

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет
Кафедра Автоматизації технологічних електромеханічних і робототехнічних
систем



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

**на тему: «Автоматизація процесу керування виробництвом пари в котлоагрегаті
ДКВР»**

Здобувач: О.В. Лазанюк
4 курс, група Ат-20

Керівник: доцент Д.А. Ковальчук

Консультанти:

доцент І.М. Світий
доцент В.М. Левінський

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</u>
Кафедра	<u>ім. П.М. Платонова</u> <u>Автоматизації технологічних процесів і</u> <u>робототехнічних систем</u>
Ступінь вищої освіти	<u>Бакалавр</u>
Спеціальність	<u>174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та</u> <u>робототехніка</u>
Освітньо-професійна програма	<u>Комп'ютерні системи та програмна інженерія в</u> <u>автоматизації та робототехніці</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри АТПіРС
І.М. Світий

«05» січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Здобувач Лазанюк Олексій Валерійович

1. Тема роботи «Автоматизація процесу керування виробництвом пари в котлоагрегаті ДКВР»
2. Керівник кваліфікаційної роботи Ковальчук Дмитро Андрійович, к.т.н., ст. викладач.
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: матеріали індивідуальних завдань виробничої і переддипломної практик, курсових і самостійних робіт, комплексне кваліфікаційне завдання (для заочників).
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	Ковальчук Д.А., к.т.н., ст. викладач.		
Розділи 2, 3	Левінський В.М., доц. каф. АТПіРС		
Розділ 4	Світий І.М., доц. каф. АТПіРС		
Розділ 5	Левінський В.М., доц. каф. АТПіРС		
Розділ 6	Степанов М.Т., доц. каф. АТПіРС		
Розділ 7	Степанов М.Т., доц. каф. АТПіРС		
Розділ 8	Левінський В.М., доц. каф. АТПіРС		

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Здобувач Лазанюк О.В.

Керівник роботи Ковальчук Д.А.

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 Лазанюк О.В. _____
Прізвище, ініціали
Підпис

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра Лазанюка Олексія Валерійовича «Автоматизація процесу керування виробництвом пари в котлоагрегаті ДКВР» викладена на 141 сторінках, містить таблиць - 8, рисунків - 144, додатків - 5, джерел з переліку посилань - 3.

Ключові слова: автоматизація , об'єкт керування , система автоматичного керування , імітаційне моделювання , автономна САР , програмований логічний контролер , АРМ оператора , принципова електрична схема.

Об'єкт розробки – система автоматичного керування процесом виробництва пари в промисловому котлоагрегаті ДКВР.

Мета роботи – підвищення техніко-економічних та екологічних показників функціонування котлоагрегату ДКВР за рахунок підвищення динамічної точності контурів регулювання тиску пари та рівня води в барабані , зниження числа аварійних ситуацій , забезпечення надійної логіко-програмної взаємодії з оператором-технологом.

Методи дослідження - методи теорії автоматичного керування, ідентифікації об'єкта керування (активний експеримент) , імітаційного та машинного моделювання взаємозв'язаних каналів у сучасних інженерних середовищах.

Отримані результати: Розроблено та обґрунтовано концептуальну модель об'єкта управління, виконано координаторну параметризацію та ідентифікацію математичних моделей каналів регулювання; синтезовано автономну САР підвищеної динамічної точності із перехресними коригуючими зв'язками, яка мінімізує взаємний вплив каналів «тиск пари - рівень води» та демонструє високу якість і грубість перехідних процесів; сформульовано та розроблено детальні алгоритми логічного керування для процедур автоматизованого пуску, планової та аварійної зупинки обладнання котлоагрегату; створено прикладне програмне забезпечення (програми для ПЛК Siemens SIMATIC S7-1500) та розроблено людино-машинний інтерфейс (НМІ) АРМ оператора-технолога на базі панелі керування Comfort; оформлено комплект проектно-технічної документації САК, включаючи технологічну схему автоматизації, структури мереж та фрагменти принципових електричних схем підключення ПЛК.

ЗМІСТ

Назви розділів, підрозділів	Стор.
1. Опис ділянки технологічного процесу, його агрегатів та існуючого рівня автоматизації керування ними. Виявлення потенційних джерел економічної ефективності і конкретизація задачі модернізації САК.	6
2. Розробка концептуальної моделі об'єкта управління та ідентифікація моделей.	26
3. Розробка та оптимізація алгоритмів регулювання, порівняльний аналіз САР.	52
4. Розробка алгоритмів логічного керування технологічним агрегатом.	85
5. Вибір технічних засобів та розробка структури контролерно-комп'ютерної мережі.	93
6. Розробка контролерно-комп'ютерної мережі, програмування алгоритмів регулювання та логічного керування САК.	98
7. Розробка SCADA для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика САК.	107
8. Розробка фрагментів документації технічного забезпечення САК, включаючи питання охорони праці.	121

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

1.1.1 - наводять коротку історичну довідку підприємства та дають коротку характеристику виробничій діяльності з зазначенням видів основних виробництв (за умови наявності такої інформації у звітах виробничої та переддипломної практик та/або на WEB-сайті підприємства);

1.1.2 - наводять узагальнену схему ТП, який розглядається в кваліфікаційній роботі, і дають її короткий опис. Виділяють в цій схемі ділянку, для якої буде розроблятися система автоматичного керування.

Паливо у суміші з повітрям подається через пальник у топку і горить у вигляді факела. Повітря нагнітається за допомогою дуттьового вентилятора.

Продукт горіння – розжаренні димові гази; вони проходять через димоходи, віддають тепло різним поверхням теплопередачі і викидаються димососом у димову трубу. Вода, підігрівається в економайзері та подається у барабан, який вмурований у топку котла. Вода випаровується у трубах, розташованих в середині топки. Насичена пара збирається у барабані над поверхнею води та подається у пароперегрівник, де випаровується бризки води, які містяться у насиченій парі, і пара підігрівається до заданої температури.

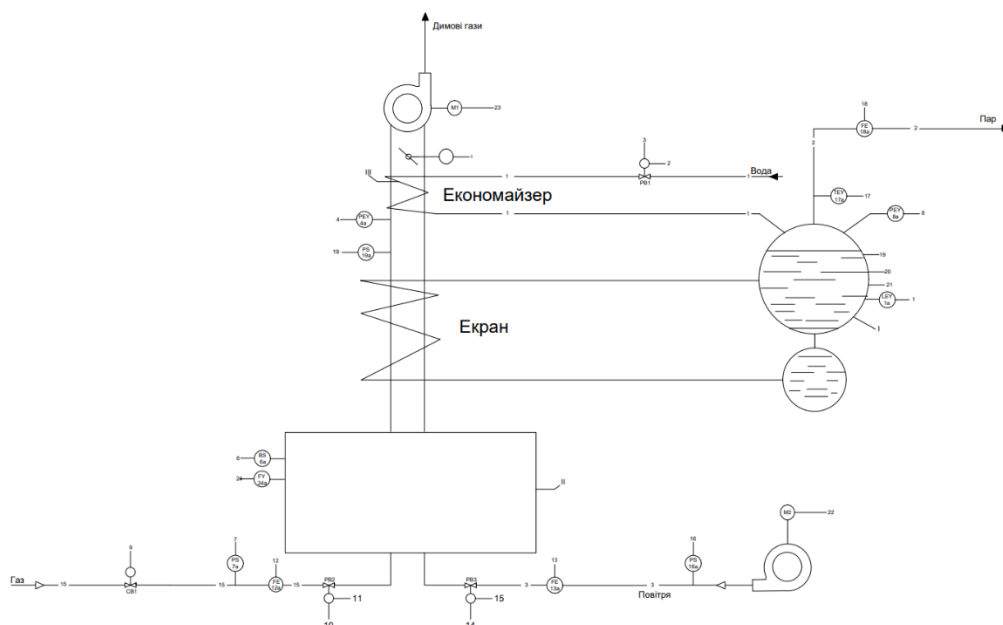


Рис.1.1 – Технологічна схема автоматизації котлового агрегату

1.1.3 - складають розгорнуту схему ТП цієї ділянки й дають докладний опис суті цього процесу як цілеспрямованого перетворення матеріальних і

енергетичних потоків, який реалізується технологічним агрегатом (ТА), тобто комплексом технологічного обладнання;

Суттю технологічного процесу автоматизації котлового агрегату полягає в автоматизації роботи котла, регулюючи подачу пального та повітря відповідно до реальних потреб системи.

Повітря нагнітається по лінії повітря повітряним вентилятором. Для підтримки подачі повітря в топку котла II через регулюючий орган на лінії повітря контролюється тиск за допомогою датчиків тиску.

Газ через РО контрольований датчиками тиску надходить у запальник, і потім на пальник. Для контролю газу на запальнику та пальнику топкового котла II застосовуємо датчик надлишкового тиску.

У топковому котлі II відбувається змішування газу та повітря, де суміш запалюється, за допомогою приладу для дистанційного розпалювання газового полум'я, використовується захисний запальний пристрій.

Контур регулювання рівня барабана котла реалізовано наступним чином: вимірюють і регулюють комплектом за сигналом датчика-дифманометра сапфіра шляхом зміни положення подачі води в економайзер. Сигнал регулювання поступає на виконавчий механізм МЕО 250/25, який встановлений на лінії живильної труби.

1.1.4 - опис конструкції ТА, яка може бути об'єднана або розподілена на декілька частин, а також особливості його експлуатації.

Котловий агрегат складається з топки котра завдяки своїй конструкції та матеріалу може витримувати дуже високі температури, також в яку подається паливо та повітря через припливний вентилятор. Окрім цього, в ТП бере участь економайзер котрий завдяки своїй конструкції підігріває воду через топкові гази і подає її до барабану, котрий вмурований безпосередньо в топку котла.

1.1.5 - формулюють (у загальному виді) умови, при яких можливо і економічно доцільно реалізувати розглянутий ТП;

Мета ведення процесу - отримання заданих продуктів із заданими властивостями (показниками якості). Умови технологічного процесу автоматизації котельної установки з:

- Температура димових газів – 160 градусів;
- Рівень води – 70 мм.

1.1.6 Проводять параметризацію схеми ТП, для чого фізичні, біологічні та інші параметри середовища ТП та компонентів ТА, що змінюються у ході цього процесу.

Технологічна схема є графічним відображенням руху і перетворення матеріальних та енергетичних потоків. Кожен потік і процес перетворення його механічних, фізичних, хімічних і біологічних властивостей характеризується набором параметрів, які відображають їх властивості та умови перетворення потоків. Їх нанесення на схему технологічного процесу і є її параметризацією.

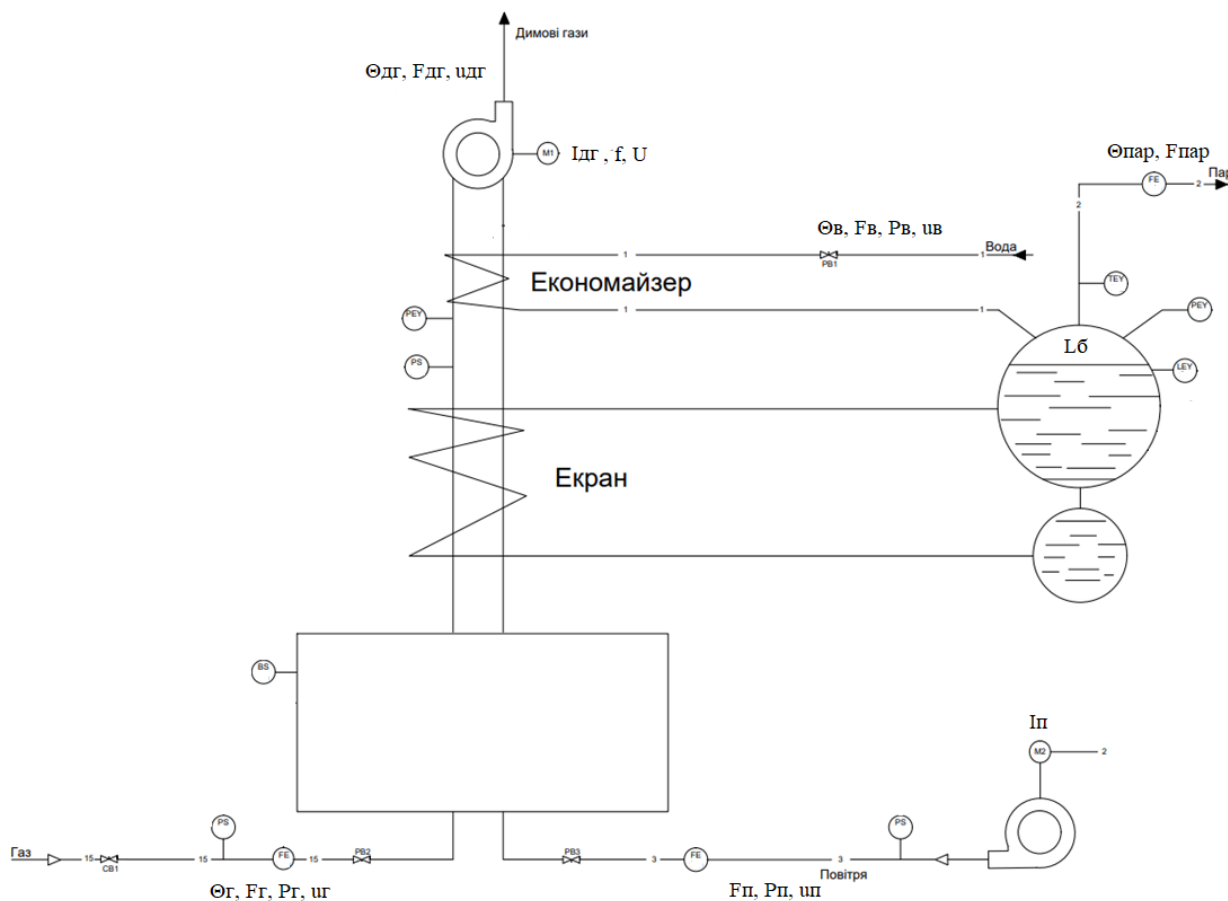


Рис.1.3 – Параметризована технологічна схема автоматизації котлового агрегату

Позначення на параметризованій схемі:

ΘГ – температура газу.

FG – витрата газу.

PG – тиск подачі газу.

уг – регулюючий орган подачі газу.

FG – витрата повітря.

PG – тиск подачі повітря.

уп – регулюючий орган подачі повітря.

Θдг – температура димових газів.

FG – витрата димових газів.

PG – тиск подачі димових газів.

удг – регулюючий орган подачі димових газів.

Θв – температура води.

F_v – витрата води.

P_v – тиск подачі води.

ув - регулюючий орган подачі води.

$\Theta_{пар}$ – температура пари.

$F_{пар}$ – витрата пари.

L_b – рівень барабана.

I_p – струм двигуна вентилятора повітря.

$I_{дг}$ – струм двигуна вентилятора димових газів.

f – частота в електромережі.

U напруга в електромережі.

1.1.7 Проводять первинний аналіз параметрів ТП та ТА у ході якого розподіляю їх на дві групи.

Група «а» (регламентовані параметри):

L_b – показник рівня води у барабані. Рівень води, включаючи її кількість, підлягає суворому контролю згідно з нормами та стандартами. Регулюється завдяки подачі води до економайзеру.

$\Theta_{дг}$ – Температура димових газів. Температура має відповідати певним нормативам, адже саме завдяки неї ми отримуємо потрібну температуру нагріву води. Регулюється завдяки подачі природного газу та повітря безпосередньо до топки.

Група «б» (параметри, що впливають на регламентовані):

$\Theta_{пар}$ та $F_{пар}$ – температура та витрата нагрітої пари. Впливає на рівень води, адже саме з неї утворюється бризки пари.

Θ_v та F_v – температура витрата вхідної води. Зміна температури та витрати вхідної води впливає на рівень та температуру води у барабані.

Θ_g та F_g – температура та витрата подачі природного газу до топки.

F_p – витрата повітря. Подача повітря до топки, що впливає на температуру горіння факела у топці.

P_g, P_p, P_v – тиски газу, повітря, води, димових газів, пари. Впливає на тиск та кількість подачі енергетичних матеріалів.

$u_g, u_p, u_v, u_{дг}$ – положення регулюючих клапанів та вентиляторів. Ці параметри визначають витрати газу пари та води, отже, впливають на весь процес.

$I_{дг}, I_p$ – струм та потужність двигунів. Ці параметри характеризують роботу вентиляторів, що забезпечує процес подачі та виведення повітря та димових газів. Їх зміна може свідчити про неполадки або зміну режимів роботи, що може вплинути на процес.

f, U – частота на напруга мережі. Їх відхилення від норми можуть призвести до збоїв в роботі обладнання та вплинути на процес.

Перелік параметрів групи «а»:

L_b – показник рівня води в барабані;

$\Theta_{дг}$ – показник температури димових газів;

Перелік параметрів групи «б»:

$\Theta_{\text{пар}}$ – температура пари;
 $\Theta_{\text{г}}$ – температура природного газу.
 $F_{\text{г}}$ – витрата природного газу;
 $F_{\text{п}}$ – витрата повітря;
 $F_{\text{дг}}$ – витрата димових газів;
 $F_{\text{в}}$ – витрата води;
 $F_{\text{пар}}$ – витрата пари;
 $u_{\text{г}}, u_{\text{п}}, u_{\text{в}}, u_{\text{дг}}$ - положення регулюючих клапанів та вентиляторів;
 $I_{\text{дг}}, I_{\text{п}}$ – струм двигунів вентиляторів;
 $P_{\text{г}}, P_{\text{п}}, P_{\text{в}}$, - тиски газу, повітря, води
 f, U – частота на напруга мережі;

1.1.8 Проводять поглиблений аналіз групи «а»

А) Технологічні регламенти:
 $L_{\text{б}}$ – показник рівня води в барабані;
 $\Theta_{\text{дг}}$ – показник температури димових газів;
 Б) Експлуатаційні регламенти:
 $I_{\text{дг}}, I_{\text{п}}$ – струм двигунів насосів;
 В) Техніко-економічні та екологічні регламенти:
 $F_{\text{г}}$ – витрата природного газу;
 $F_{\text{п}}$ – витрата повітря;
 $F_{\text{дг}}$ – витрата димових газів;
 $F_{\text{в}}$ – витрата води;
 $F_{\text{пар}}$ – витрата пари;

Аналіз регламенті доцільно реалізувати у вигляді таблиці регламентів.

Таблиця 1.1 Таблиця регламентів

№ п/п	Найменування	Позначення	Одиниця виміру	Номінальні значення	Допустимими відхилення від номінала		
					Довготривалі	Короткочасні	
					Величина	Величина	Час
1	Рівень води в барабані	Lб	%	70	$\pm 0,5$	± 2	60
2	Тиск в барабані котла	Pб	МПа	0,95	$\pm 0,02$	$\pm 0,06$	60

1.1.9 Проводять поглиблений аналіз групи «б»

Сировинні параметри:

Θ_{Γ} – температура газу;

Θ_{Π} – температура повітря

$\Theta_{\text{в}}$ – температура води

$\Theta_{\text{пар}}$ – температура пари

Енергетичні параметри:

f – частота мережі;

U – напруга мережі;

P_{Γ} - тиск газу,

P_{Π} - тиск повітря,

$P_{\text{в}}$ - тиск води

Механічні параметри:

u_{Γ} – положення регулюючого клапану подачі природного газу;

u_{Π} – положення регулюючого клапану подачі повітря;

$u_{\text{в}}$ – положення регулюючого клапану подачі води;

$u_{\text{дг}}$ – положення роботи вентилятора витягу димового газу;

Положення регулюючих клапанів $u_{\text{в}}$, u_{Γ} та u_{Π} безпосередньо впливають на витрати матеріальних потоків (води газу та повітря), вони відповідають визначенню керуючих впливів. Змінюючи положення цих клапанів, можна регулювати кількість води, газу та повітря, що дає вплив на рівень води у барабані та на температуру димових газів.

1.1.10 Розробка параметричної схеми ТП

Формалізація опису взаємозв'язків між параметрами ТП досягається за рахунок переходу від параметризованої до параметричної схеми ТП. При цьому ті параметри, які відображають цілі функціонування об'єкта моделювання та додаткові вимоги до нього, тобто ті параметри, які регламентовані, будуть вихідними, а параметри, що відбивають умови функціонування об'єкта – вхідними.

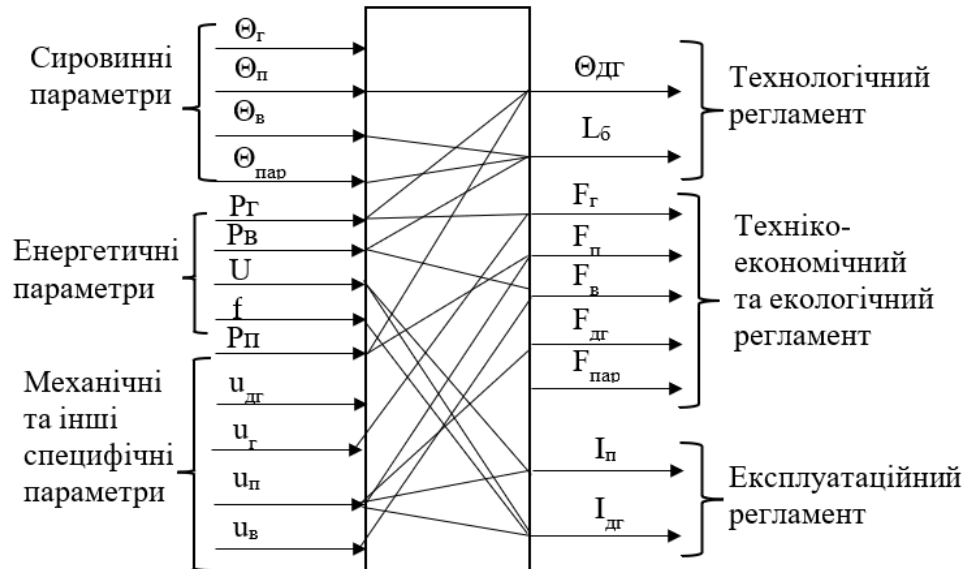


Рис.1.4 – Параметрична схема процесу автоматизації котлового агрегату

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

1.2.1 Оцінка існуючого рівня реалізації функції регулювання для технологічних та експлуатаційних параметрів та її забезпечення технічними засобами автоматизації

Регулювання вихідного показника рівня води в барабані (L_6)

Необхідність регулювання:

Потреба у воді, зокрема її рівень у барабані (L_6), повинна відповідати встановленим допустимим нормам та вимогам технологічного процесу. На цей параметр впливають різні збурення, такі як: температура та витрата води (Θ_v та F_v) – коливання рівня води у барабані, може призвести до зупинки технологічного процесу, або виходу із ладу обладнання через переповнення або нестачу води.

Спосіб регулювання:

Регулювання рівня води в барабані (L_6) здійснюється автоматично за допомогою системи автоматичного керування, також є можливість

перемикання на ручне керування в разі потреби, наприклад, при налаштуванні системи, проведенні ремонтних робіт або виникненні нештатних ситуацій.

Технічні засоби:

Вимірюють і регулюють рівень барабана завдяки комплекту сигналу датчика-дифманометра сапфіра



Рис.1.5 – Сапфіровий датчик тиску - 22МП

Датчики тиску «Сапфір» можна віднести до категорії комбінованих перетворювачів тиску, оскільки вони поєднують датчики надлишкового тиску та датчики вакуумметричного тиску різних рідких та газоподібних речовин. Купити Сапфір датчик тиску можна для вимірювання вакуумметричних тисків у діапазоні від -100кПа до -0,08кПа та надлишкових тисків у діапазоні від 0,08кПа до 2,4мПа. Для різних значень вимірюваного тиску може застосовуватися та чи інша модифікація датчика (згідно з технічними характеристиками). Сапфір 22 ідеально підходить для використання в системах автоматичного керування, регулювання, контролю різними технологічними процесами. Відмінно підійде для застосування у вибухонебезпечних зонах, наприклад, у газовій та нафтовій промисловостях.



Рис.1.6 – Регулюючий клапан Danfoss VF2

Особливості клапана:

100% герметичне ущільнення воріт з EPDM.

Клапани DN 50 мм має конструкцію скидання тиску.

Логарифмічна характеристика споживання.

Без електроприводу штоки клапана можуть знаходитися в будь-якому положенні.

Максимальна робоча температура 130 °
 Тип двоходовий
 Пропускна спроможність kvs 100 м3/год
 Приєднання фланець
 Країна виробник Данія
 Виробник Danfoss
 Номінальний діаметр Ду 80 мм
 Максимальний робочий тиск 16 бар

Область застосування ГВП, опалення, вентиляція, системи тепло-
 водопостачання



Рис.1.7 – Електричний виконавчий механізм МЕО 250/25-0,25-84

Механізми МЕО призначені для приведення в дію запірно-регулюючої арматури в системах автоматичного регулювання технологічними процесами відповідно до командних сигналів регулюючих і керуючих пристроїв. Механізми виготовляються з датчиком зворотного зв'язку (блоком сигналізації положення вихідного валу) для роботи в системах автоматичного регулювання або без датчиків зворотного зв'язку з блоком кінцевих вимикачів для ручного керування.

Основні технічні характеристики:

Номінальний крутний момент на вихідному валу МЕО – 16, 40, 100, 250, 630, 1600, 4000, 10000 Н.м.

Номінальне значення повного ходу – 0,25; 0,63 обороти.

Номінальний час повного ходу – 10, 25, 63, 160 с.

Регулювання температури димових газів (Θдг)

Необхідність регулювання:

Підтримка Θ димових газів в заданих межах є важливою для забезпечення її відповідності вимогам технологічного процесу. На значення Θдг можуть впливати наступні збурення: Θг, Fг, Fп, Pг, Pп.

Спосіб регулювання:

Регулювання Θдг температури димових газів здійснюється автоматично за допомогою системи автоматичного керування, також є можливість перемикання на ручне керування в разі потреби наприклад, при налаштуванні системи, проведенні ремонтних робіт або виникненні нештатних ситуацій.

Технічні засоби:

Для вимірювання Θ_g , F_g , P_g використовується датчик BRC MTM DE 802125

Сигнал від датчика перетворюється і передається до контролера за допомогою регулятора. Керуючим впливом є положення регулюючого клапана подачі газу (u_g). Зміна положення клапана типу Danfoss VF2 здійснюється за допомогою електричного виконавчого механізму типу Danfoss AME435, який отримує керуючий сигнал від контролера.



Рис.1.8 – Датчик BRC MTM DE 802125

BRC MTM DE 802125 - Датчик температури та тиску газу BRC MTM PT MAP cod.DE802125

Сенсор/датчик температури та тиску газу
 Діапазон робочих температур ($^{\circ}\text{C}$) $-40 \div 120$
 Робочий тиск (бар) $0,2 \div 4$
 Робочий тиск (MAP) (бар) $0,2 \div 2,5$
 Датчик температури (ком) 10
 Діаметр газового шлангу (мм) 12
 Діаметр шлангу MAP (мм) 5
 Інтегрований роз'єм підключення
 Сертифікація: R67-01 – R110

Для вимірювання F_p , P_p використовується датчик витрати повітря YOKOGAWA



Рис. 1.9 - датчик витрати повітря YOKOGAWA

Серія VY відрізняється високою універсальністю вихрових витратомірів. Вони вимірюють витрату потоку рідини, газу та пара шляхом вимірювання вихрового потоку Кішені, що виникає позаду вихроутворювача.

Підтримка ефективних та планових виробничих операцій

За допомогою функції діагностики працездатності, яка відстежує стан всього приладу, користувач може точно оцінити стан поточного вимірювання приладу на моніторі комп'ютера в диспетчерському приміщенні. Крім того, в Прилад реєструється інформація про стан, що полегшує визначення необхідності технічного обслуговування. Виконуючи операції з технічного обслуговування, такі як очищення витратоміра або заміна вихроутворювача, в залежності від стану приладу, ці функції сприяють більш ефективній та плановій роботі установки.

Оригінальна вбудована система виявлення розробки Yokogawa забезпечує найвищу надійність і довговічність завдяки: чутливому елементу виявлення сигналу всередині вихроутворювача та простий конструкції, що не має частин, що рухаються. Серія VY успадковує цю структуру, яка добре зарекомендувала себе у серії YEWFLOW. Крім того, завдяки оптимізації нашої перевіреної функції фільтрації SSP (*) вимірювання стають більш стабільними та стійкими до вібрацій. Прилади серії VY забезпечують точність вимірювання $\pm 0,75\%$ від показань для рідини або $\pm 1\%$ від показань для газу та пари в широкому діапазоні умов використання текучого середовища.

Технічні засоби:

Для вимірювання $\Theta_{дг}$, $F_{дг}$ використовується запальний пристрій ЗЗП-3.



Рис. 1.10 – Захисний-запальний пристрій ЗЗП-3

Принцип контролю наявності полум'я - ЗЗП-3 Контроль факела запального за допомогою датчика іонізаційного.

Технічні характеристики

Напруга живлення керуючого приладу, електромагнітного вентиля і бобіни	~220 В
Частота, Гц	50
Довжина занурювальний частині запальника, мм	350, 500, 700, 1000
Тиск газу, кг/см ²	0.01-2.5
Витрата газу, кг/год, не більше	8
Довжина факела при нормальному режимі горіння, мм	не менш 800
Час спрацьовування пристрою контролю факела, з	не більше 2

2.1.4 Регулювання струму двигунів ($I_{дг}$, $I_{п}$)

Необхідність регулювання:

Регулювання струму в двигунах є важливим аспектом експлуатації насосів та вентиляторів, оскільки він дозволяє виявляти неполадки та запобігати аварійним ситуаціям. Збурення, які впливають на струм двигунів є відхилення напруги живлення від номінального значення та частота напруги живлення.

Спосіб регулювання:

Регулювання струму двигунів ($I_{дг}$, $I_{п}$) здійснюється автоматично за допомогою системи автоматичного керування, також є можливість перемикання на ручне керування в разі потреби наприклад, при налаштуванні системи, проведенні ремонтних робіт або виникненні нештатних ситуацій.

Технічні засоби:

Для подачі повітря у барабан використовується дуттєвий вентилятор з трифазний електродвигун AIP100L2. Керуючим впливом є частота напруги живлення (f). Змінюючи частоту за допомогою частотного перетворювача можна регулювати швидкість обертання двигуна.



Рис.1.11 – Електродвигун AIP100L2

АИР100L2 – це асинхронний електродвигун 5,5 кВт 3000 об/хв. Трифазний загальнопромисловий магнітоелектричний двигун із короткозамкненим ротором. Паспортна частота обертання 2900 оборотів, потужність – 5,5 кВт, частота обертання поля статора – 3000 об/хв. Живлення - 220/380 Вольт 50 Гц. Універсальні кріпильні розміри згідно з ГОСТ 31606-2012. Діаметр валу – 28 мм • IP55 • ККД – 85,7%.

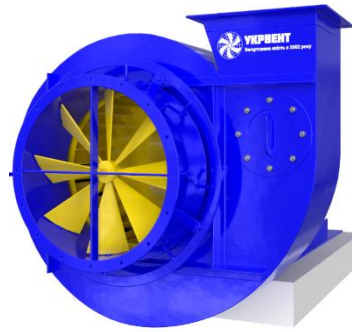


Рис. 1.12 Вентилятор тяго дуттьової ВД-2,7 (1,5/1500)

2.1.5 Опис технічних засобів для "ручного" управління ТП та ТА

На великих заводах виникає проблема ефективного розташування великої кількості приладів та систем управління, що ускладнює їх практичне використання та обслуговування. Застосування компактної щитової апаратури та телемеханічних систем вибіркового контролю призводить до значного зменшення розмірів пультів та скорочення витрат на будівельну частину. Малий розмір управляючих щитів дозволяє використовувати більш доступні та зручні рішення в компонуванні, об'єднуючи всі ланцюги керування та контролю на одному пульті-панелі. Це сприяє покращенню огляду, швидкості та легкості виробничих операцій.

Для вказаного ТП був обраний монтажний щит із розмірами 1200x800x400. На лицьовій панелі цього щита, зображеної на кресленні, розташовані перемикачі, кнопки та світлодіодні індикатори. Світлодіодні індикатори HL1-HL2 служать для відображення стану роботи двигунів, а HL3-HL8 – для моніторингу функціонування ВМ. Крім того, на щиті відображено блок ручного управління Зб.

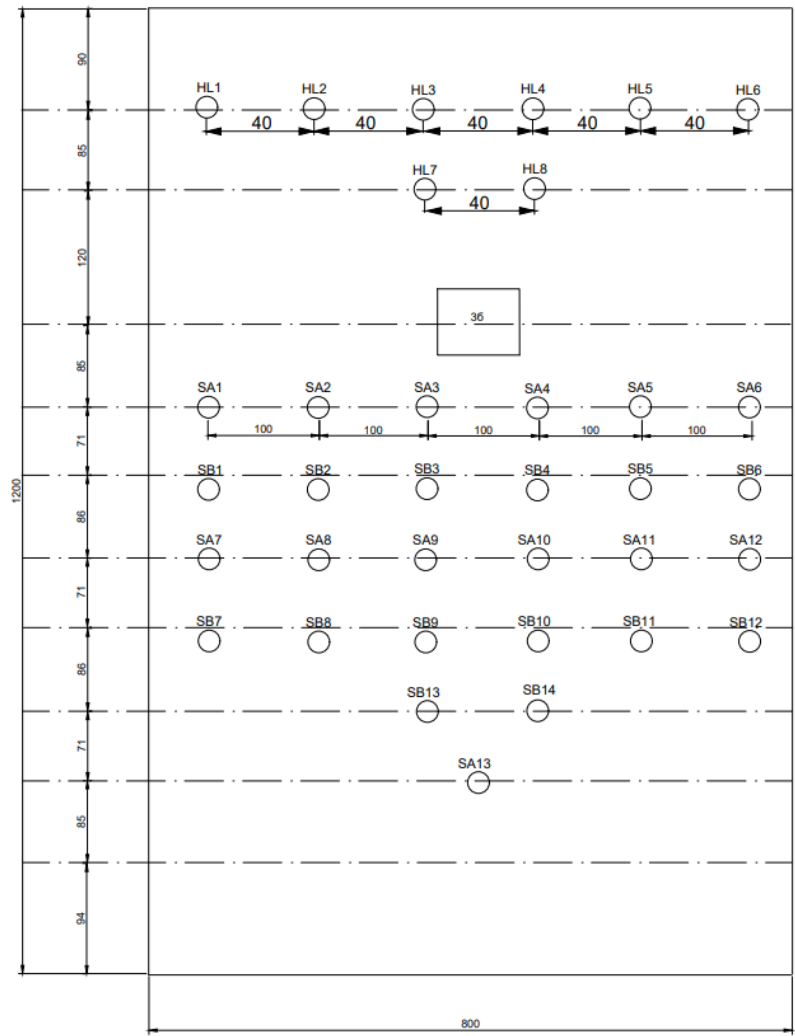


Рис. 1.13 передня панель щита управління

1.1.6 Опис технічних засобів автоматизації поза зоною розташування ТА

В якості ПЛК в автоматизації котлового агрегату використовується Siemens S7- 1500 для реалізації алгоритмів керування, збору та обробки даних з датчиків, та формування керуючих сигналів. ПЛК розміщений у щиті керування.



Рис.1.14 – ПЛК Siemens S7- 1500

Окрім цього, в автоматизації даного процесу використовується блок ручного управління БРУ-22.

Блок ручного управління БРУ-22 розрахований на застосування в автоматизованих системах управління технологічними процесами (АСУТП) та призначений для перемикання ланцюгів управління виконавчими пристроями, індикації положення ланцюгів.



Рис.1.15 – блок ручного управління БРУ-22

Функції автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора технологічного процесу реалізовано у вигляді комп'ютерної робочої станції з встановленим програмним забезпеченням SCADA. АРМ дозволяє оператору здійснювати моніторинг та керування процесом автоматизації котельної установки, переглядати поточні значення параметрів, аварійні повідомлення, також надає можливість налаштування параметрів регуляторів та зміни режимів роботи установки.

1.2.2 Функції логічного (логіко-програмного) управління, оцінка існуючого рівня їх реалізації та забезпечення технічними засобами автоматизації

1.2.2.1 Формулювання умов та опис реалізації технологічного пуску ТА

Здійснення технологічного пуску котельної установки реалізовано наступним чином: перевірка наявності води на вході в установку, перевірка рівня газу в газопроводі та готовності системи дозування, перевірка працездатності насосів, вентиляторів, клапанів та інших елементів установки, перевірка працездатності ПЛК, датчиків, виконавчих механізмів та інших компонентів системи керування.

Технологічний пуск котлового агрегату здійснюється автоматично за допомогою системи керування, реалізованої на базі ПЛК Siemens S7-1500 та SCADA-системи. Також у разі потреби, оператор може перемкнути систему в режим ручного керування та здійснювати пуск та зупинку обладнання, а також регулювання параметрів вручну за допомогою кнопкової станції, перемикачів, розташованих на місцевому щиті керування.

1.2.2.2 Формулювання умов та опис реалізації технологічної зупинки ТА

Технологічна зупинка котлового агрегату реалізована наступним чином: зупинка здійснюється за розкладом або за необхідності проведення профілактичних чи ремонтних робіт. Якщо рівень води в водопроводі стає нижче допустимого - установку необхідно зупинити, щоб уникнути роботи насосів «всуху» та їх пошкодження.

Технологічна зупинка котлового агрегату здійснюється автоматично за допомогою системи керування, реалізованої на базі ПЛК Siemens S7-1500 та SCADA-системи. У разі потреби, оператор може перемкнути систему в режим ручного керування та здійснювати зупинку обладнання вручну за допомогою кнопкової станції на місцевому щиті керування.

1.2.2.3 Формулювання умов та опис реалізації блокування передаварійної ситуації

Умови блокування передаварійної ситуації реалізовано наступним чином: перевищення допустимого рівня води у барабані, перевищення допустимого струму на двигунах вентиляторів та відхилення напруги живлення або частоти мережі від допустимих значень.

Блокування передаварійних ситуацій здійснюється автоматично за допомогою системи керування на базі ПЛК Siemens S7-1500. Також оператор може контролювати стан системи та отримувати інформацію про передаварійні ситуації через SCADA-систему. У разі потреби, оператор може втрутитися в процес керування та виконати необхідні дії вручну.

1.2.2.4 Формулювання умов та опис реалізації аварійної (екстреної) зупинки ТА

Аварійна (екстрена) зупинка технологічного обладнання (ТА) у котловому агрегаті необхідна у випадках, коли виникають загрозові ситуації, які можуть призвести до пошкодження обладнання, тому для її уникнення реалізовані наступні умови: перевищення допустимого рівня води у барабані, вичерпання запасів сировини (води, газу), необхідної для процесу нагріву димових газів, а також аварійна ситуація в електричній мережі.

Зупинка може здійснюватися автоматично за допомогою системи керування або вручну оператором за допомогою кнопкової станції на місцевому щиті керування.

1.2.2.5 Визначають існуючий комплекс технічних засобів, які „постачають” інформацію для алгоритмів логічного керування

Для вимірювання рівня у барабані використовується датчик-дифманометр сапфіра, який спрацьовує при перевищенні допустимого рівня води. Для вимірювання і контролю газу та повітря використовується датчик тиску YOKOGAWA. Для вимірювання струму двигунів насосів використовується аналоговий амперметр Hager SM001. Для надання поточного стану електродвигунів насосів та виконавчих механізмів включено/відключено

використовуються кнопкова станція пуск/стоп з LED підсвіткою, також використовується перемикач вибору режиму керування.

1.2.2.6 Визначають існуючі засоби безпосереднього впливу на процес

Для подачі газу, води, повітря використовується регулюючий клапан типу Danfoss VF2. Для пуску електродвигунів насосів та вентиляторів використовується контактор типу Schneider Electric LC1D12, а для захисту електродвигунів від перегріву використовується теплове реле Schneider Electric LRD16.

1.2.2.7 Визначають існуючі засоби обробки логічної інформації та формування логічних керуючих дій

Для реалізації алгоритмів логічного управління використовуються двопозиційне реле типу EP-1 для пуску електродвигунів насосів, як в автоматичному так і в ручному режимі. Для формування керуючих впливів використовуються ПЛК типу Siemens S7-1500.

1.2.2.8 Визначають існуючі засоби подання інформації технологічному персоналу

Для надання інформації технологічному персоналу використовуються комп'ютерна робоча станція з встановленим програмним забезпеченням SCADA. АРМ дозволяє оператору здійснювати моніторинг та керування автоматизацією котельної установки, переглядати поточні значення параметрів, аварійні повідомлення, також надає можливість налаштування параметрів регуляторів та зміни режимів роботи установки. Також існують засоби, через які можна впливати на процес, до них відносяться: кнопки пуск/стоп, перемикачі для вибору режиму роботи.

1.2.2.9 Наводять фото технічних засобів перерахованих вище



Рис.1.16 – Пост двомісний Аско "Старт-Стоп"



Рис.1.17 – Перемикач на 3 фіксованих положення ALCLR-22



Рис.1.18 – Світлосигнальна арматура червона AD22-22DS



Рис.1.19 – Контактор Schneider electric lc1d12



Рис.1.20 – Світлодіодні індикатори HL1-HL2



Рис.1.21 – Двопозиційне реле АСКО-УКРЕМ MY2 (5A 24V DC)

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

1.3.1 Конкретизують вплив вхідних сировинних, енергетичних, механічних параметрів ТП на вихідні параметри (питомі витрати сировини, енергоносіїв)

Вплив витрати води (F_v) на витрату пари ($F_{\text{пар}}$):

зі збільшенням витрати вхідної води необхідна витрата пари також зростає для забезпечення ефективного пароутворення в барабані.

Вплив вхідного показника температури та витрати повітря (Θ_p , F_p) на витрату димових газів ($F_{\text{дг}}$): чим вища температура та витрата повітря, тим більше димових газів утворюється. зміни температури та витрати газу (Θ_g та F_g) теж впливають на витрату димових газів.

Вплив регулюючого клапана подачі води (u_v) на витрату пари (F_k): від стану положення регулюючого клапану також залежить витрата пари.

Вплив регулюючого клапана подачі повітря та газу (u_p та u_g) на витрату димових газів ($F_{\text{дг}}$): від стану положення регулюючих клапанів також залежить витрата димових газів.

Для виміру витрати води, використовується електромагнітний витратомір типу SITRANS FMT020.



Рис.1.22 – Електромагнітний витратомір SITRANS FMT020.

1.3.2 Визначають потенційні джерела економічної ефективності від впровадження поліпшених функцій регулювання та логічного керування.

За рахунок більш точного регулювання подачі води можна досягти оптимального використання енергетичних ресурсів та уникнути їх перевитрат. Використання частотних перетворювачів для керування насосами дозволить оптимізувати їх роботу та знизити споживання електроенергії, особливо в режимах часткового навантаження. За рахунок більш точного контролю параметрів процесу та вчасне блокування перед аварійних ситуацій дозволить зменшити кількість випадків, витрата енергетичних ресурсів перевищує нормативи, що призводить до недоцільності експлуатування котельної установки. Запобігання аварійним ситуаціям та оптимізація режимів роботи обладнання сприятиме збільшенню терміну його служби та зниженню витрат на ремонт та заміну деталей.

1.3.3 Конкретизують кінцеву економічну ціль модернізації системи і визначають, за рахунок яких саме поліпшень функцій регулювання та логічного керування вона може бути досягнута.

Кінцевою економічною метою модернізації системи автоматичного керування котлового агрегату є оптимізація роботи котла, регулювання подачі газу води та повітря відповідно до реальних потреб системи. Це може значно зменшити витрати енергії та забезпечити оптимальну ефективність. Також вона може ефективно контролювати процеси згоряння та викиди, забезпечуючи найкращу роботу котла і зменшуючи негативний вплив на довкілля.

Ця мета може бути досягнута за рахунок наступних поліпшень функцій оптимізації, зниження енергоспоживання насосів за рахунок використання частотних перетворювачів, зменшення часу простоїв обладнання завдяки впровадженню системи автоматичного блокування перед аварійних ситуацій та аварійної зупинки, підвищення ефективності подачі енергетичних ресурсів за рахунок більш точного регулювання рівня води у барабані. Це призведе до зменшення перенавантаження системи, а також до економії води, що використовується нагріву у барабані.

1.3.4 Конкретизують інші цілі, які можуть бути досягнуті за рахунок модернізації

Головною цілю автоматизації котлового агрегату – є важливість забезпечення ефективності, економії ресурсів та виконання стандартів у галузі енергетики. Також, завдяки сучасним технічним засобам автоматизації поліпшується умови праці робочого персоналу, а за допомогою блокування передаварійних ситуацій підвищується експлуатація технологічного агрегату та технічних засобів.

2. Розробка концептуальної моделі об'єкта управління та ідентифікація моделей.

2.1 Розробка структурної (координатної) схеми об'єкта керування

2.1.1 Конкретизація мети і завдань керування об'єктом, виявлення регульованих координат

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 аналізованого технологічного процесу генерації пари в котлоагрегаті в якості регульованих координат об'єкта керування (параметрів групи «а») доцільно обрати рівень води в барабані котла L_6 та тиск в барабані котла P_6 .

2.1.2 Вибір управляючих дій об'єкту керування.

Необхідною умовою вирішення задач керування є наявність керуючих дій, що повинні бути вхідними змінними (координатами) ОК. Для задач регулювання, такими керуючими діями, насамперед, є дії, що цілеспрямовано можуть змінювати витрати матеріальних і енергетичних потоків, а саме – положення регулювальних органів. Кількість керуючих дій повинно бути рівним кількості регульованих змінних.

Для процесу керування виробництвом пари в промисловому котлоагрегаті до керуючих дій доцільно віднести положення регулювального органу подачі живильної води до барабана котла u_v і подачу природного газу до топки u_r .

2.1.3 Виділення та класифікація збурень об'єкта керування.

Після того, як визначені керуючі 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 генерації пари в котлоагрегаті до контрольованих збурень доцільно віднести витрату нагрітої пари $F_{\text{пар}}$, яка визначається поточним споживанням та навантаженням на котел. Всі інші вхідні дії, крім керуючих дій і контрольованого збурення, віднесемо до неконтрольованих збурень. Детерміновану складову цих збурень адитивно прикладемо до керуючих дій, а стохастичну (випадкову) складову (f_1 , f_2) – до відповідної регульованої координати.

2.1.4 Складання структурної (координатної) схеми об'єкту регулювання.

Структурна схема ОК є черговим і останнім етапом формалізації подання технологічного процесу як ОК. Розробка схеми проводиться на основі результатів досліджень, викладених у п.п. 2.1.1 – 2.1.3.

Структурна схема ОК, по суті, є найбільш загальною (концептуальною) моделлю технологічного процесу як ОК.

Структурна схема процесу процесу генерації пари в котлоагрегаті наведена на рис. 2.1.

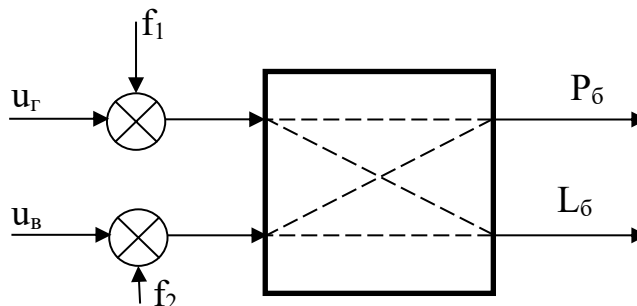


Рис 2.1 Структурна схема процесу процесу генерації пари в котлоагрегаті

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

2.2.1 Априорний аналіз і вибір структури моделей динамічних властивостей каналів керування та контрольованих збурень на основі знання фізичних закономірностей технологічного процесу.

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

Для технологічного процесу генерації пари в котлоагрегаті, як за каналами регулювання тиску пара в барабані ($u_T - P_6$, $u_B - P_6$), так і за каналами регулювання рівня води ($u_B - L_6$, $u_T - L_6$), об'єкт керування має як властивість самовирівнювання, так і безсамовирівнювання. Збільшення керуючої дії подачі газу на пальник (u_T) або подачі питної води (u_B) призведе до відповідної зміни тиску пара та рівня води в барабані котла згідно з їхніми динамічними характеристиками (росту тиску при збільшенні u_T або підняття рівня при збільшенні u_B).

2.2.2 Априорний аналіз і прийняття рішення про припустимість лінеаризації статичних властивостей каналів керування і збурень об'єкта регулювання, виходячи, зокрема, з діапазонів зміни регульованих перемінних при роботі САР, для розробки якої ведеться ідентифікація об'єкта.

Виходячи з фізичної суті процесів, що протікають в ОК, відомо, що відносно у повній мірі математично ці процеси можуть бути описані нелінійними диференціальними рівняннями. А в також процеси можуть бути описані лінійними диференціальними рівняннями, тобто припустимою є лінеаризація моделі ОК.

2.2.2.1 Ідентифікація лінеаризованих моделей динаміки каналів управління об'єкта регулювання в околиці його робочих режимів.

2.2.2.2 Короткий порівняльний аналіз і вибір доцільних входних дій для експериментального дослідження з метою отримання необхідної інформації про властивості каналів об'єкту для випадку, коли входні змінні каналів доступні для цілеспрямованої зміни.

Активні експерименти можуть проводитися тільки з каналами, входні змінні яким доступні для цілеспрямованої зміни. Ними, насамперед, є керуючі дії. При цьому експериментатор може обирати входню дію будь-якої форми (ступінчасту, лінійно зростаючу, імпульсну, гармонічну, випадкову). Однак, з розуміння простоти організації цих дій, мінімізації витрат часу на

проведення експерименту та обробки його результатів, доцільно використовувати ступінчасті дії.

2.2.3 Планування активного експерименту на об'єкті для обраних вхідних дій і отримання реакцій на них у ході натурного та (або) уявного експериментів.

План активного експерименту

1. За допомогою зміни керуючих дій досягаємо значень регульованих координат, що перебували б в околицях їх номінальних значень. Для ОК (котлоагрегату) значенням базових керуючих впливів $u_r = 60\%$ х.р.о. та $u_v = 60\%$ х.р.о. будуть відповідати номінальні значення регульованих координат: тиск в барабані $P_6 = 0,95$ МПа та рівень води $L_6 = 70\%$.
2. Чекаємо закінчення перехідних процесів в каналах та настання сталих режимів, при яких вихідні змінні перестануть змінюватися.
3. Змінимо управляючу дію u_r (або u_v) ступінчастим чином на 10% х.р.о., відзначивши при цьому момент початку її зміни.
4. Реєструємо зміну вихідних змінних до настання нових сталих режимів.
5. Повертаємо керуючий вплив u_v у вихідний стан, чекаємо закінчення перехідних процесів в каналах та настання сталих режимів.
6. Змінимо іншу управляючу дію u_r ступінчастим чином на 10% х.р.о., відзначивши момент початку її зміни.

Реєструємо зміну вихідних змінних до настання нових сталих режимів. Результати активного експерименту наведені на рис. 2.2.

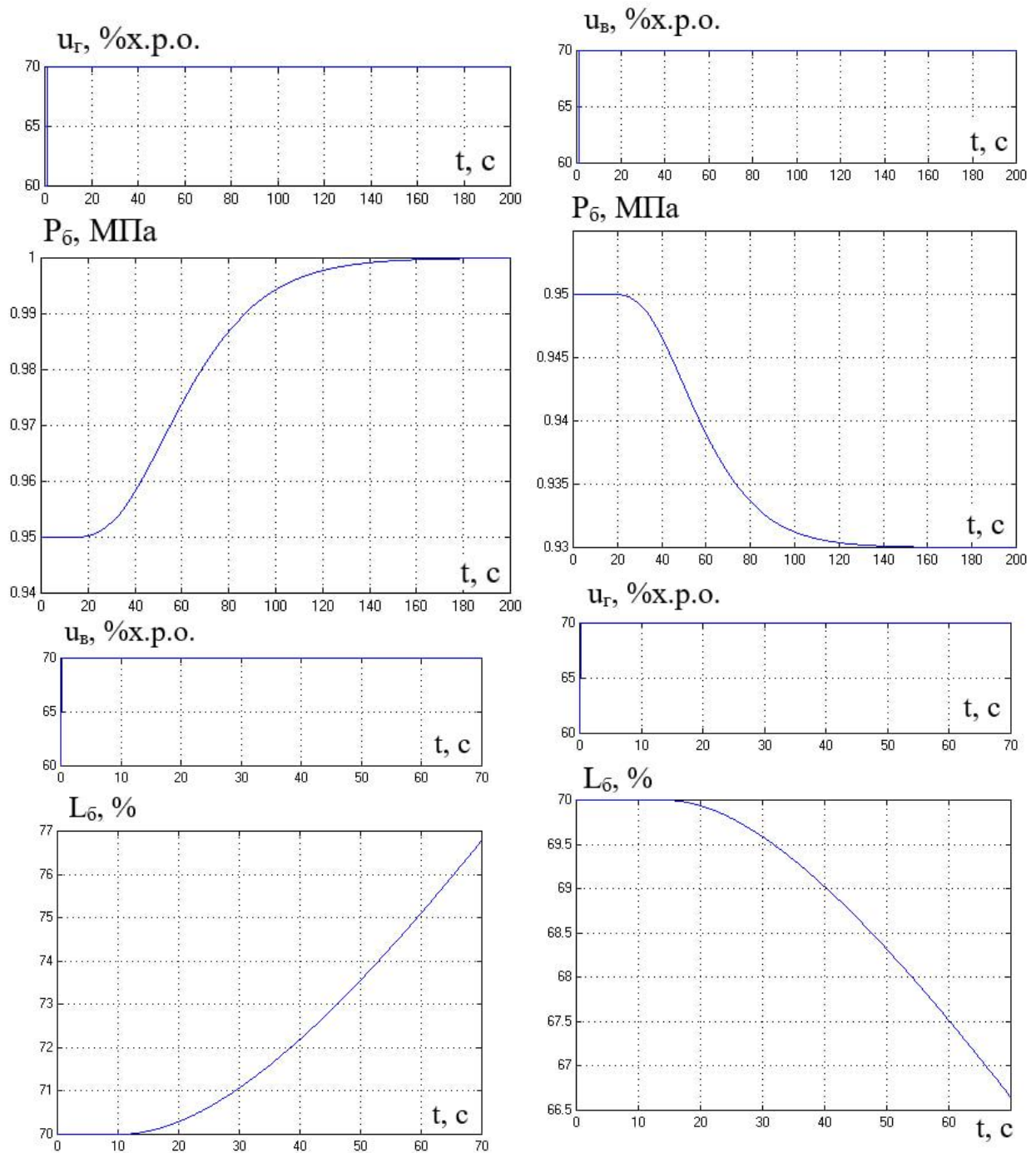


Рис. 2.2 – Результати активного експерименту

2.2.4 Аналіз отриманої в ході експерименту інформації, обґрунтування та вибір структури моделей каналів (структурна ідентифікація моделей).

За результатами активного експерименту (рис. 2.1) можна зробити висновок, що канали керування ОК мають властивості, як із

самовирівнюванням, так і безсамовирівнювання, а значить їхня модель може бути описана передаточними функціями: першого та другого порядку:

Для статичних моделей -

$$W_{U_B-P_6}^O(p) = \frac{k \cdot e^{-\tau p}}{Tp + 1}; \quad W_{U_r-P_6}^O(p) = \frac{k \cdot e^{-\tau p}}{(Tp + 1)^2}$$

Для астатичних моделей -

$$W_{U_B-L_6}^O(p) = \frac{e^{-\tau p}}{Tp}; \quad W_{U_r-L_6}^O(p) = \frac{e^{-\tau p}}{T_1 p \cdot (T_2 p + 1)}$$

2.2.5 Вибір методик і проведення параметричної ідентифікації моделей першого та другого порядків.

Для параметричної ідентифікації моделей ОК за каналом $U_r - P_6$ зі статичними властивостями необхідно знайти коефіцієнт передачі ОК (K), сталу часу (T) і час запізнення (τ).

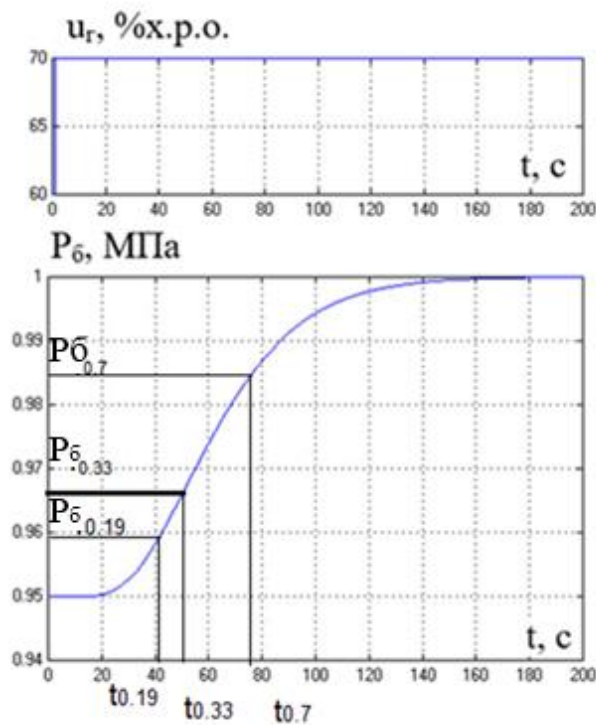


Рис. 2.3 – Параметрична ідентифікація моделі

Коефіцієнт передачі визначають наступним чином:

$$k = \Delta P_6 / \Delta U_{\Gamma} = (P_{6K} - P_{6П}) / (U_{\Gamma K} - U_{\Gamma П}) = (1 - 0,95) / (70 - 60) = 0,05 / 10 = 0,005 \text{ МПа} / \% \text{х.р.о.}$$

Модель 1-го порядку

$$\tau = (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) / 2 = (3 \cdot 45,5 - 70,85) / 2 = 32,8 \text{ с}$$

$$t_{0,33} = 45,5 \text{ с}$$

$$t_{0,7} = 70,85 \text{ с}$$

$$T = (t_{0,7} - \tau) / 1,2 = (70,85 - 32,8) / 1,2 = 31,7 \text{ с}$$

$$W_{U_{\Gamma}-P_6}^O(p) = \frac{0,005 \cdot e^{-32,8p}}{31,7p + 1}$$

Модель 2-го порядку

$$\tau = (3 \cdot t_{0,19} - t_{0,7}) / 2 = (3 \cdot 37,4 - 70,85) / 2 = 20,7 \text{ с}$$

$$T = (t_{0,7} - \tau) / 2,4 = (70,85 - 20,7) / 2,4 = 20,9 \text{ с}$$

$$t_{0,19} = 37,4 \text{ с}$$

$$W_{U_{\Gamma}-P_6}^O(p) = \frac{0,005 \cdot e^{-20,7p}}{(20,9p + 1)^2}$$

Для параметричної ідентифікації моделей ОК за каналом $U_{\Gamma} - P_6$ зі статичними властивостями необхідно знайти коефіцієнт передачі ОК (K), сталу часу (T) і час запізнення (τ).

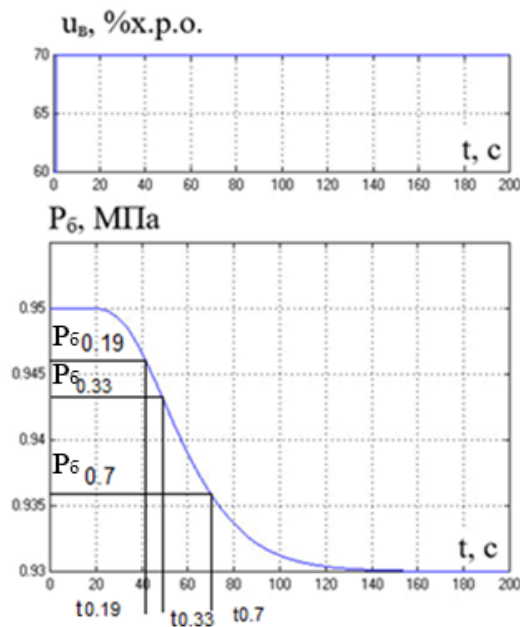


Рис. 2.4 – Параметрична ідентифікація моделі

Коефіцієнт передачі визначають наступним чином:

$$k = \Delta P_6 / \Delta U_B = (P_{6K} - P_{6П}) / (U_{BK} - U_{BП}) = (0,93 - 0,95) / (70 - 60) = -0,02 / 10 = -0,002 \text{ МПа} / \% \text{х.р.о.}$$

Модель 1-го порядку

$$\tau = (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) / 2 = (3 \cdot 41,1 - 71,65) / 2 = 25,8 \text{ с}$$

$$T = (t_{0,7} - \tau) / 1,2 = (71,65 - 25,8) / 1,2 = 38,2 \text{ с}$$

$$t_{0,33} = 41,1 \text{ с}$$

$$t_{0,7} = 71,65 \text{ с}$$

$$W_{U_B-P_6}^O(p) = \frac{-0,002 \cdot e^{-25,8p}}{38,2p + 1}$$

Модель 2-го порядку

$$\tau = (3 \cdot t_{0,19} - t_{0,7}) / 2 = (3 \cdot 33 - 71,65) / 2 = 13,7 \text{ с}$$

$$T = (t_{0,7} - \tau) / 2,4 = (71,65 - 13,7) / 2,4 = 24,2 \text{ с}$$

$$t_{0,19} = 33 \text{ с}$$

$$W_{U_B-P_6}^O(p) = \frac{-0,002 \cdot e^{-13,7p}}{(24,2p + 1)^2}$$

Для параметричної ідентифікації моделей ОК за каналом $U_B - L_6$ з астатичними властивостями необхідно визначити час запізнення (τ), сталу інтегрування (T_1 , T_{01}) та сталу часу (T_2).

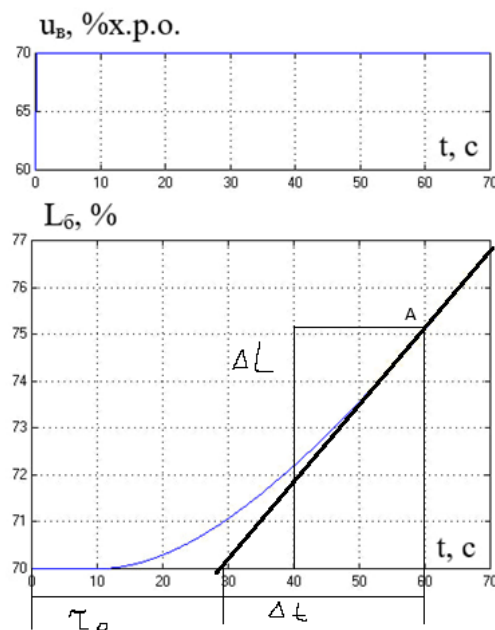


Рис. 2.5 – Параметрична ідентифікація моделі

Модель 1-го порядку.

$$\tau = 28 \text{ с}$$

$$T = \Delta u_1 / \Delta L \cdot \Delta t = (70 - 60) / (75,12 - 70) \cdot (60 - 28) = 10 / 5,12 \cdot 32$$

$$= 62,5 \text{ \%х.р.о.} / \% \cdot \text{с}$$

$$W_{U_B-L_6}^O(p) = \frac{e^{-28p}}{62,5p}$$

t, с	Lб, %	$\Delta L / \Delta t$	t, с	Lб, %	$\Delta L / \Delta t$	t, с	Lб, %	$\Delta L / \Delta t$
0	70	0	28	70,86	0,085	70	76,81	0,172
12	70	0	32	71,28	0,105	80		0,172
16	70,06	0,025	36	71,71	0,115			
18	70,11	0,036	42	72,45	0,13			
20	70,2	0,045	46	72,98	0,145			
24	70,54	0,062	50	73,56	0,155			
26	70,69	0,075	65	75,95	0,166			

Таблиця 2.1 – Результати графічного диференціювання

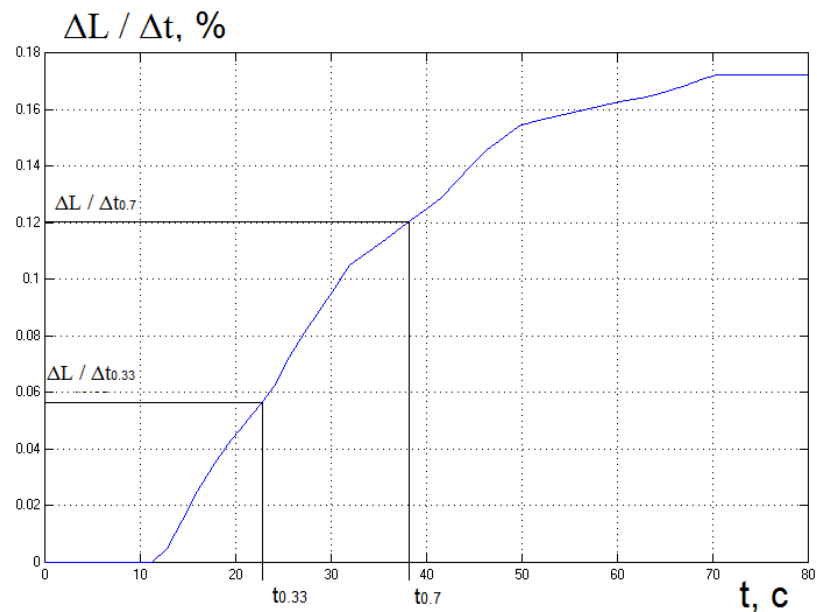


Рис. 2.6 – Результат графічного диференціювання

За результатами графічного диференціювання знаходимо:

$$\tau = (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) / 2 = (3 \cdot 22,9 - 38,3) / 2 = 12 \text{ с}$$

$$T_2 = (t_{0,7} - \tau) / 1,2 = (38,3 - 12) / 1,2 = 17 \text{ с}$$

$$t_{0,33} = 22,9 \text{ с}$$

$$t_{0,7} = 38,3 \text{ с}$$

$$W_{U_B-L_6}^O(p) = \frac{e^{-12p}}{62,5p \cdot (17p + 1)}$$

Для параметричної ідентифікації моделей ОК за каналом $U_r - L_6$ з астатичними властивостями необхідно визначити час запізнення (τ), сталу інтегрування (T_1 , T_{01}) та сталу часу (T_2).

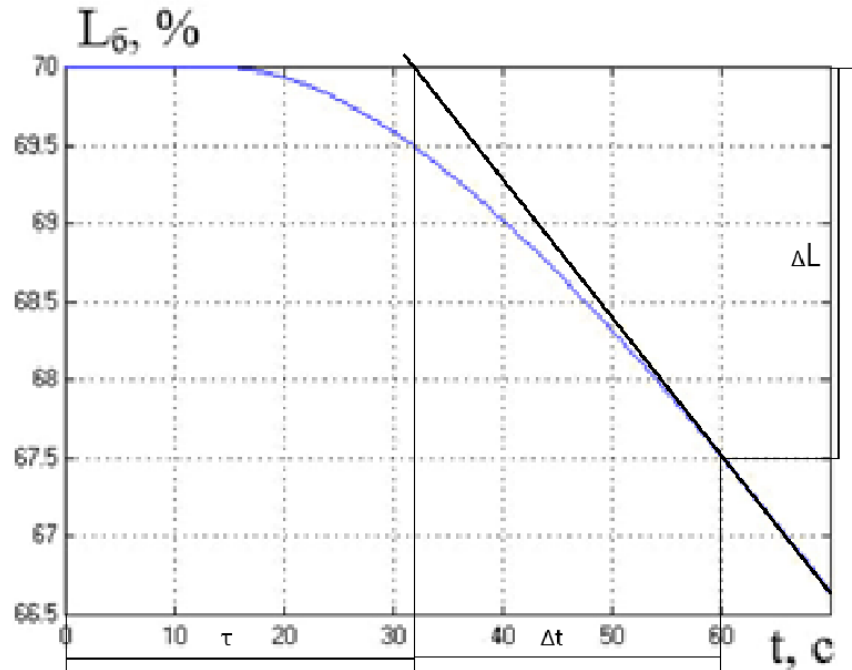


Рис. 2.7 – Параметрична ідентифікація моделі

Модель 1-го порядку

$$\tau = 32 \text{ c}$$

$$T = \Delta u_1 / \Delta L \cdot \Delta t = (70 - 60) / (67,5 - 70) \cdot (60 - 32) = 10 / -2,5 \cdot 28 \\ = -112 \text{ \%х.р.о.} / \% \cdot \text{c}$$

$$W_{U_r-L_6}^0(p) = -\frac{e^{-32p}}{-112p}$$

t, c	L6, %	$\Delta L / \Delta t$	t, c	L6, %	$\Delta L / \Delta t$
0	70	0	36	69,26	-0,06
15,7	70	0	38	69,13	-0,065
20	69,93	-0,015	46	68,59	-0,08
22	69,88	-0,025	56	67,83	-0,085
26	69,76	-0,035	58	67,66	-0,085
28	69,67	-0,045	65	67,06	-0,088
32	69,48	-0,054	70	66,62	-0,088

Таблиця 2.2 – Результати графічного диференціювання

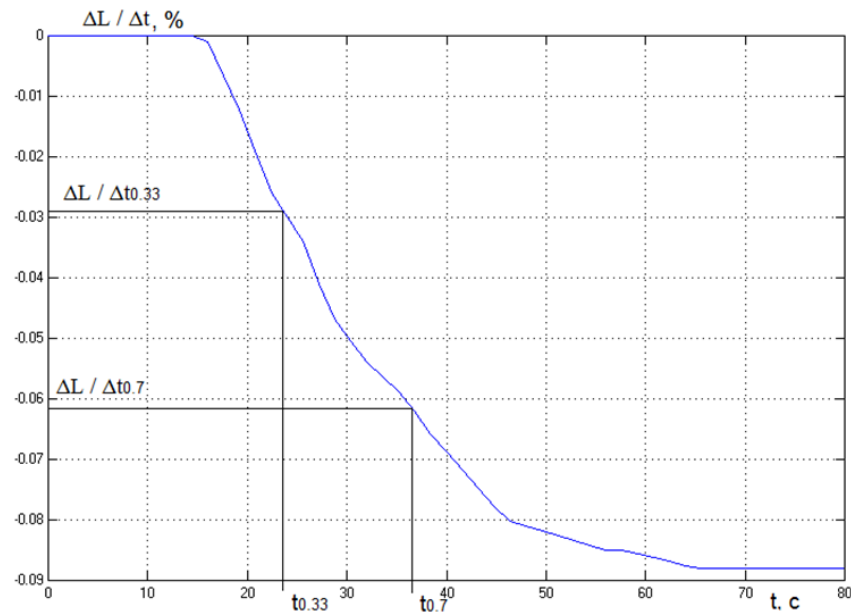


Рис. 2.8 – Параметрична ідентифікація моделі

$$\tau = (3 \cdot t_{0.33} - t_{0.7}) / 2 = (3 \cdot 23,5 - 36,5) / 2 = 17 \text{ c}$$

$$T_2 = (t_{0.7} - \tau) / 1,2 = (36,5 - 17) / 1,2 = 16,3 \text{ c}$$

$$t_{0.33} = 23,5 \text{ c}$$

$$t_{0.7} = 36,5 \text{ c}$$

$$W_{U_{\Gamma-L6}}^O(p) = -\frac{e^{-32p}}{-112p}; \quad W_{U_{\Gamma-L6}}^O(p) = -\frac{e^{-17p}}{-112p \cdot (16,3p + 1)}$$

2.2.6 Ідентифікація моделей статички каналів управління об'єкту регулювання з істотно нелінійними властивостями

2.2.7 Вибір і опис доцільного методу експериментальних досліджень властивостей каналів з метою отримання необхідної інформації.

Метою цього підрозділу курсової роботи є отримання моделей статички для побудови моделей динаміки в абсолютних величинах. Також метою підрозділу є отримання моделей статички каналі ОК з суттєво нелінійними властивостями, якщо така задача передбачена індивідуальним завданням.

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 статички 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 у та x . У цьому випадку залежність розум = $y^M = \hat{y} = \Phi(\hat{x})$ 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 статички можуть бути пасивному або активними (як і при отриманні моделей динаміки). Для отримання моделей статички у нашому випадку будемо використовувати активний експеримент.

2.2.8 Планування активного експерименту на об'єкті для реалізації обраного методу та відображення результатів натурного або уявного експериментів у вигляді оцінок статичних характеристик.

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.

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 2.3 і на рис. 2.9.

Таблиця 2.3

Результати експерименту для визначення статичної характеристики ОК

№ експерименту	уг, %х.р.о.	ув, %х.р.о.	Рб, МПа
1	60	60	0,95
2	70	60	1,0
3	80	60	1,05
4	50	60	0,9
5	40	60	0,85
6	0	60	0,1
8	100	60	1,1
9	60	70	0,93
10	60	80	0,91
11	60	50	0,97
12	60	40	0,99
13	60	0	1,15
14	60	100	0,87

Побудова у графічному вигляді статичних характеристик ОК, попередня оцінка їх адекватності.

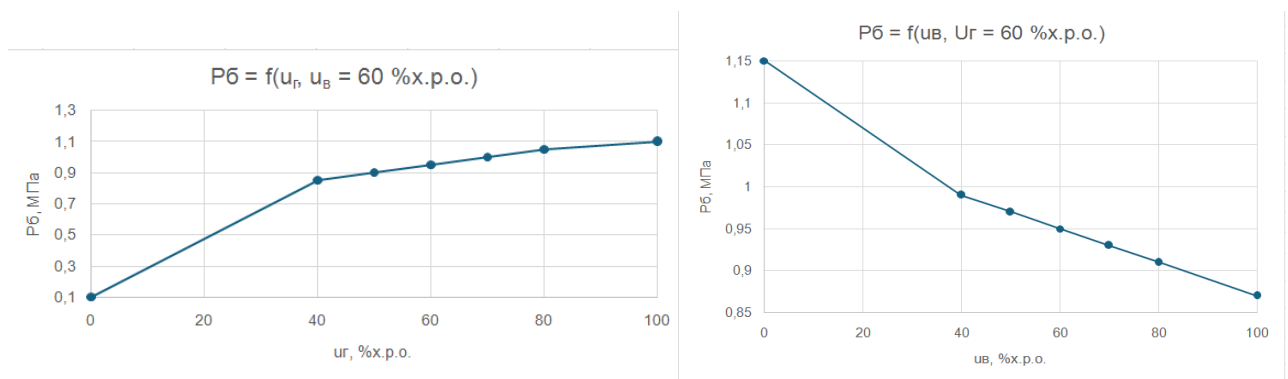


Рис. 2.9 – Результат експерименту для визначення статичної характеристики ОК за каналами U_{Γ} - P_b , U_B - P_b

Провести параметричну ідентифікацію моделей каналів ОК.

$$P_6 = a_1 \cdot u_r + a_2 \cdot u_b + a_0$$

$$a_1 = \Delta P_6 / \Delta u_r = (1 - 0,95) / (70 - 60) = 0,05 / 10 = 0,005 \text{ МПа} / \% \text{х.р.о.}$$

$$a_2 = \Delta P_6 / \Delta u_b = (0,93 - 0,95) / (70 - 60) = -0,02 / 10 = -0,002 \text{ МПа} / \% \text{х.р.о.}$$

$$a_0 = P_6 - a_1 \cdot u_r - a_2 \cdot u_b = 0,95 - 0,005 \cdot 60 + 0,002 \cdot 60 = 0,95 - 0,30 + 0,12 = 0,77 \text{ МПа}$$

$$P_6 = 0,005 \cdot u_r - 0,002 \cdot u_b + 0,77$$

3. Провести порівняльний аналіз результатів моделювання та експериментальних даних.

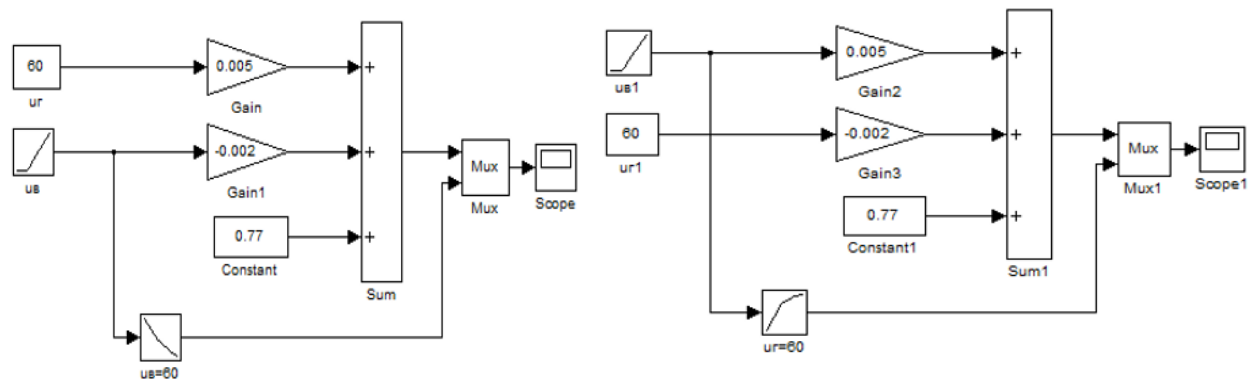


Рис. 2.10 – Структурна схема моделювання моделей статички

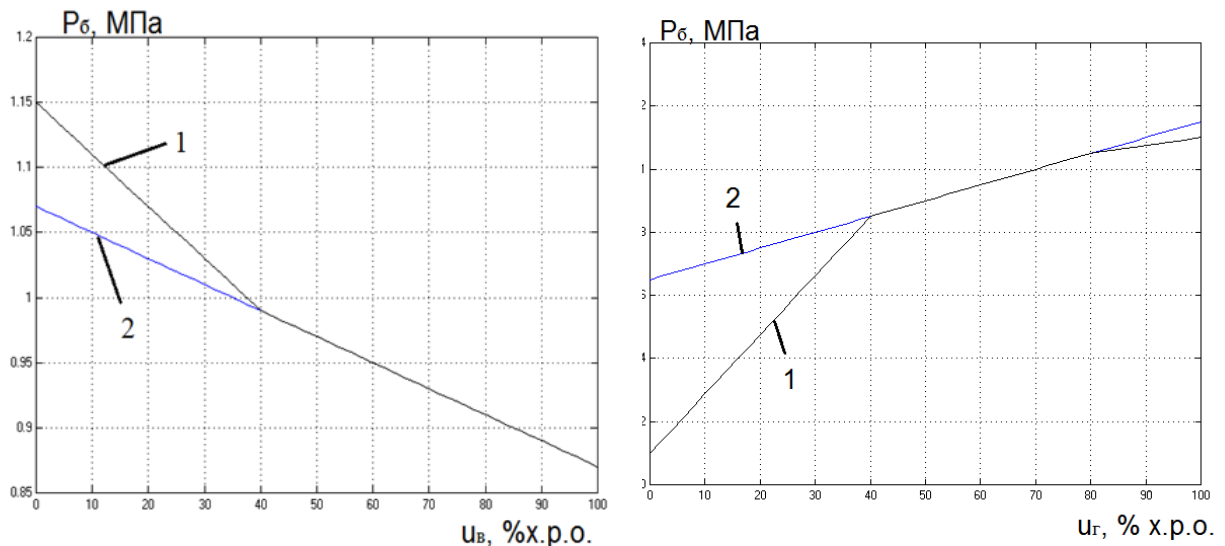


Рис. 2.11 – Результати моделювання моделей статички

2.3. Ідентифікація математичних моделей неконтрольованих збурень об'єкта регулювання

2.3.1 Аналіз фізичної суті, можливих діапазонів зміни та частотних властивостей вхідних дій і їх наслідків.

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

%х.р.о., а діапазон зміни неконтрольованих збурень може становити приблизно 10...15% від діапазону зміни управляючої дії, тобто становить приблизно 10...15

%х.р.о. (якщо неконтрольовані збурення прикладені до управляючої дії), або $(10...15) \cdot K_0$ (якщо неконтрольовані збурення прикладені до регульованої координати).

Контрольовані збурювання – це конкретні фізичні параметри, які мають власну розмірність. Діапазон їх зміни можна визначити, виходячи з технологічних і виробничих інструкцій.

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

$$f(t) = \bar{f}(t) + \tilde{f}^{\text{п}}(t) + \tilde{f}^{\text{с}}(t) + \tilde{f}^{\text{ш}}(t)$$

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

$\tilde{f}^{\text{п}}(t)$ - квазидетермінована складова;

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

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

Варто враховувати, що складові $\bar{f}(t)$, $\tilde{f}^{\text{п}}(t)$, $\tilde{f}^{\text{с}}(t)$ і їх сума є відносно низькочастотними діями, несприятливі наслідки яких САК повинна і може компенсувати. Складова $\tilde{f}^{\text{ш}}(t)$ 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 $\tilde{f}^{\text{ш}}(t)$ 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_n цих складових і τ_0 , можна провести поділ сигналу:

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

2.3.2 Аналіз можливостей ідентифікації моделей координатних і параметричних збурень різного рівню деталізації і вибір загальної структури моделей.

Моделі неконтрольованих збурень доцільно представляти як суму чотирьох складових. Причому, детерміновану складову (fНД) доцільно привести до керуючої дії, а квазидетерміновану та стохастичну складові (fНС) доцільно привести до регульованої координати.

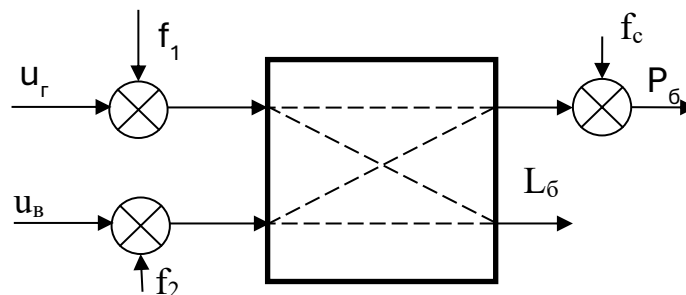


Рис. 2.12 – Структурна схема додавання координатних збурень

2.3.3 Планування пасивного експерименту для збору інформації про координатні збурення, подання реалізацій записаних у ході експерименту змінних.

Оскільки можливості отримати реальні експериментальні дані немає, то з навчальною метою можна скористатися генератором даних. Для генерації

результатів пасивного експеримента з метою дослідження контрольованих збурень треба бути готовими до відповіді на наступні питання.

1. Яким є мінімальне і задане значення регульованої координати? Для досліджуваного ОК P_6 ($u = 0\% \text{ x.p.o.}$) $= 0,1 \text{ МПа}$ $P_6^{\text{ЗДН}} = 0,95 \text{ МПа}$

2. Яким є значення і розмірність часу запізнення в каналі управління для досліджуваної регульованої координати? Для досліджуваного ОК $\tau_{\text{уп}} - p_6 = 32,8$ с.

Генерацію результатів пасивного експерименту буде забезпечувати програма rgen у середовищі Матлаб. Результати генерації випадкового процесу, що відповідає сигналу контрольованих збурень досліджуваного ОК наведені на рис. 2.13

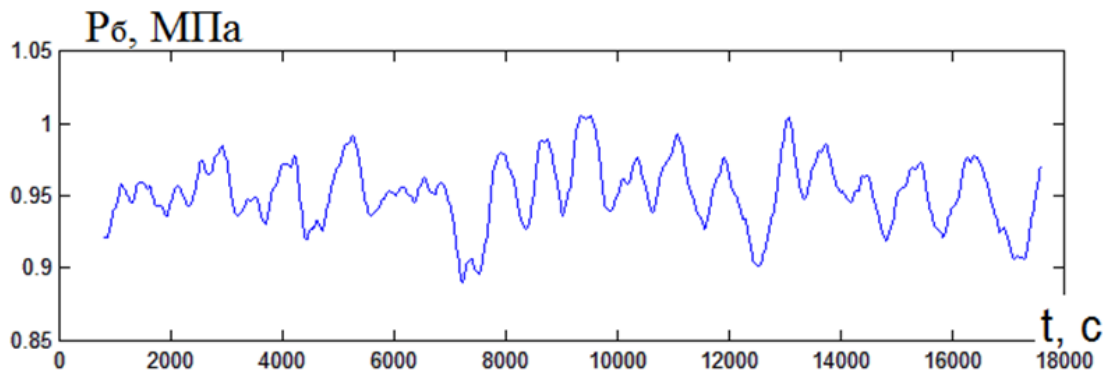


Рис. 2.13 – Результати генерації випадкового процесу, що відповідає сигналу контрольованого збурення для досліджуваного ОК

2.3.4 Оцінювання імовірнісних характеристик випадкових складових координатних збурень, аналіз оцінок щільностей імовірності, кореляційних функцій, спектральних щільностей і уточнення структури моделі (структурна ідентифікація), зокрема оцінка присутності істотної прихованої періодичної складової.

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

Першим етапом ідентифікації моделі контрольованих і 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 контрольованим збуренням, наведені на рис. 2.14.

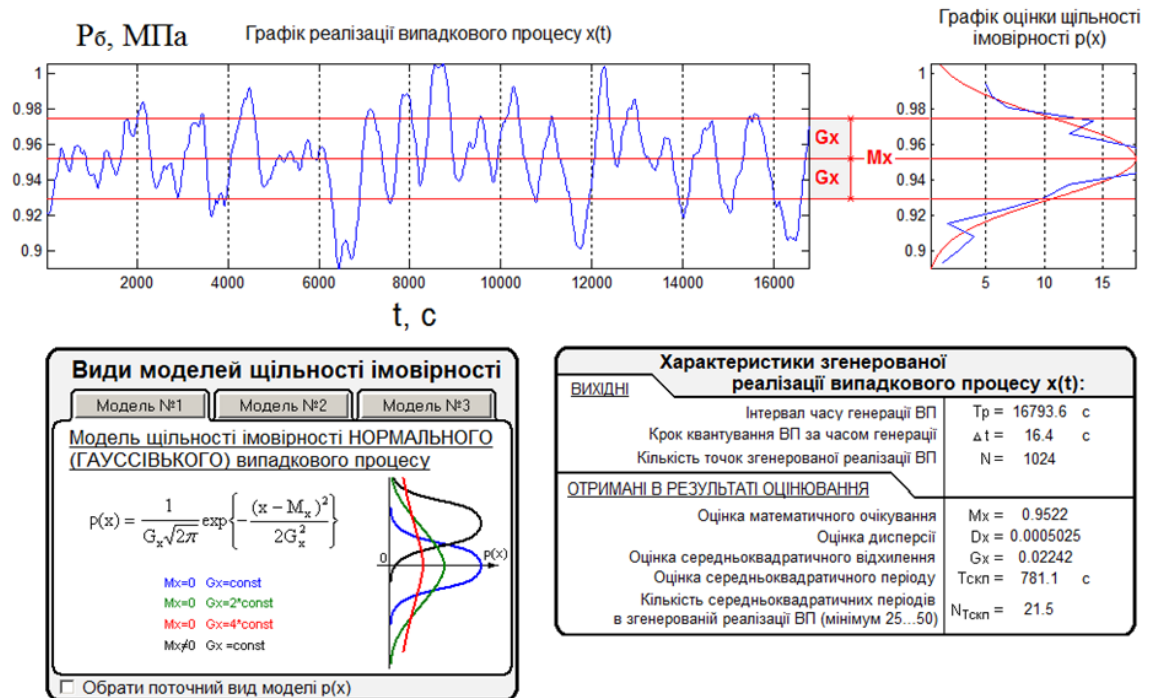


Рис. 2.14 – Результати оцінювання імовірнісних характеристик випадкового процесу, відповідного контролюваному збуренню.

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 №5

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

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

Модель №6

$$R_f(\tau_K) = D_f \cdot e^{-\alpha |\tau_K|} \cdot \left(\cos(\beta \cdot |\tau_K|) + \frac{\alpha}{\beta} \cdot \sin(\beta \cdot |\tau_K|) \right)$$

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

Параметрична ідентифікація моделей імовірнісних властивостей випадкової складової, оцінка результатів ідентифікації.

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 процедурами, що використовує квадратичний критерій. При цьому вирішується задача.

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

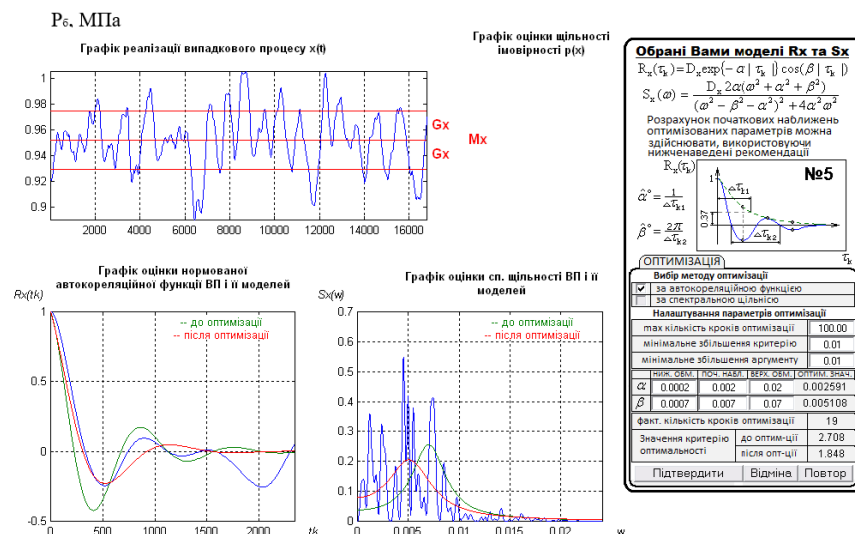


Рис. 2.15 – Результати параметричної ідентифікації моделі №5

контрольованих збурень

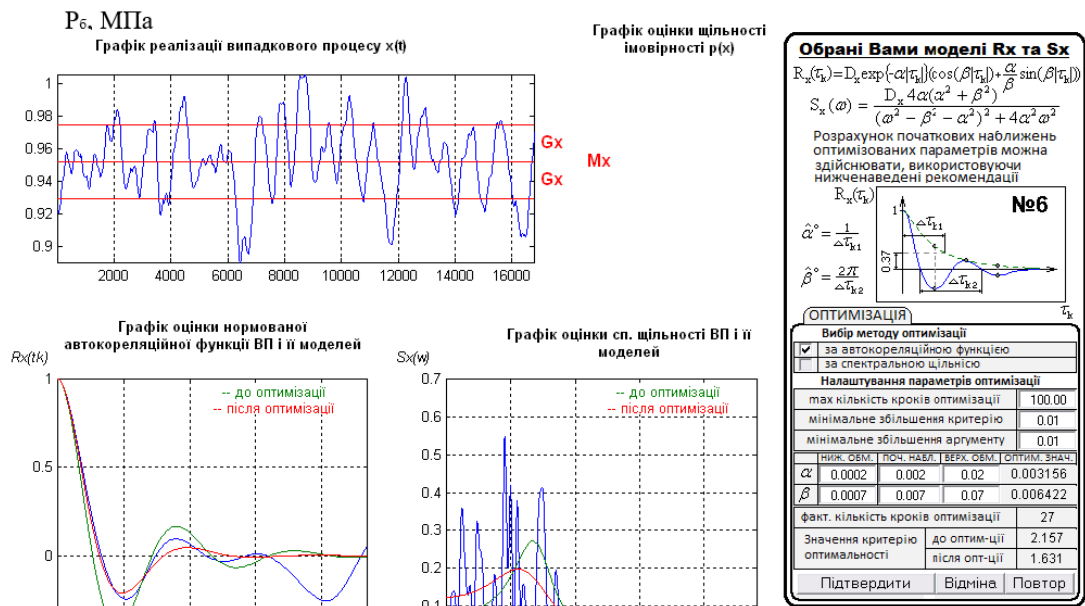


Рис. 2.16 – Результати параметричної ідентифікації моделі №6 контрольованих збурень

Таблиця результатів ідентифікації						
Номер моделі	α	β	A	C	γ	Значення критерію оптимізації
☒ 5	0.0025914	0.0051078	-	-	-	3.4143
☒ 6	0.0031562	0.0064217	-	-	-	2.6604

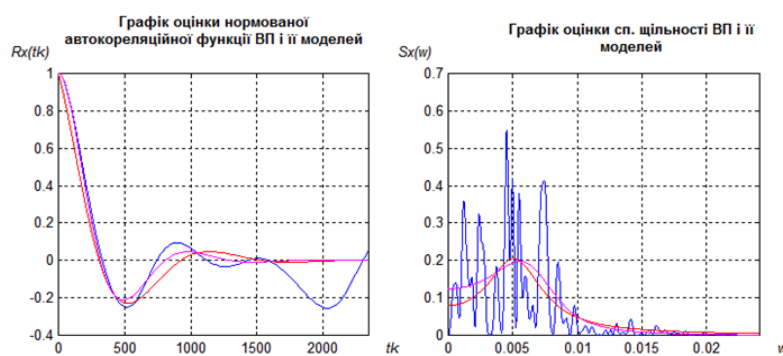


Рис. 2.17 – Підсумкові результати ідентифікації моделі контрольованих збурень

Як видно з результатів ідентифікації моделі контрольованих збурень (рис. 2.16), кращою є модель №6, тому що для цієї моделі меншим є середньоквадратичне відхилення моделі від оцінки кореляційної функції.

2.4. Реалізація математичних моделей на ПЕОМ у середовищі комп'ютерного імітаційного моделювання, проведення з ними комп'ютерних експериментів для обґрунтування їх адекватності об'єкту оригіналу.

2.4.1 Реалізація у середовищі імітаційного моделювання моделей каналів перетворення дій і підтвердження їх відповідності експериментальним даним.

2.4.1.1 Розробка схем моделювання динаміки каналів перетворення дій, отримання перехідних характеристик моделей і їх порівняння з експериментальними перехідними характеристиками.

У цьому підрозділі роботи в пакеті Simulink середовища Матлаб для каналу

« $U_B - P_6$ », « $U_r - P_6$ », « $U_B - L_6$ », « $U_r - L_6$ » ОК розробляється схема моделювання як для моделі 1-го, так і для моделі 2-го порядку.

Передаточна функція моделі 1-го та 2-го порядку за каналом $U_r - P_6$ має вигляд:

$$W_{U_r-P_6}^O(p) = \frac{0,005 \cdot e^{-32,8p}}{31,7p + 1}; \quad W_{U_r-P_6}^O(p) = \frac{0,005 \cdot e^{-20,7p}}{(20,9p + 1)^2}$$

Передаточна функція моделі 1-го та 2-го порядку за каналом $U_B - P_6$ має вигляд:

$$W_{U_B-P_6}^O(p) = \frac{-0,002 \cdot e^{-25,8p}}{38,2p + 1}; \quad W_{U_B-P_6}^O(p) = \frac{-0,002 \cdot e^{-13,7p}}{(24,2p + 1)^2}$$

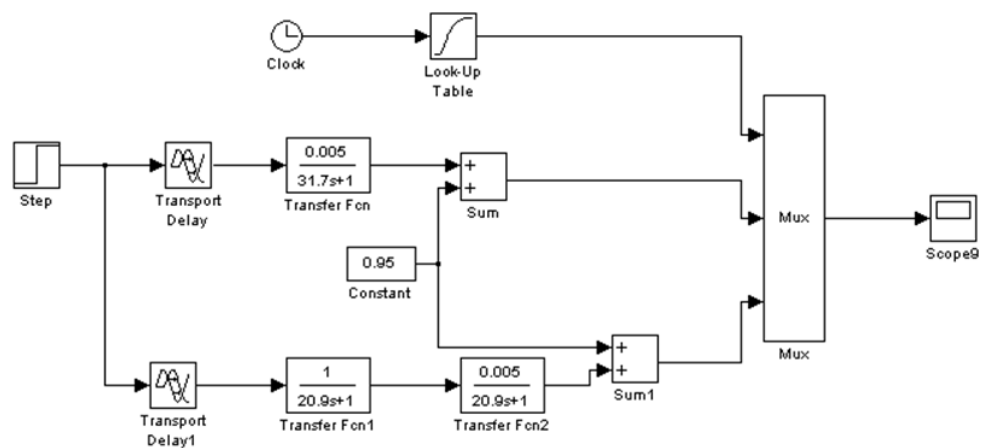
Передаточна функція моделі 1-го та 2-го порядку за каналом $U_B - L_6$ має вигляд:

$$W_{U_B-L_6}^O(p) = \frac{e^{-28p}}{62,5p}; \quad W_{U_B-L_6}^O(p) = \frac{e^{-12p}}{62,5p \cdot (17p + 1)}$$

Передаточна функція моделі 1-го та 2-го порядку за каналом $U_r - L_6$ має вигляд:

$$W_{U_r-L_6}^O(p) = -\frac{e^{-32p}}{-112p}; \quad W_{U_r-L_6}^O(p) = -\frac{e^{-17p}}{-112p \cdot (16,3p + 1)}$$

t, c	P_6	t, c	P_6	t, c	P_6
0	0,95	66	0,9818	132	0,9994
5	0,95	71	0,9851	136	0,9995
9	0,95	75	0,987	141	0,9996
14	0,95	80	0,989	146	0,9997
19	0,95	85	0,99	151	0,9998
24	0,95	89	0,993	155	0,9999
28	0,95	94	0,994	160	1
33	0,95	99	0,995		
38	0,96	104	0,996		
42	0,9638	108	0,998		
47	0,9677	113	0,998		
52	0,9716	118	0,999		
56	0,9753	122	0,9991		
61	0,9786	127	0,9993		

Таблиця 2.3 – Експериментальні дані за каналом $U_r - P_6$ Рис. 2.18 – Схема моделювання каналу керування ОК за каналом $U_r - P_6$

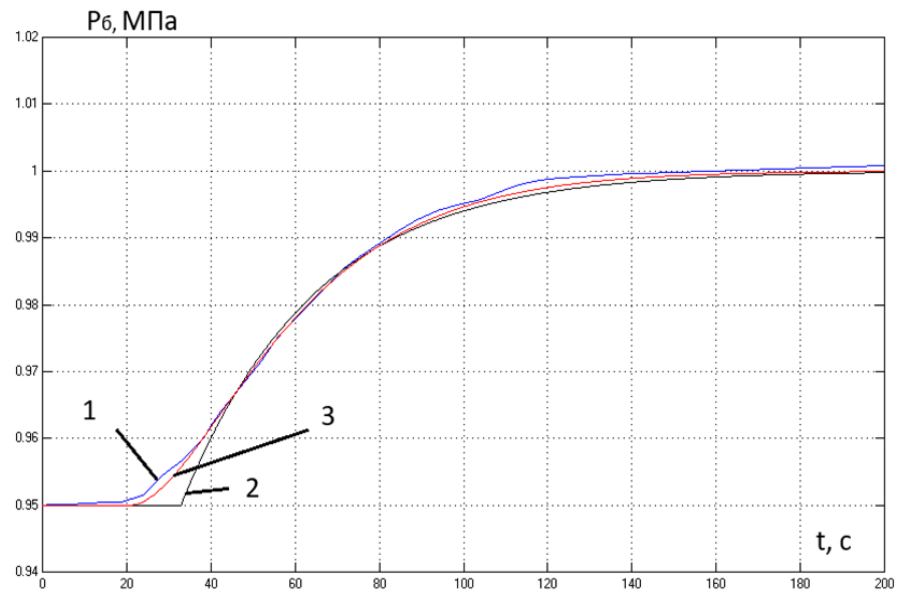


Рис. 2.19 – Результати моделювання: 1 – кусочно-лінійна апроксимація експериментальних даних; 2 – модель 1-го порядку; 3 – модель 2-го порядку

t, c	P_6	t, c	P_6	t, c	P_6
0	0,95	80	0,934	140	0,93
20	0,95	90	0,9325	155	0,93
25	0,9495	100	0,932	180	0,93
30	0,948	120	0,931		
35	0,945	130	0,93		
60	0,9385	135	0,93		
70	0,9365	136	0,93		
75	0,935	138	0,93		

Таблиця 2.4 – Експериментальні дані за каналом $U_B - P_6$

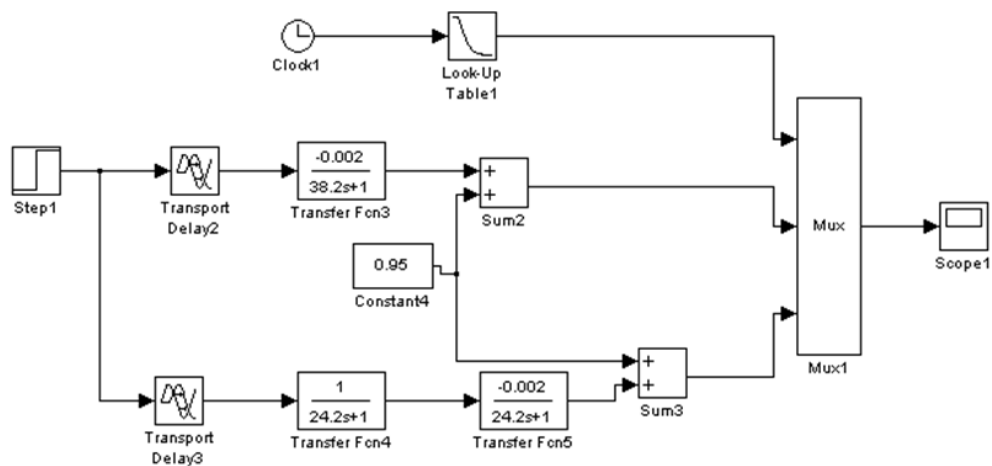


Рис. 2.20 – Схема моделювання каналу керування ОК за каналом $U_B - P_6$

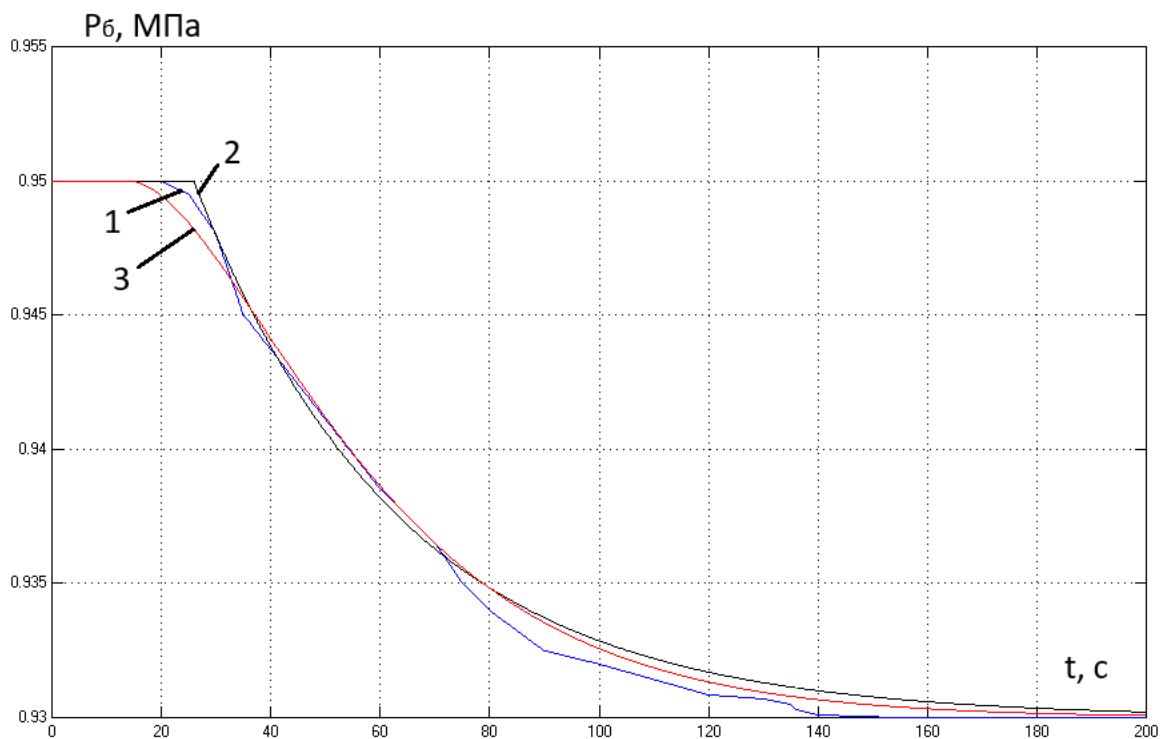


Рис. 2.21 – Результати моделювання: 1 – кусочно-лінійна апроксимація експериментальних даних; 2 – модель 1-го порядку; 3 – модель 2-го порядку

t, c	L_6	t, c	L_6	t, c	L_6
0	70	26	70,7	42	72,7
12	70	28	70,9	44	73
14	70,06	30	71,1	46	73,3
16	70,11	32	71,5	48	73,6
18	70,2	34	71,7	50	74,3
20	70,3	36	71,9	55	75,1
22	70,4	38	72,2	60	76
24	70,5	40	72,5	70	76,8

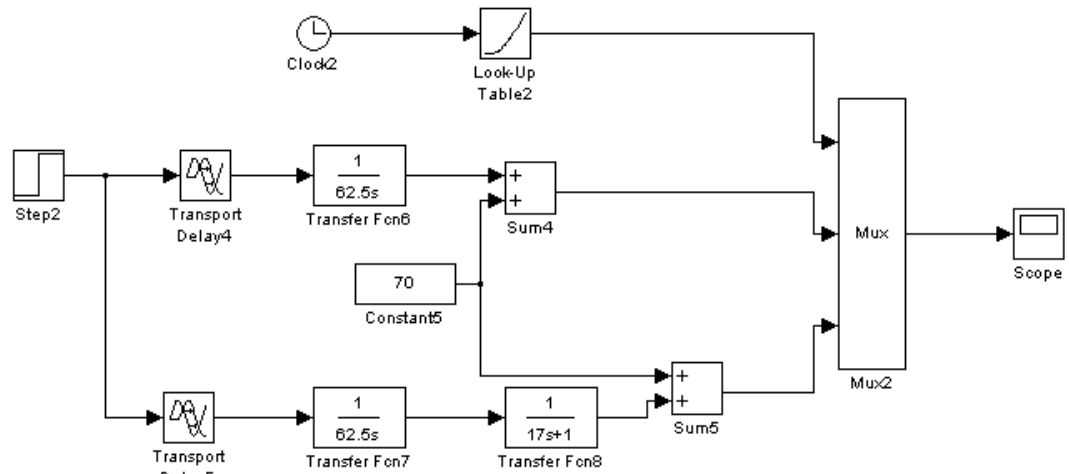
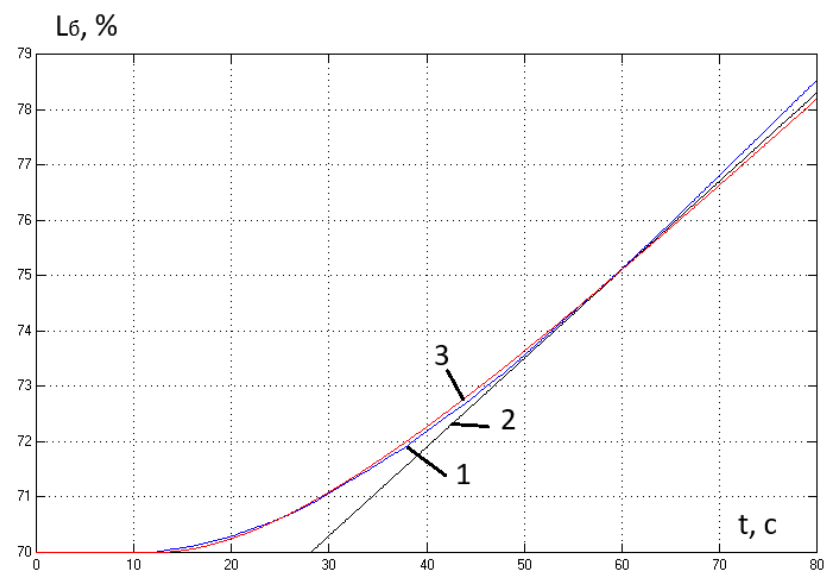
Таблиця 2.5 – Експериментальні дані за каналом $U_B - L_6$ Рис. 2.22 Схема моделювання за каналом « $U_B - L_6$ »

Рис. 2.23 – Результати моделювання: 1 – кусочно-лінійна апроксимація експериментальних даних; 2 – модель 1-го порядку; 3 – модель 2-го порядку

t, c	L_6	t, c	L_6	t, c	L_6
0	70	32	69,4	50	68,2
15,7	70	34	69,26	52	68
18	69,9	36	69,13	54	67,8
20	69,85	38	69	56	67,7
22	69,8	40	68,9	58	67,6
24	69,76	42	68,8	60	67,5
26	69,67	44	68,6	65	67
28	69,6	46	68,5	70	66,6
30	69,5	48	68,3		

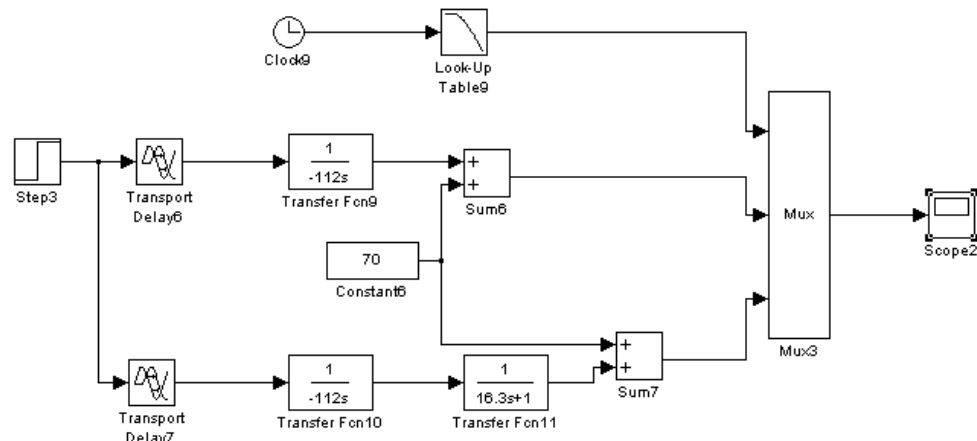
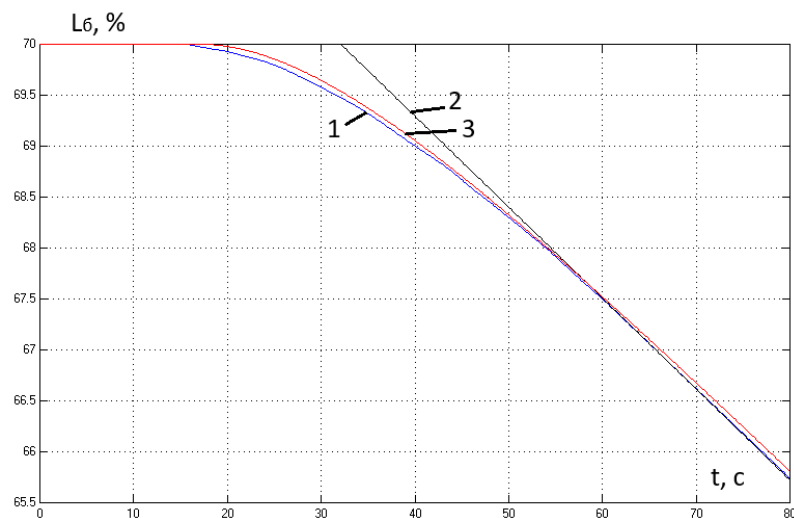
Таблиця 2.6 – Експериментальні дані за каналом $U_B - L_6$ Рис. 2.24 Схема моделювання за каналом « $U_\Gamma - L_6$ »

Рис. 2.25 – Результати моделювання: 1 – кусочно-лінійна апроксимація експериментальних даних; 2 – модель 1-го порядку; 3 – модель 2-го порядку

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

3.1.1 Декомпозиція загальної задачі керування технологічним агрегатом і формулювання окремих задач.

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 вихідних змінних об'єкту керування (L_6) та (P_6) на заданому значенні - 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 - завдання логічного керування.

3.1.2 Обґрунтування необхідності і доцільності автоматизації кожної з окремих завдань управління.

Необхідно і доцільно автоматизувати кожну із завдань управління.

Завдання регулювання необхідне для стабілізації тиску пари P_6 та рівня води в барабані L_6 без участі людини. Ручне керування неможливе через складний взаємозв'язок каналів: зміна подачі газу u_r для коригування тиску викликає ефект вскипання та коливання рівня води L_6 , що вимагає точної роботи ПІД-регуляторів.

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 керування виробництвом пари в промисловому котлоагрегаті цю задачу можна вирішити, підвищивши вимоги до розв'язання задачі регулювання. Головним джерелом підвищення

економічної ефективності цього процесу є зниження витрат палива на реалізацію технологічного процесу.

Процесу керування виробництвом пари є об'єктом неперервної дії. Для нього є характерним тривалий робочий режим, на який об'єкт виводять в дистанційному режимі. Режими пуску і зупинки є неекономічними режимами роботи установки. 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.

Формалізація вимог до гранично-припустимих статичних і динамічних відхилень регульованих змінних від відповідних заданих значень перехідних і динамічно сталих процесів і подання їх у формі регламентних зон регульованих змінних.

Регламентна зона за параметрами наведена на рис. 3.1, рис. 3.2.

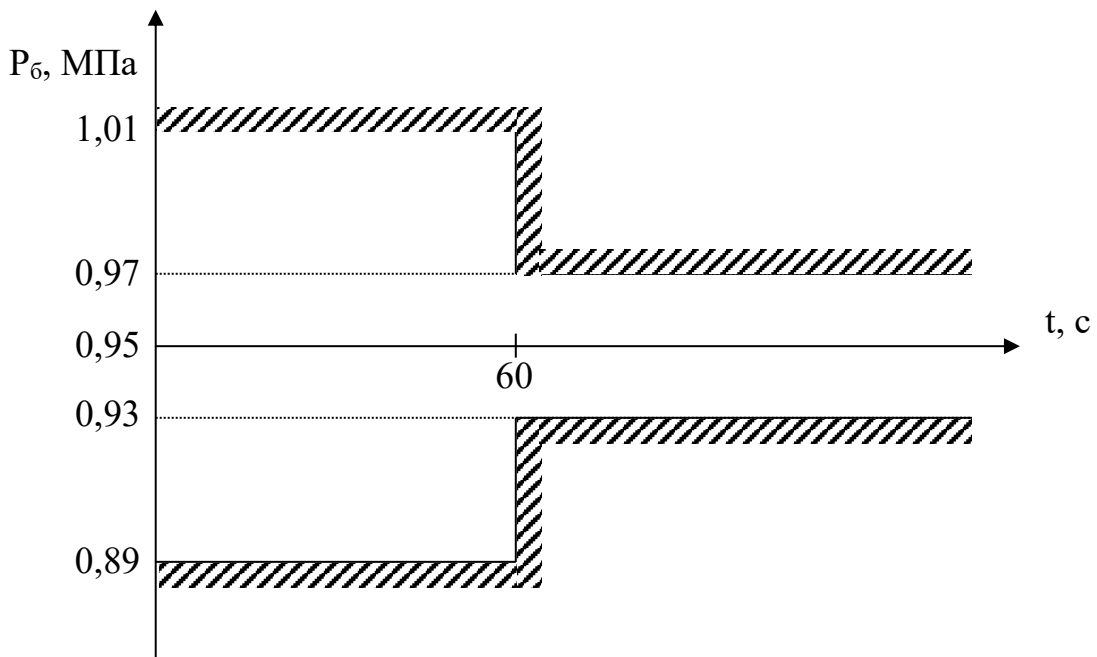


Рис. 3.1 – Регламентна зона для тиску в барабані котла

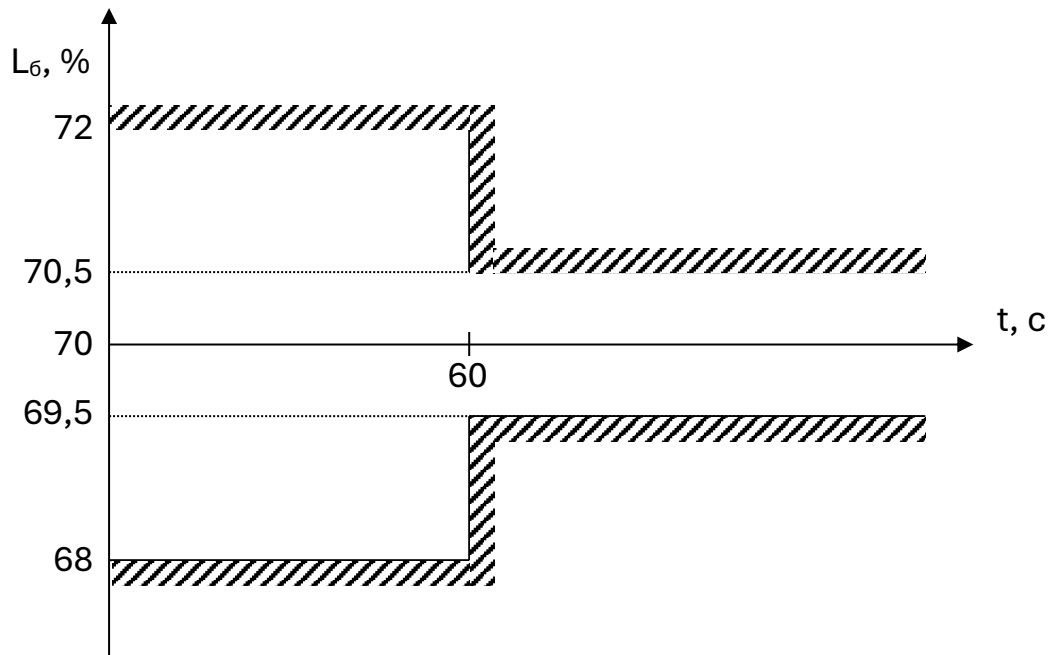


Рис. 3.2 – Регламентна зона для рівня води в барабані котла

3.1.3 Формалізація інтегральних вимог до перехідних та динамічно сталих процесів регулювання у формі інтегральних критеріїв оптимальності САР.

Ефективність роботи САР і підвищення її динамічної точності доцільно вести за таким критерієм:

$$J = \int_0^t \left(\left| \frac{\Delta L_б(t)}{0,5} \right| + |\Delta P_б(t)| \right) dt$$

де t_M — час моделювання; $\Delta L_б(t)$ - відхилення рівня води в барабані від заданого значення (70 % х.р.о.); $\Delta P_б(t)$ - відхилення тиску в барабані котла від заданого значення (0,95 МПа). Вибір, обґрунтування та подання у вигляді узагальненої структурної схеми принципу побудови системи автоматичного регулювання.

Оснoву керування становить інформація про мету керування або про бажаний стан ОУ y^* , про поточний стан ОУ y та про збуреннях f . Залежно від обсягу

використовуваної керуючим пристроєм (КП) інформації про ОУ виділяють чотири принципи побудови САР: принцип розімкнутого твердого (програмного) керування; принцип розімкнутого керування по збурюванню; принцип замкнутого керування по стані ОУ або керування зі зворотним зв'язком; комбінований принцип керування.

Для процесу керування виробництвом пари доступною, крім інформації про бажаний стан ОК ($P_б^{ЗДН}$), ($L_б^{ЗДН}$) є інформація про поточний стан ОК.

Такий обсяг інформації для формування керуючого впливу достатній для реалізації замкненого принципу керування. Тому саме цей принцип і буде покладено в основу розроблюваної САР базової структури. Структурна схема цього принципу управління приведена на рис. 3.3

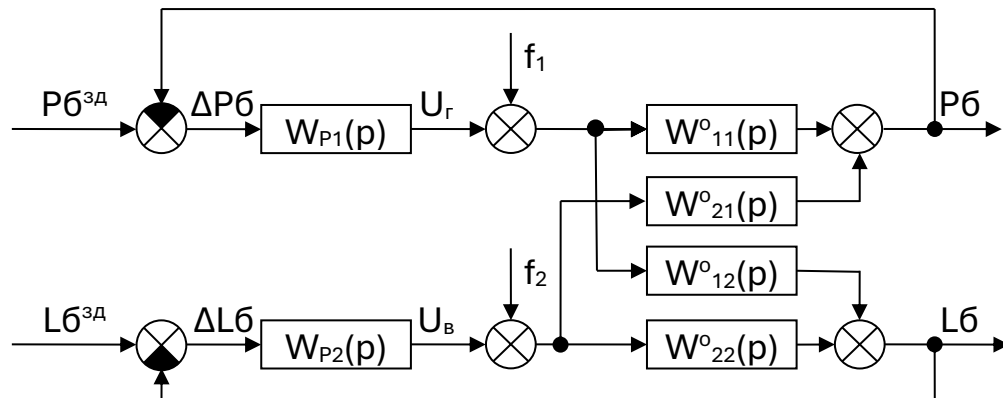


Рис. 3.3 – Структурна схема САР базової структури.

3.2. Параметричний синтез і аналіз САР базової структури.

3.2.1 Розробка на основі обраного загального принципу побудови САР, її базової конкретної структури.

Структурна схема САР керування виробництвом пари котлоагрегату має наступний вигляд:

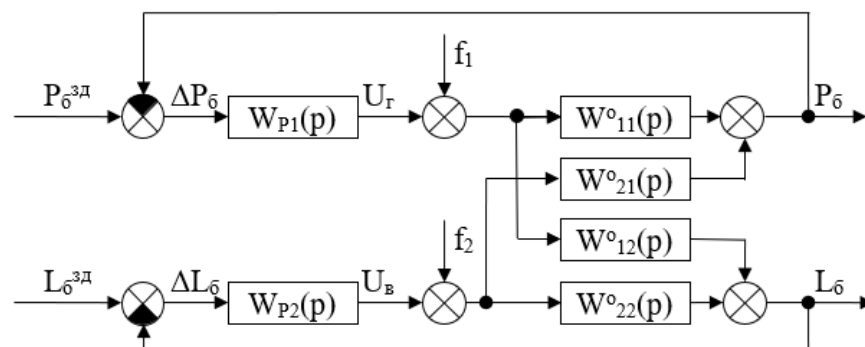


Рис. 3.4 – Структурна схема САР керування виробництвом пари

На рисунку:

u_B - положення регулюючого органу подачі води;

u_G - положення регулюючого органу подачі газу;

L_6 - рівень води в барабані котла;

P_6 - тиск в барабані котла;

f_1 - вектор неконтрольованих збурень;

f_2 - вектор неконтрольованих збурень;

$W_{P1}(p)$ - передаточна функція регулятора тиску в барабані котла;

$W_{P2}(p)$ - передаточна функція регулятора рівня води в барабані котла;
 $L_{\delta}^{3д}$ - задане значення регульованої координати рівня води в барабані котла;

$P_{\delta}^{3д}$ - задане значення регульованої координати тиску в барабані котла;
 $\Delta P_{\delta}, \Delta L_{\delta}$ – помилка регулювання.

Вибір альтернативних варіантів типових алгоритмів регулювання, запис їх рівнянь і передаточних функцій.

Процес виробництва пари має статичні та астатичні 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

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

Передаточна функція ПІД-регулятора

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

$$J = \int_0^{t_M} \left[(\Delta P_{\delta}(t))^2 + \frac{(\Delta L_{\delta}(t))^2}{2} \right] dt$$

Розробка структурної схеми цифрового імітаційного моделювання САР при детермінованих та стохастичних вхідних діях.

У результаті виконання 4 розділу курсової роботи була проведена ідентифікація моделей каналів перетворення координатних дій технологічного процесу виробництва пари. Результати ідентифікації зведені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 –Результати ідентифікації каналів перетворення
координатних дій ОК

Канал ОК	Модель 1-го порядку	Модель 2-го порядку
« u_r - P_6 »	$W_{o11}(p) = \frac{0,005 \cdot e^{-32,8p}}{31,7p + 1}$	$W_{o11}(p) = \frac{0,005 \cdot e^{-20,7p}}{(20,9p + 1)^2}$
« u_B - P_6 »	$W_{o21}(p) = \frac{-0,002 \cdot e^{-25,8p}}{38,2p + 1}$	$W_{o21}(p) = \frac{-0,002 \cdot e^{-13,7p}}{(24,2p + 1)^2}$
« u_B - L_6 »	$W_{o22}(p) = \frac{e^{-28p}}{62,5p}$	$W_{o22}(p) = \frac{e^{-12p}}{62,5p \cdot (17p + 1)}$
« u_r - L_6 »	$W_{o12}(p) = \frac{e^{-32p}}{-112p}$	$W_{o12}(p) = \frac{e^{-17p}}{-112p \cdot (16,3p + 1)}$

Структурна схема моделювання САР з ПІ-регулятором наведена на рис. 3.5, а с ПІД-регулятором - на рис. 3.6. Структурна схема моделювання ОК наведена на рис. 3.7.

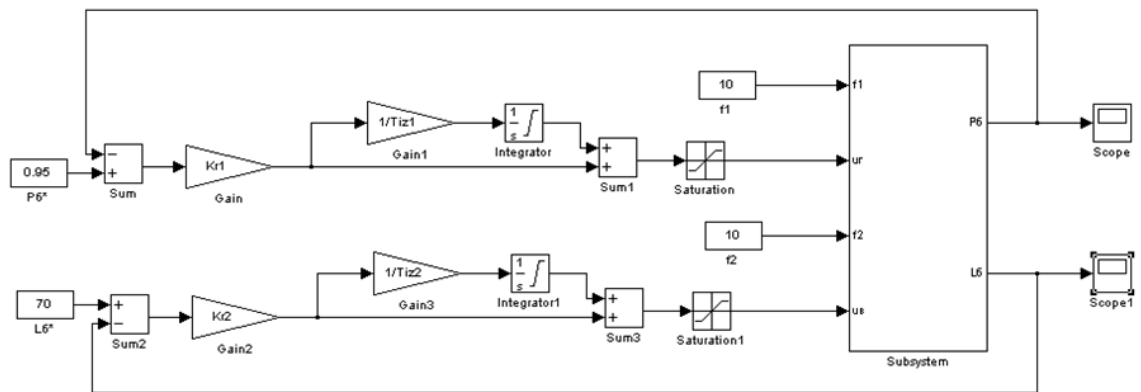


Рис. 3.5 – Структурна схема моделювання САР з ПІ-регулятором

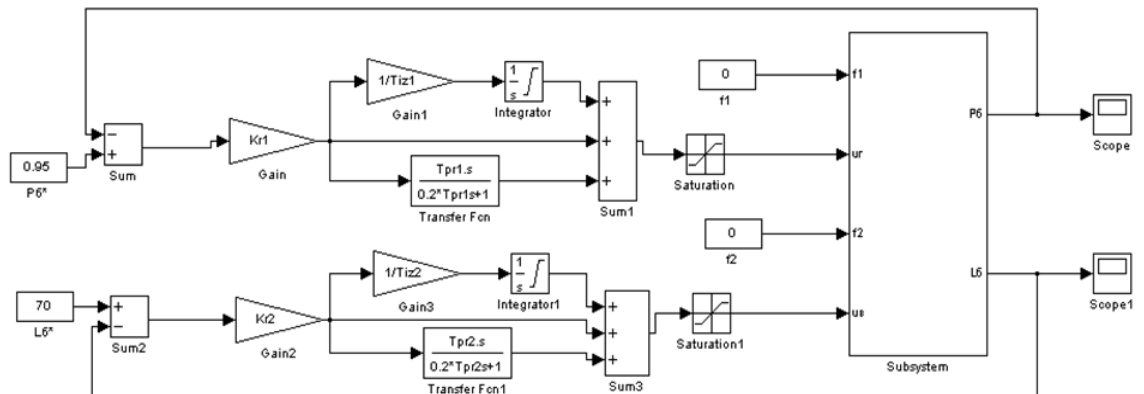


Рис. 3.6 – Структурна схема моделювання САР з ПІД-регулятором

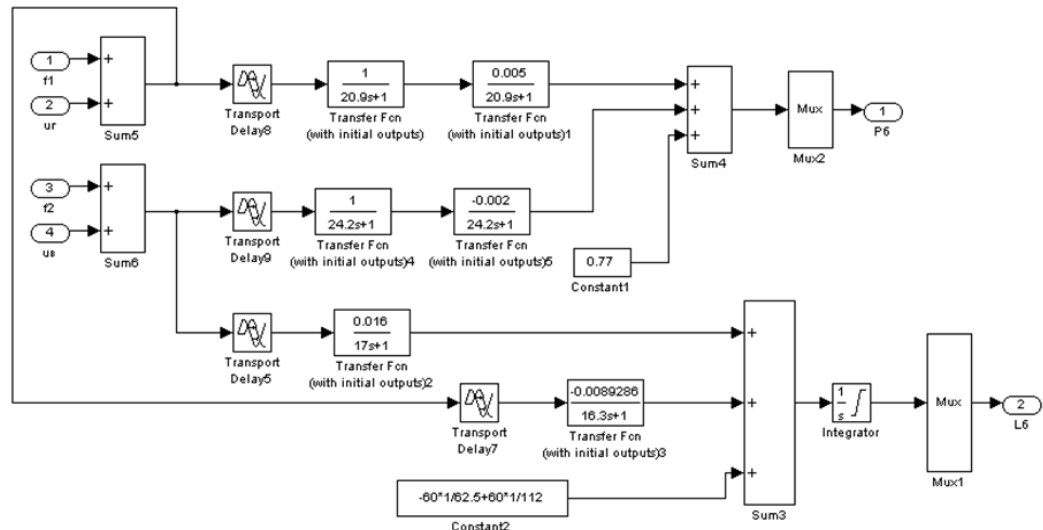


Рис. 3.7 – Структурна схема моделювання ОК

Вибір початкових наближень настроювальних параметрів алгоритмів регулювання на основі інженерних методик параметричного (неоптимального) синтезу САР.

Розрахунок налаштувань ПІ-регуляторів

Регулятор $W_{P1}(p)$ (1-1)

$$K_{P1} = \frac{0,8 \cdot T_O}{K_O \cdot \tau_O} = \frac{0,8 \cdot 31,7}{0,005 \cdot 32,8} = 154,6\% \text{х.р.о. /МПа}$$

$$T_{I1} = 2,5 \cdot \tau_O = 2,5 \cdot 32,8 = 82 \text{ с}$$

Регулятор $W_{P2}(p)$ (2-2)

$$K_{P2} = \frac{0,7 \cdot T_O}{\tau_O} = \frac{0,7 \cdot 62,5}{28} = 1,56\% \text{х.р.о. /\%}$$

$$T_{I2} = 4,0 \cdot \tau_O = 4,0 \cdot 28 = 112 \text{ с}$$

Розрахунок налаштувань ПІД-регуляторів

Регулятор $W_{P1}(p)$

$$K_{P1} = \frac{1,0 \cdot T_O}{K_O \cdot \tau_O} = \frac{1,2 \cdot 31,7}{0,005 \cdot 32,8} = 232\% \text{х.р.о. /МПа}$$

$$T_{I1} = 2,0 \cdot \tau_O = 2 \cdot 32,8 = 65,6 \text{ с}$$

$$T_{уП1} = 1,0 \cdot \tau_O = 1,0 \cdot 32,8 = 32,8 \text{ с}$$

Регулятор $W_{P2}(p)$

$$K_{P2} = \frac{1,1 \cdot T_O}{\tau_O} = \frac{1,1 \cdot 62,5}{28} = 2,5\% \text{х.р.о. /\%}$$

$$T_{I2} = 2,0 \cdot \tau_O = 2 \cdot 28 = 56 \text{ с}$$

$$T_{уП2} = 1,0 \cdot \tau_O = 1,0 \cdot 28 = 28 \text{ с}$$

3.2.2 Параметричний оптимальний синтез САР з альтернативними алгоритмами регулювання для детермінованих (ступінчастих) вхідних діях.

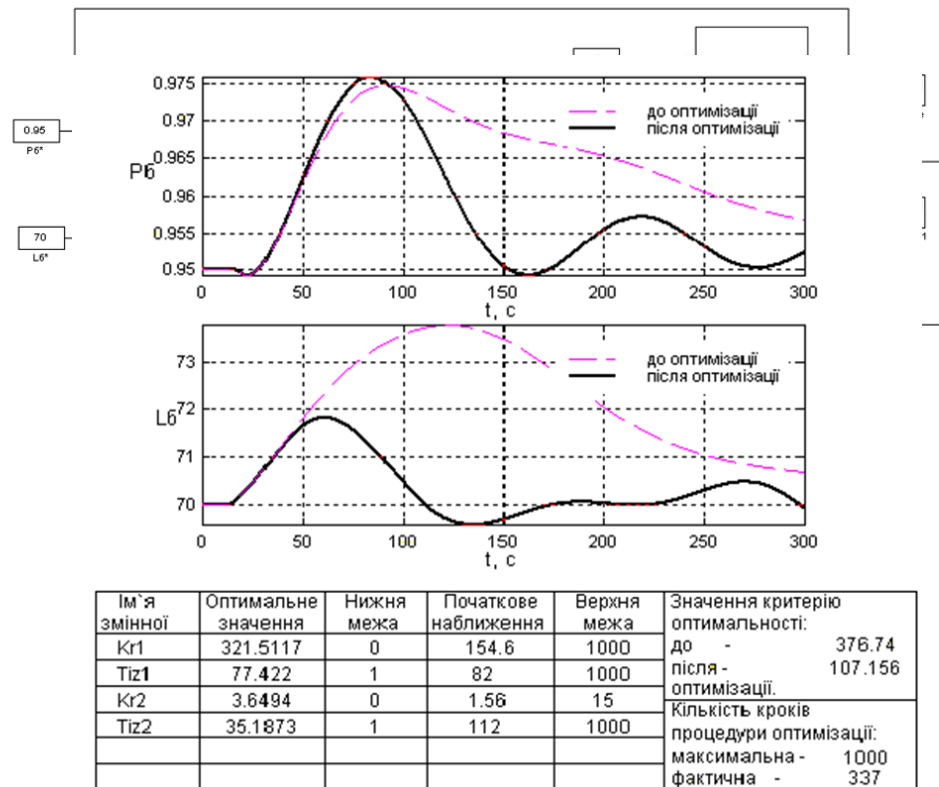


Рис. 3.8 - Структурна схема моделювання САР для оптимізації налаштувань ПІ-регулятора

Рис. 3.9 – Результати оптимізації налаштувань ПІ-регулятора

Порівнюємо перехідні процеси в САР з ПІ-регулятором до і після оптимізації за інтегральними і прямими показниками якості. Результати порівняння зведено в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Результатів порівняння САР з ПІ-регулятором до і після оптимізації

САР з ПІ-регулятором	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta P_6^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп1}}, \text{c}$	$\Delta L_6^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп2}}, \text{c}$	
до оптимізації	0,025	134,7	3,78	344,53	376,74
після оптимізації	0,026	106,27	1,82	99,05	107,16

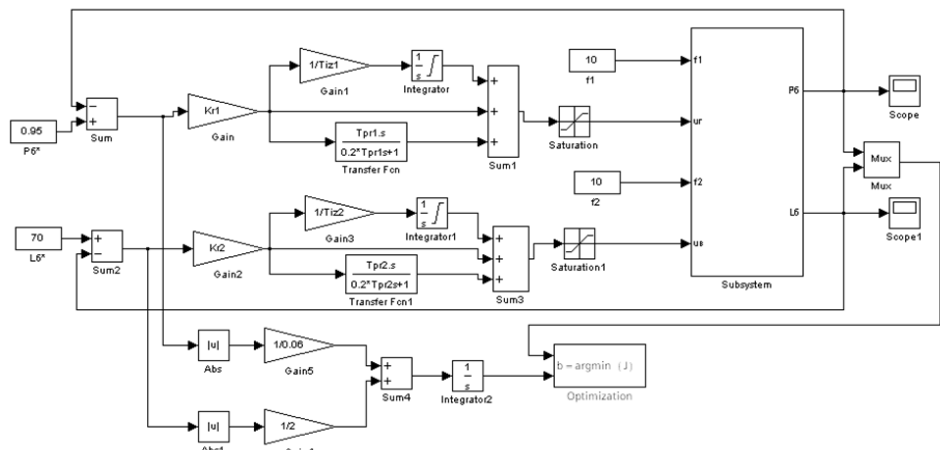


Рис. 3.10 - Структурна схема моделювання САР для оптимізації налаштувань ПІД-регулятора

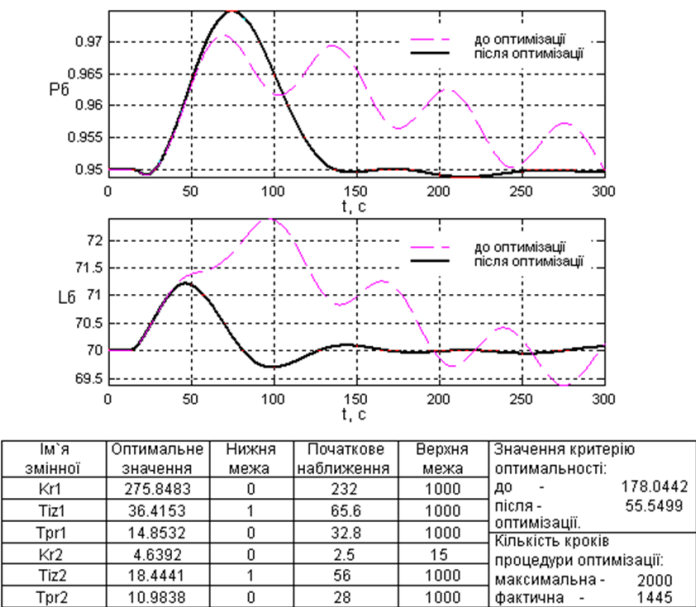


Рис. 3.11 – Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора

Порівнюємо перехідні процеси в САР з ПІД-регулятором до і після оптимізації за інтегральним і прямими показниками якості. Результати порівняння зведено в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Результатів порівняння САР з ПІД-регулятором до і після оптимізації

САР з ПІД-регулятором	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta P_6^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп1}}, \text{с}$	$\Delta L_6^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп2}}, \text{с}$	
до оптимізації	0,021	76	2,39	186,84	178
після оптимізації	0,025	91,08	1,21	69,24	55,55

Порівняльний аналіз перехідних процесів в параметрично оптимальних системах за значенням критерію оптимальності та показниками, для яких встановлені гранично-допустимі значення.

Для проведення порівняльного аналізу САР з ПІ- та ПІД-регулятором будемо використовувати структурну схему моделювання.

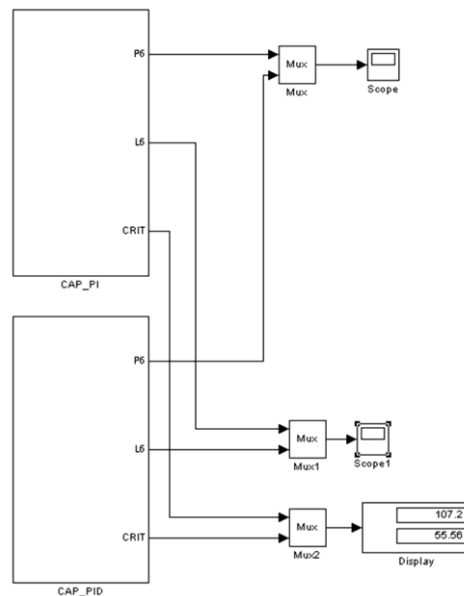


Рис. 3.12 - Структурна схема моделювання для порівняльного аналізу варіантів САР

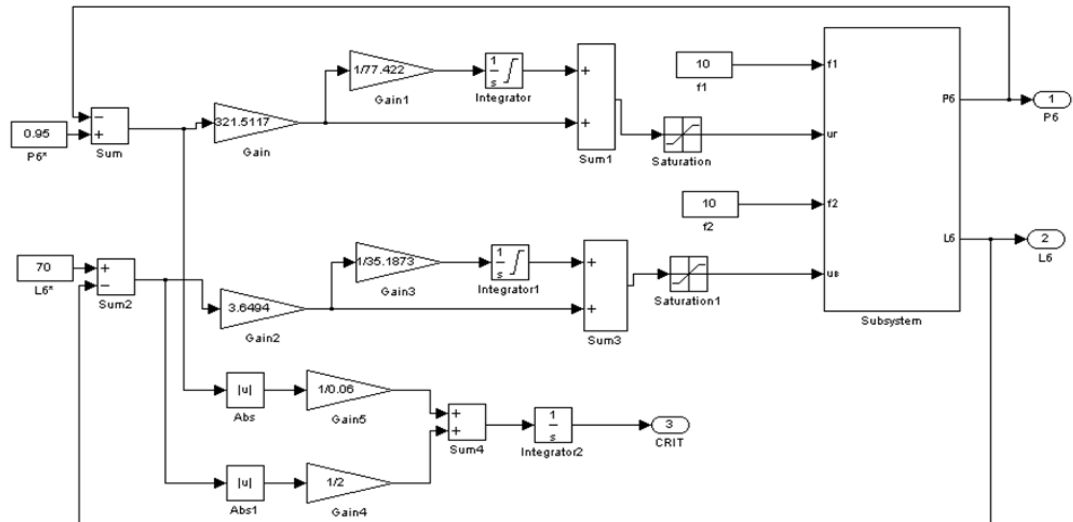


Рис. 3.13 – Структурна схема моделювання САР з ПІ-регулятором

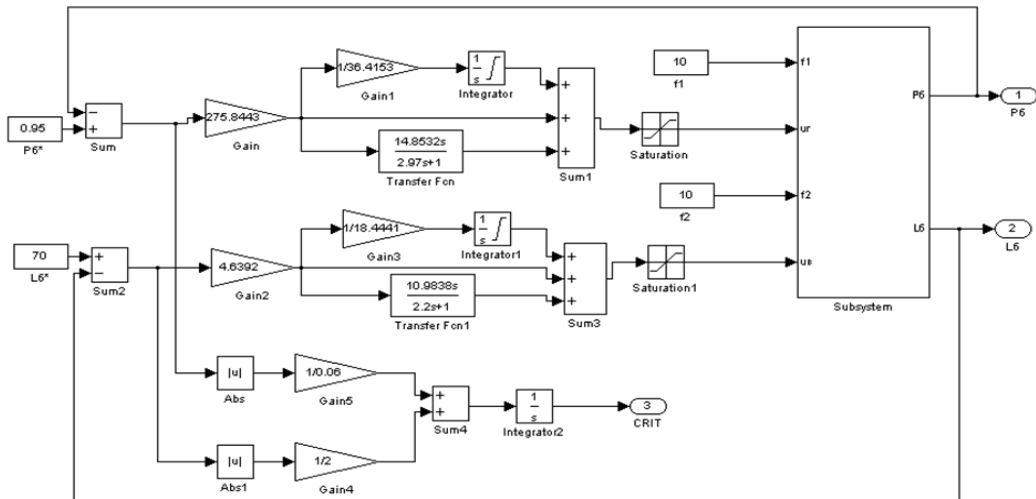


Рис. 3.14 – Структурна схема моделювання САР з ПІД-регулятором

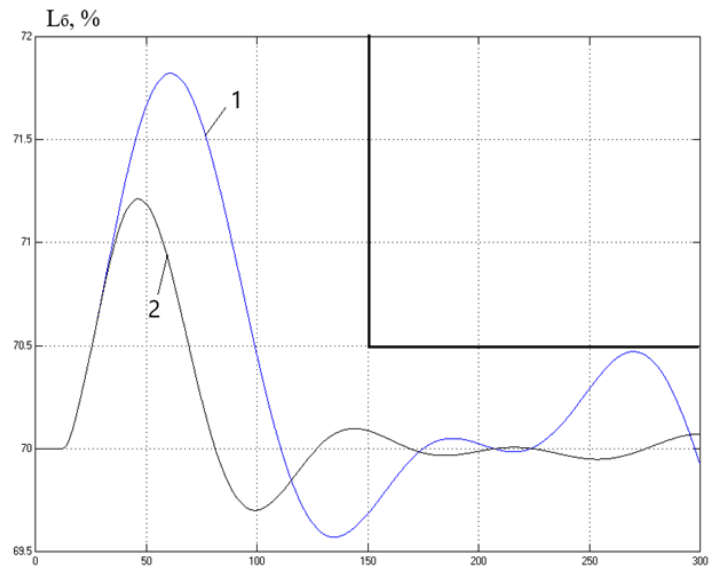


Рис. 3.15 – Результати порівняння варіантів САР: 1 – САР з ПІ-регулятором; 2 – САР з ПІД-регулятором.

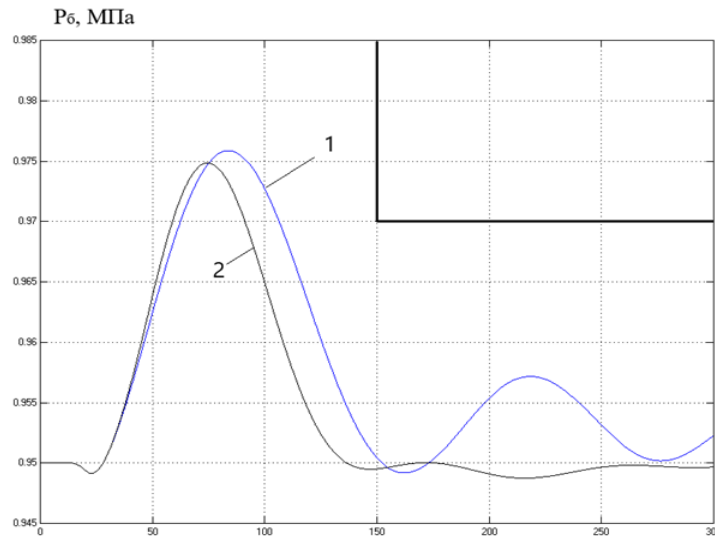


Рис. 3.16 – Результати порівняння варіантів САР: 1 – САР з ПІ-регулятором; 2 – САР з ПІД-регулятором.

Таблиця 3.4 – Результати порівняння варіантів САР

САР	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta P_6^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп1}}, \text{с}$	$\Delta L_6^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп2}}, \text{с}$	
ПІ	0,026	106,27	1,82	99,05	107,16
ПІД	0,025	91,08	1,21	69,24	55,55

Як видно з результатів порівняння перехідних процесів, САР з ПІД-регулятором є кращою за усіма показниками. Тому ПІД-закон регулювання будемо використовувати й надалі.

3.2.3 Аналіз грубості САР до варіацій параметрів ОК

Вибір параметрів ОК, по який доцільно оцінити грубість САР, значень їх варіацій і планування машинного експерименту з оцінки грубості.

Дослідження САР на грубість будемо проводити в умовах варіації часів запізнення в каналах ОК на 20%.

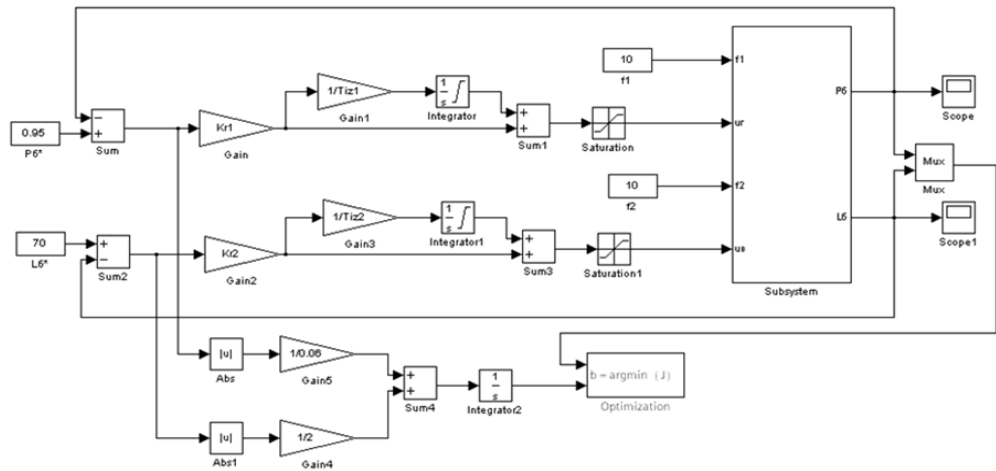


Рис. 3.17 - Структурна схема моделювання для аналізу САР з ПІ-регулятором на грубість

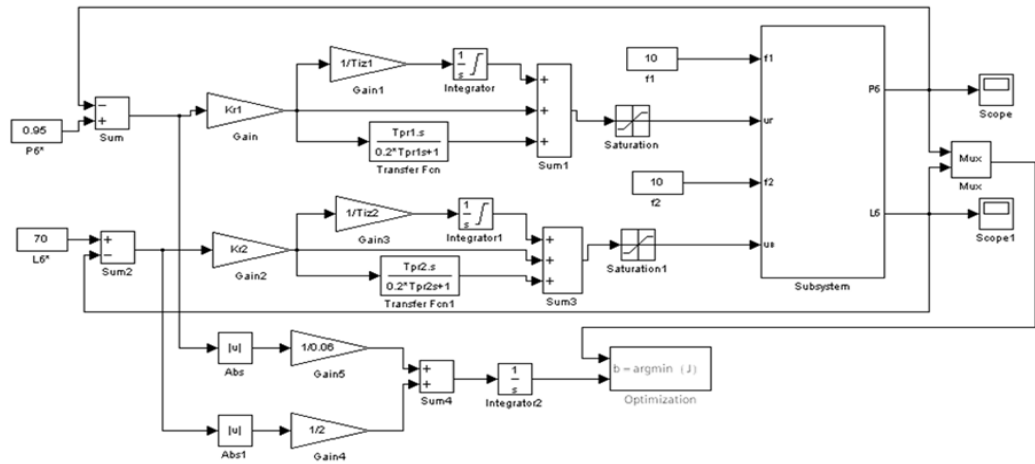


Рис. 3.18 - Структурна схема моделювання для аналізу САР з ПІД-регулятором на грубість

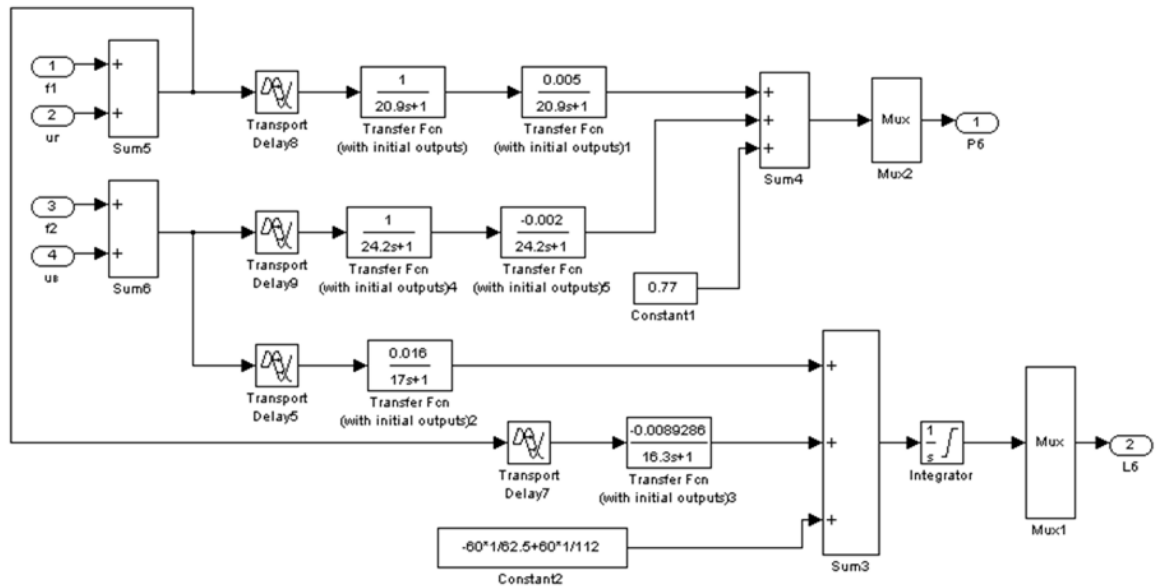


Рис. 3.19 - Структурна схема моделювання ОК для аналізу САР на грубість

Порівняльний аналіз перехідних процесів за критерієм оптимальності та показниками, для яких встановлено гранично-припустимі значення.

Результати оцінки САР з ПІ-регулятором на грубість наведені на рис. 6.18, а САР з ПІД-регулятором – на рис. 6.19. Як видно з результатів, САР і з ПІ- регулятором, і з ПІД-регулятором є грубою, оскільки в умовах варіації параметрів ОК дає перехідні процеси, що сходяться. Але також в умовах дії збурень детермінованого характеру перехідні процеси в САР виходять за рамки регламентних зон.

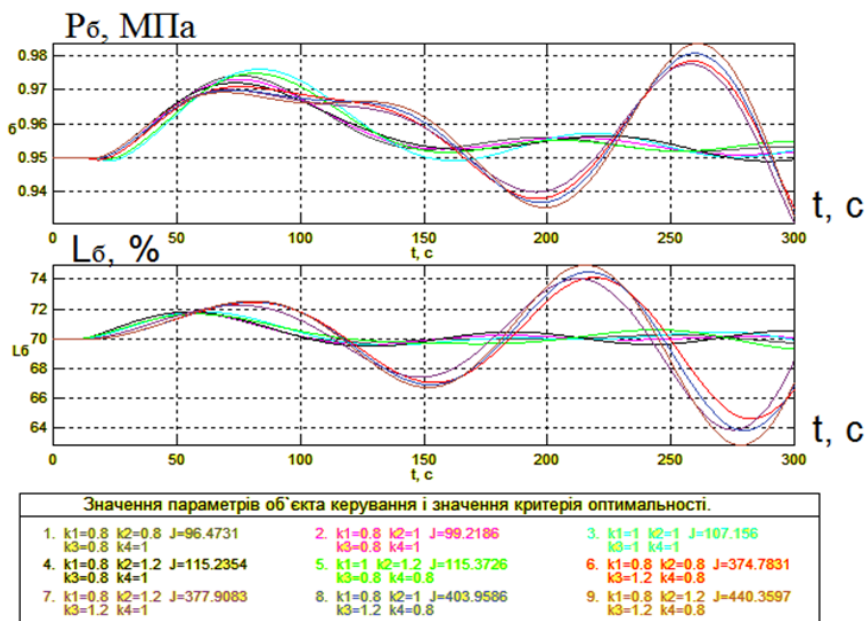


Рис. 3.20 - Аналіз на грубість САР з ПІ-регулятором в умовах дії детермінованих контрольованих та неконтрольованих збурень

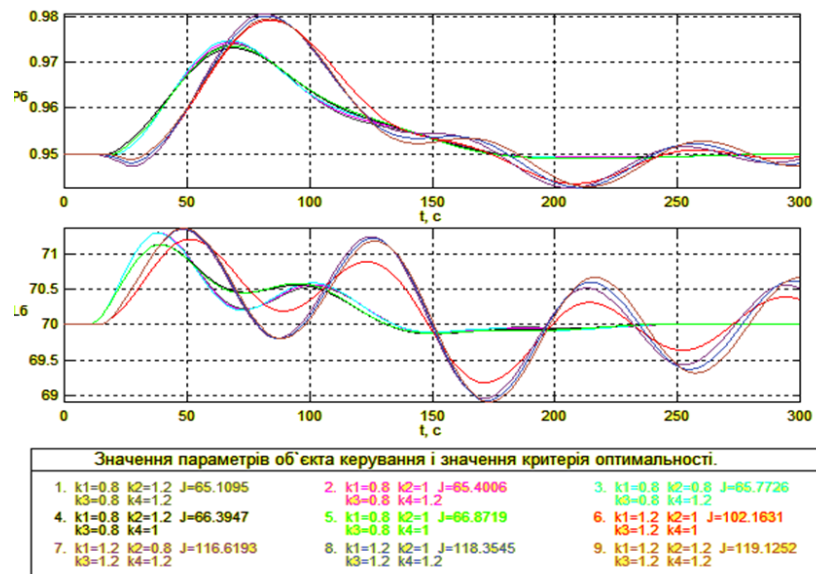


Рис. 3.21 - Аналіз на грубість САР з ПІД-регулятором в умовах дії детермінованих контрольованих та неконтрольованих збурень

Вибір з розглянутих сполучень параметрів ОР найбільш «несприятливих» і «сприятливих» для керування:

Схема моделювання САР базової структури з ПІ-регулятором для порівняння варіантів з номінальними параметрами, а також з параметрами ОК "найсприятливішими" та "найнесприятливішими" для керування наведено на рис.

Результати порівняння варіантів САР наведено на рис. 3.23, 3.24 і зведено в таблицю 3.5.

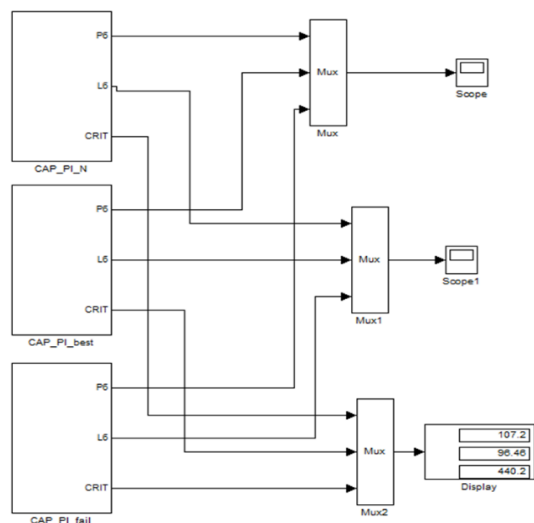


Рис. 3.22 – Схема моделювання САР базової структури з ПІ-регулятором для порівняння варіантів з номінальними, "найсприятливішими" та "найнесприятливішими" для керування параметрами ОК

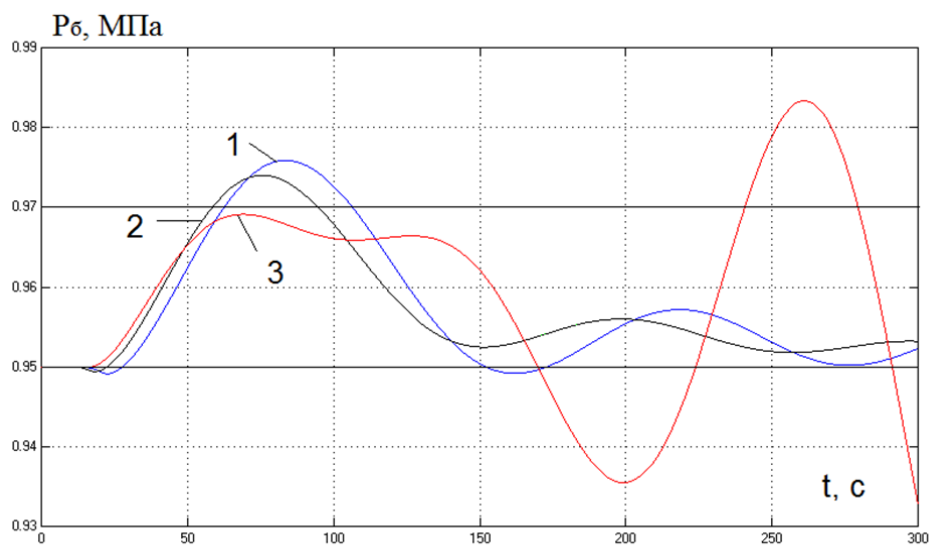


Рис. 3.23 – Результати порівняння варіантів САР базової структури з ПІ-регулятором: 1 – при номінальних параметрах ОК; 2 – при «найсприятливіших» для керування параметрах ОК; 3 – при «найнесприятливіших» для керування параметрах ОК.

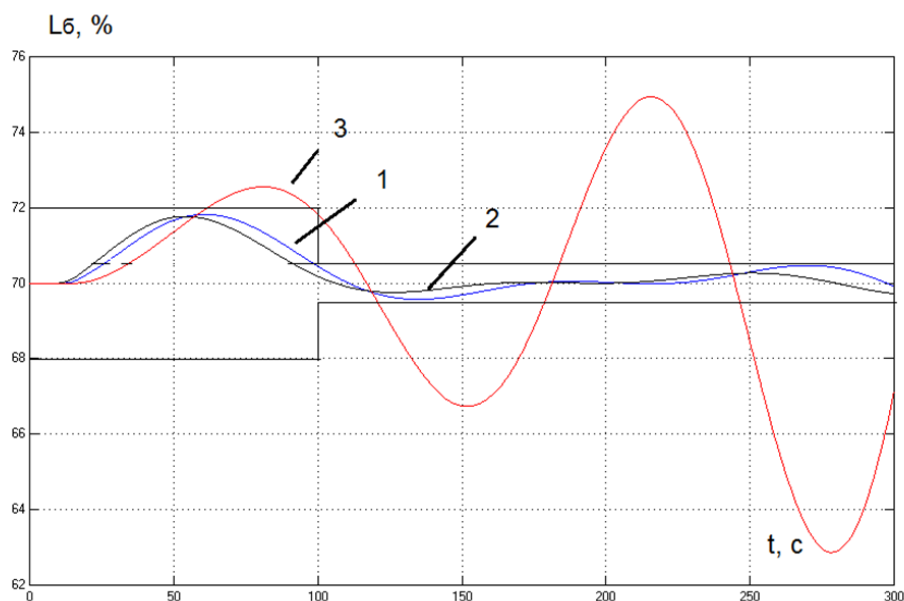


Рис. 3.24 – Результати порівняння варіантів САР базової структури з ПІ-регулятором: 1 – при номінальних параметрах ОК; 2 – при «найсприятливіших» для керування параметрах ОК; 3 – при «найнесприятливіших» для керування параметрах ОК.

Таблиця 3.5 – Результати порівняння варіантів САР базової структури з
ПІ-регулятором

Варіант САР (параметри ОК)	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta P_6^{\text{МАКС}}$	$T_{\text{пп}1}, \text{с}$	$\Delta L_6^{\text{МАКС}}$	$T_{\text{пп}2}, \text{с}$	
номінальні	0,026	106,4	1,82	99,06	107,2
«насприятливіші»	0,024	94,7	1,69	91,9	99,46
«найнесприятливіші»	нескінченне	нескінченне	нескінченне	нескінченне	440,2

Схема моделювання САР базової структури з ПІД-регулятором для порівняння варіантів з номінальними параметрами, а також з параметрами ОК "найсприятливішими" та "найнесприятливішими" для керування наведено на рис.

Результати порівняння варіантів САР наведено на рис. 3.26, 3.27 і зведено в таблицю 3.6.

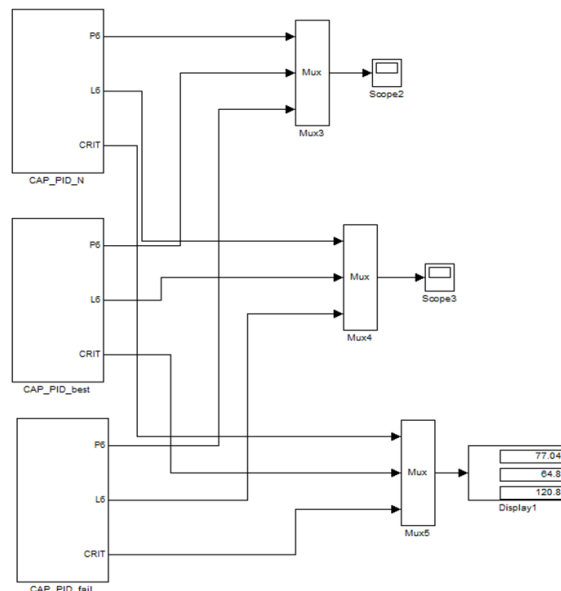


Рис. 3.25 – Схема моделювання САР базової структури з ПІД-регулятором для порівняння варіантів з номінальними, "найсприятливішими" та "найнесприятливішими" для керування параметрами ОК

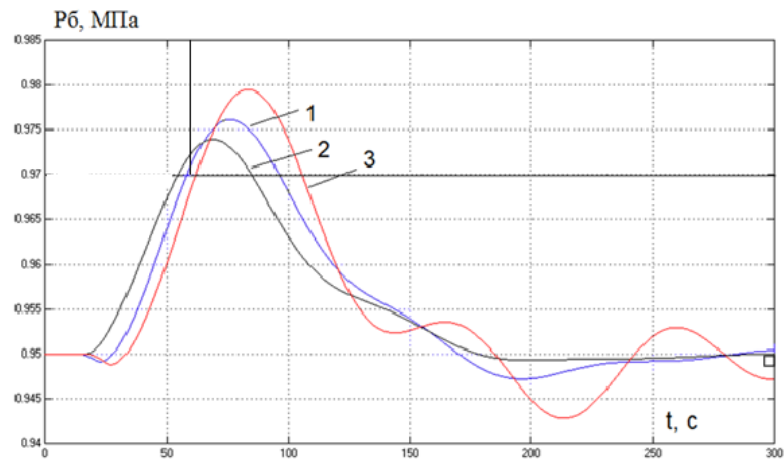


Рис. 3.26 - Результат порівняння варіантів САР базової структури з ПІД - регулятором: 1 - при номінальних параметрах ОК, 2 - при «найсприятливіших» для керування параметрах ОК, 3 - при «ненайсприятливіших» параметрах ОК.

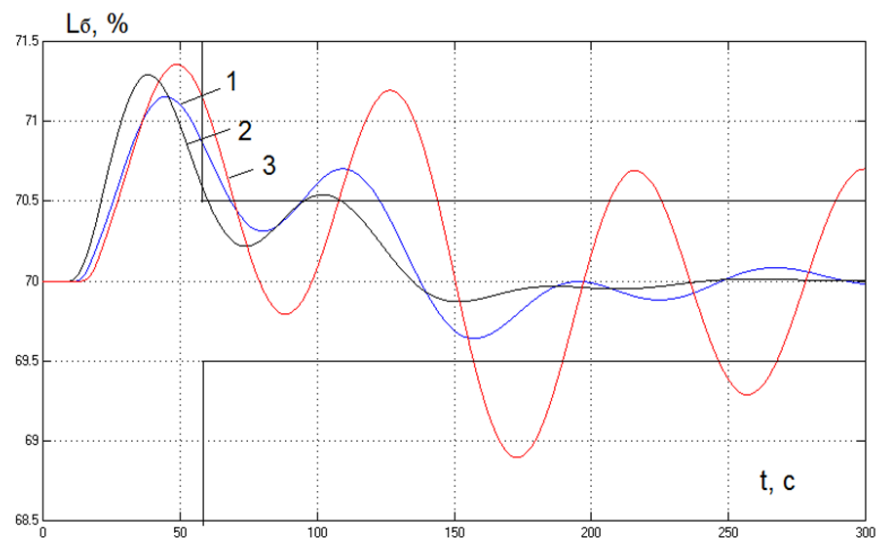


Рис. 3.27 — Результат порівняння варіантів САР базової структури з ПІД — регулятором: 1 — при номінальних параметрах ОК, 2 — при «найсприятливіших» для керування параметрах ОК, 3 — при «ненайсприятливіших» параметрах ОК.

Таблиця 3.6 – Результати порівняння варіантів САР базової структури з ПІ-регулятором

Варіант САР (параметри ОК)	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta P_6^{\text{МАКС}}$	$T_{\text{пп}1}, \text{с}$	$\Delta L_6^{\text{МАКС}}$	$T_{\text{пп}2}, \text{с}$	
номінальні	0,026	96,2	1,15	68,4	77
«насприятливіші»	0,024	85	1,29	60,2	64,8
«найнесприятливіші»	0,03	105,7	>300	>300	120,8

Чи є грубими САР з ПІ- та ПІД-регуляторами?

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

Якою є різниця між «найсприятливішими» та «найнесприятливішими» для керування умовами моделювання САР за показниками якості перехідних процесів?

Для САР з ПІД-регуляторами різниця між «найсприятливішими» та «найнесприятливішими» для керування параметрами ОК за максимальним динамічним відхиленням $\Delta P_b^{\text{МАКС}}$ складає 20%; за часом перехідного процесу (P_b) 19,6%, ..., за критерієм 46%.

Для САР з ПІ-регуляторами різниця між «найсприятливішими» та «найнесприятливішими» для керування параметрами ОК за максимальним динамічним відхиленням $\Delta P_b^{\text{МАКС}}$ за критерієм складає 77%.

Яка САР є «грубішою», а яка «чутливішою»?

Оскільки за більшістю показників різниця між «найсприятливішими» та «найнесприятливішими» умовами керування для САР з ПІ-регуляторами є меншою, то САР з ПІД-регуляторами є «грубішою», а САР з ПІ-регуляторами – «чутливішою».

3.3. Структурний і параметричний синтез САР підвищеної динамічної точності і її аналіз

3.3.1 Аналіз особливостей об'єкта регулювання, що знижують динамічну точність і вибір способів її підвищення за рахунок введення в структуру САР додаткових зв'язків, що забезпечують, наприклад, інваріантність, автономність, компенсацію запізнення і т.д.

Причиною недостатньої точності САР можуть бути зовнішні умови: дія інтенсивних контрольованих та неконтрольованих обурень, інтенсивна зміна завдання САР, а також внутрішні особливості ОУ та САР (значне співвідношення τ_o / T_o , взаємний вплив каналів у багатовимірній САР).

У нашому випадку основною причиною недостатньої динамічної точності САР є дія обурення, що контролюється. Основним шляхом підвищення динамічної точності саме САР, що розглядається, є побудова САР, інваріантної до дії контрольованого обурення.

3.3.1.1 Розробка на основі обраних способів підвищення динамічної точності САР її структурної схеми та формулювання (в аналітичній формі) умов, що забезпечують необхідні властивості САР.

Основним шляхом підвищення динамічної точності розглянутої САР є побудова автономної САР. Відповідно до цього структурна схема САР представлена на рис.3.28.

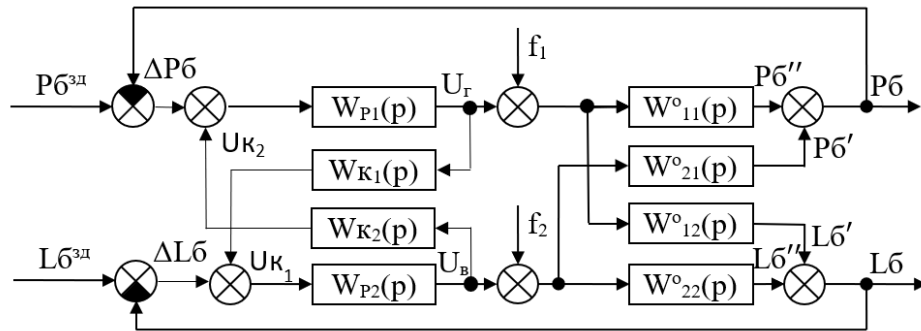


Рис.3.28 – Структурна схема САР, підвищеної динамічної точності

Виведення передавальних функцій коригувальних зв'язків, аналіз їх структури з умов фізичної реалізованості, приведення до виду, що фізично реалізується, подання у формі з'єднання типових динамічних ланок і отримання перехідних характеристик.

Розрахунок передаточної функції коригуючого зв'язку:

$$P6' + P6'' = P6 = 0$$

$$L6' + L6'' = L6 = 0$$

$$P6' = u_B \cdot W_{21}^O(p); \quad P6'' = u_B \cdot W_{K2}(p) \cdot W_{P1}(p) \cdot W_{11}^O(p)$$

$$L6' = u_r \cdot W_{12}^O(p); \quad L6'' = u_r \cdot W_{K1}(p) \cdot W_{P2}(p) \cdot W_{22}^O(p)$$

$$u_B \cdot W_{21}^O(p) + u_B \cdot W_{K2}(p) \cdot W_{P1}(p) \cdot W_{11}^O(p) = 0$$

$$u_B \cdot W_{K2}(p) \cdot W_{P1}(p) \cdot W_{11}^O(p) = -u_B \cdot W_{21}^O(p)$$

$$W_{K2}(p) \cdot W_{P1}(p) \cdot W_{11}^O(p) = -W_{21}^O(p)$$

$$u_r \cdot W_{12}^O(p) + u_r \cdot W_{K1}(p) \cdot W_{P2}(p) \cdot W_{22}^O(p) = 0$$

$$u_r \cdot W_{K1}(p) \cdot W_{P2}(p) \cdot W_{22}^O(p) = -u_r \cdot W_{12}^O(p)$$

$$W_{K1}(p) \cdot W_{P2}(p) \cdot W_{22}^O(p) = -W_{12}^O(p)$$

$$W_{K2}(p) = -\frac{W_{21}^O(p)}{W_{P1}(p) \cdot W_{11}^O(p)}$$

$$W_{K1}(p) = -\frac{W_{12}^O(p)}{W_{P2}(p) \cdot W_{22}^O(p)}$$

$$W_{21}^O(p) = \frac{-0,002 \cdot e^{-25,8p}}{38,2p+1}; \quad W_{11}^O(p) = \frac{0,005 \cdot e^{-32,8p}}{31,7p+1};$$

$$\begin{aligned}
 W_{P1}(p) &= 275,84 \cdot \left(1 + \frac{1}{36,4p} + 14,9p\right) = 275,84 \cdot \frac{36,4 \cdot 14,9 \cdot p^2 + 36,4p + 1}{36,4p} \\
 &= 275,84 \cdot \frac{542,36p^2 + 36,4p + 1}{36,4p}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_{K2}(p) &= -\frac{W_{21}^O(p)}{W_{P1}(p) \cdot W_{11}^O(p)} \\
 &= -\frac{\frac{-0,002 \cdot e^{-25,8p}}{38,2p + 1}}{275,84 \cdot \frac{542,36p^2 + 36,4p + 1}{36,4p} \cdot \frac{0,005 \cdot e^{-32,8p}}{31,7p + 1}} \\
 &= -\frac{-0,002}{275,84 \cdot 0,005} \cdot \frac{e^{-25,8p}}{e^{-32,8p}} \\
 &\quad \cdot \frac{36,4p \cdot (31,7p + 1)}{(38,2p + 1) \cdot (542,36p^2 + 36,4p + 1)} \\
 &= 0,00145 \cdot e^{-25,8p - (-32,8p)} \\
 &\quad \cdot \frac{36,4p \cdot (31,7p + 1)}{(38,2p + 1) \cdot (542,36p^2 + 36,4p + 1)} \\
 &= 0,00145 \cdot e^{7p} \cdot \frac{36,4p \cdot (31,7p + 1)}{(38,2p + 1) \cdot (542,36p^2 + 36,4p + 1)}
 \end{aligned}$$

$$W_{12}^O(p) = \frac{e^{-32p}}{-112}; W_{22}^O(p) = \frac{e^{-28p}}{62,5p};$$

$$\begin{aligned}
 W_{K2}(p) &= 4,64 \cdot \left(1 + \frac{1}{18,4p} + 11p\right) = 4,64 \cdot \frac{18,4 \cdot 11 \cdot p^2 + 18,4p + 1}{18,4p} \\
 &= 4,64 \cdot \frac{202,4p^2 + 18,4p + 1}{18,4p}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_{K1}(p) &= -\frac{W_{12}^O(p)}{W_{P2}(p) \cdot W_{22}^O(p)} = -\frac{\frac{e^{-32p}}{-112}}{4,64 \cdot \frac{202,4p^2 + 18,4p + 1}{18,4p} \cdot \frac{e^{-28p}}{62,5p}} \\
 &= \frac{1}{4,64} \cdot \frac{62,5p}{112p} \cdot e^{-32p - (-28p)} \cdot \frac{18,4p}{202,4p^2 + 18,4p + 1} \\
 &= 0,12 \cdot e^{-4p} \cdot \frac{18,4p}{202,4p^2 + 18,4p + 1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_{K2}(p) &= 0,00145 \cdot e^{7p} \cdot \frac{36,4p \cdot (31,7p + 1)}{(38,2p + 1) \cdot (542,36p^2 + 36,4p + 1)} \\
 &= 0,00145 \cdot e^{7p} \cdot \frac{36,4p}{38,2p + 1} \cdot \frac{31,7p + 1}{542,36p^2 + 36,4p + 1}
 \end{aligned}$$

$$W_{K1}(p) = 0,12 \cdot e^{-4p} \cdot \frac{18,4p}{202,4p^2 + 18,4p + 1}$$

Структурна схема моделювання передавальної функції коригуючих зв'язків наведена на рис. 3.29 3.30 , а їх перехідні характеристики – на рис. 3.31 3.32 .



Рис. 3.29 – Структурна схема моделювання передавальної функції коригуючого зв'язку 2.

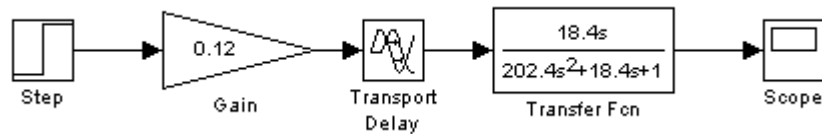


Рис. 3.30 – Структурна схема моделювання передавальної функції коригуючого зв'язку 1.

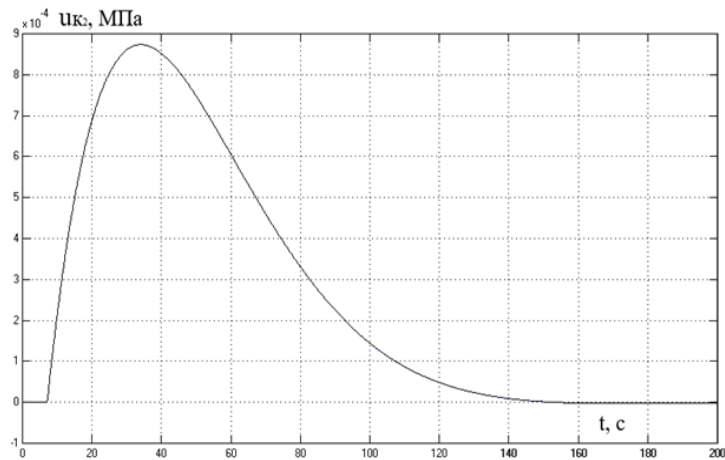


Рис. 3.31 – Перехідна характеристика коригуючого зв'язку 2

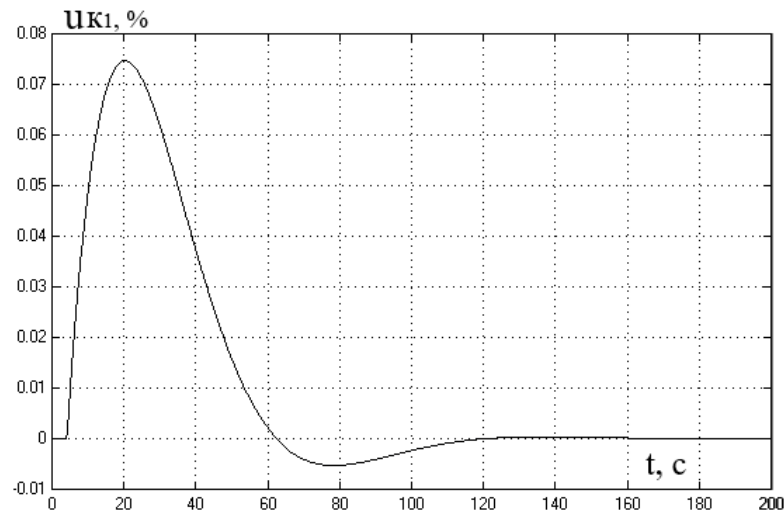


Рис. 3.32 – Перехідна характеристика коригуючого зв'язку 1

Спрощення коригувальних зв'язків з урахуванням особливостей їх технічної реалізації та параметричний синтез САР при детермінованих вхідних впливах.

Аналіз складності технічної реалізації коригувальних зв'язків з урахуванням можливостей технічних засобів та їх спрощення за рахунок зниження розмірності передавальних функцій, апроксимації запізнення дробово-раціональними передавальними функціями тощо. зі збереженням загальних властивостей зв'язків, уявлення зв'язків, що управляють, з'єднанням типових ланок.

Отримана передатна функція коригувального зв'язку представлена надто складною функцією, тому її доцільно спростити при збереженні її диференційних властивостей. Спрощена передатна функція коригувального зв'язку матиме вигляд:

$$W_{K2}(p) = 0,00145 \cdot e^{7p} \cdot \frac{36,4p \cdot (31,7p + 1)}{(38,2p + 1) \cdot (542,36p^2 + 36,4p + 1)}$$

$$W_{K2}(p) = K_K \cdot e^{-T_{K1}p} \cdot \frac{T_{K2}p}{(T_{K2}p + 1)^2} = K_K \cdot e^{-T_{K1}p} \cdot \frac{T_{K2}p}{T_{K2}p + 1} \cdot \frac{1}{T_{K2}p + 1}$$

$$W_{K1}(p) = K_K \cdot e^{-T_{K3}p} \cdot \frac{T_{K4}p}{(T_{K4}p + 1)^2}$$

3.3.2 Вибір початкових наближень параметрів спрощених коригувальних зв'язків з умов близькості перехідних характеристик коригувальних зв'язків до та після їх спрощення (можливе застосування будь-яких методів як оптимізаційних, так і звичайних).

Отримаємо параметри спрощеного коригуючого зв'язку 2:
 $K_k = 0,00145$; $T_{k1} = 7$; $T_{k2} = 36,4$.

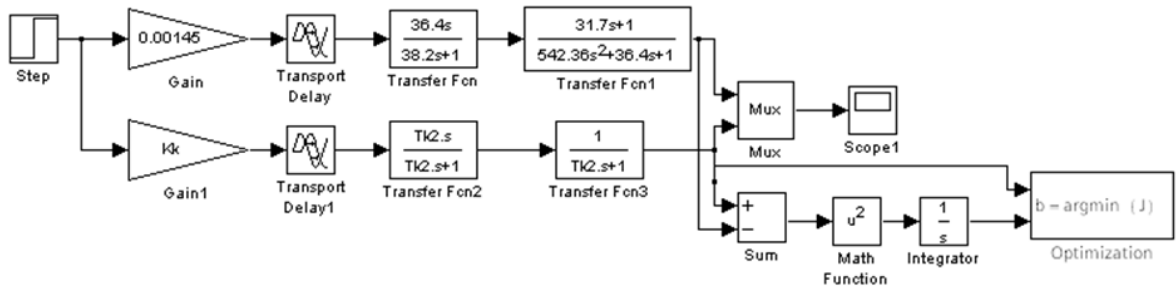


Рис. 3.33 – Схема моделювання для уточнення початкових наближень параметрів коригувального зв'язку 2.

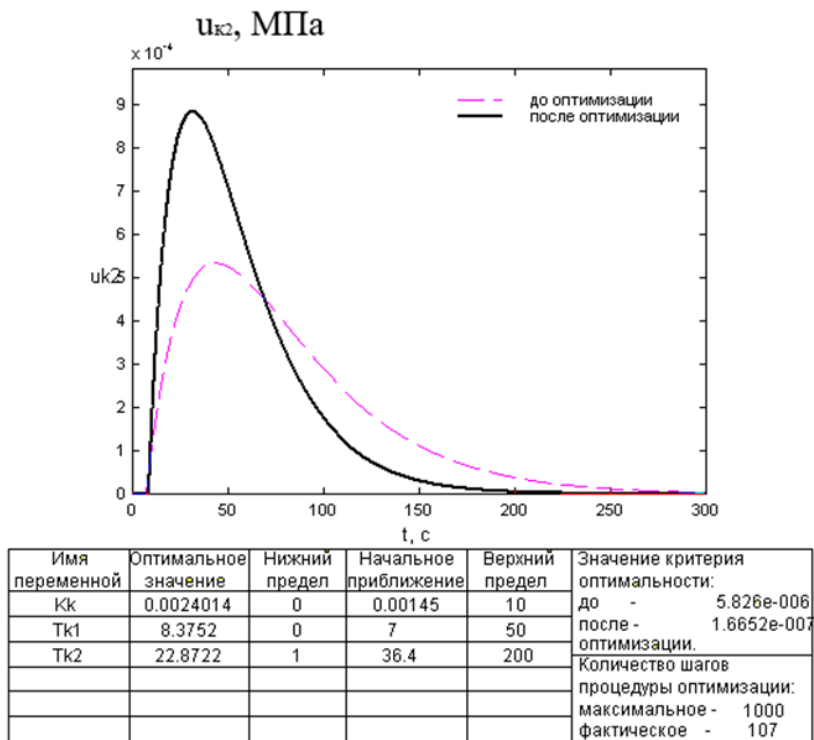


Рис. 3.34 – Результати розрахунку початкових наближень параметрів коригувального зв'язку 2

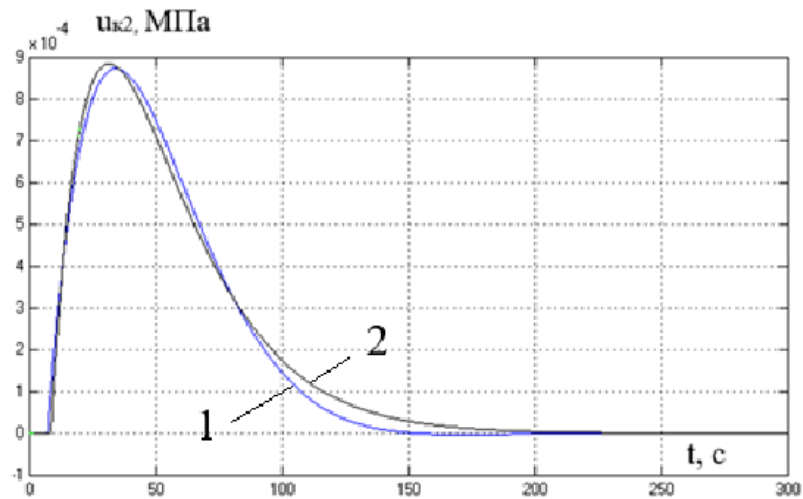


Рис. 3.35 – Перехідна характеристика розрахункового та спрощеного коригувального зв'язку: 1 — коригувальний зв'язок, 2 — спрощений коригувальний зв'язок.

Отримаємо параметри спрощеного коригуючого зв'язку 1:

$$K_{k2} = 0,12; T_{k3} = 4; T_{k4} = 18,4$$

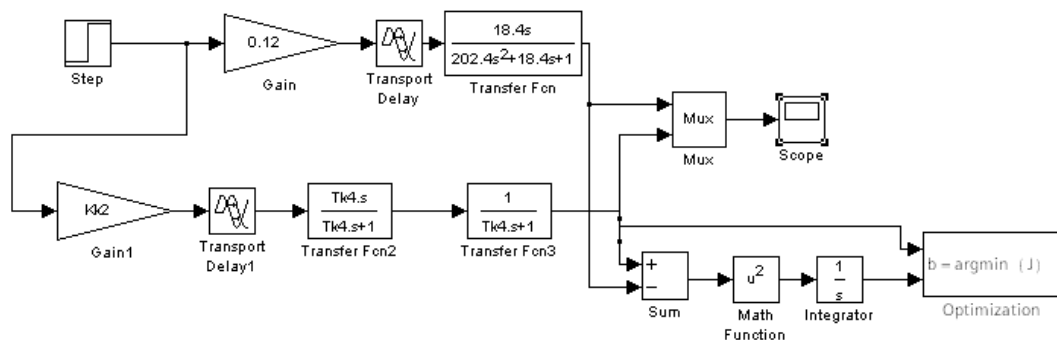


Рис. 3.36 – Схема моделювання для уточнення початкових наближень параметрів коригувального зв'язку 1.

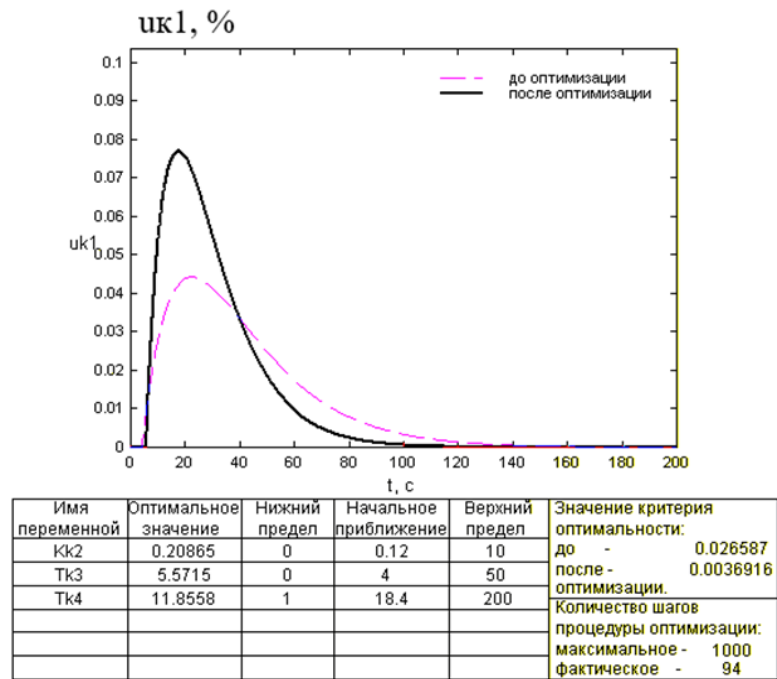


Рис. 3.37 – Результати розрахунку початкових наближень параметрів коригувального зв'язку 1.

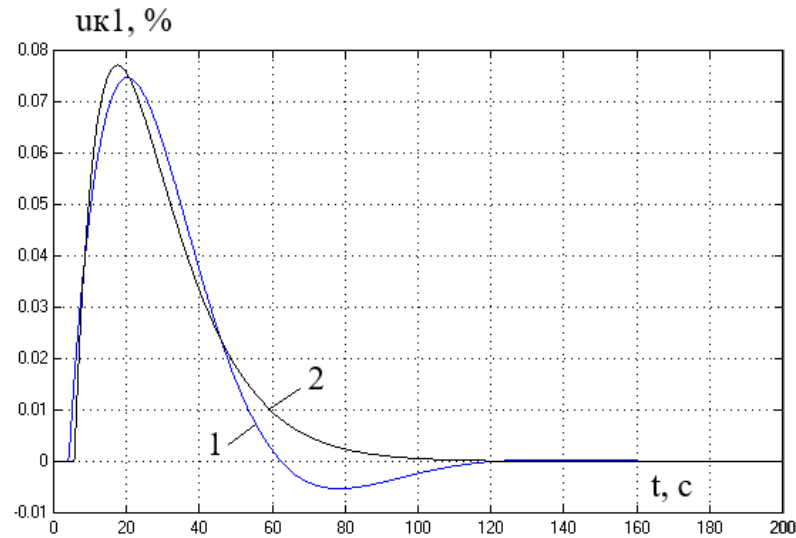


Рис. 3.38 – Перехідна характеристика розрахункового та спрощеного коригувального зв'язку: 1 — коригувальний зв'язок, 2 — спрощений коригувальний зв'язок.

Розробка структурної схеми та програми цифрового імітаційного моделювання та параметричний оптимальний синтез САР підвищеної динамічної точності для детермінованих (ступінчастих) вхідних впливів.

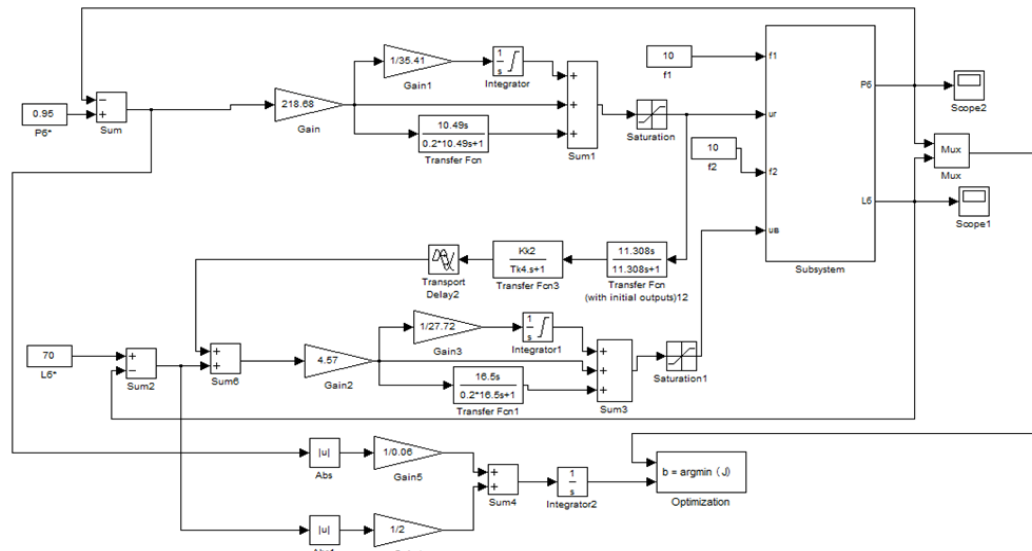
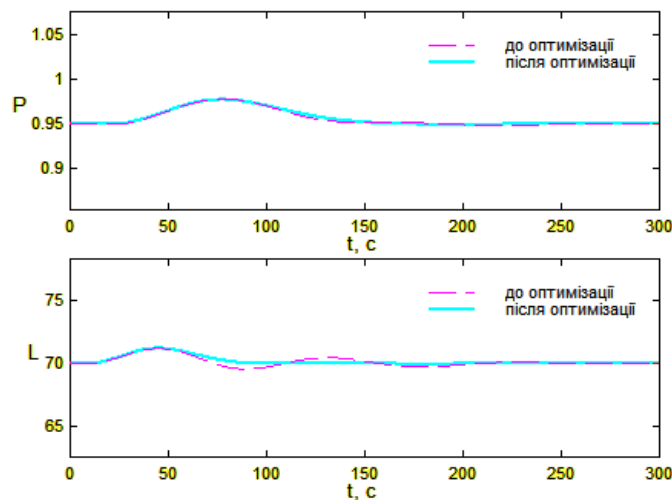


Рис. 3.39 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригувального зв'язку.



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
Kk2	0.17221	-5	0.21	5	до - 68.9559
Tk3	18.6206	0	5.57	100	після - 56.9318
Tk4	11.308	0	11.9	200	Кількість кроків процедури оптимізації:
					максимальна - 1500
					фактична - 147

Рис. 3.40 – Результати оптимізації параметрів коригувального зв'язку

3.3.3 Аналіз грубості САР підвищеної динамічної точності до варіацій параметрів об'єкта регулювання.

Вибір параметрів ОК, за яким доцільно оцінити грубість САР значень їх варіацій та планування машинного експерименту з оцінки грубості.

Як і у випадку САР базової структури, САР підвищеної динамічної точності досліджуємо на грубість в умовах варіації параметрів ОК, а саме часу запізнення в каналах ОК $\pm 20\%$.

Порівняльний аналіз перехідних процесів за критерієм оптимальності та показниками, для яких встановлені гранично-допустимі значення.

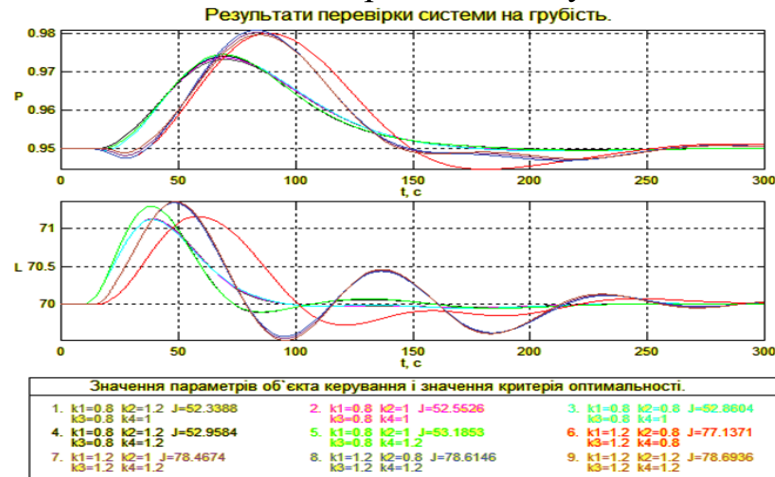
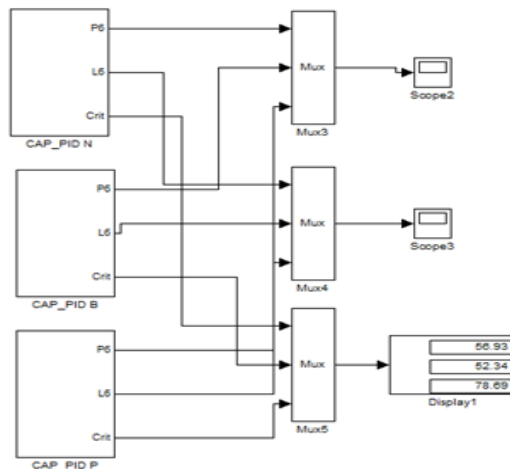


Рис. 3.41 – Аналіз САР підвищеної динамічної точності на грубість за умов

варіації параметрів ОК

Вибір із розглянутих поєднань параметрів ОК найбільш «несприятливих» та «сприятливих» для керування.

Як видно з результатів оцінки САР на грубість, найбільш "сприятливим" для керування є номінальний час запізнення за каналом керування, і запізнення, менше на 20% за каналом контрольованого збурення. Найбільш "несприятливим" для керування є поєднання параметрів ОК, що відповідає часу запізнення по обох каналах, на 20% більшому їх номінальних значень.



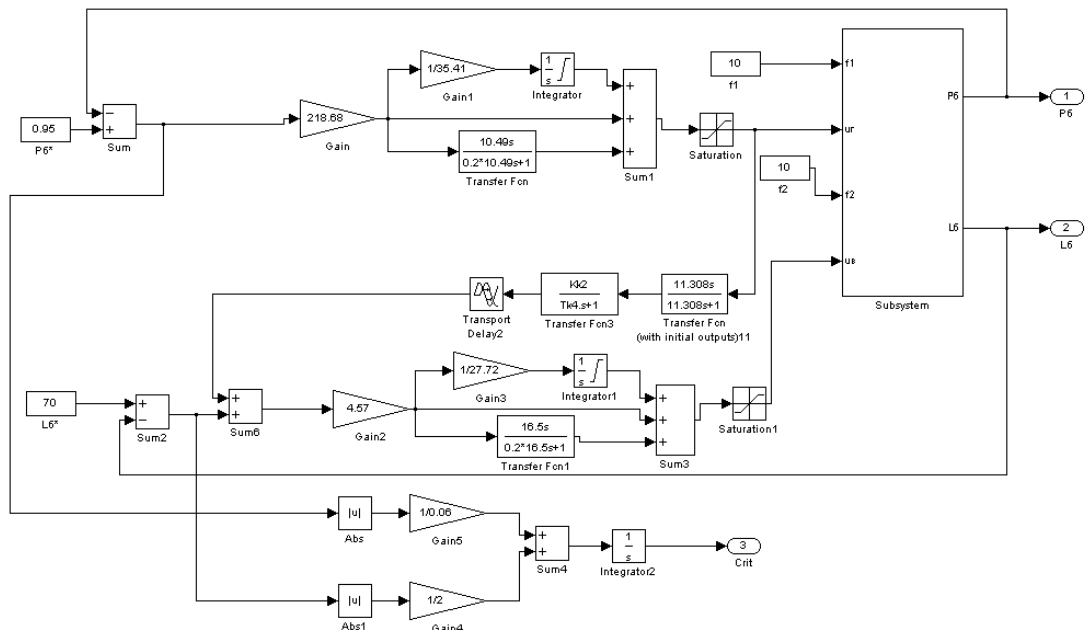


Рис. 3.42 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для порівняння варіантів з номінальними, "сприятливими" та "несприятливими" для керування параметрами ОК

Таблиця 3.7 - Результати порівняння варіантів САР підвищеної динамічної точності.

Варіант САР (параметри ОК)	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta P\delta^{\text{МАКС}}$	$T_{пп1}, \text{с}$	$\Delta L\delta^{\text{МАКС}}$	$T_{пп2}, \text{с}$	
номінальні	0,026	99,5	1,2	68,6	56,9
«насприятливіші»	0,023	86,9	1,1	63,2	52,3
«найнесприятливіші»	0,03	108,5	1,4	70,2	78,7

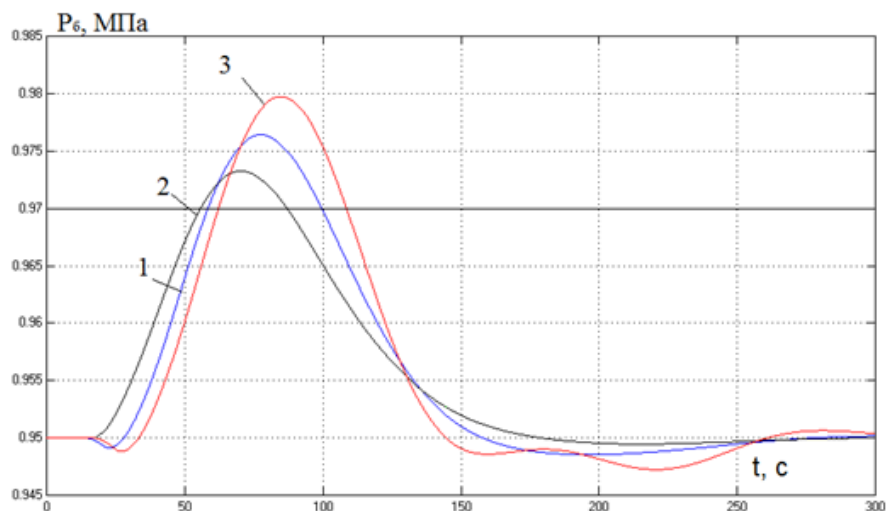


Рис. 3.43 – Результат порівняння варіантів САР підвищеної динамічної точності з ПД — регулятором P_6 : 1 — при номінальних параметрах ОК, 2 — при «найсприятливіших» для керування параметрах ОК, 3 — при «найсуприятливіших» параметрах ОК.

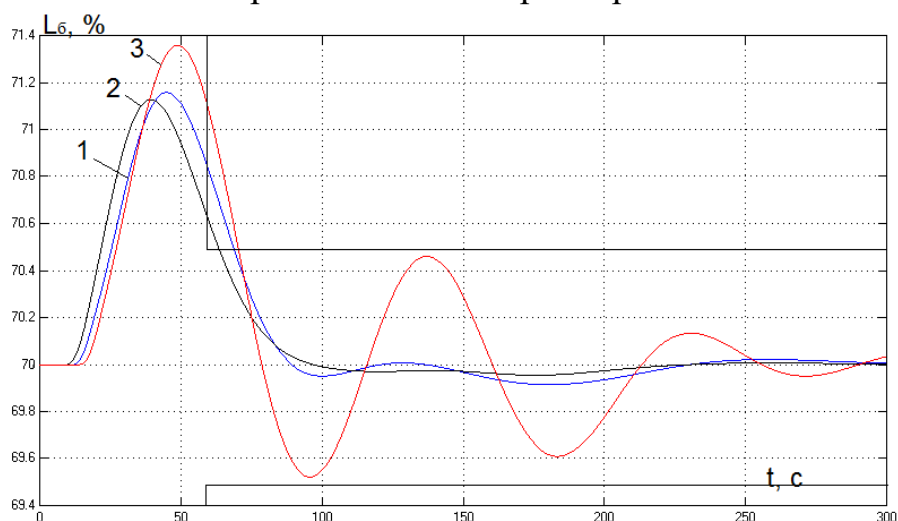


Рис. 3.44 – Результат порівняння варіантів САР підвищеної динамічної точності з ПД — регулятором L_6 : 1 — при номінальних параметрах ОК, 2 — при «найсприятливіших» для керування параметрах ОК, 3 — при «найсуприятливіших» параметрах ОК.

Порівняльний аналіз САР базової структури і підвищеної динамічної точності.

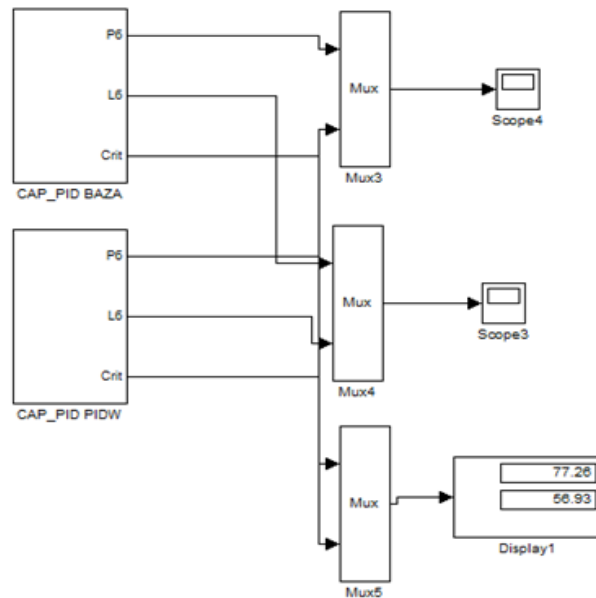


Рис. 3.45 - Структурна схема моделювання для порівняння САР базової структури та САР підвищеної динамічної точності в перехідних режимах

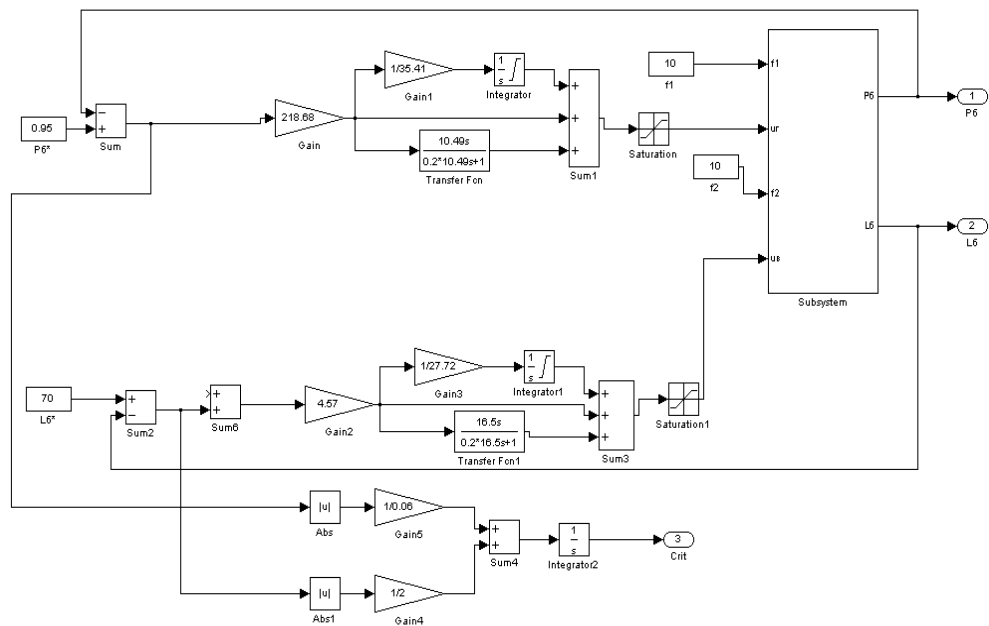


Рис. 3.46 – Структурна схема моделювання САР базової структури

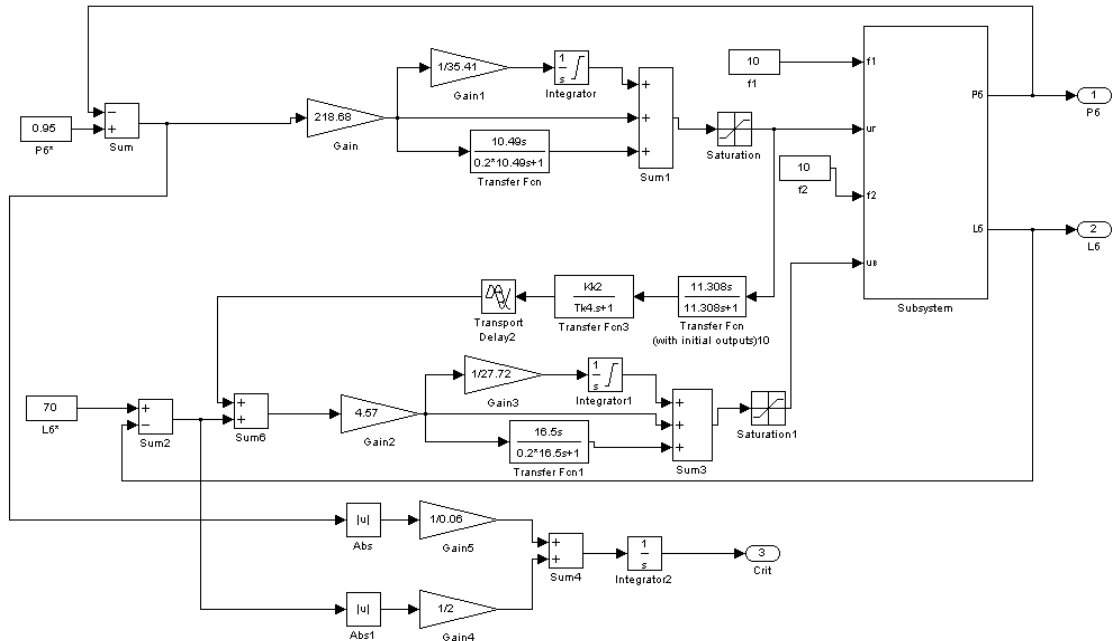


Рис. 3.47 – Структурна схема моделювання САР підвищеної динамічної точності.

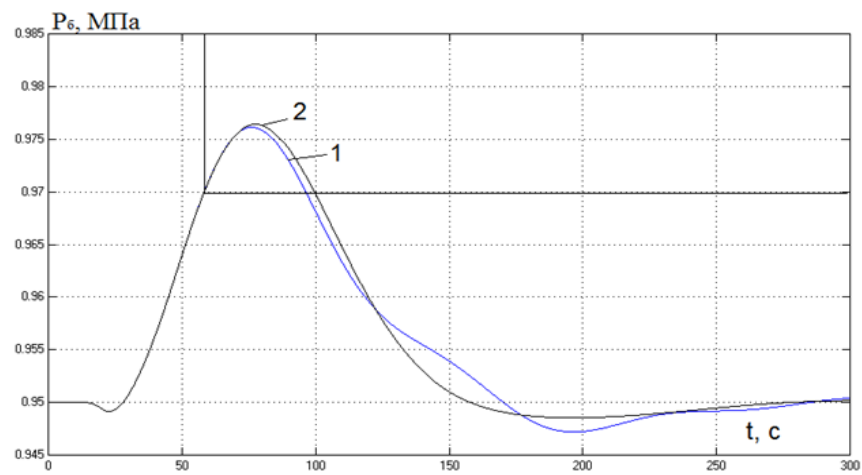


Рис. 3.48 – Результати порівняння якості роботи САР базової структури 2 і САР підвищеної динамічної точності 1

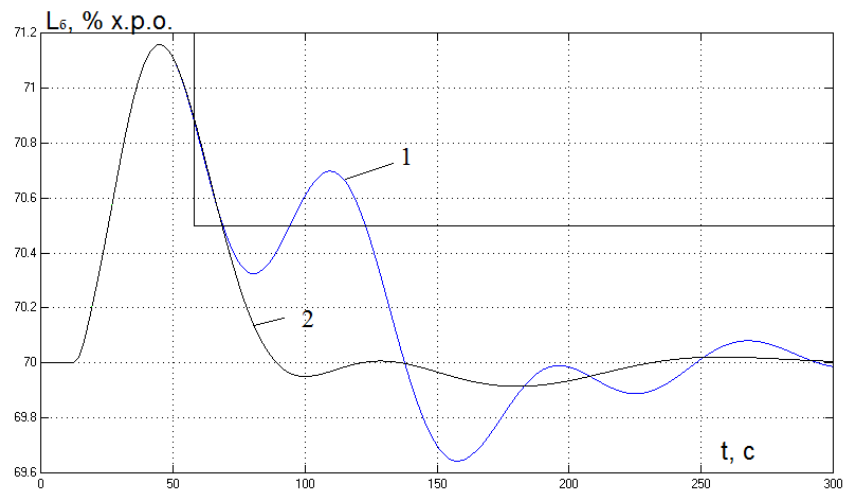


Рис. 3.49 – Результати порівняння якості роботи САР базової структури 2 і САР підвищеної динамічної точності 1

Таблиця 3.8 – Результати порівняння САР базової структури та САР підвищеної динамічної точності у перехідних режимах

Варіант САР (параметри ОК)	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta P_{\text{б}}^{\text{МАКС}}$	$T_{\text{пп1}}, \text{с}$	$\Delta L_{\text{б}}^{\text{МАКС}}$	$T_{\text{пп2}}, \text{с}$	
Базова	0,03	96,3	1,2	122,8	77,26
Автономна	0,03	99,5	1,2	68,6	56,9

Висновки за розділом:

В якості базового алгоритму регулювання був використовуваний ПІД-алгоритм, який продемонстрував найкращу якість перехідних процесів та стійкість системи до 20%-ї варіації параметрів запізнення. Підвищення динамічної точності САР котлоагрегату доцільно проводити шляхом забезпечення автономності взаємозв'язаних каналів регулювання тиску пари та рівня води за допомогою перехресних коригуючих зв'язків $W_{k1}(p)$. Оскільки САР підвищеної динамічної точності є грубою та забезпечує суттєве покращення показників якості регулювання у порівнянні з САР базової структури (знижуючи критерій невідповідності), використання САР підвищеної динамічної точності є цілком доцільним.

4. Конкретизація задачі і розробка алгоритмів логічного керування технологічним агрегатом

4.1. Аналіз існуючого рівня реалізації функцій логічного (логікопрограмного) керування технологічним агрегатом та модернізація комплексу технічних засобів для автоматизації цих функцій.

4.1.2. Опис процедур технологічного пуску, технологічної зупинки та аварійної зупинки з використанням «природної» мови

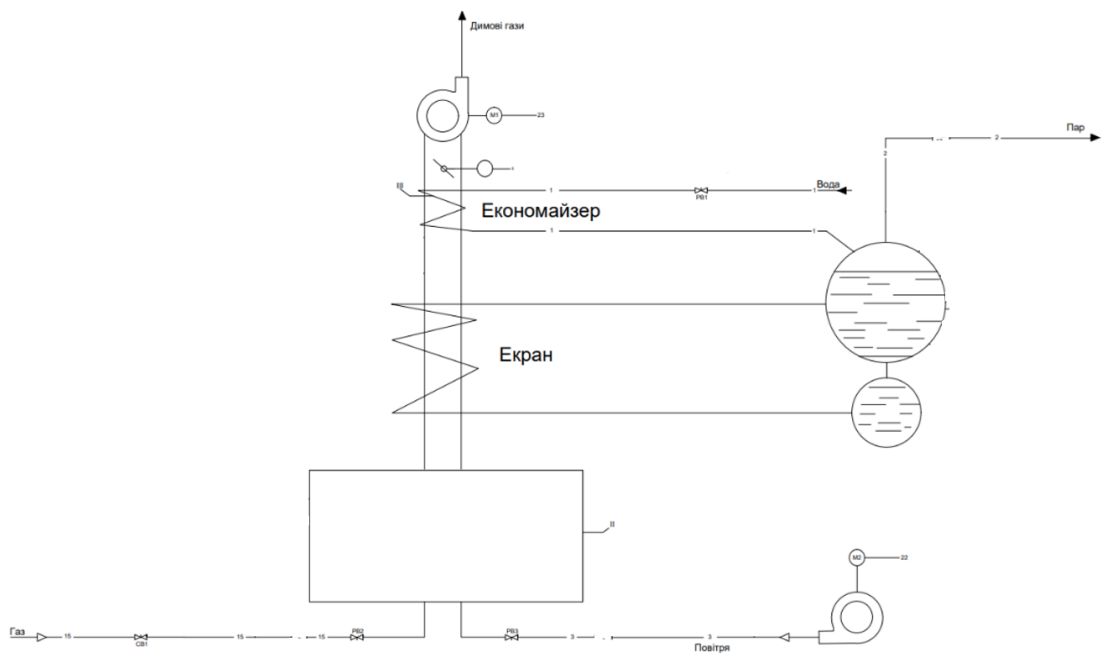


Рис. 4.1 - Технологічна схема автоматизації котлового агрегату

Процедура технологічного пуску:

Після перевірки умов, необхідних для пуску, та передпускової звукової сигналізації необхідно забезпечити постійну наявність води в барабані на рівні 70%. Після заповнення барабана до робочого рівня необхідно забезпечити циркуляцію повітря в топці для підготовки до подальшого запалювання.

Далі слід провести продувку топки для видалення залишкових газів та створити потрібне розрідження в топці. Після досягнення необхідного розрідження потрібно забезпечити тиск на робочому рівні 0.95 МПа у барабані як одну з умов для запалювання. Коли тиск досягнуто, вмикають запальний пристрій і забезпечують умови для запалювання за допомогою малого факела. Проводять запалювання, і якщо запалювання пройшло успішно, переходять на великий факел. Потім виводять котлоагрегат на режим за температурою відпрацьованих топкових газів.

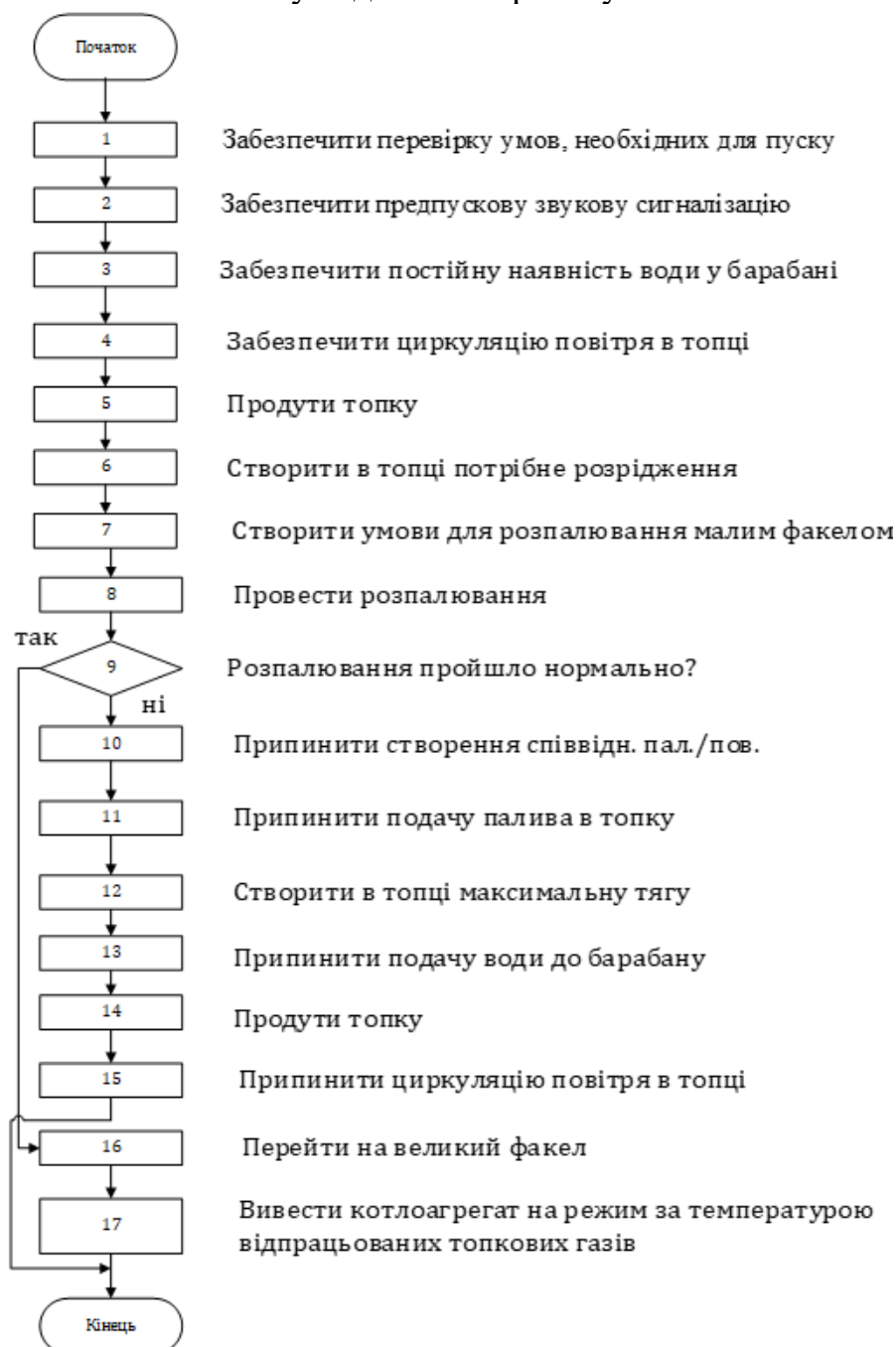
У разі невдалого запалювання припиняють створення співвідношення паливо/повітря, припиняють подачу палива в топку, створюють у топці

максимальну тягу, припиняють подачу води до барабана та проводять повторну продувку топки. Після цього припиняють циркуляцію повітря в топці.

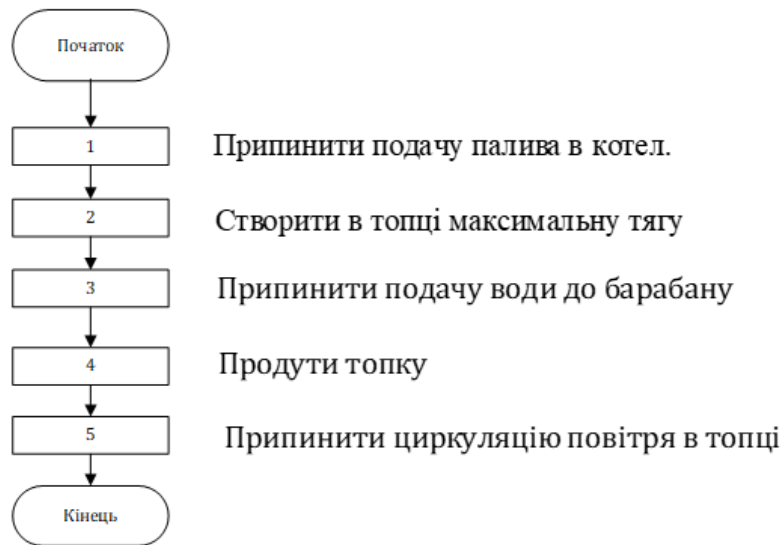
Нормальну зупинку ТП починають, припинивши подачу палива в котел. Потім потрібно створити максимальну тягу в топці. Припиняють подачу води до барабану та продувають топку видаляючи залишкові гази. Після цього припиняється циркуляція повітря в топці.

4.2. Формалізація регламентів функціонування технологічного агрегату при технологічному пуску, технологічній зупинці, блокування передаварійних ситуацій та аварійній зупинці технологічного процесу у вигляді блок-схем та їх опис.

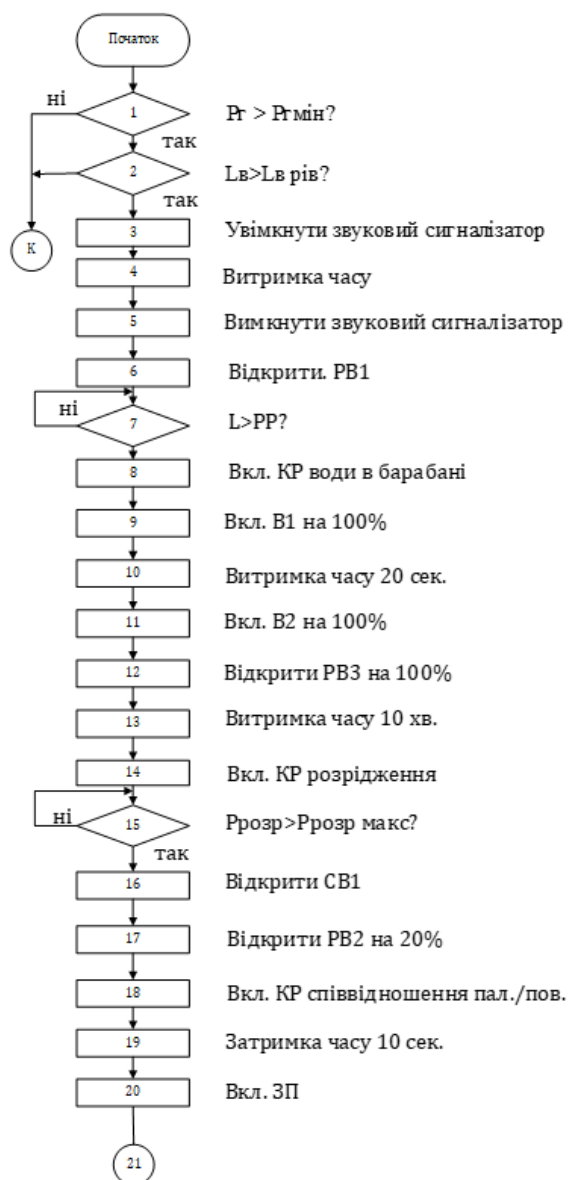
Регламент на пуск ділянки в роботу:

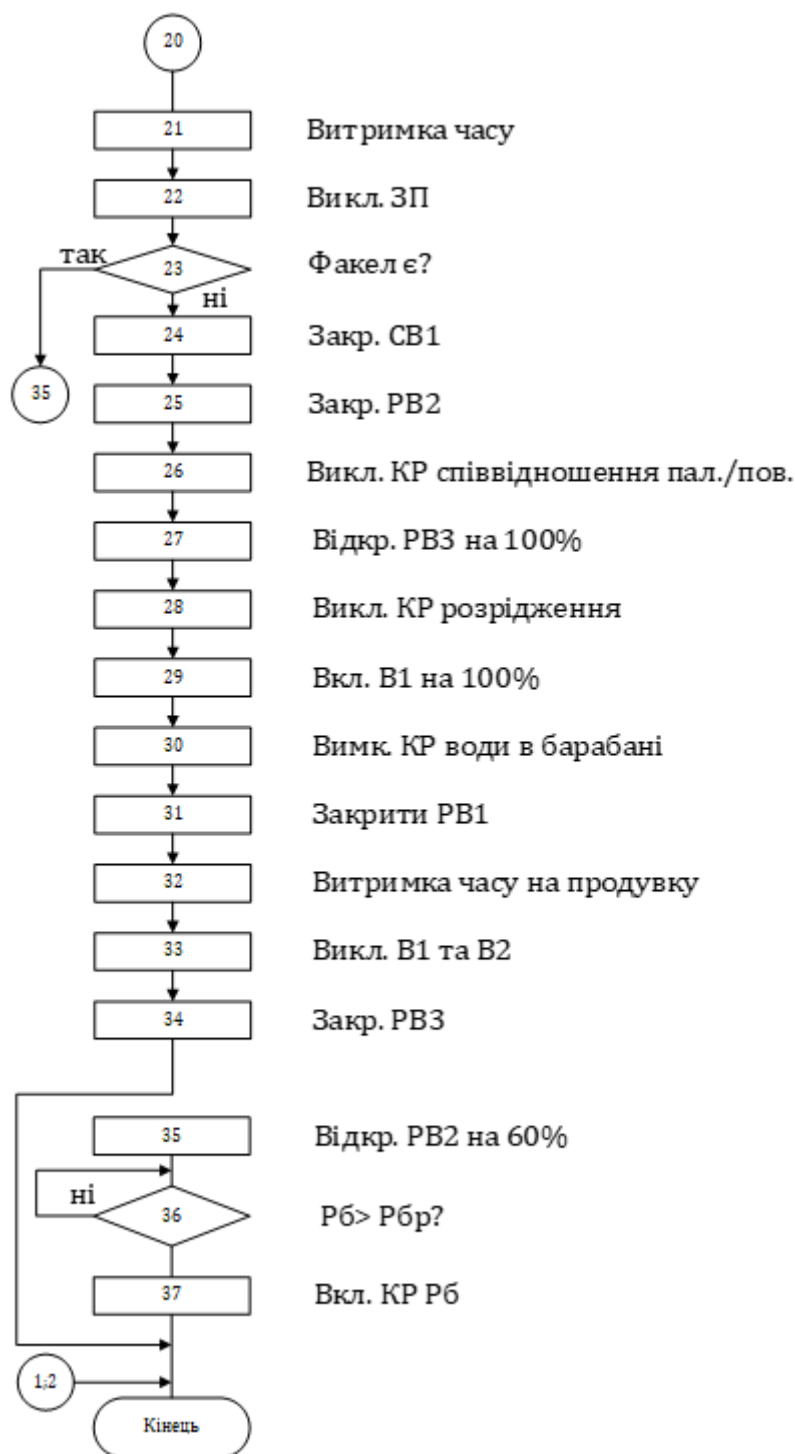


Регламент технологічної зупинки ділянки



4.3. Розробка алгоритмів автоматичного керування: технологічним пуском та зупинкою, блокуванню передаварійних ситуацій та аварійної зупинки технологічного агрегату у вигляді блок-схем та їх опис.





При перевірці умов, необхідних для пуску, слід перевірити тиск газу P_g у газопроводі, який повинен перевищувати мінімальне значення $P_{гмін}$. Якщо тиск відповідає необхідному значенню, алгоритм переходить до наступного етапу.

Для забезпечення передпускової сигналізації необхідно увімкнути звуковий сигналізатор, витримати встановлений час, після чого вимкнути звуковий сигналізатор.

Для забезпечення постійної наявності води в барабані котлоагрегату замикають контур регулювання рівня, що формує сигнал управління РВ1. Наявність води у барабані перевіряється досягненням робочого рівня РР води (умова $L > РР$).

Для подачі води в барабан необхідно увімкнути контур регулювання подачі води в барабан та включити вентилятор В1 на 100% потужності для забезпечення належної циркуляції повітря.

Після цього здійснюється витримка часу на продувку тривалістю 20 секунд, а потім увімкнення вентилятора В2 на 100% потужності. Відкривається регулюючий вентиль РВ3 на 100%, і витримується час 10 хвилин для продувки топки від залишкових газів.

Для забезпечення контролю розрідження включається контур регулювання розрідження КР розрідження. Якщо розрідження Ррозр досягає оптимального значення та не перевищує Ррозр макс, система переходить до наступного етапу, де відкривається соленоїдний вентиль СВ1 та регулюючий вентиль РВ2 на 20%.

Далі вмикається контур регулювання співвідношення палива та повітря КР співвідношення пал./пов., після чого витримується час 10 секунд перед запуском запального пристрою ЗП.

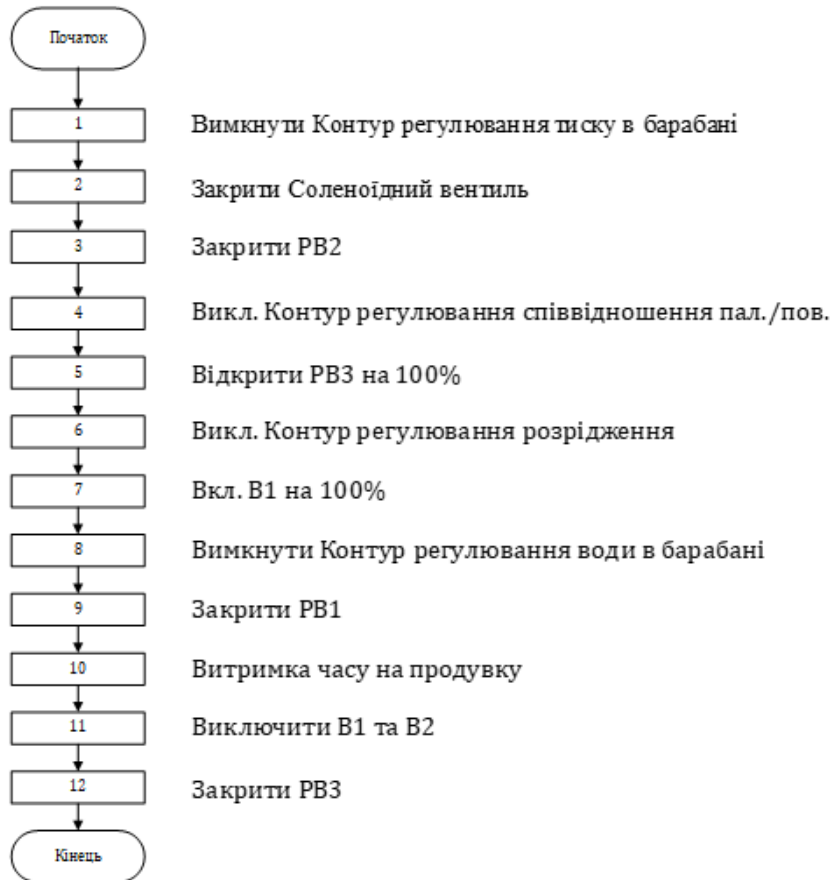
Після активації ЗП необхідно витримати час для стабілізації процесу запалювання, а потім вимкнути запальний пристрій. Далі перевіряється наявність факела. Якщо факел є, система переходить до наступного етапу.

На завершальному етапі РВ2 відкривається на 60% для забезпечення стабільної подачі газу, а тиск у барабані Рб контролюється на відповідність значенню Рбр. При досягненні необхідного тиску у барабані активується контур регулювання тиску КР Рб, після чого алгоритм завершено.

Якщо факел не запалився, то виникає аварія. У такому випадку закривається соленоїдний вентиль СВ1 та регулюючий вентиль РВ2, а також вимикається КР співвідношення пал./пов.. Після цього РВ3 відкривається на 100% для продувки, контур регулювання розрідження вимикається, а вентилятор В1 працює на 100% для завершення продувки.

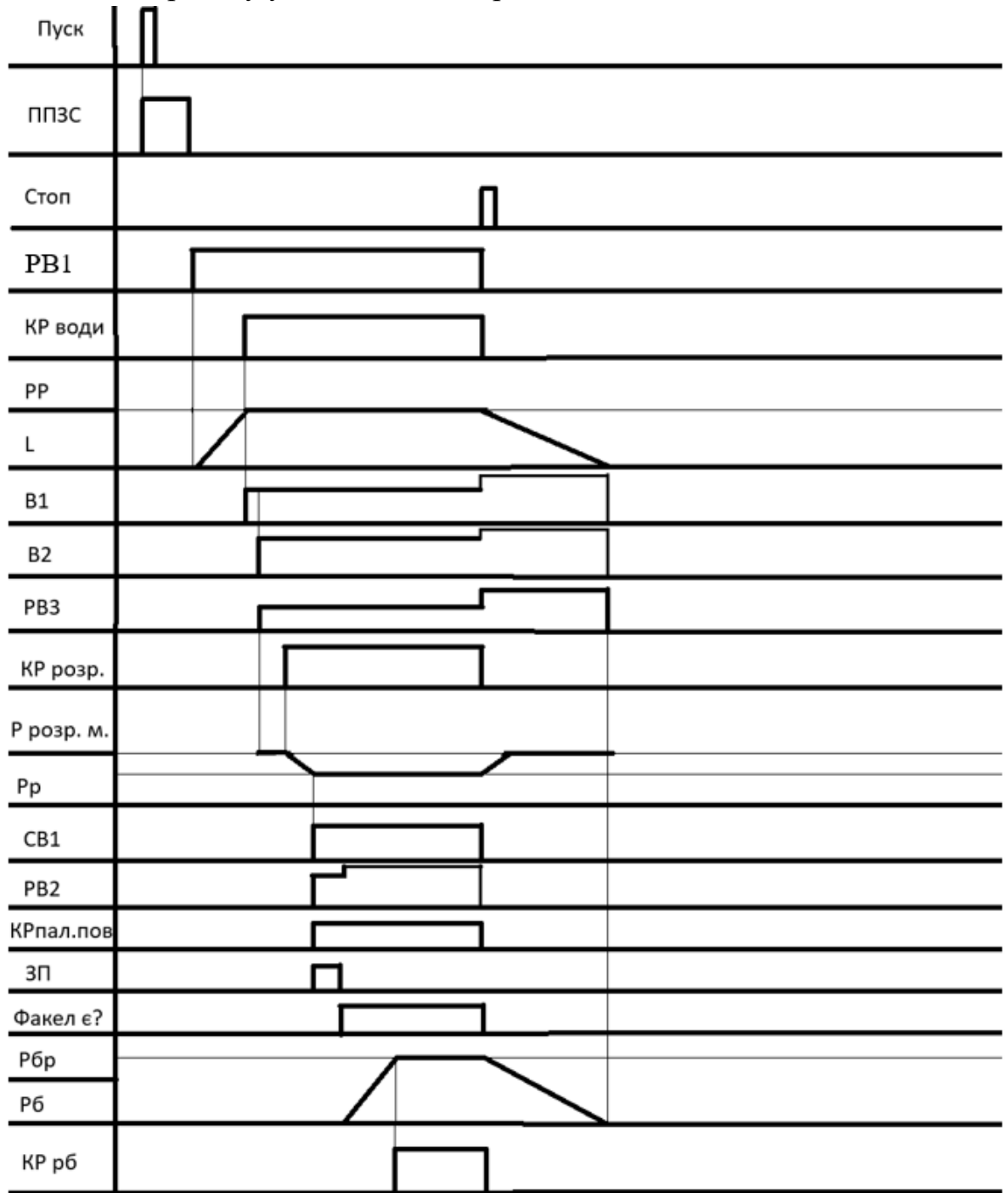
Для закінчення процесу аварії котлоагрегату вимикається контур регулювання подачі води в барабан, закривається РВ1, та здійснюється витримка часу на продувку топки. Після завершення продувки вентилятори В1 та В2 вимикаються, а регулюючий вентиль РВ3 закривається.

Алгоритм логічного керування технологічною зупинкою ділянки технологічного процесу:



Для зупинки котлоагрегату необхідно вимкнути контур регулювання тиску в барабані. Після цього слід закрити соленоїдний вентиль і закрити РВ2. Потім необхідно вимкнути контур регулювання співвідношення паливо/повітря. Для забезпечення оптимального потоку повітря потрібно відкрити РВ3 на 100%. Далі вимикається контур регулювання розрідження, після чого включається вентилятор В1 на 100%. Для припинення регулювання води в барабані необхідно вимкнути відповідний контур. Потім закривається РВ1 і витримується час на продувку системи. Після продувки вимикаються вентилятори В1 та В2. Завершується алгоритм закриттям РВ3.

Формалізація послідовності пуску, зупинки (циклу роботи)
технологічного процесу у вигляді циклограми.



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

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

Таблиця 5.1 - Перелік вхідних та вихідних сигналів контролера.

№ пп	Найменування параметру	Умовне позначення	Вид сигналу A/D	Тип сигналу I/O	Діапазон сигналу на вході / виході контролера	Позначення на схемі
1	Сигнал стану авт. Вимикача M1	QF1	D	I	(0/24 В)	DI1
2	Сигнал стану контактора M1	KM1	D	I	(0/24 В)	DI2
3	Сигнал перемикача режиму M1	SA1	D	I	(0/24 В)	DI3
4	Сигнал стану авт. Вимикача M2	QF2	D	I	(0/24 В)	DI4
5	Сигнал стану контактора M2	KM2	D	I	(0/24 В)	DI5
6	Сигнал перемикача режиму M2	SA2	D	I	(0/24 В)	DI6
7	Витрата газу з магістралі газу	F _Г	D	I	(0/24 В)	DI7
8	Тиск подачі газу на пальник	P _Г	D	I	(0/24 В)	DI8
9	Тиск повітря на пальник	P _п	D	I	(0/24 В)	DI9
10	Тиск живильної води	P _{жв}	D	I	(0/24 В)	DI10
11	Тиск перегрітої пари	P _{пп}	D	I	(0/24 В)	DI11
12	Наявність факела (1, 2)	B _s	D	I	(0/24 В)	DI12
13	Керування дугтьовим вентилятором	M1	D	O	(0/24 В)	DO1
14	Керування вентилем подачі води	PB1	D	O	(0/24 В)	DO2
15...						

15	Керування димососом	M3	D	O	(0/24 В)	DO3
16	Керування запальним пристроєм	ZZP	D	O	(0/24 В)	DO4
17	Керування соленоїдним вентилем	YV1	D	O	(0/24 В)	DO5
18	Звукова сигналізація	HA1	D	O	(0/24 В)	DO6
19	Розрідження в топці	P _T	A	I	4-20 мА	AI1
20	Рівень води в барабані	L6	A	I	4-20 мА	AI2
21	Тиск в барабані	P6	A	I	4-20 мА	AI3
22	Керування клапаном регулювання газу (PB2)	F _{V2}	A	O	4-20 мА	AO1
23	Керування клапаном регулювання повітря (PB3)	F _{V1}	A	O	4-20 мА	AO2

Дискретні входи (DI) - 12 каналів;

Дискретні виходи (DO) - 6 каналів;

Аналогові входи (AI) - 3 канали;

Аналогові виходи (AO) - 2 канали.

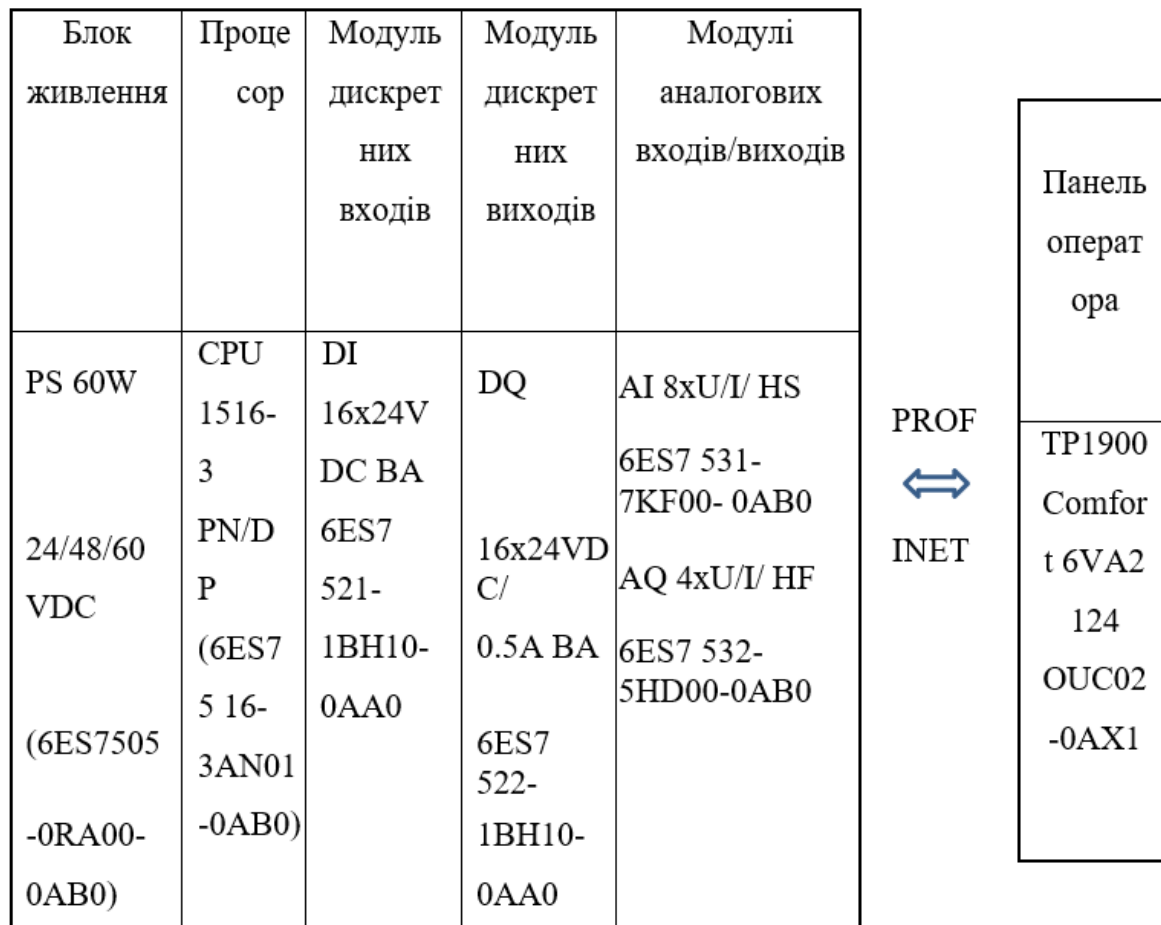


Рис. 5.1 – Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування

Центральний процесор CPU 1516-3 PN / DP призначений для побудови систем управління, що вимагають виконання програм великого об'єму, високій швидкості оброблення даних і обслуговування систем розподіленого введення-виведення на основі мереж PROFINET IO і PROFIBUS DP.

Оснащений інтерфейсами PROFINET, а також PROFIBUS. Це дає можливість застосувати його при подальшій розбудові системи на інші ділянки виробництва.

6ES7516-3AN01-0AB0	
General information	
Product type designation	CPU 1516-3 PN/DP
Hardware function version	FS03
Firmware version	V2.0
Engineering with STEP 7 TIA Portal can be configured/integrated as of version	V14
Configuration control	
Via data record	Yes
Display	
Screen diagonal (cm)	6.1 cm
Operator controls	
Number of buttons	6
Mode selector	1
Supply voltage	
Type of supply voltage	24 V DC
Low limit of permitted range (DC)	19.2 V
High limit of permitted range (DC)	28.8 V
Reverse polarity protection	Yes
Power and voltage failure buffering	
Power/voltage failure buffer time	5 ms

Input current	
Current consumption (rated value)	0.85 A
Inrush current, max.	2.4 A; rated value
I _{tr}	0.02 A*s
Power	
Power consumption from the backplane bus (balanced)	6.7 W
Incoming power to the backplane bus	12 W
Power loss	
Power loss, typ.	7 W
Memory	
Number of slots for SIMATIC memory card	1
SIMATIC memory card required	Yes
Work memory	
Integrated (for program)	1 MB
Integrated (for data)	5 MB

Рис. 5.2 – Технічні дані CPU

Для вводу дискретних сигналів обраний модуль DI 16x24VDC BA (6ES7521-1BH10-0AA0). Він здатен сприймати до 16 сигналів від датчиків, на виходах яких є сигнали -3...+5 VDC (рівні логічного нуля) або +11...30 VDC (рівні логічної одиниці).

6ES7521-1BH10-0AA0	
General Information	
Product type designation	DI 16x24VDC BA
Hardware functional status	FS01
Firmware version	V1.0.0
FW update possible	Yes
Product function	
I&M data	Yes; I&M0 to I&M3
Engineering with STEP 7 TIA Portal can be configured/integrated as of version	
STEP 7	V13 / V13
STEP 7 can be configured/integrated as of version	V5.5 SP3 / -
PROFIBUS as of GSD version/GSD revision	V1.0 / V5.1
PROFINET as of GSD version/GSD revision	V2.3 / -
Operating mode	
DI	Yes
Counters	No
MSI	Yes
Supply voltage	
Rated value (DC)	24 V
Valid range, low limit (DC)	20.4 V
Valid range, high limit (DC)	28.8 V
Power	
Power consumption from the backplane bus	1.05 W
Power loss	
Power loss, typ.	1.8 W
Digital inputs	
Number of inputs	16
Configurable digital inputs	No
Sinking/sourcing input	Sinking input
Input characteristic curve acc. to IEC 61131, type	Yes
Input voltage	
Type of input voltage	DC
Rated value (DC)	24 V
for signal "0"	-30 to +5 V
for signal "1"	+11 to +30 V

Рис. 5.3 – Технічні характеристики та схема підключень DI 16x24VDC BA

Для виводу дискретних сигналів обраний модуль DQ 16x24VDC/0.5A BA (6ES7522-1BH10-0AA0). При виводі керуючих сигналів на його виходах з’являється напруга 24 VDC, вихідні транзистори здатні продукувати струм на навантаження до 0,5 А.

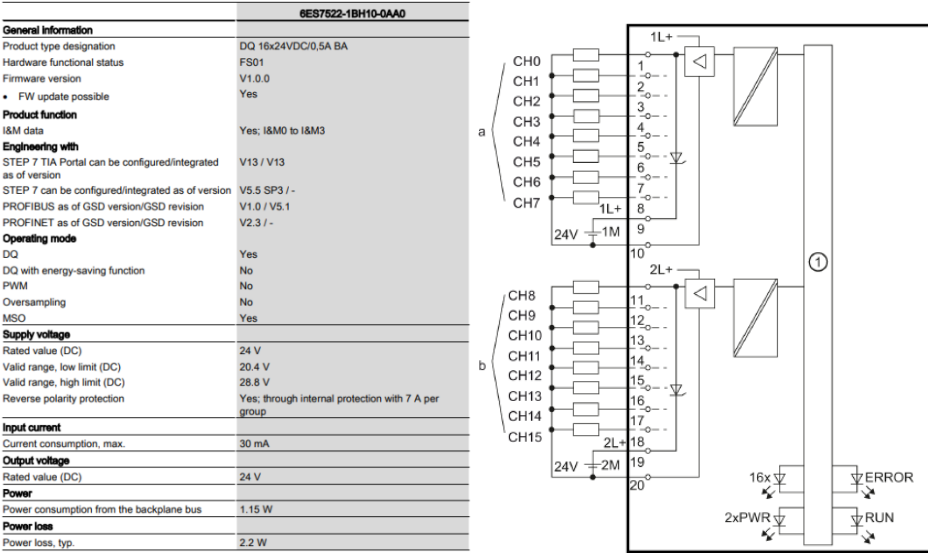


Рис. 5.4 – Технічні характеристики та схема підключень DQ 16x24VDC/0.5A BA

Для вводу/виводу аналогових сигналів обраний модуль AI 8xU/I/HS 6ES7 531-7KF00-0AB0 та AQ 4xU/I/HF 6ES7-532-5HD00-0AB0. Вони здатні сприймати аналоговий сигнал струму 4...20 mA DC від датчиків з 4-х провідною або 2-х провідною схемами підключення.

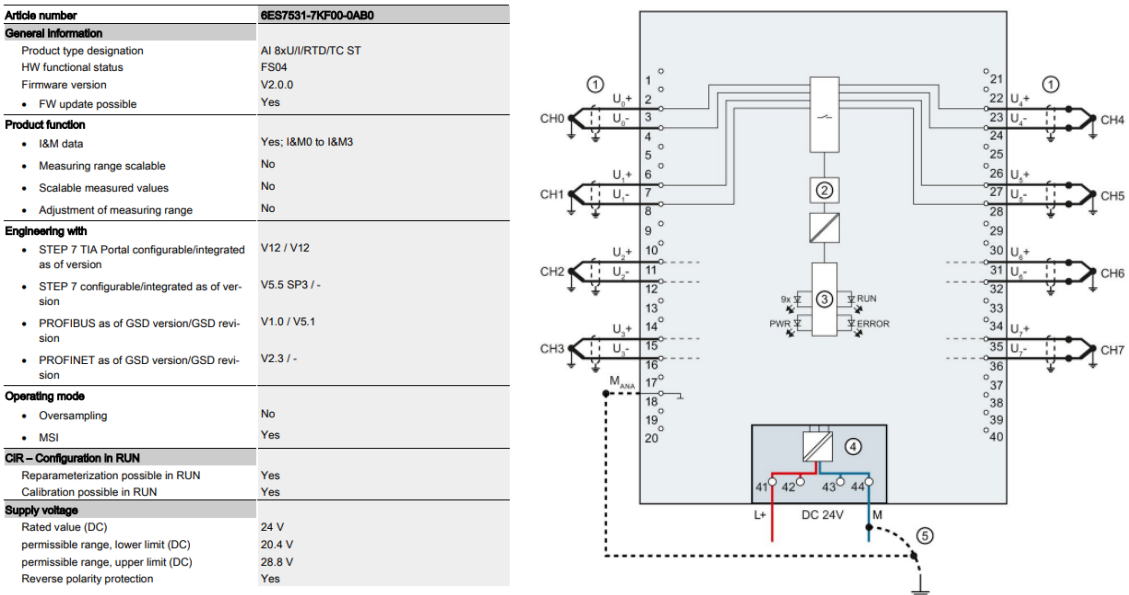


Рис. 5.5 – Технічні характеристики та схема підключень датчиків сили струму до входів 6ES7531-7KF00-0AB0

Article number	6ES7532-5HD00-0AB0
General information	
Product type designation	AQ 4xU/I ST
HW functional status	FS04
Firmware version	V2.2.0
FW update possible	Yes
Product function	
I&M data	Yes; I&M0 to I&M3
Output range scalable	No
Engineering with	
STEP 7 TIA Portal configurable/integrated as of version	V12 / V12
STEP 7 configurable/integrated as of version	V5.5 SP3 / -
PROFIBUS as of GSD version/GSD revision	V1.0 / V5.1
PROFINET as of GSD version/GSD revision	V2.3 / -
Operating mode	
Oversampling	No
MSO	Yes
CiR – Configuration in RUN	
Reparameterization possible in RUN	Yes
Calibration possible in RUN	Yes
Supply voltage	
Rated value (DC)	24 V
permissible range, lower limit (DC)	20.4 V
permissible range, upper limit (DC)	28.8 V
Reverse polarity protection	Yes
Input current	
Current consumption, max.	190 mA; with 24 V DC supply

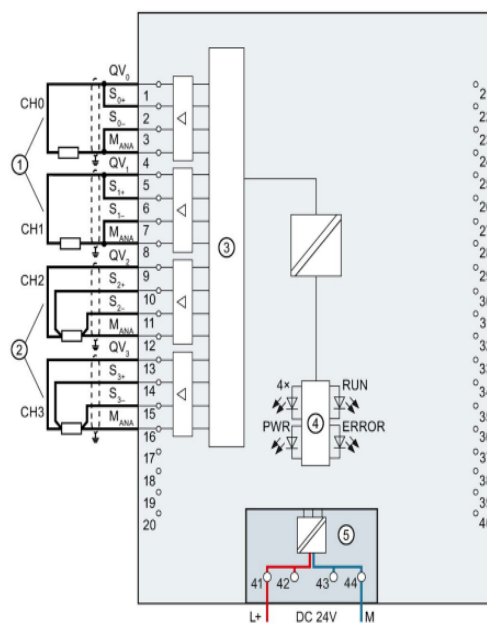


Рис. 5.6 – Технічні характеристики та схема підключень датчиків сили струму до входів AQ 4xU/I/ST 6ES7-532-5HD00-0AB0.

До виходів цього модуля можна підключати виконавчі механізми, які сприймають керуючий сигнал із діапазону 0...10 V DC по 2-х провідній або 4-х провідній схемі підключення. Виходи мають захист від короткого замикання.

6. РОЗРОБКА КОНТРОЛЕРНО-КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ, ПРОГРАМУВАННЯ АЛГОРИТМІВ РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЛОГІЧНОГО КЕРУВАННЯ САК

6.1 Програмне конфігурування контролера

Для реалізації алгоритмів регулювання та логічного керування створюємо у середовищі TIA Portal проект і додаємо до його складу обрані контролер CPU 1513-1 PN та панель оператора TP1900 Comfort.

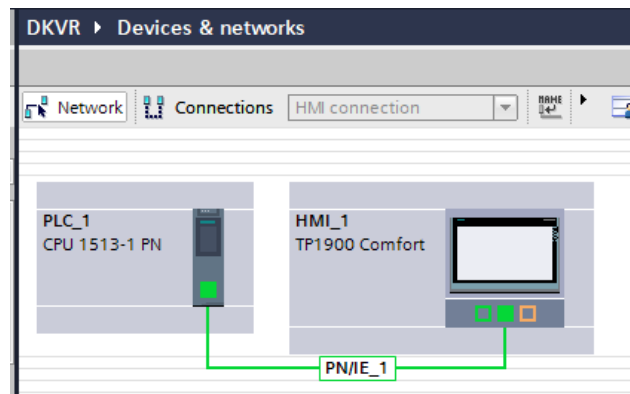


Рис. 6.1 Визначення складу технічних засобів проекту

Виконуємо конфігурування обраного контролера і модулів ПЗО. Для цього необхідні модулі вводу/виводу перетягуємо в поле редагування з бібліотеки, присвоюємо імена змінним, які відповідають фізичним входам і виходам (рис. 6.2). Визначаємо у властивостях модулів вид сигналів та діапазони їх зміни (рис. 6.3).

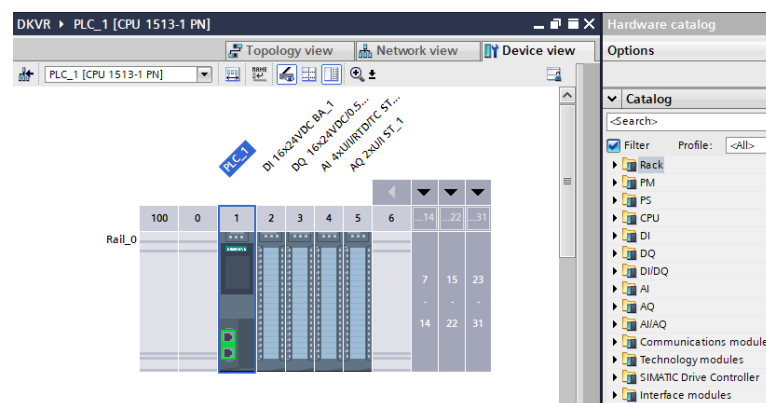


Рис. 6.2 Конфігурування контролера і модулів ПЗО

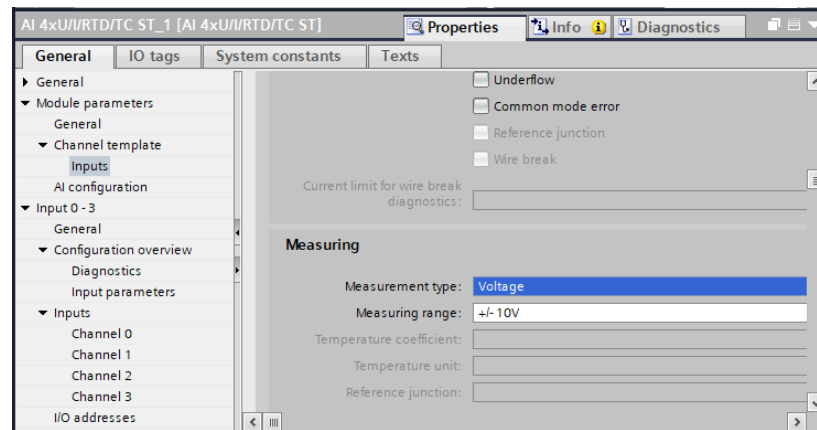


Рис. 6.3 Приклад визначення виду вхідного сигналу
і діапазону його зміни

Остаточне визначення і коригування імен входів/виходів проводимо в таблиці тегів програми.

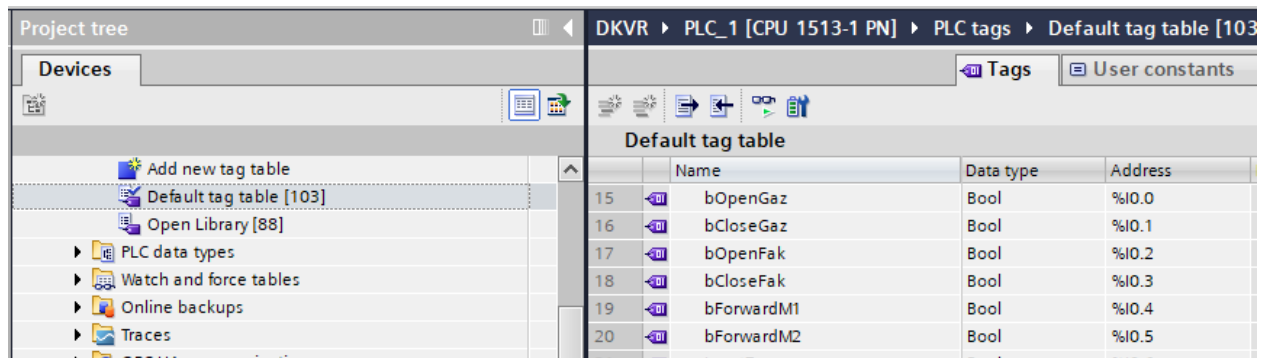


Рис. 6.4 Приклад вікна таблиці тегів (фрагмент)

6.2 Розробка програмного забезпечення

За допомогою миші перетягуємо з зовнішньої глобальної бібліотеки SOL в проект теги та необхідні функціональні блоки, які обробляють сигнали для типового обладнання.

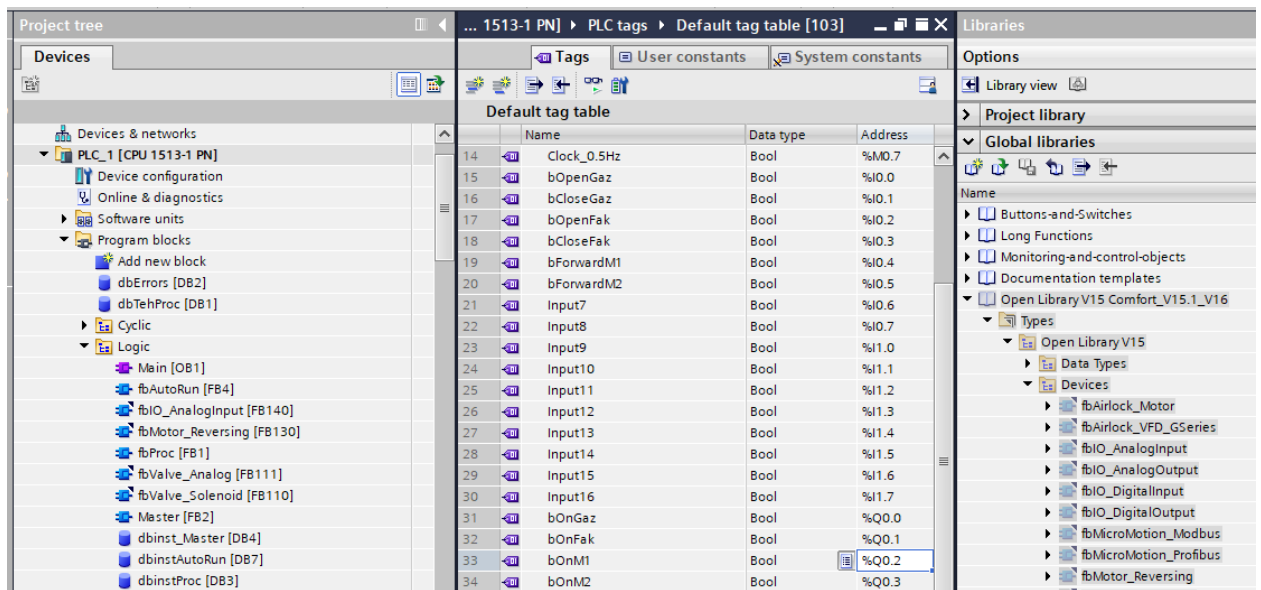


Рис. 6.5 Приклад додавання бібліотечних тегів та функціональних блоків
FB Motor, FB Valve_Analog, FB Valve_Solenoid

Використовуючи бібліотечні типи даних, створюємо два глобальних блоки даних, де розміщуємо імена змінних і їх типи.

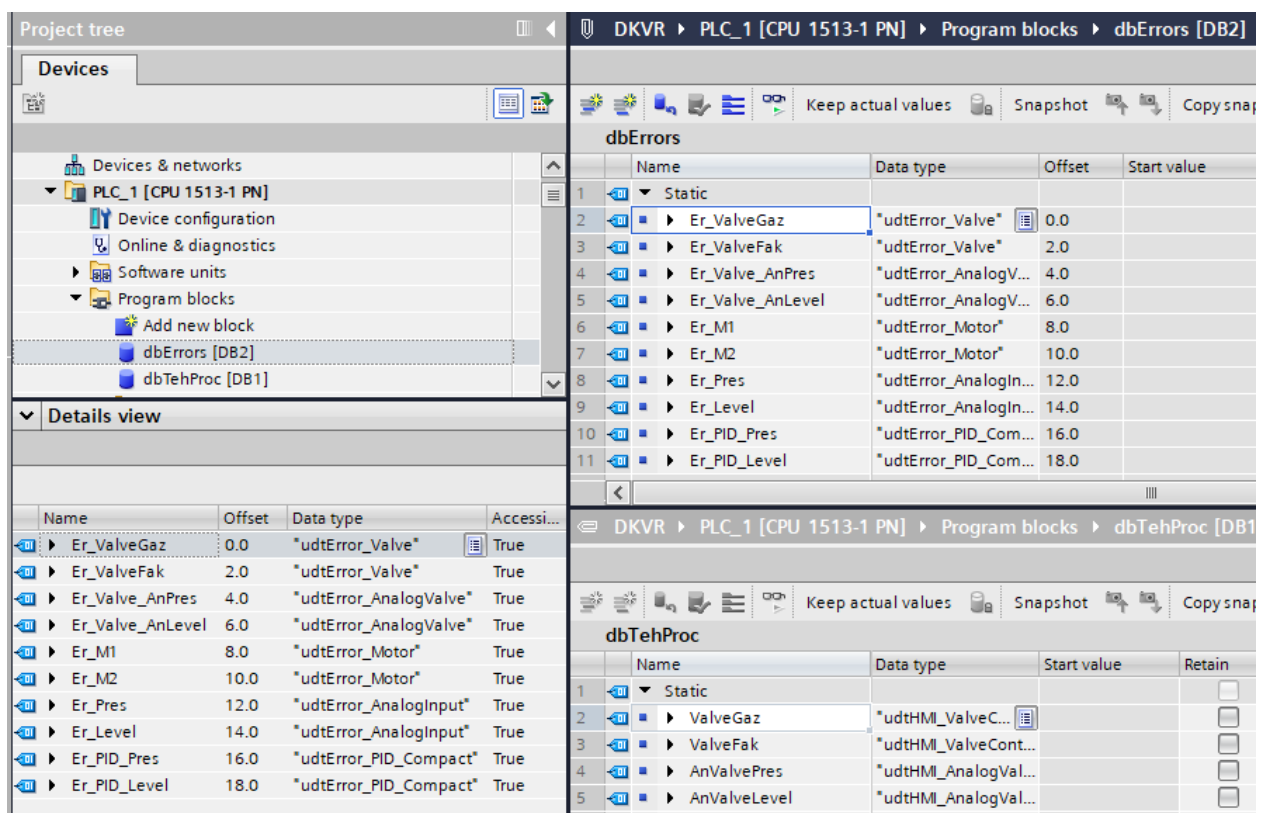


Рис. 6.6 Створення глобальних dbTehProc, dbErrors

6.2.1 Створення підпрограм логічного керування.

Ці підпрограми призначені для автоматичного пуску та зупинки обладнання ділянки. Їх доцільно згрупувати в папку Logic. Спочатку розробляємо підпрограму fbProc опитування стану обладнання, а саме клапану ValveGaz, пристрою запалення ValveFak, електроприводів M1, M2.

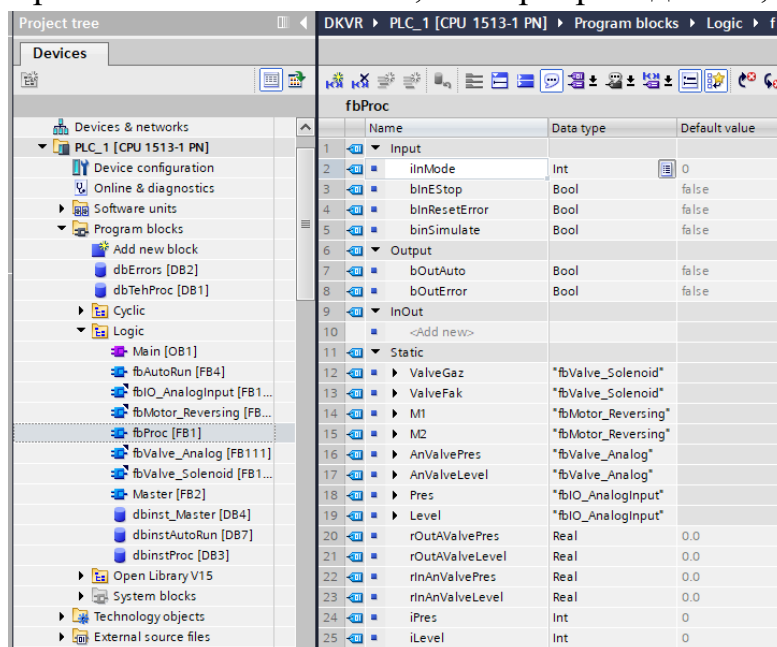


Рис. 6.7 Інтерфейс fbProc

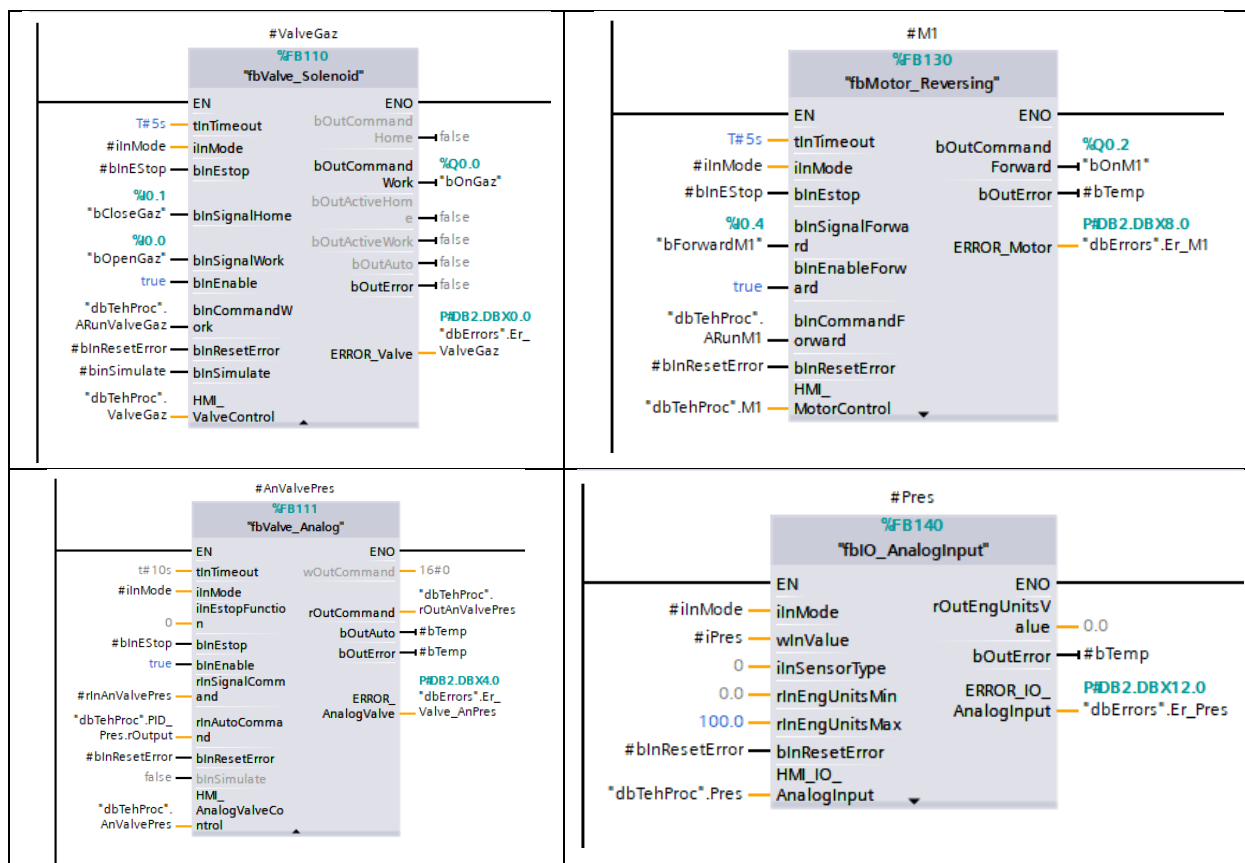


Рис. 6.8 Фрагменти підпрограми fbProc

Для цього використовуємо типові бібліотечні функціональні модулі (рис. 6.8), до входів і виходів яких підключаємо відповідні сигнали згідно з їх описом.

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

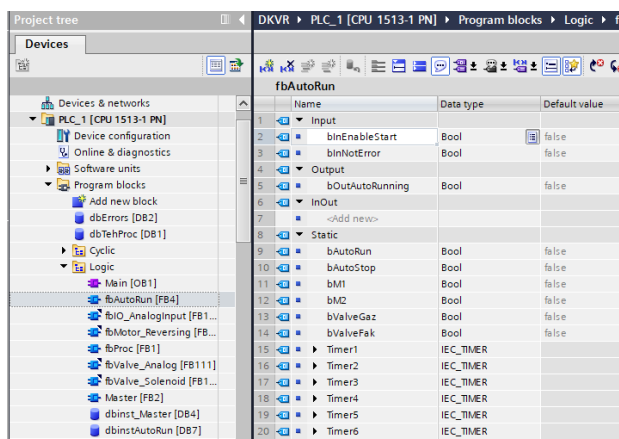


Рис. 6.9 Интерфейс fbAutoRun

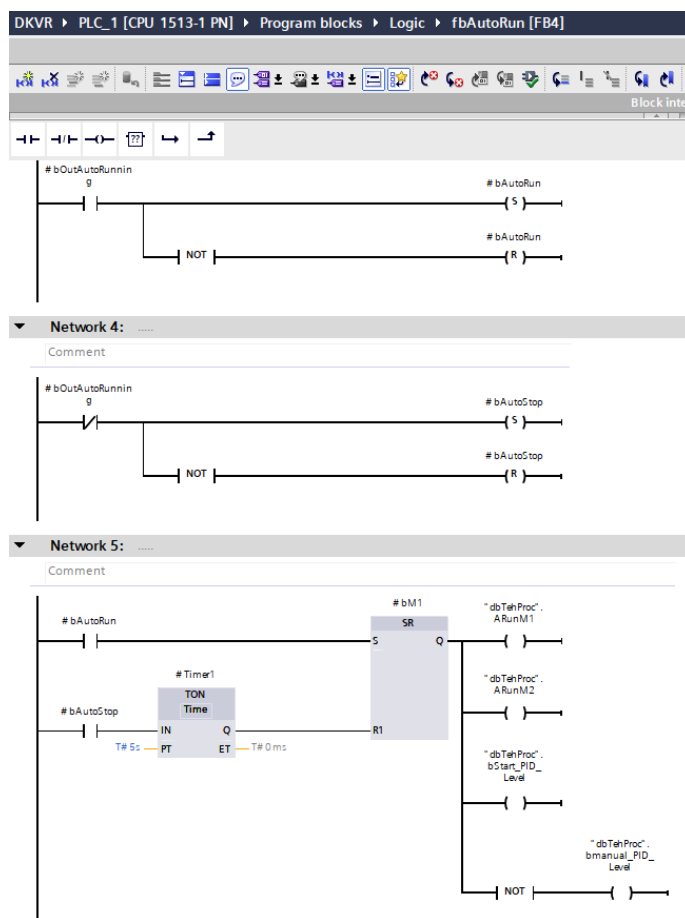


Рис. 6.10 Фрагмент програми fbAutoRun

Виклик на виконання підпрограм fbProc та fbAutoRun здійснюється в програмі Master.

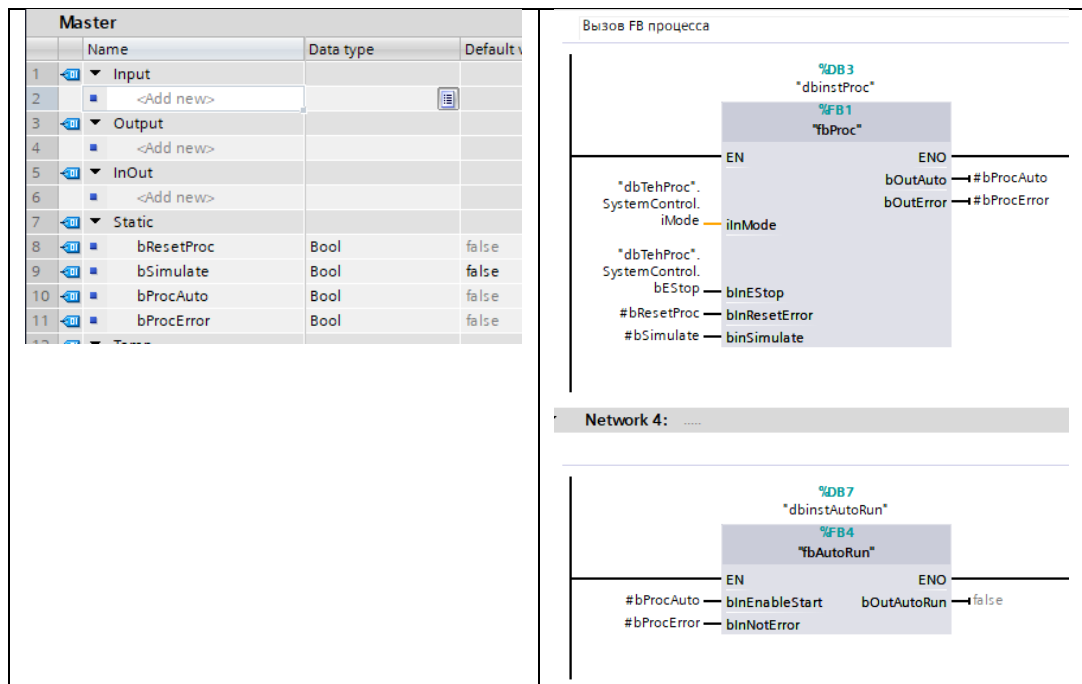


Рис. 6.11 Інтерфейс та текст програми Master

6.3 Програмна реалізація алгоритмів регулювання та їх тестування на моделі ОК

Підпрограми регулювання призначені для перевірки алгоритмів регулювання, які були розроблені в розділі 3. Ці підпрограми доцільно згрупувати в папці Cyclic.

Модель САР реалізована у функціональному блоці fbSAR, розрахунок якого виконується кожну 0.1 сек в організаційному блоці OB30. Необхідність використання саме організаційного блока OB30 зумовлена вимогою до точного визначення кроку квантування при розрахунках керуючого впливу.

Модель САР запрограмована з використанням функціональних блоків типових динамічних ланок з бібліотеки LSim (FB LSsm_Lagging і FB LSim_PT1, Lsim_I), що формують модель ОК, і типових регуляторів fbPID_Compact.

DKVR ▸ PLC_1 [CPU 1513-1 PN] ▸ Program blocks ▸ Cyclic ▸ fb

fbSAR

	Name	Data type	Default value
1	Input		
2	<Add new>		
3	Output		
4	<Add new>		
5	InOut		
6	<Add new>		
7	Static		
8	PID_Pres	*fbPID_Compact*	
9	PID_Level	*fbPID_Compact*	
10	Zap1	*LSim_Lagging*	
11	Zap2	*LSim_Lagging*	
12	ApZveno	*LSim_PT1*	
13	ApZveno_1	*LSim_PT1*	
14	ApZveno_2	*LSim_PT1*	
15	IntZveno1	*LSim_I*	
16	uDelayCycles1	ULint	10
17	uDelayCycles2	ULint	10
18	rAdd	Real	0.0

Рис. 6.12 Інтерфейс fbSAR

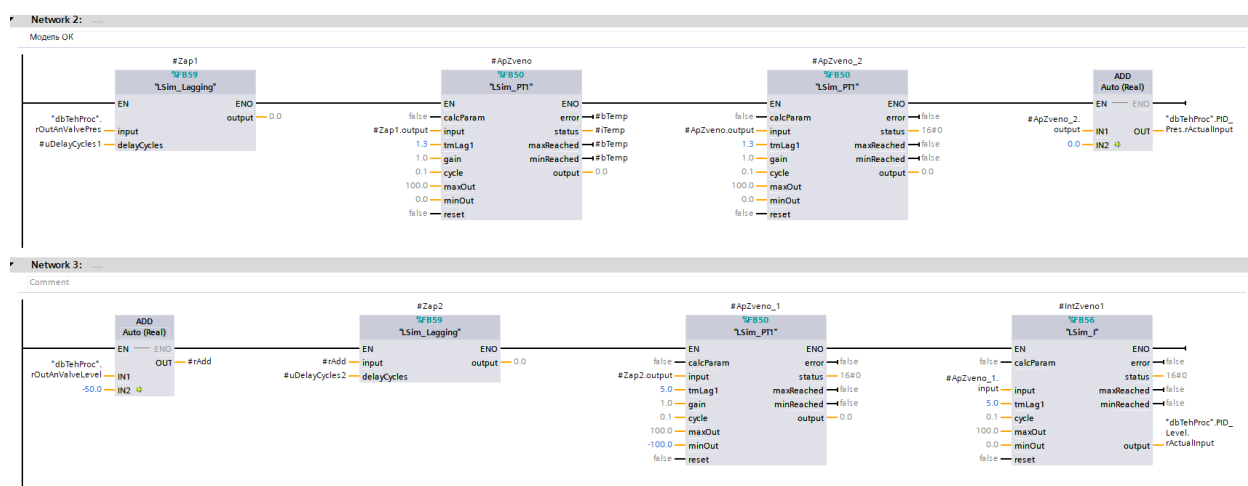


Рис. 6.13 Фрагмент програми, що реалізує модель ОК

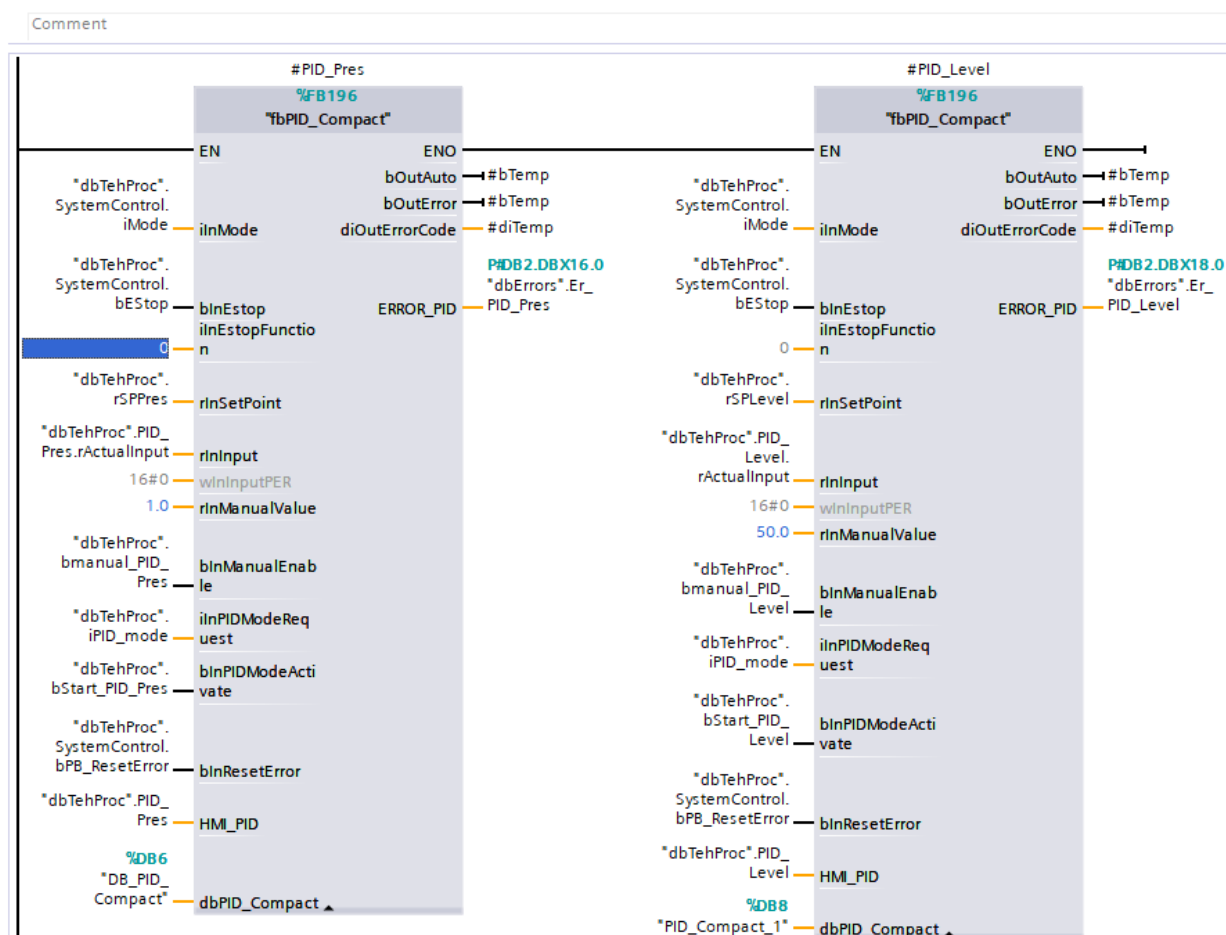


Рис. 6.14 – Фрагмент програми, що реалізує ПІД-регулятори

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

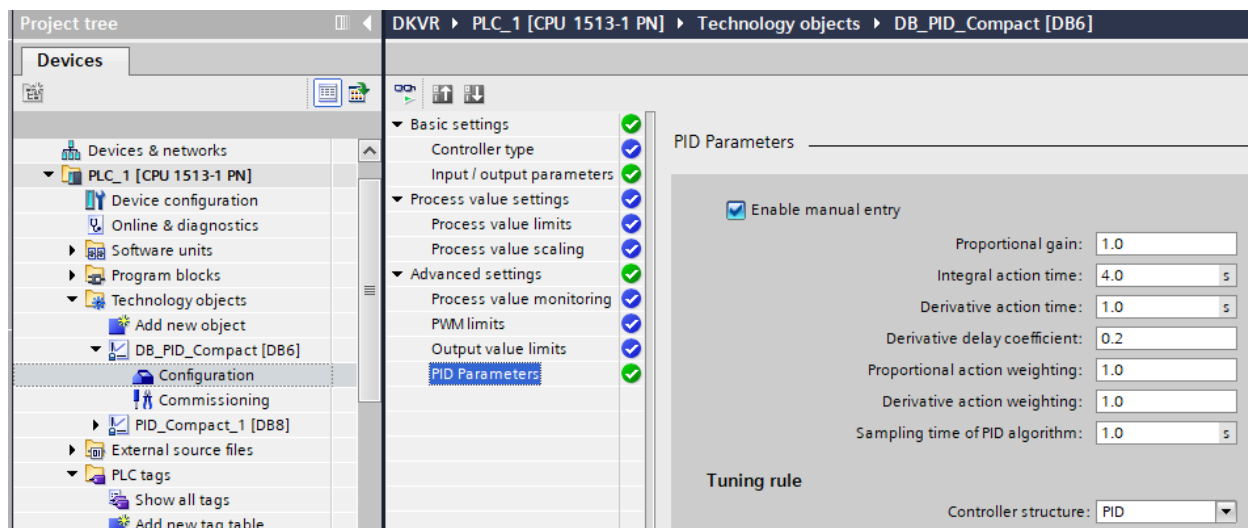


Рис. 6.15 Приклад налаштування параметрів ПІД-регулятора

Тестування проекту проводиться в режимі емуляції контролера з використанням програми S7 PLCSIM, в яку завантажується розроблений проект.

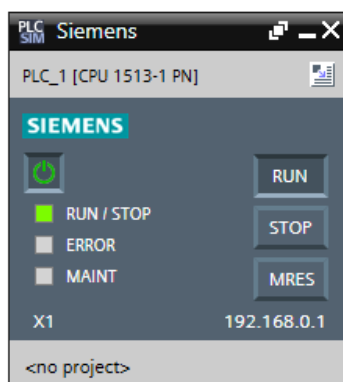


Рис. 6.16 Вигляд вікна програми PLCSIM

Результати тестування підтвердили правильність роботи програми, відповідно до вимог алгоритмів керування.

Висновок

В результаті виконання даного розділу були вивчені основні характеристики контролерів фірми Siemens сімейства S7-1500 та принципи їх програмування.

Отримано навички використання документації виробника, правильного вибору необхідних модулів контролерів і ПЗО сімейства S7-1500.

Отримано практичний досвід програмного конфігурування контролерів сімейства S7-1500 в середовищі TIA Portal та розробки програм логічного керування та регулювання із використанням типових бібліотечних функціональних блоків.

7. РОЗРОБКА SCADA ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО РОБОЧОГО МІСЦЯ ТЕХНОЛОГА І НАЛАДЧИКА САК

В даному розділі показано, яким чином інформацію, яка обробляється в контролері, можна представити оператору, що контролює хід виконання технологічного процесу.

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

Для організації зв'язку вибираємо тип сполучення «HMI connection» та встановлюємо унікальні адреси технічних засобів в мережі PROFINET.

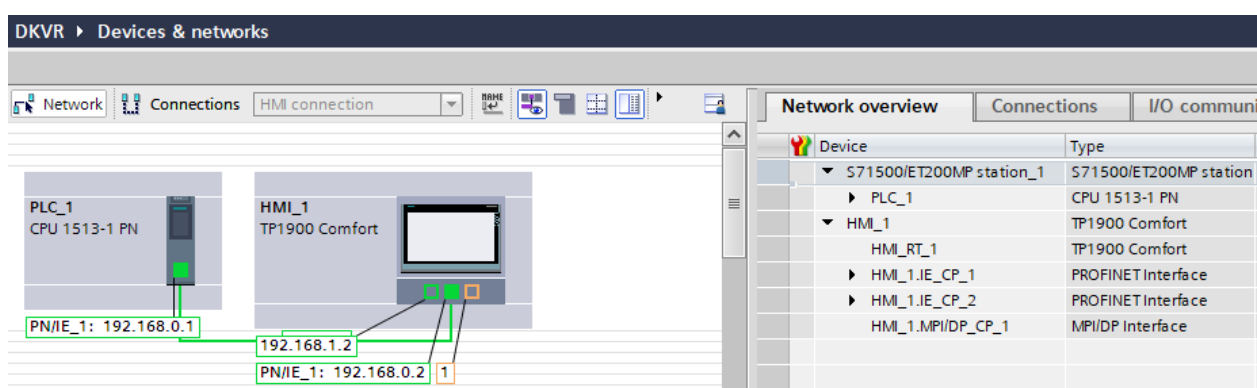


Рис. 7.1 Встановлення IP-адрес технічних засобів проекту та типу їх сполучення в мережі

Конфігурування панелі оператора TP 1900 Comfort виконуємо в розділі HMI_1/Runtime settings дерева каталогу проекту.

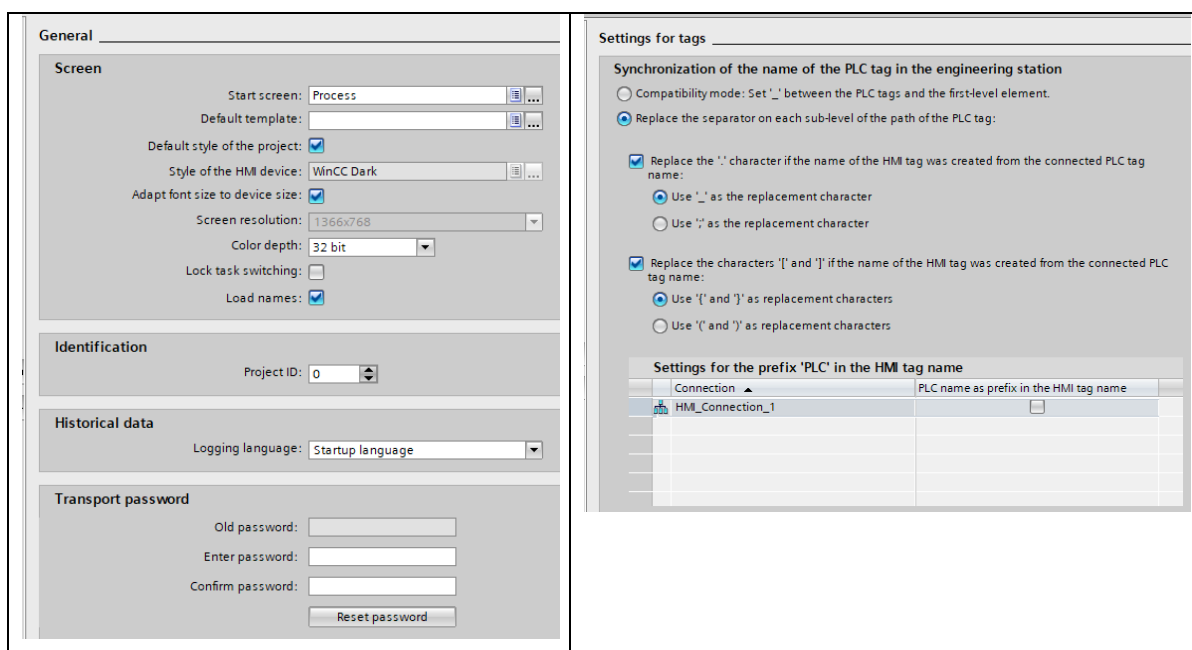


Рис. 7.2 Конфігурування TP 1900 Comfort

Щоб пов'язати між собою теги ПЛК та НМІ, створюємо таблицю НМІ-тегів Default tag table, куди за допомогою миші перетаскуємо складові блоку даних ПЛК dbTechProc.

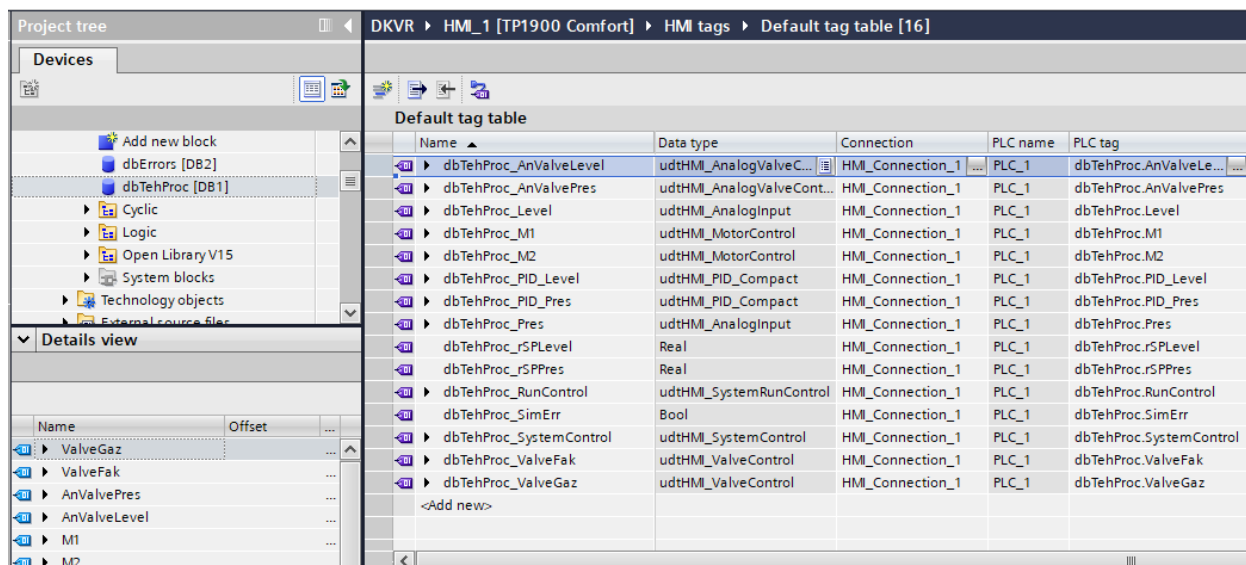


Рис. 7.3 Приклад створення таблиці НМІ-тегів

В подальшому завдяки цьому взаємозв'язку зміни в змінних ПЛК будуть відображатися в елементах НМІ.

7.2 Конкретизація функцій та структури екранів АРМ оператора-технолога.

Структура екранів АРМ оператора-технолога повинна містити в собі екрани для керування котлом:

- екран схеми установки для управління технологічним процесом;
- екран для спостерігання за регульованими змінними;
- екран для відтворення діагностичних повідомлень про роботу технологічного агрегату.

Функції екранів АРМ оператора-технолога:

- екран схеми установки надає функції управління виконавчими механізмами та електродвигунами, як в автоматичному режимі, так і в ручному;

екран для спостерігання за регульованими змінними надає можливість спостерігати за графіками в реальному часі, змінювати задане значення та налаштування регуляторам;

екран для відтворення діагностичних повідомлень надає можливість бачити повідомлення про несправності, а також переглядати повідомлення, 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 командою Add new template. Графічні елементи розташовані у вікні шаблону будуть присутні на всіх екранах, які входять в проект.

Шаблон екранів має заголовок екрану і меню перемикавання екранів АРМ. Він включає елемент відображення поточної дати і часу, назву проекту, прізвище розробника проекту. Для їх створення із розділу Toolbox проекту використаємо інструменти редагування Text field та Data/Time field, які за допомогою миші встановимо на екрані шаблону.

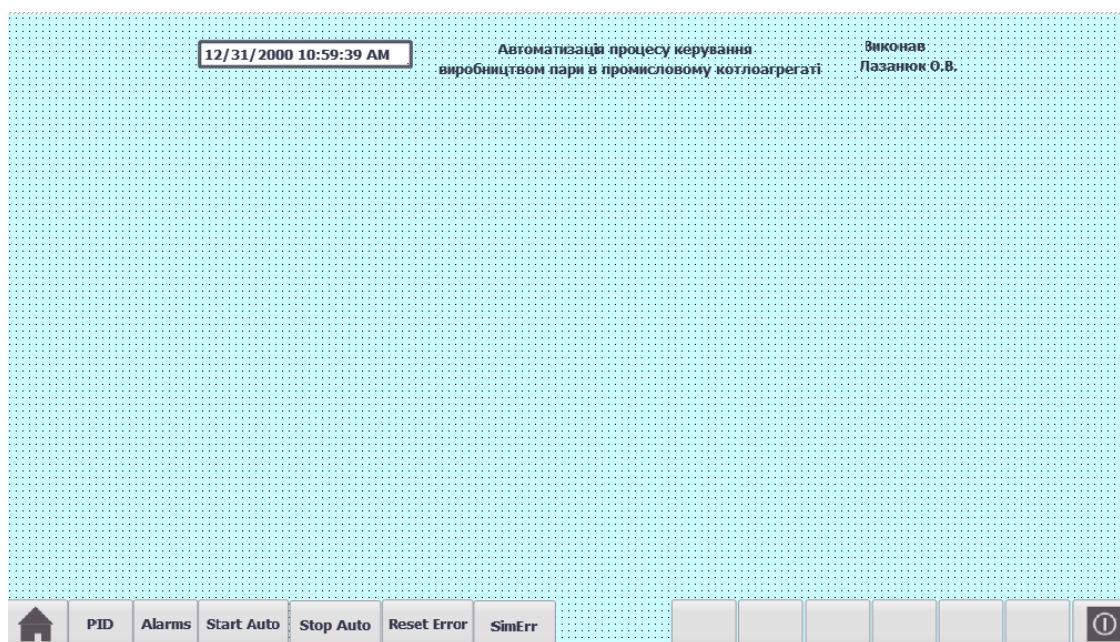


Рис. 7.4 – Загальний вигляд шаблону екранів

Меню переключення екранів складається з набору кнопок, що дозволяють виконувати перемикання між різними графічними вікнами. За допомогою миші перемістимо інструмент редагування Button із розділу Toolbox на екран шаблону. Для перемикання вікон використовуються спеціальна системна функція ActivateScreen, яку слід пов'язати із властивістю Events кожної кнопки, вказавши ім'я екрану.

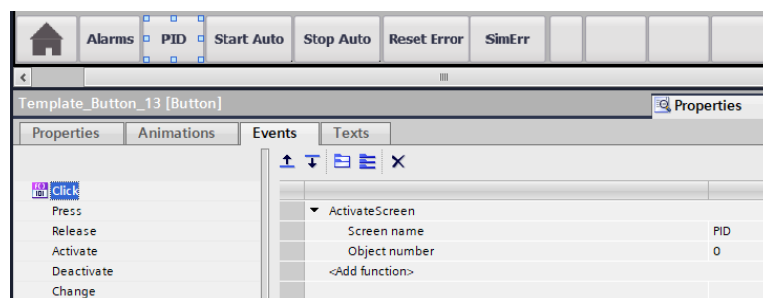


Рис. 7.5 – Приклад використання системної функції «Activate Screen» для перемикання екранів графічного інтерфейсу

Для кожної одиниці обладнання спочатку за допомогою команди Add new pop-up screen створюємо пусті спливаючі вікна Pop-up screens, а потім заповнюємо їх відповідними зображеннями з розділу бібліотеки SOL (див. рис. 7.6).

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, а також на вкладці Events вказуємо системну команду ShowPopupScreen (див. рис. 7.7).

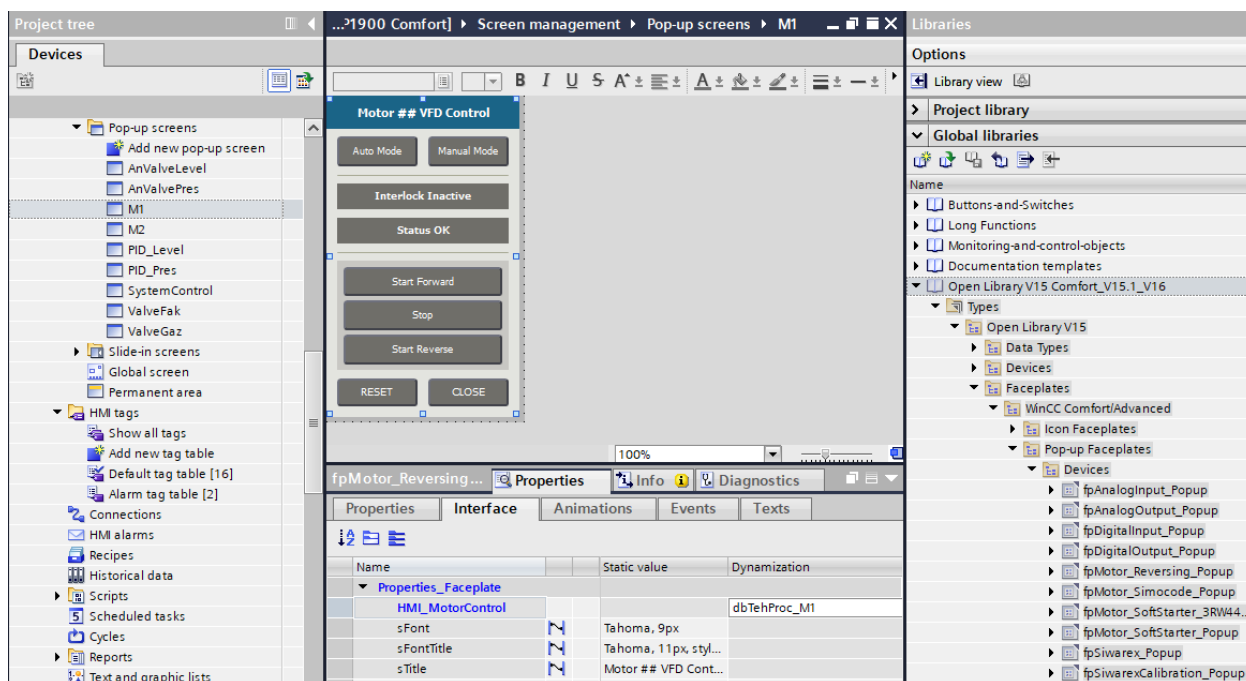


Рис. 7.6 Приклад створення спливаючих вікон для керування електроприводом

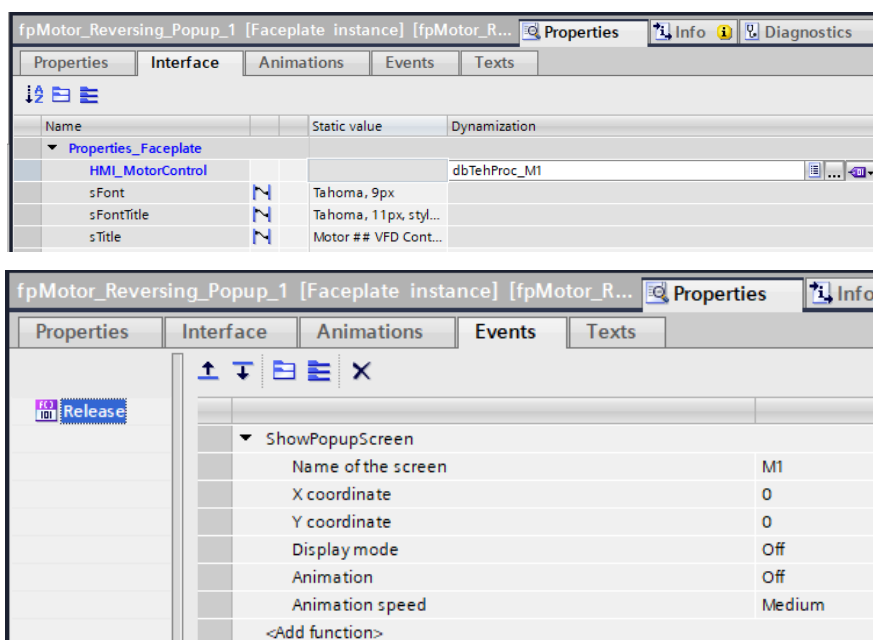


Рис. 7.7 Приклад визначення параметрів впливаючого вікна

Основний екран Process містить схематичне зображення котла з нанесеними на нього елементами відображення і управління. Зображення створено в графічному редакторі TIA Portal з використанням стандартних елементів графічної бібліотеки цього редактора. Встановлені на схемі графічні

елементи відображення і управління дозволяють оператору контролювати стан обладнання системи і значення технологічних параметрів, а також керувати обладнанням системи. Для цього на проекцію екрану Process переносимо за допомогою миші з відповідного розділу бібліотеки SOL піктограми обладнання.

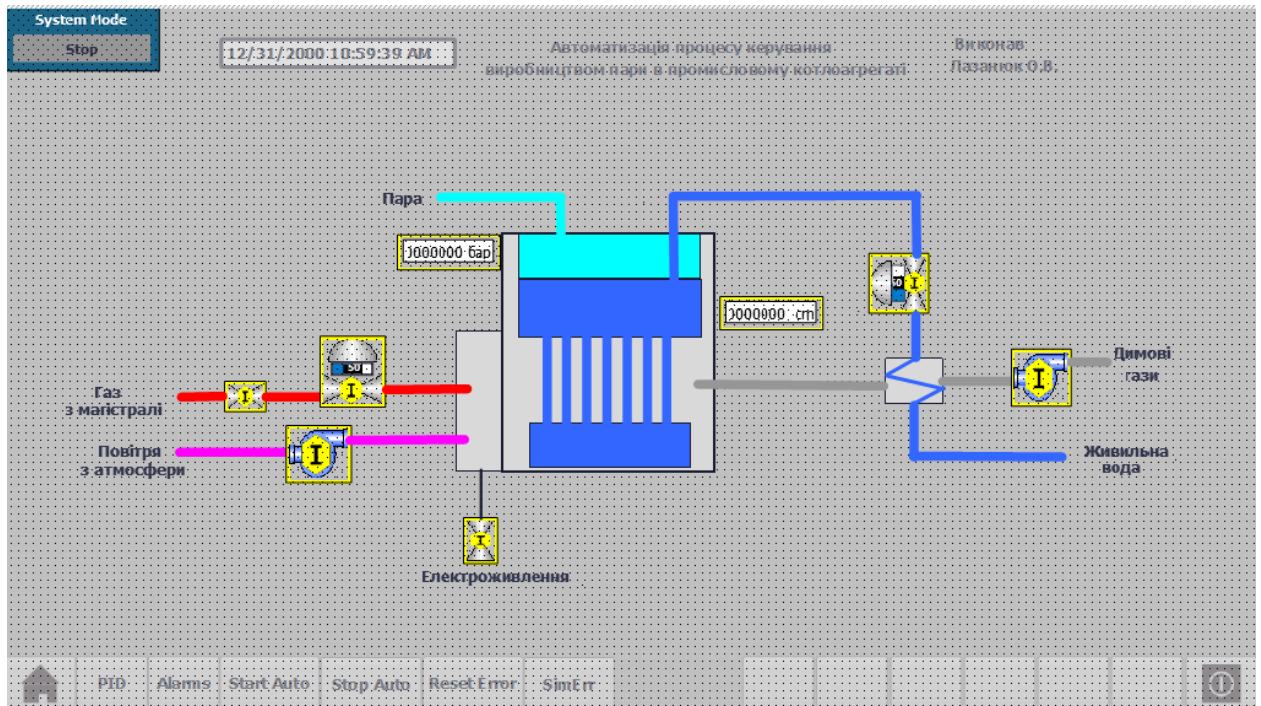


Рис. 7.8 Екран схеми установки Process

Кожну піктограму (Faceplate instance) пов'язуємо із відповідним тегом та спливаючим вікном. Натискання на зображення піктограми забезпечить відкривання зображення відповідного спливаючого вікна конкретної одиниці обладнання, оскільки у властивості Events піктограми вписано виконання системної функції ShowPopUpScreen (рис. 7.9).

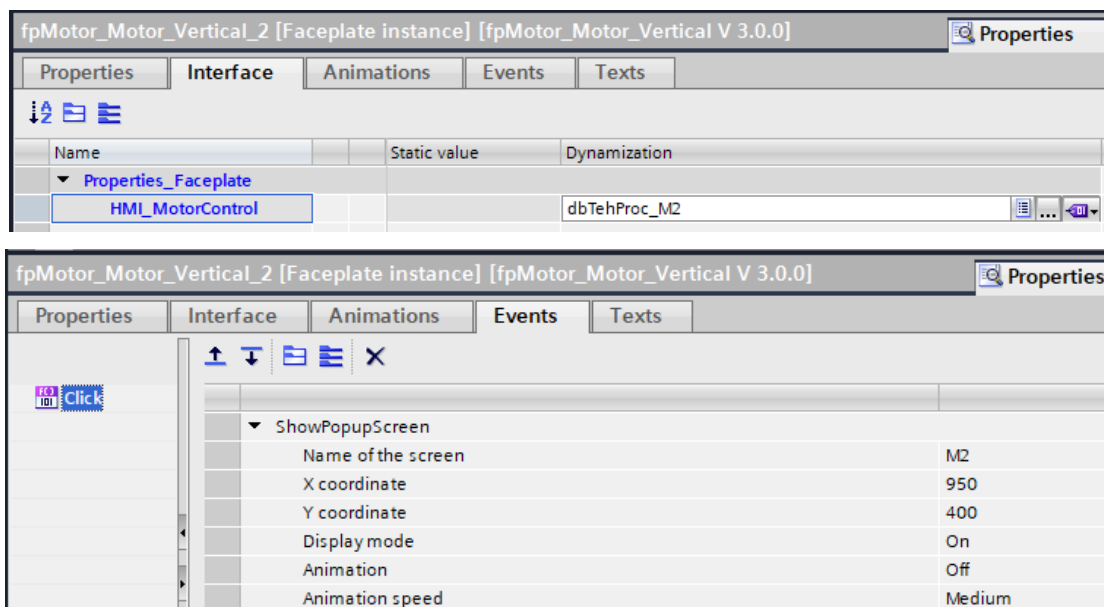


Рис. 7.9 Приклад налаштування піктограми електроприводу

Для реєстрації змін основних технологічних параметрів та налаштування параметрів ПІД-регуляторів в проекті передбачений екран PID (рис. 7.10), який може бути використаний наладчиком САК.

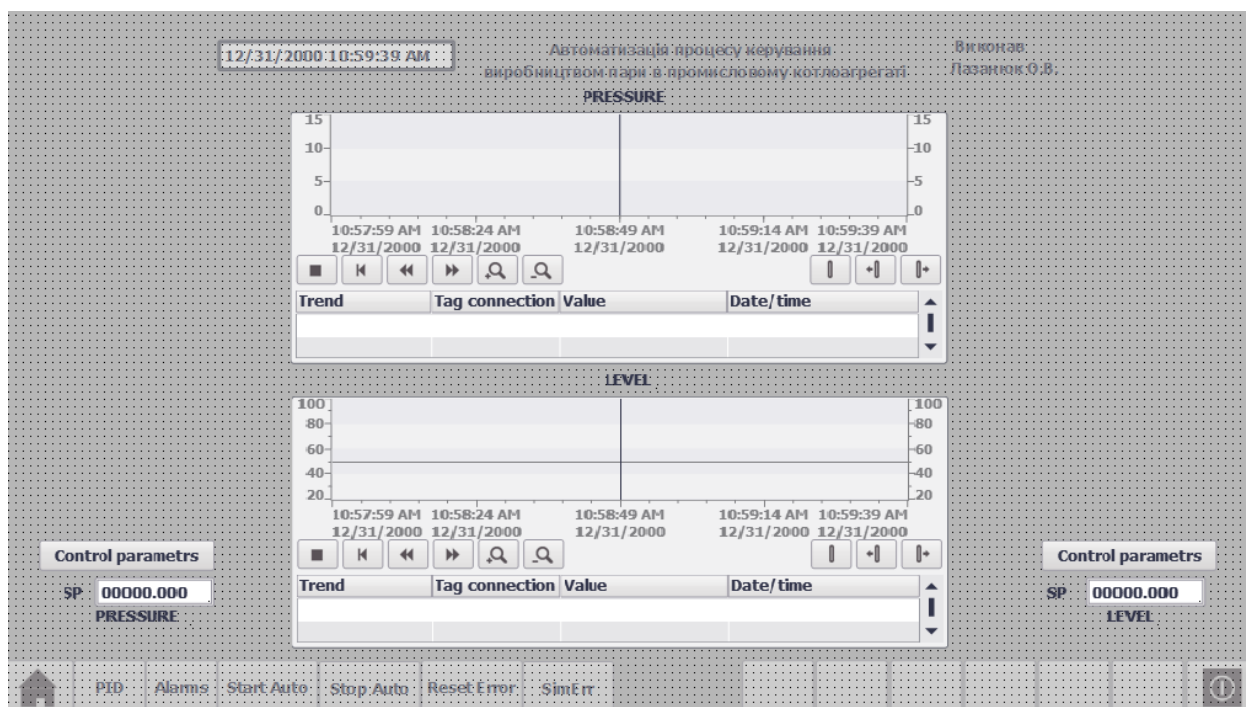


Рис. 7.10 Екран графіків

Для побудови графіків зміни тиску пари та рівня води в котлі використовується елемент Trend View із стандартної бібліотеки. Приклад його налаштування наведений на рис. 7.11.

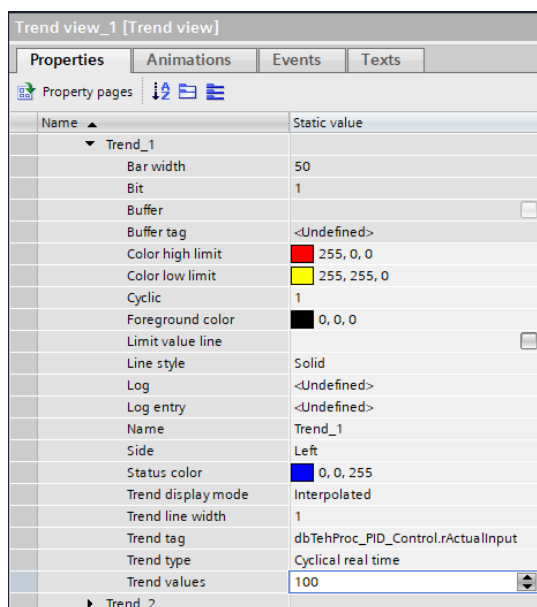


Рис. 7.11 Вікно налаштування елементу Trend

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

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

Налаштування цих елементів відображення показано на рис. 7.12.

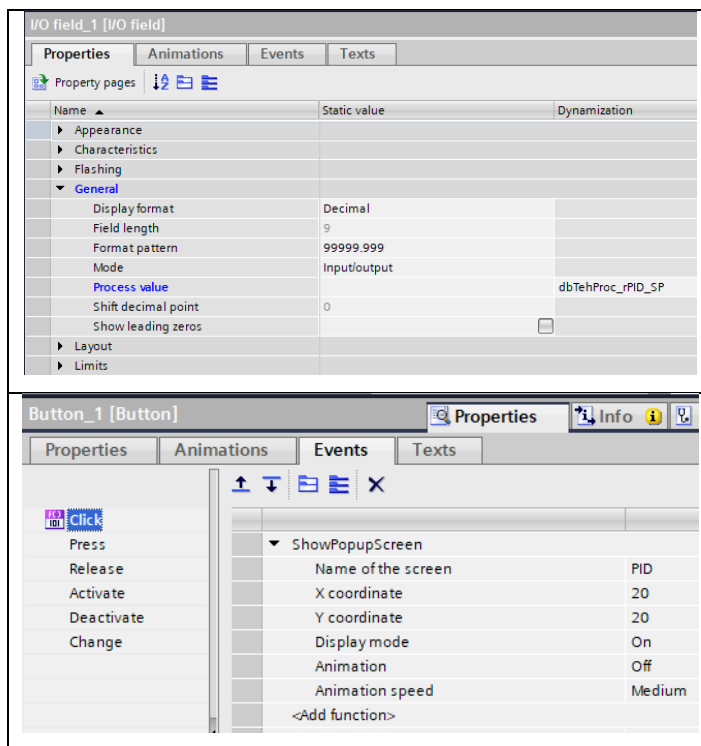


Рис. 7.12 Налаштування вікна вводу/виводу та кнопки

Для інформування оператора про стан технологічного процесу 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 НМІ (рис. 7.13).

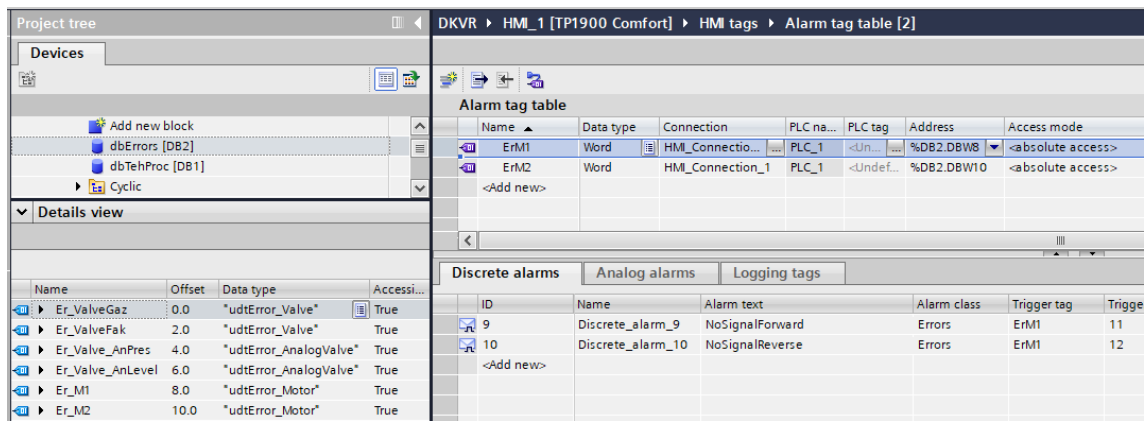


Рис. 7.13 Приклад прив'язки тегів dbErrors з HMI-тегами

Кожний біт HMI-тега з Alarm tag table сортуємо по типам та по класам Errors або Warnings (див. рис. 7.13). Кожному з цих бітів відповідає своє повідомлення (Alarm text).

Для відображення цих повідомлень для оператора створюємо екран Alarms.

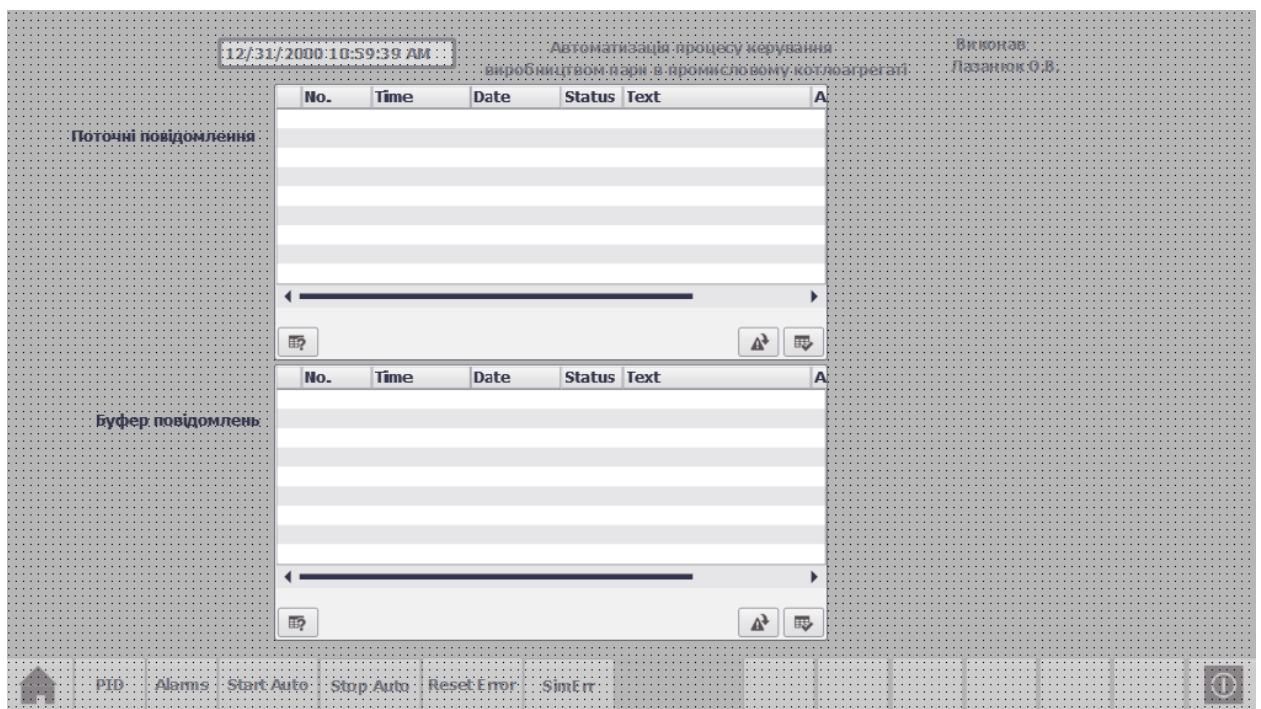


Рис. 7.14 Екран Alarms повідомлень про несправності

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.

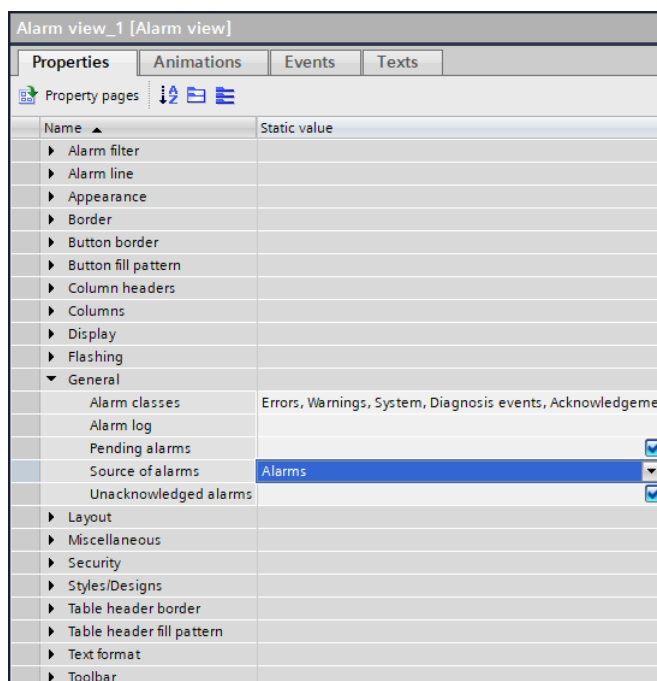


Рис. 7.15 Налаштування властивостей елементу Alarm View

При цьому можуть виводитися на екран повідомлення різних класів.

7.5 Тестування системи керування.

Тестування проведемо в режимі емуляції контролера з використанням програми S7-PLCSIM, в середовище якої завантажуюємо частину проекту PLC_1 після його компіляції.

Відображення екранів виконується в режимі симуляції в середовищі WinCC Runtime Advanced, куди після компіляції завантажуюємо частину проекту HMI_1.

В залежності від вимог виробництва оператор має змогу налаштувати систему на режими: стоп, ручний, автоматичний, індивідуальний.

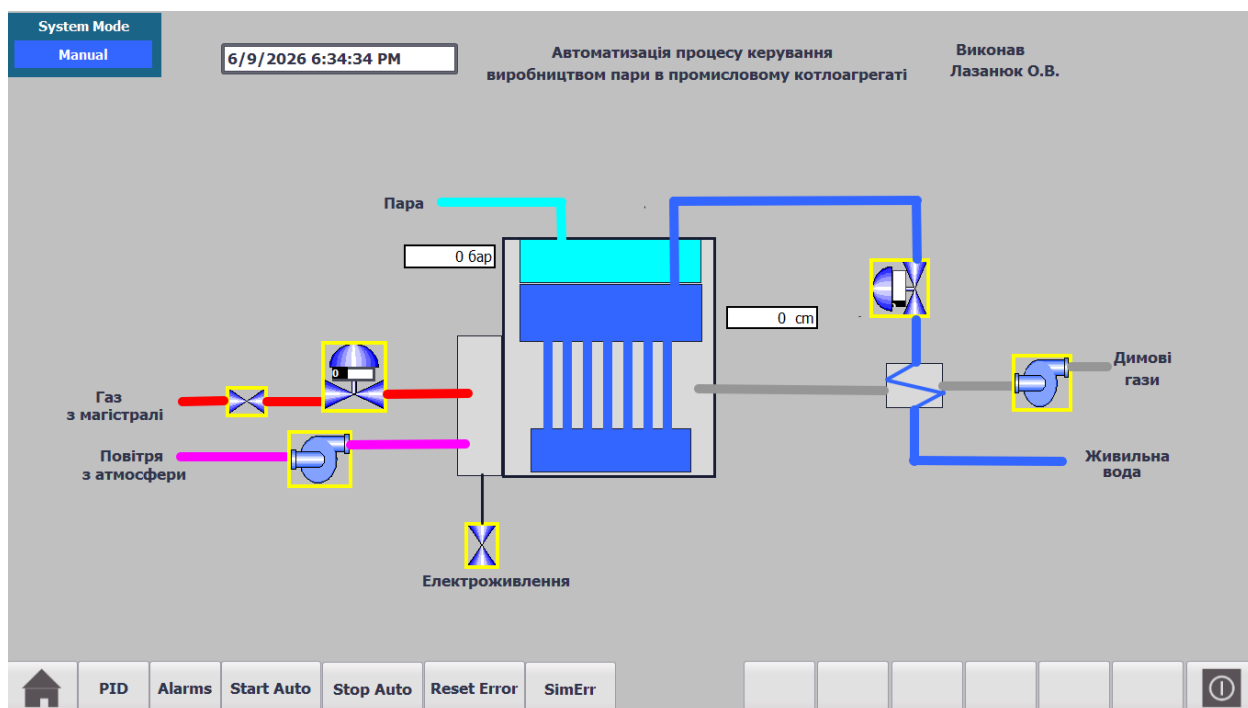


Рис. 7.16 Схема установки в ручному режимі

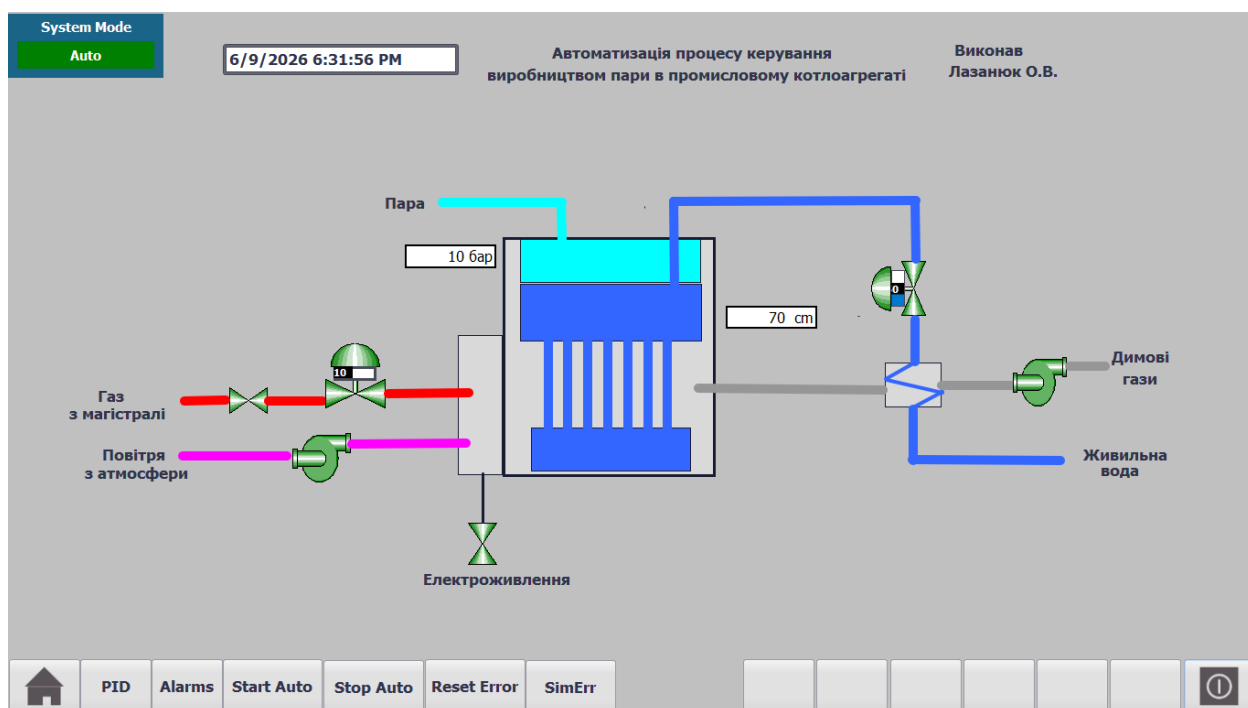


Рис. 7.17 Схема установки в автоматичному режимі

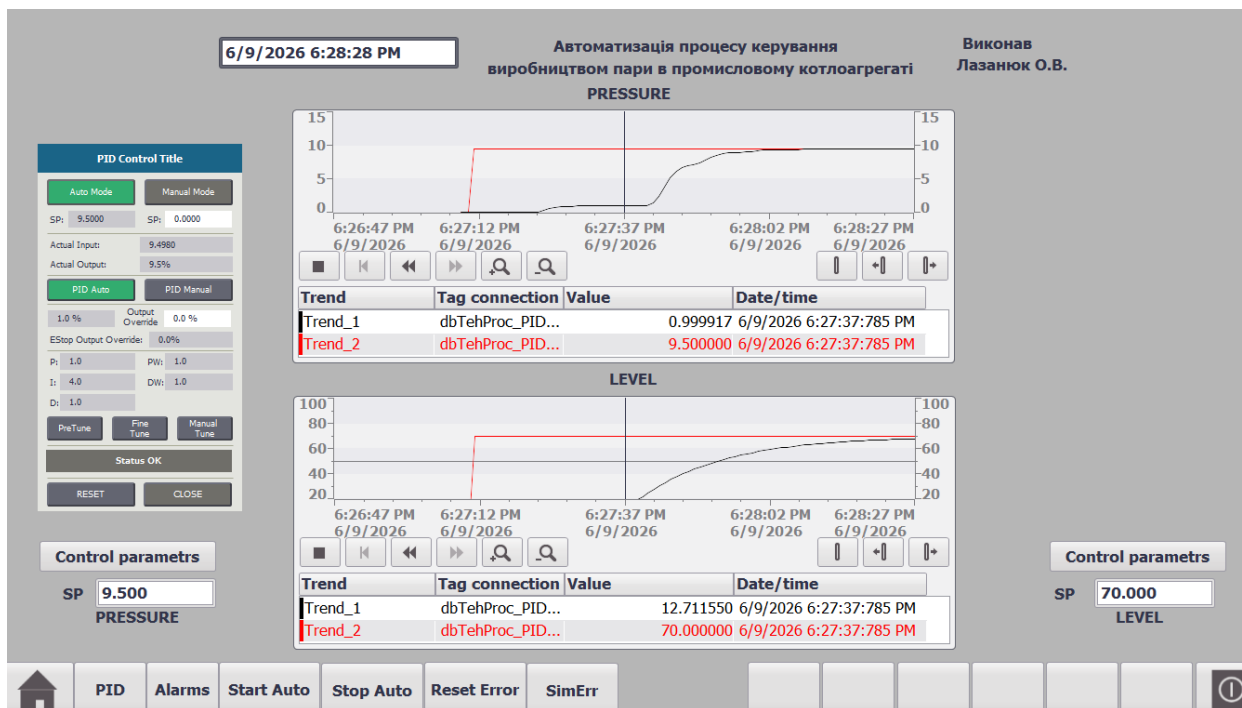


Рис. 7.18 Екран PID в тестовому режимі

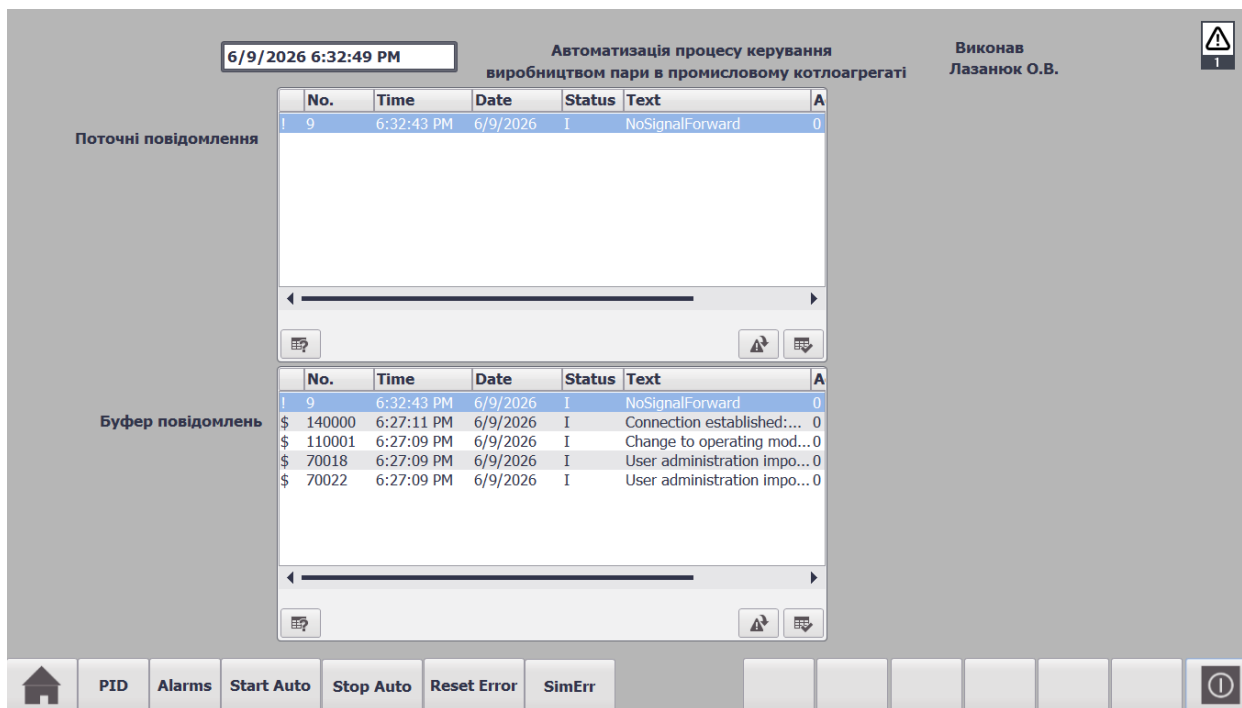


Рис. 7.19 Екран Alarms в тестовому режимі при імітації несправності

Висновок: у цій частині роботи розроблений інтерфейс для SCADA системи управління технологічним процесом виробництва пари. 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, які може використати в своїй роботі наладчик САК.

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

8. РОЗРОБКА ФРАГМЕНТІВ ДОКУМЕНТАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕСПЕЧЕННЯ САК, ВКЛЮЧАЮЧИ ПИТАННЯ ОХОРОНИ ПРАЦІ

8.1. Характеристики технологічного об'єкта керування та опис основних технічних рішень

Для реалізації системи автоматичного керування (САК) котлом ДКВР запропонована наступна технічна структура (рис. 8.1), що покращує завадостійкість системи керування.

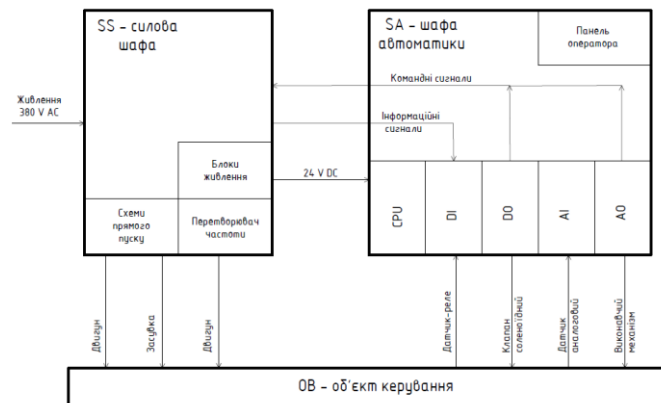


Рис. 8.1 Структура САК

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.

Відповідно до складеної технічної структури системи керування розроблено комплект її проектної документації, зміст якого визначається результатами вибору комплексу технічних засобів у п'ятому розділі. Комплект включає наступні документи:

Графічні:

- 1 – схему автоматизації;
- 2 – принципову електричну схему (ПЕС) керування електроприводу;
- 3 – ПЕС живлення;
- 4 – схему мережних 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 монтажній панелі шафи 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 реалізує основні функції контролю та регулювання, для обміну інформацією по мережі він 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 8xU/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 системи керування, обсяг автоматизації, а також 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 вхідних сигналів обрані з уніфікованим вихідним сигналом струмовим (4...20мА DC), вихідні аналогові сигнали струму (4...20 мА DC) і сприймаються виконавчими механізмами.

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

- 1 – 2 керування та контроль стану електроприводів M1, M2;
- 3 - 4 – керування та контроль стану клапан FV3 та електрозапалу EV4;
- 5 - 6 – контроль і регулювання тиску пари та рівня води в котлі;
- 7, 8 – контроль тиску повітря і газу на вході в пальник;
- 9 – контроль розрідження в топці;
- 10 – контроль виходу пари на виході з котла;
- 11, 13 – контроль температури живильної води до і після економайзера;
- 12 – контроль температури димових газів після економайзера

У контурах 1 – 4 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 5 реалізована система контролю та регулювання тиску в котлі. Розглянемо дію цього контуру. Від датчика тиску з уніфікованим перетворювачем PY/5 пропорційний тиску сигнал струму 4...20 мА DC подається на регулятор PC/5, який сприймає також сигнал заданого значення НІС/7 і формує керуючий вплив у вигляді 4...20 мА DC, що подається на виконавчий механізм PCV/5 клапану подачі газу в пальник. Регулятори реалізовані програмно в ПЛК. В контурі передбачена функції ручного задатчика і індикації регульованої змінної НІС/7, які реалізовані в панелі оператора. Контур 6 регулювання рівня в котлі працює аналогічно.

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 М1 здійснюється від мережі типу TN через автомат захисту електродвигуна Q1, клеми контактора Q3, кабель W15 та вимикач ОВ-Q1.

Місьцеве 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 Н2, 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, що підключаються до клем SA-X1, подаються сигнали 0 або 24 V DC, які характеризують поточний стан апаратури керування електроприводами M1, M2, що встановлена у силовій шафі і забезпечує локальне (місцеве) керування. По кабелям W1, W8, W17, що підключається до клем SA-X1, передаються сигнали від датчиків-реле тиску PS/7, PS/8, PS/9. По кабелям W13, W14, W16, що підключається до клем SA-X1, передаються сигнали від датчиків-реле температури TS/11, TS/12, TS/13. По кабелю W12, що підключається до клем SA-X1, передається сигнал від датчика-реле наявності факелу RS/14.

На дискретних виходах модуля DQ 16x24VDC/0.5A BA (6ES7522-1BH10-0AA0) формуються сигнали 0 або 24 V DC, які по кабелям W4, 5, що підключаються до клем SA-X1, передаються у силову шафу в схему керування електроприводами M1, M2. Також до виходу модуля дискретних виходів по кабелям W3, W6, що підключаються до клем SA-X1, підключаються проміжні реле K3, K4 для керування клапанами FV/3, EV/4.

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, 11, що під'єднуються до клем SA-X1, підключаються датчики з уніфікованим виходом 4...20 mA DC: тиску пари в котліPY/5, рівня води в котлі LY6, витрат пари з котла FY10.

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 4...20 mA DC, які за допомогою кабелів W13, 14, що підключаються до клем SA-X1, передає сигнали керування на виконавчі механізми клапанів PCV/5, LCV6.

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

8.6 Охорона праці при монтажі, налагодженні та експлуатації АСКТП

8.6.1 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).

8.6.2. Безпека при роботі з паровими котлами регулюється жорсткими нормативними актами України, оскільки це об'єкти підвищеної небезпеки. Основними документами тут є Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском, Правила безпеки систем газопостачання

(якщо котел газовий) та Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС).

Нижче наведено чіткі правила безпеки для обох етапів: від інженерного монтажу до безпосереднього керування через SCADA.

1. Безпека при монтажі, експлуатації та ремонті технічних засобів автоматизації

Цей етап стосується монтажників, КВПівців (налагоджувальників) та ремонтного персоналу.

При монтажі та налагодженні:

Знеструмлення та блокування: Усі монтажні роботи на електричних лініях живлення датчиків, виконавчих механізмів та контролерів (ПЛК) мають виконуватися при повній відсутності напруги. На комутаційних апаратах обов'язково вивішується плакат: *«Не вмикати! Працюють люди»*.

Перевірка заземлення: Усі металеві корпуси щитів автоматизації, КВП, виконавчих механізмів та захисних труб для кабелів повинні бути надійно заземлені (приєднані до загального контуру заземлення) відповідно до ПУЕ та ПБЕЕС.

Робота з первинними датчиками тиску та температури: Монтаж датчиків, що контактують із робочим середовищем (пара, гаряча вода), дозволяється проводити тільки на відключених та охолоджених трубопроводах, де тиск скинуто до нуля. Відсічна арматура на імпульсних лініях має бути повністю закрита.

При експлуатації та ТО (технічному обслуговуванні):

Перевірка захистів та блокувань: Категорично забороняється робота котла з несправними або відключеними технологічними захистами (наприклад, захист від упушення рівня води, захист від підвищення тиску пари, захист від згасання факела пальника). Перевірка справності автоматичних захистів має проводитися за графіком.

Іскробезпека та вибухозахист: Якщо котел працює на газі чи рідкому паливі, у приміщенні котельні датчики та виконавча арматура у

вибухонебезпечних зонах повинні мати відповідне виконання (наприклад, іскробезпечне коло 'Ex i' або вибухонебезпечна оболонка 'Ex d'). Не допускається порушення герметичності цих приладів.

Аналіз загазованості: Автоматична система сигналізації довибухових концентрацій газу та метану/оксиду вуглецю повинна працювати безперервно.

При ремонті:

Оформлення допуску: Ремонтні роботи в котельній, пов'язані з автоматикою, мають виконуватися за нарядом-допуском (особливо у вибухонебезпечних зонах або всередині топки/барабана котла).

Метрологічна повірка: Після ремонту або заміни датчиків, які відповідають за безпеку (датчики тиску пари, рівня в барабані), вони в обов'язковому порядку проходять калібрування або повірку.

8.6.3. Правила техніки безпеки для оператора (диспетчера) SCADA-системи

Оператор здійснює дистанційне керування, тому його безпека та безпека котла залежать від ергономіки робочого місця, психофізіологічного стану та чіткого дотримання інструкцій.

Організація робочого місця та електробезпека:

Електробезпека комп'ютера: Перед початком зміни оператор повинен візуально перевірити цілісність кабелів живлення ПК, моніторів та заземлення системного блоку. Забороняється користуватися пошкодженими розетками чи заливати апаратуру рідиною.

Ергономіка та мікроклімат: Оскільки робота сидяча і пов'язана з постійним напруженням зору, екран монітора має знаходитися на відстані 60 см від очей. Освітлення в операторській має бути достатнім, але без бліків на екрані. Обов'язково потрібно дотримуватися регламентованих перерв для відпочинку очей.

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%.
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.

Професійні правила безпеки при керуванні котлом:

Контроль аварійних уставка (Alarm Management): Оператор не має права ігнорувати, вимикати звукову сигналізацію або «квитувати» (скидати) аварійні повідомлення в SCADA без з'ясування та усунення причини виникнення тривоги.

Дії при відмові SCADA (Втрата зв'язку / "No Connection"): У разі зависання комп'ютера, збою операційної системи або втрати зв'язку з ПЛК (контролером), оператор повинен діяти за аварійною інструкцією:

1. Перевести керування котлом на дублюючий пульт (якщо є фізичний аналоговий щит).
2. Якщо візуальний контроль за рівнем води та тиском пари повністю втрачено і відновити зв'язок оперативно неможливо — котел підлягає аварійній зупинці вручну за допомогою фізичних кнопок «СТОП» (які зазвичай винесені окремо від комп'ютера).

Заборона несанкціонованого доступу: Оператор повинен працювати строго під своїм обліковим записом (паролем). Забороняється змінювати критичні технологічні уставки захистів в інженерному меню SCADA, якщо це

не входить до його повноважень або виконується без погодження з технологом/службою КВПіА.

Передача зміни: При передачі зміни оператор зобов'язаний усно та через журнал логів SCADA повідомити наступника про всі зауваження до роботи автоматики, датчиків чи виконавчих механізмів (наприклад, якщо якийсь клапан нестабільно працює в автоматичному режимі та переведений у ручний 'Manual').

Висновки за розділом

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

Розроблений комплект включає основні документи технічного забезпечення системи автоматизації керування котлом ДКВР. 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.

Список використаних джерел

1. 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
2. Хобін В. А. 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. <https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONAHТcnv.BibRecord.157312>
3. Хобін В.А., Світий І.М. Теорія автоматичного керування: Посібник до виконання комплексної курсової роботи. Одеська національна академія харчових технологій, 2020. – 277 с.
4. Муратов В. Г. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади [Текст] : навч. посіб./ В. Г. Муратов. — Вид. 2-ге, допов. — Київ : Освіта України, 2016. — 364 с. <https://elc.library.onaft.edu.ua/libraryw/DocumentDescription?docid=OdONAHТcnv.BibRecord.155904>
5. Конспект лекцій "Ідентифікація та моделювання об'єктів автоматизації" для студентів спеціальності 151 / Укладач В.А. Хобін. – Одеса: ОНАХТ, 2019. – 97 с.
6. Хобін В.А. Конспект курсу лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного керування» частина1, для студентів спеціальності 151 денної та заочної форм навчання. – Одеса: ОНАХТ, 2019. – 112 с.
7. Хобін В.А. Конспект курсу лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного керування» частина 2, для студентів спеціальності 151 денної та заочної форм навчання. - Одеса: ОНАХТ, 2019. - 87 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>		
PY/5	Датчик тиску пари JUMO dTRANS p31	1	
LY/6	Датчик диференціального тиску Сапфір 22ДД	1	
FY/10	Датчик витрат пари Yokogawa digitalYEWFO DY	1	
PS/7,8,9	Датчик-реле тиску для газу і повітря Dungs GWA6	3	
TS/11,12, 13	Датчик-реле температури KPS 83 100-200 °C	3	
PCV/5,6	Регулюючий сидельний клапан ESG з електроприводом 4...20 мА	2	
FV/3	Клапан газовий відсічний ZB-2-GAZES	1	
EV4/ RS14	Запальний пристрій з контролем полум'я ЗЗП-3	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	

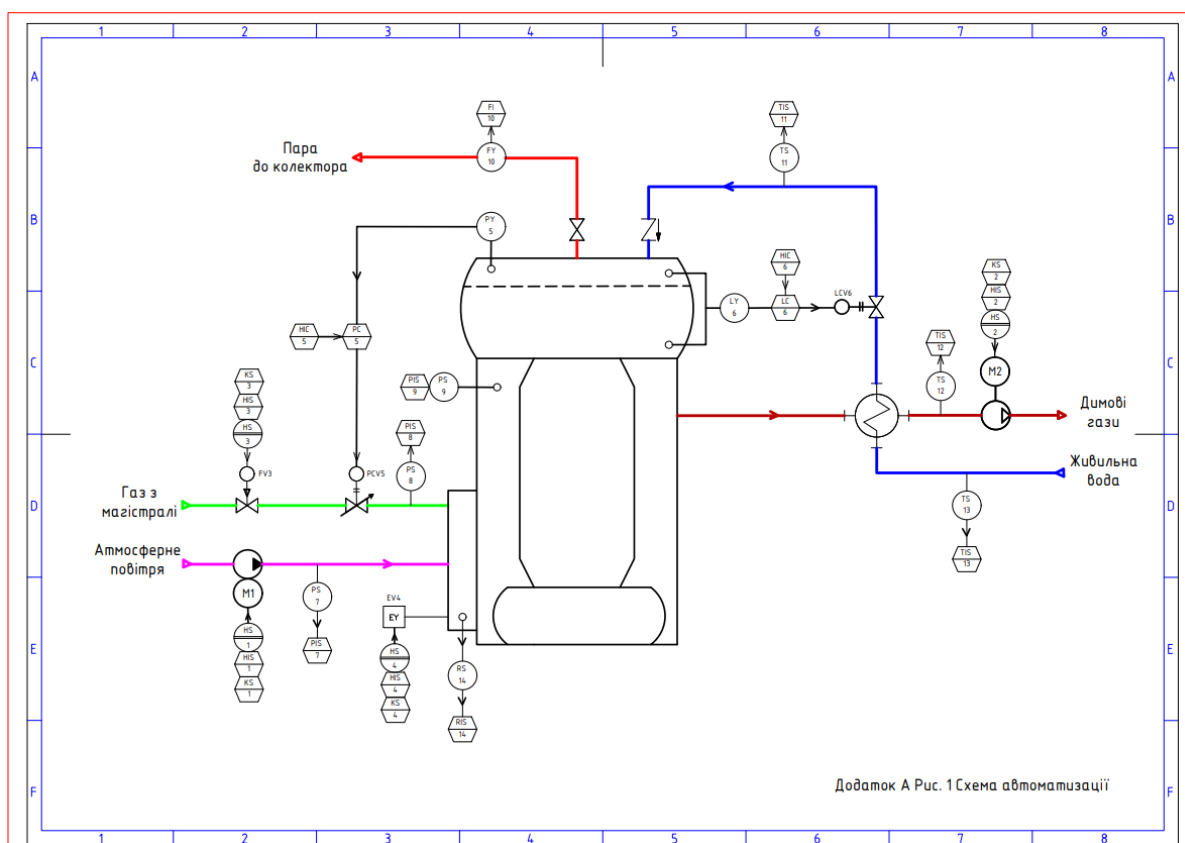


Рис. 1 Схема автоматизації

ДОДАТОК Б Документація до принципів електричних схем

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	
PS/7,8,9	Датчик-реле тиску для газу і повітря Dungs GWA6	3	

TS/11,12,13	Датчик-реле температури KPS 83 100-200 °C	3	
RS14	Запальний пристрій з контролем полум'я ЗЗП-3	1	
	<u>DO</u>		
PLC2	модуль DQ 16x24VDC/0.5A BA (6ES7522-1BH10-0AA0)	1	
K3, K4	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	
PY/5	Датчик тиску пари JUMO dTRANS p31	1	
LY/6	Датчик диференціального тиску Сапфір 22ДД	1	
FY/10	Датчик витрат пари Yokogawa digitalYEWFO DY	1	
	<u>AO</u>		
PLC4	Модуль АО 2xU/I/6ES7 (532-5NB00- 0AB0)	1	
F5	Запобіжник 50F, 1A, 5x20мм K206: 10921	1	
PCV/5,6	Регулюючий сидельний клапан ESG з електроприводом 4...20 мА	2	

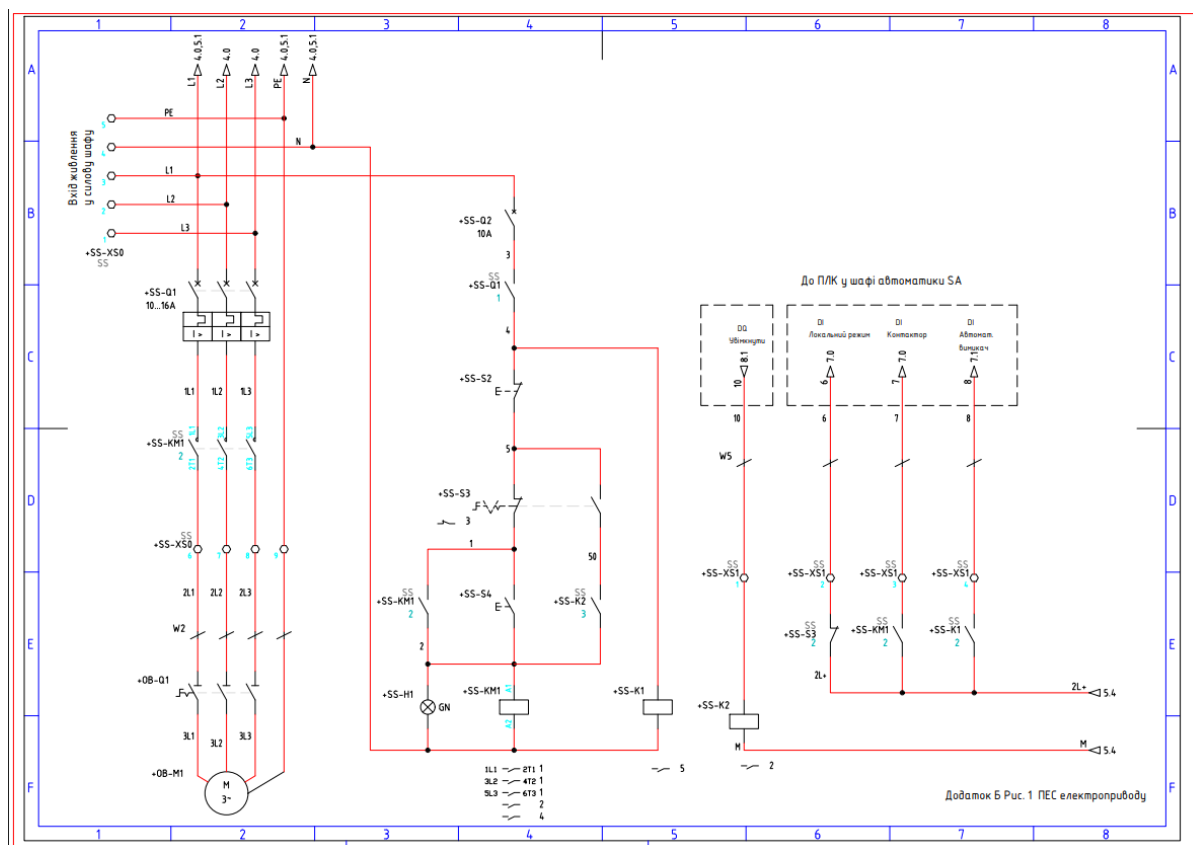


Рис. 2 ПЕС електроприводу

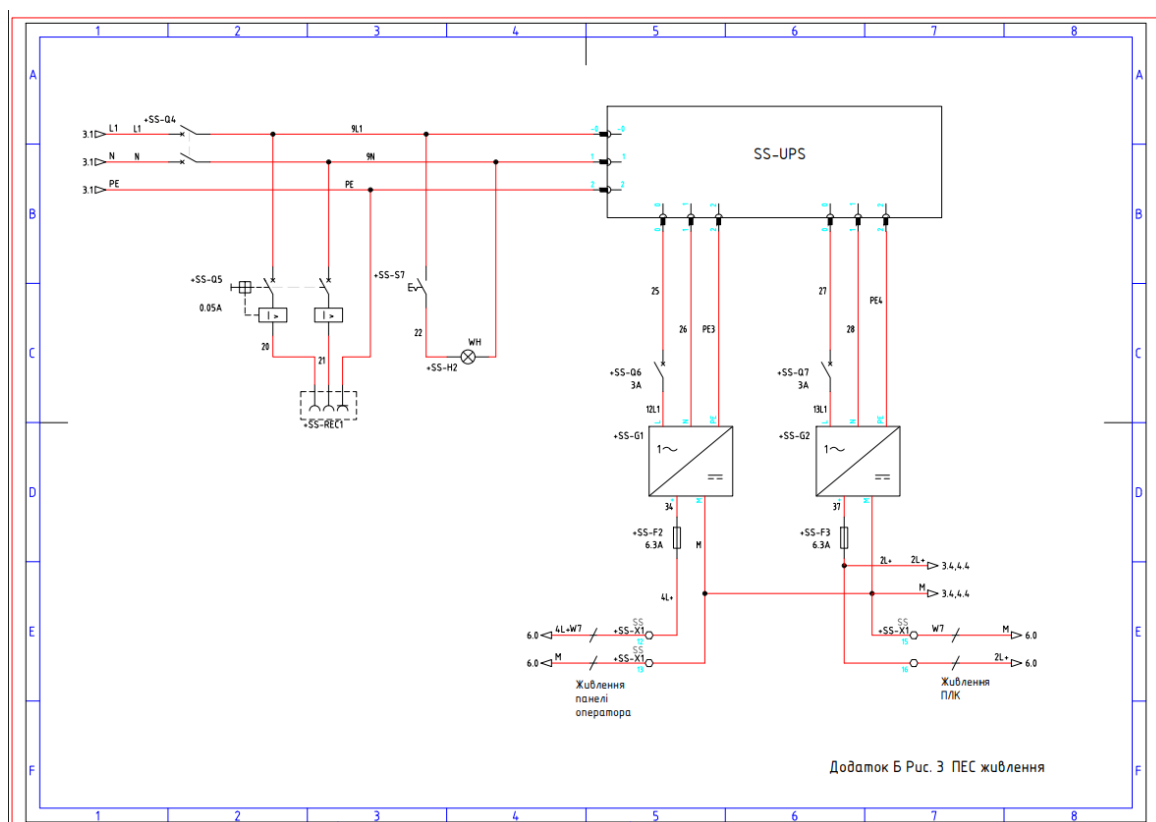


Рис. 3 ПЕС живлення

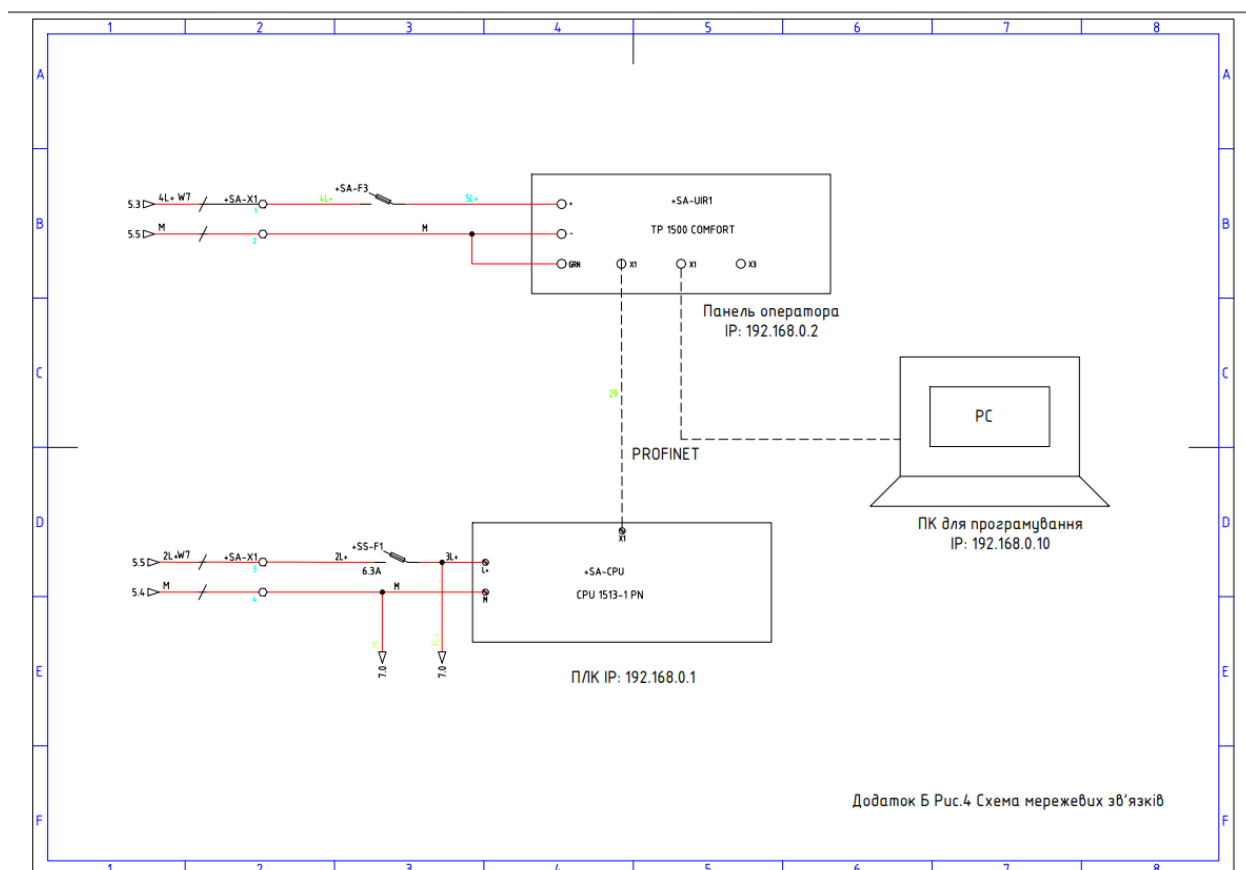


Рис. 4 Схема мережевих зв'язків

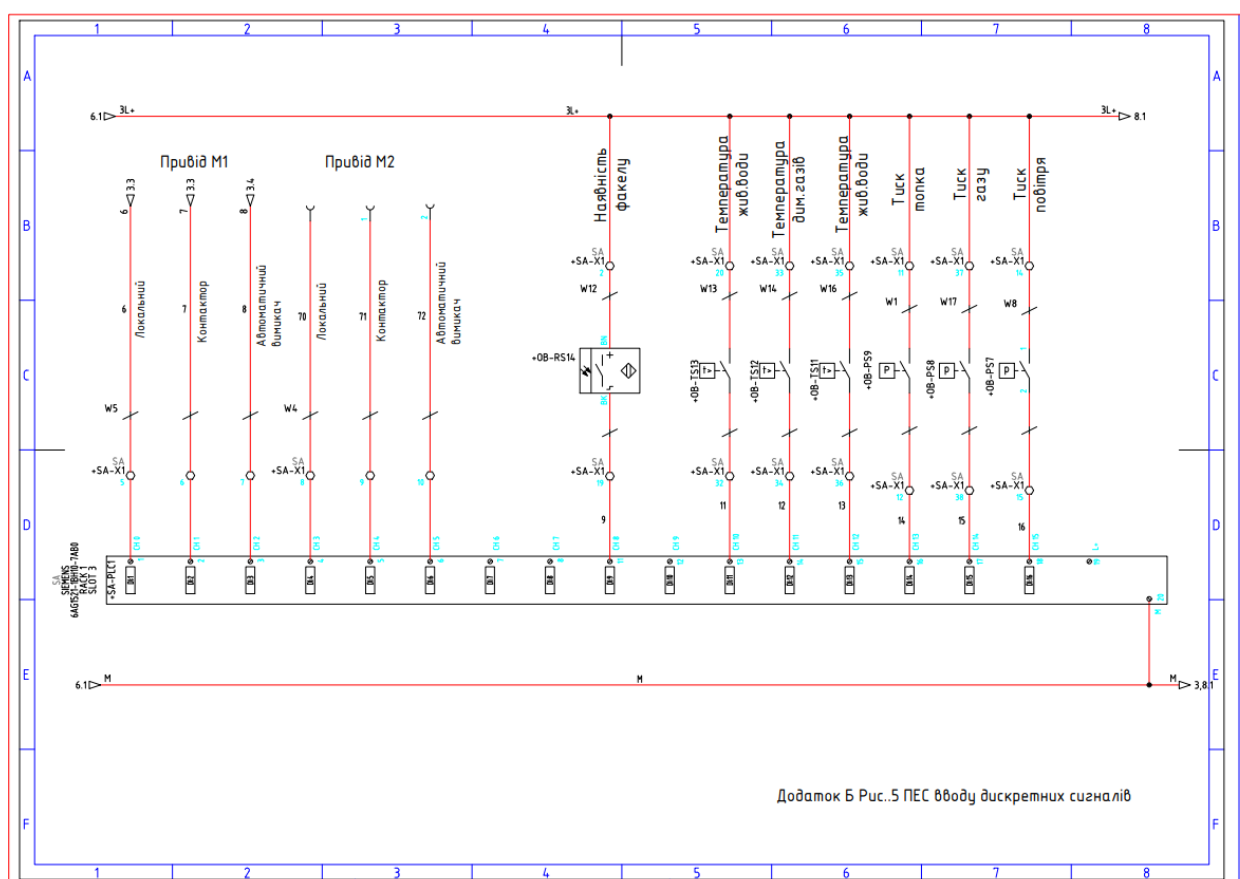


Рис. 5 ПЕС вводу дискретних сигналів

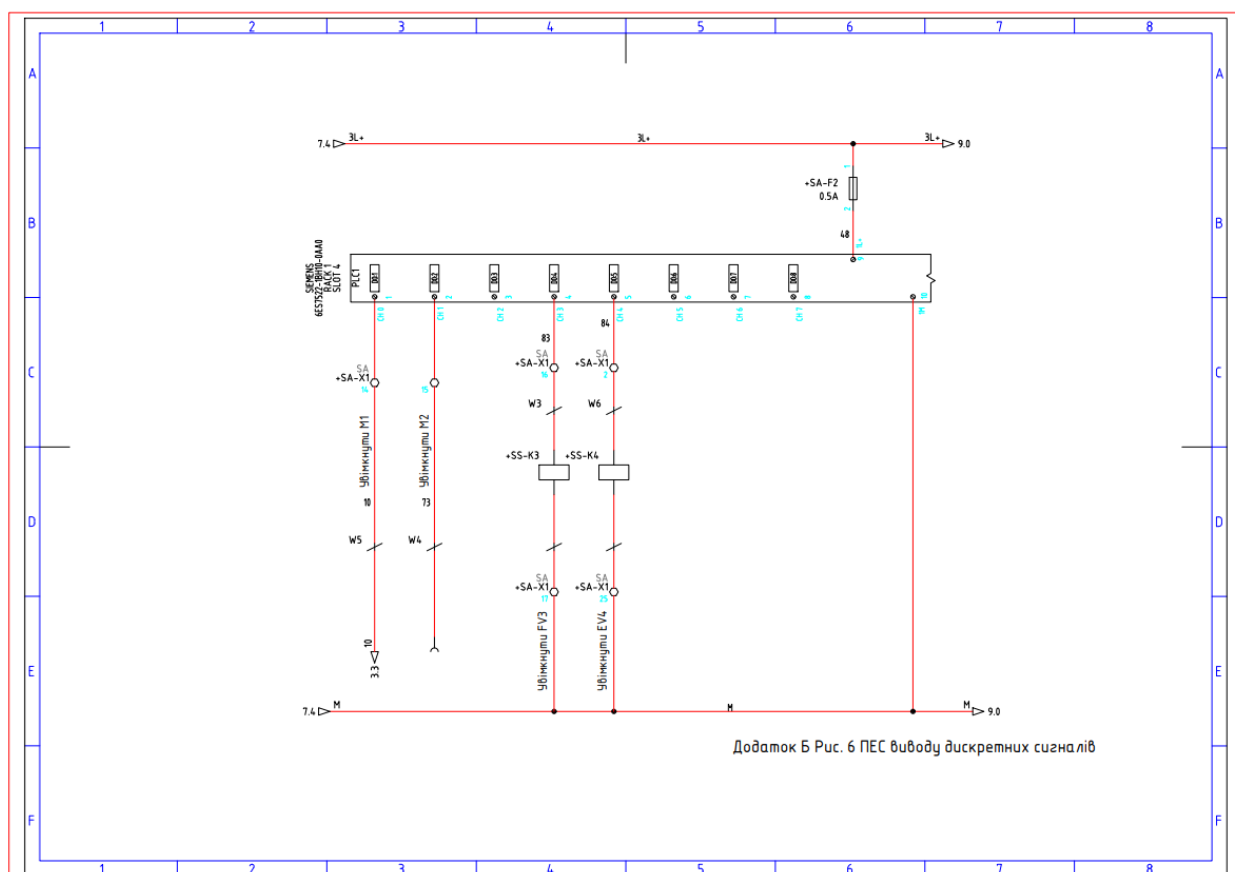


Рис. 6 ПЕС виводу дискретних сигналів

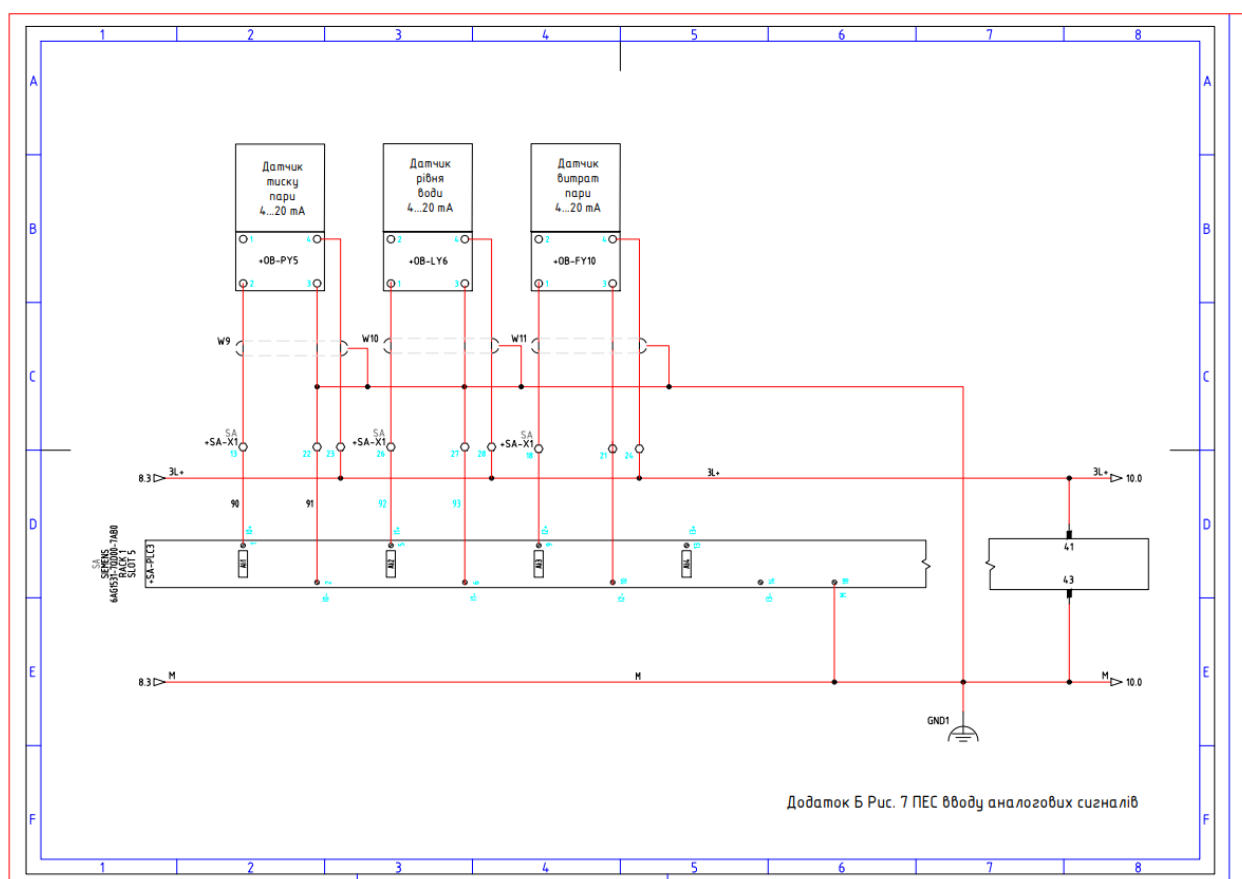


Рис. 7 ПЕС вводу аналогових сигналів

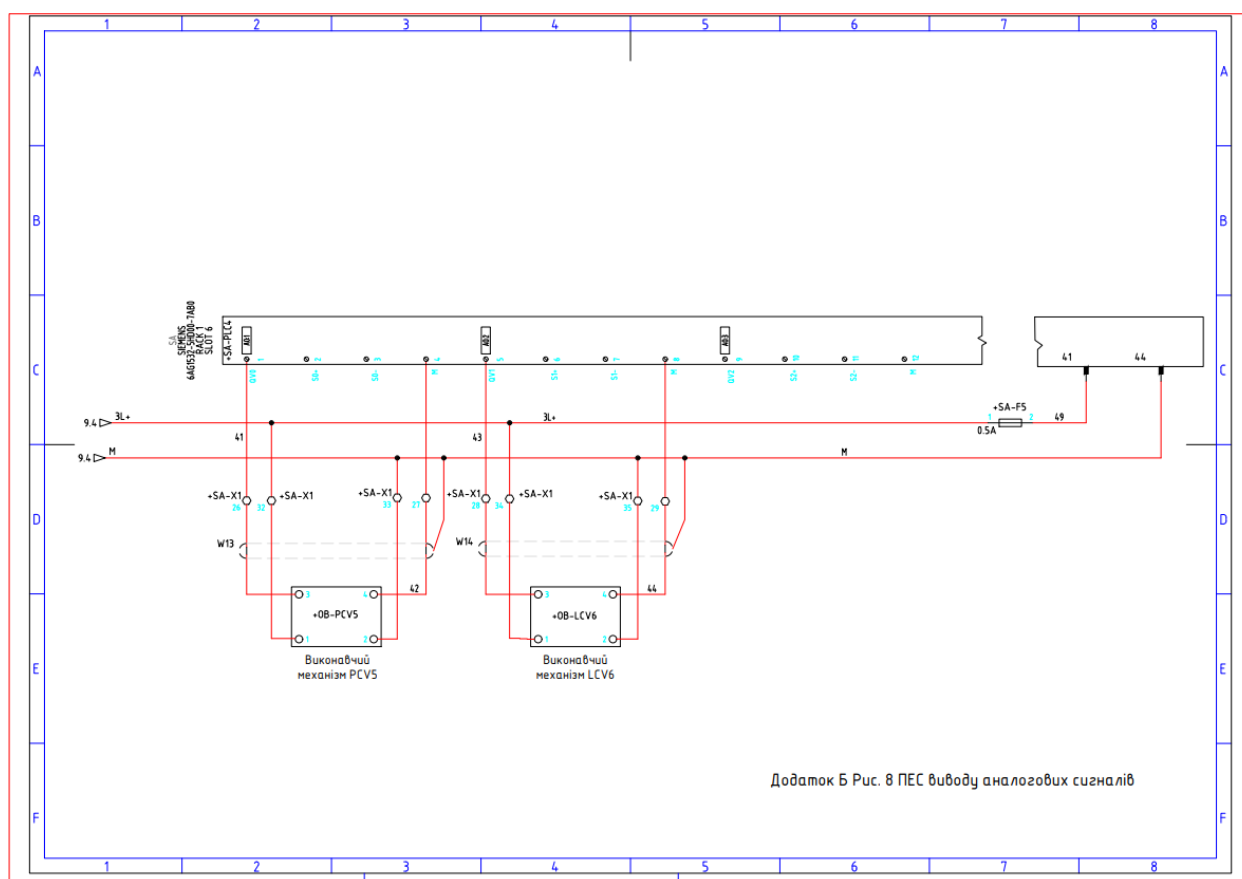


Рис. 8 ПЕС виводу аналогових сигналів