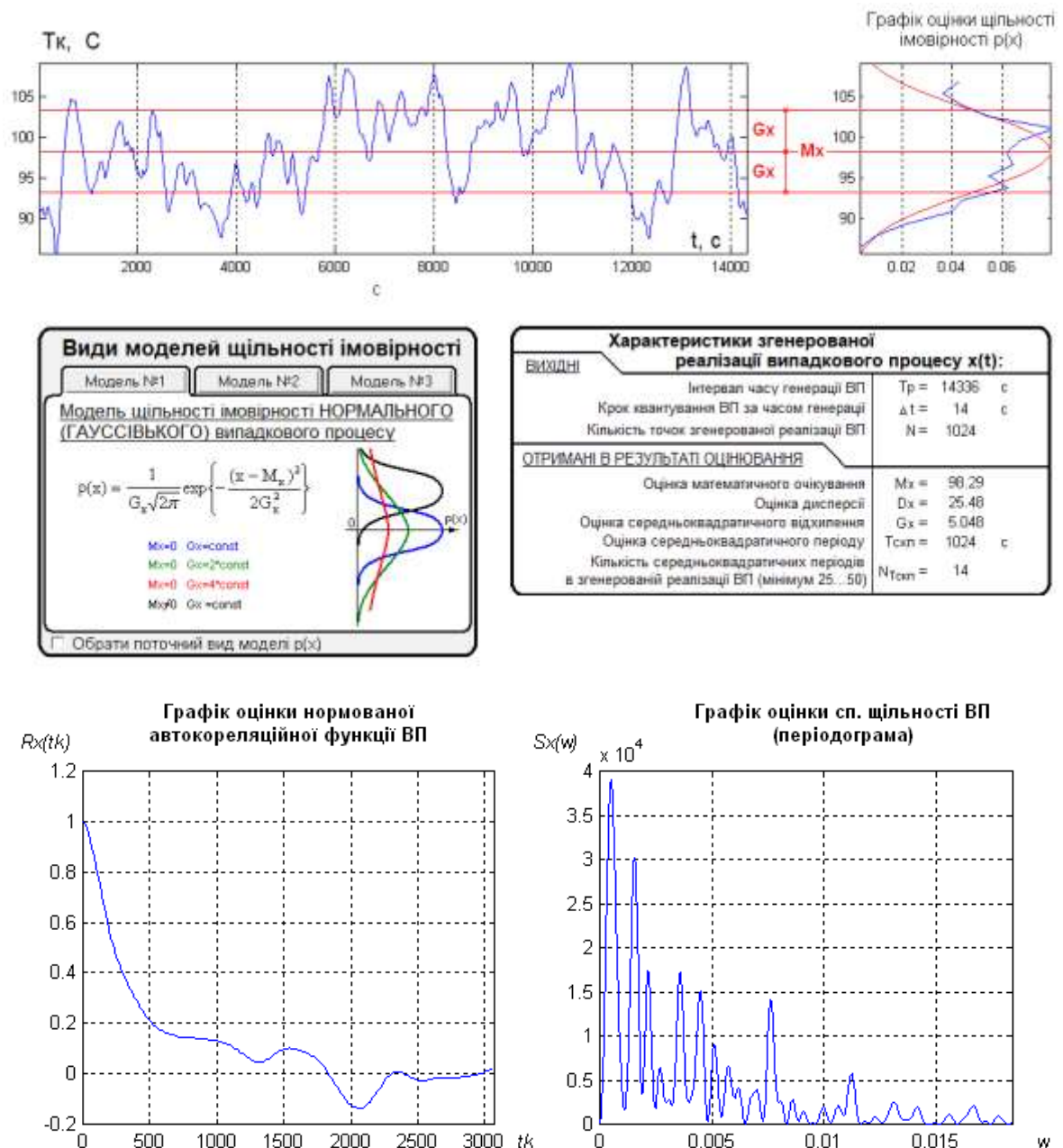


Рис. 2.15 – Результати оцінювання імовірнісних характеристик випадкового процесу

За результатами оцінювання щільності імовірності випадкового процесу обирається його модель. В якості моделі обираємо нормальний випадковий процес:

$$p(f) = \frac{1}{\sigma_f \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(f - m_f)^2}{2\sigma_f^2}}$$

За результатами оцінювання нормованих кореляційних функцій з набору типових вибираємо два варіанти моделей кореляційних функцій і спектральних щільностей:

Модель №1

$$R_f(\tau_K) = D_f \cdot e^{-\alpha \cdot |\tau_K|}$$

$$S_f(\omega) = \frac{D_f \cdot 2\alpha}{(\omega^2 + \alpha^2)}$$

Модель №2

$$R_f(\tau_K) = D_f \cdot e^{-\alpha \cdot |\tau_K|} \cdot (1 - \alpha \cdot |\tau_K|)$$

$$S_f(\omega) = \frac{D_f \cdot 4\alpha\omega^2}{(\omega^2 + \alpha^2)^2}$$

Модель №3

$$R_f(\tau_K) = D_f \cdot e^{-\alpha \cdot |\tau_K|} \cdot (1 + \alpha \cdot |\tau_K|)$$

$$S_f(\omega) = \frac{D_f \cdot 4\alpha^3}{(\omega^2 + \alpha^2)^2}$$

Параметрами моделей випадкових складових збурень є коефіцієнт спаду α і коефіцієнт коливальності β . Пошук значень цих параметрів і називають параметричною ідентифікацією моделі стохастичної складової збурень. Вона ведеться, як правило, у два етапи: 1) вибір початкових наближень параметрів $\hat{\alpha}^0, \hat{\beta}^0$; 2) пошук значень параметрів, які забезпечують найкраще наближення моделі до її оцінки.

При виборі початкових наближень параметрів можна користуватися рекомендаціями, які викладені в програмі. При параметричній оптимізації моделі використовується пошукова процедура, що використовує квадратичний критерій. При цьому вирішується задача

$$\hat{a}^* = \arg \min \left[\left(\hat{R}_{\hat{\tau}}(\tau_K) - R_{\hat{\tau}}^M(\tau_K) \right)^2 \right], \quad \bar{a} = \{\alpha, \beta\}^T.$$

Підсумкові результати ідентифікації моделі неконтрольованих збурень наведені на рис. 2.16.

Таблиця результатів ідентифікації						
Номер моделі	α	β	A	C	γ	Значення критерію оптимізації
✓ 1	0.00275	*	*	*	*	1.2826
✓ 2	0.0009	*	*	*	*	5.9653
✓ 3	0.00595	*	*	*	*	2.0737

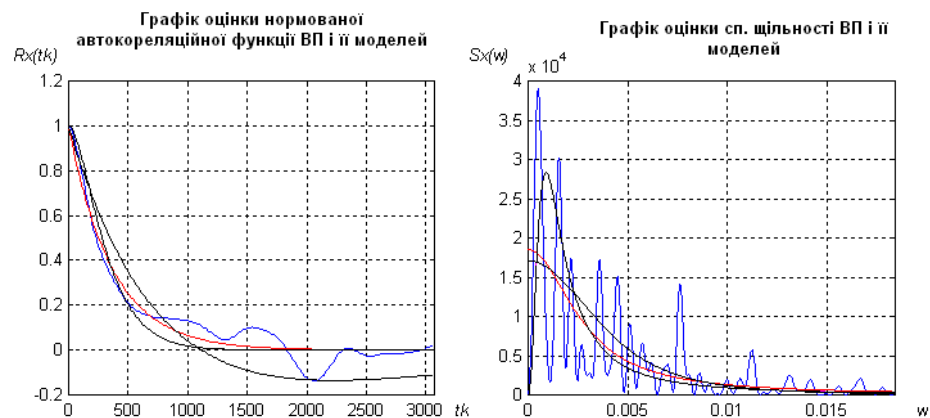


Рис. 2.16 – Підсумкові результати ідентифікації моделі неконтрольованих збурень

Як видно з результатів ідентифікації моделі неконтрольованих збурень (рис. 3.7) кращою є модель №1, тому що для цієї моделі меншими є середньоквадратичні відхилення моделі від оцінок кореляційних функцій.

2.4 Реалізації моделей у середовищі імітаційного моделювання і підтвердження їх відповідності експериментальним даним

На цьому етапі роботи в пакеті Simulink середовища Матлаб для всіх каналів ОК розробляється схема моделювання як для моделі 1-го, так і для моделі 2-го порядку. Результати параметричної ідентифікації моделей каналів ОК зводимо в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати параметричної ідентифікації моделей каналів ОК

Канал ОК	Модель 1-го порядку	Модель 2-го порядку
«У _Т – Т _К »	$W_{U_T-T_K}^O(p) = \frac{0,7 \cdot e^{-28p}}{9,2p + 1}$	$W_{U_T-T_K}^O(p) = \frac{0,7 \cdot e^{-24,2p}}{(6,2p + 1)^2}$
«У _Т – Т _Т »	$W_{U_T-T_T}^O(p) = \frac{0,5 \cdot e^{-114,9p}}{58,8p + 1}$	$W_{U_T-T_T}^O(p) = \frac{0,5 \cdot e^{-90p}}{(39,8p + 1)^2}$
«Т _К – Т _Т »	$W_{T_K-T_T}^O(p) = \frac{5/7 \cdot e^{-75,1p}}{57,9p + 1}$	$W_{T_K-T_T}^O(p) = \frac{5/7 \cdot e^{-56,2p}}{(37,5p + 1)^2}$

Для каналу «У_Т – Т_К» передаточні функції моделей 1-го та 2-го порядку ОК мають вигляд:

$$W_{U_T-T_K}^O(p) = \frac{0,7 \cdot e^{-28p}}{9,2p + 1} ; W_{U_T-T_K}^O(p) = \frac{0,7 \cdot e^{-24,2p}}{(6,2p + 1)^2}$$

Моделі повинні мати один вхід, вихід моделей виводиться на графік в одній системі координат. У цю ж систему координат зводяться експериментальні дані. Для додавання в схему експериментальних даних попередньо готують експериментальні дані в табличному виді і реалізують їх у компоненті Look-Up-Table. Для досліджуваного ОК експериментальні дані зведено в таблицю 2.3. Схема моделювання каналу управління ОК наведена на рис. 2.17 Результати моделювання наведені на рис. 2.18.

Табл. 2.3 – Експериментальні дані за каналом «Ут – Тк»

t, c	T _к , °C	t, c	T _к , °C	t, c	T _к , °C	t, c	T _к , °C	t, c	T _к , °C
0	100	30	101,65	38	104,6	46	106,23	60	106,93
21	100	32	102,43	40	105,15	48	106,44	65	106,96
26	100,42	34	103,21	42	105,6	50	106,6	70	107
28	100,95	36	103,95	44	105,95	55	106,83	75	107

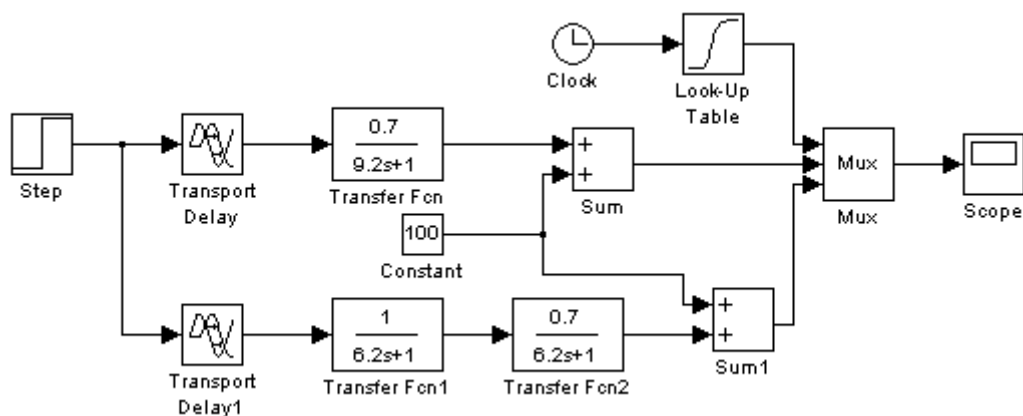


Рис. 2.17 – Схема моделювання ОК за каналом «Ут – Тк»

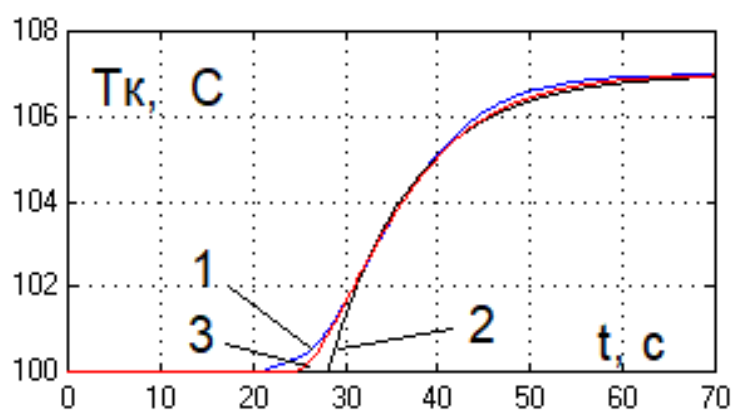


Рис. 2.18 – Результати моделювання ОК по каналу «Ут – Тк»: 1 – кусочно-лінійна апроксимація експериментальних даних; 2 – модель 1-го порядку; 3 – модель 2-го порядку

Для каналу « $U_T - T_T$ » передаточні функції моделей 1-го та 2-го порядку ОК мають вигляд:

$$W_{U_T-T_T}^O(p) = \frac{0,5 \cdot e^{-114,9p}}{58,8p+1}; W_{U_T-T_T}^O(p) = \frac{0,5 \cdot e^{-90p}}{(39,8p+1)^2}$$

Експериментальні дані за каналом зведено в таблицю 2.4, схема моделювання наведена на рис. 2.19, а результати моделювання – на рис. 2.20.

Табл. 2.4 – Експериментальні дані за каналом « $U_T - T_T$ »

t, с	T_T , °C	t, с	T_T , °C	t, с	T_T , °C	t, с	T_T , °C	t, с	T_T , °C
0	80	110	80,54	150	82,17	200	83,9	300	84,92
70	80	120	80,88	160	82,58	220	84,3	350	84,98
80	80,03	130	81,28	170	82,97	250	84,67	400	85
100	80,27	140	81,72	180	83,32	270	84,81	450	85

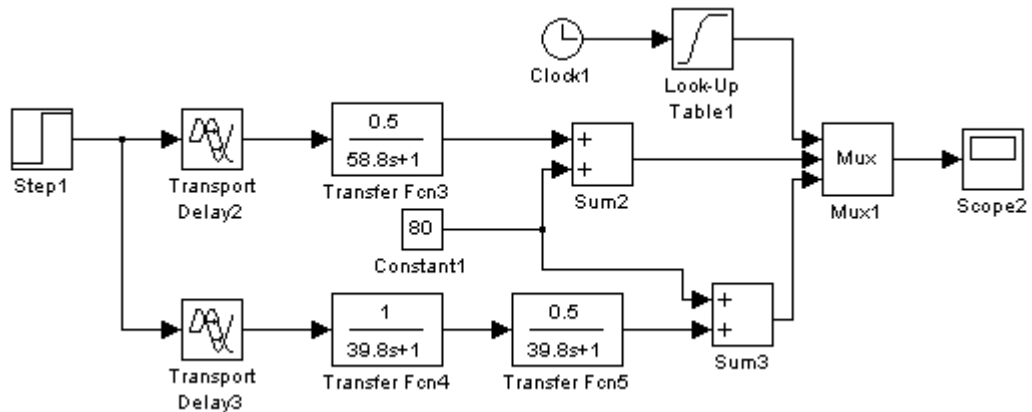


Рис. 2.19 – Схема моделювання каналу управління ОК
за каналом « $U_T - T_T$ »

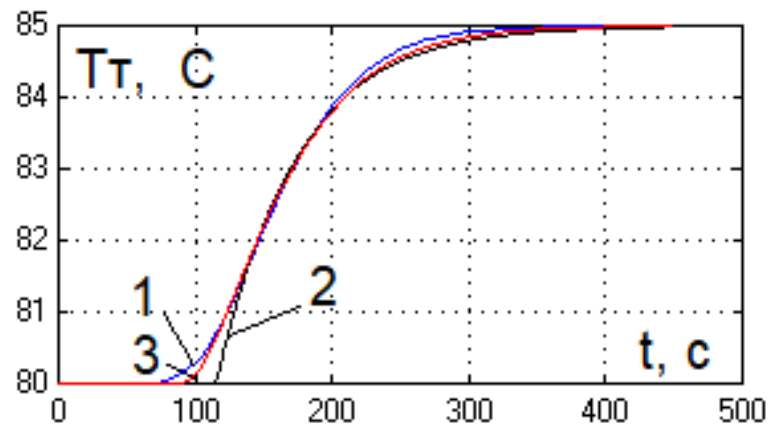


Рис. 2.20 – Результати моделювання ОК за каналом «Ут – Тт»: 1 – кусочно-лінійна апроксимація експериментальних даних; 2 – модель 1-го порядку; 3 – модель 2-го порядку

Для каналу «Тк – Тт» передаточні функції моделей 1-го та 2-го порядку ОК мають вигляд:

$$W_{Тк-Тт}^O(p) = \frac{5/7 \cdot e^{-75,1p}}{57,9p+1}; W_{Тк-Тт}^O(p) = \frac{5/7 \cdot e^{-56,2p}}{(37,5p+1)^2}$$

Експериментальні дані за каналом «Тк – Тт» зведено в таблицю 2.5, схема моделювання каналу наведена на рис. 2.21 а результати моделювання – на рис. 2.22.

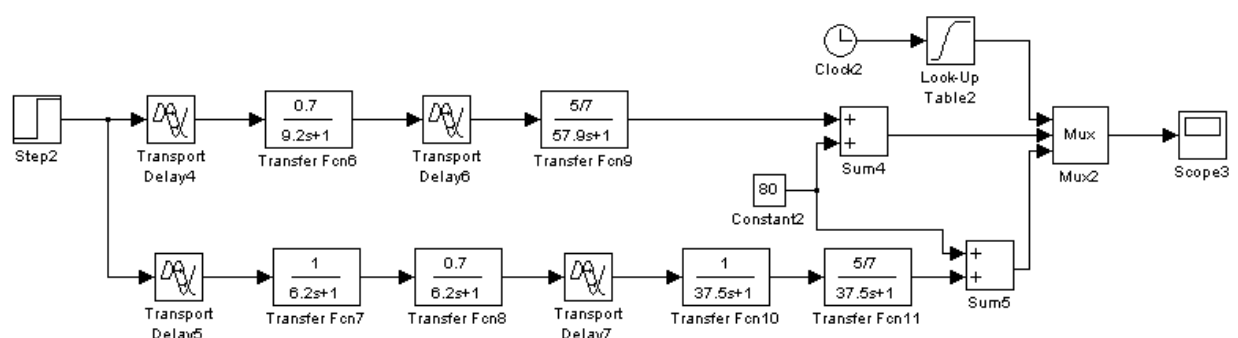


Рис. 2.21 – Схема моделювання каналу управління ОК за каналом «Тк – Тт»

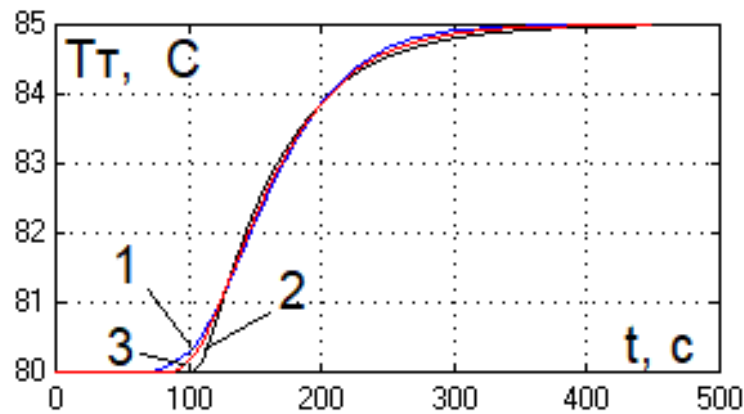


Рис. 2.22 – Результати моделювання ОК за каналом «Тк – Тт»: 1 – кусочно-лінійна апроксимація експериментальних даних; 2 – модель 1-го порядку; 3 – модель 2-го порядку

Як видно з рис. 2.18, 2.20 і 2.22, моделі ОК як 1-го, так і 2-го порядків досить точно описують експериментальні дані, але моделі 2-го порядку точніші.

Моделі статичних характеристик:

$$T_K = 0,7 \cdot U_T + 51$$

$$T_T = 5 / 7 \cdot T_K + 60/7$$

Для виконання цього етапу роботи скористаємося можливостями Матлаб (Simulink). Експериментальні дані для перевірки моделі статички наведені в таблиці 2.1, схема моделювання наведена на рис. 2.23, а результати моделювання – на рис. 2.24.

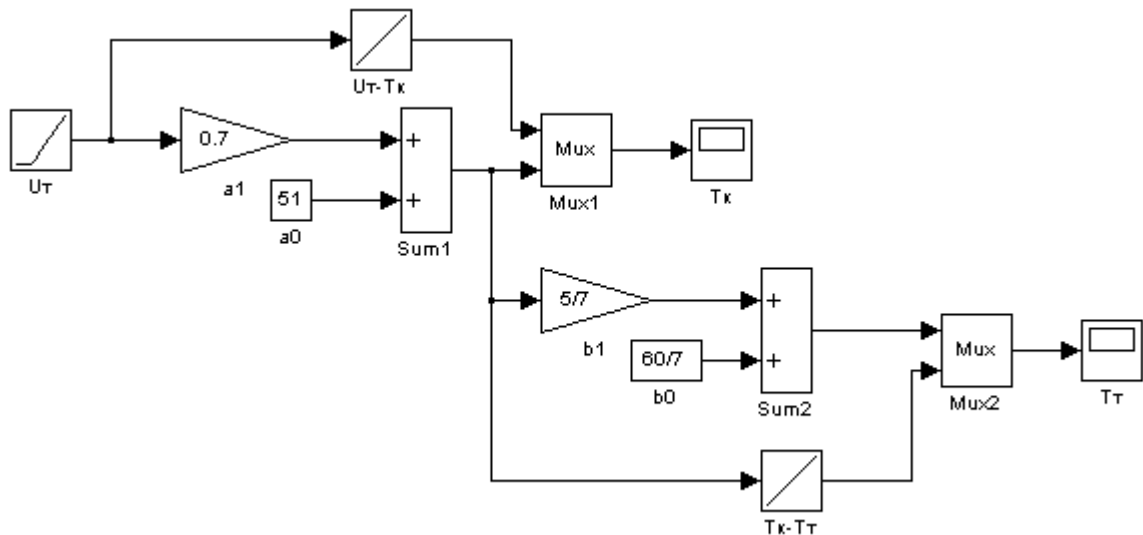


Рис. 2.23 – Схеми моделювання статичних характеристик ОК

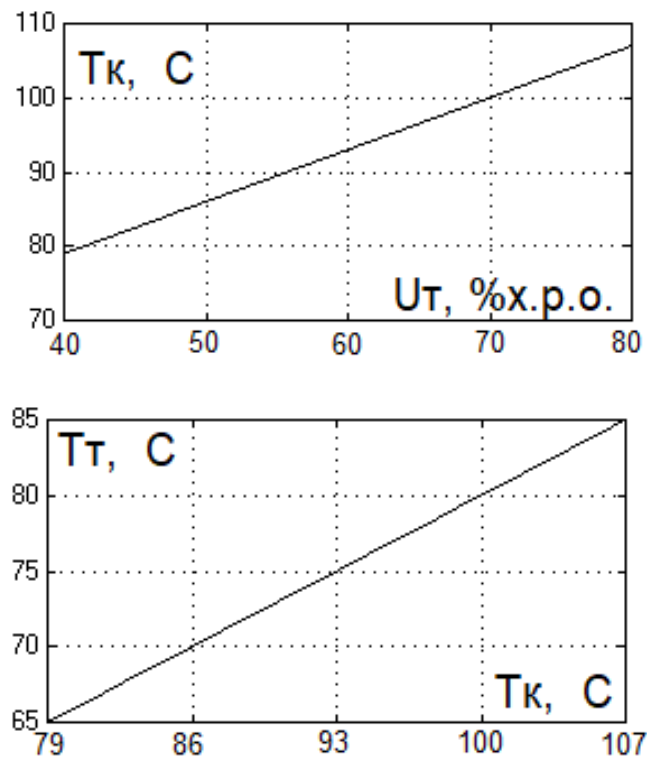


Рис. 2.24 – Результати моделювання статичних характеристик ОК

Як видно із графіків (рис. 2.24), моделі статичних характеристик точно відтворюють експериментальні дані.

Повна модель каналів ОК містить у собі моделі каналів управління з урахуванням статичної характеристики. Схема моделювання каналів ОК

наведена на рис. 2.25, а результати моделювання – на рис. 2.26, 2.27.

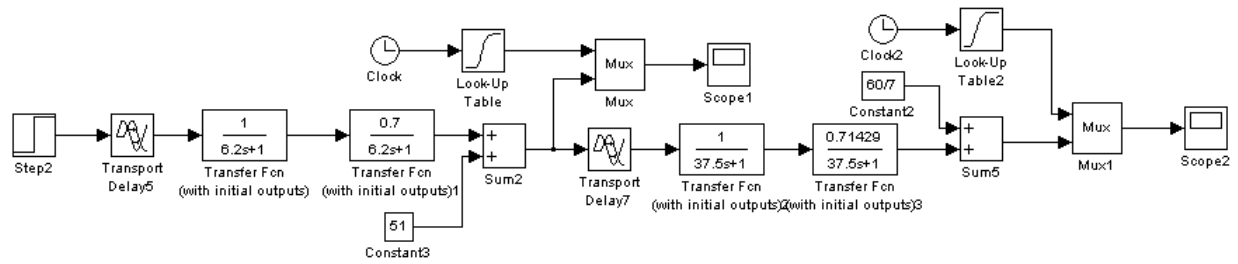


Рис. 2.25 – Схема моделювання повної моделі каналів ОК

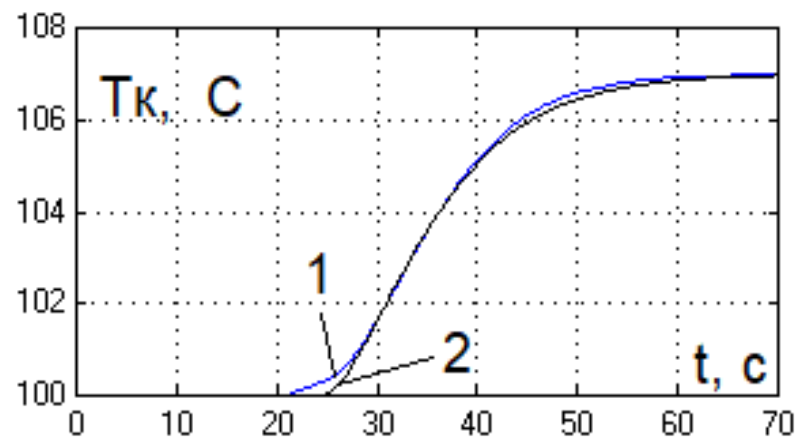


Рис. 2.26 – Результати моделювання за каналом «У_т – Т_к»: 1 – експериментальні дані, 2 – модель

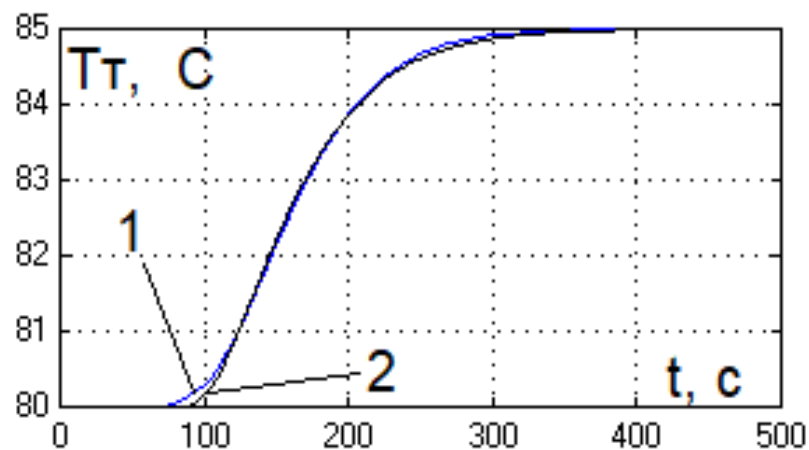


Рис. 2.27 – Результати моделювання за каналом «У_т – Т_т»: 1 – експериментальні дані, 2 - модель

Як видно з результатів моделювання (рис. 2.26, 2.27), модель ОК достатньо точно відображає експериментальні дані. Це означає, що отримана модель каналів ОК є адекватною.

Для відтворення моделі збурень як стохастичних процесів (СП) із заданими властивостями будемо використовувати метод формуючого фільтру. Його можна представити у вигляді такої структурної схеми моделювання

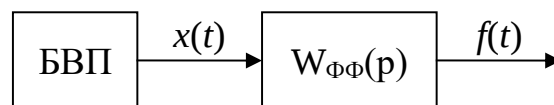


Рис. 2.28 – Структурна схема моделі СП

Для відтворення моделі стохастичного процесу із заданими властивостями спочатку треба визначити передаточну функцію формуючого фільтра $W_{\Phi\Phi}(p)$. Відомо, що спектральні щільності вхідного $x(t)$ і вихідного $f(t)$ сигналів взаємозалежні

$$|W_{\Phi\Phi}(j\omega)|^2 = \frac{S_f(\omega)}{S_x(\omega)} = W_{\Phi\Phi}(j\omega) \cdot W_{\Phi\Phi}(-j\omega)$$

Якщо випадковий процес $x(t)$ має властивості білого шуму, то його спектральна щільність $S_x(\omega) = a = \text{const}$. Вона може бути розрахована за формулою

$$S_x(\omega) = G_x^2 \frac{2 \cdot \Delta t_z}{3},$$

де G_x - середньоквадратичне відхилення процесу $x(t)$, Δt_z – крок генерації випадкового процесу.

Надалі до передаточної функції формуючого фільтра підставляють формули для спектральних щільностей вхідного й вихідного сигналу.

Для моделі №1

$$|W_{\phi\phi}(j\omega)|^2 = \frac{S_f(\omega)}{S_x(\omega)} = W_{\phi\phi}(j\omega) \cdot W_{\phi\phi}(-j\omega) = \frac{\frac{D_f 2\alpha}{-(j)^2 \omega^2 + \alpha^2}}{a}$$

$$|W_{\phi\phi}(j\omega)|^2 = \frac{1}{a} \cdot \frac{D_f 2\alpha}{(\alpha - j\omega)(\alpha + j\omega)} = \left(\frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \frac{\sqrt{D_f 2\alpha}}{\alpha + j\omega} \right) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \frac{\sqrt{D_f 2\alpha}}{\alpha - j\omega} \right)$$

Тому
$$W_{\phi\phi}(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \frac{\sqrt{D_f 2\alpha}}{\alpha + j\omega}.$$

В операторній формі, після заміни $j\omega = p$, передаточна функція буде мати такий вид:

$$W_{\phi\phi}(p) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \frac{\sqrt{D_f 2\alpha}}{\alpha + p} = \frac{\sqrt{D_f 2\alpha}}{\sqrt{a} \left(\frac{1}{\alpha} p + 1 \right)} = \frac{\sqrt{2D_f / (a \cdot \alpha)}}{\frac{1}{\alpha} p + 1}.$$

$$W_{\phi\phi}(p) = \frac{k}{Tp + 1}, \text{ де } k = \sqrt{\frac{2D_f}{S_x(\omega) \cdot \alpha}}; T = \frac{1}{\alpha}$$

$$\sigma_x = \sigma_f / 2 = 5,048 / 2 = 2,524$$

$$\Delta t_\Gamma = \frac{1}{(2 \dots 3)\alpha} = \frac{1}{3 \cdot 0,00275} \dots \frac{1}{2 \cdot 0,00275} = 121 \dots 182 \approx 150c$$

$$S_x(\omega) = \sigma_x^2 \cdot \frac{2 \cdot \Delta t_\Gamma}{3} = 2,524^2 \cdot \frac{2 \cdot 150}{3} = 637$$

$$k = \sqrt{\frac{2D_f}{S_x(\omega) \cdot \alpha}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 25,48}{637 \cdot 0,00275}} = 5,39; T = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{0,00275} = 364$$

$$W_{\phi\phi}(p) = \frac{5,39}{364p + 1}$$

Налаштування елемента Band-Limited White Noise:

Noise power = $S_x(\omega) = 637$;

Sample time = $\Delta t_\Gamma = 150$ c;

Seed = 1.

Кількість точок моделювання $N = 1024$

$Tp = N \cdot \Delta t_\Gamma = 1024 \cdot 150 = 153\,600$ c

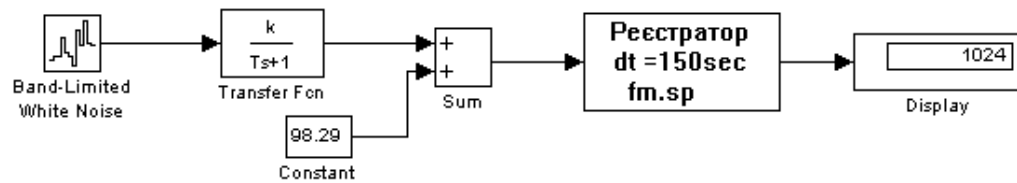


Рис. 2.29 – Схема моделювання формуючого фільтра

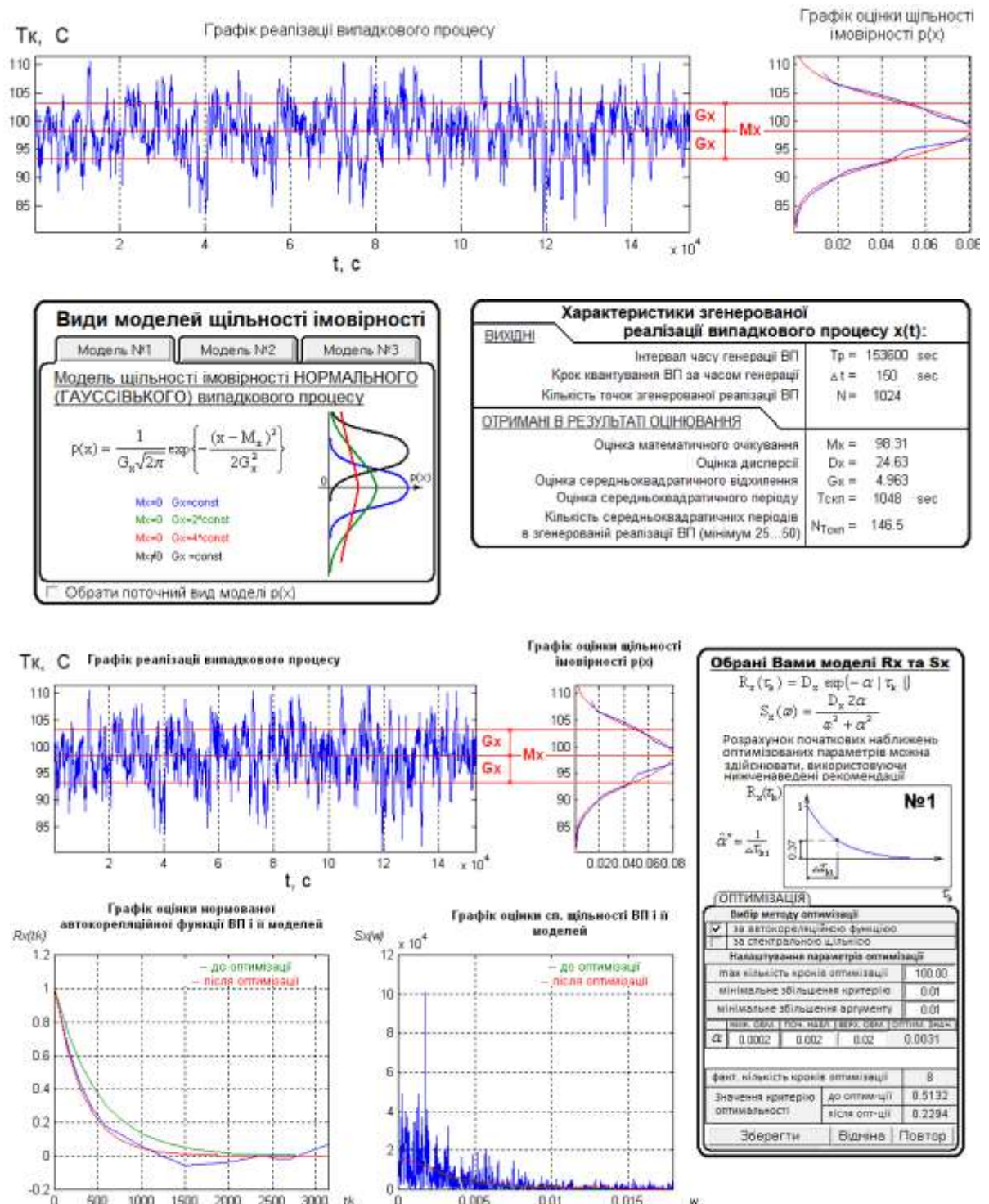


Рис. 2.30 – Результати параметричної ідентифікації моделі випадкового процесу з розрахунковими параметрами формуючого фільтра

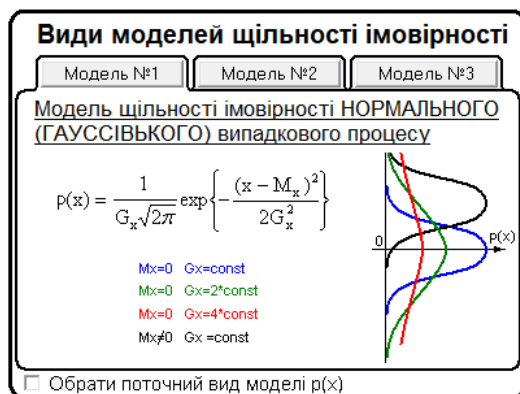
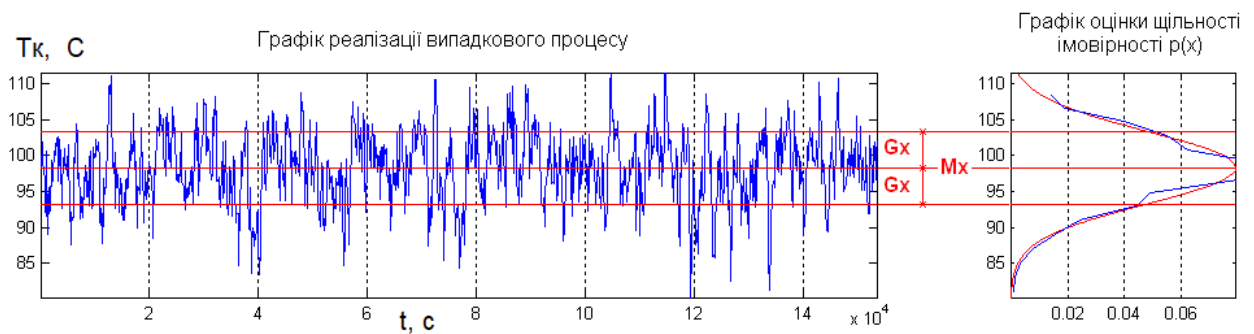
$$\Delta M = \frac{|M - \hat{M}|}{M} \cdot 100 = \frac{|98,31 - 98,29|}{98,31} \cdot 100 = 0\%$$

$$\Delta \sigma = \frac{|\sigma - \hat{\sigma}|}{\sigma} \cdot 100 = \frac{|4,963 - 5,048|}{4,963} \cdot 100 = 1,7\%$$

$$\Delta \alpha = \frac{|\alpha - \hat{\alpha}|}{\alpha} \cdot 100 = \frac{|0,0031 - 0,00275|}{0,0031} \cdot 100 = 11,3\%$$

Похибка відтворення α суттєво перевищує 5%, тому проведемо коригування параметрів формуючого фільтра:

$$k = \frac{\hat{\sigma}}{\sigma} \cdot k_{\Pi} = \frac{5,048}{4,734} \cdot 5,39 = 5,75; T = 400 \text{ с}$$



Характеристики згенерованої реалізації випадкового процесу x(t):	
ВИХІДНІ	
Інтервал часу генерації ВП	Tr = 153600 sec
Крок квантування ВП за часом генерації	Δt = 150 sec
Кількість точок згенерованої реалізації ВП	N = 1024
ОТРИМАНІ В РЕЗУЛЬТАТІ ОЦІНЮВАННЯ	
Оцінка математичного очікування	Mx = 98.31
Оцінка дисперсії	Dx = 25.51
Оцінка середньоквадратичного відхилення	Gx = 5.05
Оцінка середньоквадратичного періоду	Tskп = 1056 sec
Кількість середньоквадратичних періодів в згенерованій реалізації ВП (мінімум 25...50)	N _{Tskп} = 145.5

Рис. 2.31 – Результати параметричної ідентифікації моделі випадкового процесу з уточненими параметрами формуючого фільтра

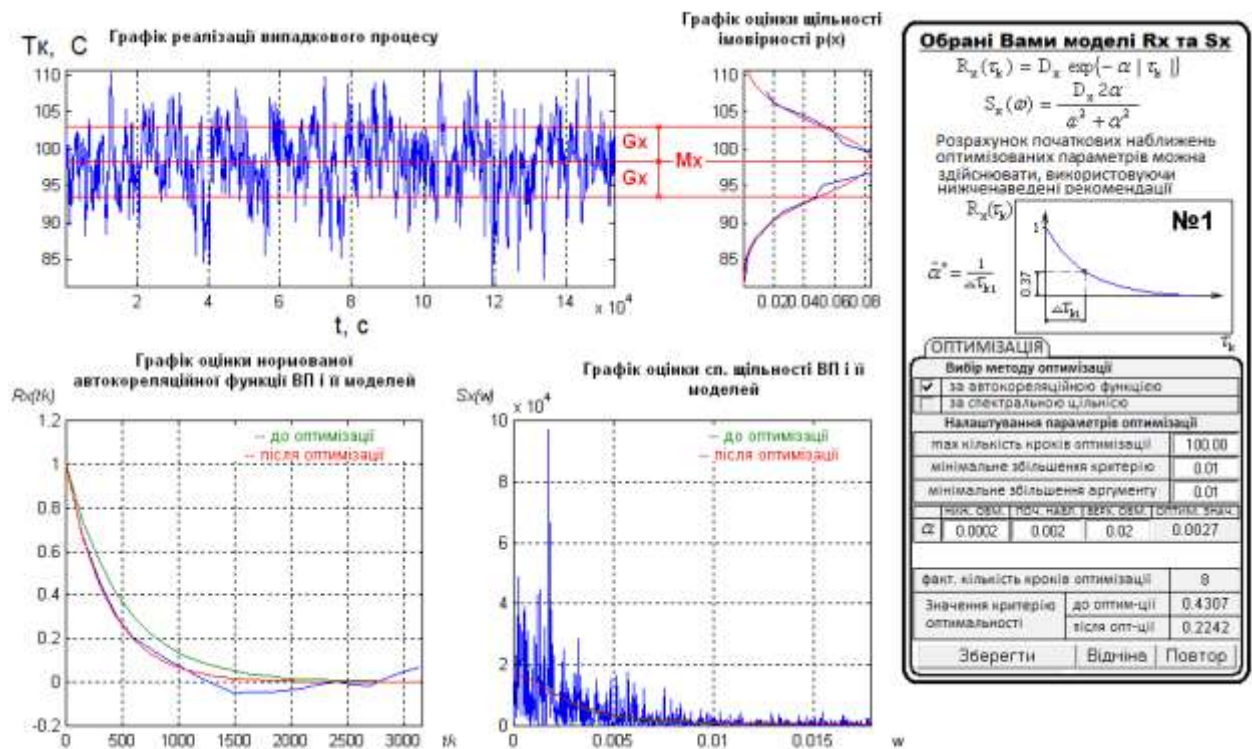


Рис. 2.31 (закінчення) – Результати параметричної ідентифікації моделі випадкового процесу з уточненими параметрами формуючого фільтра

$$\Delta M = \frac{|M - \hat{M}|}{M} \cdot 100 = \frac{|98,31 - 98,29|}{98,31} \cdot 100 = 0\%$$

$$\Delta \sigma = \frac{|\sigma - \hat{\sigma}|}{\sigma} \cdot 100 = \frac{|5,05 - 5,048|}{5,05} \cdot 100 = 0\%$$

$$\Delta \alpha = \frac{|\alpha - \hat{\alpha}|}{\alpha} \cdot 100 = \frac{|0,0027 - 0,00275|}{0,0027} \cdot 100 = 1,85\%$$

Похибка відтворення M , σ_f , α і β менша від 5%, а значить точність моделі неконтрольованих збурень є достатньою.

Кінцева передаточна функція формуючого фільтра.

$$W_{\Phi\Phi}(p) = \frac{5,75}{400p + 1}$$

Повна модель ОК містить у собі повну модель каналів і модель неконтрольованих збурень. Схема моделювання повної моделі ОК наведена на рис. 2.32, а результати моделювання – на рис. 2.33.

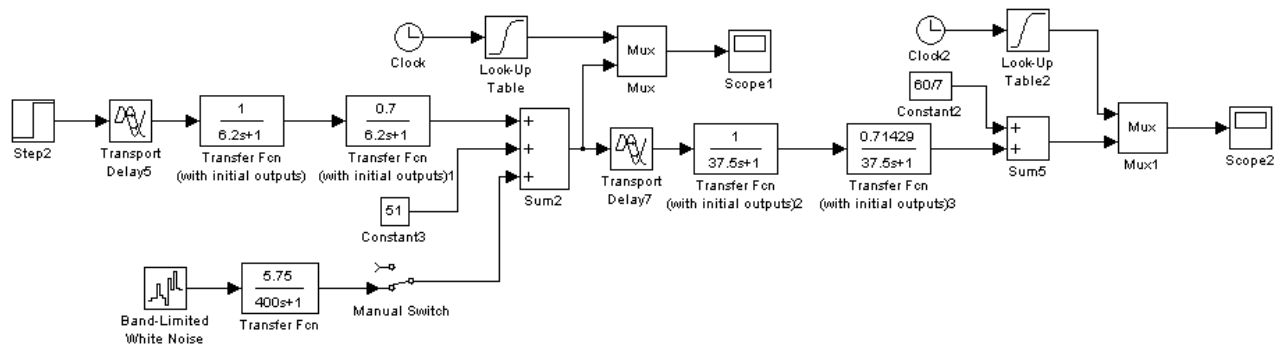


Рис. 2.32 – Схема моделювання повної моделі ОК

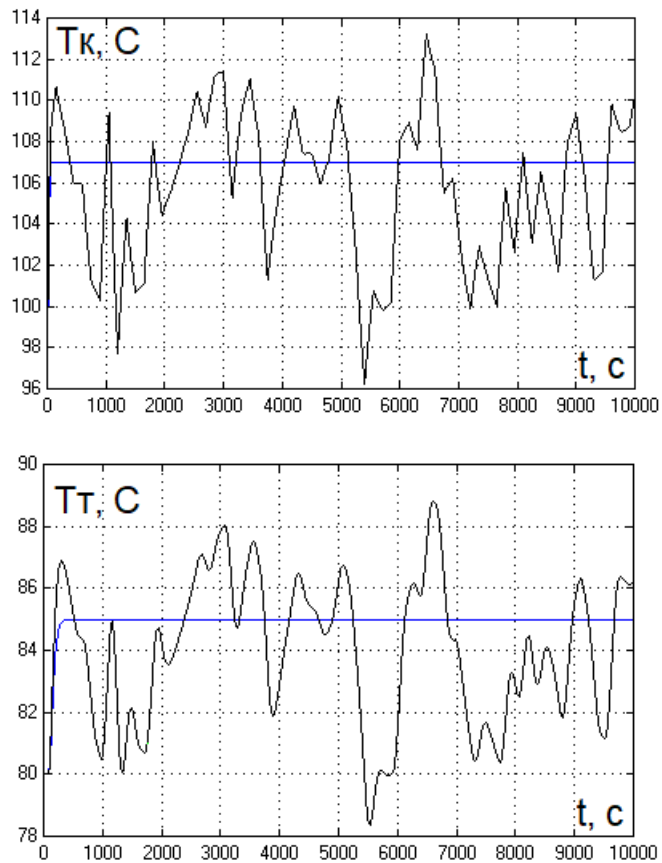


Рис. 2.33 – Результати моделювання повної моделі ОК

2.5 Висновки за розділом

В результаті виконання цього розділу була проведена ідентифікація моделі процесу гарячого бездимного копчення риби, як об'єкту керування. Були ідентифіковані канали управління, в результаті чого було з'ясовано, що всі вищезгадані канали мають статичні властивості, тобто властивостями самовирівнювання. Це пов'язано з тим, що в універсальній коптильній камері протікають процеси, які за своєю природою мають такі властивості. При складанні структурних схем моделювання та їх реалізації були отримані результати, які мають достатній ступінь відповідності реальним передаточних функцій, що свідчить про правильність проведення параметричної ідентифікації моделей каналів ОК.

3. Розробка і параметрична оптимізація алгоритмів регулювання, порівняльний аналіз САР

3.1 Формулювання задач керування, вимог до їх розв'язку і вибір основних принципів побудови автоматичних систем

Загальною метою керування є керування матеріальними та енергетичними потоками для отримання властивостей продукту необхідного виду і якості.

Із загальної мети керування можна виділити окремі задачі:

- підтримання параметрів стану об'єкту керування (T_t) на його заданому значенні ($T_t^{здн}$) – задача регулювання.
- пристосування в процесі роботи об'єкту управління до його змінних властивостей - задача адаптації;
- забезпечення ефективних режимів роботи об'єкту керування - задача оптимізації;
- забезпечити ввімкнення і вимкнення при пусках, зупинках, аварійних ситуаціях - задача логічного керування.

Необхідно і доцільно автоматизувати кожен із завдань управління.

Для завдання регулювання автоматизація необхідна для автоматичного регулювання заданої змінної в околиці бажаного значення із заданою точністю без фізичної участі людини. Для якісної і економічно доцільною реалізації технологічного процесу гарячого бездимного копчення риби необхідно регулювати температуру контрольної тушки (T_t).

Для завдання адаптації необхідна автоматизація пристосування в процесі роботи об'єкта управління до його змінних властивостей, заданим. Розглянутий технологічний процес є об'єктом неперервної дії. Властивості продукту істотно впливають на динамічні властивості об'єкта. Але ці властивості в процесі роботи установки на тривалому інтервалі часу

змінюються мало. Цю задачу можна вирішити, змінюючи (коригуючи) настройки регуляторів в процесі роботи установки.

Для задачі оптимізації слід автоматизувати пошук оптимального протікання процесу, мінімізувати витрати енергії, брак готової продукції, збільшити продуктивність обладнання. Для процесу гарячого бездимного копчення риби цю задачу можна вирішити, підвищивши вимоги до розв'язання задачі регулювання. Головним джерелом підвищення економічної ефективності цього процесу є зниження витрат електроенергії.

Процес гарячого бездимного копчення риби є об'єктом неперервно-дискретної дії. Для нього є характерним цикл роботи у поєднанні з робочим тепловим режимом. Підвищення економічної ефективності роботи цього процесу в режимах пуску і зупинки можна досягти, автоматизувавши ці завдання. Тому для даного технологічного процесу актуальна автоматизація задачі логічного керування.

Відповідно до нормативів ведення технологічного процесу (див. табл. 2.1) температура в камері має підтримуватися на рівні $T_{k^{зд}} = 100^{\circ}\text{C}$, з точністю $\pm 1^{\circ}\text{C}$. За параметром можливі припустимі короточасні відхилення до $\pm 5^{\circ}\text{C}$ протягом часу не більше 400с. Регламентна зона за параметром наведена на рисунку 5.1. Температура контрольної тушки має підтримуватися на рівні $T_{t^{зд}} = 80^{\circ}\text{C}$, з точністю $\pm 1^{\circ}\text{C}$. За параметром можливі припустимі короточасні відхилення до $\pm 5^{\circ}\text{C}$ протягом часу не більше 400с. Регламентна зона за параметром наведена на рисунку 5.2.

Як видно з гранично припустимих регламентів на САР для процесу гарячого бездимного копчення риби, особливо жорсткі вимоги пред'являються до короточасних відхилень, оскільки саме недотримання цих регламентів може призвести до браку готової продукції і суттєвих економічних збитків. При цьому малі відхилення регламентуються дуже жорстко. Тому в якості інтегрального критерію застосуємо саме інтегральний модульний критерій.

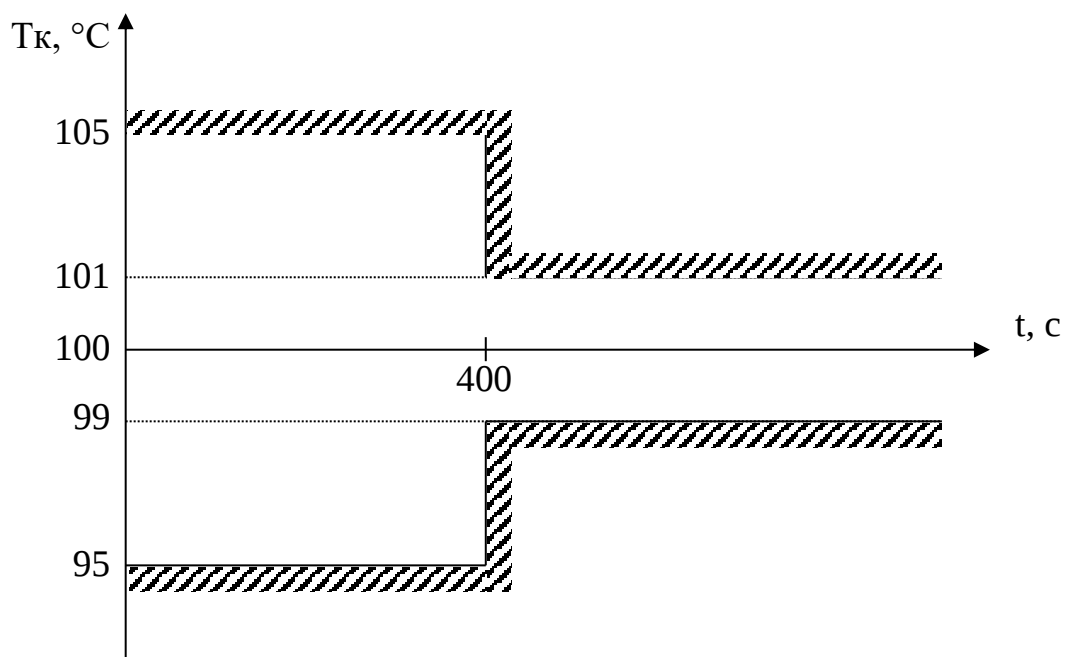


Рис. 3.1 – Регламентна зона за температурою середовища в камері

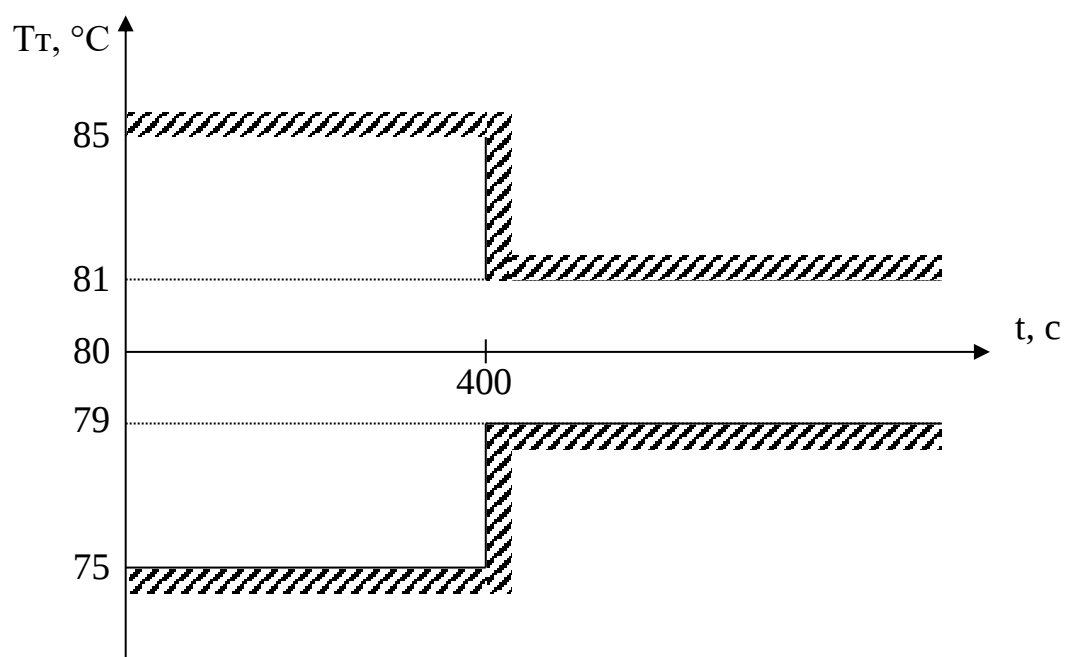


Рис. 3.2 – Регламентна зона за температурою контрольної тушки

Отже, ефективну роботу САР з регулювання температури контрольної тушки в універсальній копильній камері, підвищення її динамічної точності доцільно вести за таким критерієм:

$$J = \int_0^{t_M} |\Delta T_T(t)| dt$$

де t_M - час моделювання;

$\Delta T_T(t)$ – помилка регулювання температури контрольної тушки.

Основу керування становить інформація про мету керування або про бажаний стан ОК $\bar{y}^*$, про поточний стан ОК $\bar{y}$ та про збуреннях $\bar{f}$. Залежно від обсягу використовуваної керуючим пристроєм (КП) інформації про ОК виділяють чотири принципи побудови САР: принцип розімкнутого жорсткого (програмного) керування; принцип розімкнутого керування за збуренням; принцип замкнутого керування за станом ОК або керування зі зворотним зв'язком; комбінований принцип керування.

Для вирішення задачі регулювання температури контрольної тушки T_T достатнім буде використовувати замкнений принцип керування, у відповідності до якого для процесу керування достатньо використовувати інформацію про бажаний стан ОК та про його поточний стан.

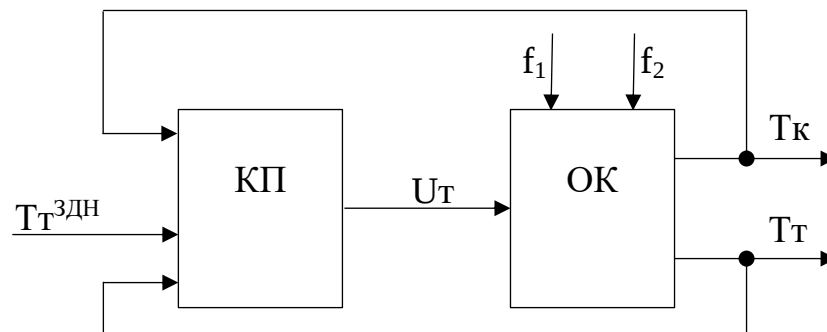


Рис. 3.3 – Структурна схема системи керування, що відповідає замкнутому принципу керування

3.2 Параметричний синтез і аналіз САР базової структури

Відповідно до структурної схеми, що відповідає замкненому принципу керування, структурна схема САР температури контрольної тушки гарячого бездимного копчення риби матиме вигляд, наведений на рис. 3.4.

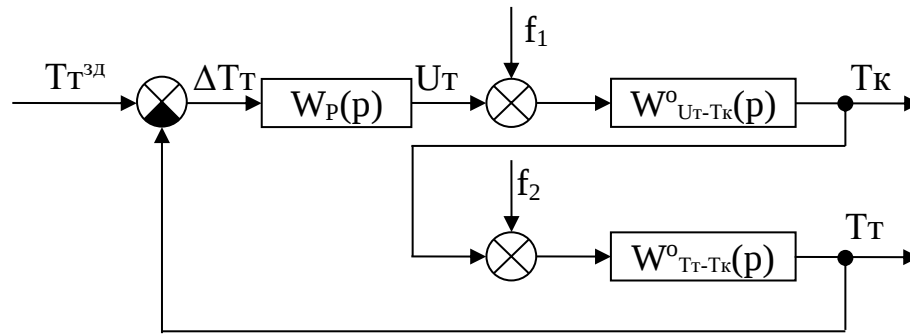


Рис. 3.4 – Структурна схема САР базової структури

На схемі $W_P(p)$ - передаточна функція регулятора; $T_T^{3ДН}$ – задане значення регульованої координати; ΔT_T – помилка регулювання.

Процес гарячого бездимного копчення риби за всіма каналами має статичні властивості, тому в якості альтернативних варіантів алгоритмів регулювання обираємо пропорційно-інтегральний (ПІ) і пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) алгоритми регулювання.

Рівняння руху ПІ-регулятора

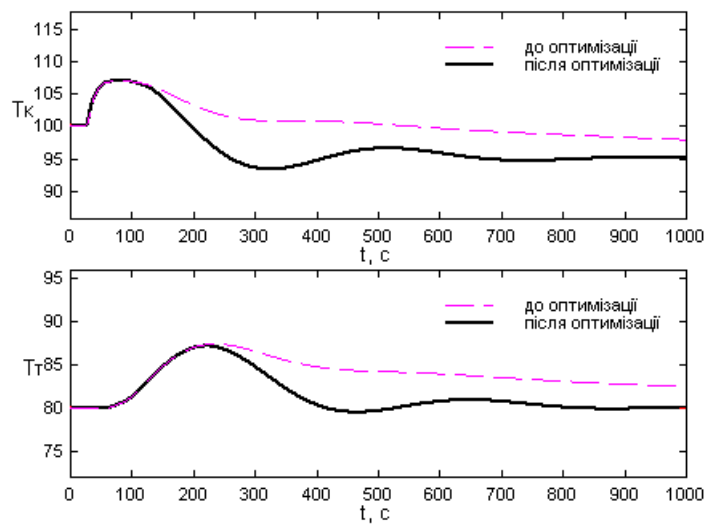
$$u(t) = K_p \cdot \left(\Delta y(t) + \frac{1}{T_{I3}} \int_0^T \Delta y(t) dt \right) + u_0$$

Передаточна функція ПІ-регулятора

$$W_P(p) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{I3}p} \right)$$

Рівняння руху ПІД-регулятора

$$u(t) = K_p \cdot \left(\Delta y(t) + \frac{1}{T_{I3}} \int_0^T \Delta y(t) dt + T_{yП} \frac{d\Delta y(t)}{dt} \right) + u_0$$



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
Kr	1.3469	0	0.82	10	до - 3869.2492
Tiz	116.7503	1	287	1000	після - 1569.6941
					оптимізації.
					Кількість кроків процедури оптимізації:
					максимальна - 1500
					фактична - 84

Рис. 3.6 – Результати оптимізації налаштувань ПІ-регулятора

Таблиця 3.1 – Результати порівняння САР з ПІ-регулятором до і після оптимізації

САР з ПІ-регулятором	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta T_K^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп}1}, \text{c}$	$\Delta T_T^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп}2}, \text{c}$	
до оптимізації	12	1940	7,42	1780	3869
після оптимізації	12	590	7,2	380	1570

Для оптимального параметричного синтезу САР з ПІД-регулятором будемо використовувати структурну схему моделювання, наведену на рисунку 3.7. Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора наведені на рисунку 3.8.

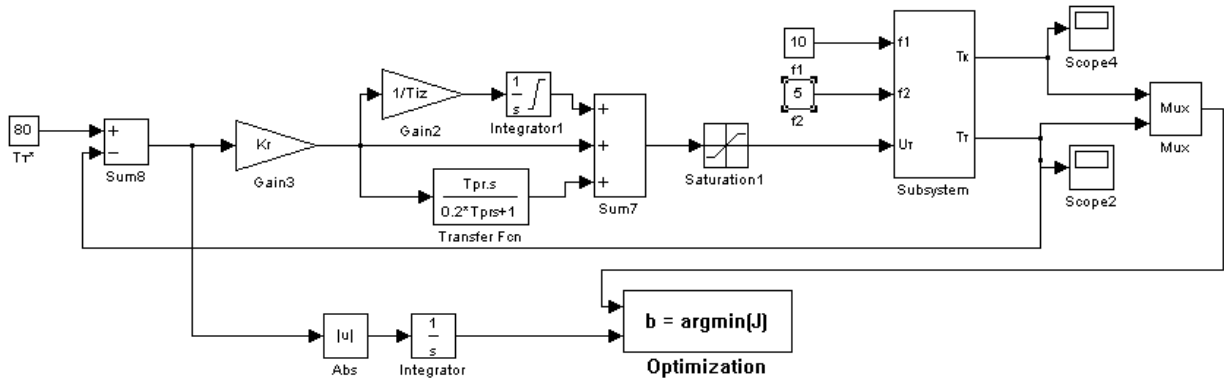
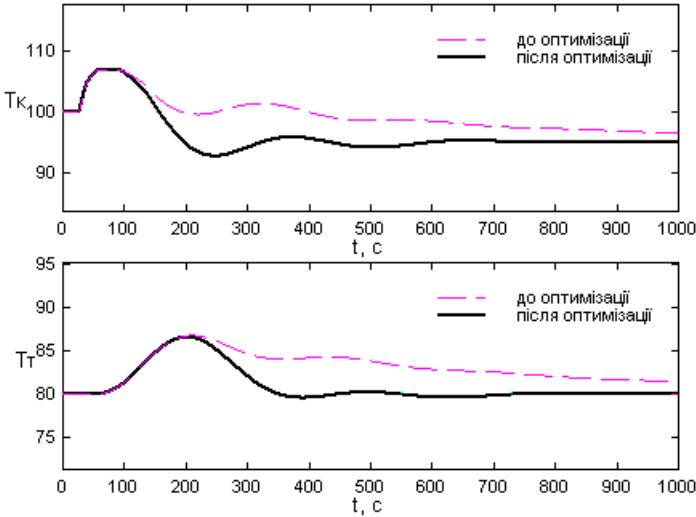


Рис. 3.7 – Структурна схема моделювання САР для оптимізації налаштувань ПІД-регуляторів



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
Kr	1.6256	0	1.02	10	до - 3100.4349
Tiz	90.0287	1	229.8	1000	після - 1108.7906
Tpr	43.5703	0	57.5	200	оптимізації.
					Кількість кроків процедури оптимізації:
					максимальна - 1500
					фактична - 255

Рис. 3.8 – Результати оптимізації налаштувань ПІД-регуляторів

Таблиця 3.2 – Результати порівняння САР з ПІД-регуляторами до і після оптимізації

САР з ПІ-регулятором	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta T_K^{МАКС}, ^\circ C$	$T_{пп1}, c$	$\Delta T_T^{МАКС}, ^\circ C$	$T_{пп2}, c$	
до оптимізації	12	1234	6,8	1193	3100
після оптимізації	12	297	6,6	322	1109

Схема моделювання для порівняння САР з ПІ- та ПІД-регулятором наведена на рис. 3.9. Результати порівняння САР з ПІ та ПІД-регулятором наведено на рис. 3.10 і в таблиці 3.3.

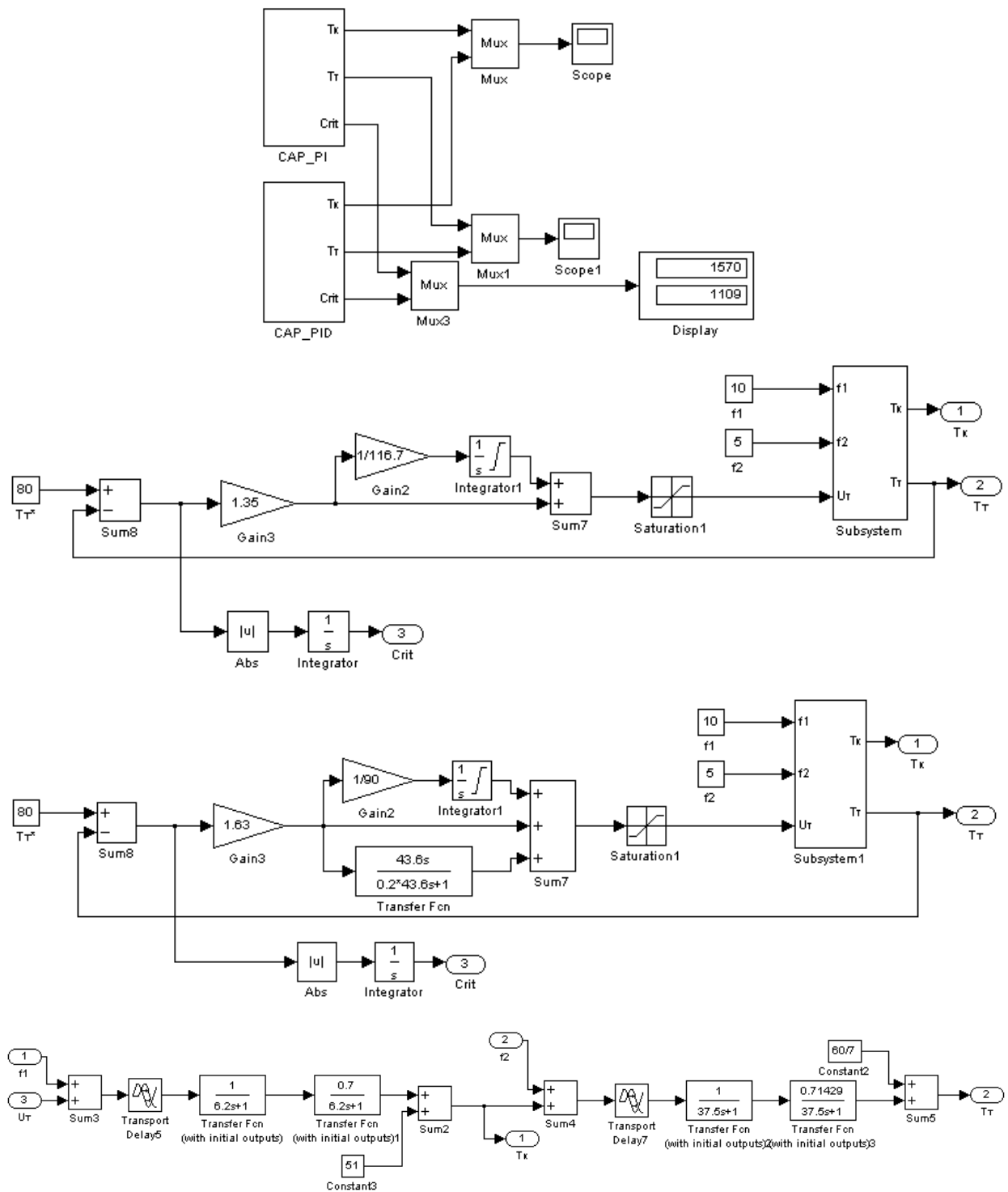


Рис. 3.9 – Схема моделювання для порівняння САР з ПІ- та ПІД-регуляторами

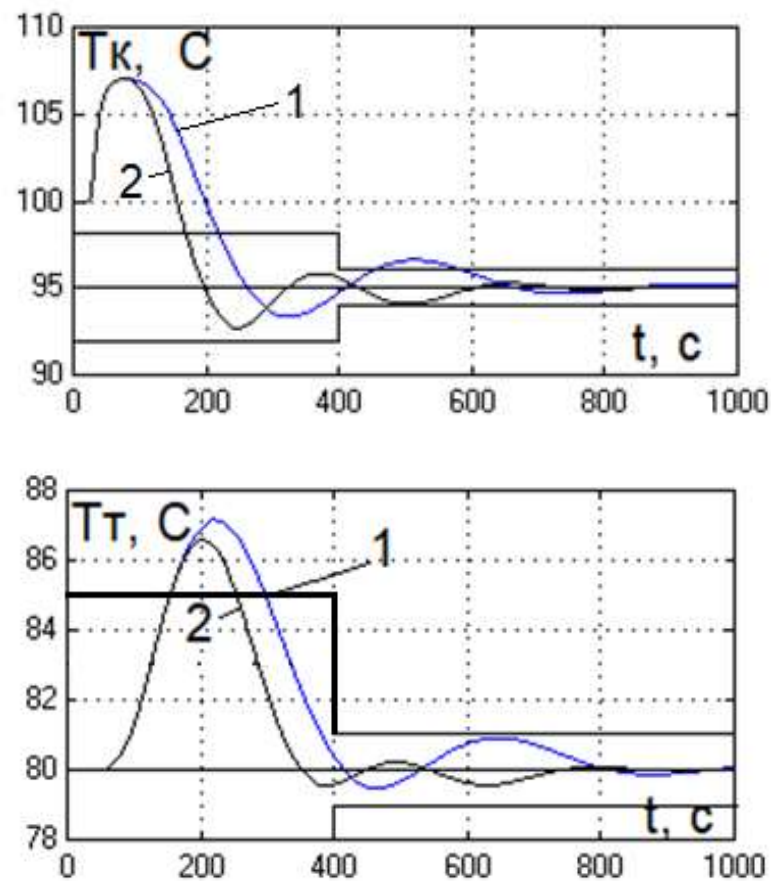


Рис. 3.10 – Результати порівняння САР з ПІ (1) та ПІД-регулятором (2)

Таблиця 3.3 – Результати порівняння варіантів САР

САР	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta T_K^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп}1}, \text{c}$	$\Delta T_T^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп}2}, \text{c}$	
ПІ	12	590	7,2	380	1570
ПІД	12	297	6,6	322	1109

Як видно з результатів порівняння перехідних процесів, САР з ПІД-регуляторами є кращою за усіма показниками. Тому ПІД-закон регулювання доцільно використовувати і надалі.

Промодельємо роботу САР при повному циклі копчення та проварювання риби: $T_T^{3Д} = 0,0057 \cdot t + 20$; $T_{T0} = 51^\circ\text{C}$.

У ході процесу задане значення температури контрольної тушки змінюється програмно. Моделювати будемо два етапи циклу: подачу копильної речовини, починаючи з початку моделювання (це буде спричиняти пониження температури в камері, а значить і температури тушки, що моделюється збуренням $f_1 = -10\% \text{х.р.о.}$) і процес варки, при якому диспергування копильної речовини припиняється (моделюється збуренням $f_1 = 0\% \text{х.р.о.}$). Процес диспергування триватиме 1800 секунд (або 30 хвилин), а процес варки – наступні 3600 с (або 60 хв).

Схема моделювання процесу наведена на рис. 3.11, результати моделювання в абсолютних значеннях наведені на рис. 3.12, а результати моделювання у відхиленнях від заданого значення – на рис. 3.13.

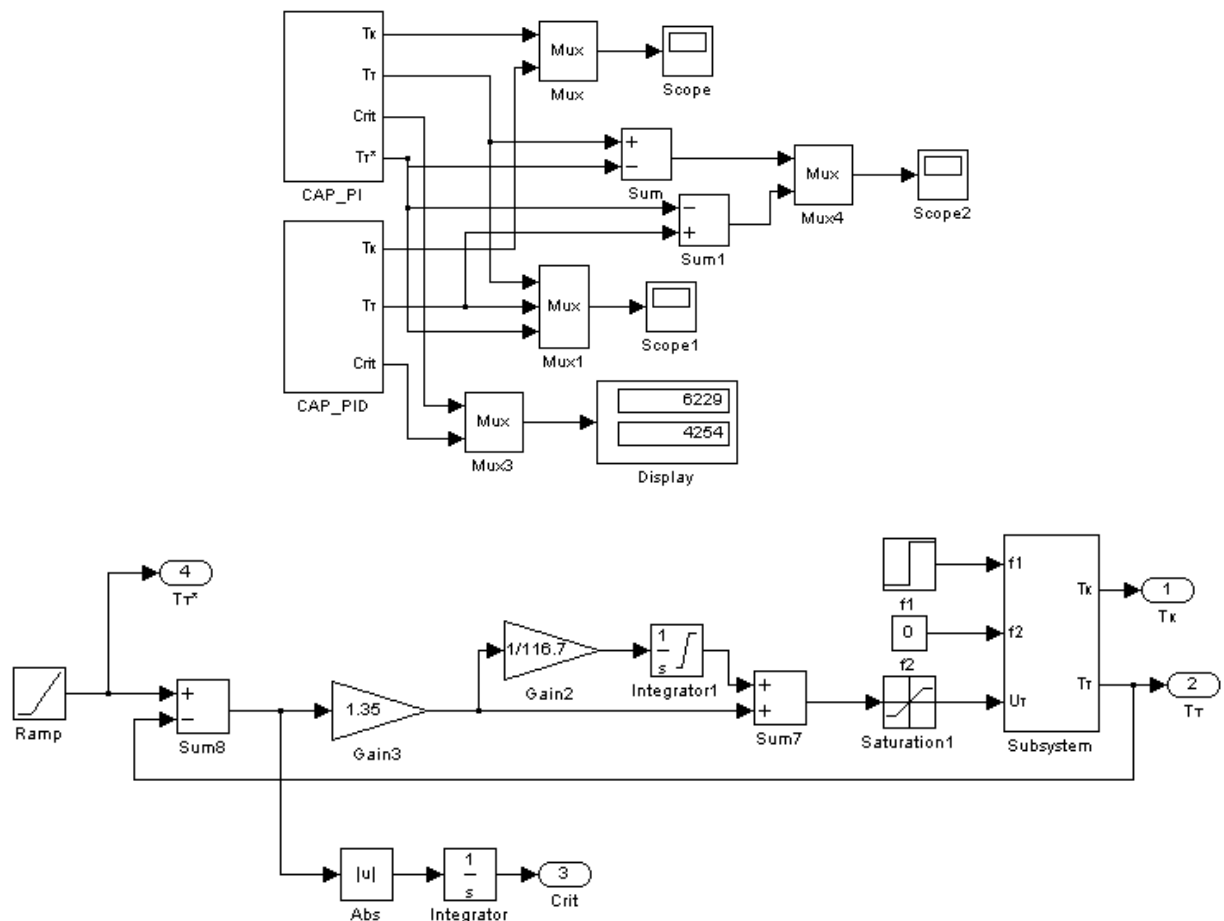


Рис. 3.11 – Схема моделювання роботи CAP при повному циклі копчення та проварювання риби

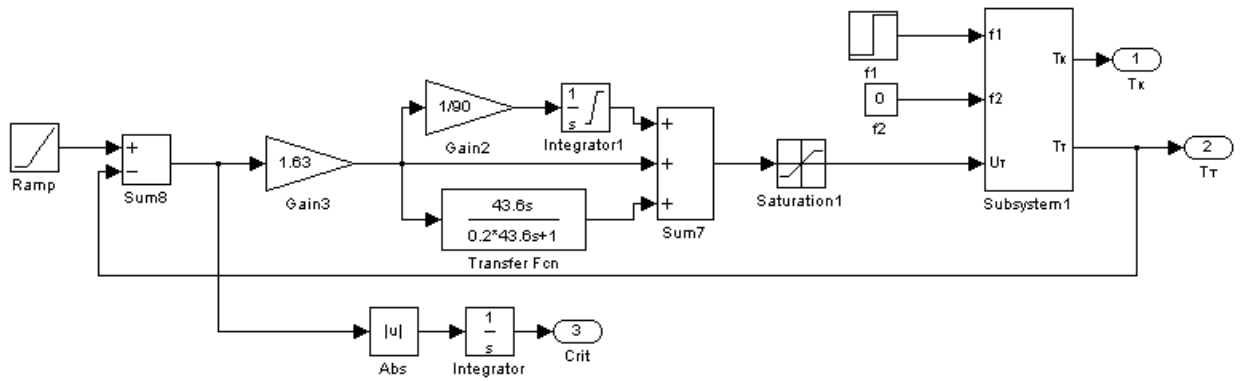


Рис. 3.11 (закінчення) – Схема моделювання роботи САР при повному циклі копчення та проварювання риби

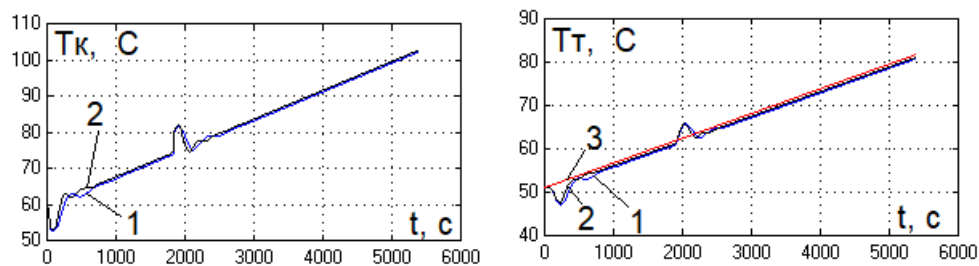


Рис. 3.12 – Результати моделювання роботи САР при повному циклі копчення та проварювання риби: 1 – САР з ПІ-регулятором; 2 – САР з ПД-регулятором, 3 – задане значення T_T

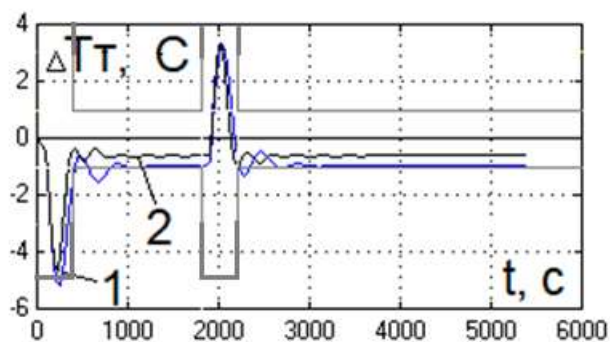


Рис. 3.13 – Результати моделювання роботи САР у відхиленнях при повному циклі копчення та проварювання риби: 1 – САР з ПІ-регулятором; 2 – САР з ПД-регулятором

Проведемо аналіз грубості САР до варіацій параметрів ОК. В процесі роботи ділянки гарячого бездимного копчення риби внаслідок нелінійності

запізнення в каналах моделі ОК можуть варіювати в межах до $\pm 20\%$. При цьому дослідження САР на грубість слід проводити в умовах дії детермінованих ступінчастих неконтрольованих збурень $10\% \times p.o.$ Структурні схеми моделювання для аналізу САР з ПІ- та ПІД-регулятором на грубість наведені вище на рис. 3.5 та 3.7.

Результати оцінки САР з ПІ-регулятором на грубість наведені на рис. 3.14, а САР з ПІД-регулятором – на рис. 3.15. Як видно з результатів, САР з ПІ-регуляторами та з ПІД-регуляторами є грубими.

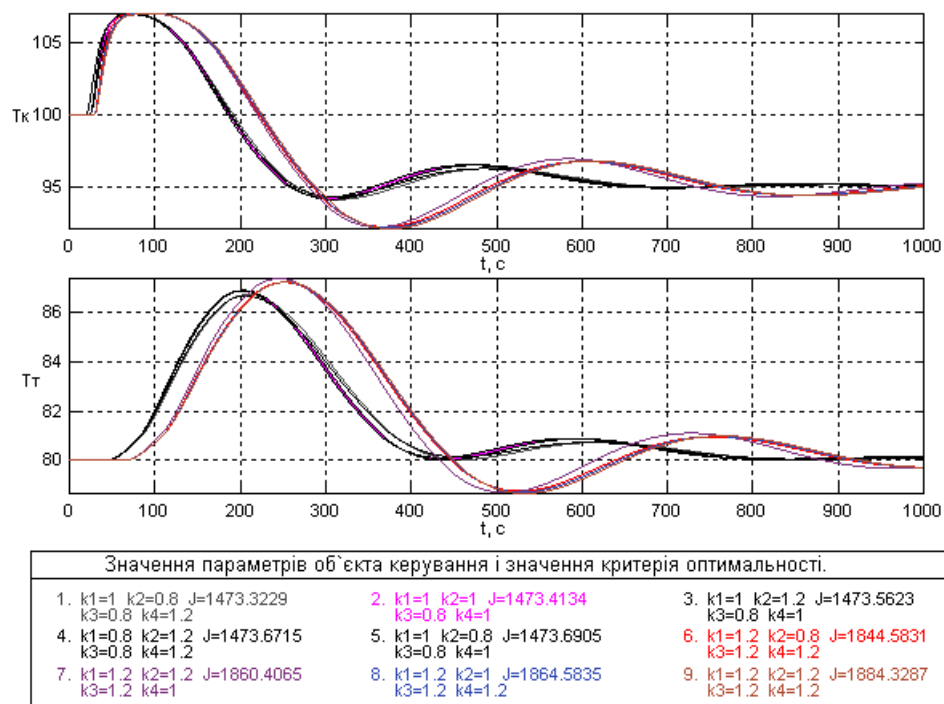


Рис. 3.14 – Аналіз на грубість САР з ПІ-регуляторами

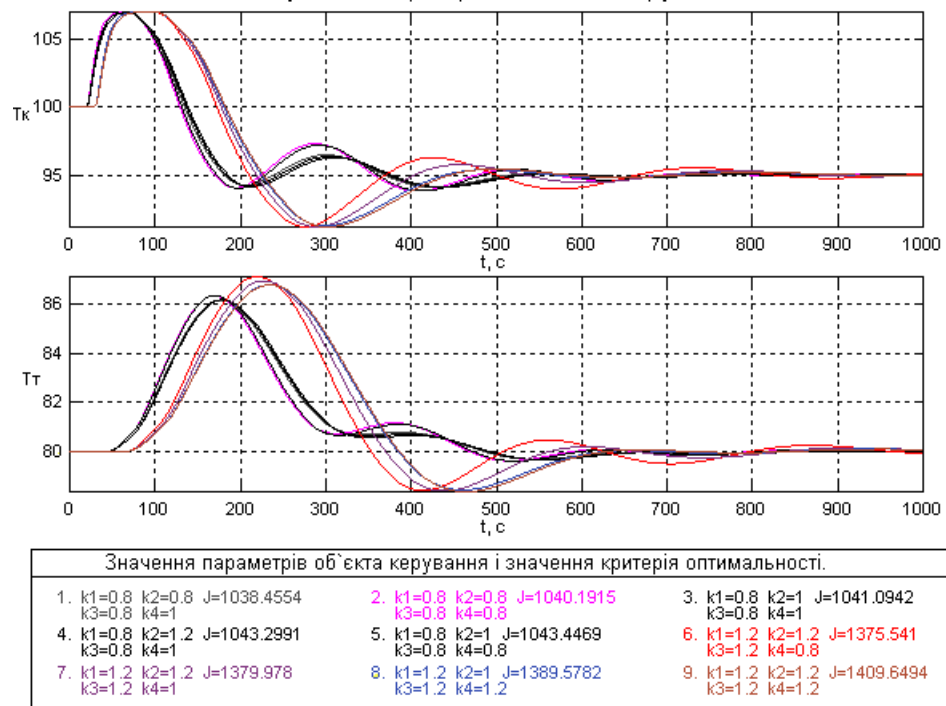


Рис. 3.15 - Аналіз на грубість САР з ПД-регуляторами

САР з ПІ- та ПД-регулятором є грубою.

«Найсприятливішою» для керування є САР з ПІ-регулятором з часами запізнення та сталими часу в каналах ОК, меншими на 20% від номінальних значень. «Найнесприятливішою» для керування є САР з ПІ-регулятором з часами запізнення в каналах ОК, на 20% більших від номінальних значень.

«Найсприятливішою» для керування є САР з ПД-регуляторами з часами запізнення в каналах ОК, меншими на 20% від номінальних значень. «Найнесприятливішою» для керування є САР з ПД-регулятором з часами запізнення в каналах прямих каналах ОК, на 20% більших від номінальних значень, а в перехресних каналах на 20% менших від номінальних значень.

3.3 Синтез і аналіз САР підвищеної динамічної точності

Причиною недостатньої точності САР можуть бути зовнішні умови: дія інтенсивних контрольованих і неконтрольованих збурень, інтенсивна зміна заданих значень регульованих координат, а також внутрішні особливості ОК і

САР (значне співвідношення t_0 / T_0 , взаємний вплив каналів в багатовимірної САР).

Аналіз САР гарячого бездимного копчення риби показав, що основною причиною недостатньої якості САР є вплив неконтрольованих збурень. Враховуючи особливості ОК, пов'язані з наявністю проміжної точки, якою є температура середовища в камері, способом підвищення динамічної точності САР є використання для регулювання інформації з проміжної точки та побудова каскадної САР.

В основу підвищення динамічної точності САР температури гарячого бездимного копчення риби буде покладено каскадний принцип, пов'язаний із введенням до структури САР внутрішнього контуру регулювання. Відповідно до цього принципу структурна схема каскадної САР матиме вигляд, наведений на рис. 3.16.

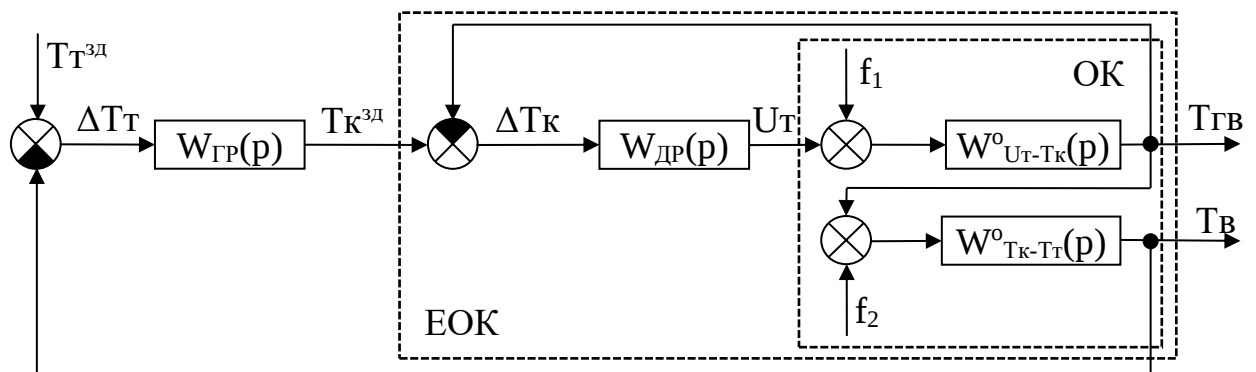


Рис. 3.16 – Структурна схема каскадної САР температури гарячого бездимного копчення риби

На схемі

ОК – об'єкт керування;

ЕОК – еквівалентний об'єкт керування;

$W^o_{U_T-T_K}(p)$ – передаточна функція ОК за каналом « U_T-T_K »;

$W^o_{T_K-T_T}(p)$ – передаточна функція ОК за каналом « T_K-T_T »;

$W_{ДР}(p)$ – передаточна функція допоміжного регулятора;

$W_{ГР}(p)$ – передаточна функція головного регулятора;

T_k – температура середовища в камері, °C;

ΔT_k – помилка регулювання температури середовища в камері, °C;

T_k^{3d} – задане значення температури середовища в камері, °C;

T_t – температура контрольної тушки, °C;

ΔT_t – помилка регулювання температури контрольної тушки, °C;

T_t^{3d} – задане значення температури контрольної тушки, °C;

U_t – положення регулюючого органу подачі потужності до ТЕНу, %х.р.о.;

f_1, f_2 – вектори неконтрольованих збурень.

Температура середовища в камері T_k обрана в якості проміжної точки, оскільки цей параметр є зручним для вимірювання, інерційність ОК в проміжній точці є суттєво меншою, ніж в ОК в цілому, в проміжній точці є змога компенсувати певну частину неконтрольованих збурень.

Розрахунок початкових наближень параметрів допоміжного регулятора проводитимемо на основі параметрів ОК за каналом « $U_t - T_k$ ».

$$W_{U_t-T_k}^o(p) = \frac{0,7 \cdot e^{-28p}}{9,2p + 1}$$

В якості допоміжного регулятора приймемо ПІ-регулятор.

Передаточна функція ПІ-регулятора:

$$W_{др}(p) = K_{др} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{ІЗдр}p} \right)$$

Проведемо розрахунок початкових наближень параметрів варіантів допоміжного регулятора, якщо бажаний вигляд перехідного процесу – коливальний з 20%-вим перерегулюванням.

ПІ-регулятор:

$$K_{др} = \frac{0,8 \cdot T_o}{K_o \cdot \tau_o} = \frac{0,8 \cdot 9,2}{0,7 \cdot 28} = 0,38 \text{ \%х.р.о./}^\circ\text{C}$$

$$T_{ІЗдр} = 2,5 \cdot \tau_o = 2,5 \cdot 28 = 70 \text{ с}$$

Розрахунок параметрів головного регулятора будемо проводити за параметрами еквівалентного об'єкту керування (ЕОК). Передаточна функція ЕОК матиме вигляд:

$$W_{\text{ЕОК}}(p) = \frac{K_{\text{ЕОК}} \cdot e^{-\tau_{\text{ЕОК}} p}}{T_{\text{ЕОК}} p + 1}$$

Знайдемо параметри ЕОК.

$$K_{\text{ЕОК}} = K_{\text{ТК}^{\text{ЗД}}-\text{ТК}}^{\text{С}} \cdot K_{\text{ТК}-\text{ТТ}}^{\text{О}}$$

Для ПІ-регулятора

$$K_{\text{ТК}^{\text{ЗД}}-\text{ТК}}^{\text{С}} = 1$$

$$K_{\text{ЕОК}} = K_{\text{ТК}^{\text{ЗД}}-\text{ТК}}^{\text{С}} \cdot K_{\text{ТК}-\text{ТТ}}^{\text{О}} = 1 \cdot 5 / 7 = 0,71$$

$$T_{\text{ЕОК}} \approx 0,5 \cdot T_{\text{УТ}-\text{ТК}} + T_{\text{ТК}-\text{ТТ}} = 0,5 \cdot 9,2 + 57,9 = 62,5 \text{ с}$$

$$\tau_{\text{ЕОК}} = \tau_{\text{УТ}-\text{ТК}} + \tau_{\text{ТК}-\text{ТТ}} = 28 + 75,1 = 103,1 \text{ с}$$

В якості головного регулятора оберемо ПІД-регулятор, передаточна функція якого матиме вигляд:

$$W_{\text{ДР}}(p) = K_{\text{ГР}} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{\text{ІЗГР}} p} + T_{\text{УПГР}} p \right)$$

Проведемо розрахунок налаштувань головного регулятора, якщо бажаний вигляд перехідного процесу коливальний з 20% перерегулюванням.

Якщо допоміжний регулятор П, то передаточна функція ЕОК матиме вигляд:

$$W_{\text{ЕОК}}(p) = \frac{K_{\text{ЕОК}} \cdot e^{-\tau_{\text{ЕОК}} p}}{T_{\text{ЕОК}} p + 1} = \frac{0,71 \cdot e^{-103,1 p}}{62,5 p + 1}$$

Параметри головного регулятора:

$$K_{\text{ГР}} = \frac{1,0 \cdot T_{\text{ЕОК}}}{K_{\text{ЕРК}} \cdot \tau_{\text{ЕОК}}} = \frac{1,0 \cdot 62,5}{0,71 \cdot 103,1} = 0,85 \text{ \%х.р.о./}^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{ІЗГР}} = 2,0 \cdot \tau_{\text{ЕОК}} = 2,0 \cdot 103,1 = 206,2 \text{ с}$$

$$T_{\text{УПГР}} = 0,5 \cdot \tau_{\text{ЕОК}} = 51,6 \text{ с}$$

Схема моделювання каскадної САР, якщо допоміжний регулятор ПІ, матиме вигляд, наведений на рис. 3.17. Результати оптимізації налаштувань ПІ- та ПІД-регуляторів – на рис. 3.18.

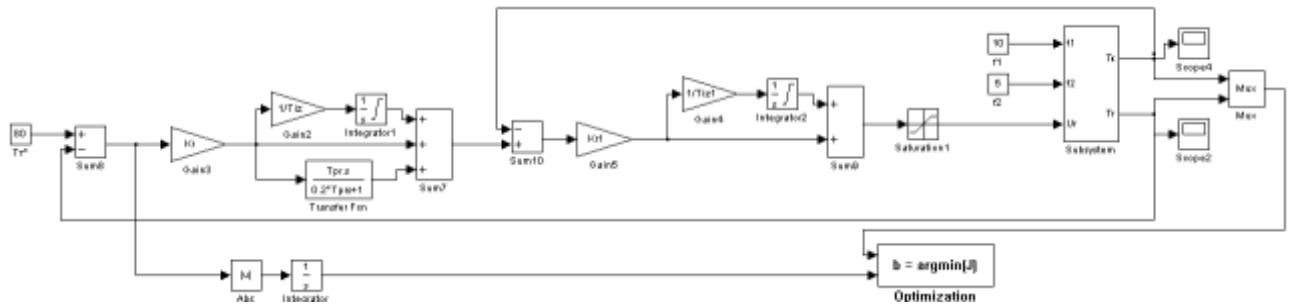
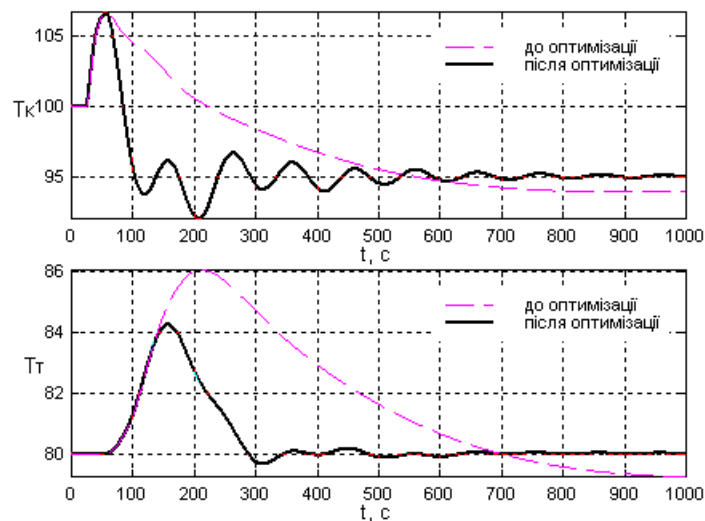


Рис. 3.17 – Схема моделювання каскадної САР



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
Kr	0.925	0	0.85	10	до - 1901.5477
Tiz	83.921	1	206.2	1000	після - 508.6374
Tpr	29.2532	0	51.6	200	оптимізації.
Kr1	0.64133	0	0.38	10	Кількість кроків процедури оптимізації:
Tiz1	9.3815	1	70	300	максимальна - 1500
					фактична - 344

Рис. 3.18 – Результати оптимізації каскадної САР

САР підвищеної динамічної точності досліджуємо на грубість в умовах варіації параметрів ОК, а саме, часів запізнення в каналах ОК $\pm 20\%$.

Результати перевірки САР підвищеної динамічної точності на грубість в умовах варіації параметрів ОК наведені на рис. 3.19. Як видно з результатів оцінки САР на грубість, в умовах варіації параметрів ОК, лише САР з допоміжним ПІ-регулятором є грубою.

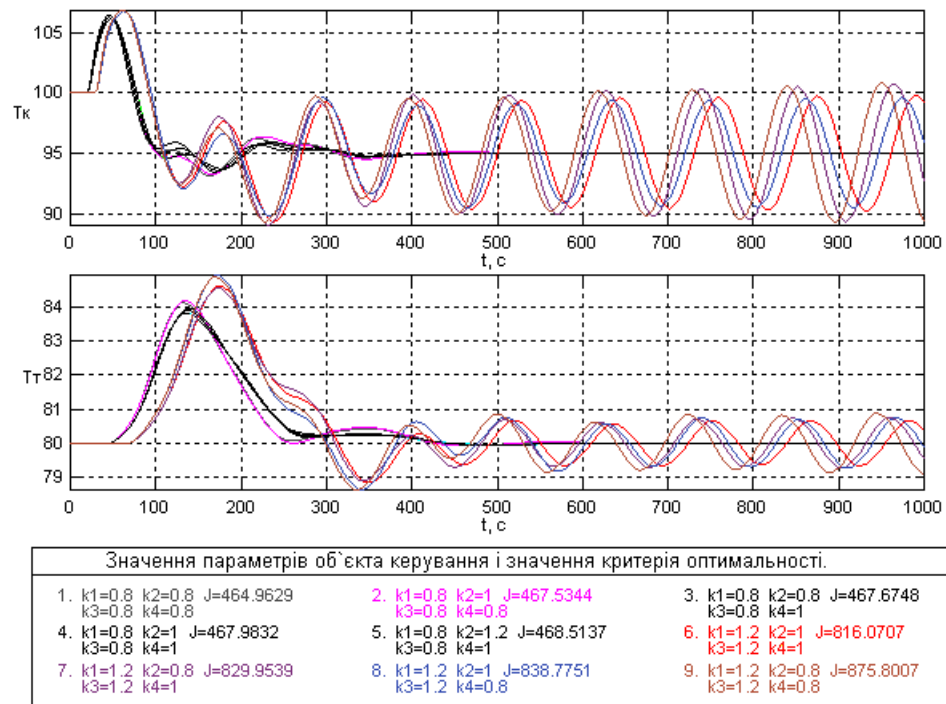


Рис. 3.19 – Результати перевірки САР каскадної структури на грубість

3.4 Порівняльний аналіз перехідних процесів у параметрично оптимальних САР базової структури та підвищеної динамічної точності

Для порівняння якості роботи САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності розроблено структурну схему моделювання, наведену на рис. 3.20. Результати порівняння наведені на рис. 3.21 і в таблиці 3.4.

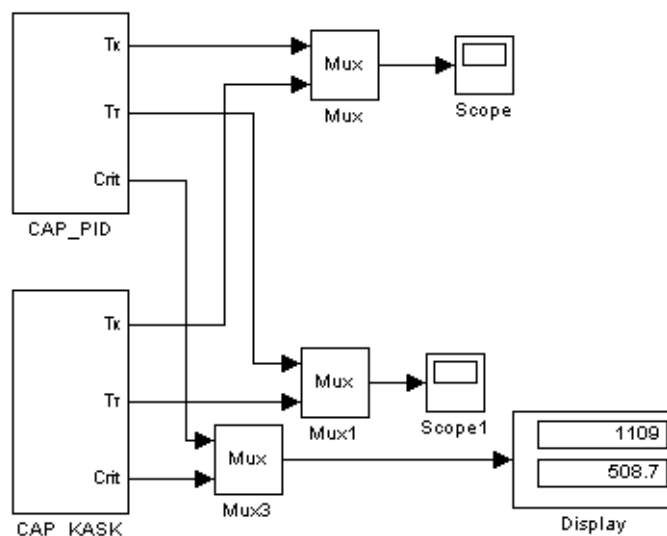


Рис. 3.20 – Структурна схема моделювання для порівняння якості роботи САР базової структури і САР каскадної структури

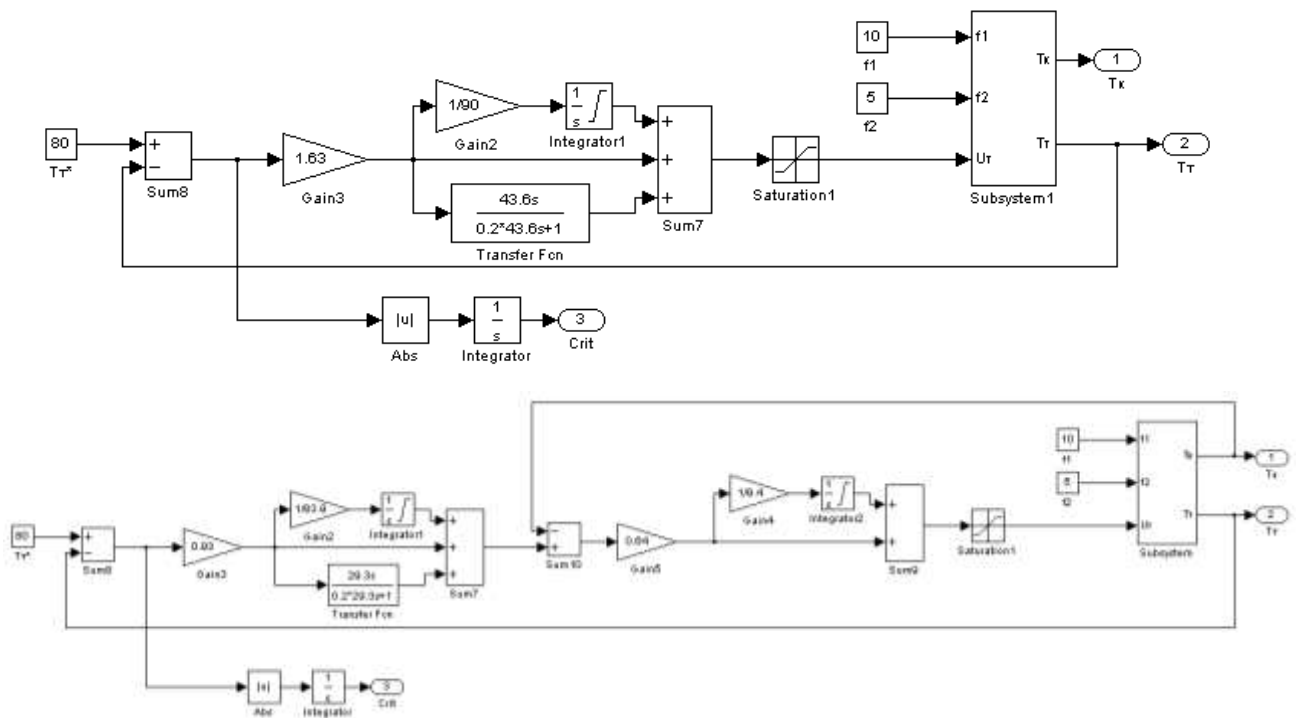


Рис. 3.20 (закінчення) – Структурна схема моделювання для порівняння якості роботи САР базової структури і САР каскадної структури

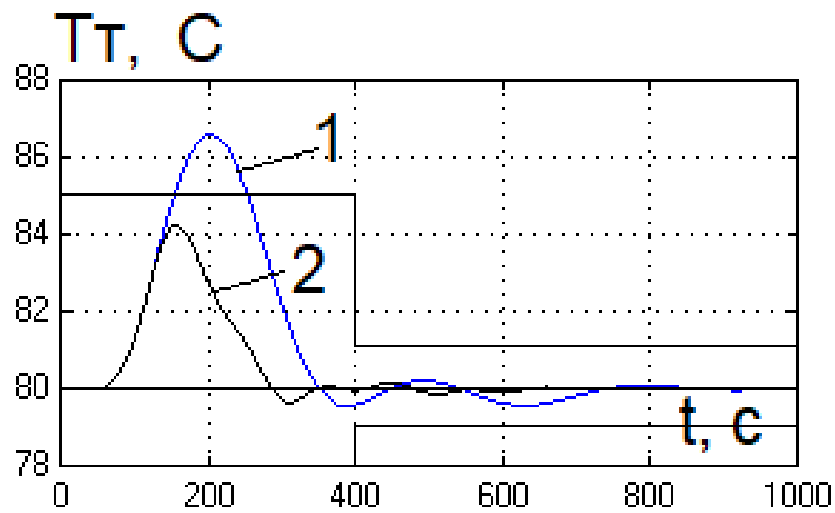


Рис. 3.21 – Результати порівняння якості роботи САР базової структури (1) і САР каскадної структури (2)

Таблиця 3.4 – Результати порівняння якості роботи САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності

Варіант САР	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta T_T^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп}}, \text{с}$	
Базова	6,6	322	1109
Каскадна	4,26	256	508,7

Промодельюємо роботу САР при повному циклі копчення та проварювання риби: $T_T^{3\text{Д}} = 0,0057 * t + 20$; $T_{T0} = 51^\circ\text{C}$. Порівняємо роботу САР базової структури з ПІД-регулятором і САР каскадної структури.

Схема моделювання процесу наведена на рис. 3.22, результати моделювання в абсолютних значеннях наведені на рис. 3.23, а результати моделювання у відхиленнях від заданого значення – на рис. 3.24.

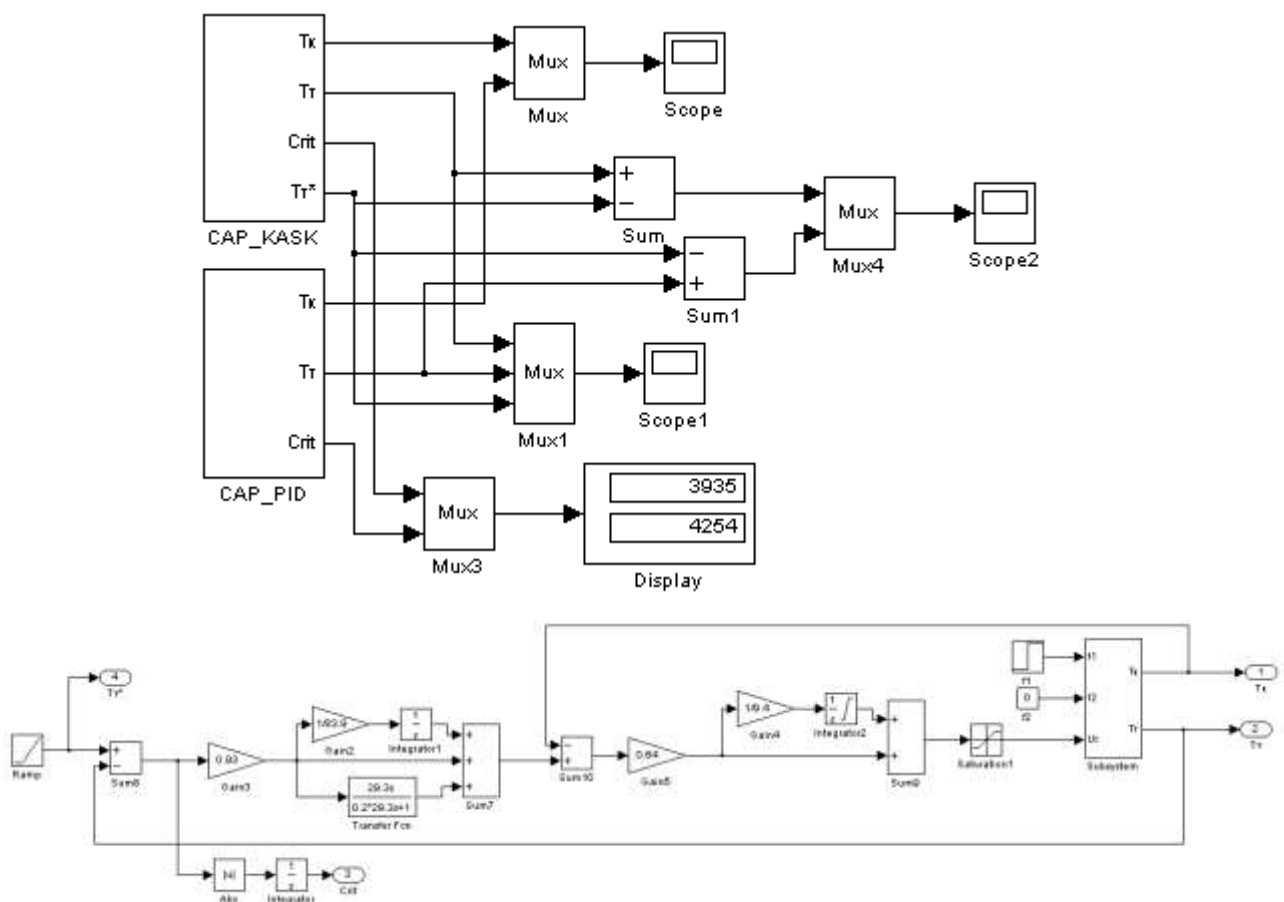


Рис. 3.22 – Схема моделювання роботи САР при повному циклі копчення та проварювання риби

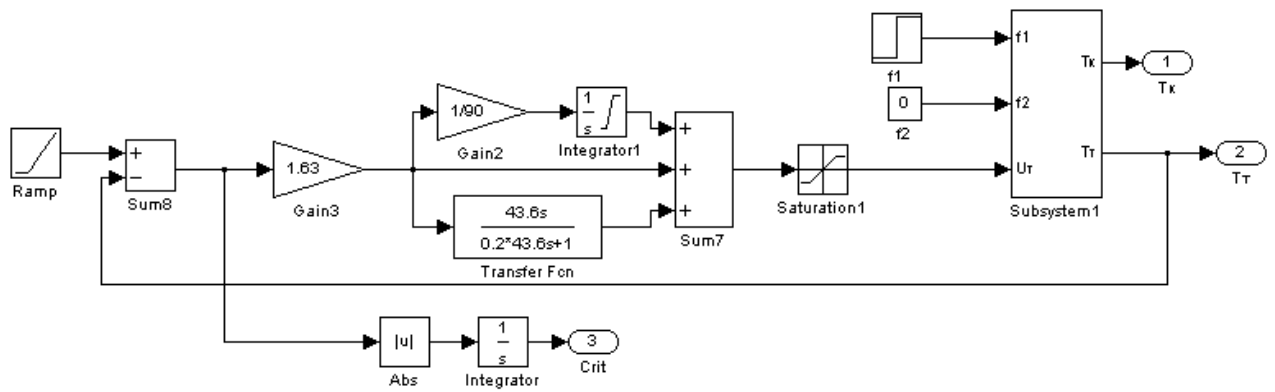


Рис. 3.22 (закінчення) – Схема моделювання роботи САР при повному циклі копчення та проварювання риби

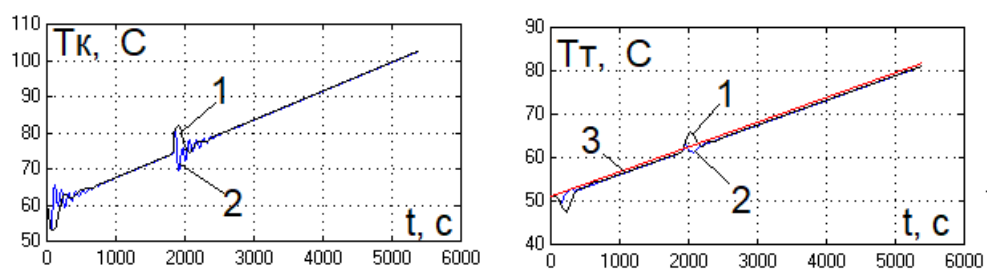


Рис. 3.23 – Результати моделювання роботи САР при повному циклі копчення та проварювання риби: 1 – САР з ПІД-регулятором; 2 – САР каскадної структури, 3 – задане значення T_T

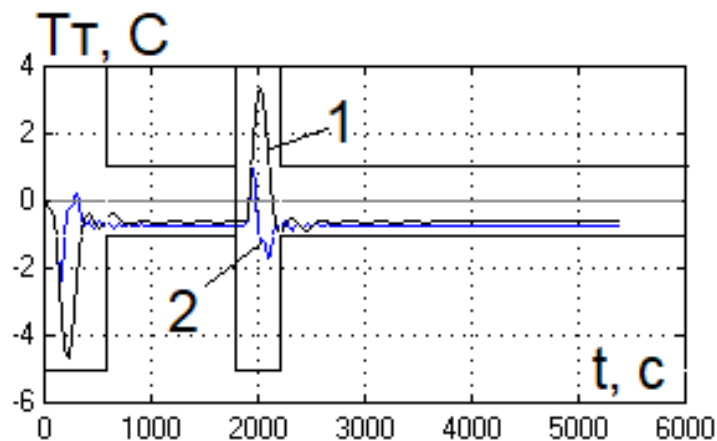


Рис. 3.24 – Результати моделювання роботи САР у відхиленнях при повному циклі копчення та проварювання риби: 1 – САР з ПІД-регулятором; 2 – САР каскадної структури

3.5 Висновки за розділом

САР з ПІ- і з ПІД-регулятором не відповідає гранично-припустимим вимогам.

Для ПІ-регулятора у результаті оптимізації коефіцієнт передачі K_p збільшився на 65%, час ізодрому T_{I3} зменшився на 59%, максимальне динамічне відхилення $\Delta T_k^{\text{МАКС}}$ не змінилося, час перехідного процесу за T_k зменшився на 70%, максимальне динамічне відхилення $\Delta T_t^{\text{МАКС}}$ зменшилося на 3%, час перехідного процесу за T_t зменшився на 79%, інтегральний показник якості зменшився на 59%.

Для ПІД-регуляторів у результаті оптимізації коефіцієнт передачі K_p збільшився на 37%, час ізодрому T_{I3} зменшився на 61%, час упередження T_{up} зменшився на 24%, максимальне динамічне відхилення $\Delta T_k^{\text{МАКС}}$ не змінилося, час перехідного процесу за T_k зменшився на 76%, максимальне динамічне відхилення $\Delta T_t^{\text{МАКС}}$ зменшилося на 3%, час перехідного процесу за T_t зменшився на 73%, інтегральний показник якості зменшився на 64%.

Оскільки САР з налаштуваннями регуляторів за інженерними методиками дають перехідні процеси, що сходяться, то їх можна використовувати на практиці за умови не занадто жорстких гранично-припустимих вимог. Але такі САР потребують оптимального параметричного синтезу.

В результаті введення до регуляторів Д-складової в САР максимальне динамічне відхилення $\Delta T_k^{\text{МАКС}}$ не змінилося; час перехідного процесу за T_k зменшився на 3% на 15%, максимальне динамічне відхилення $\Delta T_t^{\text{МАКС}}$ зменшилося на 8%; час перехідного процесу за T_t зменшився на 26%, інтегральний показник якості зменшився на 15%.

Як показують результати моделювання повного циклу коптіння і проварювання риби, отримана САР вимагає подальшого підвищення динамічної точності.

САР з ПІ- та ПІД-регуляторами є грубими, тому що в умовах 20%-ї варіації параметрів ОК ці САР дають перехідні процеси, що сходяться.

З усього вище сказаного можна зробити висновок, що за усіма показниками якості САР з ПІД-регулятором є кращою, ніж САР з ПІ-регулятором, але САР з ПІД-регуляторами менш грубою.

Отже, в подальших дослідженнях в якості базового алгоритму регулювання будемо застосовувати ПІД-регулятор.

САР підвищеної динамічної точності задовольняє гранично припустимим вимогам.

Після підвищення динамічної точності САР інтегральний критерій зменшився на 54%, максимальне динамічне відхилення зменшилося на 36%, час перехідного процесу зменшився на 21%.

САР підвищеної динамічної точності є грубою.

Оскільки САР каскадної структури дає покращення інтегрального показника якості регулювання та прямих показників якості, тому САР підвищеної динамічної точності використовувати доцільно.

4. Конкретизація задачі і розробка алгоритмів логічного керування технологічним агрегатом

4.1 Розробка алгоритмів автоматичного управління нормальним пуском та зупинкою установки

Суть технологічного процесу гарячого бездимного копчення риби полягає в доведенні тушок риби, розміщених в стелажах коптильної камери, до температури 80°C на протязі 90...100 хв. у парах коптильної рідини, а потім охолодженні в камері на протязі 20 хв. Технологічна схема процесу гарячого бездимного копчення риби для вирішення задач логічного керування приведена на рисунку 4.1.

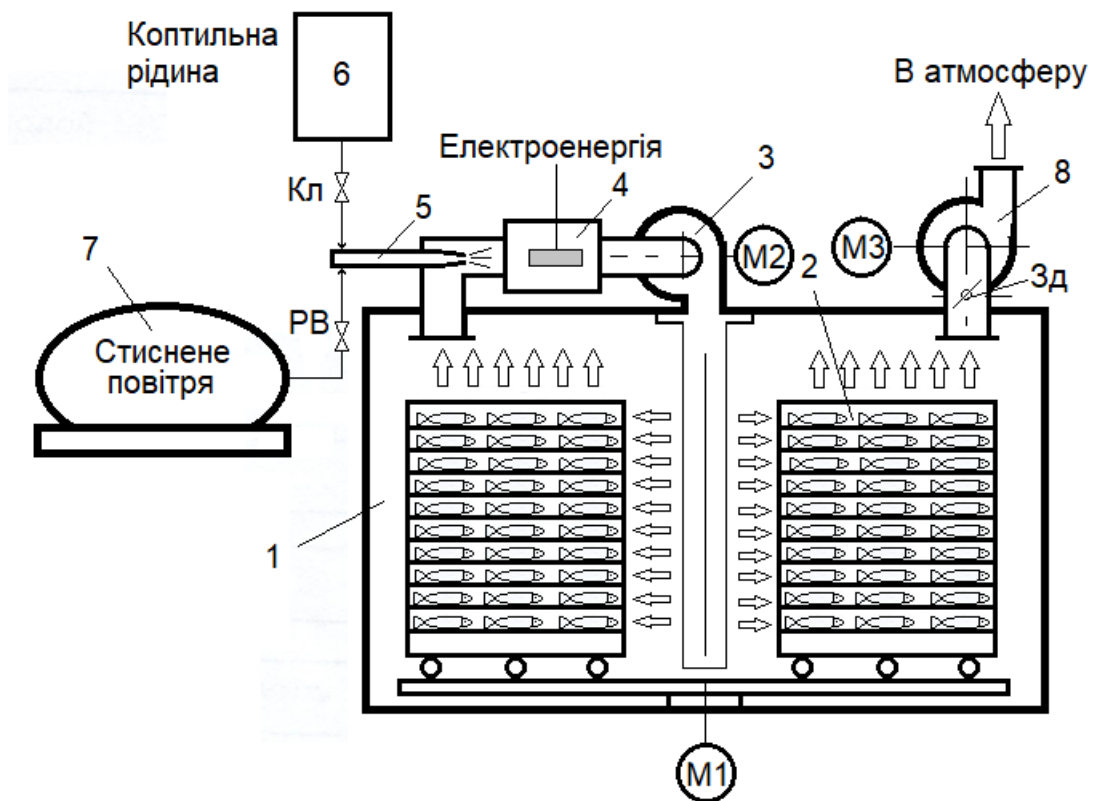


Рис. 4.1 – Технологічна схема процесу гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері для вирішення задачі логічного керування

Технологічний процес гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері є процесом неперервно-дискретним. Тому

задача логічного керування буде зводитися до керування циклом роботи.

Перед завантаженням камера має бути прогріта. Після перевірки умов, необхідних для пуску, та передпускової звукової сигналізації потрібно забезпечити рух стелажів у камері. Потім стартує процес підсушки риби. Температура в камері має бути встановлена на рівні 40...50°C. Продукт в камері має перебувати на протязі 20 хвилин. Потім в камеру має подаватися коптильна рідина на протязі 30 хв. При цьому температура в камері має піднятися до 100°C. Потім подача коптильної рідини припиняється, а продукт продовжує проварюватися ще 60 хв. Проварювання закінчується, якщо температура контрольної тушки досягла 80°C. Потім температура в камері знижується до 40...50°C і риба за таких умов охолоджується 20 хв. На цьому цикл обробки риби в камері завершується. Блок схема регламенту циклу гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері приведено на рис. 4.2 .

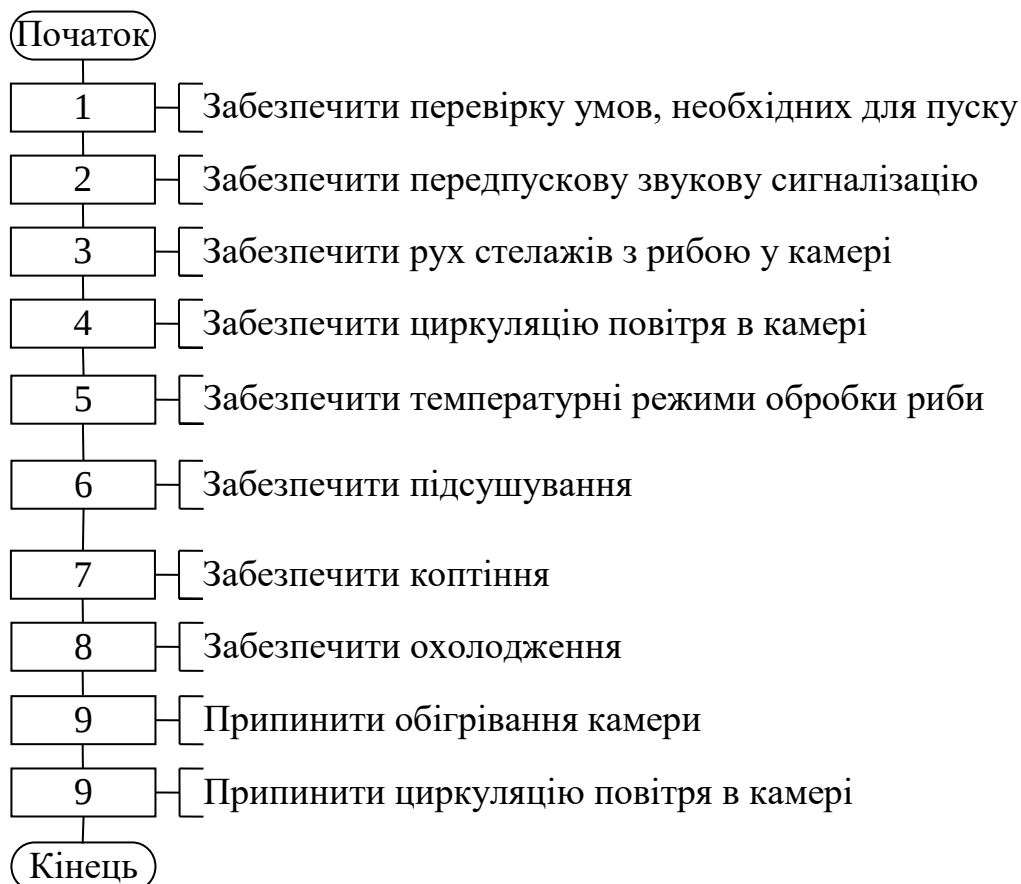


Рис. 4.2 – Блок схема регламенту циклу гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері

4.2 Розробка алгоритму автоматичного керування технологічним циклом процесу

Блок схема алгоритму автоматичного керування циклом гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері наведена на рисунку 4.3.

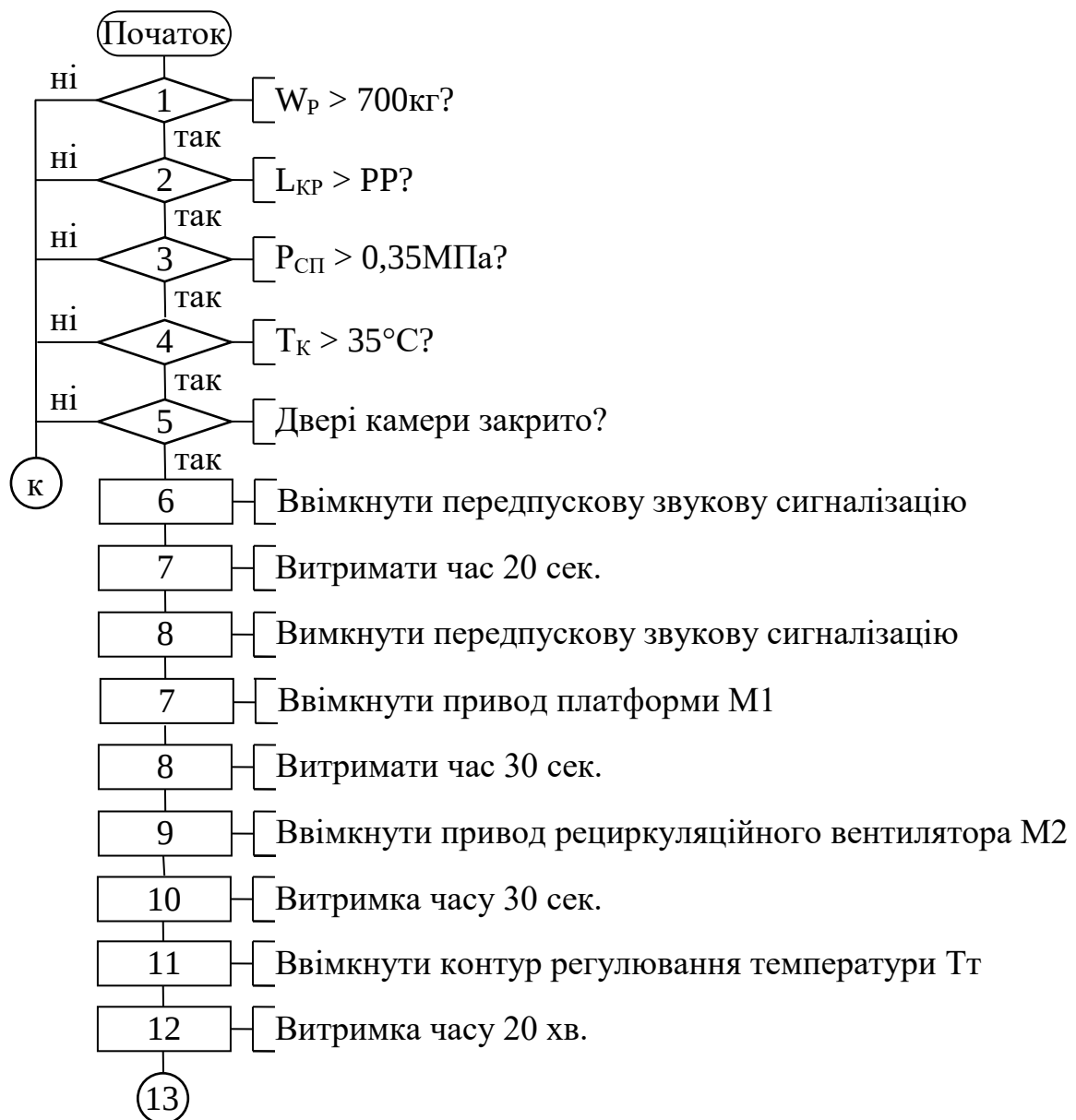


Рис. 4.4 – Блок схема алгоритму автоматичного керування циклом гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері



Рис. 4.4 (закінчення) – Блок схема алгоритму автоматичного керування циклом гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері

Керування циклом гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері реалізується наступним чином.

Перевірка умов, необхідних для пуску, реалізується перевіркою маси на платформі, яка має бути більшою 700 кг. Має бути робочий рівень коптильної рідини в ємності. Тиск стисненого повітря у ресивері має бути більшим від 0,35МПа. Камера має бути прогрітою до 35°C, а двері камери мають бути зачинені. Для забезпечення передпускової звукової сигналізації звуковий сигналізатор вмикається на 20 сек. Надалі вмикається для обертання платформа. Після витримки часу 30 сек. вмикається привод рециркуляційного вентилятора М2. Після витримки часу 30 сек. вмикається контур регулювання температури і починає в автоматичному режимі відпрацьовувати тепловий режим камери. Починається режим підсушки. Для цього витримується час 20 хв. Для реалізації режиму коптіння відкривається РВ і починає подаватися стиснене повітря. Після продувки форсунки 20 сек. відкривається КЛ і до системи починає подаватися коптильна рідина. Розпочинається режим коптіння, який триває 30 хв. Потім розпочинається режим проварювання. Для цього припиняється подача коптильної рідини. Закривається КЛ, продувається форсунка 30 сек., закривається РВ. Режим проварювання триває 60 хв., потім контролюється досягнення температурою контрольної тушки значення 80°C. Якщо температура досягнута, то режим проварювання завершується і починається режим охолодження. Для цього вимикається контур регулювання ТТ, а ТЕН перемикається на 30% потужності. В камері вмикається витяжка. Для цього відкривається засувка ЗД і вмикається привод витяжного вентилятора. Режим охолодження триває 20 хв. По завершенню режиму охолодження вимикається ТЕН, приводи вентиляторів, платформи та закривається витяжна засувка. Цикл роботи камери завершено.

4.3 Висновки за розділом

В ході виконання цього розділу роботи сформульовано регламент циклу гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері та розроблено алгоритм логічного керування циклом роботи.

5. Вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізації керуючих впливів, розробка технічної структури контролерно-комп'ютерної мережі

5.1 Характеристики середовищ, з якими взаємодіють засоби автоматизації та обслуговуючий персонал, які повинні бути враховані при виборі технічних засобів і місць їх розміщення

До переліку середовищ, параметри яких підлягають контролю, вимірюванню, регулюванню відноситься: гаряче повітря з температурою 40...90 °С, тушка риби з температурою 80 °С - з нею стикаються чутливі елементи датчиків температури, повітряні заслінки, вентилятори.

Характеристики виробничих приміщень, де розташовуються технологічне обладнання та технічні засоби автоматизації: процес копчення риби здійснюється в копильні, яка встановлений у приміщенні цеху, температура повітря в якому змінюється в діапазоні 20...30 °С. Оскільки для копчення риби використовується копильна рідина, то цей процес не є пожежонебезпечним або вибухонебезпечним.

«Правила улаштування електроустановок» визначають:

жарке приміщення - приміщення, в якому під впливом різних теплових випромінювань температура повітря перевищує постійно або періодично + 35 °С (наприклад, приміщення із сушарками, печами, котельні тощо).

Щодо небезпеки ураження людей електричним струмом розрізняють:

приміщення з підвищеною небезпекою, які характеризуються наявністю в них однієї з умов, що створює підвищену небезпеку:

- 1) струмопровідної підлоги (металева, земляна, залізобетонна, цегляна тощо);
- 2) високої температури;
- 3) можливості одночасного дотику людини до металоконструкцій будівель, технологічних апаратів, механізмів тощо, які мають з'єднання з

землею, з одного боку, і до металевих корпусів електроустаткування – з іншого;

Відповідно до введеної класифікації приміщення, де встановлена коптильня, слід віднести до жаркого приміщення з підвищеною небезпекою ураження людей електричним струмом.

На обслуговуючий персонал діють такі шкідливі чинники, як шум та підвищена температура. Тому АРМ оператора-технолога доцільно винести в окреме приміщення, в яке зводиться вся необхідна інформація про стан технологічних параметрів. В системі слід передбачити можливість місцевого та дистанційного керування технологічним обладнанням.

5.2 Вибір технічних засобів збору інформації про хід технологічного процесу і стан обладнання

В ході технологічно процесу копчення риби використовуються наступні технічні засоби:

Для виміру температури повітря в коптильні застосований датчик температури ТЕРА (ТСП гр.100П) в корпусі 1-3 з вбудованим нормуючим перетворювачем (див. рис. 5.1, рис. 5.2).



а)

Технічні характеристики:

Код моделі		ТСМ (50М, 100М)	ТСП (Pt100, Pt1000, 50П, 100П)	
1-3, 1-3а, 1-3в, 1-3н, 1-3п, 1-3ф, 1-4		-50...150	-100...250, -50...250, -50...500, -50...600	
Тип*	R ₀ , Ом	$\alpha=R_{100}-R_0/R_0\cdot100, ^\circ\text{C}^{-1}$	I _{ном.} , макс, мА	Робочий діапазон, °C
50М	50	0,00428	1	-50...180
100М	100			
Pt100	100	0,00385	1	-196...750
Pt1000	1000		0,3	

б)

Рис. 5.1 – Датчик температури ТЕРА (ТСП гр.100П) в корпусі 1-3:

а) зовнішній вигляд; б) технічні характеристики



а)

Технічні характеристики:

Тип	Вхідний сигнал	Вихідний сигнал	Діапазон перетворення, °C	Клас точності, %
ТСЛУ	50П, 100П, Pt100	4-20 мА	0...150, -50...250, -50...650	0,2 або 0,5
ТХАУ	ХА (K)		0...500, 0...850, 0...1300	
ТННУ	НН (N)		0...1300	
ТППВ	S, R		0...1700	
ТПРУ	В		600...1700	

б)

Рис. 5.2 – Вбудований перетворювач температури:

а) зовнішній вигляд; б) технічні характеристики

Для дистанційного виміру температури тушки риби в копильні застосований оптичний датчик температури ExTemp фірми Calex.



а)

Технічні характеристики:

- Temperature range: -20°C to 1000°C
- Two wire, 4-20 mA output
- Fast response time and high stability
- Stainless steel 316 housing -
 - IP65 sealed
- Supplied with up to 25 m cable

б)

Рис. 5.3 – Датчик температури ExTemp:

а) зовнішній вигляд; б) технічні характеристики

Для сигналізації граничних (мінімального та максимального) рівнів копильної рідини застосований дворівневий поплавковий датчик ДПР-3.2.

Технічні характеристики:



а)

Найменування параметра	Значення		
	ДРП-1.2	ДРП-2.2	ДРП-3.2
Електричні параметри			
Кількість сигналізованих рівнів	2		
Максимальна комутувана потужність, Вт	10		30
Максимальний комутований струм, А	0,5		2
Максимальна комутувана напруга, В	180		230
Кількість спрацювань при напрузі комутації постійного струму 24 В і струмі 0,25 А	1х10 ⁶		

б)

Рис.- 5.4. Поплавковий датчик рівня ДПР:

а) зовнішній вигляд; б) технічні характеристики

Для сигналізації тиску повітря застосований датчик-реле тиску А6-753221 (3,52...6,21 бар, $\pm 0,48$) .

Технічні характеристики:



а)

Temperature Limits: -40 to 248°F (-40 to 120°C).**Pressure Limits:**

Operating Pressure: 150 psi (10.3 bar) for 0.5-24 psi set point ranges, 250 psi (17.2 bar) for 25-150 psi set-point ranges;

Proof Pressure: 500 psi (34.5 bar);

Burst Pressure: 750 psi (51.7 bar) for 0.5-24 psi set point ranges, 1250 psi (86.2 bar) for 25-150 psi set-point ranges.

Enclosure Rating: General purpose or with cover: IP65 - weatherproof.**Repeatability:** $\pm 10\%$ of set-point.**Set Point Tolerance:** $\pm 15\%$ of range.**Switch Type:** 1 SPST NO, 1 SPST NC. NO and NC switch independent from each other.**Electrical Ratings:**

Resistive: 15 A @ 6 VDC, 8 A @ 12 VDC, 4 A @ 24 VDC;

Inductive: 1 A @ 120 VAC, 0.5 A @ 240 VAC.

Electrical Connections: #8-32 screw terminals.

б)

Рис.- 5.5. Датчик-реле тиску А6-753221:

а) зовнішній вигляд; б) технічні характеристики

5.3 Вибір технічних засобів для реалізації керуючих впливів технологічного процесу

Для зміни витрат електричної енергії, яка підводиться до ТЕНів, використаний регулятор потужності TS1 SP 3ph фірми Thermokon Sensortechnik GmbH



а)

Технічні характеристики:
 напруга мережі 400 V FC4;
 вхідний сигнал керування 0...10 V DC;
 температура 0...45 °C;
 степінь захисту IP 40;
 монтаж на DIN-рейку

б)

Рис. 5.6 – Регулятор потужності TS1 SP 3ph

а) зовнішній вигляд; б) технічні характеристики

Для керування положенням повітряних заслінок застосовується виконавчий механізм Belimo LR24A60 з лінійним приводом



а)

Напруга живлення AC/DC 24 V 50/60 Hz
 Потужність 1,5 Вт
 Час повороту 150с/100мм
 Крутний момент Мін. 150 Н
 Ступінь захисту IP54 при встановленні в
 будь-якому положенні
 Температура експлуатації -30 ... +50 C
 Довжина ходу 60, 100, 200, 300 мм

б)

Рис. 5.7 – Виконавчий механізм Belimo LR24A60

а) зовнішній вигляд; б) технічні характеристики

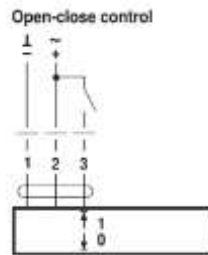


Рис. 5.8 – Схема підключення Belimo LR24A60

Для переривання потоку коптильної рідини використаний електромагнітний клапан CEME 8617, сигнал керування 0-220 V AC.



Технічні характеристики:
 Пропускна здатність K_v 2,2 м³/год
 Мінімальний диференціал тиску 0,3 бар
 Максимальний диференціал тиску 10 бар;
 живлення 230 V AC
 степінь захисту IP 54;

Рис. 5.9 – Зовнішній вигляд та основні технічні характеристики клапану CEME 8617

Для переривання потоку повітря використаний електромагнітний клапан 21A8KV45 (ODE, Italy).



Технічні характеристики:

Робоча температура	-10 + 140 °C
Максимальний тиск на вході	40 bar
Мінімальний перепад тиску	0 bar
Максимальний перепад тиску	
Змінний струм	Постійний струм
5 bar Катушка 8 Вт	2 bar Катушка 8 Вт
	7 bar Катушка 12 Вт
12 bar Катушка 14 Вт	8 bar Катушка 14 Вт
Коефіцієнт пропусної здатності, K_v	6,5 або 9 л/хв
Матеріал мембрани	FKM
Напруга живлення	
Змінний струм, 50/60 Hz	Постійний струм
- 12 В, 24 В, 48 В, 110 В, 220-230 В, 380 В	- 12 В, 24 В, 36 В, 48 В, 110 В, 220 В

Рис. 5.10 – Зовнішній вигляд та основні технічні характеристики клапану 21A8KV45 ODE

5.4 Вибір технічної структури і технічних засобів для реалізації контролерно-комп'ютерної мережі

Виконавши аналіз системи автоматизації ТП копчення риби за розділами 1...4, складемо таблицю зі списком параметрів, які повинні оброблятися в керуючому пристрої - контролері.

Табл. 5.1 – Список параметрів на входах або виходах контролера

№ пп	Найменування параметру	Вид A/D	Тип сигналу I/O	Діапазон сигналу на вході або виході контролера
1	Температура повітря в коптельні	A	I	4...20 mA DC
2	Температура тушки риби	A	I	4...20 mA DC
3	Сигнал авт.вимикача M1	D	I	24 V DC
4	Сигнал стану контактора M1	D	I	24 V DC
5	Сигнал перемикача режиму M1	D	I	24 V DC
6	Сигнал авт.вимикача M2	D	I	24 V DC
7	Сигнал стану контактора M2	D	I	24 V DC
8	Сигнал перемикача режиму M2	D	I	24 V DC
9	Сигнал авт.вимикача M3	D	I	24 V DC
10	Сигнал стану контактора M3	D	I	24 V DC
11	Сигнал перемикача режиму M3	D	I	24 V DC
12	Сигнал датчика-реле рівня копильної рідини	D	I	24 V DC
13	Сигнал датчика-реле тиску повітря	D	I	24 V DC
14	Сигнал керування M1	D	O	24 V DC
15	Сигнал керування M2	D	O	24 V DC
16	Сигнал керування M3	D	O	24 V DC
17	Сигнал керування клапном копильної рідини	D	O	24 V DC
18	Сигнал керування клапаном подачі повітря	D	O	24 V DC
19	Сигнал керування заслінкою повітря	D	O	24 V DC
20	Сигнал керування регулятором потужності	A	O	0...10 V DC

Таким чином кількість каналів вводу / виводу наступна:

AI – 2, AO – 1, DI – 11, DO – 6

Розробка технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування.

В системі автоматизації основне та допоміжне технологічне устаткування розташовується в одному приміщенні компактно, тому доцільно обрати також централізовану схему розміщення модулів системи керування.

Систему керування розроблена на базі контролера S7-1500 фірми Siemens. Приміщення цеху опалювальне, що дозволяє використовувати модулі звичайного виконання, а не з розширеним температурним діапазоном, які дорожче. Враховуючи, що центральний процесор і модулі системи мають виконання IP20, тому вони розміщені у настінній шафі зі ступенем захисту IP54 в окремому від технологічного устаткування приміщенні. Для забезпечення теплового балансу у шафі при монтажі модулів виримані наступні рекомендації (рис. 5.11).

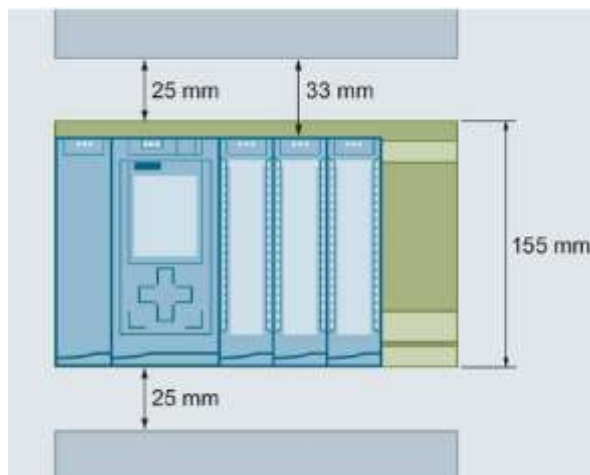


Рис. 5.11 – Рекомендації з монтажу Simatic S7-1500 у шафі

Враховуючи кількість змінних, які необхідно вводити та виводити з контролеру, схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи автоматичного керування приймає наступний вигляд (рис. 5.12).

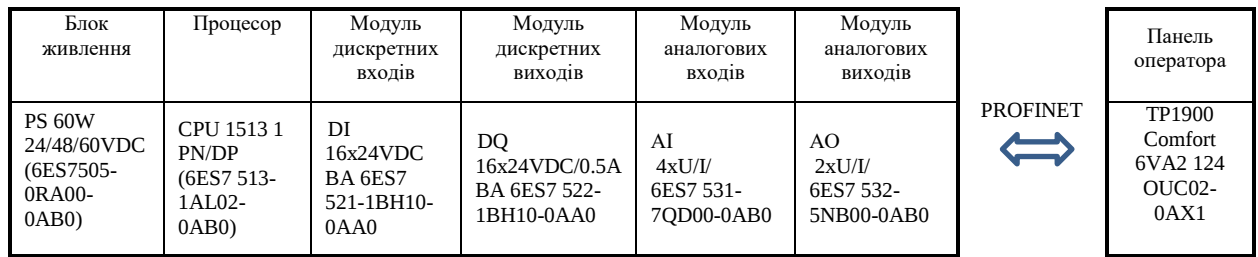


Рис. 5.12 – Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування

Центральний процесор CPU 1513 1 PN без вбудованих каналів вводу-виводу, орієнтований на рішення стандартних завдань автоматичного керування. Дозволяє використовувати в системі локального вводу-виводу весь спектр сигнальних, технологічних та комунікаційних модулів S7-1500.

Article number	6ES7513-1AL02-0AB0
General information	
Product type designation	CPU 1513-1 PN
HW functional status	FS01
Firmware version	V2.5
Engineering with	
• STEP 7 TIA Portal configurable/integrated as of version	V15
Configuration control	
via dataset	Yes
Display	
Screen diagonal [cm]	5.45 cm
Control elements	
Number of keys	8
Mode buttons	2
Supply voltage	
Type of supply voltage	24 V DC
permissible range, lower limit (DC)	19.2 V
permissible range, upper limit (DC)	28.8 V
Reverse polarity protection	Yes
Main buffering	
• Mains/voltage failure stored energy time	5 ms
• Repeat rate, min.	1/s
Input current	
Current consumption (rated value)	0.7 A
Current consumption, max.	0.95 A
Inrush current, max.	1.9 A; Rated value
I _{th}	0.02 A*s
Power	
Infeed power to the backplane bus	10 W
Power consumption from the backplane bus (balanced)	5.5 W
Power loss	
Power loss, typ.	5.7 W
Memory	
Number of slots for SIMATIC memory card	1
SIMATIC memory card required	Yes

Work memory	
• integrated (for program)	300 kbytes
• integrated (for data)	1.5 Mbytes
Load memory	
• Plug-in (SIMATIC Memory Card), max.	32 Gbytes
Backup	
• maintenance-free	Yes
CPU processing times	
for bit operations, typ.	40 ns
for word operations, typ.	48 ns
for fixed point arithmetic, typ.	64 ns
for floating point arithmetic, typ.	256 ns
CPU blocks	
Number of elements (total)	2 000; Blocks (OB, FB, FC, DB) and LADs
OB	
• Number range	1 ... 60 000; subdivided into: number range that can be used by the user: 1 ... 30 000, and number range of OBs created via SFC 68: 60 000 ... 60 000
• Size, max.	1.5 Mbytes; For non-optimized block accesses, the max. size of the OB is 64 KB
FB	
• Number range	0 ... 65 535
• Size, max.	300 kbytes
FC	
• Number range	0 ... 65 535
• Size, max.	300 kbytes
DB	
• Size, max.	300 kbytes
• Number of free cycle OBs	100
• Number of time alarm OBs	20
• Number of delay alarm OBs	20
• Number of cyclic interrupt OBs	20; With minimum OB 3s cycle of 500 µs
• Number of process alarm OBs	60
• Number of DPV1 alarm OBs	3
• Number of synchronous mode OBs	1
• Number of technology synchronous alarm OBs	2
• Number of startup OBs	100

Рис. 5.13 – Технічні дані CPU 1513 1 PN

Для вводу дискретних сигналів обраний модуль DI 16x24VDC BA (6ES7521-1BH10-0AA0)

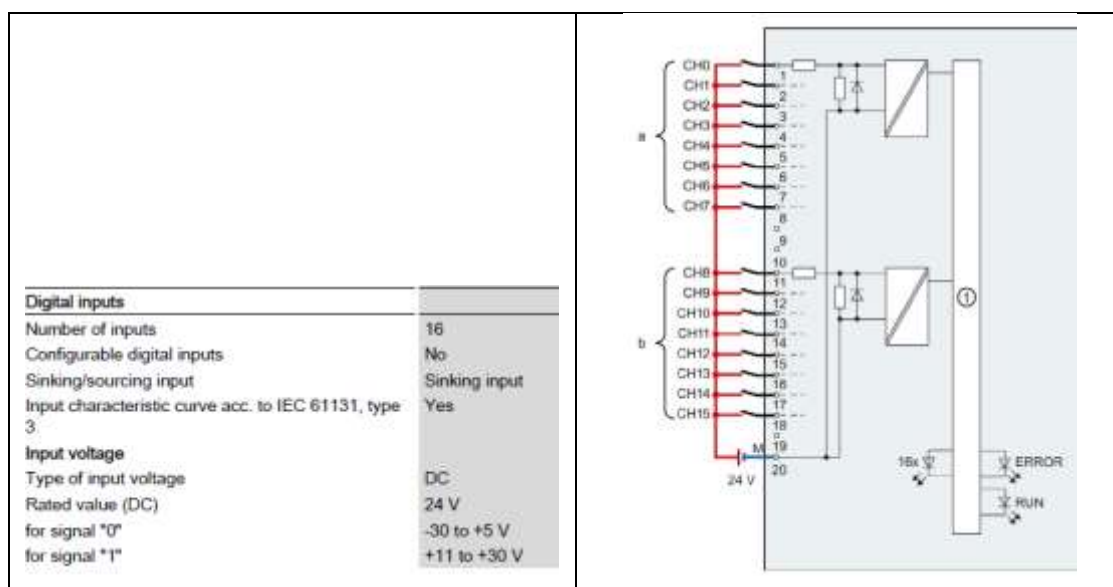


Рис. 5.14 – Технічні характеристики та схема підключень DI 16x24VDC BA

Для виводу дискретних сигналів обраний модуль DQ 16x24VDC/0.5A BA (6ES7522-1BH10-0AA0)

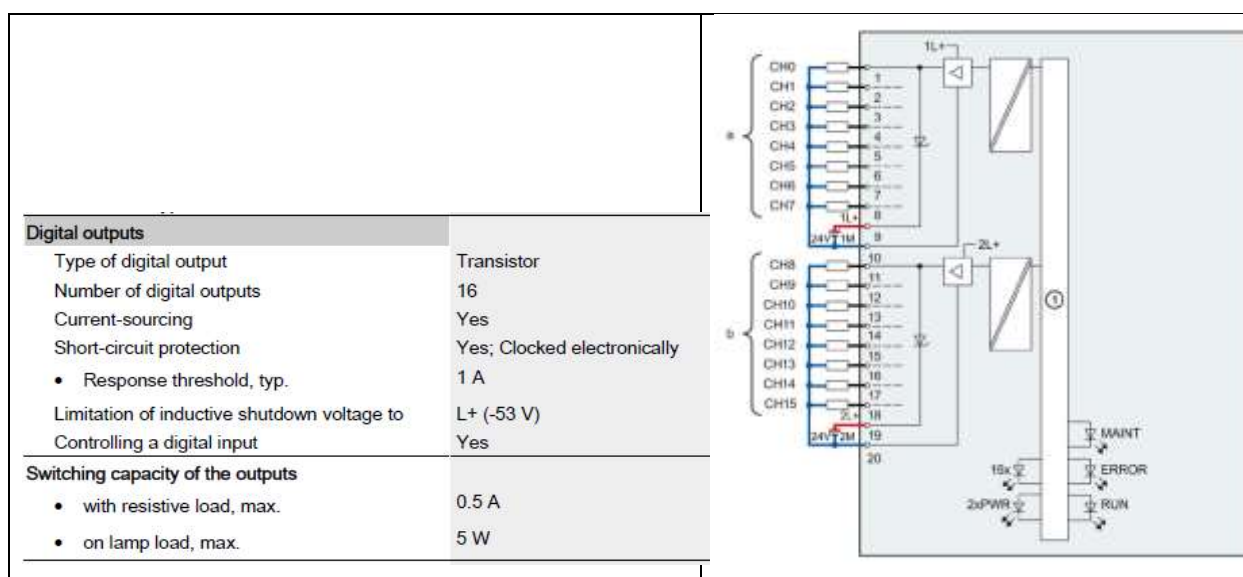


Рис. 5.15 – Технічні характеристики та схема підключень

DQ 16x24VDC/0.5A BA

Для вводу аналогових сигналів обраний модуль AI 4xU/I (6ES7 531-7QD00-0AB0).

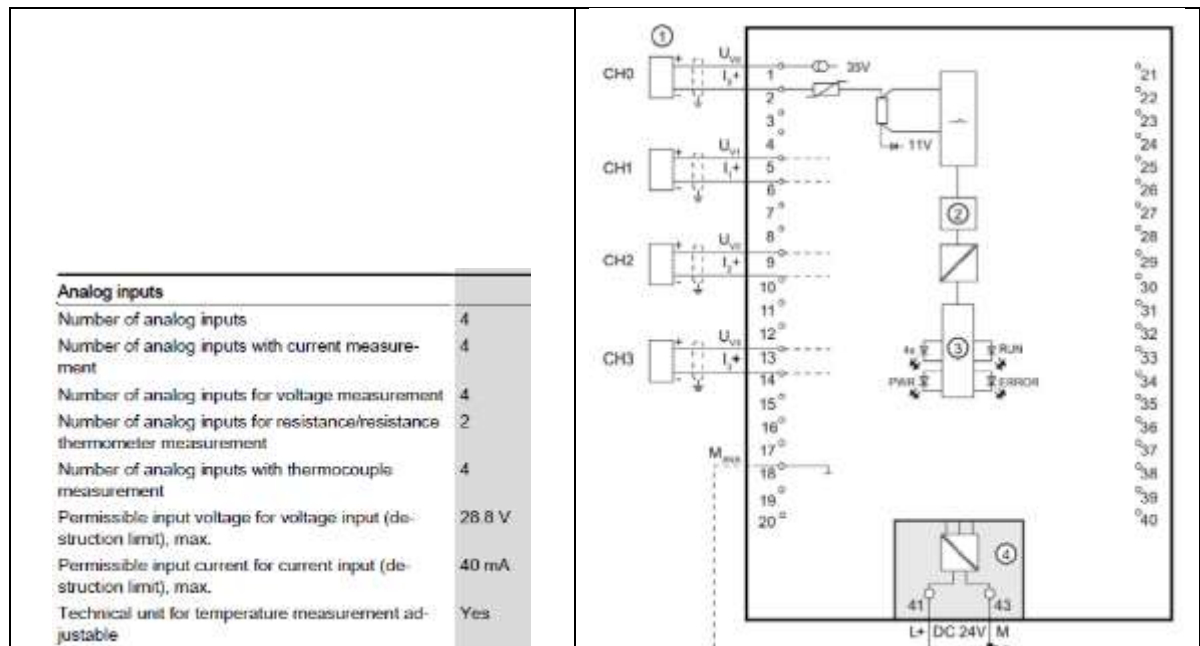


Рис. 5.16 – Технічні характеристики та схема підключень датчиків сили струму до входів 6ES7 531-7QD00-0AB0

Для виводу аналогових сигналів обраний модуль АО 2хU/I/6ES7 532-5NB00-0AB0

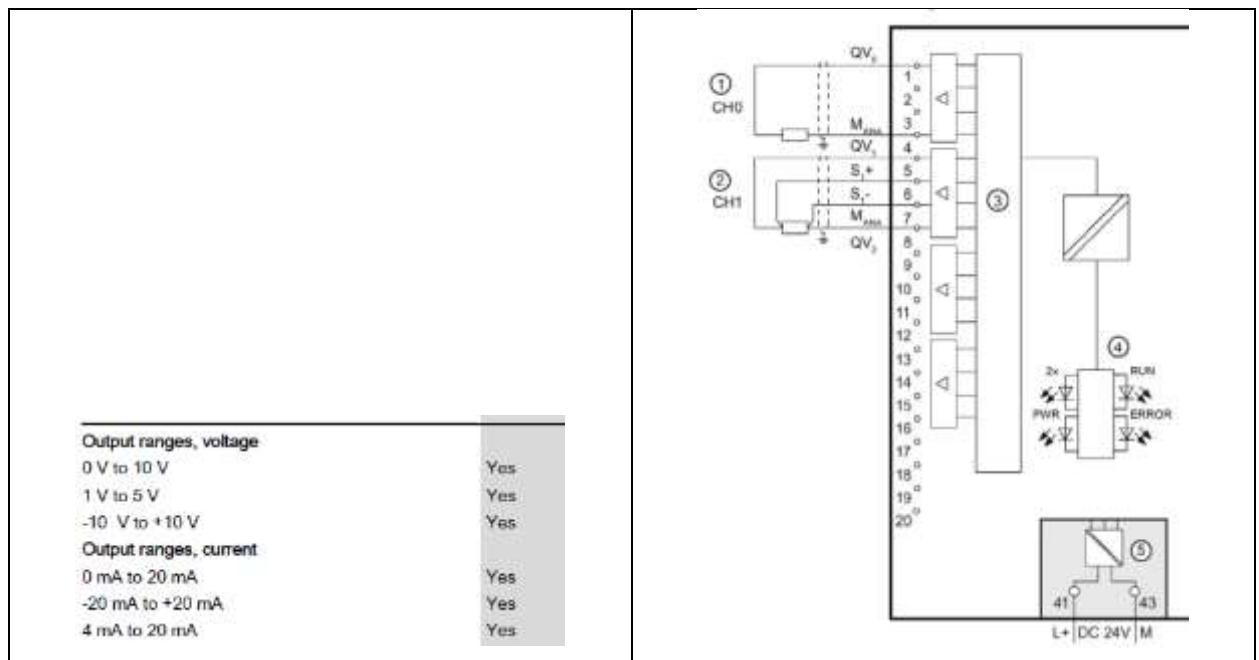


Рис. 5.17 – Технічні характеристики та схема формування уніфікованої напруги на виходах 6ES7 532-5NB00-0AB0

5.5 Висновки за розділом

В даному розділі був проведений вибір технічних засобів для керування процесом копчення риби. Класи точності, ступінь захисту та ступінь вибухозахисту пристроїв відповідають виробничим умовам технологічного процесу. Виходи датчиків та входи виконавчих механізмів сумісні з входами/виходами ПЛК. Система керування побудована за централізованою схемою із використанням ПЛК SIMATIC S7-1500 та панелі оператора TP1900 Comfort, об'єднаних по мережі Profinet, що забезпечує можливість її подальшого розвитку.

6. Параметризація технічних засобів, контролера і мереж, програмування алгоритмів логічного керування та регулювання САК

6.1 Параметризація технічних засобів, контролера і мереж

У середовищі TIA Portal створюємо проект для системи керування процесом бездимного копчення риби і додаємо до його складу контролер CPU 1516-3 PN / DP та панель оператора TP1900 Comfort, які за своїми технічними характеристиками відповідають поставленій задачі автоматизації.

Конфігурування обраного контролера та панелі оператора проводимо шляхом налаштування мережевих зв'язків між ними, для чого вказуємо IP адреси. В якості типу з'єднання обираємо HMI connection.

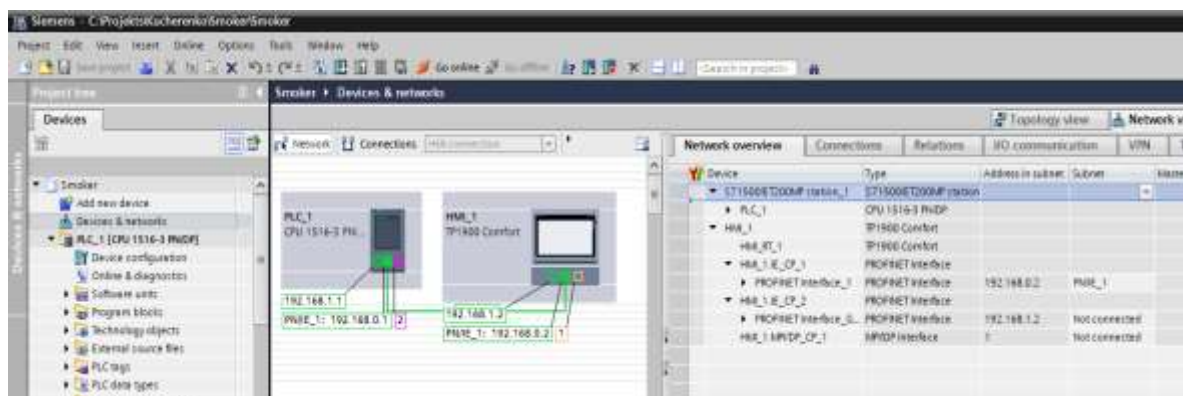


Рис. 6.1 – Визначення складу технічних засобів проекту САК процесом бездимного копченням риби

На вкладці Properties контролера (CPU) встановлюємо можливість користуватися байтами системної пам'яті та байтами часової пам'яті (рис. 6.2). Це важливо для виконання алгоритмів керування камерою копчення.

Далі обираємо з каталогу необхідні модулі вводу/виводу, перетягуємо їх за допомогою миші в поле редагування з бібліотеки (рис. 6.3) Присвоюємо імена фізичним входам і виходам і виконуємо конфігурування модулів ПЗО, для чого обираємо тип і діапазони зміни вхідних та вихідних сигналів (рис. 6.4)

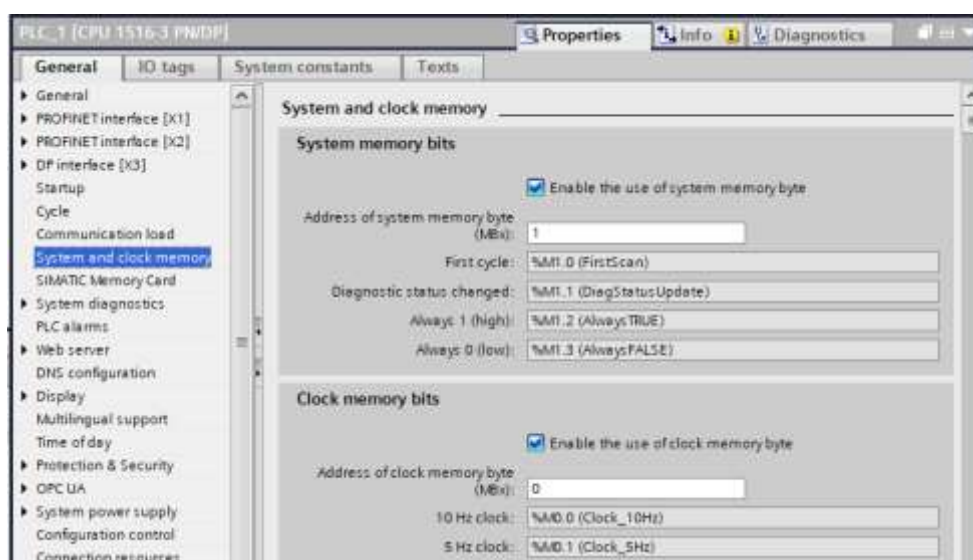


Рис. 6.2 – Приклад використання системних областей пам'яті CPU

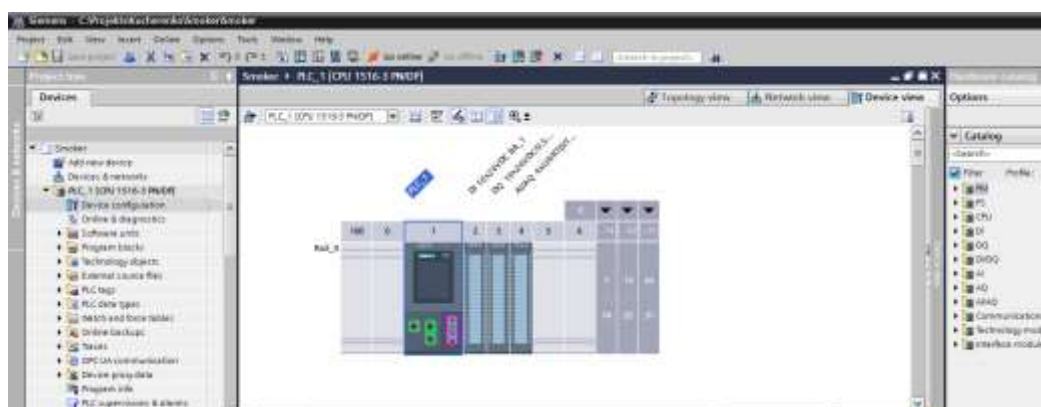


Рис. 6.3 – Приклад визначення ЦПМ та модулів ПЗО

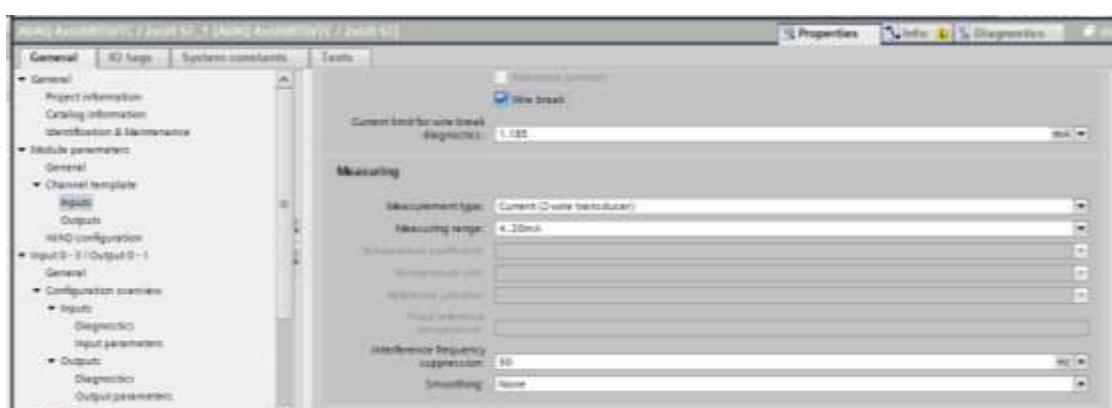


Рис. 6.4 – Приклад визначення виду вхідного сигналу і діапазону його зміни для аналогового модуля

Відповідно до табл. 5.1 проводимо остаточне формування імен вхідів/виходів в таблиці тегів програми.

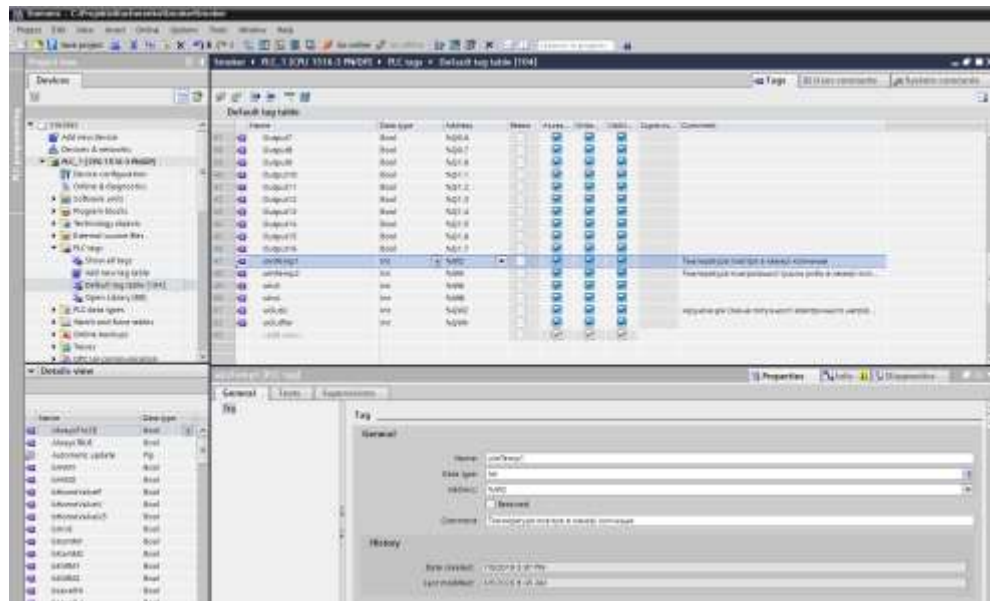


Рис. 6.5 – Фрагмент вікна таблиці тегів

6.2 Розробка програм для реалізації алгоритмів логічного керування

В дереві каталогу проекту створюємо два підкаталоги: Cyclic, де будемо розміщувати функціональні блоки та блоки даних системи регулювання температури контрольної тушки риби, та Logic, де будемо розміщувати функціональні блоки та блоки даних системи логічного керування процесом бездимного копчення риби.

У вкладці Libraries відкриваємо бібліотеку SOL і за допомогою миші перетягуємо в проект теги з бібліотеки SOL та необхідні функціональні блоки для керування електроприводами, аналоговими та відсічним клапанами.

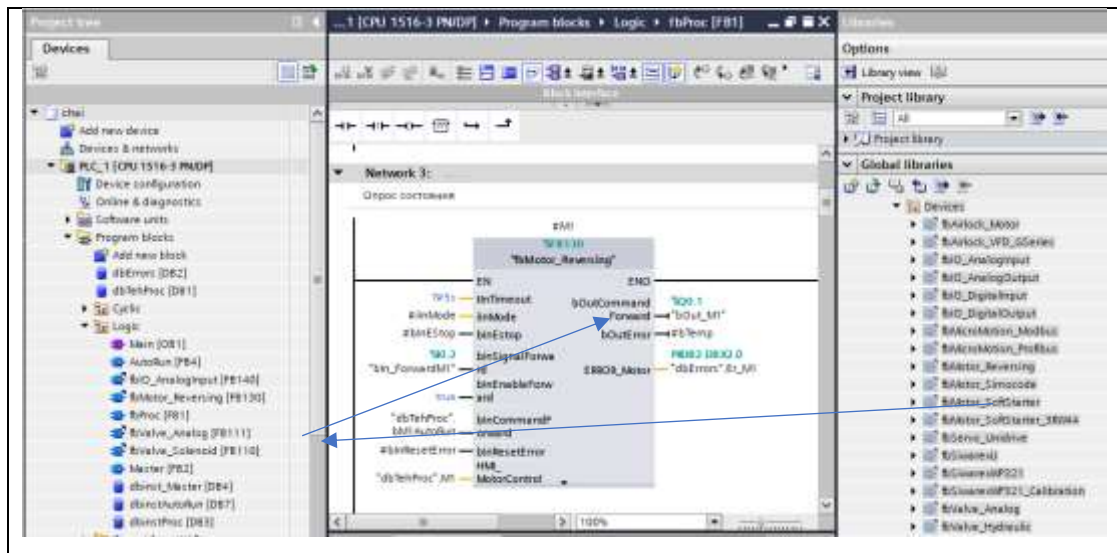


Рис. 6.6 – Приклад додавання функціонального блоку FB Motor в проект системи керування процесом бездимного копчення риби

Основні функціональні можливості цих блоків:

- формування керуючих впливів;
- - аналіз зворотного зв'язку про результати виконання;
- - формування структур даних для обміну з НМІ програмами.

Використовуючи бібліотечні типи даних, які розміщені в дереві каталогу проекту PLC data types, створюємо два глобальних блоки даних dbTehProc, dbErrors.

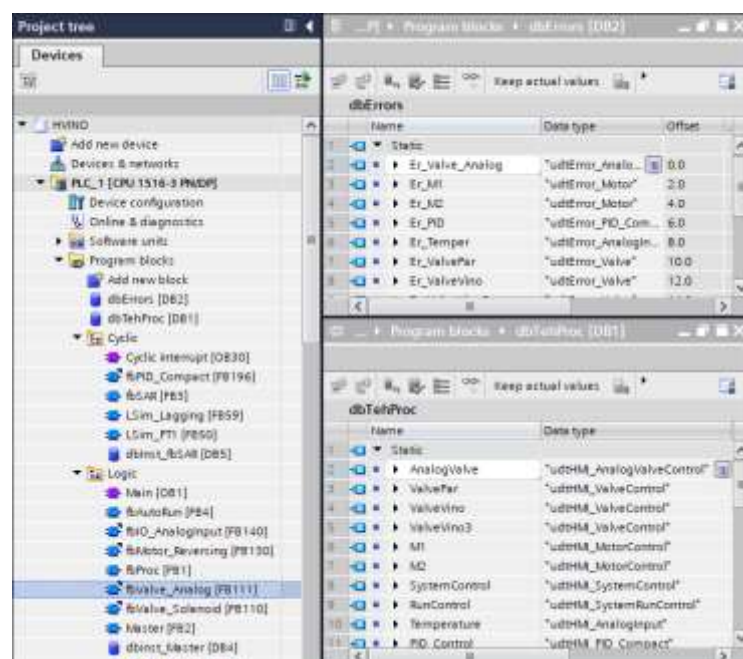


Рис. 6.7 – Створення глобальних dbTehProc, dbErrors

Створення підпрограм логічного керування.

Спочатку розробляємо підпрограму fbProc опитування стану обладнання, а саме електроприводів обертаючого механізму M1 і вентиляторів M2 та M3, аналогового, та відсічних клапанів. Створюємо інтерфейс цього функціонального блоку, в якому в розділах Input, Output, Static, Temp вказуємо імена змінних та їх типи.

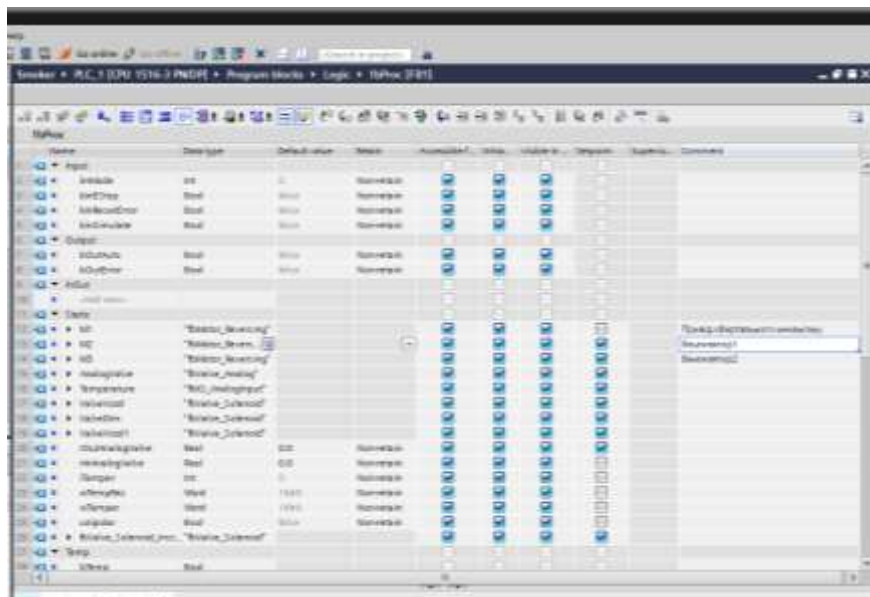


Рис. 6.8 – Інтерфейс програмного блоку fbProc

Підпрограма fbProc створена на мові LD. Для кожного електроприводу викликається екземпляр бібліотечного функціонального блоку fbMotor_Reversing та попередньо пишеться строчка програми, яка імітує зворотній зв'язок з виходу цього блоку на його вхід, тобто спрацювання контактора електропривода. До входів/виходів fbMotor_Reversing підключаються відповідні змінні із блоків даних dbTehProc, dbErrors (рис. 6.9).

Аналогічно здійснюється опит стану відсічних (рис. 6.10) та аналогових клапанів (рис. 6.11). Для цього викликаються екземпляри бібліотечних функціональних блоків fbValve_Solenoid, fbValve_Analog, до входів/виходів яких підключаються відповідні змінні із блоків даних dbTehProc, dbErrors.

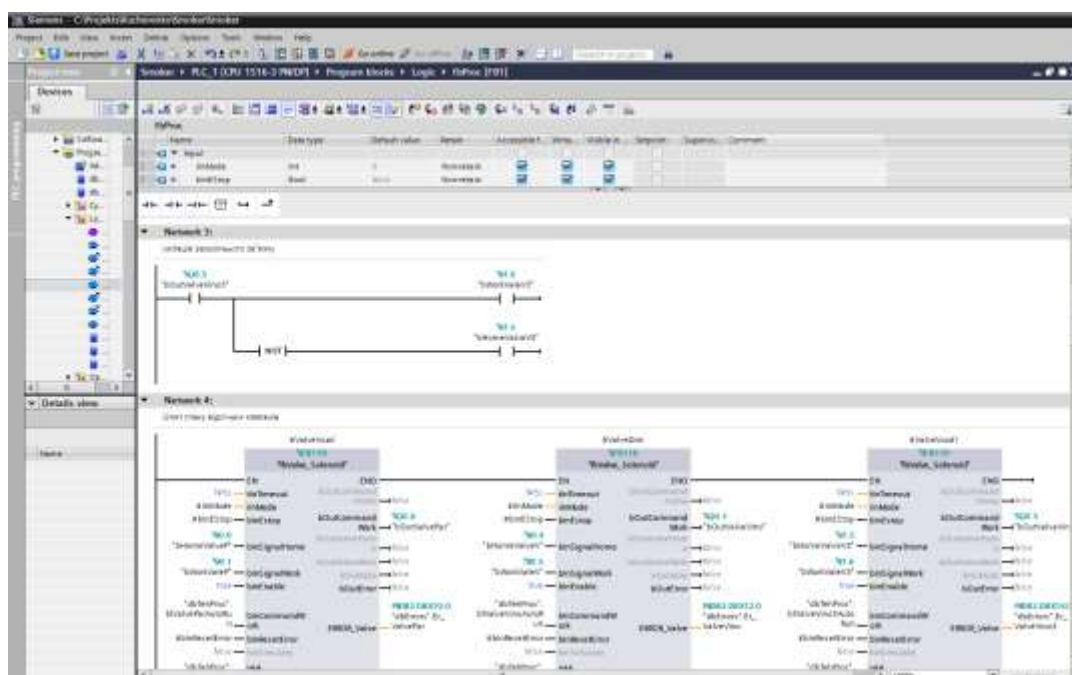


Рис. 6.9 – Фрагмент підпрограми fbPro

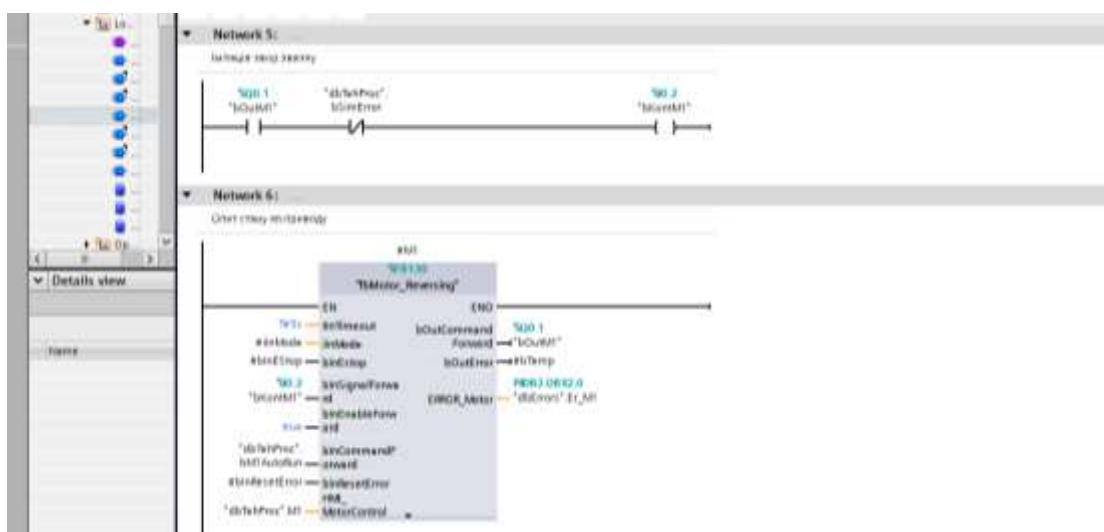


Рис. 6.10 – Фрагмент підпрограми fbPro

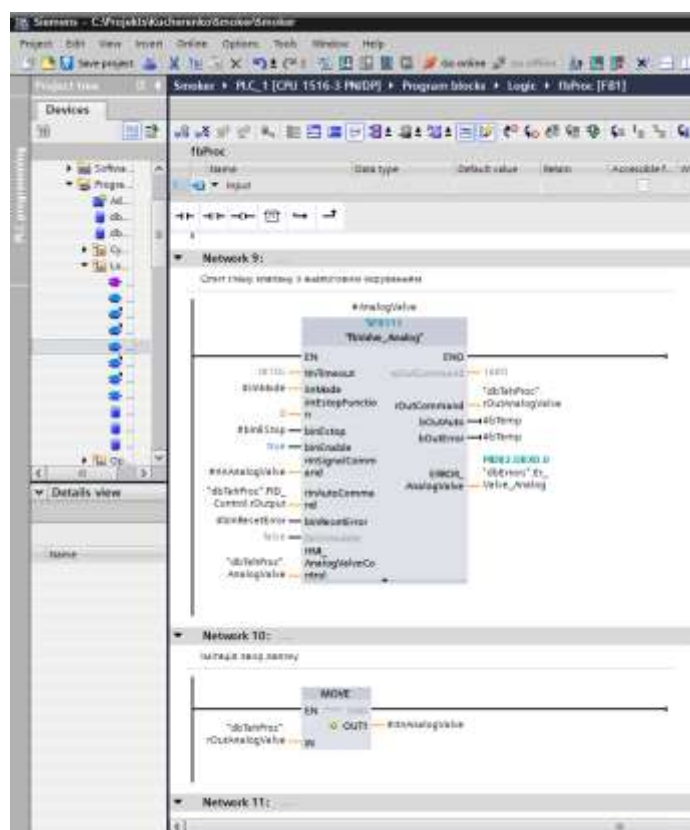


Рис. 6.11 – Фрагмент підпрограми fbProc.

В кінці програми проводяться перевірки режиму роботи та похибок обладнання (клапанів та двигунів).

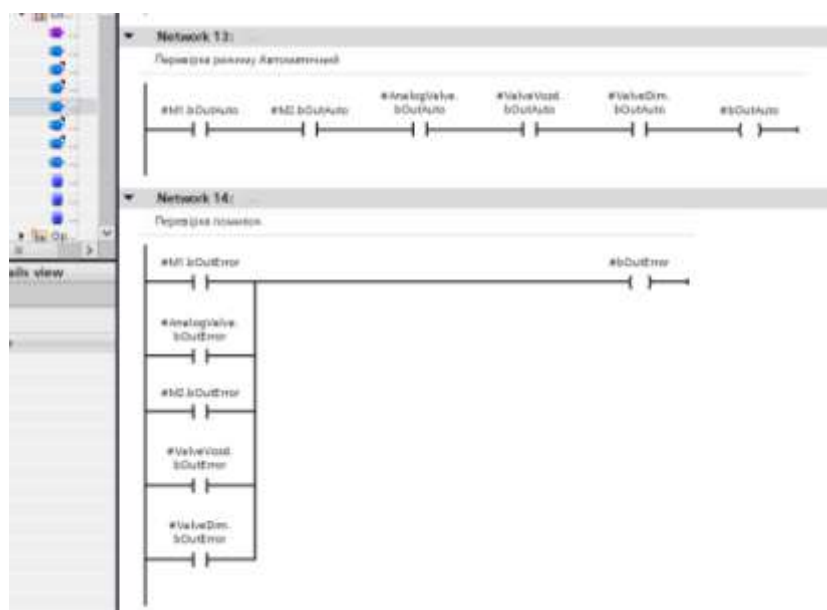
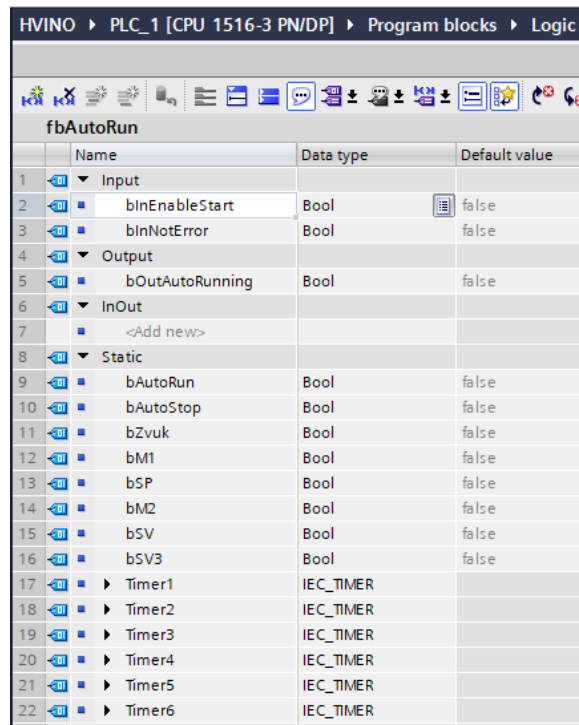


Рис. 6.12 – Фрагмент підпрограми fbProc

Далі складаємо підпрограму пуску та зупинки обладнання камери копчення риби fbAutoRun, яка базується на алгоритмах, розроблених у розділі 4.

Спочатку створюється інтерфейс функціонального блоку fbAutoRun, в якому вказуються змінні та їх типи.



	Name	Data type	Default value
1	Input		
2	bInEnableStart	Bool	false
3	bInNotError	Bool	false
4	Output		
5	bOutAutoRunning	Bool	false
6	InOut		
7	<Add new>		
8	Static		
9	bAutoRun	Bool	false
10	bAutoStop	Bool	false
11	bZvuk	Bool	false
12	bM1	Bool	false
13	bSP	Bool	false
14	bM2	Bool	false
15	bSV	Bool	false
16	bSV3	Bool	false
17	Timer1	IEC_TIMER	
18	Timer2	IEC_TIMER	
19	Timer3	IEC_TIMER	
20	Timer4	IEC_TIMER	
21	Timer5	IEC_TIMER	
22	Timer6	IEC_TIMER	

Рис. 6.13 – Інтерфейс функціонального блоку fbAutoRun

А далі на мові LD пишуться строки цього блоку (рис. 6.14), які забезпечують почерговий запуск та зупинку електроприводів та клапанів. Інтервали затримок встановлюються у відповідних таймерах типу TON, які відносяться до базових інструкцій мови, так само як і SR-тригери.

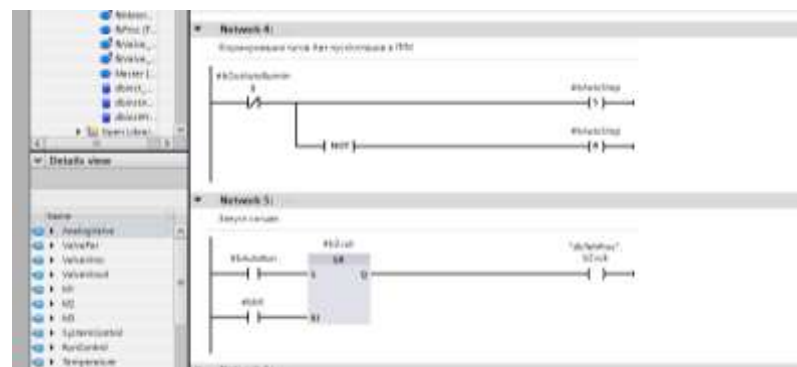


Рис. 6.14 – Фрагмент підпрограми fbAutoRun

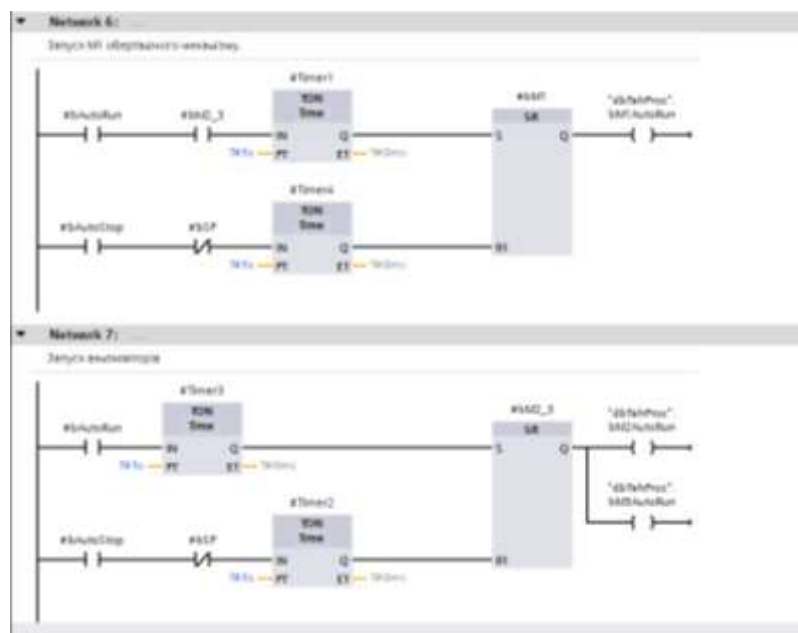


Рис. 6.15 – Фрагмент підпрограми fbAutoRun

Завершують підпрограму строки із визначенням режиму роботи «ручний-автоматичний» ПД-регулятора (рис. 6.16).

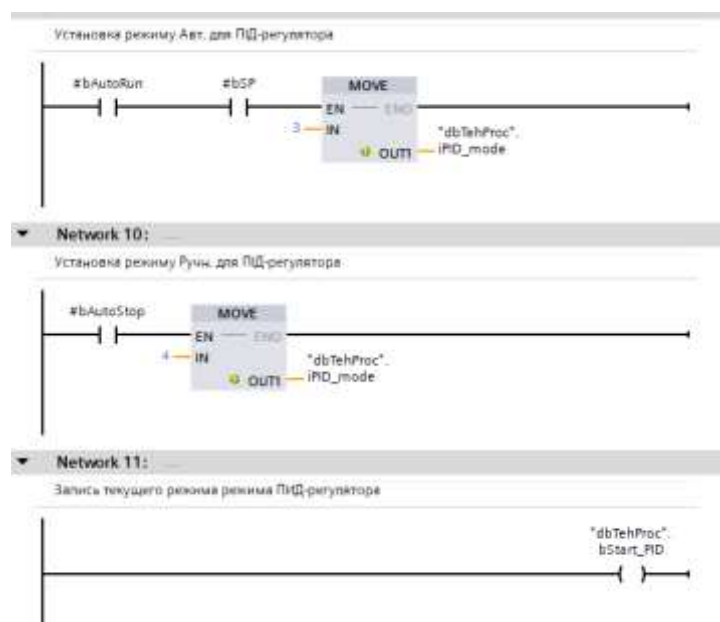


Рис. 6.16 – Фрагмент підпрограми AutoRun

Виклик на виконання підпрограм fbProc та fbAutoRun здійснюється в підпрограмі Master (рис. 6.17), яка в свою чергу викликається на виконання в

головній програмі Main (OB1). Це відповідає загальному принципу побудови програм у контролері.



Рис. 6.17 – Інтерфейс та текст підпрограми Master

Циклічне виконання цих підпрограм забезпечує опит стану обладнання, його автоматичний пуск і зупинку.

6.3 Розробка програм для реалізації алгоритмів регулювання

Алгоритми регулювання для процесу бездимного копчення риби були розроблені і протестовані в розділах 1..3, де були визначені параметри моделі об'єкту керування і параметри ПІД-регуляторів.

В середовищі TIA Portal модель САР реалізована у функціональному блоці FB SAR, розрахунок якого виконується кожну 0,1 сек в організаційному блоці Syclic interrupt (OB30). Необхідність використання саме організаційного блока OB30 зумовлена вимогою до точного визначення кроку квантування при розрахунках керуючого впливу у ПІД регуляторі.

Модель САР запрограмована спрощено з використанням функціональних блоків типового регулятора fbPID_Compact та типових динамічних ланок з бібліотеки LSim (FB LSim_Lagging і FB LSim_PT1), що формують модель ОК. Інтерфейс підпрограми САР представлений на рис. 6.18, в якому вказані змінні підпрограми та їх типи.

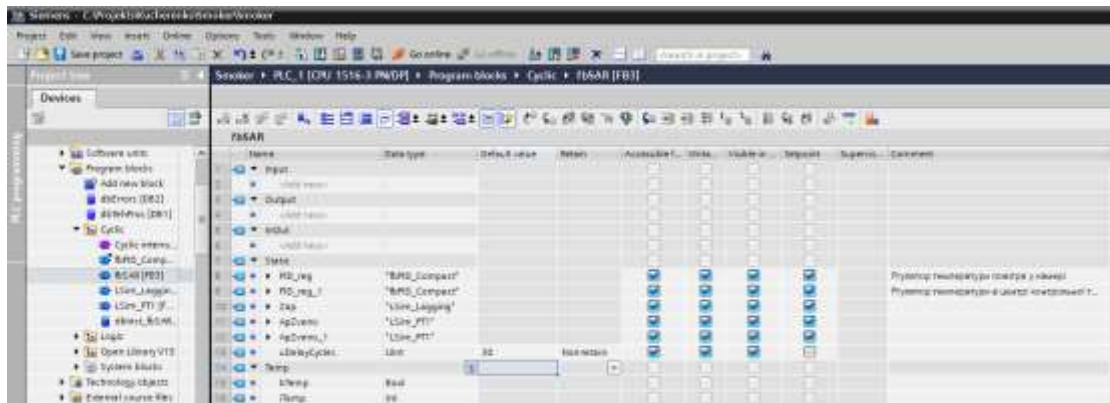


Рис. 6.18 – Фрагмент інтерфейсу функціонального блоку fbSAR

Перша строчка підпрограми fbSAR містить виклик функціонального блоку ПІД-регулятора fbPID_Compact, до входів/виходів яких підключаються відповідні змінні із блоків даних dbTehProc, dbErrors.

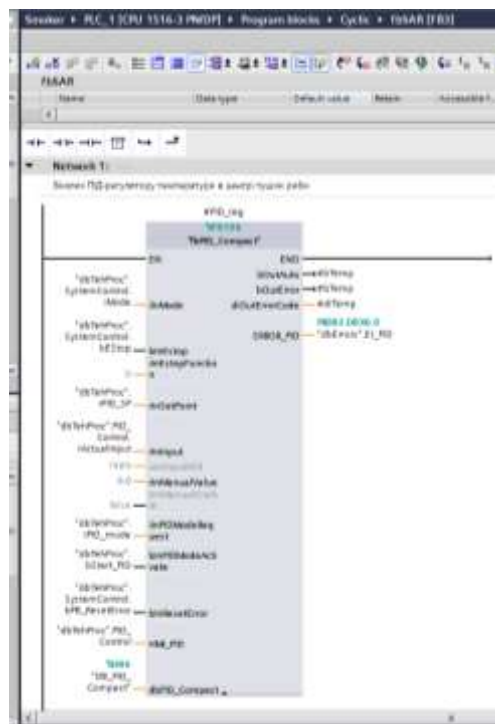


Рис. 6.19 – Фрагмент функціонального блоку fbSAR,
що реалізує ПІД-регулятор

Налаштування параметрів ПІД-регуляторів проводимо через їх блоки даних, що знаходяться в розділі Technology objects в дереві каталогу проекту.



Рис. 6.20 – Приклад налаштування параметрів ПІД-регулятора

Вихідні сигнали ПІД-регуляторів підключаються до входів функціональних блоків аналогових клапанів або напряму до виходу контролеру та регулятору потужності ТЕНу (див. рис. 6.11).

Далі за допомогою екземплярів типових ланок: запізнення LSim_Lagging та інерційної ланки першого порядку LSim_PT1, викликається на виконання модель ОК (рис. 6.21). Модель ОК спрощена, але параметри моделі відповідають значенням, розрахованим в розділі 3.

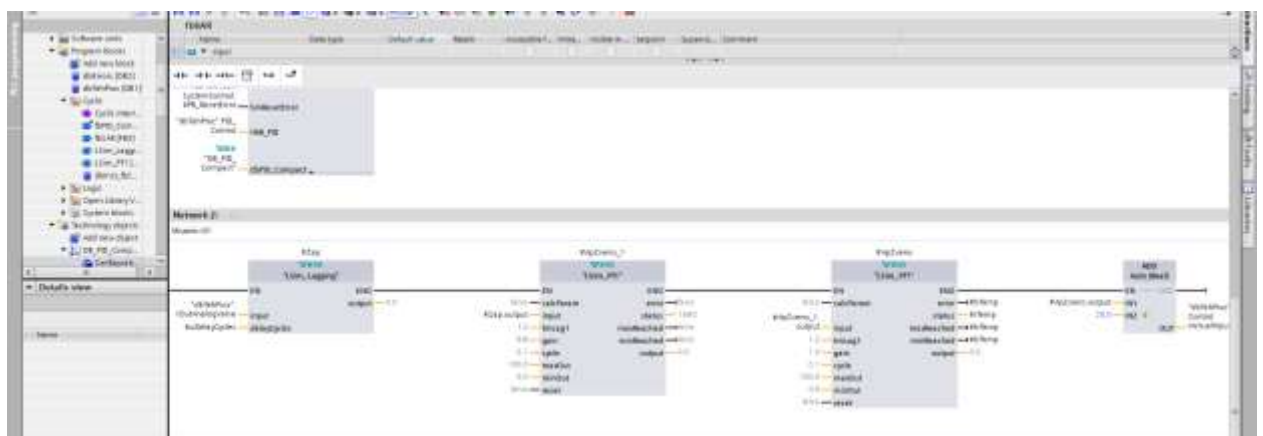


Рис. 6.21 – Фрагмент функціонального блоку fbSAR, що реалізує модель ОК

Тестування проекту і налаштування програмних модулів проводиться в режимі емуляції контролера з використанням програми S7 PLCSIM. На рисунку 6.22 представлений загальний вигляд вікна емулятора контролера з працюючою в ньому програмою.



Рис. 6.22 – Вигляд вікна програми PLCSIM

Результати тестування підтвердили правильність роботи програми, відповідно до вимог алгоритму керування процесом бездимного копчення риби.

6.4 Висновки за розділом

В результаті виконання даного розділу було проведено програмне конфігурування контролерів фірми Siemens сімейства S7-1500 та розроблено програмне забезпечення САК процесом бездимного копчення риби яке реалізує алгоритми логічного керування та регулювання. Програмне забезпечення реалізовано в середовищі TIA Portal.

7. Розробка SCADA для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика САК

7.1 Встановлення зв'язку між контролером та панеллю оператора, її конфігурування

Для організації зв'язку між контролером та панеллю оператора системи керування бездимним копченням риби вибираємо тип сполучення «HMI connection» та встановлюємо унікальні адреси технічних засобів в мережі PROFINET.

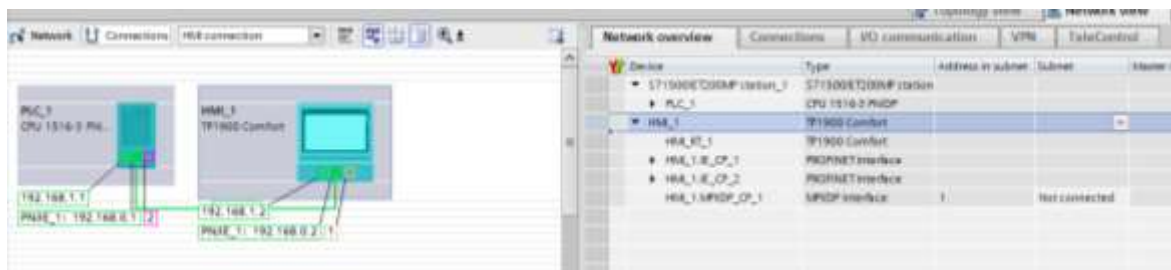


Рис. 7.1 – Встановлення IP-адрес технічних засобів проекту та типу їх сполучення в мережі

Конфігурування панелі оператора TP 1900 Comfort виконуємо в розділі Runtime settings дерева каталогу проекту системи керування бездимним копченням риби.

7.2 Конкретизація функцій і структури екранів АРМ оператора-технолога

Структура екранів АРМ оператора-технолога повинна містити в собі екрани для керування процесом бездимного копчення риби:

- екран схеми установки для керування технологічним процесом бездимного копчення риби;

- екран для спостереження за регульованими змінними (температура повітря в камері та температура в центрі контрольної тушки риби);

- екран для відтворення діагностичних повідомлень про роботу технологічного агрегату (камери копчення).

Функції екранів АРМ оператора-технолога:

- екран схеми установки надає функції керування усіма клапанами та електродвигунами, як в автоматичному режимі, так і в ручному;

- екран для спостереження за регульованими змінними надає можливість спостерігати за графіками в реальному часі, змінювати задане значення та налаштування регуляторів температури;

- екран для відтворення діагностичних повідомлень надає можливість бачити повідомлення про несправності обладнання камери копчення, а також перегляду повідомлень, які зберігаються в архіві.

7.3 Розробка екранів АРМ оператора-технолога

Шаблон екранів.

Шаблон екранів Template_1 створюється в розділі Screen Management дерева каталогу проекту в розділі НМІ. Графічні елементи розташовані у вікні шаблону будуть присутні на всіх екранах, які входять в проект.

Шаблон екранів включає заголовок екрану і меню перемикання екранів АРМ. Він включає логотипи академії, елемент відображення поточної дати і часу, назву проекту, прізвище розробника проекту.

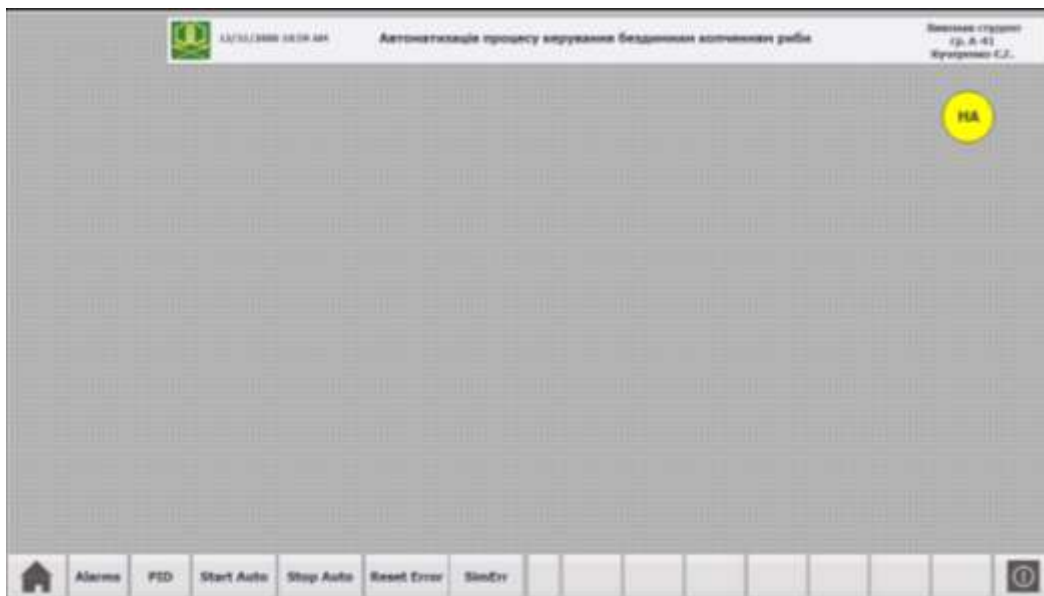


Рис. 7.4 – Загальний вигляд шаблону екранів для АРМ оператора камери бездимного копчення риби

Меню переключення екранів складається з набору кнопок, що дозволяють виконувати перемикання між різними графічними вікнами. Для перемикання вікон використовуються спеціальні системні функції.

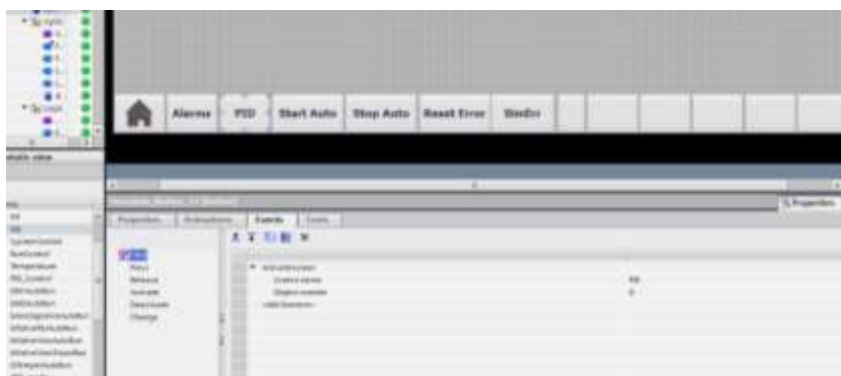


Рис. 7.5 – Приклад використання системної функції «Activate Screen» для перемикання екранів графічного інтерфейсу

Для кожної одиниці обладнання створюємо спливаючі вікна Pop-up screens і заповнюємо їх з відповідного розділу бібліотеки SOL.

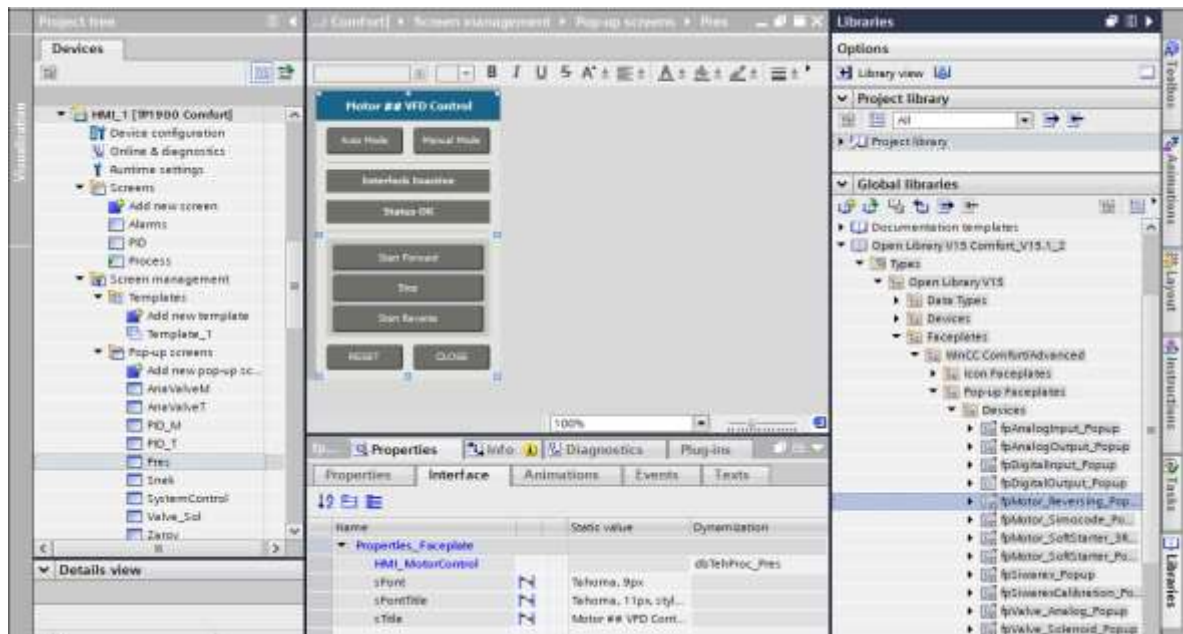


Рис. 7.6 – Приклад створення спливаючих вікон для керування окремим обладнанням камери бездимного копчення риби

У властивостях Properties кожного спливаючого вікна на вкладці Interface встановлюємо взаємозв'язок із тегом HMI, який буде забезпечувати динамізацію зображення вікна та можливість керування оператором станом електроприводів та клапанів.

Основний екран «Схема установки» містить схематичне зображення камери бездимного копчення риби з нанесеними на нього елементами відображення і керування. Зображення створено в графічному редакторі TIA Portal з використанням стандартних елементів графічної бібліотеки цього редактора. Встановлені на схемі графічні елементи відображення і управління дозволять оператору контролювати стан обладнання системи і значення технологічних параметрів, а також керувати обладнанням системи.

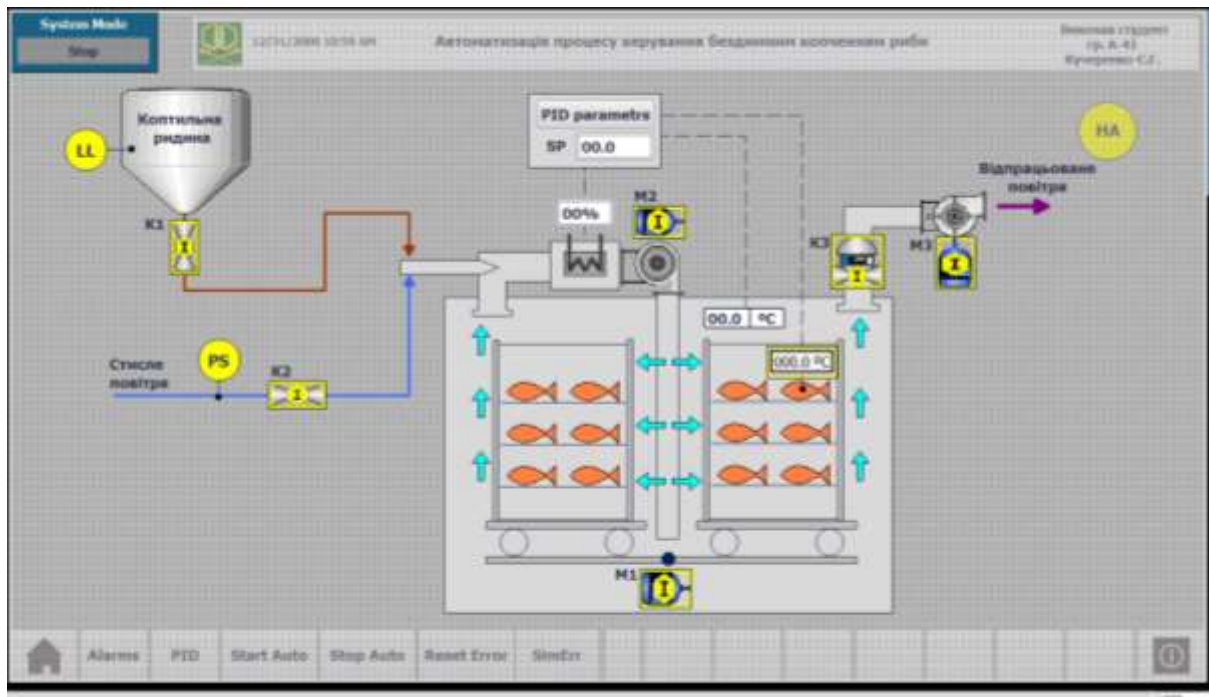


Рис. 7.7 – Екран схеми установки бездимного копчення риби

Для цього на проєкцію екрану переносимо за допомогою миші з відповідного розділу бібліотеки SOL піктограми обладнання.

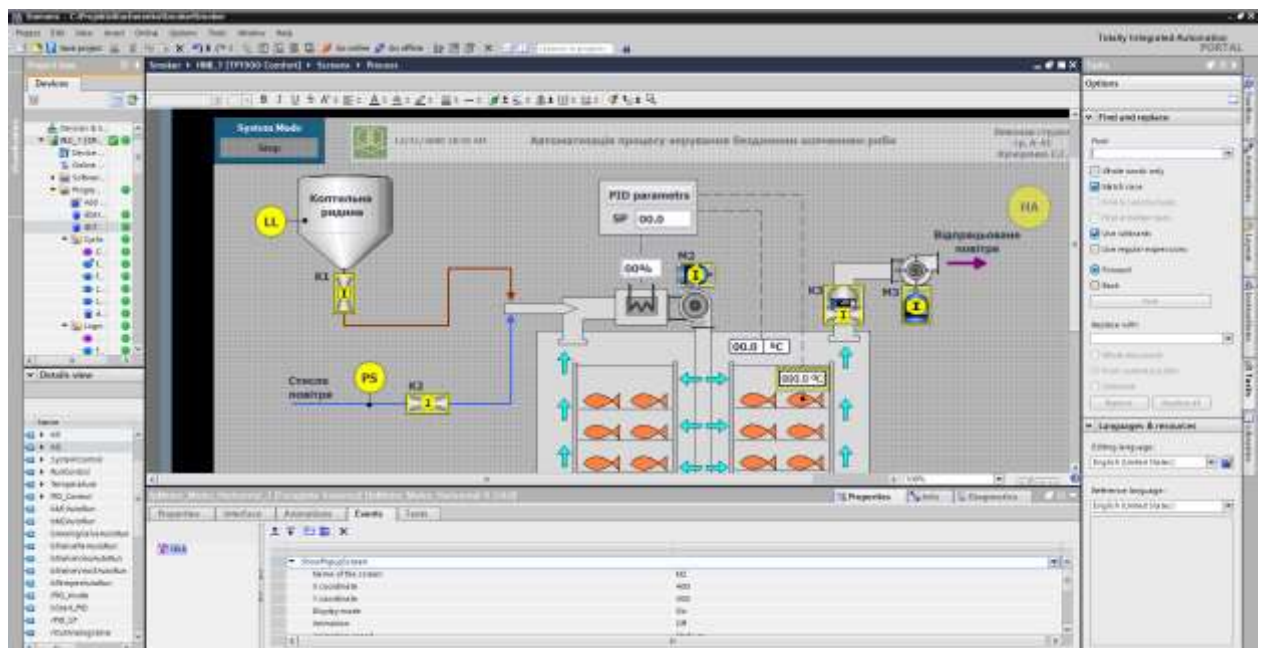


Рис. 7.8 – Приклад налаштування піктограми електроприводу

Натискання на зображення піктограми забезпечить відкривання зображення відповідного спливаючого вікна конкретної одиниці обладнання,

оскільки у властивості Events піктограми вписано виконання системної функції ShowPopupScreen.

Для реєстрації змін основних технологічних параметрів та налаштування параметрів ПІД-регуляторів в проекті передбачений екран PID (рис. 7.9).

Для побудови графіків зміни температури повітря та температури в центрі контрольної тушки риби використовується елемент Trend View із стандартної бібліотеки. Приклад його налаштування наведений на рис. 7.10.

Виклик спливаючого вікна налаштування параметрів ПІД-регулятора здійснюється натисканням відповідної кнопки на екрані.

Змінити задане значення контуру регулювання можна за допомогою вікна вводу/виводу.

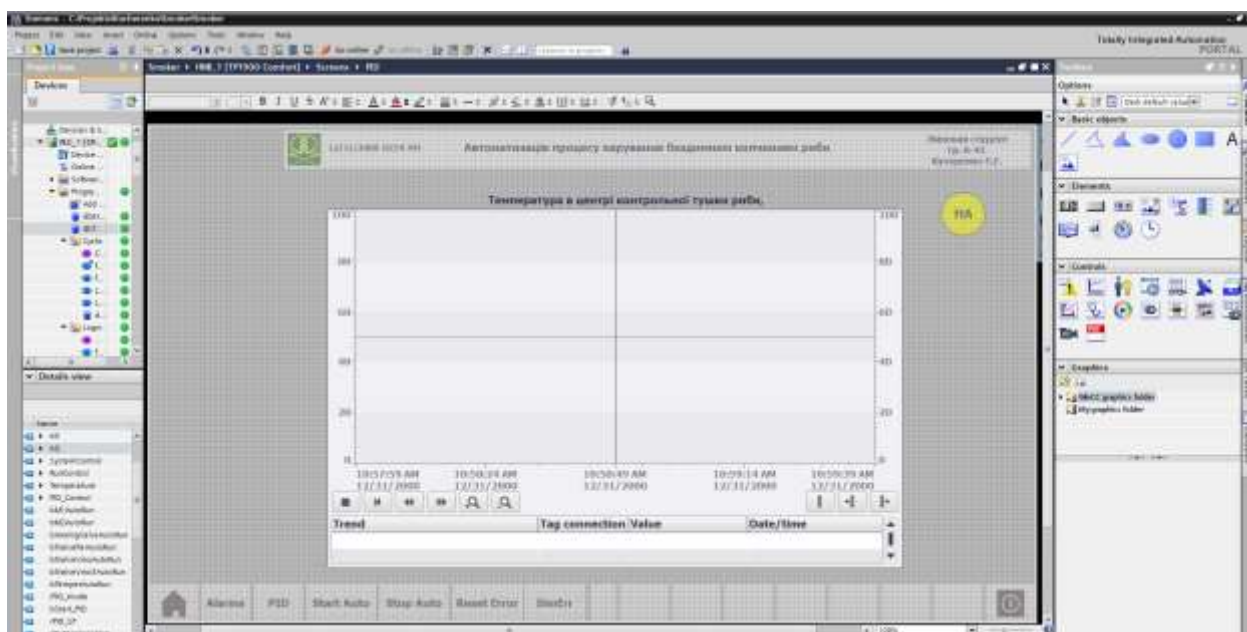


Рис. 7.9 – Екран графіків

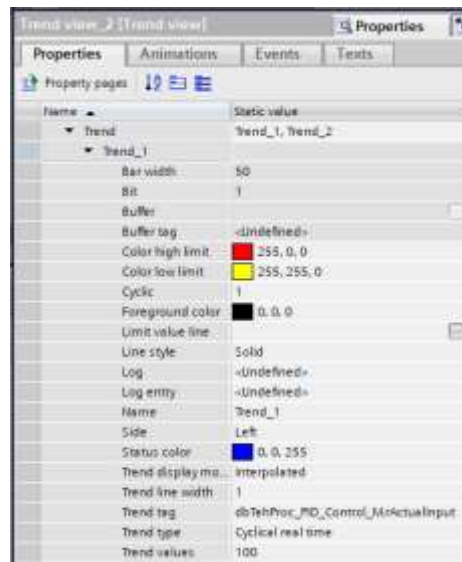


Рис. 7.10 – Вікно налаштування елементу Trend

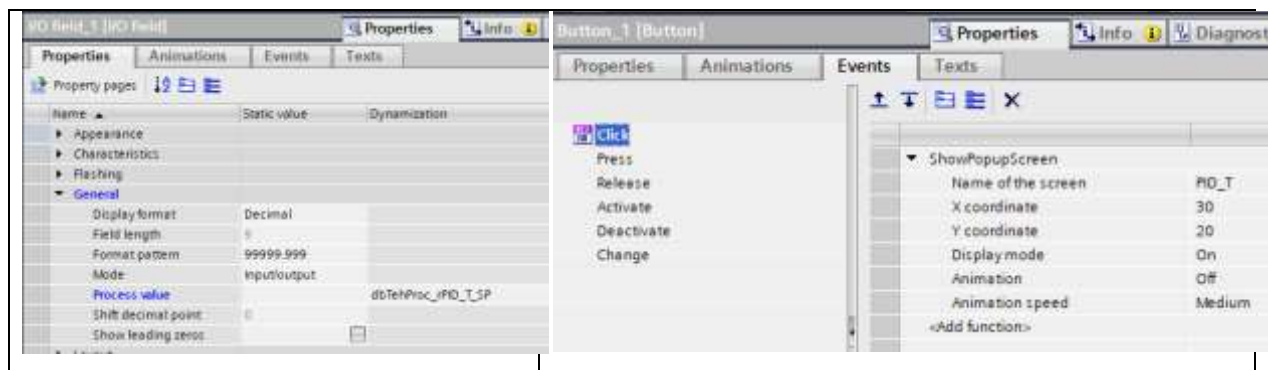


Рис. 7.11 – Налаштування вікна вводу/виводу та кнопки

Для інформування оператора про стан технологічного процесу бездимного копчення риби і виникнення подій (Alarm) з обладнанням установки в проекті створена система повідомлень. Вона включає повідомлення від програми користувача і системні повідомлення ОС ПЛК. Повідомлення від програми, розділяються на дискретні і аналогові і належать класам «Warnings» (попередження) і «Errors» (помилки). Повідомлення класу «Errors» інформують про критичні або небезпечні робочі стани та заносяться в архів.

В програмі користувача в ПЛК функціональні блоки, які обслуговують одиницю обладнання, формують інформацію про події в 16-бітному слові (тип

Word). Кожному виду несправності відповідає певний біт. Ці слова потім збираються в програмі ПЛК в окремий блок даних dbErrors.

Далі теги з цього блоку даних пов'язуємо з 16-бітними тегами HMI.

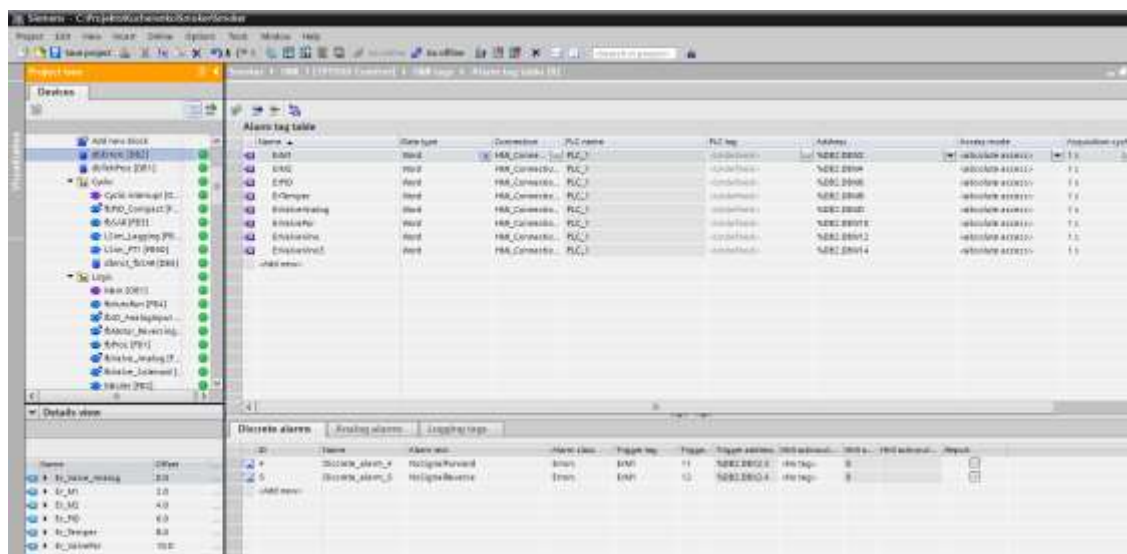


Рис. 7.12 – Приклад прив'язки тегів dbErrors з HMI-тегами для обладнання установки з бездимного копчення риби

Кожний біт HMI-тега з Alarm tag table сортуємо по типам та по класам Errors або Warnings (див. рис. 7.12). Кожному з цих бітів відповідає своє повідомлення (Alarm text). Для відображення цих повідомлень для оператора створюємо екран Alarms (див. рис. 7.13).

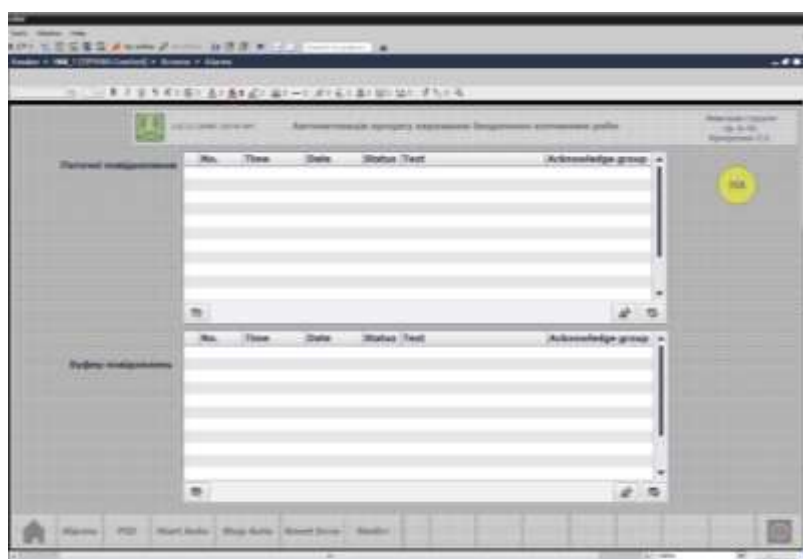


Рис. 7.13 – Екран Alarms повідомлень про несправності установки з бездимного копчення риби

Вивід повідомлень на екран виконується за допомогою елемента «Alarm View», який може бути налаштований на виведення поточних активних повідомлень, вмісту буфера повідомлень, вмісту архіву повідомлень. Приклад налаштування наведено нижче.

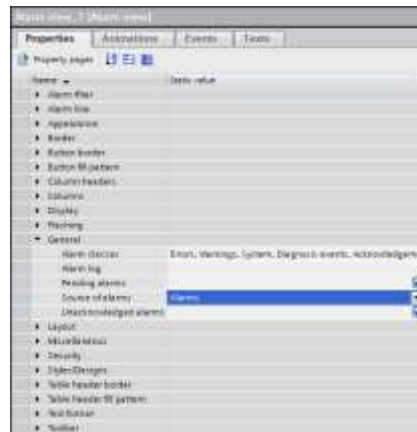


Рис. 7.14 – Налаштування властивостей елементу Alarm View

При цьому можуть виводитися на екран повідомлення різних класів.

7.4 Тестування системи керування

Тестування роботи САК камерою бездимного копчення риби проведемо в режимі емуляції контролера з використанням програми S7-PLCSIM, в середовищі якої завантажуюмо проект ПЛК після його компіляції.

Відображення екранів виконується в режимі симуляції в середовищі WinCC Runtime Advanced, куди після компіляції завантажуюмо проект HMI.

В залежності від вимог виробництва оператор має змогу налаштувати систему на режими: стоп, ручний, автоматичний, індивідуальний. На рис. 7.16 – 7.20 наведено приклади вікон HMI – оператора.

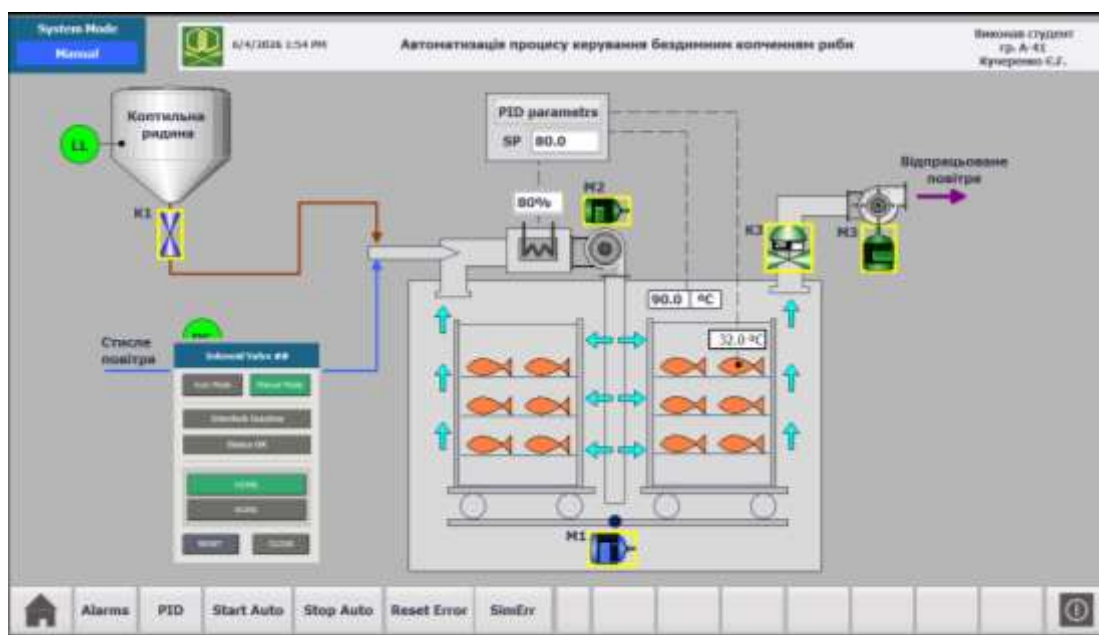


Рис. 7.16 – Схема установки бездимного копчення риби в ручному режимі

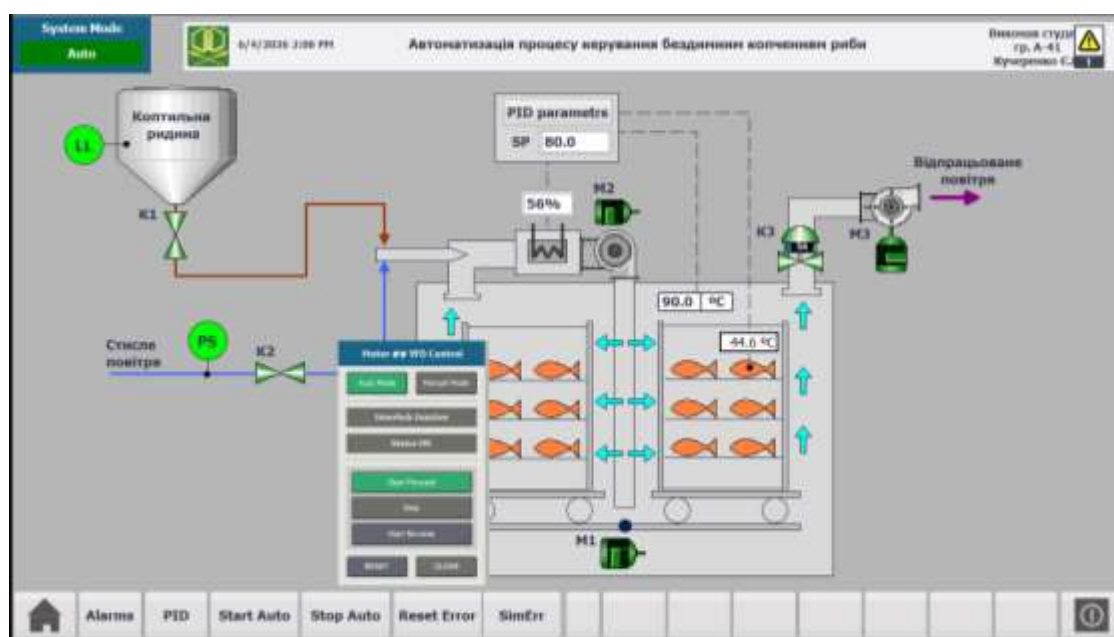


Рис. 7.17 – Схема установки бездимного копчення риби в автоматичному режимі

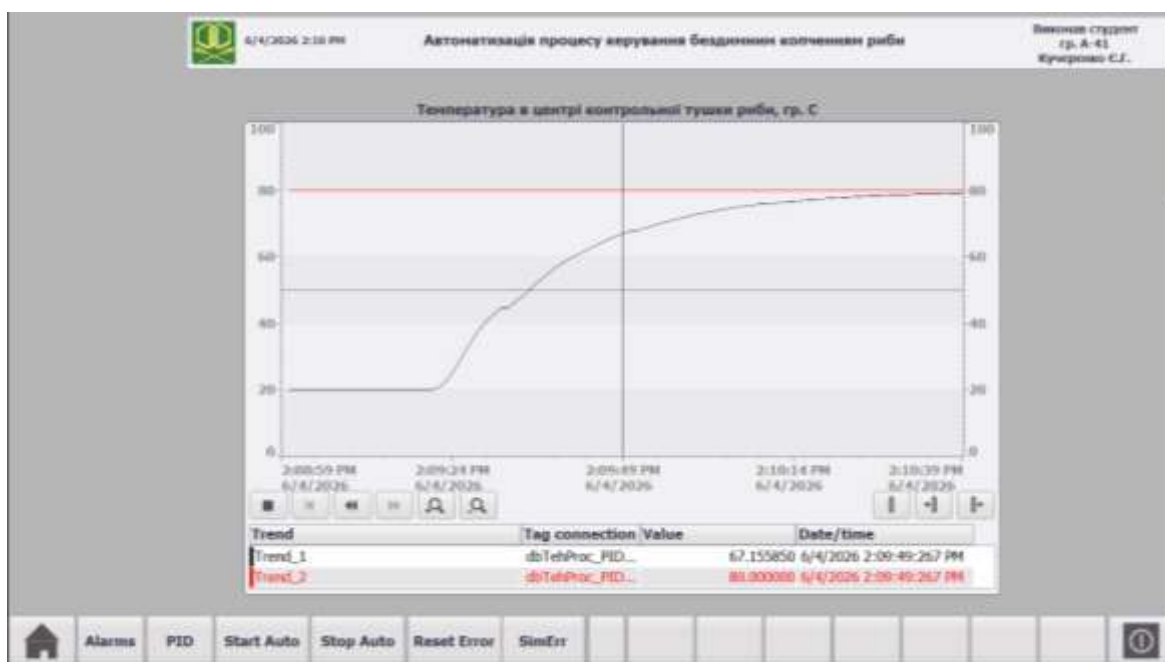


Рис. 7.18 – Екран PID з відображенням температури в центрі контрольної тушки риби в тестовому режимі

The screenshot shows the "Alarms" screen with two tables: "Поточні повідомлення" (Current messages) and "Буфер повідомлень" (Buffer messages). The bottom of the screen has a navigation bar with buttons: Alarms, PID, Start Auto, Stop Auto, Reset Error, and SimErr.

No.	Time	Date	Status	Text	Acknowledge group
1	2:14:27 PM	6/4/2026	2	Notification received	0
2	2:13:38 PM	6/4/2026	1	Температура в центрі тушки...	0

No.	Time	Date	Status	Text	Acknowledge group
1	2:14:27 PM	6/4/2026	2	Notification received	0
2	2:13:38 PM	6/4/2026	1	Температура в центрі тушки риби н...	0
2	2:09:49 PM	6/4/2026	1	Температура в центрі тушки риби н...	0
2	2:07:10 PM	6/4/2026	1	Температура в центрі тушки риби н...	0
\$ 140000	2:07:10 PM	6/4/2026	1	Connection established: HMI_Connects...	0
\$ 110001	2:07:06 PM	6/4/2026	1	Change to operating mode 'online'.	0
\$ 70018	2:07:06 PM	6/4/2026	1	User administration imported successf...	0
\$ 70022	2:07:06 PM	6/4/2026	1	User administration import started.	0

Рис. 7.19 – Екран Alarms в тестовому режимі при імітації несправності обладнання (двигуна M1) камери копчення

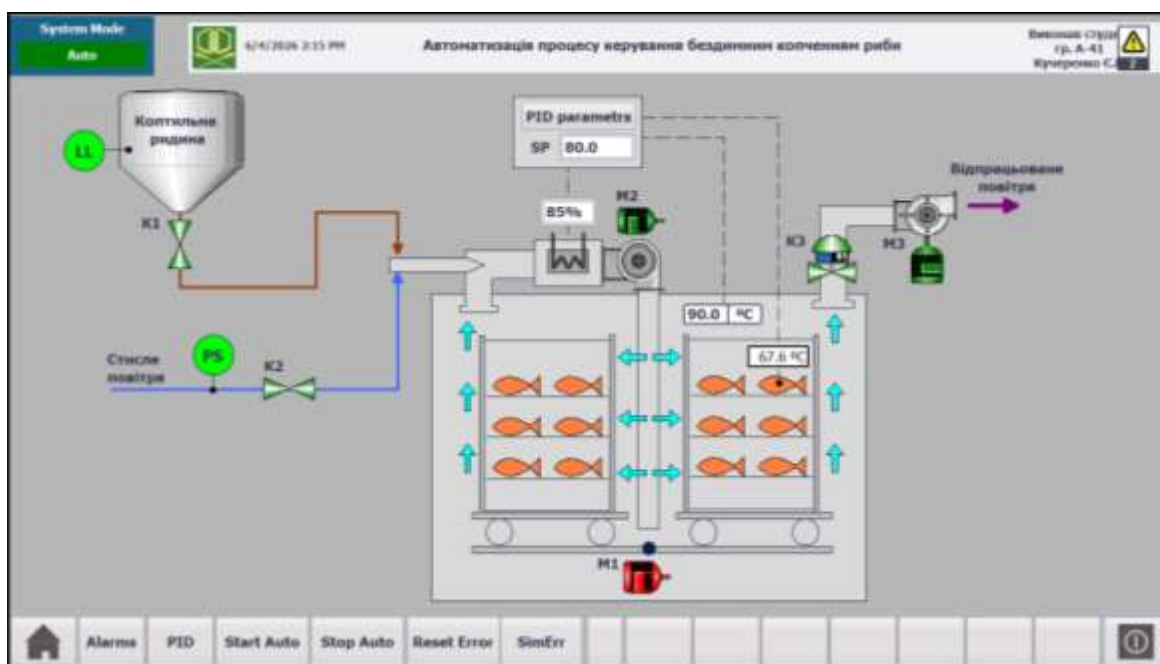


Рис. 7.20 – Головний екран в тестовому режимі при імітації несправності обладнання (двигуна M1) камери копчення

7.5 Висновки за розділом

У цій частині роботи розроблений інтерфейс для SCADA системи керування технологічним процесом бездимного копчення риби. Створені екран для відображення схеми камери для роботи оператора-технолога, екран для відображення графіків зміни регульованих параметрів технологічного процесу (температура в центрі тушки риби) та налагодження САР, екран реєстрації подій в системі керування.

Тестування системи в цілому продемонструвало її роботоспроможність у всіх режимах роботи.

8. Розробка фрагментів документації технічного забезпечення САК та заходів з охорони праці

8.1 Опис основних технічних рішень із побудови САК та склад документації її технічного забезпечення

Для створення схем автоматизації (P&ID) замість застарілих ГОСТів використовуються стандарти ДСТУ ISO 14617 (зокрема ISO 14617-1:2025) та ДСТУ EN 62424.

Для харчової та зернопереробної промисловості впроваджується стандарт ISA-88 (міжнародний аналог — IEC 61512).

Для ефективного керування елеватором або харчовим заводом є стандарт ISA-95 (IEC 62264).

Для харчової промисловості впроваджується стандарт, пов'язаний з гігієнічними вимогами та контролем якості, ISO 22000: Система менеджменту безпеки харчових продуктів.

Для реалізації системи автоматичного керування (САК) ділянкою копчення риби запропонована наступна технічна структура (рис. 8.1).

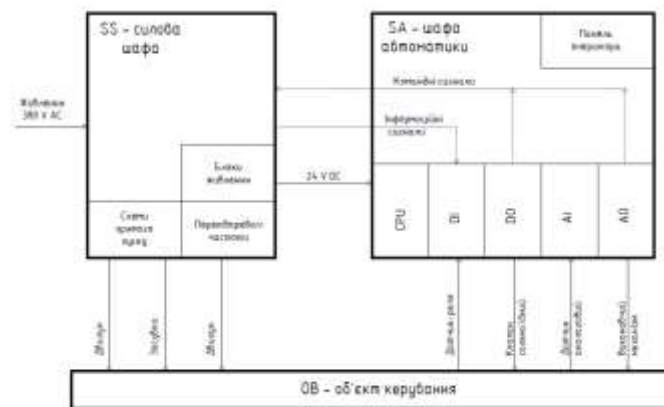


Рис. 8.1 Структура САК

В силовій шафі розміщені технічні засоби для керування електроприводами та блоки живлення.

В шафі автоматики розміщені технічні засоби інтелектуальної частини САК. Таке технічне рішення дозволяє зменшити вплив струмів, які протікають по силовим кабелям, на роботу ПЛК і панелі оператора, що покращує завадостійкість системи керування.

За результатами вибору комплексу технічних засобів і відповідно до складеної технічної структури системи керування розроблено комплект її проектної документації. Комплект включає наступні документи:

Графічні:

- 1 – схему автоматизації;
- 2 – принципову електричну схему (ПЕС) керуванням електроприводу;
- 3 – ПЕС живлення;
- 4 – схему мережевих зв'язків;
- 2 – ПЕС підключення до блоку дискретних входів ПЛК;
- 3 – ПЕС підключення до блоку дискретних виходів ПЛК;
- 4 – ПЕС підключення до блоку аналогових входів ПЛК;
- 5 – ПЕС підключення до блоку аналогових виходів ПЛК.

Текстові:

- попередній перелік обладнання до всіх графічних документів;
- дану пояснювальну записку до проекту.

Елементи керування та живлення електроприводів встановлюються в силовій шафі на DIN-рейку 35 мм. Детально ця шафа в даній роботі не розглядається.

Шафа оператора знаходиться у спеціальному операторському пункті (ОП). На внутрішній площі шафи оператора встановлюють ПЛК та елементи живлення до нього, а на фасадній двері – панель оператора.

ПЛК складається з центрального процесора та модулів вводу-виводу. Центральний процесор CPU 1513, що реалізує основні функції контролю та регулювання, оснащений інтерфейсом PROFINET.

Всі модулі вводу/виводу серії SIMATIC S7-1500 та CPU монтуються на DIN-рейку 35 мм в шафі оператора. Вони використовуються для отримання

інформації з датчиків безперервних і дискретних сигналів, а також для видачі керуючих сигналів на виконавчі механізми для підтримки регламентних значень регульованих змінних, а також передачі даних на панель оператора. CPU та модулі забезпечують виконання наступних основних функцій:

- прийом і дешифрацію команд по мережам PROFINET;
- введення, фільтрацію й нормалізацію аналогових сигналів входу та виходу – модуль AI 4xU/I (6A7 1531-7KF00-7AB0) та модуль AO 4xU/I/6ES7 (6AG 1532-5HD00-7AB0);
- опитування стану дискретних входів - модуль DI 16x24VDC BA (6ES7521-1BH10-0AA0) та вивід із дискретних виходів сигналів керування - модуль DQ 16x24VDC/0.5A BA (6ES7522-1BH10-0AA0).

Взаємодія контролера і панелі оператора здійснюється по мережі PROFINET. Для керування застосовується панель оператора TP1900 Comfort (6VA2 124 OUC02-0AX1), на якій встановлена система виконання SCADA WinCC Comfort, що призначена для оперативного контролю, сигналізації, реєстрації параметрів.

8.2 Розробка схеми автоматизації

Схема автоматизації технологічного процесу є основним документом, що визначає функціональну структуру, обсяг автоматизації й що роз'ясняє певні процеси, що протікають у функціональних ланцюгах. Вона складена відповідно до ДСТУ ISO 14617-6:2018 «Графічні умовні позначки для схем. Частина 6. Функції вимірювання та керування». Функції автоматичного регулювання й логіко-програмного керування, виконує ПЛК сумісно з панеллю оператора. Всі використані датчики входних сигналів обрані з уніфікованим вихідним сигналом струмовим (4...20mA DC), вихідні аналогові сигнали напруги (0...10 V DC) і сприймаються виконавчими механізмами.

Розглянемо перелік контурів контролю й керування, які наведені на схемі автоматизації по позиційним номерам контурів:

- 1 – 3 керування та контроль стану електроприводів M1, M2; M3;
- 4 - 6 – керування та контроль стану клапанів FV4, FV5, FV6;
- 7, 10 – контроль і регулювання температури тушки риби в камері;
- 8 – контроль рівня копильної рідини в баку;
- 9 – контроль тиску стисненого повітря в мережі.

У контурах 1 – 6 керування приводами передбачені функції місцевого керування, які реалізуються за рахунок технічних засобів, що розміщені у силовій шафі, функції дистанційного керування з панелі оператора та функції автоматичного керування у часі по програмі в ПЛК.

У контурі 7, 10 реалізована система контролю та регулювання температури тушки риби в камері копчення риби. Розглянемо дію цього контуру. Від датчика температури з уніфікованим перетворювачем TY/7 пропорційний температурі тушки риби сигнал струму 4...20 mA DC подається на регулятор TIRC/7, який сприймає також сигнал заданого значення HIC/7 і формує задане значення для внутрішнього регулятора TC/10, який в свою чергу, сприймає сигнал струму 4...20 mA DC, пропорційний температурі повітря в камері, і формує керуючий вплив у вигляді 0...10 V DC, що подається виконавчий механізм JC/10. Регулятори реалізовані програмно в ПЛК. В контурі передбачена функції ручного задатчика і індикації регульованої змінної HIC/7, які реалізовані в панелі оператора.

В контурі 8 сигнал від датчика-реле рівня LS/8 з уніфікованим виходом у вигляді напруги 0-24 V DC, подається на ПЛК і дозволяє сформувати функції індикації та сигналізації LIS8 на панелі оператора.

Аналогічно сигнал від датчика-реле тиску PS/9 з уніфікованим виходом у вигляді напруги 0-24 V DC, подається на ПЛК і дозволяє сформувати функції індикації та сигналізації PIS/9 на панелі оператора.

У додатку А наведені схема автоматизації та перелік приладів та засобів, які використані в цій схемі.

8.3 Розробка принципової електричної схеми керуванням електроприводом

Всі компоненти схеми розміщуються в силовій шафі SS. Дана ПЕС забезпечує місцеве і дистанційне керування. Живлення електропривода M1 здійснюється від мережі типу TN через автомат захисту електродвигуна Q1, клеми контактора Q3, кабель W15 та вимикач OB-Q1.

Місцеве керування електроживленням котушки контактора Q3 здійснюється від фази L1 завдяки використанню автоматичного вимикача Q2, кнопки Стоп S1 та кнопки Пуск S3. Перемикання в дистанційний режим здійснює перемикач S2. Керуючий сигнал від модуля DQ 16x24VDC/0.5A BA (6ES7522-1BH10-0AA0) контролера формує проміжне реле K5, яке своїм контактом здійснює електроживлення котушки Q3.

Стани Q3, S2, K4 у вигляді сигналів 24 V DC подаються до дискретних входів модуля DI 16x24VDC BA (6ES7521-1BH10-0AA0).

8.4 Розробка принципової електричної схеми живлення

Дана схема забезпечує живлення модулів ПЛК і панелі оператора. Всі її компоненти розміщуються в силовій шафі SS. Живлення здійснюється від фази L1 через автоматичний вимикач Q4 та блок безперебійного живлення UPS. До його виходів через автоматичні вимикачі Q6, Q7 підключені два джерела живлення G1, G2 220 V AC/ 24 V DC, які забезпечують напругу живлення для модулів ПЛК і панелі оператора. Вихідні ланки G1, G2 захищені від режиму «короткого замикання» запобіжниками F2, F3.

Освітлення в шафі забезпечує лампа H2, яка отримує живлення від фази L1 через кнопку S7. В шафі передбачена розетка REC1, яка отримує живлення від фази L1 через диференційний вимикач Q5.

8.5 Розробка принципової схеми мережевих підключень

На даній схемі вказані кола живлення CPU ПЛК 24 V DC від схеми живлення через вимикач з запобіжником F1 та панелі оператора через вимикач з запобіжником F3. Пунктирними лініями показані мережеві зв'язки між ПЛК, панеллю і комп'ютером програмування.

8.6 Розробка принципових електричних схем підключення до модулів ПЛК

До дискретних входів модуля DI 16x24VDC BA (6ES7521-1BH10-0AA0) по кабелях W 4, 5, 6, що підключаються до клем SA-X1, подаються сигнали 0 або 24 V DC, які характеризують поточний стан апаратури керування електроприводами M1, M2, M3, що встановлена у силовій шафі і забезпечує локальне (місцеве) керування. По кабелям W1, W8, що підключається до клем SA-X1, передаються сигнали від датчиків-реле рівня і тиску LS/8, PS/9.

На дискретних виходах модуля DQ 16x24VDC/0.5A BA (6ES7522-1BH10-0AA0) формуються сигнали 0 або 24 V DC, які по кабелям W4, 5, 6 що підключаються до клем SA-X1, передаються у силову шафу в схему керування електроприводами M1, M2, M3. Також до виходу модуля дискретних виходів по кабелям W3, 11, 12, що підключається до клем SA-X1, підключаються проміжні реле K3, K4, K5 для керування клапанами FV/4, FV/5, FV6.

Модуль аналогових входів AI 4xU/I (6A7 1531-7KF00-7AB0) розміщується на на DIN-рейці 35 мм в шафі оператора. До його аналогових входів за допомогою екранованих кабелів W9, 10, що під'єднуються до клем SA-X1, підключаються датчики температури повітря в камері і тушки риби з уніфікованим виходом 4...20 mA DC TY10, TY7.

Модуль аналогових виходів AO 2xU/I/6ES7 (6AG 1532-5HD00-7AB0) розміщується на на DIN-рейці 35 мм в шафі оператора. Аналоговий вихід цього модуля формує сигнал 0...10 V DC, які за допомогою кабелів W15, що

підключається до клем SA-X1, передає сигнал керування регулятор електричної потужності JY7.

У додатку Б наведені ПЕС підключення до модулів ПЛК та перелік приладів, що в них використані.

8.8 Охорона праці

Загальні положення

Безпека праці при створенні та експлуатації систем автоматизації технологічних процесів повинна відповідати вимогам:

- Закону України «Про охорону праці»;
- НПАОП 0.00-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів»;
- НПАОП 0.00-1.32-01 «Правила техніки безпеки під час експлуатації електроустановок»;
- ДБН В.2.5-23:2010 «Електрообладнання будівель і споруд»;
- ДСТУ EN 60204-1:2018 «Безпечність машин. Електрообладнання машин»;
- ПУЕ (Правила улаштування електроустановок).

Робота з промисловою автоматизацією поєднує в собі два різні середовища: "поле" (де безпосередньо монтують залізо) та "диспетчерську" (де керують процесами через монітори). Нижче наведено детальний розбір шкідливих факторів та правил безпеки для обох професій.

Шкідливі фактори для монтажника систем промислової автоматизації.

Монтажник працює безпосередньо на об'єктах (цехах, підстанціях, будівництвах), де стикається з великою кількістю небезпек:

Ураження електричним струмом: Робота з діючими електроустановками, кабелями під напругою, шафами керування (ПЛК). Це головний ризик.

Травмонебезпечність (механічні фактори): Рухомі частини станків, конвеєрів та роботів, які налагоджуються; падіння інструментів з висоти; гострі краї металоконструкцій.

Висота: Монтаж датчиків, прокладання кабельних лотків часто відбуваються на естакадах або драбинах.

Шум та вібрація: Робота промислового обладнання, що діє поруч, а також використання власного електроінструменту (перфоратори, болгарки).

Хімічні та термічні фактори: Пил, пари мастил, гази, гарячі поверхні труб та технологічних посудин, де монтуються датчики температури чи тиску.

Несприятливий мікроклімат: Робота в неопалюваних приміщеннях, на вулиці або, навпаки, у гарячих цехах.

Правила техніки безпеки для монтажника автоматизації.

Перед початком і під час будь-яких робіт монтажник зобов'язаний суворо дотримуватися ПТБ:

Організаційні заходи: Працювати лише за нарядом-допуском або розпорядженням. Перед роботою пройти інструктаж під керівництвом виконроба чи майстра.

Знеструмлення та блокування: Перед монтажем чи ремонтом обладнання має бути повністю знеструмлене. На вимикачі вивішується плакат: "Не вмикати! Працюють люди", а самі автомати блокуються замками.

Перевірка відсутності напруги: Безпосередньо на місці роботи за допомогою покажчика напруги (мультиметра) перевірити, що струму в мережі немає.

Використання засобів індивідуального захисту:

Діелектричні рукавички, каска, захисні окуляри.

Спецодяг та взуття на нековзній підшві без металевих елементів (де це необхідно).

Пояс безпеки при роботі на висоті понад 1.5 метра.

Інструмент: Використовувати тільки ізольований інструмент (з маркуванням до 1000 В), який не має тріщин чи пошкоджень.

Робота в діючих установках: Не проводити роботи наодинці (мінімум удвох) у приміщеннях з підвищеною небезпекою.

Шкідливі фактори для оператора SCADA-системи.

На відміну від монтажника, оператор сидить у кабінеті, але його праця пов'язана з великим психофізіологічним навантаженням:

Зорове перенапруження (астенопія): Безперервне спостереження за дрібними елементами мнемосхем, графіками та миготливими індикаторами на моніторі протягом 8–12 годин.

Гіподинамія та статичне навантаження: Тривале перебування в положенні сидячи призводить до застою крові, проблем із хребтом (остеохондроз) та кистьового тунельного синдрому (від мишки та клавіатури).

Нервово-емоційне напруження (стрес): Висока відповідальність за перебіг техпроцесу. Необхідність миттєво реагувати на аварійні сигнали та приймати рішення, від яких залежать життя людей та цілісність заводу.

Електромагнітні поля: Випромінювання від великої кількості моніторів, серверів та системних блоків.

Монотонність праці: Тривалий час процес може йти ідеально, що притупляє увагу оператора, викликає сонливість, але вимагає постійної готовності до дії.

Вимоги до приміщення диспетчерського пункту (операторської).

Щоб мінімізувати шкідливі фактори, операторська кімната повинна відповідати жорстким санітарним нормам:

Параметр	Вимога / Норма
Площа та об'єм	Не менше 6 кв. м площі та 20 куб м об'єму на одне робоче місце оператора.
Освітлення	Комбіноване (природне + штучне). На столі має бути 300–500 лк. Світло не повинно створювати бліків на екранах моніторів.
Мікроклімат	Наявність кондиціонування та вентиляції. Температура: 22–24°C влітку, 20–22°C взимку. Відносна вологість: 40–60%.

Параметр	Вимога / Норма
Шум	Рівень звукового тиску в диспетчерській не повинен перевищувати 50–55 дБА (стіни та стеля мають бути зі звукопоглинаючих матеріалів).
Ергономіка	Спеціальні меблі: стілець із регулюванням висоти, кута нахилу спинки та підлокітників. Монітори розташовуються на відстані 60–70 см від очей.

Правила техніки безпеки для оператора SCADA-системи.

Хоча ризик отримати травму в кріслі менший, правила безпеки тут не менш важливі:

Режим праці та відпочинку: Найважливіше правило. Оператор повинен робити регламентовані перерви (по 10–15 хвилин кожні 2 години або 5–10 хвилин щогодини) для розминки очей та суглобів.

Електробезпека в офісі: Заборонено самостійно ремонтувати розетки, монітори чи лізти всередину системного блоку під напругою. При виявленні запаху гарі чи іскріння — негайно знеструмити обладнання головним рубильником та викликати електрика.

Організація робочого місця: Не захаращувати вентиляційні отвори моніторів та системних блоків паперами. Не ставити склянки з водою, чаєм чи кавою поруч із клавіатурою та апаратурою керування.

Гігієна праці: Виконувати прості вправи для очей (погляд вдалину-зблизька) та легку гімнастику під час перерв для запобігання застійним явищам у тілі.

Дії при аварії: Оператор повинен чітко знати план евакуації, місця розташування вуглекислотних вогнегасників (безпечних для електроніки) та вміти користуватися кнопкою аварійної зупинки всього технологічного комплексу (ESD - Emergency Shutdown).

8.9 Висновки за розділом

В ході виконання розділу було розроблено варіант комплексу технічної документації САК на базі контролера фірми Siemens SIMATIC S7-1500.

Розроблений комплект включає основні документи технічного забезпечення системи автоматизації керування процесу копчення риби. В результаті виконання отримані навички з розробки технічної документації на системи автоматизації з використанням ПЛК та сучасних пристроїв автоматизації.

Також в рамках цього розділу роботи опрацьовано основні питання, пов'язані з охороною праці при експлуатації системи автоматичного керування процесом.

Висновок

В ході виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було розглянуто технологію гарячого бездимного копчення риби. Підвищення ефективності саме цього процесу здатне дати суттєвий економічний ефект. Тому процес гарячого бездимного копчення риби було обрано в якості об'єкту для модернізації системи керування. Провівши аналіз ходу технологічного процесу, можна зробити висновок, що саме на цій ділянці технологічної схеми можна істотно змінити техніко-економічні показники виробництва в цілому, такі як зменшення енерговитрат та втрат від браку готової продукції.

Виходячи з вище викладеного, при впровадженні для процесу гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері модернізованої системи керування на базі мікропроцесорної техніки, яка буде ефективно контролювати і керувати процесом, потрібно домогтися: зниження витрат електроенергії та втрат від браку готової продукції. Для цього слід буде поліпшити якість регулювання температури контрольної тушки та температури в камері, удосконалити існуючі алгоритми логічного керування, замінити існуючу елементно-технічну базу на більш нові засоби керування.

Була проведена ідентифікація моделі процесу гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері, як об'єкта керування. Були ідентифіковані канали управління, в результаті чого було з'ясовано, що всі вищезгадані канали мають статичні властивості, тобто властивостями самовирівнювання. Це пов'язано з тим, що в універсальній коптильній камері протікають процеси, які за своєю природою мають такі властивості. При складанні структурних схем моделювання та їх реалізації були отримані результати, які мають достатній ступінь відповідності реальним передаточних функцій, що свідчить про правильність проведення параметричної ідентифікації моделей каналів ОК.

Задача побудови системи автоматичного регулювання вирішувалася у два етапи. Спочатку було проведено синтез та аналіз САР базової структури, а

потім проведено підвищення динамічної точності цієї САР шляхом побудови системи каскадної структури.

САР з ПІ- та ПІД-регулятором в перехідних режимах задовольняє гранично припустимим вимогам,.

І САР з ПІ-регулятором, і САР з ПІД-регулятором є грубими.

За усіма показниками якості САР з ПІД-регуляторами є кращою, ніж САР з ПІ-регуляторами. Тому в подальших дослідженнях в якості базового алгоритму регулювання будемо застосовувати ПІД-закон регулювання.

САР підвищеної динамічної точності побудована на каскадним.

Каскадна САР є грубою, тому що в умовах 20%-ї варіації параметрів ОК ці САР дають перехідні процеси, що сходяться.

У порівнянні з САР базової структури з ПІД-регуляторами каскадна САР дає покращення за прямими показниками якості перехідних процесів. За критерієм оптимальності САР каскадної структури дає покращення на 54%. Тому у подальшому доцільно використовувати САР каскадної структури.

В ході розробки алгоритмів логічного керування для гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері було складено регламенти функціонування та алгоритми автоматичного керування пуском та технологічною зупинкою процесу гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері.

Було проведено вибір технічних засобів, які зможуть забезпечити керування процесом гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері. Класи точності, ступінь захисту та ступінь вибухозахисту пристроїв відповідають виробничим умовам технологічного процесу. Виходи датчиків та входи виконавчих механізмів сумісні з входами/виходами ПЛК.

Мікропроцесорне ядро системи керування побудоване за централізованою схемою із використанням ПЛК SIMATIC S7-1500 та панелі оператора TP1900 Comfort, об'єднаних по мережі Profinet, що забезпечує можливість подальшого розвитку системи.

Були визначені процесорний блок та блоки вводу виводу фірми Siemens сімейства S7-1500, проведено їх конфігурування.

Розроблені програми логічного керування технічними засобами та регулювання температури контрольної тушки із використанням бібліотечних функціональних блоків.

Проведено тестування цих програм, яке засвідчило їх відповідність алгоритмам.

Розроблено інтерфейс для SCADA системи управління технологічним процесом гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері. Створені екран для відображення схеми установки для роботи оператора-технолога, екран для відображення графіків зміни регульованих параметрів технологічного процесу та налагодження САР, екран реєстрації подій в системі керування.

Тестування системи в цілому продемонструвало її працездатність у всіх режимах роботи.

Розроблено варіант комплекту технічної документації САК на базі контролера фірми Siemens SIMATIC S7-1500.

Розроблений комплект включає основні документи технічного забезпечення системи автоматизації керування процесу гарячого бездимного копчення риби в універсальній коптильній камері. В результаті виконання отримані навички з розробки технічної документації на системи автоматизації з використанням ПЛК та сучасних пристроїв автоматизації.

Опрацьовано основні питання, пов'язані з охороною праці при експлуатації системи автоматичного керування процесом.

Перелік джерел

1. ДСТУ 4814:2007 «Риба гарячого копчення. Технічні умови». — К. : Держспоживстандарт України, 2008.
2. Технологія рибних продуктів : навч. посібник / за ред. О. В. Семенюк, Л. В. Порохняк. — Одеса : Астропринт, 2017. — 408 с.
3. Інноваційні технології харчових виробництв : монографія / за ред. В. А. Піддубного. — Київ : Кондор-Видавництво, 2017. — 374 с.
4. Технологічне обладнання харчових виробництв : підручник / Х. В. Смирнов, М. О. Якушенко, О. І. Чепелюк. — Київ : Ліра-К, 2019. — 512 с.
5. Процеси та апарати харчових виробництв : підручник / за ред. проф. П. С. Широкова. — Львів : Новий Світ-2000, 2018. — 460 с.
6. Конспект лекцій з курсу "Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів" [Електронний ресурс] : для студентів, які навчаються за спец. 151 - "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" ден. та заоч. форм навчання / В. А. Хобін ; відп. за вип. В. А. Хобін; Каф. автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем. — Одеса : ОНАХТ, 2016. — Електрон. текст. дан.: 96 с.
7. Конспект лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форм навчання. Укл. В.А. Хобін. – Одеса: ОНАХТ, 2020. – Ч. 1. – 110 с.
8. Конспект лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування» для студентів напряму підготовки 6.050202 денної та заочної форм навчання. В.А. Хобін. – Одеса: ОНАХТ, 2014. – Ч. 2. – 72 с.
9. Муратов В. Г. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади: Навчальний посібник для студентів спеціальності 7.092500 «Автоматизоване управління технологічними процесами». – К.: Освіта України, 2016. – 286 с.
10. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані

технології та робототехніка» денної та заочної форм навчання / За ред. В.А. Хобіна - Одеса: ОНТУ, 2024 р. – 47 с.

11. Савицький, В. К. Технічні засоби автоматизації [Текст]: навч. посіб. /В.К. Савицький, Р.М. Федоришин; Нац. ун-т "Львівська політехніка".— Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2018. - 292 с.

12. Левінський В. М. Конспект курсу лекцій з курсу "Технічні засоби автоматизації". Розділ "Виконавчі пристрої" [Електронний ресурс] : для студентів спец. 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" ден. та заоч. форм навчання / В. М. Левінський, М. В. Левінський ; відп. за вип. В. А. Хобін ; Каф. автоматизації технологічних процесів і робототехн. систем. — Одеса : ОНАХТ, 2018. — Електрон. текст. дані: 150 с.

13. Левінський В. М. Основи створення проектів автоматизації в середовищі TIAPortal [Електронний ресурс] : електрон. навч. посіб. для підгот. студентів спец. "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" / В. М. Левінський, М. В. Левінський ; Одес. нац. акад. харч. технологій. — Одеса : ОНАХТ, 2019. — Електрон. текст. дані: 177 с.

14. Пупена О.М., Розроблення людино-машинних інтерфейсів та систем збирання даних з використанням програмних засобів SCADA/HMI. : Навч. посіб. Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. — 594 с.

15. Пупена О.М, Ельперін І.В., Луцька Н.М., Ладанюк А.П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах: Навчальний посібник. – К. : Вид-во "Ліра-К", 2011. – 552 с.

16. ANSI/ISA-101.01-2015, Human Machine Interfaces for Process Automation Systems Copyright: 2015 Length: 64 pages

17. Автоматизація виробничих процесів [Текст] : підручник / І. В. Ельперін, О. М. Пупена, В. М. Сідлецький, С. М. Швед ; Нац. ун-т харч. технологій. — Вид. 2-ге, випр. — Київ : Ліра-К, 2017. — 378 с. — Бібліогр.: с. 376-377.

18. Трегуб Віктор Григорович Проектування систем автоматизації [Текст] : навч. посіб. / В. Г. Трегуб ; Нац. ун-т харч. технологій. — Київ : Ліра-К, 2017. — 344 с. : табл., рис. — Бібліогр.: с. 341.

19. Безпека життєдіяльності та основи охорони праці : конспект лекцій [Електронний ресурс] / О. О. Фесенко, В. М. Лисюк, С. М. Неменуца, З. М. Сахарова ; Каф. безпеки життєдіяльності. — Одеса : ОНАХТ, 2021. — Електрон. текст. дані: 149 с.

20. Національний стандарт України «Автоматизація технологічних процесів. зображення умовні приладів і засобів автоматизації в схемах» ДСТУ Б А.2.4-16:2008.

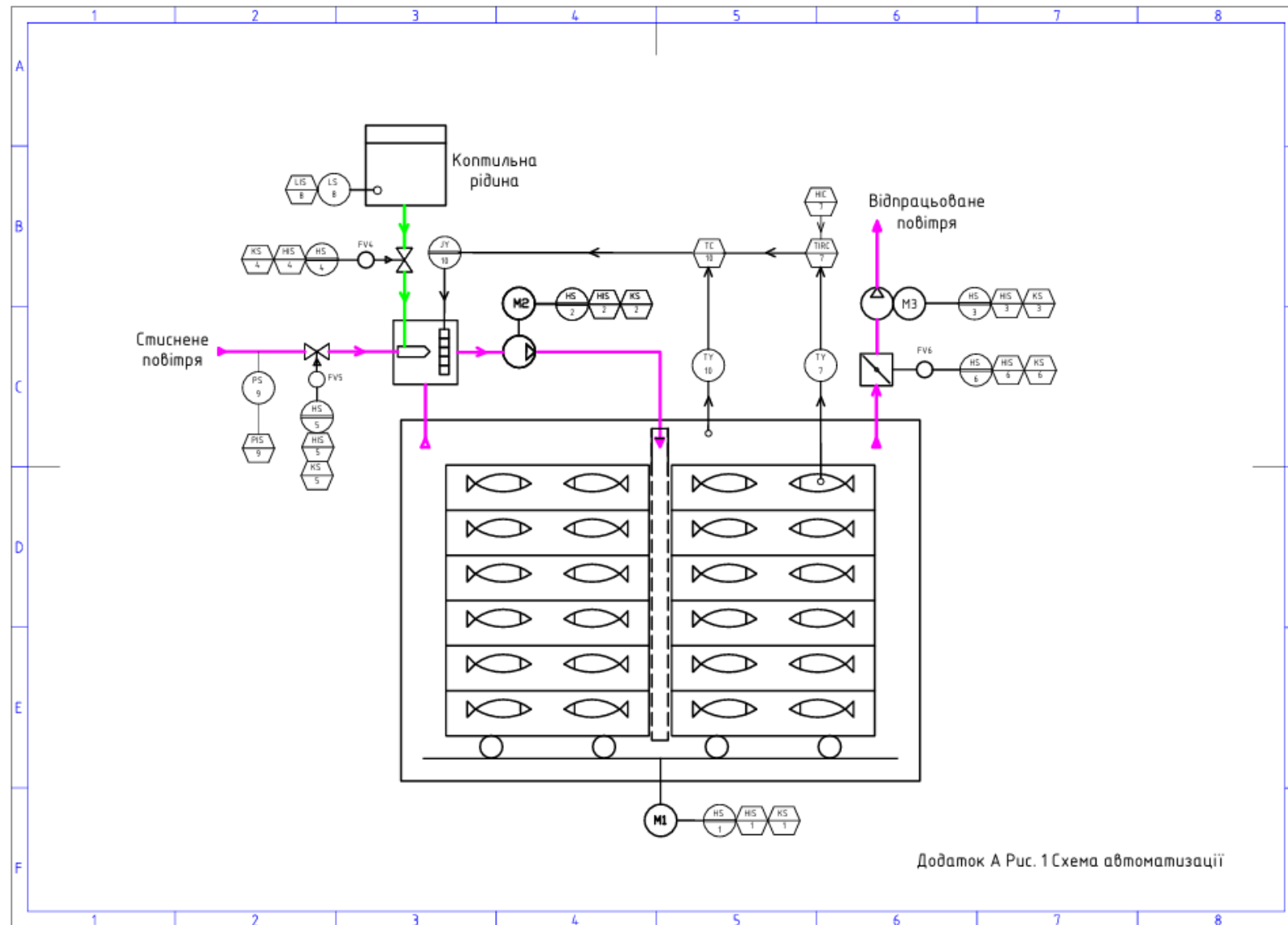
21. ДСТУ 3008:2015 Звіти в сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. Київ, ДП УкрНДНЦ, 2016. 31 с.

Додатки

ДОДАТОК А. Документація до схеми автоматизації

Таблиця А – Попередній перелік обладнання до схеми автоматизації

Поз. познач.	Найменування	К-ть	Прим.
	<u>Прилади за місцем</u>		
TY/10	Датчик температури повітря ТЕРА (ТСП гр.100П) в корпусі 1-3	1	
TY/7	Оптичний датчик температури ExTemp	1	
LS/8	Поплавковий датчик рівня ДПР	1	
PS/9	Датчик-реле тиску А6-753221	1	
JY/10	Регулятор потужності TS1 SP 3ph	1	
FV6	Виконавчий механізм Belimo LR24A60	1	
FV4	Електромагнітний клапан CEME 8617	1	
FV5	Електромагнітний клапан 21A8KV45	1	
	<u>Прилади у шафі оператора</u>		
TIRC/7 KS/1... KS/6	Центральний процесор CPU 1513 1 PN	1	
HIS/1... HIS/6	Панель оператора TP1900 Comfort 6VA2 124 OUC02-0AX1	1	
HS/1... HS/6	Кнопка, 22мм, зелена, з тримачем 1NO Siemens: 3SU1100-0AB40-1BA0	6	
	Поворотний перемикач, О-І, з фіксацією, 1NO+1NC Siemens: 3SU1100-2BF60-1MA0	6	



ДОДАТОК Б. Документація до принципової електричної схеми

Таблиця Б1 – Попередній перелік обладнання до принципової електричної схеми

Позначення	Найменування	К-ть	Прим.
	Електропривід		
Q1	Автомат захисту двигуна Schneider Electric GV3P65	1	
KM1	Контактор Schneider Electric LC1E65M5	1	
K2	Проміжне реле Schneider Electric Zelio Relay 4CO, 24V DC, 6A, LED (RXM4AB2BDPVS)	1	
S4	Кнопка, 22мм, зелена, з тримачем 1NO Siemens: 3SU1100-0AB40-1BA0	1	
S3	Поворотний перемикач, О-І, з фіксацією, 1NO+1NC Siemens: 3SU1100-2BF60-1MA0	1	
S2	Кнопка 22 мм, кругла, пластикова, 1 червона, без фіксації, 1H3 Siemens: 3SU1100-0AB20-1CA0	1	
H1	Індикатор світловий, метал, 24V AC / DC, Білий Siemens: 3SU1132-0AD60-3AA0	1	
	Схема живлення		
Q4	Автоматичний вимикач Siemens: 5SL6210-6	1	
USB	Smart-UPS LogicPower-1000 PRO	1	
G1, G2	PS 60W 24/48/60VDC (6ES7505-0RA00-0AB0)	2	
Q5	MITSUBISHI CP-S-2P-0.05A	1	
F2, F3	TELEMECANIQUE ABE7FU630	2	
	<u>DI</u>		
PLC1	DI 16x24VDC BA (6ES7521-1BH10-0AA0)	1	
F1	Запобіжник 50F, 1A, 5x20мм K206: 10921	1	
LS/8	Поплавковий датчик рівня ДПР	1	
PS/9	Датчик-реле тиску A6-753221	1	

	<u>DO</u>		
PLC2	модуль DQ 16x24VDC/0.5A BA (6ES7522-1BH10-0AA0)	1	
K3, K4, K5	Реле проміжне Schneider Electric Zelio Relay 4CO, 24B DC, 6A, LED (RXM4AB2BDPVS)	3	
F2	Запобіжник 50F, 1A, 5x20мм K206: 10921	1	
	<u>AI</u>		
PLC3	Модуль AI 4xU/I (6ES7 531-7QD00-0AB0)	1	
TY/10	Датчик температури повітря ТЕРА (ТСП гр.100П) в корпусі 1-3	1	
TY/7	Оптичний датчик температури ExTemp	1	
	<u>AO</u>		
PLC4	Модуль АО 2xU/I/6ES7 (532-5NB00-0AB0)	1	
F5	Запобіжник 50F, 1A, 5x20мм K206: 10921	1	
JY/10	Регулятор потужності TS1 SP 3ph	1	

