

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ

Група АКПз-23-1К

Роман Раделицький

2025

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

Раделицький Роман Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.51
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСОМ АБСОРБЦІЙНОГО ОСУШЕННЯ ГАЗУ

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

асистент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

М.І. Когутяк

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПз-23-1К

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

Р.Ю. Раделицький

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

І.І. Чигур

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

« » 2025 року

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

Раделицький Роман Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи автоматизації процесом абсорбційного осушення газу

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

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «07» травня 2025 року № 53/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025 р.

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

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

Вступ. 1. Дослідження установки абсорбції як об'єкта автоматизації. 2. Математичний опис об'єкта керування. 3. Синтез системи керування абсорбційною установкою. 4. Розробка верхнього рівня керування в середовищі xPC-target. 5. Синтез on-line моделі системи керування.

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

1. Лист 1 - Функціональна схема автоматизації - БР.АКПз-12.00.00.000 01.
Лист 2 - Розрахунок параметрів налаштування регуляторів - БР.АКПз-12.00.00.000 02. Лист 3 - Імітаційне моделювання в Matlab - БР.АКПз-12.00.00.000 03. Лист 4 - Структура xPC-Target - БР.АКПз-12.00.00.000 04.
Лист 5 - Синтез on-line моделі системи керування - БР.АКПз-12.00.00.000 05.
Лист 6 - Web-інтерфейс користувача -БР.АКПз-12.00.00.000 06.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Дослідження установки абсорбції як об'єкта автоматизації.	15.05.2025	
2.	Математичний опис об'єкта керування.	18.05.2025	
3.	Синтез системи керування абсорбційною установкою.	22.05.2025	
4.	Розробка верхнього рівня керування в середовищі xPC-target.	28.05.2025	
5.	Синтез on-line моделі системи керування.	10.06.2025	

Студент _____
(підпис)

Р.Ю. Раделицький _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

І.І. Чигур _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 69 сторінок друкованого тексту, 28 рисунків, 7 таблиць, 7 посилань на джерела, 1 додаток.

Тема: «Розроблення системи автоматизації процесом абсорбційного осушення газу».

Об'єкт дослідження: абсорбційна установка осушення газу.

Мета проекту: розробити систему автоматизації абсорбційного осушення газу з можливістю віддаленого керування

Методи дослідження: положення теорії автоматичного керування були використані для ідентифікації передавальних функцій об'єкта регулювання та для обчислення оптимальних налаштувань регуляторів. Методологія математичного моделювання слугувала основою для розробки моделі системи керування. Для аналізу динамічних характеристик та поведінки розробленої моделі в середовищі MATLAB було залучено методи імітаційного моделювання.

Результати бакалаврської роботи: За результатами проведеного активного експерименту було ідентифіковано передавальну функцію об'єкта керування для ключового каналу "витрата насиченого абсорбенту – температура в нижній частині абсорбера". На основі цього здійснено вибір типів регуляторів та розраховано їхні оптимальні параметри налаштування. Проведено комп'ютерне моделювання одноконтурної та каскадної архітектур системи керування з використанням технології xPC-Target, що дозволило кількісно оцінити досягнуті показники якості регулювання.

Ключові слова: абсорбція, керування, моделювання, регулятор.

ABSTRACT

Bachelor's thesis contains: 69 pages of printed text, 28 figures, 7 tables, 7 references to sources, 1 appendice.

Topic: "Development of an automation system for the process of absorption gas drying".

Object of research: absorption gas drying plant.

Project goal: to develop an automation system for absorption gas drying with the possibility of remote control

Research methods: the provisions of the theory of automatic control were used to identify the transfer functions of the control object and to calculate the optimal settings of the regulators. The methodology of mathematical modeling served as the basis for developing a control system model. Simulation modeling methods were used to analyze the dynamic characteristics and behavior of the developed model in the MATLAB environment.

Results of the bachelor's thesis: According to the results of the active experiment, the transfer function of the control object for the key channel "saturated absorbent flow rate - temperature in the lower part of the absorber" was identified. Based on this, the types of regulators were selected and their optimal settings were calculated. Computer simulation of single-loop and cascade architectures of the control system was carried out using xPC-Target technology, which allowed us to quantitatively assess the achieved control quality indicators.

Keywords: absorption, control, modeling, regulator.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАНОВКИ АБСОРБЦІЇ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ	
1.1 Призначення установки і суть процесів абсорбції та десорбції	10
1.2 Характеристика сировини і готового продукту.....	11
1.3 Аналіз технологічної схеми маслоабсорційної установки.....	14
1.4 Вибір та обґрунтування параметрів контролю і регулювання.....	17
Висновки до розділу	19
2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	
2.1. Вибір об'єкта керування.....	20
2.2 Основні показники якості і критерії оптимальності системи автоматизації.....	21
2.3 Експериментальне дослідження динаміки керованого об'єкта.....	22
Висновки до розділу	30
3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АБСОРБЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ	
3.1. Визначення передавальної функції компенсатора.....	31
3.2. Визначення параметрів налаштування регуляторів.....	35
3.3 Визначення показників якості автономної системи керування.....	43
Висновки до розділу	46
4 РОЗРОБКА ВЕРХНЬОГО РІВНЯ КЕРУВАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ xPC-Target	
4.1 Визначення xPC-Target.....	47
4.2 Програмні засоби реалізації xPC-Target.....	48

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розроблення системи автоматизації процесом абсорбційного осушення газу	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.	Раделицький Р.					6	69	
Перевір.	Чигур І.І.							
Реценз.								
Н. Контр.	Кучмистенко О					АКПз-23-1К ІФНТУНГ		
Затверд.	Лагойда А.І.							

4.3 Апаратні засоби реалізації xPC-Target.....	49
4.4 Обмін інформацією.....	50
4.5 Налаштування параметрів.....	52
4.6 Режими дії.....	53
4.7 Випробування установки.....	55
4.8 Інтерфейс Web-браузера.....	57
Висновки до розділу	60
5 СИНТЕЗ ON-LINE МОДЕЛІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	
5.1 Модель mbus-rt. mdl у реальному часі.....	61
5.2 Параметри установки програми.....	62
5.3 Вибір цільової конфігурації.....	63
5.4 Використання S-функції.....	64
5.5 Процедура побудови та розгортання програмного коду.....	66
Висновки до розділу	67
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Метою бакалаврської роботи є розробити систему автоматизації абсорбційного осушення газу з можливістю віддаленого керування.

Абсорбційне осушення газу являє собою фундаментальний та широко розповсюджений масообмінний процес, що має критичне значення для численних промислових операцій. Його основна мета полягає у вибіркового видаленні водяної пари з газових сумішей шляхом її поглинання рідким абсорбентом. Необхідність такого осушення зумовлена тим, що присутність вологи, навіть у незначних кількостях, може спричинити серйозні технологічні, економічні та безпекові проблеми.

Наприклад, у нафтогазовій промисловості, вода в природному газі може призводити до утворення твердих газових гідратів при низьких температурах та високих тисках, що блокують трубопроводи та обладнання, спричиняючи значні збитки та ризики аварій. Окрім того, волога, особливо в поєднанні з кислими компонентами, такими як сірководень (H_2S) та діоксид вуглецю (CO_2), значно прискорює корозію металевих конструкцій, скорочуючи термін їхньої служби та підвищуючи витрати на обслуговування.

У хімічній та нафтохімічній промисловості осушення газів є невід'ємною частиною багатьох технологічних циклів. Волога може негативно впливати на активність та селективність каталізаторів, знижувати ефективність процесів розділення (наприклад, криогенної дистиляції), а також погіршувати якість кінцевих продуктів, не дозволяючи досягти необхідних специфікацій за точкою роси. Неконтрольована конденсація вологи в технологічних апаратах може призводити до порушення їхньої роботи та виникнення позаштатних ситуацій.

Процес абсорбційного осушення базується на принципі розчинності водяної пари в спеціально підібраних рідких речовинах – абсорбентах, найпоширенішими з яких є гліколи (наприклад, триетиленгліколь – ТЕГ). Ці речовини мають високу гігроскопічність та здатність до регенерації, що дозволяє використовувати їх у замкнених циклах. Ефективність процесу залежить від багатьох факторів,

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

включаючи властивості абсорбенту, параметри контакту фаз (температура, тиск, поверхня контакту), а також конструктивні особливості абсорбційного обладнання.

Таким чином, абсорбційне осушення газів є важливою інженерною задачею, вирішення якої забезпечує надійність, ефективність та безпеку функціонування широкого спектра промислових підприємств. Глибоке розуміння фізико-хімічних основ процесу, особливостей вибору абсорбентів та оптимальних умов його проведення є запорукою успішної експлуатації та подальшого вдосконалення систем осушення.

Значна складність та висока динаміка технологічних процесів, що протікають в апаратах хімічних виробництв, їхня виражена чутливість до будь-яких порушень встановленого режиму, а також підвищений рівень вибухо- та пожежонебезпеки разом із шкідливими умовами праці для технологічного персоналу, є вагомими причинами, що зумовлюють посилену увагу до питань розробки та впровадження систем дистанційного керування такими процесами. Функціональні обов'язки персоналу на подібних об'єктах часто зводяться до спостереження за функціонуванням агрегатів та механізмів і виконання найпростіших операцій управління, таких як увімкнення або вимкнення обладнання у визначені моменти часу. Для ліквідації можливих нештатних ситуацій або аварій обслуговуючий персонал змушений викликати кваліфікованих фахівців, що призводить до втрати часу та потенційних збитків.

Сучасний рівень розвитку обчислювальної техніки та засобів зв'язку дозволяє перевести більшість таких об'єктів на автоматичний режим роботи, забезпечуючи можливість дистанційного моніторингу та управління мережею об'єктів з єдиних диспетчерських пунктів. Такі системи автоматизації виробництва, що включають автоматичний контроль та керування параметрами технологічного процесу, забезпечують необхідну якість продукції на виході з апаратів, раціональне використання сировини та енергетичних ресурсів, скорочення чисельності технічного персоналу та подовження термінів міжремонтного пробігу технологічного устаткування.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАНОВКИ АБСОРБЦІЇ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Призначення установки і суть процесів абсорбції та десорбції

Абсорбція являє собою процес селективного поглинання окремих компонентів із газової суміші за допомогою рідкого поглинача, який називають абсорбентом. Протилежний процес, що полягає у виділенні поглинених компонентів газу з абсорбенту, має назву десорбція. На відміну від процесу ректифікації, абсорбція характеризується переважно односпрямованим масообміном: цільові компоненти вилучаються з газової фази, тоді як їх перехід з абсорбенту назад у газ практично не відбувається. Аналогічне твердження справедливе і для десорбції.

У нафтопереробній та газовій промисловості абсорбційні процеси широко застосовуються для розділення, осушення та очищення вуглеводневих газів. Наприклад, з природних та супутніх газів вилучають цінні компоненти, такі як етан, пропан, бутан, а також компоненти бензину. Також абсорбція використовується для видалення сірководню (хемосорбція, що супроводжується хімічними реакціями) та для розділення газів, отриманих у процесах піролізу та каталітичного крекінгу.

Схематично процес абсорбції (та десорбції) можна представити як взаємодію двох фаз, зображену на рисунку 1.1.

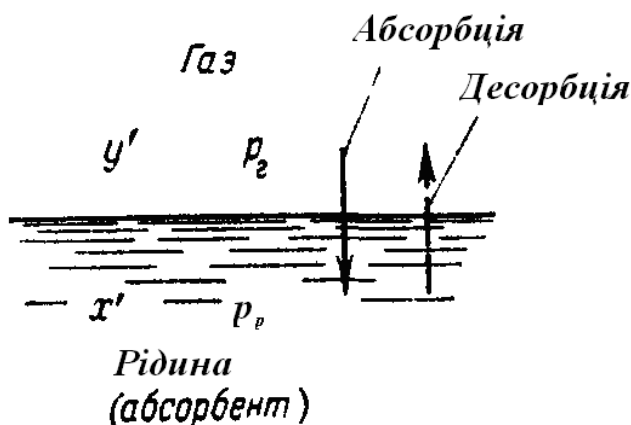


Рисунок 1.1 - Обмін елементами між газом і абсорбентом

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Для того, щоб процес абсорбції відбувався, необхідно, щоб парціальний тиск компонента, що вилучається, у газовій фазі p_r був вищим, ніж його парціальний тиск в абсорбенті p_r . Різниця цих тисків, $\Delta P = p_r - p_r$, визначає рушійну силу процесу абсорбції. Якщо $P > 0$, відбувається абсорбція; якщо $P < 0$ – десорбція. Процес абсорбції (або десорбції) припиняється, коли система досягає стану рівноваги, тобто коли $p_r = p_r^* = p_r$, де p_r^* – рівноважний парціальний тиск компонента в газовій фазі над рідиною.

Оскільки парціальний тиск компонента є пропорційним до його концентрації, рушійну силу процесу можна також виразити через різницю концентрацій у газовій (y') та рідкій (x') фазах: $\Delta y' = y' - y'^*$ або $\Delta x' = x' - x'^*$. Загальне рівняння масопередачі в процесі абсорбції наступне:

$$M = K_p F(p_2 - p_2^*) = K_y F(y' - y'^*) = K_x F(x' - x'^*), \quad (1.1)$$

Зазвичай абсорбент підбирають таким чином, щоб його можна було вважати нелетким в при процедурі процесу абсорбції. Процеси абсорбції та десорбції часто здійснюють на одній інтегрованій установці, яка включає абсорбер та десорбер. Регенований (відновлений) абсорбент після десорбції повертається назад в абсорбер для повторного використання.

1.2 Характеристика сировини і готового продукту

Первинною сировиною для функціонування даної технологічної системи є попутний нафтовий газ, який отримують зі свердловин. В результаті переробки на установці одержують наступні продукти: газ після процесу відбензинення, вуглеводневі гази у зрідженому стані (відомі як ЗВГ) та бензин газовий.

У технологічному процесі на установці застосовуються ключові реагенти та матеріали:

- Поглинач для маслоабсорбційного блоку (здебільшого використовується фракція гасу).
- Діетиленгліколь (застосовується з метою осушення газового потоку перед процесом абсорбції, проте детальний опис його використання в даному контексті не наводиться).

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Вуглеводневі гази у зрідженому стані (що представляють собою суміш вуглеводнів С₃-С₄) належать до токсичних сполук і за рівнем впливу на людський організм класифікуються як речовини четвертого класу небезпеки. Пари зріджених вуглеводневих газів мають тенденцію до акумуляції в низинних та погано вентильованих зонах, оскільки їхня питома вага більша за питому вагу повітря. При взаємодії з повітрям зріджені вуглеводневі гази формують суміші, що становлять небезпеку вибуху (за умов тиску 0,1 МПа та температурного режиму 15-20 °С) при концентрації їхніх парів у межах 4–10 % за об'ємом.

Вимоги до фізико-хімічних показників пропан-бутанової фракції (ЗВГ) в Україні переважно визначаються національними стандартами, зокрема ДСТУ 4047-2001 "Гази вуглеводневі зріджені паливні для комунально-побутового споживання. Технічні умови" та міждержавним стандартом ГОСТ 27578-87 "Гази вуглеводневі зріджені для автомобільного транспорту. Технічні умови", який також може застосовуватися.

Ці стандарти встановлюють норми для таких ключових показників. Основні фізико-хімічні показники та їх норми:

Компонентний склад. Масова частка пропану та пропілену: Залежить від марки газу (наприклад, для марки СПБТ (суміш пропану та бутану технічного) цей показник нормується).

Масова частка бутанів та бутиленів: Також залежить від марки газу і є важливим показником.

Сума неграничних вуглеводнів: Обмежується для забезпечення стабільності та безпеки газу.

Тиск насичених парів. При +45 °С: Не повинен перевищувати максимального значення (наприклад, 1,6 МПа), щоб уникнути надлишкового тиску в ємностях при підвищених температурах.

При -20 °С (для зимових марок): Повинен бути не нижчим за певне значення, щоб забезпечити надійне випаровування газу при низьких температурах.

Густина рідкої фази: Нормується при певній температурі (наприклад, +20

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

°C).

Вміст сірчистих сполук. Масова частка сірководню: Суворо обмежується через його високу корозійну активність та токсичність (наприклад, не більше 0,003% або 5 г на 100 м³ в деяких специфікаціях).

Масова частка меркаптанової сірки: Також обмежується. Загальний вміст сірки важливий для екологічності та запобігання корозії обладнання.

Вміст вільної води та лугу: Повинні бути відсутні, оскільки вода може викликати утворення гідратів та корозію, а луг є залишком процесу очищення і його наявність небажана.

Інтенсивність запаху: ЗВГ повинні бути одоровані (додавання речовин з сильним запахом, наприклад, етилмеркаптану) для своєчасного виявлення витоків. Інтенсивність запаху перевіряється за встановленою методикою.

Об'ємна частка рідкого залишку при +20 °C: Цей показник характеризує наявність важких вуглеводневих фракцій і не повинен перевищувати встановленої межі (наприклад, 0,6%).

Фізико-хімічні показники пропан-бутанової фракції (ЗВГ) повинні відповідати вимогам, наведеним у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Характеристика газу вуглеводневого зрідженого

НАЗВА ХАРАКТЕРИСТИКИ	ДОПУСТИМЕ ЗНАЧЕННЯ
Відсотковий вміст компонента за масою, %:	
- загальна кількість метану, етану та етилену	максимальний вміст (в оригіналі норматив не визначений)

- загальна кількість пропану та пропілену	нормативне значення не встановлено
- загальна кількість бутанів та бутиленів	мінімум 60 (приклад числового значення з оригіналу)
Частка рідкого залишку за об'ємом при +20 °С %, не вище	0,6
Надлишковий тиск насиченої пари, МПа:	
- при температурі +45 °С, максимальне значення	1,6
- при температурі -20 °С, мінімальне значення	0,2
Відсотковий вміст сірководню та меркаптанової сірки за масою, %, не вище	0,013
- з них сірководню, %, максимальний вміст	0,003
Наявність вільної води	має бути відсутня
Наявність луку	має бути відсутня

Як абсорбент на установці застосовується гасова фракція, що характеризується межами кипіння в діапазоні 150–280 °С та молекулярною масою близько 150 кг/кмоль. Вибір такого абсорбенту зумовлений його фізико-хімічними властивостями, зокрема, здатністю ефективно поглинати цільові вуглеводні та відносною легкістю регенерації.

1.3 Аналіз технологічної схеми маслоабсорбційної установки

Спрощена технологічна схема в маслоабсорбційної установки (МАУ) представлена на рисунку 1.2. Робота установки організована наступним чином :

Осушений нафтовий газ, що надходить на установку, має тиск у межах 2,0-3,5 МПа та температуру, що не перевищує 46 °С (319 К). Цей потік газу подається під нижню тарілку абсорбера К-1. Абсорбер К-1 є ключовим апаратом процесу і оснащений 30 ковпачковими тарілками, які забезпечують розвинену поверхню

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

контакту між газовою та рідкою фазами для ефективного масообміну.

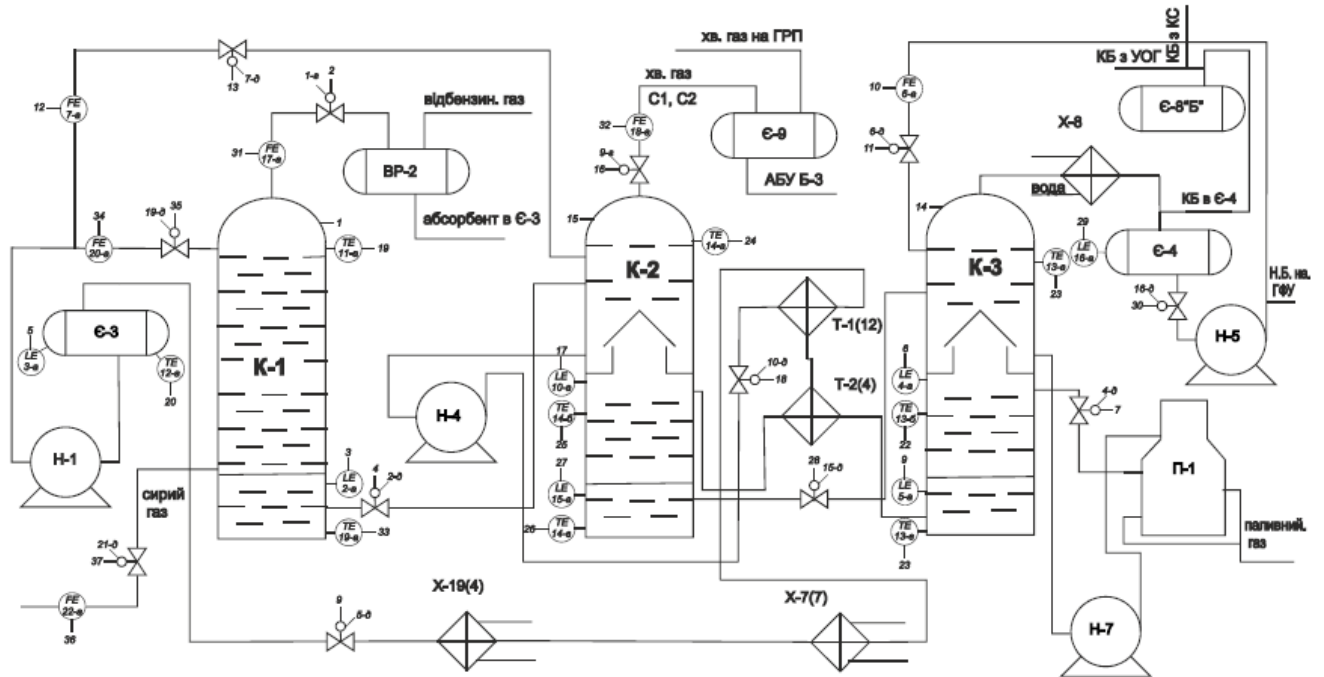


Рисунок 1.2 – Технологічна схема маслоабсорбційної установки

Одночасно на верхню тарілку колони К-1 за допомогою насоса Н-1 з ємності регенованого абсорбенту Є-3 подається охолоджений регенований абсорбент. Температура цього абсорбенту також не повинна перевищувати 46 °С (319 К), а його витрата регулюється в діапазоні 70-150 м³/год. Під час контакту газу з абсорбентом на ковпачкових тарілках відбувається процес поглинання важких вуглеводнів з газової фази рідким абсорбентом.

З верхньої частини абсорбера К-1 виходить потік відбензиненого газу. Цей газ далі спрямовується у відділювач рідини ВР-2, де відбувається сепарація крапель абсорбенту, які могли бути винесені потоком газу. Після відділювача ВР-2 відбензинений газ подається на дотискуючі газомотокомпресори, а потім – у магістральний газопровід. Абсорбент, вловлений у відстійнику ВР-2, повертається в ємність регенованого абсорбенту Є-3.

Насичений абсорбент, що накопичується в нижній частині абсорбера К-1, має температуру в діапазоні 27-50 °С (300-323 К). Цей потік спрямовується в абсорбційно-відпарну колону (АВК) К-2. Призначення колони К-2 полягає у відпарюванні (десорбції) легкокиплячих вуглеводнів, переважно метану та етану,

з насиченого абсорбенту. Процес відпарювання в АВК К-2 відбувається за рахунок комбінованого впливу зниження тиску (з 2,0-3,5 МПа до 0,8-1,1 МПа) та підведення тепла від десорбційних парів. Тепло підводиться шляхом циркуляції частини насиченого абсорбенту з глухої тарілки АВК через теплообмінники Т-1, Т-2 та повернення його в кубову частину колони К-2 з температурою 145-215 °С (418-488 К). Циркуляція цього потоку забезпечується насосом Н-4.

Для підтримання температурного режиму та ефективності процесу в АВК К-2 на її верхню тарілку насосом Н-1 з ємності Є-3 подається зрошення регенованим абсорбентом. Витрата цього зрошення становить 10-40 м³/год, а температура – 46 °С (319 К). Температура верху колони К-2 підтримується в межах 20-45 °С (293-318 К). Суміш метану, етану та незначної кількості важчих вуглеводнів (скидні гази) виходить з верхньої частини АВК і надходить у відділювач рідини Є-9 для сепарації крапель винесеного абсорбенту. З ємності Є-9 скидні гази спрямовуються на газорегуляторний пункт (ГРП) і використовуються як паливо для власних потреб заводу. Існує також можливість подачі цих газів на прийом другого ступеня стиснення газомотокомпресорів. Абсорбент, що накопичується в ємності Є-9, періодично перекачується в ємність регенованого абсорбенту Є-3.

Стабільний насичений абсорбент, з якого видалено легкі компоненти, з температурою 145-215 °С (418-488 К) з кубової частини АВК К-2 надходить у верхню частину десорбера К-3. У десорбері К-3 відбувається процес відпарювання (десорбції) поглинутих вуглеводнів з насиченого абсорбенту. Цей процес здійснюється при тиску 0,5-0,85 МПа, температурі низу колони до 310 °С (583 К) та температурі верху в діапазоні 30-105 °С (303-378 К). Підтримання високої температури в нижній частині десорбера К-3 забезпечується циркуляцією абсорбенту через трубчастий підігрівач П-1 за схемою: глуха тарілка десорбера К-3 – насос Н-7 – підігрівач П-1 – кубова частина десорбера К-3.

Пари нестабільного бензину, що утворюються у верхній частині десорбера К-3, надходять у конденсатори-холодильники Х-8, де конденсуються, і далі збираються в ємності нестабільного бензину Є-4. Для підтримання заданої

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

температури верху десорбера К-3 (30-105 °С) частина нестабільного бензину з ємності Є-4 за допомогою насоса Н-5 або Н-6 подається як зрошення на верхню тарілку десорбера К-3. Кількість цього зрошення (10-70 м³/год) підтримується регулятором витрати. З ємності Є-4 нестабільний бензин за допомогою насоса Н-5 або Н-6 через регулятор рівня подається на газофракціонуючу установку (ГФУ) для подальшого розділення.

Регенований (пісний) абсорбент з кубової частини десорбера К-3 через регулятор рівня проходить через систему теплообмінників Т-2 та Т-1, де він віддає своє тепло потоку насиченого абсорбенту, що йде до колони К-2, тим самим підвищуючи енергоефективність процесу. Далі гарячий регенований абсорбент охолоджується в холодильниках Х-7, Х-9 до температури, що не перевищує 46 °С (319 К), після чого надходить в ємність регенованого абсорбенту Е-3, звідки знову подається на абсорбцію, замикаючи цикл.

1.4 Вибір та обґрунтування параметрів контролю і регулювання

Ефективне управління та моніторинг роботи абсорбера К-1 планується здійснювати за допомогою системи автоматичного управління. Для цього передбачається встановлення місцевих приладів та датчиків для вимірювання технологічних параметрів безпосередньо на апараті. Регулюючі пристрої будуть розміщені в спеціальній шафі модуля керування. У табл. 1.5 наведено перелік основних параметрів, що підлягають регулюванню в абсорбері маслоабсорбційної установки.

Підвищення температури в абсорбері негативно впливає на ефективність процесу абсорбції. Це пов'язано з тим, що зі зростанням температури збільшується інтенсивність коливального руху молекул компонента, що поглинається, і, як наслідок, зменшується ймовірність їх захоплення абсорбентом. З іншого боку, занадто низька температура в абсорбері може призвести до конденсації вуглеводнів та їх небажаної втрати разом з потоком абсорбенту.

Збільшення тиску в абсорбері, навпаки, сприяє покращенню процесу абсорбції, оскільки підвищується швидкість дифузії молекул компонента, що

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

поглинається, до поверхні абсорбенту. Однак значне зростання тиску в абсорбері призводить до збільшення експлуатаційних витрат, пов'язаних з попереднім стисненням газу, а також вимагає використання апаратів з товстішими стінками, що збільшує капітальні витрати.

Питома витрата абсорбенту – це кількість абсорбенту, що припадає на одиницю маси газової суміші, яка обробляється. Від величини питомої витрати залежать розміри абсорбційного апарату та експлуатаційні витрати на регенерацію абсорбенту. Чим більша витрата абсорбенту, тим більша площа контакту між поверхнею абсорбенту та газовою сумішшю, і, відповідно, тим вища швидкість абсорбції. Проте надмірно велика витрата абсорбенту призводить до зростання витрат на його перекачування та регенерацію.

Значення ключових параметрів контролю та регулювання для абсорбера К-1 наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Значення параметрів контролю і регулювання

НАЗВА ПАРАМЕТРУ	ОДИНИЦЯ ВИМІРЮВАННЯ	МЕЖІ КОЛИВАННЯ ПАРАМЕТРУ
Тиск в абсорбері К-1	МПа	2,2-3,7
Температура регенерованого абсорбенту	°С	до 48
Питома витрата абсорбенту в абсорбер	м ³ /год	75-145
Температура насиченого абсорбенту	°С	до 48
Рівень насиченого абсорбенту	м	0,15-0,95

Рівень рідини в нижній частині абсорбера виконує функцію гідрозатвору, який запобігає потраплянню газової суміші в трубопровід відведення насиченого абсорбенту. Тому рівень рідини в абсорбері К-1 необхідно підтримувати в заданих межах, зазвичай від 0,1 до 0,9 м.

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Висновки до розділу

У даному розділі здійснено комплексний аналіз технологічного процесу масляної абсорбції як об'єкта, що підлягає автоматизованому керуванню. Особливу увагу було приділено безпосередньо процесу абсорбції, який полягає у контакті газового потоку з збідненим (пісним) абсорбентом, у результаті чого відбувається поглинання абсорбентом важких вуглеводневих компонентів з газу. Насичений цими компонентами абсорбент відбирається з нижньої частини абсорбційної колони.

Задача розробки системи автоматичного керування (АСК) процесом абсорбції полягає у забезпеченні точного дотримання ключових технологічних параметрів процесу. До таких параметрів належать температура, тиск, рівень рідини в апараті та витрати потоків. Аналіз представленого матеріалу свідчить, що даний технологічний процес є сприятливим для застосування сучасної мікропроцесорної техніки з метою ефективного керування всіма зазначеними технологічними параметрами, що відкриває можливості для підвищення стабільності, економічності та безпеки його функціонування.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1. Вибір об'єкта керування

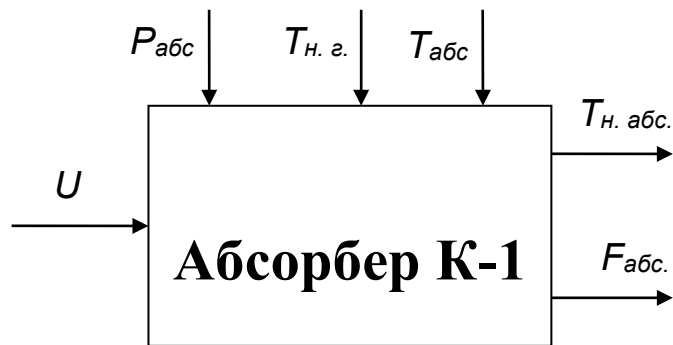
Після ретельного аналізу маслоабсорбційної установки стає очевидним, що одним з центральних та найбільш значущих елементів установки, з точки зору автоматизації, є абсорбер. Саме в абсорбері відбувається ключовий технологічний етап – процес абсорбції, який полягає у виділенні з нафтового газу широкої фракції легких вуглеводнів. Цей процес протікає за визначених умов: температура близько 40 °С та тиск у діапазоні 2,0 - 3,5 МПа.

Основне функціональне призначення абсорбера полягає в отриманні двох цільових продуктів: відбензиненого газу та насиченого абсорбенту (у даному випадку – гасової фракції). Якість та чистота цих продуктів мають суттєвий вплив на загальну ефективність процесу відбензинення попутного нафтового газу. Відповідно, для забезпечення нормального та стабільного функціонування установки необхідно підтримувати теплові та матеріальні баланси за основними технологічними потоками.

З огляду на це, головним завданням системи автоматичного керування (АСК) для даного об'єкта буде підтримання заданої температури в абсорбері. Температуру в абсорбері доцільно регулювати шляхом зміни подачі регенованого (охолодженого) абсорбенту. На тепловий баланс абсорбера впливає низка параметрів, основні з яких представлені на структурній схемі (рисунок 2.1).

Таким чином, для стабілізації температурного режиму колони К-1 доцільно розглядати застосування каскадної автоматичної системи регулювання (АСР). Такий підхід обґрунтовується тим, що основний канал регулювання (вплив зміни подачі абсорбенту на температуру в колоні) характеризується значною інерційністю. Окрім основного контуру регулювання температури, в колоні також доцільно здійснювати контроль температури та тиску в різних точках по висоті апарату для отримання більш повної інформації про розподіл параметрів та стан процесу.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



$F_{абс}$ – подача регенованого абсорбенту в абсорбер; $T_{н. абс.}$ – температура насиченого абсорбенту на виході з абсорбера; $T_{абс}$ – температура регенованого абсорбенту; $T_{н. г.}$ – температура нафтового газу; U – керуючий вплив (положення регулюючого органу на лінії подачі регенованого абсорбенту)

Рисунок 2.1 - Структурна абсорбційної колони, як об'єкта керування

Розробка математичної моделі, що адекватно описує динаміку цього об'єкта, є фундаментальним кроком для подальшого синтезу ефективної системи керування. Оскільки отримання такої моделі з перших принципів (на основі рівнянь тепло- та масообміну) є надзвичайно складним завданням, було обрано експериментальний підхід.

2.2 Основні показники якості і критерії оптимальності системи автоматизації

Як зазначалося вище, основною метою розроблюваної системи автоматизації є підтримання температури абсорбера на заданому рівні для забезпечення оптимальних умов протікання процесу абсорбції. Регулювання цього параметра здійснюється шляхом зміни витрати регенованого абсорбенту, що подається в абсорбер.

Для оптимізації процесу регулювання температури та забезпечення утримання технологічних параметрів у заданих межах, були обрані наступні кількісні показники якості регулювання, які базуються на загальноприйнятих вимогах до промислових систем автоматизації :

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

- Максимальна похибка апроксимації експериментальних характеристик об'єкта не повинна перевищувати 2,5%. Це забезпечить адекватність математичної моделі реальному об'єкту.
- Перерегулювання керованої величини (температури) під час перехідного процесу має бути меншим за 20%. Це важливо для уникнення значних відхилень від заданого значення, які можуть негативно вплинути на процес.
- Відхилення керованої величини від нового усталеного значення після завершення перехідного процесу не повинно перевищувати 5% (зона нечутливості).
- Ступінь затухання коливань у перехідному процесі повинен знаходитися в межах 0,75 – 0,95. Це забезпечить швидке згасання коливань та стабілізацію системи.
- Запас стійкості по амплітуді має бути в діапазоні 0,5 – 0,6.
- Запас стійкості по фазі повинен становити 30 – 60 градусів. Ці два останні показники гарантують робастність системи до змін параметрів об'єкта та зовнішніх збурень.

Дотримання цих критеріїв дозволить створити систему керування, яка буде не тільки стабільною, але й забезпечуватиме високу точність підтримання температури та швидку реакцію на збурення, що є критично важливим для ефективної роботи абсорбційної установки.

2.3 Експериментальне дослідження динаміки керованого об'єкта

Враховуючи, що розробка математичного опису динаміки абсорбційної колони на основі фундаментальних рівнянь тепло- та масопередачі є досить складним та трудомістким завданням, було прийнято рішення визначити динамічні властивості об'єкта керування експериментальним методом. Цей підхід передбачає проведення активного експерименту безпосередньо на діючій установці або її фізичній моделі.

Для отримання динамічних характеристик досліджуваного об'єкта було

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

використано дані активного експерименту. Зокрема, застосовано метод аперіодичних вхідних впливів типу “стрибок”. Суть методу полягає у поданні на вхід об'єкта ступінчастої зміни одного з керуючих параметрів та реєстрації відповідної зміни вихідного параметра в часі, що дозволяє отримати перехідну характеристику об'єкта.

Даний метод базується на припущенні, що об'єкт дослідження є лінійним при малих відхиленнях вхідної змінної від її початкового значення. Також припускається, що його динамічні властивості не змінюються в часі (стаціонарність), а вихідна змінна не залежить від просторових координат об'єкта (об'єкт із зосередженими параметрами). Для коректного застосування цього методу необхідно, щоб випадкові процеси зміни змінних величин об'єкта під час його експлуатації були стаціонарними ергодичними випадковими процесами.

Незалежно від конкретного методу експериментального визначення динамічних характеристик, процес завжди включає три основні етапи:

1. Підготовка та планування експерименту.
2. Проведення експерименту.
3. Обробка та аналіз отриманих результатів експерименту.

2.3.1 Підготовка і планування експерименту, виявлення вхідних і вихідних змінних

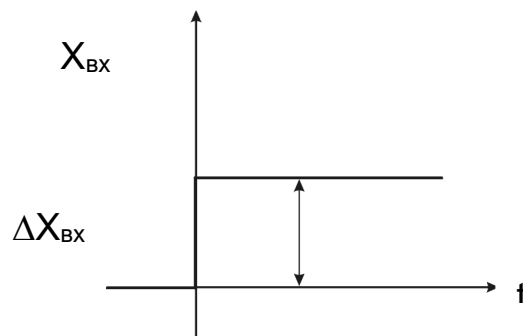
Етап підготовки та планування експерименту при вивченні динамічних характеристик розпочинається з детального вивчення об'єкта дослідження. На цьому етапі необхідно чітко визначити вхідну та вихідну змінні для кожного каналу регулювання, що досліджується. У даному випадку, як вхідний параметр розглядається відсоток відкриття регулюючого органу (РО), що змінює подачу абсорбенту, а як вихідний параметр – сигнал з вторинного вимірювального приладу (наприклад, датчика температури), який надходить на вхід регулятора.

При дослідженні замкнутої системи регулювання, вхідний вплив для отримання перехідної характеристики можна створити шляхом ступінчастої зміни завдання регулятора (задавача), фіксуючи при цьому зміну вихідної величини –

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

сигналу вимірювального перетворювача. Важливою умовою під час проведення експерименту з аперіодичними впливами є мінімізація або повна відсутність збурюючих впливів іншого походження, які можуть спотворити результати. У зв'язку з цим, при вивченні об'єкта дослідження необхідно виявити та, по можливості, усунути або стабілізувати потенційні джерела таких збурень.

При плануванні експерименту обирається вид досліджуваного впливу (у даному випадку – ступінчастий), його амплітуда та початкове значення вихідної змінної, з якого починається експеримент. Для даного дослідження аперіодичному впливу відповідатиме стрибкоподібна зміна подачі регенованого абсорбенту. Графічне представлення такого аперіодичного впливу наведено на рисунку 2.2.



$X_{вх}$ – вхідний вплив (відсоток відкриття регулюючого органу);

$\Delta X_{вх}$ – амплітуда вхідного впливу

Рисунок 2.2 - Аперіодичний вплив

Амплітуда вхідного впливу ($\Delta X_{вх}$) на практиці зазвичай обирається в інтервалі (0,1-0,15) від максимального можливого значення вхідної величини ($X_{вхmax}$). У випадку, коли збурення створюється переміщенням регулюючого органу, за $X_{вхmax}$ приймається стовідсоткове його переміщення (повне відкриття або закриття).

Експеримент розпочинають із встановлення на досліджуваному об'єкті стабільного виробничого режиму, який би характеризувався постійністю вихідної змінної ($Y_{вих0}$). Враховуючи інерційність протікання процесу абсорбції, режим роботи при сталій вихідній змінній $Y_{вих0}$ необхідно витримати протягом певного часу, наприклад, (2,0 – 2,5 хв) перед подачею збурення. Після цього наноситься

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

збурення шляхом зміни положення регулюючого органу на 10-15% від його повного ходу, і реєструється зміна вихідної величини в часі. Одночасно з цим фіксуються зміни основних збурюючих впливів, особливо тих, що пов'язані з навантаженням об'єкта. Закінчення перехідного процесу визначається за стабілізацією вихідної змінної. Вважається, що дослідження закінчене, якщо вихідна величина, починаючи з деякого моменту часу, залишається практично незмінною.

2.3.2 Обробка результатів експерименту

Експериментальні дані, отримані для основного (канал регулювання температури низу абсорбера шляхом зміни витрати насиченого абсорбенту) та допоміжного (канал регулювання витрати абсорбенту) каналів, представлені відповідно в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Результати експерименту по основному і допоміжному каналах

T, C	%, ВХ	T _{Н.АБС} , °C	F _{АБС} , М ³ /ГОД
0	15	27,01	44,100
20	15	27,01	61,700
40	15	28,99	72,260
60	15	35,33	78,420
80	15	39,40	82,380
100	15	41,73	84,500
120	15	43,13	85,944
140	15	43,92	86,800
160	15	44,38	87,100
180	15	44,62	87,830
200	15	44,80	87,920

220	15	44,89	88,100
240	15	44,94	88,100
260	15	44,97	88,100
280	15	44,99	88,100
300	15	45,00	88,100
320	15	45,01	88,100
340	15	45,01	88,100
360	15	45,01	88,100

На основі даних з таблиці 2.1 будуються експериментальні перехідні характеристики. Для основного каналу регулювання (залежність температури насиченого абсорбенту $T_{н.абс}$ від часу при ступінчастій зміні вхідного сигналу) перехідна характеристика показана на рисунку 2.3. Для допоміжного каналу (залежність витрати абсорбенту $F_{абс}$ від часу) перехідна характеристика зображена на рисунку 2.4.

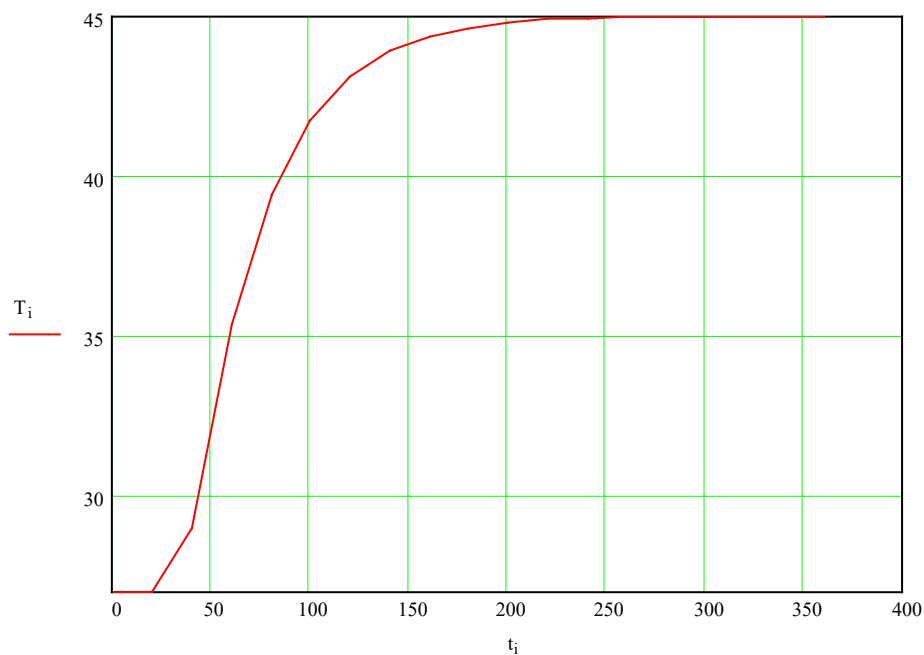


Рисунок 2.3 - Експериментальна перехідна характеристика по основному каналу

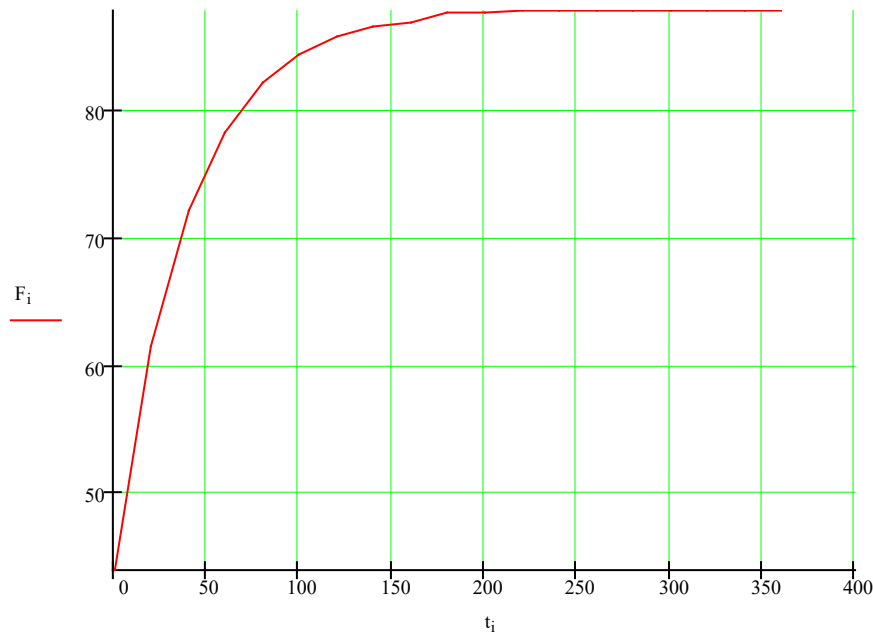


Рисунок 2.4 - Експериментальна перехідна характеристика по допоміжному каналу

Для подальшого аналізу та синтезу системи керування необхідно привести отримані перехідні характеристики до безрозмірних величин. Це дозволяє узагальнити результати та спростити процедуру апроксимації. Перехід до безрозмірних величин здійснюється за такими формулами :

$$X_{\text{exi}}^* = \frac{X_{\text{exi}} - X_{\text{ex0}}}{X_{\text{ex max}} - X_{\text{ex0}}}, \quad Y_{\text{vixi}}^* = \frac{Y_{\text{vixi}} - Y_{\text{vix0}}}{Y_{\text{vix max}} - Y_{\text{vix0}}}, \quad (2.1)$$

де: $X_{\text{вхi}}$, $Y_{\text{вхi}}$ - біжучі значення вхідної і вихідної величин в розмірних одиницях;

$X_{\text{вх0}}$, $Y_{\text{вх0}}$ - значення вхідних вихідних величин в розмірних одиницях до моменту нанесення збурення на КО;

$X_{\text{вх max}}$ - максимальне значення вхідної величини в розмірних одиницях;

$Y_{\text{вих max}}$ - значення вихідної величини після закінчення перехідного процесу в розмірних одиницях.

Проведемо розрахунок для основного каналу регулювання (температура Тн.абс). Вхідний вплив $X_{\text{вх}}$ (відсоток відкриття РО) змінюється стрибком. Початкове значення $Y_{\text{вих0}}=27$ °С, кінцеве усталене значення $Y_{\text{вихmax}}=45$ °С. Результати розрахунку в безрозмірних одиницях занесені до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Результати експерименту по основному каналу регулювання в безрозмірних одиницях

t,с	0	20	40	80	100	120	140	160	180	200	220
X _{вх}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Y _{вих}	0	0	0,1	0,461	0,687	0,817	0,895	0,938	0,964	0,977	0,987

Продовження таблиці 2.2

t,с	240	260	280	300	320	340	360
X _{вх}	1	1	1	1	1	1	1
Y _{вих}	0,992	0,989	0,9	0,98	0,98	0,99	1

На основі даних, представлених у таблиці 2.2, будується експериментальна перехідна характеристика основного каналу в безрозмірних одиницях (рисунок 2.5). Апроксимація цієї кривої, проведена за допомогою програмних засобів, дозволяє отримати аналітичний вираз для передавальної функції об'єкта по даному каналу. В результаті апроксимації отримано передавальну функцію :

$$W(p) = \frac{-0.252p - 50.094}{p^2 + 203.901p + 0.87} \quad (2.3)$$

Максимальна похибка апроксимації в точці T=20 с рівна 1,2% .

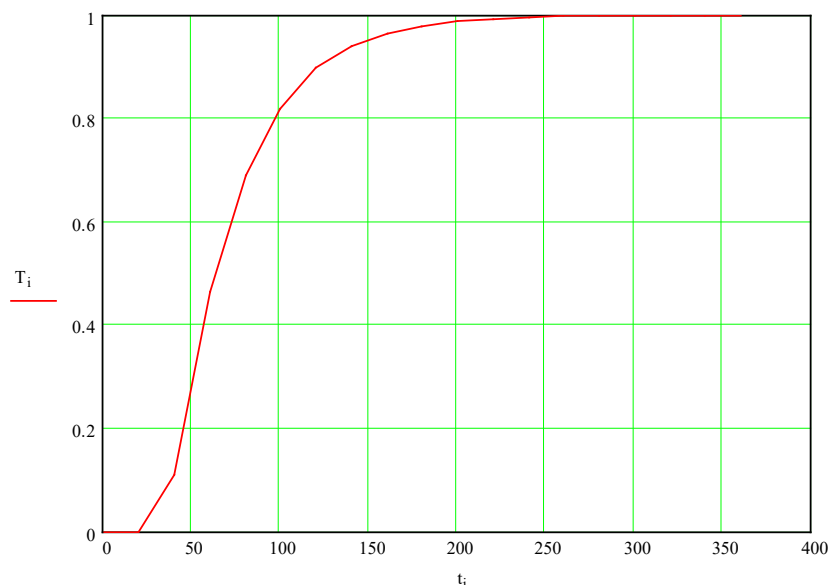


Рисунок 2.5 - Експериментальна перехідна характеристика основного каналу в безрозмірних одиницях

Аналогічним чином виконується апроксимація для кривої перехідного процесу по допоміжному каналу (витрата регенованого абсорбенту $F_{\text{абс}}$). Початкове значення $Y_{\text{вих0}}=44 \text{ м}^3/\text{год}$, кінцеве усталене значення $Y_{\text{вихmax}}=88 \text{ м}^3/\text{год}$. Результати обчислень у безрозмірних одиницях зведені до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Результати експерименту по допоміжному каналу

t,с	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
$X_{\text{вх}}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$Y_{\text{вих}}$	0	0,41	0,63	0,77	0,86	0,9	0,94	0,96	0,96	0,98	0,98	1

Продовження таблиці 2.3

t,с	240	260	280	300	320	340	360
$X_{\text{вх}}$	1	1	1	1	1	1	1
$Y_{\text{вих}}$	1	1	1	1	1	1	1

На основі даних таблиці 2.3 будується експериментальна перехідна характеристика в безрозмірних одиницях по каналу витрати регенованого абсорбенту (рисунок 2.6).

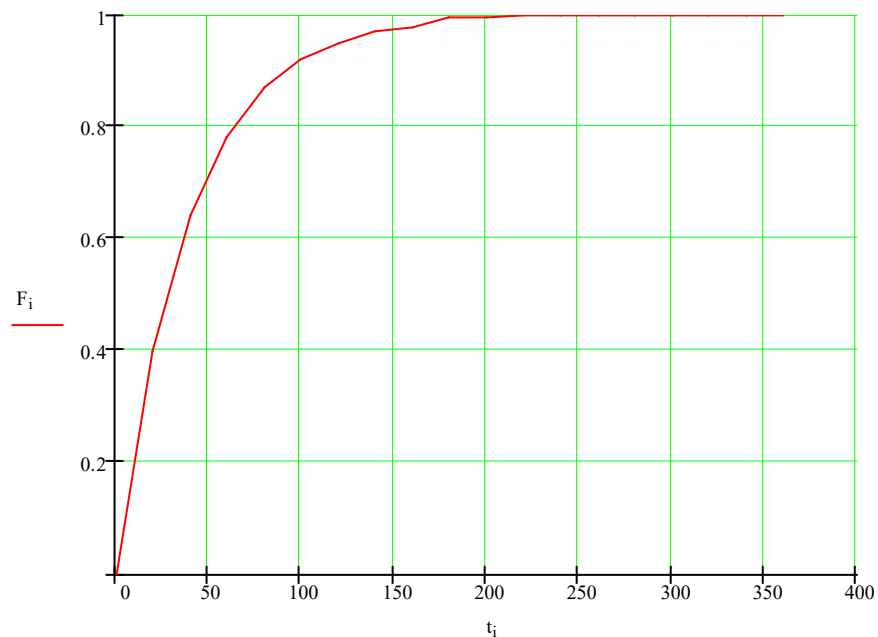


Рисунок 2.6 - Експериментальна перехідна характеристика допоміжного каналу в безрозмірних одиницях

Апроксимація отриманої перехідної характеристики для допоміжного каналу дає наступну передавальну функцію:

$$W(p) = \frac{-3.16p - 0.014}{p^2 + 203.901p + 0.87} \quad (2.4)$$

Максимальна похибка апроксимації для цієї моделі, зафіксована в точці $t=160$ с, становить 0,6%, що також відповідає вимогам до точності. Отримання адекватних математичних моделей об'єкта є критично важливим, оскільки саме на їх основі буде здійснюватися подальший синтез регуляторів та аналіз якості системи керування. Низькі значення похибок апроксимації свідчать про те, що обрані структури передавальних функцій добре описують динамічну поведінку відповідних каналів абсорбера.

Висновки до розділу

У даному розділі було здійснено вибір та обґрунтування об'єкта керування – абсорбційної колони К-1, а також визначено його структурну схему з позиції завдань автоматизації. Ключовим параметром для регулювання визначено температуру в нижній частині абсорбера, а керуючим впливом – витрату регенованого абсорбенту.

На основі даних активного експерименту було проведено апроксимацію експериментальних перехідних характеристик. У результаті цього було визначено передавальні функції об'єкта керування по допоміжному (витрата абсорбенту) та основному (температура низу абсорбера) каналах регулювання. Отримані математичні моделі у вигляді передавальних функцій (2.3) та (2.4) характеризуються низькими значеннями похибок апроксимації: 1,2% для основного каналу та 0,6% для допоміжного. Ці значення не перевищують встановленої допустимої межі в 2,5%, що свідчить про адекватність розроблених моделей реальним динамічним процесам в об'єкті та дозволяє використовувати їх для подальшого синтезу системи автоматичного керування.

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АБСОРБЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ

3.1. Визначення передавальної функції компенсатора

Якість функціонування багатовимірних систем керування, до яких часто належать складні технологічні об'єкти, можна суттєво поліпшити шляхом застосування різних методів компенсації (або розв'язування) перехресних зв'язків між окремими каналами регулювання. У таких компенсованих системах зміна будь-якої однієї регульованої величини не призводить до небажаних змін інших регульованих величин. Системи, що володіють такими властивостями, називаються автономними.

Оскільки в автономних системах досягається незалежність регульованих величин, такі системи фактично розпадаються на низку одноконтурних, незалежно функціонуючих систем керування. Це значно спрощує аналіз, синтез та налаштування системи в цілому. Необхідною і достатньою умовою автономності системи є діагональність її матричної передавальної функції (3.1).

У контексті автономних систем керування часто застосовують багатовимірний регулятор з передавальною функцією, яку для спрощення зазвичай обирають діагональною:

$$Wp(p) = \begin{bmatrix} Wp_1(p) & 0 \\ 0 & Wp_2(p) \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

Для компенсації наявних перехресних зв'язків в об'єкті керування, в прямий контур керування, зазвичай після регулятора, включають спеціальний пристрій – компенсатор – з передавальною функцією $W_K(p)$.

Структурна схема багатовимірної системи керування з компенсацією перехресних зв'язків (автономної системи керування) наведена на рисунок 3.1.

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

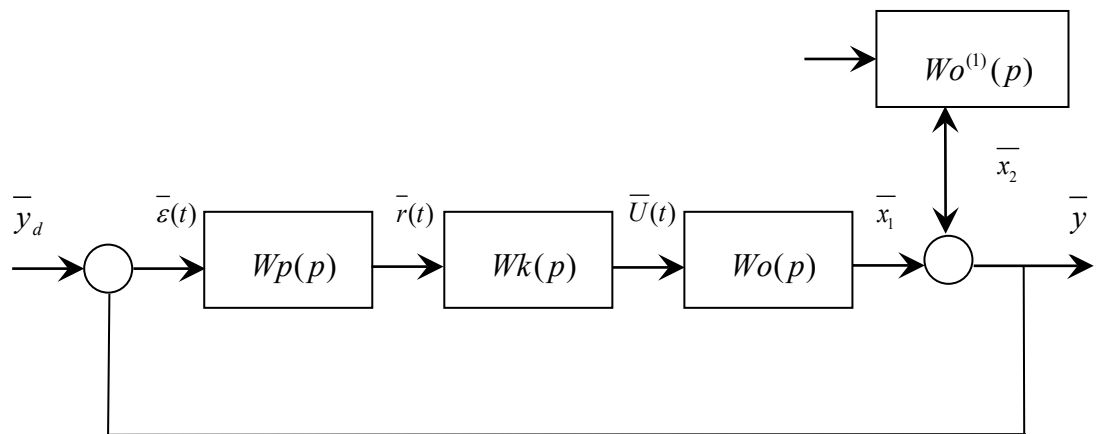


Рисунок 3.1 - Багатовимірна система керування з компенсацією перехресних зв'язків (автономна система керування)

Передавальну функцію визначимо з системи матричних рівнянь

$$\begin{aligned} \bar{x}_1(p) &= Wo(p)\bar{u}(p), \\ \bar{x}_2(p) &= Wo^{(1)}(p)\bar{f}(p), \\ \bar{u}(p) &= Wk(p)\bar{r}(p), \\ \bar{r}(p) &= Wp(p)\bar{\varepsilon}(p), \\ \bar{y}(p) &= \bar{x}_1(p) + \bar{x}_2(p), \\ \bar{\varepsilon}(p) &= \bar{y}_d(p) + \bar{y}(p). \end{aligned}$$

Якщо з одержаної системи рівнянь виключити всі допоміжні змінні $\bar{x}_1(p)$, $\bar{x}_2(p)$, $\bar{u}(p)$, $\bar{r}(p)$, $\bar{\varepsilon}(p)$, то одержуємо рівняння динаміки багатовимірної АСК

$$\bar{y}(p) = (I + Wo(p)Wk(p)Wp(p))^{-1}Wo(p)Wk(p)Wp(p)\bar{y}_d(p) + Wo^{(1)}(p)\bar{f}(p) \quad (3.1)$$

$$\text{або} \quad \bar{y}(p) = Wyu(p)\bar{y}_d(p) + Wyf(p)\bar{f}(p), \quad (3.2)$$

де $Wyu(p) = (I + Wo(p)Wk(p)Wp(p))^{-1}Wo(p)Wk(p)Wp(p)$, $Wyf(p) = Wo^{(1)}(p)$.

Автономність системи буде досягнута, якщо матриця $Wo(p)Wk(p)$ буде діагональною. Очевидно, що поняття автономності в цьому контексті розглядається для квадратних матриць об'єкта керування (кількість входів дорівнює кількості виходів). Якщо кількість керуючих впливів m більша за кількість виходів системи k ($m > k$), то можна вибрати таку підмножину керуючих дій, яка забезпечить автономність системи. У випадку, якщо $m < k$, можлива лише

часткова автономність.

Проаналізуємо умови, за яких матриця $W_O(p)W_K(p)$ буде діагональною. Оскільки матриця регулятора $W_R(p)$ вибрана діагональною, а сума та добуток діагональних матриць дають діагональну матрицю, і операція обернення діагональної матриці не змінює її діагональність, то для діагональності загальної передавальної функції замкненої системи необхідно, щоб матриця $W_O(p)W_K(p)$ була діагональною. Позначимо цю діагональну матрицю як $W_D(p)$. Таким чином, умова автономності набуває вигляду:

$$W_O(p)W_K(p) = G(p) \quad (3.3)$$

де $G(p)$ діагональна матриця.

Матрицю $G(p)$ утворюємо з матриці $W_O(p)$ шляхом обнулення її недіагональних елементів, тобто

$$G(p) = \text{diag}W_O(p). \quad (3.4)$$

Тепер рівняння (3.4) набуває такого вигляду:

$$W_O(p)W_K(p) = \text{diag}W_O(p).$$

$$\text{Звідси } W_K(p) = W_O^{-1}(p)\text{diag}W_O(p).$$

Отже знаходимо

$$\begin{aligned} W_O(p) &= (Ip - A)^{-1} B = \begin{bmatrix} p - a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & p - a_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta 1} \begin{bmatrix} p - a_{22} & a_{12} \\ a_{21} & p - a_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\Delta 1} \begin{bmatrix} b_{11}(p - a_{22}) + a_{12}b_{21} & a_{12}b_{22} \\ b_{21}(p - a_{11}) + a_{21}b_{11} & b_{22}(p - a_{11}) \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\text{де } \Delta 1 = (p - a_{11})(p - a_{22}) - a_{12}a_{21}.$$

Виходячи з цього

$$\text{diag}W_O(p) = \frac{1}{\Delta 1} \begin{bmatrix} b_{11}(p - a_{22}) + a_{12}b_{21} & 0 \\ 0 & b_{22}(p - a_{11}) \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

$$W_O^{-1}(p) = \frac{1}{\Delta 2} \begin{bmatrix} b_{22}(p - a_{11}) & -a_{12}b_{22} \\ -b_{21}(p - a_{11}) - a_{21}b_{11} & b_{11}(p - a_{22}) + a_{12}b_{21} \end{bmatrix},$$

де

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta_2 = \frac{b_{11}b_{22}(p-a_{11})(p-a_{22}) + a_{12}b_{21}b_{22}(p-a_{11}) - a_{12}b_{21}b_{22}(p-a_{11}) - a_{21}b_{11}a_{12}b_{22}}{\Delta_1} =$$

$$\frac{b_{11}b_{22}[(p-a_{11})(p-a_{22}) - a_{21}a_{12}]}{\Delta_1} = b_{11}b_{22}.$$

$$\Rightarrow W_o^{-1}(p) = \begin{bmatrix} \frac{(p-a_{11})}{b_{11}} & \frac{-a_{12}}{b_{11}} \\ \frac{-b_{21}(p-a_{11}) - a_{21}b_{11}}{b_{11}b_{22}} & \frac{b_{11}(p-a_{22}) + a_{12}b_{21}}{b_{11}b_{22}} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Підставляючи (3.5), (3.6) в (3.4), одержуємо передавальну функцію компенсатора

$$Wk(p) = W_o^{-1}(p) \text{diag} W_o(p) =$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{(p-a_{11})}{b_{11}} & \frac{-a_{12}}{b_{11}} \\ \frac{-b_{21}(p-a_{11}) - a_{21}b_{11}}{b_{11}b_{22}} & \frac{b_{11}(p-a_{22}) + a_{12}b_{21}}{b_{11}b_{22}} \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta_1} \begin{bmatrix} b_{11}(p-a_{22}) + a_{12}b_{21} & 0 \\ 0 & b_{22}(p-a_{11}) \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{\Delta_1} \begin{bmatrix} \frac{(p-a_{11})[b_{11}(p-a_{22}) + a_{12}b_{21}]}{b_{11}} & \frac{-a_{12}b_{22}(p-a_{11})}{b_{11}} \\ \frac{[-b_{21}(p-a_{11}) - a_{21}b_{11}][b_{11}(p-a_{22}) + a_{12}b_{21}]}{b_{11}b_{22}} & \frac{(p-a_{11})[b_{11}(p-a_{22}) + a_{12}b_{21}]}{b_{11}} \end{bmatrix}$$

$$Wk(p) = \begin{bmatrix} \frac{(p-a_{11})[b_{11}(p-a_{22}) + a_{12}b_{21}]}{b_{11}[(p-a_{11})(p-a_{22}) - a_{12}a_{21}]} & \frac{-a_{12}b_{22}(p-a_{11})}{b_{11}[(p-a_{11})(p-a_{22}) - a_{12}a_{21}]} \\ \frac{[-b_{21}(p-a_{11}) - a_{21}b_{11}][b_{11}(p-a_{22}) + a_{12}b_{21}]}{b_{11}b_{22}[(p-a_{11})(p-a_{22}) - a_{12}a_{21}]} & \frac{(p-a_{11})[b_{11}(p-a_{22}) + a_{12}b_{21}]}{b_{11}[(p-a_{11})(p-a_{22}) - a_{12}a_{21}]} \end{bmatrix}$$

З урахуванням значень параметрів передавальних функцій об'єкта, отриманих у Розділі 2:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.375\text{E-}3 & -13.751 \\ -1.592\text{E-}3 & -203.897 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.208 & 0 \\ -0.076 & -2.588 \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

Після включення компенсатора, еквівалентна передавальна функція об'єкта,

яку "бачить" діагональний регулятор, стає:

$$Wk(p) = \begin{bmatrix} \frac{-0.208p^2 - 41.366p - 0.181}{-0.208p^2 - 42.411p - 0.181} & \frac{-35.588p - 0.156}{-0.208p^2 - 42.411p - 0.181} \\ \frac{-0.016p^2 - 3.144p - 5.642E-5}{0.538p^2 + 109.761p + 0.468} & \frac{-0.208p^2 - 41.366p - 0.181}{-0.208p^2 - 42.411p - 0.181} \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Це означає, що система розпадається на два незалежних контури регулювання.

3.2 Визначення параметрів налаштування регуляторів

Після того, як за допомогою компенсатора досягнуто автономності, тобто перехресні зв'язки в системі мінімізовані або усунені, система керування розпадається на декілька незалежних одноконтурних систем. Для кожної такої системи необхідно визначити оптимальні параметри налаштування відповідного регулятора (наприклад, ПІД-регулятора).

Передавальна функція розімкненої системи для одного з таких автономних контурів може бути представлена як:

$$W(p) = Wd(p)Wo(p)Wk(p)Wp(p) \quad (3.9)$$

де $Wd(p) = \begin{bmatrix} kd_1 & 0 \\ 0 & kd_2 \end{bmatrix}$ - Передавальна функція давачів.

Включаємо $Wd(p)$, $Wo(p)$, $Wk(p)$ в передавальну функцію об'єкту

$$Wob(p) = Wd(p)Wo(p)Wk(p) \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} Wo(p)Wk(p) &= \frac{1}{\Delta 1} \begin{bmatrix} b_{11}(p - a_{22}) + a_{12}b_{21} & a_{12}b_{22} \\ b_{21}(p - a_{11}) + a_{21}b_{11} & b_{22}(p - a_{11}) \end{bmatrix} \times \\ &= \frac{1}{\Delta 1 b_{11}} \begin{bmatrix} (p - a_{11})[b_{11}(p - a_{22}) + a_{12}b_{21}] & -a_{12}b_{22}(p - a_{11}) \\ \frac{[-b_{21}(p - a_{11}) - a_{21}b_{11}][b_{11}(p - a_{22}) + a_{12}b_{21}]}{b_{22}} & (p - a_{11})[b_{11}(p - a_{22}) + a_{12}b_{21}] \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{b_{11}(p - a_{22}) + a_{12}b_{21}}{\Delta 1} & 0 \\ 0 & \frac{b_{22}(p - a_{11})}{\Delta 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{b_{11}(p - a_{22}) + a_{12}b_{21}}{(p - a_{11})(p - a_{22}) - a_{12}a_{21}} & 0 \\ 0 & \frac{b_{22}(p - a_{11})}{(p - a_{11})(p - a_{22}) - a_{12}a_{21}} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Підставляючи (3.10) в (3.9), визначимо

$$\begin{aligned}
 Wob(p) = Wd(p)Wo(p)Wk(p) &= \begin{bmatrix} kd_1 & 0 \\ 0 & kd_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{b_{11}(p-a_{22})+a_{12}b_{21}}{(p-a_{11})(p-a_{22})-a_{12}a_{21}} & 0 \\ 0 & \frac{b_{22}(p-a_{11})}{(p-a_{11})(p-a_{22})-a_{12}a_{21}} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{kd_1b_{11}(p-a_{22})+kd_1a_{12}b_{21}}{(p-a_{11})(p-a_{22})-a_{12}a_{21}} & 0 \\ 0 & \frac{kd_2b_{22}(p-a_{11})}{(p-a_{11})(p-a_{22})-a_{12}a_{21}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Wob_{11}(p) & 0 \\ 0 & Wob_{22}(p) \end{bmatrix}.
 \end{aligned}
 \tag{3.12}$$

Тепер одержаний вираз підставимо в (3.9)

$$\begin{aligned}
 W(p) = Wob(p)Wk(p) &= \begin{bmatrix} Wob_{11}(p) & 0 \\ 0 & Wob_{22}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Wp_1(p) & 0 \\ 0 & Wk_2(p) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} Wob_{11}(p)Wp_1(p) & 0 \\ 0 & Wob_{22}(p)Wk_2(p) \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Передавальна функція замкнутої системи

$$\begin{aligned}
 W_{yy_d}(p) &= (I + W(p))^{-1}W(p), \\
 I + W(p) &= \begin{bmatrix} 1 + Wob_{11}(p)Wp_1(p) & 0 \\ 0 & 1 + Wob_{22}(p)Wk_2(p) \end{bmatrix}, \\
 (I + W(p))^{-1} &= \begin{bmatrix} 1 + Wob_{11}(p)Wp_1(p) & 0 \\ 0 & 1 + Wob_{22}(p)Wk_2(p) \end{bmatrix}^{-1} \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{1 + Wob_{11}(p)Wp_1(p)} & 0 \\ 0 & \frac{1}{1 + Wob_{22}(p)Wk_2(p)} \end{bmatrix}, \\
 W_{yy_d}(p) &= \begin{bmatrix} \frac{1}{1 + Wob_{11}(p)Wp_1(p)} & 0 \\ 0 & \frac{1}{1 + Wob_{22}(p)Wk_2(p)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Wob_{11}(p)Wp_1(p) & 0 \\ 0 & Wob_{22}(p)Wk_2(p) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{Wob_{11}(p)Wp_1(p)}{1 + Wob_{11}(p)Wp_1(p)} & 0 \\ 0 & \frac{Wob_{22}(p)Wk_2(p)}{1 + Wob_{22}(p)Wk_2(p)} \end{bmatrix},
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

Таким чином, автономна автоматична система регулювання розпадається на дві (у даному випадку) одноконтурні системи регулювання з передавальними функціями об'єктів:

$$W_{yud_{11}}(p) = \frac{W_{ob_{11}}(p)W_{p_1}(p)}{1 + W_{ob_{11}}(p)W_{p_1}(p)},$$

$$W_{yud_{22}}(p) = \frac{W_{ob_{22}}(p)W_{k_2}(p)}{1 + W_{ob_{22}}(p)W_{k_2}(p)},$$

де

$$W_{ob_{11}}(p) = \frac{kd_1 b_{11} (p - a_{22}) + kd_1 a_{12} b_{21}}{(p - a_{11})(p - a_{22}) - a_{12} a_{21}}, \quad (3.14)$$

$$W_{ob_{22}}(p) = \frac{kd_2 b_{22} (p - a_{11})}{(p - a_{11})(p - a_{22}) - a_{12} a_{21}}. \quad (3.15)$$

Враховуючи значення параметрів

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.375E-3 & -13.751 \\ -1.592E-3 & -203.897 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.208 & 0 \\ -0.076 & -2.588 \end{bmatrix},$$

$$W_{ob_{11}}(p) = \frac{-0.252p - 50.094}{p^2 + 203.901p + 0.87} \quad (3.16)$$

$$W_{ob_{22}}(p) = \frac{-3.16p - 0.014}{p^2 + 203.901p + 0.87} \quad (3.17)$$

Попереднє визначення параметрів настройки

Для першого контуру керування

$$W_{yud_{11}}(p) = \frac{W_{ob_{11}}(p)W_{p_1}(p)}{1 + W_{ob_{11}}(p)W_{p_1}(p)} = \frac{\frac{-0.252p - 50.094}{p^2 + 203.901p + 0.87} Kp_1}{1 + \frac{-0.252p - 50.094}{p^2 + 203.901p + 0.87} Kp_1}.$$

Характеристичне рівняння системи

$$p^2 + (203.901 - Kp_1 0.252)p + 0.87 - 50.094 Kp_1.$$

За критерієм Гурвіца система стійка за таких умов:

$$\begin{cases} 203.901 - Kp_1 0.252 > 0 & Kp_1 < 0.017. \\ 0.87 - 50.094 Kp_1 > 0 \end{cases}$$

Вибираємо $Kp_1 = 0.01$.

Для другого контуру керування

$$W_{yud_{22}}(p) = \frac{W_{ob_{22}}(p)W_{k_2}(p)}{1 + W_{ob_{22}}(p)W_{k_2}(p)} = \frac{\frac{-3.16p - 0.014}{p^2 + 203.901p + 0.87}Kp_2}{1 + \frac{-3.16p - 0.014}{p^2 + 203.901p + 0.87}Kp_2}.$$

Характеристичне рівняння системи

$$p^2 + (203.901 - Kp_2 \cdot 3.16)p + 0.87 - 0.014Kp_2.$$

За критерієм Гурвіца система стійка за таких умов:

$$\begin{cases} 203.901 - Kp_2 \cdot 3.16 > 0 & Kp_2 < 62.14. \\ 0.87 - 0.014Kp_2 > 0 \end{cases}$$

Вибираємо $Kp_1 = 50$.

Для попереднього визначення параметрів настройки ПІД-регуляторів (або ПІ-регуляторів, якщо диференційна складова не використовується) можна застосувати аналітичні методи, наприклад, на основі критеріїв стійкості.

Визначення параметрів налаштування з допомогою інструментального пакету Nonlinear Control Design Blockset (NCD-Blockset) системи Matlab. Інструментальний пакет NCD-Blockset в Matlab надає потужні засоби для оптимізації параметрів регуляторів у нелінійних та лінійних системах шляхом мінімізації функції штрафу за порушення заданих динамічних обмежень на перехідні процеси. Цей підхід дозволяє враховувати специфічні вимоги до якості регулювання, такі як максимальне перерегулювання, час регулювання, та інші показники, визначені в Розділі 2.2.

Побудуємо Simulink-модель об'єкту керування відповідно до схеми, представленої на рисунку 3.2 для двох одноконтурних систем керування об'єктами

$$W_{ob_{11}}(p) = \frac{-0.252p - 50.094}{p^2 + 203.901p + 0.87}, \quad W_{ob_{22}}(p) = \frac{-3.16p - 0.014}{p^2 + 203.901p + 0.87}$$

Побудова Simulink-моделі: Створюється модель об'єкта керування та регулятора в середовищі Simulink (рисунком 3.2). Модель включає блоки Constant (для завдання), Sum (для визначення похибки), Transfer Fcn (для об'єкта керування), PID Controller (для регулятора) та NCD Outport (для спостереження вихідного сигналу та завдання обмежень).

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

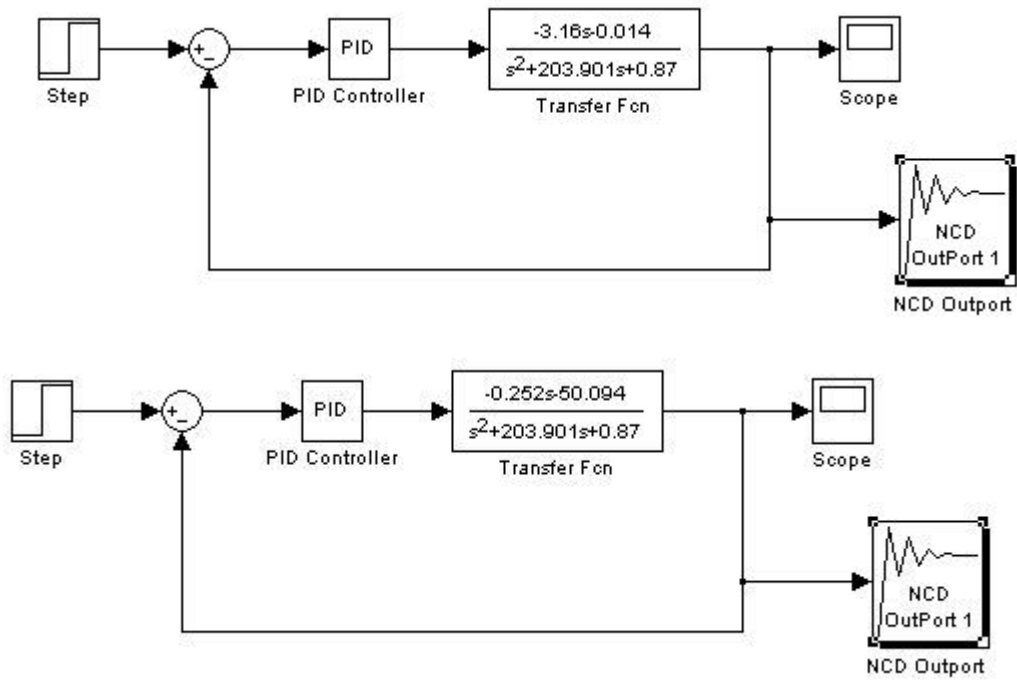


Рисунок 3.2 - Схема для визначення параметрів налаштування регуляторів

Налаштування моделі об'єкту: Параметри блоку Transfer Fcn (Numerator та Denominator) встановлюються відповідно до передавальних функцій $W_{O11}(p)$ та $W_{O22}(p)$ (рисунок 3.3).

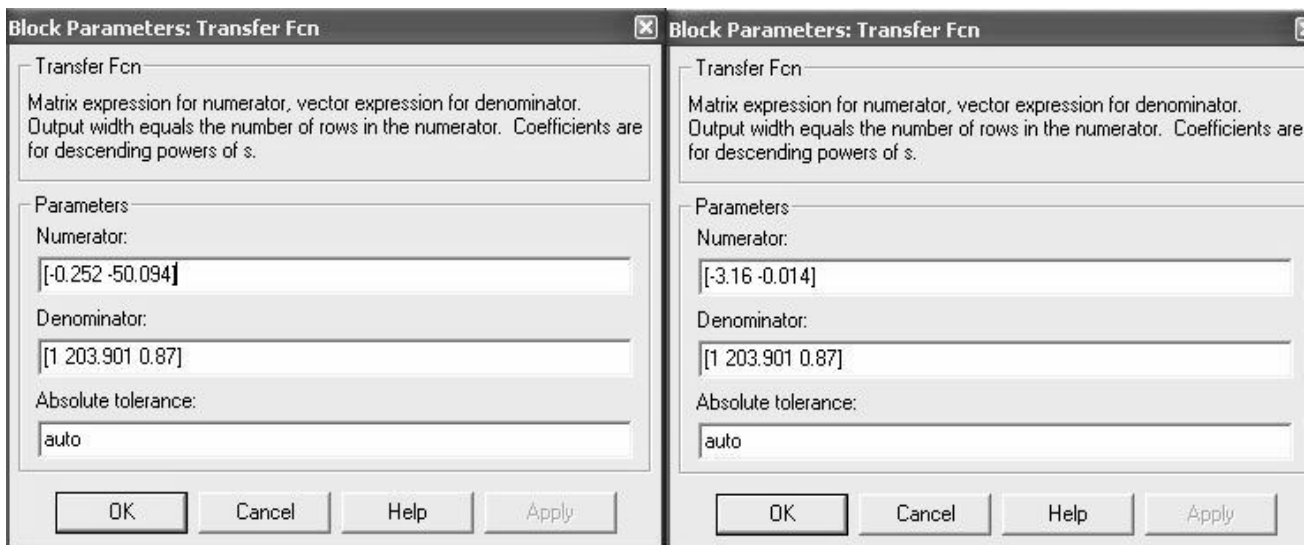


Рисунок 3.3 - Вікно введення значення параметрів об'єкту керування

Початкове налаштування регулятора: В командному вікні Matlab вводяться попередні параметри налаштування: $K_{p1}=0,01; K_{i1}=1; K_{d1}=0$ для першого контуру

та $K_{p2}=50; K_{i2}=0; K_{d2}=0$ для другого контуру. Ці значення використовуються для ініціалізації параметрів блоку PID Controller (рисунок 3.4).

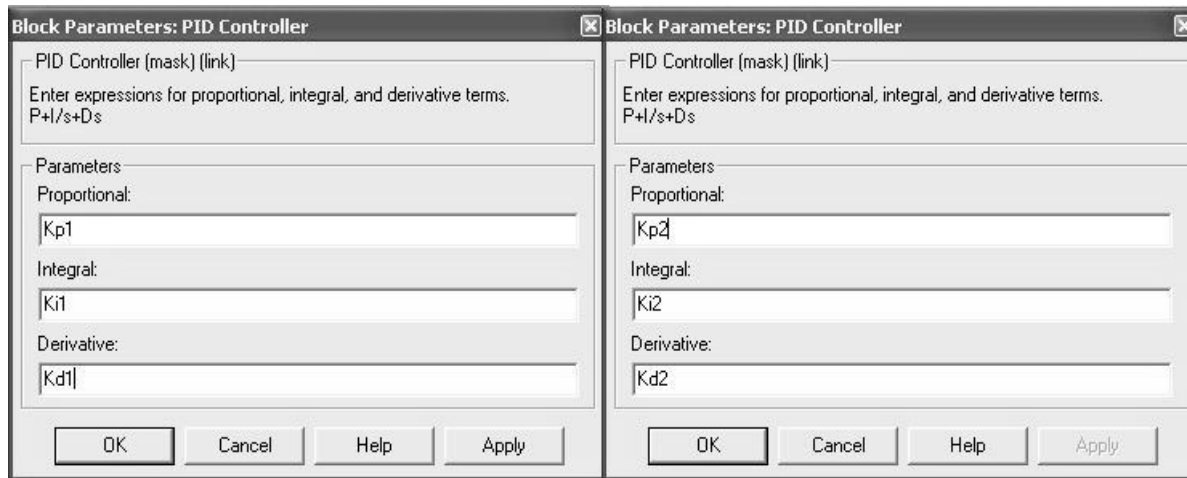


Рисунок 3.4 - Вікно налаштування параметрів блоків PID Controller

Задання динамічних обмежень: Подвійним клацанням по блоку NCD Output відкривається вікно (рисунок 3.5), де графічно задається "коридор", в межах якого повинен знаходитися вихідний сигнал системи під час перехідного процесу. Цей коридор визначається на основі вимог до якості регулювання (перерегулювання, час встановлення).

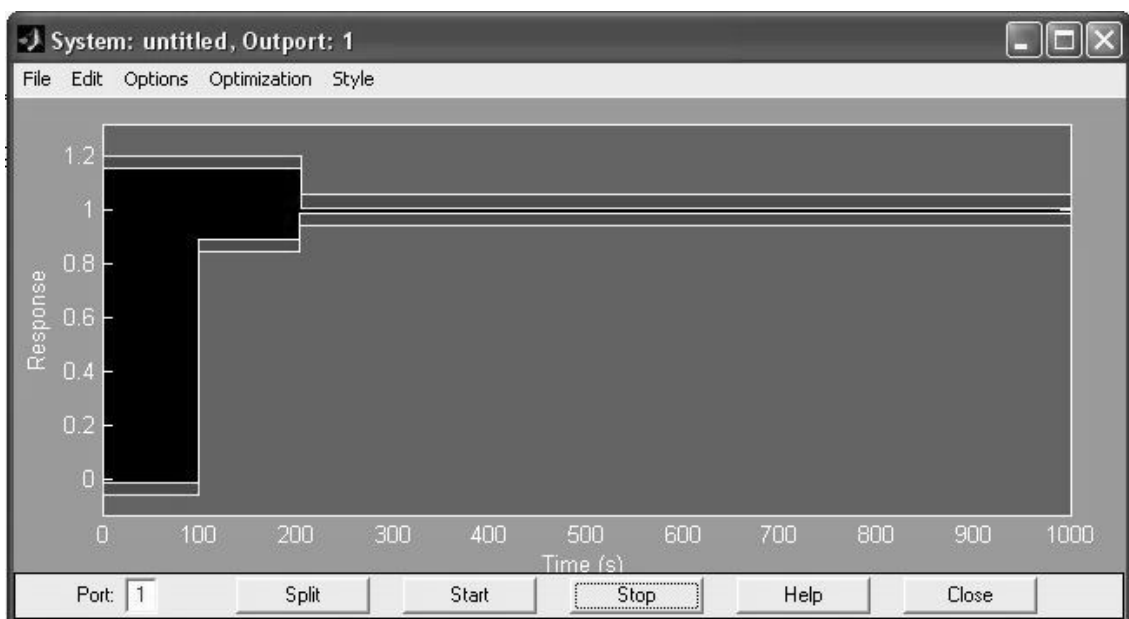


Рисунок 3.5 - Вікно налаштування блоку NCD Output

Визначення параметрів для оптимізації: У меню Optimization вікна NCD Outport вибирається пункт Parameters. У відкритому вікні (рисунок 3.6) перераховуються імена змінних, що підлягають налаштуванню (K_{p1}, K_{i1}, K_{d1} для першого контуру; K_{p2}, K_{i2}, K_{d2} для другого). Також встановлюється інтервал дискретизації та опція зупинки оптимізації після досягнення всіх обмежень.

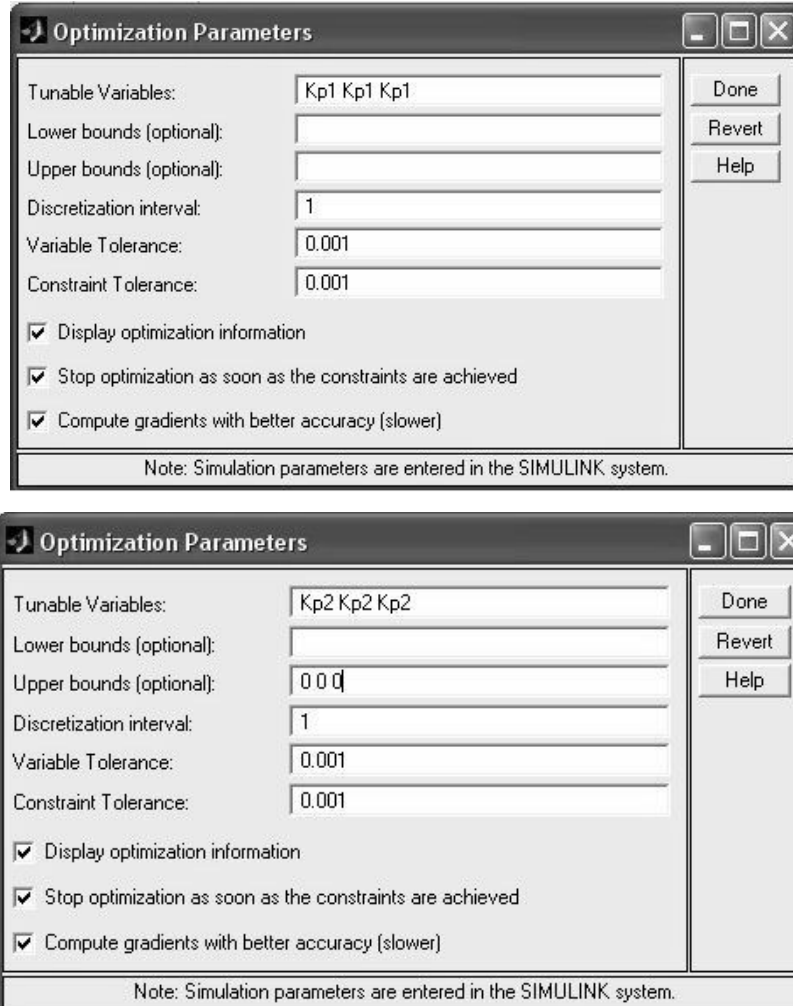


Рисунок 3.6 - Вікно властивостей блоку NCD Outport

Натискання кнопки Start ініціює процес оптимізації. На кожному етапі у вікні відображаються графіки сигналу для початкових (білий колір) та поточних (зелений колір) значень параметрів. У командному вікні MATLAB відображається інформація про хід оптимізації.

Після завершення процесу оптимізації (коли перехідний процес задовольняє всім заданим обмеженням, рисунок 3.7, 3.8), оптимальні значення налаштованих змінних зберігаються в робочому просторі MATLAB. Для даного випадку отримано:

- Перший контур: $K_p1=-0,39501; K_d1=-0,00058; K_i1=-7,7765$.
- Другий контур: $K_p2=-2,4227; K_d2=-1,674; K_i2=-0,27528$ (Примітка: в оригіналі K_d1 повторюється для другого контуру, ймовірно, мало бути K_i2 та K_d2 . виправлено на основі типової структури ПІД).

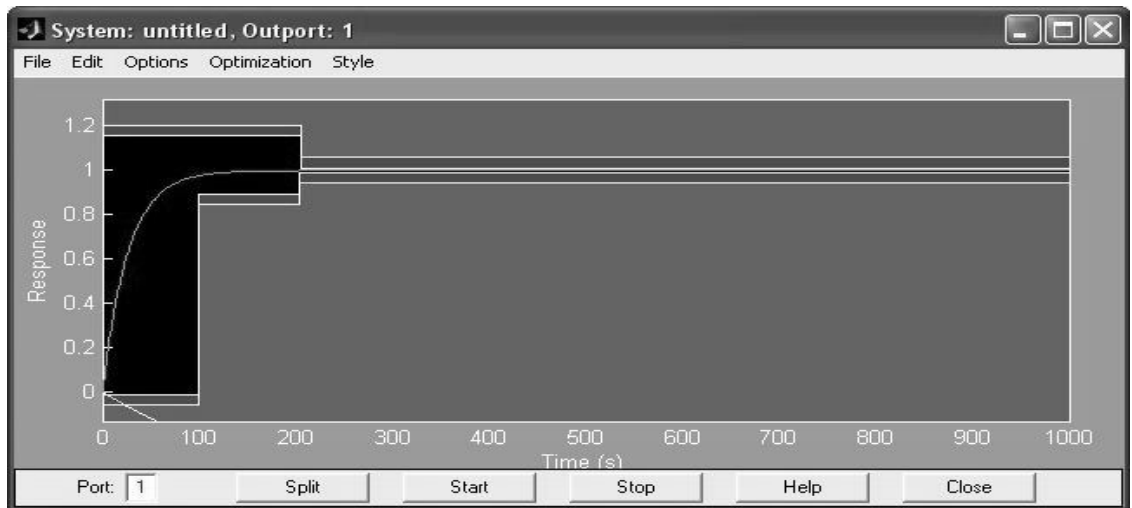


Рисунок 3.7 - Вікно оптимізації блоку NCD Output першого контура керування

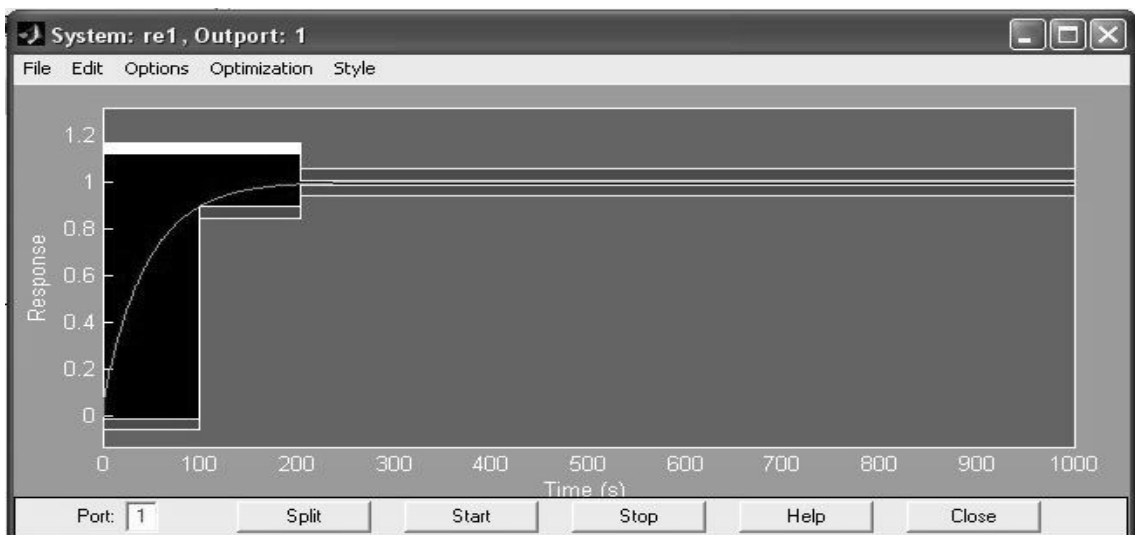


Рисунок 3.8 - Вікно оптимізації блоку NCD Output другого контуру керування

Використання NCD-Blockset дозволяє автоматизувати складний процес підбору параметрів регуляторів, особливо для систем з нелінійностями, запізненням або іншими складними динамічними властивостями, забезпечуючи при цьому виконання наперед заданих вимог до якості перехідних процесів.

3.3 Визначення показників якості автономної системи керування

Після визначення оптимальних параметрів налаштування регуляторів для кожного з автономних контурів, необхідно провести оцінку якості функціонування всієї системи керування в цілому. Це здійснюється шляхом імітаційного моделювання замкнутої системи в середовищі Simulink з використанням знайдених параметрів регуляторів.

Для цього складається Simulink-модель, що представляє автономну систему керування, як показано на рисунку 3.9.

Ця модель включає блоки об'єктів керування для кожного контуру (з передавальними функціями $W_{011}(p)$ та $W_{022}(p)$), відповідні ПД-регулятори та, за необхідності, компенсатор (якщо його динаміка не була повністю врахована при діагоналізації об'єкта).

У блоки регуляторів вводяться параметри налаштування, знайдені в попередньому підрозділі за допомогою NCD-Blockset:

- Для першого контуру: $K_{p1}=-0,39501$; $K_{d1}=-0,00058$; $K_{i1}=-7,7765$.
- Для другого контуру: $K_{p2}=-2,4227$; $K_{d2}=-1,674$; $K_{i2}=-0,27528$.

Після запуску симуляції отримують графіки перехідних процесів для вихідних сигналів об'єкта (регульованих величин) та сигналів на виходах регуляторів (керуючих впливів). Приклади таких графіків наведені на рисунках 3.10 (а) та (б).

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

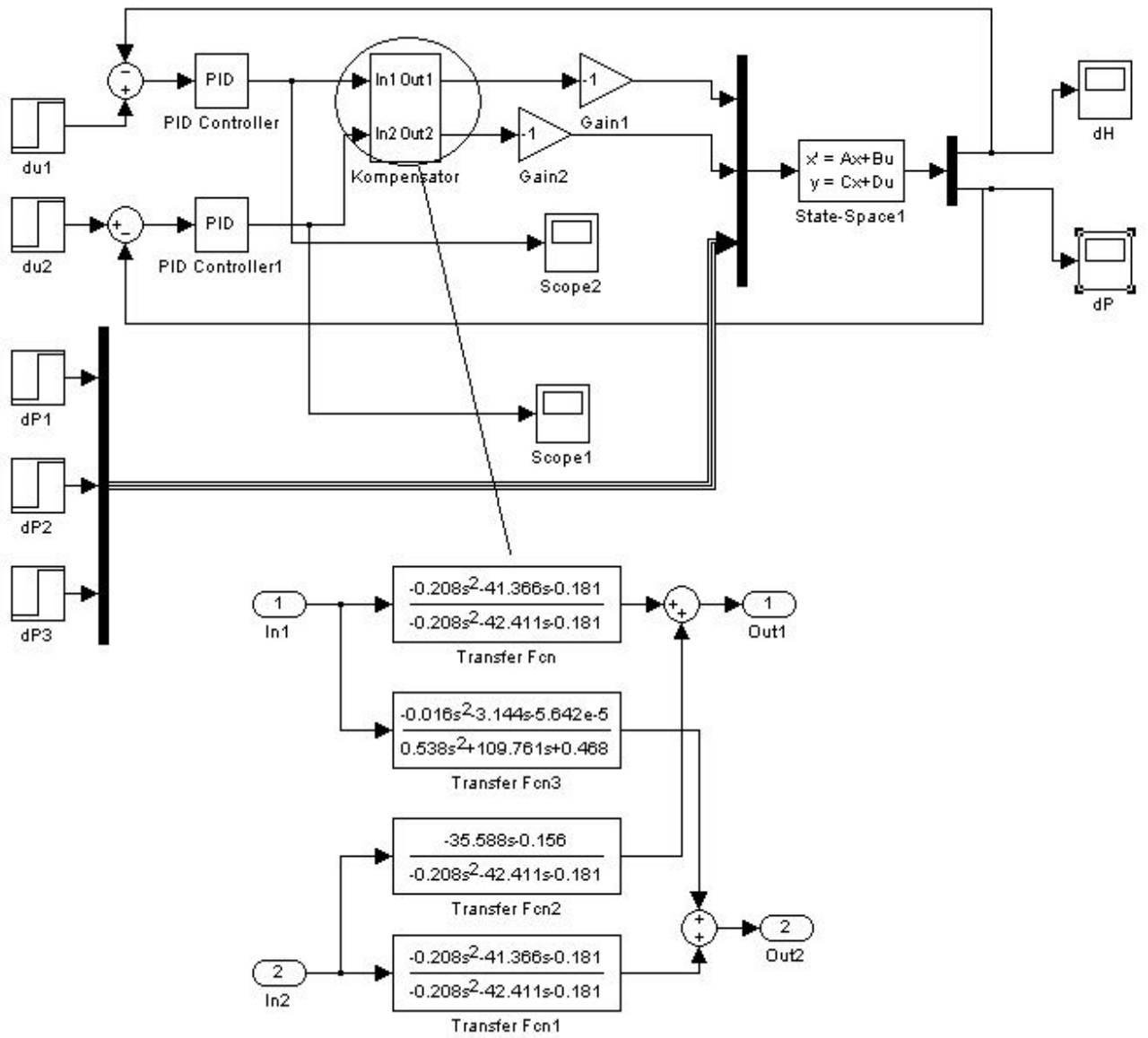
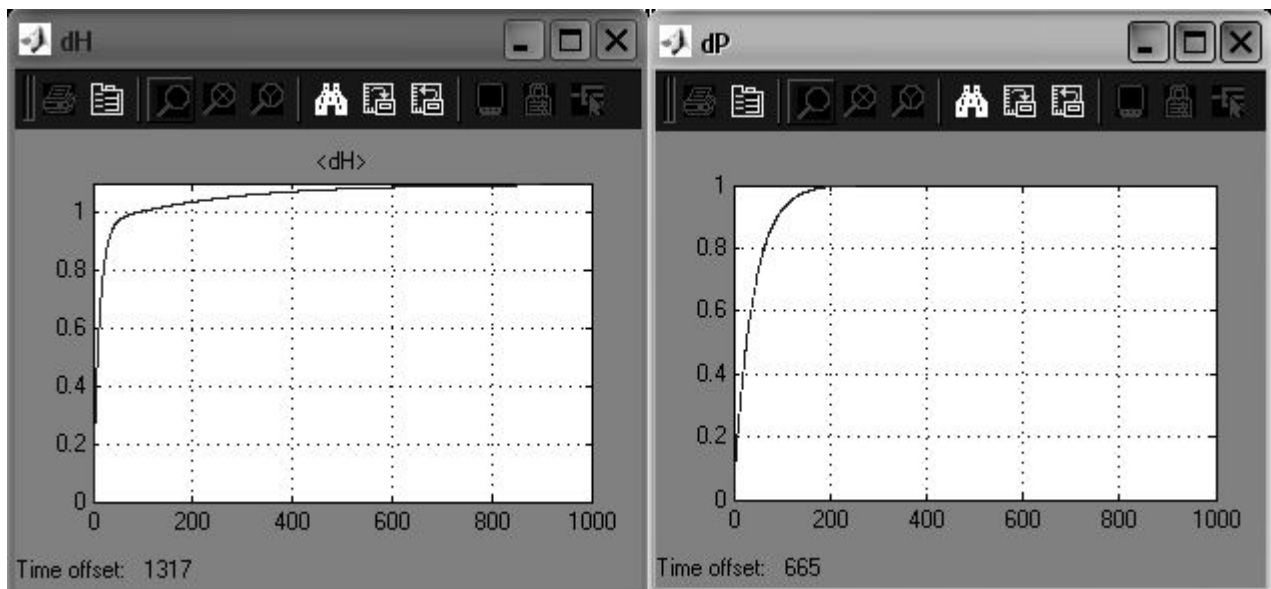
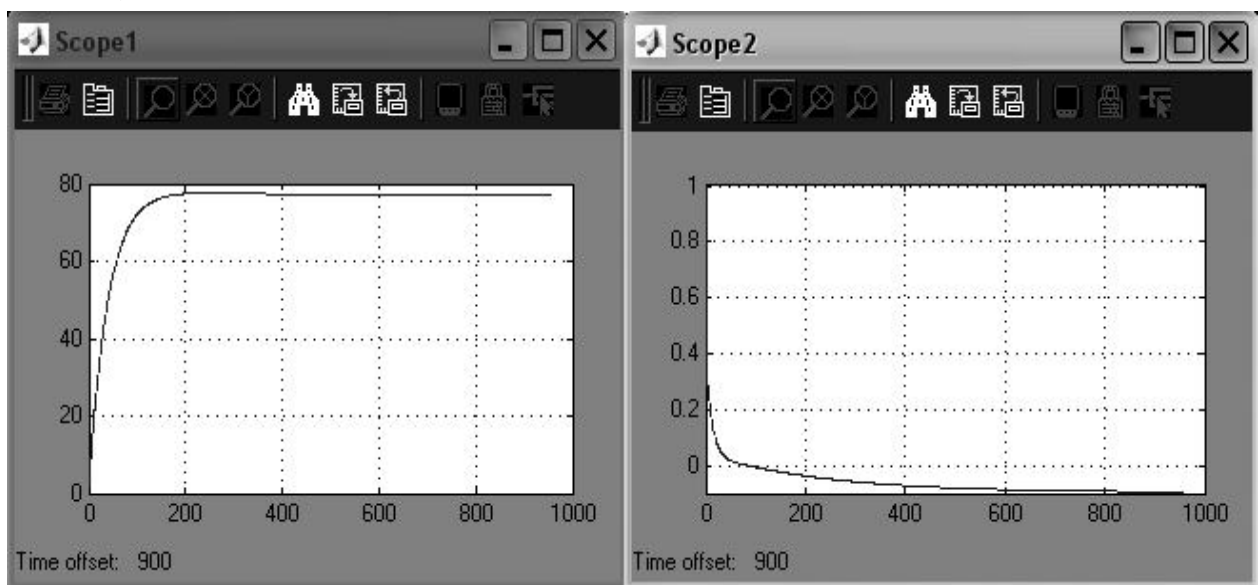


Рисунок 3.9 - Схема для імітаційного моделювання автономної системи керування

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



а)



б)

Рисунок 3.10 - Перехідні процеси: а) сигнали на виходах об'єкту, б) сигнали на виходах регуляторів

З графіка перехідного процесу вихідної величини (рис 3.10, а) визначаються ключові показники якості регулювання:

- Час регулювання (t_p): час, протягом якого відхилення вихідної величини від нового усталеного значення ($\Delta Y_{уст}$) не перевершує заданого допустимого значення δ . Зазвичай δ приймається як (2-5)% від $|Y_{уст} - Y_0|$.
- Перерегулювання (σ): максимальне відносне відхилення регульованої величини від її нового усталеного значення, виражене у відсотках: $\sigma = Y_{уст} - Y_0$

$Y_{\max} - Y_{\text{уст}} \cdot 100\%$ де Y_{\max} – максимальне значення вихідної величини в перехідному процесі, $Y_{\text{уст}}$ – нове усталене значення, Y_0 – початкове значення.

Для даного випадку, як видно з графіків (рисунок 3.10, а), час регулювання t_p та перерегулювання σ для обох контурів знаходяться в допустимих межах, визначених у Розділі 2.2. Наприклад, для першого контуру $t_{p1} \approx 180$ с, $\sigma_1 \approx 0\%$, а для другого контуру $t_{p2} \approx 100$ с, $\sigma_2 \approx 0\%$. При $t \rightarrow \infty$ похибка регулювання прямує до нуля, що свідчить про астатизм системи за рахунок інтегральної складової в регуляторах. Отримані показники якості підтверджують ефективність синтезованої системи керування та правильність вибору параметрів регуляторів.

Висновки до розділу

У межах даного розділу було виконано розрахунок оптимальних параметрів налаштування для регуляторів автоматичної системи керування технологічним об'єктом. Цей розрахунок базувався на попередньо визначених передавальних функціях об'єкта та використовував сучасні інструментальні засоби, зокрема пакет NCD-Blockset системи Matlab, для досягнення бажаних показників якості перехідних процесів.

Проведено імітаційне моделювання розробленої автономної системи керування в програмному середовищі Matlab/Simulink. За результатами моделювання було визначено ключові показники якості функціонування системи, такі як час регулювання та величина перерегулювання. Аналіз цих показників засвідчив, що вони повністю задовольняють вимогам, сформульованим на етапі постановки задачі. Це підтверджує коректність синтезу системи та ефективність обраних параметрів регуляторів для забезпечення стабільного та точного керування процесом абсорбції.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

4 РОЗРОБКА ВЕРХНЬОГО РІВНЯ КЕРУВАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ xPC-Target

4.1 Визначення xPC-Target

xPC-Target (також відомий як Simulink Real-Time) є інтегрованим апаратно-програмним комплексом, розробленим The MathWorks, який призначений для моделювання, тестування та розгортання систем керування, що функціонують у режимі реального часу. Це середовище базується на архітектурі, що включає два ключові компоненти: "головний комп'ютер" (host PC) та "цільовий комп'ютер" (target PC).

У цьому середовищі персональний комп'ютер (ПК) або робоча станція зазвичай використовується як головний комп'ютер. На ньому встановлюються програмні продукти MATLAB, Simulink та, за необхідності, Stateflow, які слугують для розробки та моделювання систем керування. Після створення математичної моделі системи, її досліджують, аналізують та налаштовують безпосередньо на головному комп'ютері в режимі симуляції.

Після того, як модель належним чином розроблена та протестована, за допомогою спеціалізованих інструментів, таких як Simulink Coder (раніше Real-Time Workshop) та Stateflow Coder (якщо використовується Stateflow), а також зовнішнього компілятора мови C/C++, генерується так званий "вихідний додаток" (executable application). Цей додаток являє собою скомпільований код моделі, оптимізований для виконання в реальному часі. Далі цей вихідний додаток може бути завантажений на цільовий комп'ютер, який використовується безпосередньо для керування фізичним технологічним процесом або його апаратним симулятором. На цільовому комп'ютері цей додаток виконується під управлінням спеціалізованого ядра реального часу xPC-Target.

Такий підхід дозволяє ефективно розділити етапи розробки та впровадження: моделювання та дослідження системи керування проводяться на одному комп'ютері (зазвичай, стандартному ПК з потужними обчислювальними ресурсами), а реалізація та виконання алгоритмів керування – на іншому,

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

спеціалізованому або промислового комп'ютері, що забезпечує детерміновану роботу в реальному часі. Це є основою для методологій швидкого прототипування систем керування (Rapid Control Prototyping – RCP) та апаратно-програмного моделювання (Hardware-in-the-Loop – HIL).

4.2 Програмні засоби реалізації xPC-Target

Для успішної реалізації системи керування на базі xPC-Target необхідний набір взаємопов'язаних програмних засобів від The MathWorks та сторонніх розробників :

- **MATLAB:** Виступає як основна програмна платформа та обчислювальне середовище для xPC-Target. MATLAB надає мову програмування, інструменти для аналізу даних, візуалізації та розробки алгоритмів, які можуть бути інтегровані в моделі Simulink.

- **Simulink:** Є графічним середовищем для моделювання, симуляції та аналізу динамічних систем. Саме в Simulink створюються блок-схеми систем керування, які потім транслуються в код для xPC-Target.

- **Simulink Coder (раніше Real-Time Workshop):** Це ключовий компонент, що забезпечує автоматичну генерацію вихідного коду мовою C (або C++) з моделей Simulink та діаграм Stateflow. Цей згенерований код є основою для вихідного додатка, що виконується на цільовому комп'ютері.

- **Компілятор C/C++:** Для компіляції згенерованого C/C++ коду в машинні інструкції, зрозумілі процесору цільового комп'ютера, xPC-Target вимагає наявності одного з підтримуваних компіляторів. На момент опису в оригінальному документі, це могли бути Microsoft Visual Studio C/C++ версії 5.0 або 6.0, або Watcom C/C++ версії 10.6 або 11.0. Сучасні версії Simulink Real-Time підтримують новіші компілятори, наприклад, MinGW або Microsoft Visual C++ (як частина Visual Studio).

Ці програмні компоненти разом утворюють потужний інструментарій, що дозволяє пройти весь шлях від ідеї та математичної моделі до працюючої системи керування реального часу.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

4.3 Апаратні засоби реалізації xPC-Target

Апаратне середовище для роботи з xPC-Target складається з трьох основних елементів: головного комп'ютера, цільового комп'ютера та каналу зв'язку (послідовного або мережевого) між ними.

- **Головний комп'ютер (Host PC):** Зазвичай це настільний персональний комп'ютер або ноутбук, на якому встановлено операційну систему Windows (на момент опису в оригіналі – Windows 95, Windows 98, Windows 2000 або Windows NT; сучасні версії підтримують актуальні ОС Windows). На головному комп'ютері розміщуються програмні засоби розробки: MATLAB, Simulink, Simulink Coder та відповідний C/C++ компілятор. Також він повинен мати дисковод для 3,5-дюймових дискет (для застарілих методів завантаження ядра на цільовий ПК) або, що більш актуально, порти USB та мережевий інтерфейс Ethernet для зв'язку з цільовим комп'ютером та передачі даних.

- **Цільовий комп'ютер (Target PC):** Це комп'ютер, на якому безпосередньо виконується програма керування в режимі реального часу. Як цільовий комп'ютер може використовуватися фактично будь-який ПК з процесором архітектури Intel x86. Це може бути стандартний ПК, промисловий комп'ютер у спеціальному виконанні, або система на базі CompactPCI. Цільовий комп'ютер також повинен мати 3,5-дюймовий дисковод (для застарілих методів завантаження), вільний послідовний порт (RS-232) або мережеву карту Ethernet для зв'язку з головним комп'ютером. Важливою особливістю є те, що xPC-Target не вимагає наявності стандартної операційної системи (DOS, Windows, Linux тощо) на цільовому комп'ютері під час виконання програми керування. Замість цього, цільовий комп'ютер завантажується зі спеціального завантажувального носія (раніше дискети, зараз частіше USB-накопичувач або через мережу), який містить спеціалізоване ядро реального часу xPC-Target. Це ядро забезпечує детерміноване виконання коду та взаємодію з апаратними засобами вводу-виводу. При використанні опції xPC Target Embedded Option (або сучасних аналогів) можливе завантаження ядра та програми з жорсткого диска цільового комп'ютера

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

або зовнішньої флеш-пам'яті, що дозволяє створювати повністю автономні системи.

Структурна схема взаємодії компонентів xPC-Target наведена на рисунку 4.1.

Ця апаратна конфігурація забезпечує гнучкість у виборі обладнання та дозволяє адаптувати систему до конкретних вимог задачі керування, від лабораторних досліджень до промислових застосувань.

4.4 Обмін інформацією

Ефективний обмін інформацією між головним та цільовим комп'ютерами є ключовим для функціонування системи на базі xPC-Target. Для цього використовуються два основні типи з'єднань: послідовний інтерфейс (RS-232) або мережеве з'єднання (TCP/IP через Ethernet). Цей канал зв'язку використовується для передачі наступних типів даних та команд:

- **Вихідний додаток (Executable Application):** Згенерований на головному комп'ютері скомпільований код моделі завантажується на цільовий комп'ютер для виконання.
- **Значення параметрів (Parameter Values):** Значення параметрів моделі (наприклад, коефіцієнти регуляторів, уставки, параметри фільтрів) можуть бути завантажені з головного комп'ютера на цільовий як до початку виконання програми керування, так і динамічно, в процесі її роботи (online tuning).
- **Команди керування (Control Commands):** Головний комп'ютер може надсилати команди на цільовий для запуску, зупинки, паузи виконання програми, а також для ініціювання інших дій, пов'язаних з керуванням експериментом або процесом.
- **Сигнали стану та дані моніторингу (Status Signals and Monitoring Data):** Цільовий комп'ютер передає на головний дані про поточний стан виконання програми, значення внутрішніх сигналів моделі (для візуалізації та аналізу), а також інформацію про можливі помилки або попередження.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

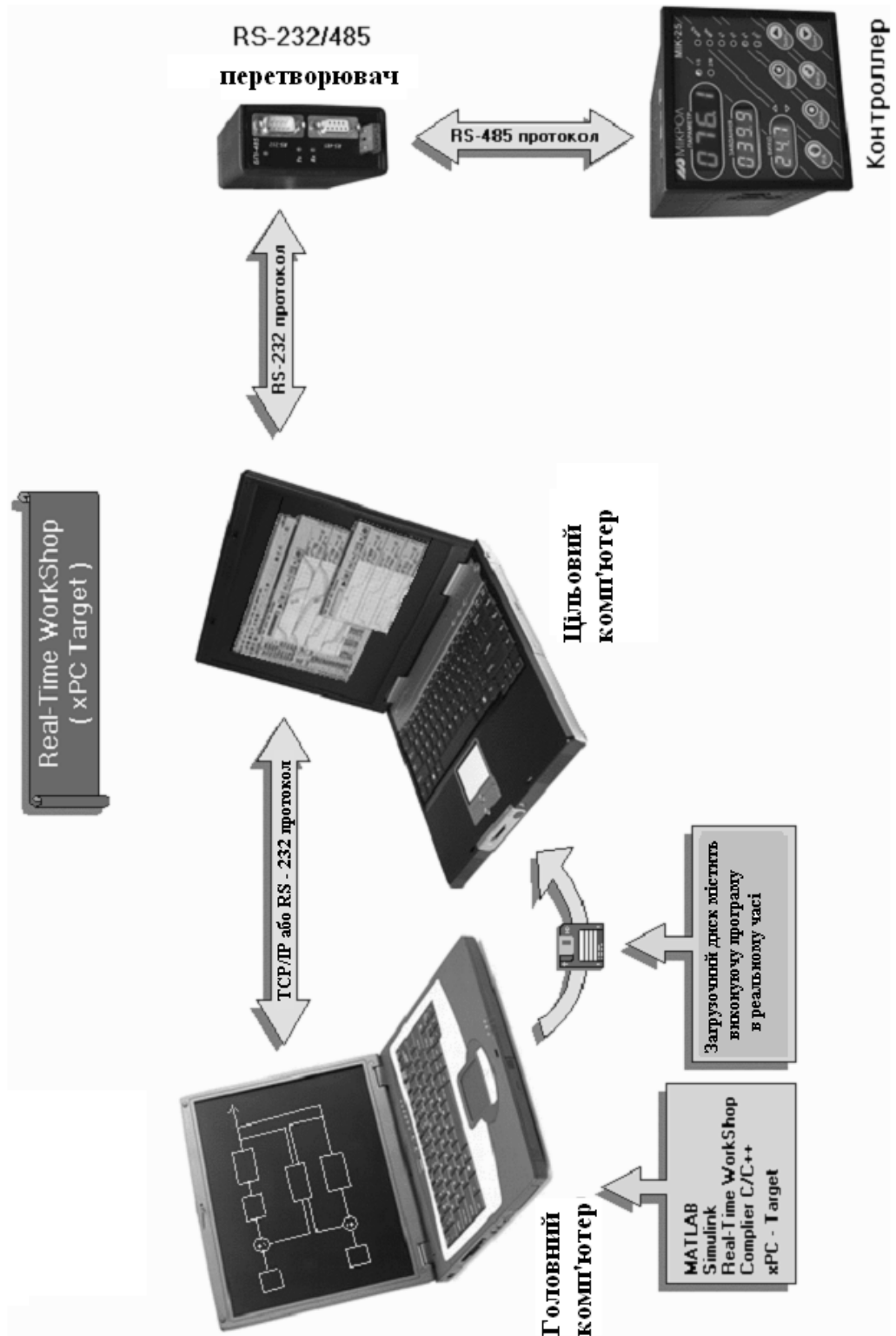


Рисунок 4.1 - Структурна схема xPC-Target

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Використання опції xPC Target Embedded Option (або аналогічних функцій у сучасних версіях) розширює можливості, дозволяючи завантажувати цільовий комп'ютер не тільки з дискети, а й з інших зовнішніх пристроїв, таких як жорсткий диск (вінчестер) або зовнішня флеш-пам'ять. Це також дає змогу створювати повністю незалежні (stand-alone) додатки на цільовому комп'ютері, які можуть запускатися та функціонувати автономно, без постійного підключення до головного комп'ютера після початкового завантаження та налаштування. Як зазначалося раніше, xPC-Target не потребує стандартної ОС на цільовому ПК; замість неї завантажувється спеціальне ядро xPC-Target з завантажувального диска.

4.5 Налаштування параметрів

Більшість стандартних та користувацьких блоків у моделях Simulink мають параметри, які можна змінювати для налаштування поведінки системи. xPC-Target надає гнучкі можливості для зміни цих параметрів навіть тоді, коли вихідна програма (скомпільована модель) вже виконується на цільовому комп'ютері в режимі реального часу. Наприклад, до таких параметрів можуть належати амплітуда та частота генератора синусоїдальних коливань, коефіцієнти ПД-регулятора, порогові значення для логічних умов тощо.

Можливості налаштування параметрів в xPC-Target включають:

- Інтерактивне налаштування (Interactive Tuning): xPC-Target підтримує інтерактивне (on-the-fly) налаштування параметрів під час виконання програми на цільовому комп'ютері в реальному часі. Зміни, внесені в параметри з головного комп'ютера, негайно передаються на цільовий комп'ютер і відображаються в поведінці системи та значеннях сигналів. Це дуже зручно для експериментального підбору оптимальних значень параметрів та спостереження за реакцією системи.
- Використання сценаріїв та пакетних процедур (Scripts and Batch Procedures): xPC-Target надає набір команд для мови MATLAB, які дозволяють програмно змінювати параметри моделі на цільовому комп'ютері. Ці команди можуть бути використані в MATLAB-скриптах для автоматизації процесу налаштування, проведення серії експериментів зі зміною параметрів, або для

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

реалізації складних алгоритмів оптимізації. Наприклад, за допомогою скрипта можна інкрементно змінювати певний параметр і спостерігати за відповідною зміною вихідних сигналів, що дозволяє систематично оптимізувати значення цього параметра.

Налаштування параметрів може здійснюватися різними способами:

- Через команди, що вводяться у командному вікні MATLAB на головному комп'ютері.
- Через команди, що вводяться безпосередньо у вікні консолі цільового комп'ютера (якщо такий інтерфейс передбачений).
- З використанням режиму External Mode в Simulink, який дозволяє з'єднати модель Simulink на головному комп'ютері з програмою, що виконується на цільовому, для інтерактивної зміни параметрів та візуалізації сигналів безпосередньо в моделі.
- Шляхом додавання спеціальних блоків (наприклад, для введення значень) до другої моделі Simulink, яка працює на головному комп'ютері та взаємодіє з цільовим додатком.
- З використанням веб-інтерфейсу xPC-Target, доступного через стандартний веб-браузер, якщо цільовий комп'ютер підключений до мережі.

Ці гнучкі можливості налаштування параметрів значно прискорюють процес розробки, тестування та оптимізації систем керування.

4.6 Режими дії

Опція xPC Target Embedded Option (або її сучасні аналоги в Simulink Real-Time) суттєво розширює можливості розгортання та функціонування систем на базі xPC-Target, дозволяючи завантажувати ядро реального часу не тільки з традиційного дисководу для гнучких дисків, але й з інших зовнішніх пристроїв зберігання даних, таких як зовнішній жорсткий диск або вбудований вінчестер цільового комп'ютера. Більше того, за допомогою цієї опції можна налаштувати цільовий комп'ютер таким чином, щоб він автоматично завантажував та виконував вбудований (embedded) додаток керування одразу після ввімкнення

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

живлення, тобто в процесі завантаження системи.

xPC Target Embedded Option доповнює базовий функціонал xPC-Target двома основними додатковими режимами дії:

- Режим DOSLoader (Завантажувач DOS): Цей режим дозволяє завантажувати ядро xPC-Target на цільовий комп'ютер з різноманітних зовнішніх пристроїв, відмінних від стандартної 3,5-дюймової дискети. Наприклад, таким пристроєм початкового завантаження може бути жорсткий диск цільового комп'ютера або зовнішній USB-накопичувач, на якому попередньо встановлена мінімальна конфігурація DOS та файли завантажувача xPC-Target. При цьому сам вихідний додаток (скомпільована модель керування) все ще завантажується з головного комп'ютера через стандартний канал зв'язку (RS-232 або Ethernet) після завантаження ядра. Процедури керування виконанням програми (запуск, зупинка), налаштування параметрів, трасування сигналів та інші функції взаємодії з цільовим комп'ютером реалізуються з головного комп'ютера, наприклад, шляхом виконання функції `xpcsetup` в MATLAB та вибору відповідних опцій.

- Режим Stand-Alone (Незалежний або Автономний): Цей режим забезпечує найвищий ступінь автономності цільової системи. Він дозволяє об'єднати вихідний додаток керування безпосередньо з ядром xPC-Target та завантажувати їх разом як єдине ціле на цільовий комп'ютер. Джерелом завантаження може бути 3,5-дюймова дискета, жорсткий диск або зовнішня флеш-пам'ять. Режим Stand-Alone є розширенням режиму DOSLoader. Ключовою відмінністю є те, що після запуску ядра на цільовому комп'ютері, режим Stand-Alone автоматично ініціює виконання вбудованого вихідного додатка. Це повністю усуває потребу в постійному підключенні до головного комп'ютера для запуску та роботи програми керування, дозволяючи розгортати додатки реального часу на цільових апаратних засобах для тривалої автономної експлуатації.

Окрім цих двох режимів, що надаються xPC Target Embedded Option, існує стандартний режим дії, який доступний і без цієї опції:

- Режим BootFloppy (Завантаження з дискети): Це базовий режим, при якому для запуску xPC-Target на цільовому комп'ютері необхідно спочатку

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

створити спеціальний завантажувальний гнучкий диск (boot floppy). Цей диск містить ядро xPC-Target і використовується для початкового завантаження цільового комп'ютера. Після завантаження ядра, зв'язок з головним комп'ютером встановлюється для завантаження та виконання програми керування.

Вибір конкретного режиму дії залежить від вимог до автономності системи, доступних апаратних засобів та специфіки завдання керування. Налаштування режимів здійснюється через вікно xPC Target Setup (рисунок 4.2), яке викликається командою xpcsetup в MATLAB.

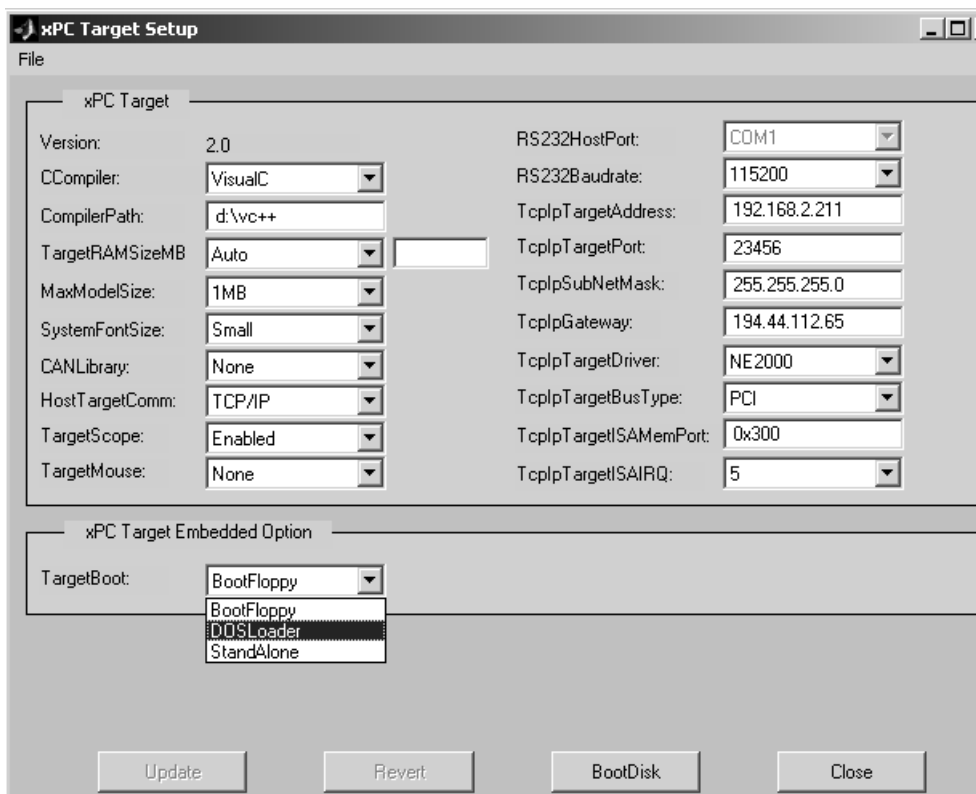


Рисунок 4.2 - Вікно xPC Target Setup

4.7 Випробування установки

Після завершення встановлення програмного забезпечення xPC-Target на головному комп'ютері, налаштування середовища розробки (включаючи конфігурацію зв'язку з цільовим комп'ютером) та створення завантажувального носія (наприклад, дискети або USB-накопичувача) для цільового комп'ютера, необхідно провести тестування утвореної системи для перевірки її працездатності. xPC-Target надає спеціальну функцію для загального тестування апаратних та

програмних компонентів.

Процедура тестування зазвичай включає наступні кроки:

1. Вставити підготовлений диск початкового завантаження (boot disk) у відповідний дисковод (або підключити USB-накопичувач) цільового комп'ютера.
2. Натиснути кнопку reset (скидання) на цільовому комп'ютері або ввімкнути його, якщо він був вимкнений. Це ініціює процес завантаження.

Після завантаження базової системи вводу-виводу (BIOS) цільового комп'ютера, xPC-Target починає завантажувати своє ядро реального часу. Після успішного завантаження ядра на екрані монітора цільового комп'ютера з'являється специфічна інформація, що свідчить про готовність системи до роботи (приклад такого екрану наведено на рисунку 4.3).

<pre>Loaded App: 1MB free Memory: 59MB Mode: loader Logging: - StopTime: - SampleTime: - AverageTET: - Execution: -</pre>	<pre>----- * xPC Target 2.0, (c) 1996-2002 The MathWorks Inc. * ----- System: Host-Target Interface is TCP/IP (Ethernet) IP Add: 192.168.2.211 Port : 23456 SubNet: 255.255.255.0 Gateway: 194.44.112.65 Board : NE2000, PCI-BUS, MemBase:0xe800, IRQ:12</pre>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Рисунок 4.3 - Екран на цільовому комп'ютері після завантаження

На головному комп'ютері, у командному вікні MATLAB, необхідно виконати команду (функцію) `xrctest`. Ця команда запускає комплексний тестовий сценарій, який перевіряє різні аспекти взаємодії між головним та цільовим комп'ютерами, а також базову функціональність xPC-Target.

MATLAB виконує тестовий сценарій, і в командному вікні відображаються повідомлення, що вказують на успішне проходження кожного етапу тесту (OK) або на виникнення помилки (FAILED або інше повідомлення про відмову).

Успішне завершення всіх тестів (Test Suite successfully finished) свідчить про коректне налаштування апаратно-програмного комплексу xPC-Target та його готовність до завантаження та виконання розроблених моделей керування. Після цього можна запускати цільовий додаток, представлений об'єктом tg (цільовий об'єкт в MATLAB), за допомогою команд +tg, tg.start або start(tg). Під час роботи програми на екрані цільового комп'ютера може відображатися актуальна інформація про стан системи (рисунок 4.4).

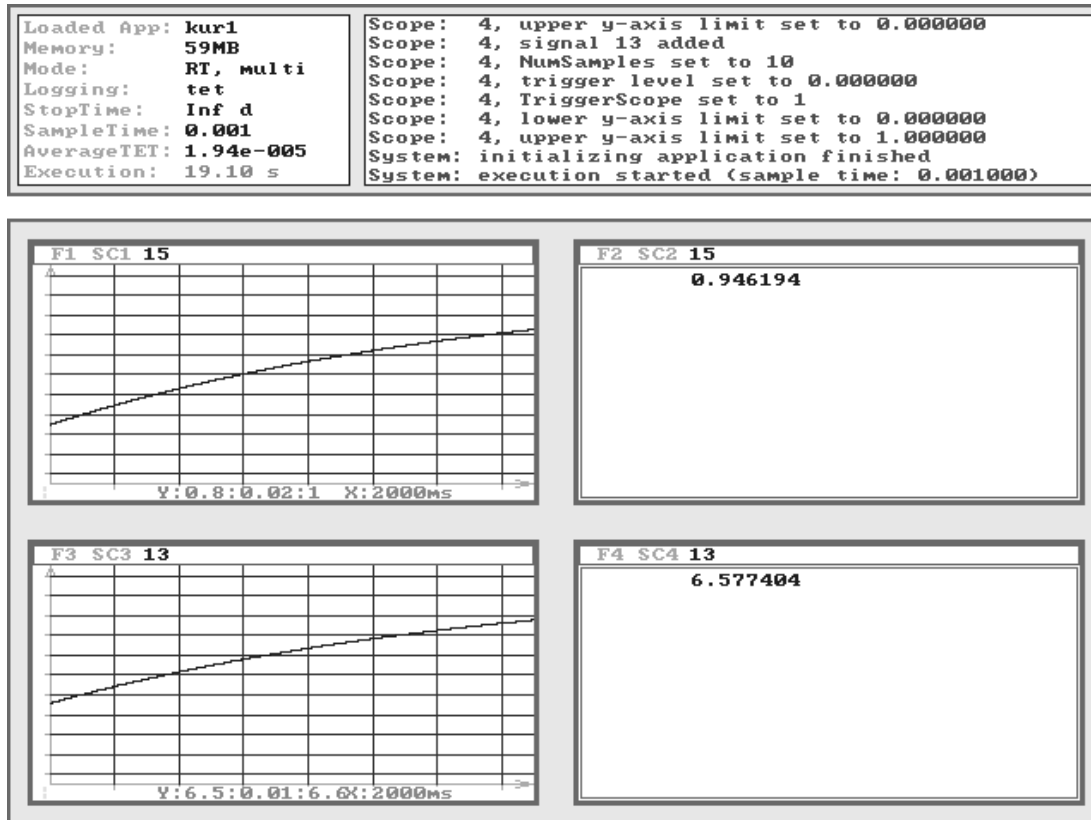


Рисунок 4.4 - Екран на цільовому комп'ютері під час роботи

4.8. Інтерфейс Web-браузера

Якщо цільовий комп'ютер, на якому виконується додаток xPC-Target, підключений до мережі TCP/IP (наприклад, локальної обчислювальної мережі підприємства або навіть Інтернету за умови належного налаштування безпеки), стає можливою взаємодія з цим цільовим додатком за допомогою стандартного веб-браузера. Цей доступ може здійснюватися з будь-якого комп'ютера, підключеного до тієї ж мережі, що й цільовий ПК, що значно розширює можливості віддаленого моніторингу та керування.

Інтерфейс веб-браузера для xPC-Target зазвичай включає наступні функціональні можливості:

- Управління виконанням додатку: Запуск, зупинка, пауза виконання програми на цільовому комп'ютері.
- Контроль сигналів (Signal Monitoring): Відображення значень обраних сигналів моделі в режимі реального часу. Це можуть бути як вимірювані параметри процесу, так і внутрішні змінні алгоритму керування.
- Налаштування параметрів (Parameter Tuning): Зміна значень параметрів моделі (наприклад, коефіцієнтів регулятора) інтерактивно через веб-інтерфейс.
- Перегляд інформації про цільовий комп'ютер та додаток: Відображення IP-адреси, стану завантаження, часу виконання тощо.

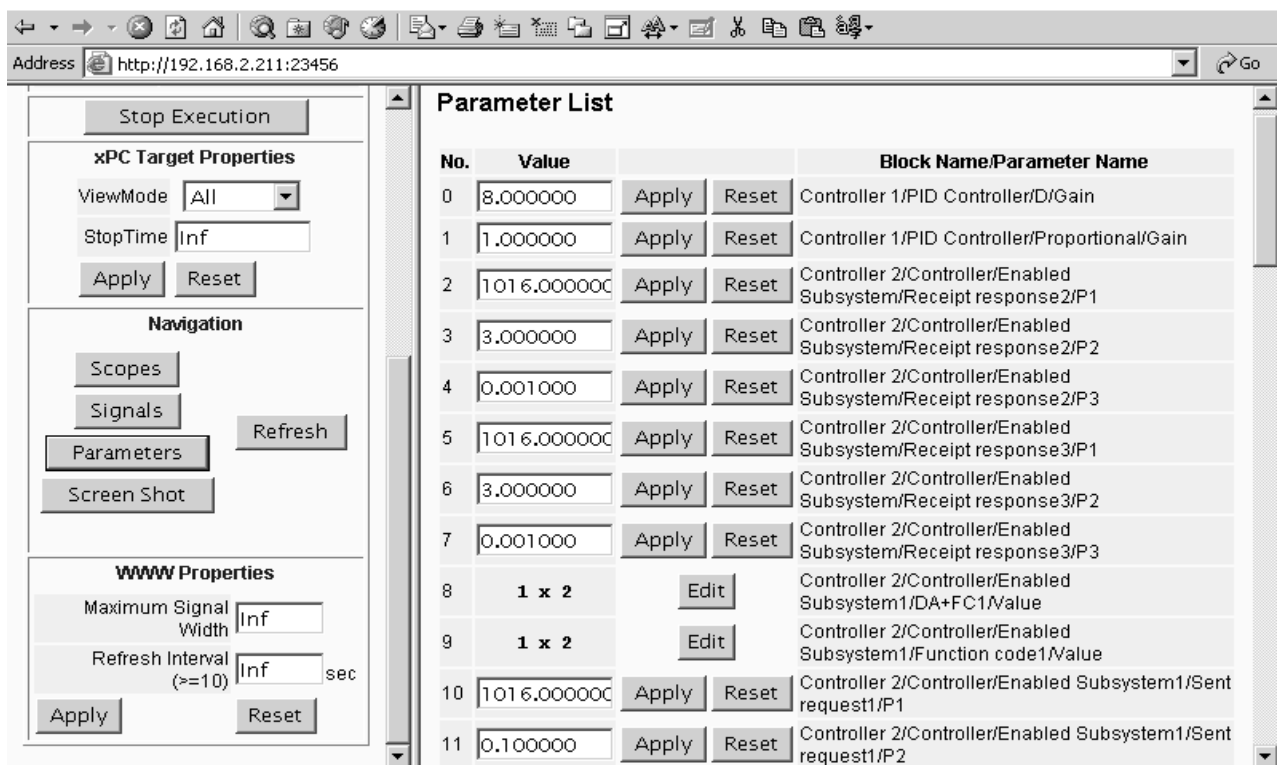


Рисунок 4.6 - Сторінка табл. параметрів

Для налаштування доступу через веб-браузер необхідно сконфігурувати IP-параметри цільового комп'ютера в середовищі xPC-Target. Це включає :

- TcpIpTargetAddress: IP-адреса, присвоєна цільовому комп'ютеру в мережі.
- TcpIpTargetPort: Номер порту, який використовується для зв'язку. За замовчуванням часто встановлюється значення типу 22222. Це значення не повинно викликати конфліктів, оскільки воно знаходиться вище зарезервованої області стандартних портів (telnet, ftp тощо) і використовується лише на цільовому комп'ютері. За потреби, це значення може бути змінено на будь-яке інше вільне значення вище 20000.
 - TcpIpSubNetMask: Маска підмережі, що відповідає конфігурації локальної мережі.
 - TcpIpGateway: IP-адреса шлюзу. За замовчуванням може бути встановлено значення 255.255.255.255, що означає, що шлюз не використовується для прямого з'єднання з цільовим комп'ютером (наприклад, якщо головний та цільовий ПК знаходяться в одній підмережі).

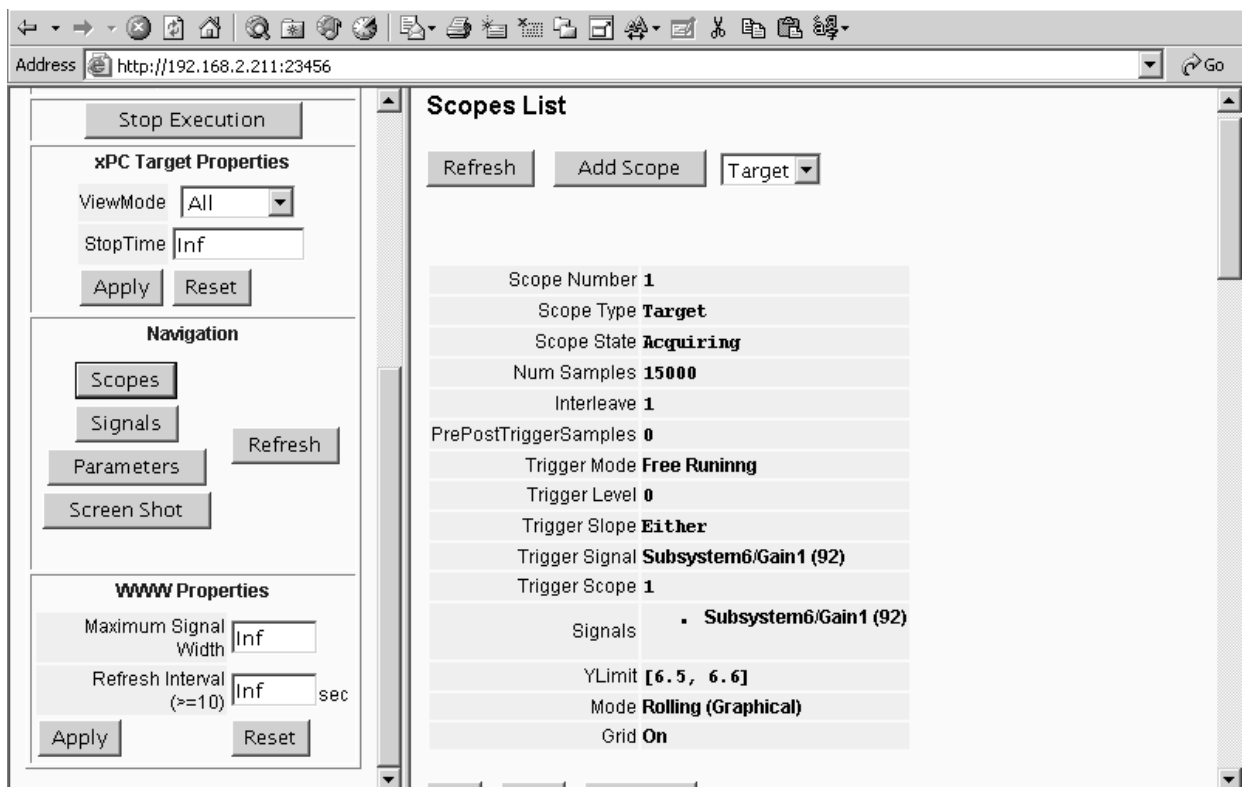


Рисунок 4.7 - Сторінка таблиць сигналів

Також необхідно визначити властивості для мережевої карти Ethernet, встановленої на цільовому комп'ютері :

- TcpIpTargetDriver: Тип драйвера для мережевої карти. За замовчуванням може бути NE2000 (для старих карт). xPC-Target також підтримує інші драйвери, наприклад, для карт на базі чіпсетів SMC91C9X або сучасних Intel, Realtek тощо (залежно від версії xPC-Target).

- TcpIpTargetBusType: Тип шини, до якої підключена мережева карта (наприклад, PCI або ISA для застарілих систем). Якщо встановлено PCI, то властивості TcpIpISAMemPort та TcpIpISAIRQ (для карт ISA) не мають значення і можуть бути заблоковані. Якщо використовується карта для шини ISA, необхідно встановити TcpIpTargetBusType в ISA та ввести відповідні значення для TcpIpISAMemPort (адреса пам'яті) та TcpIpISAIRQ (номер переривання), які повинні відповідати апаратним налаштуванням самої карти.

Висновки до розділу

У рамках розробки системи автоматизації було представлено концепцію її верхнього рівня, побудовану на основі програмно-апаратного комплексу xPC-Target від Matlab. Для організації взаємодії оператора із системою спроектовано графічний інтерфейс, доступний через стандартний веб-браузер, та здійснено селекцію відповідних програмних та технічних засобів для реалізації функцій верхнього рівня управління.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 СИНТЕЗ ON-LINE МОДЕЛІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

5.1 Модель *mbus-rt.mdl* у реальному часі

Після завершення етапів розробки та верифікації моделі в автономному (off-line) режимі, коли її поведінка відповідає очікуваним результатам, здійснюється перехід до конфігурації для взаємодії в реальному часі. Ключовим кроком є заміна стандартного блоку ПІД-регулятора (PID-Controller) на спеціалізований блок "Controller".

Призначення блоку "Controller" полягає у забезпеченні двонаправленого обміну даними та керуючими сигналами між розробленою моделлю Simulink та зовнішнім апаратним регулятором. Така архітектура надає значну гнучкість, дозволяючи інтегрувати з моделлю різноманітні типи фізичних регуляторів, наприклад, аналогові, дискретні чи фазові пристрої керування (рисунок 5.1).

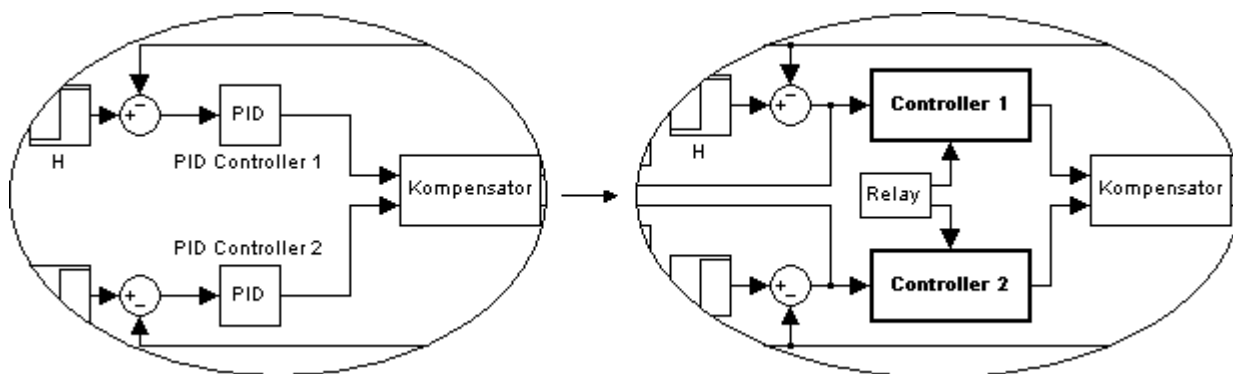


Рисунок 5.1 - Заміна блоку PID-Controller блоком Controller

Для реалізації здатності моделі функціонувати у зв'язці із зовнішнім контролером в умовах реального часу, необхідно доповнити її структуру спеціальними функціональними блоками. До таких блоків належать компоненти з бібліотеки *xPC-Target*, зокрема: *RS232 Mainboard Setup* (для налаштування послідовного зв'язку), *Scope (xPC)* (для візуалізації сигналів на цільовій платформі), *I/O port read* (для читання даних з портів вводу) та *I/O port write* (для запису даних на порти виводу).

System of automatic low - temperature separation of gas

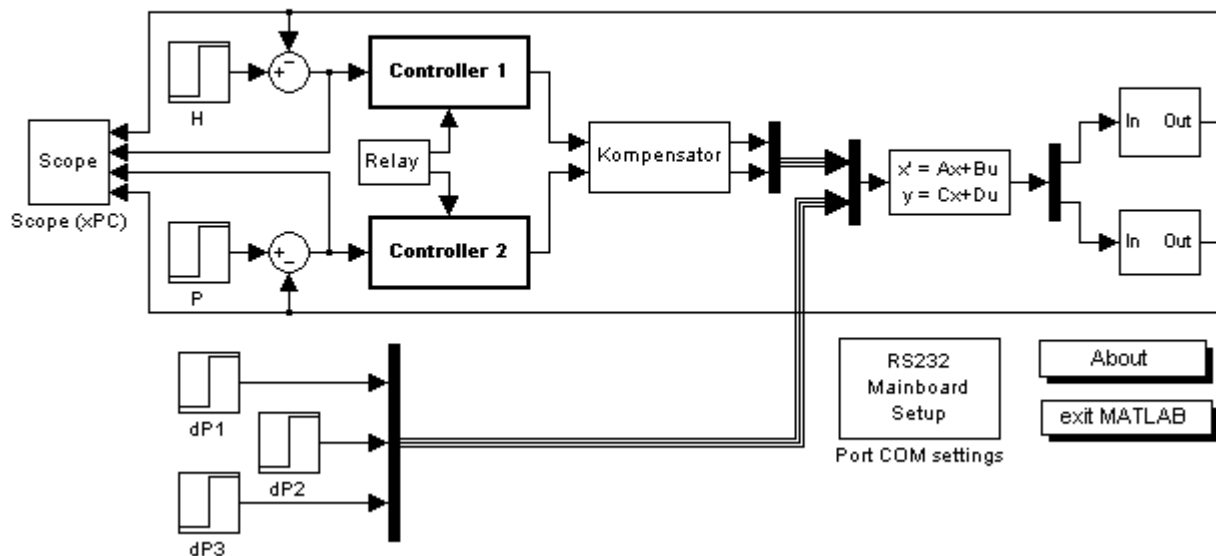


Рисунок 5.2 - Модель `mbus_rt` в режимі в реальному часі

Окрім цих, можуть знадобитися й інші допоміжні блоки. Детальний опис функцій та налаштувань зазначених блоків буде представлено у наступних підрозділах.

5.2 Параметри установки програми

Для забезпечення коректної генерації програмного коду з моделі `mbus_rt` необхідно внести певні модифікації до її конфігураційних параметрів. Особливу увагу слід звернути на те, що інструментарій Real-Time Workshop (попередник Simulink Coder) висуває обов'язкову вимогу щодо використання обчислювача (solver) з фіксованим кроком інтегрування (fixed-step).

Налаштування цих параметрів здійснюється через діалогове вікно "Simulation Parameters". Послідовність дій для конфігурації є такою:

1. У головному меню середовища Simulink, у розділі "Simulation", необхідно обрати пункт "Simulation Parameters" (або "Model Configuration Parameters" у новіших версіях). Це призведе до відкриття відповідного діалогового вікна.

2. У вікні "Simulation Parameters" слід перейти до вкладки "Solver". На цій вкладці потрібно задати відповідні значення для параметрів розв'язувача, згідно з конфігурацією, що буде детально проілюстрована нижче.

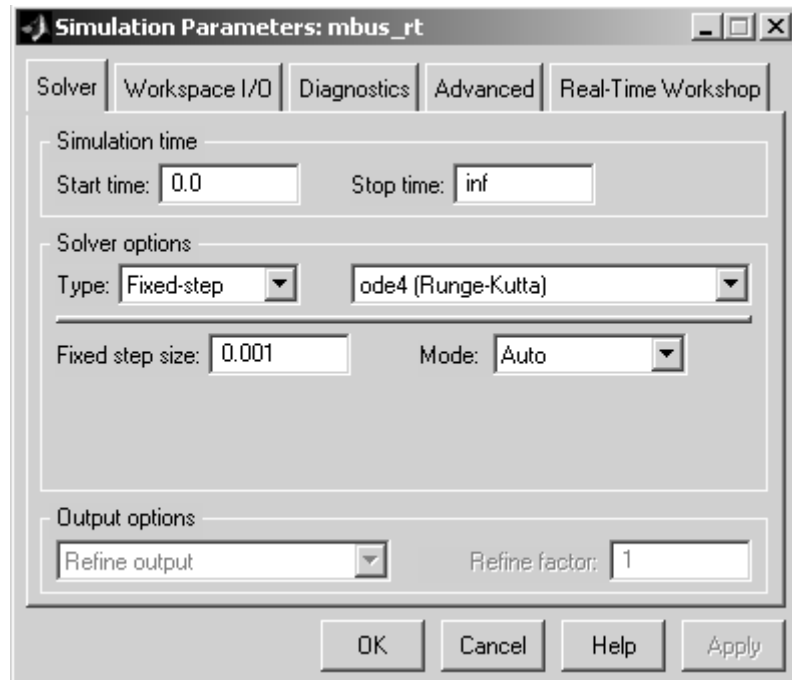


Рисунок 5.3 - Solver сторінка діалогового вікна параметрів моделювання

5.3 Вибір цільової конфігурації

Для налаштування цільової платформи, під яку буде генеруватися код, необхідно визначити системний цільовий файл (system target file), відповідний йому файл шаблону побудови (template makefile) та команду компіляції (make command). Цей процес виконується наступним чином:

У діалоговому вікні "Simulation Parameters" (Параметри моделювання) перейдіть на вкладку "Real-Time Workshop". Активується сторінка налаштувань Real-Time Workshop.

Сторінка "Real-Time Workshop" містить декілька підрозділів, доступ до яких здійснюється через випадаюче меню "Category" (Категорія). У цьому меню оберіть пункт "Target configuration" (Конфігурація цільової платформи). Важливо переконатися, що опція "Generate code only" (Тільки генерувати код) не активна (тобто прапорець знято), оскільки метою є повний процес побудови виконуваного файлу.

Поруч із полем "System target file" (Системний цільовий файл) натисніть кнопку "Browse..." (Огляд...). Ця дія відкриє "System Target File Browser" (Браузер системних цільових файлів). У цьому браузері відображається перелік усіх доступних на даний момент конфігурацій цільових платформ. При виборі певної конфігурації зі списку, Real-Time Workshop автоматично встановлює асоційовані з нею системний цільовий файл, файл шаблону побудови та команду компіляції.

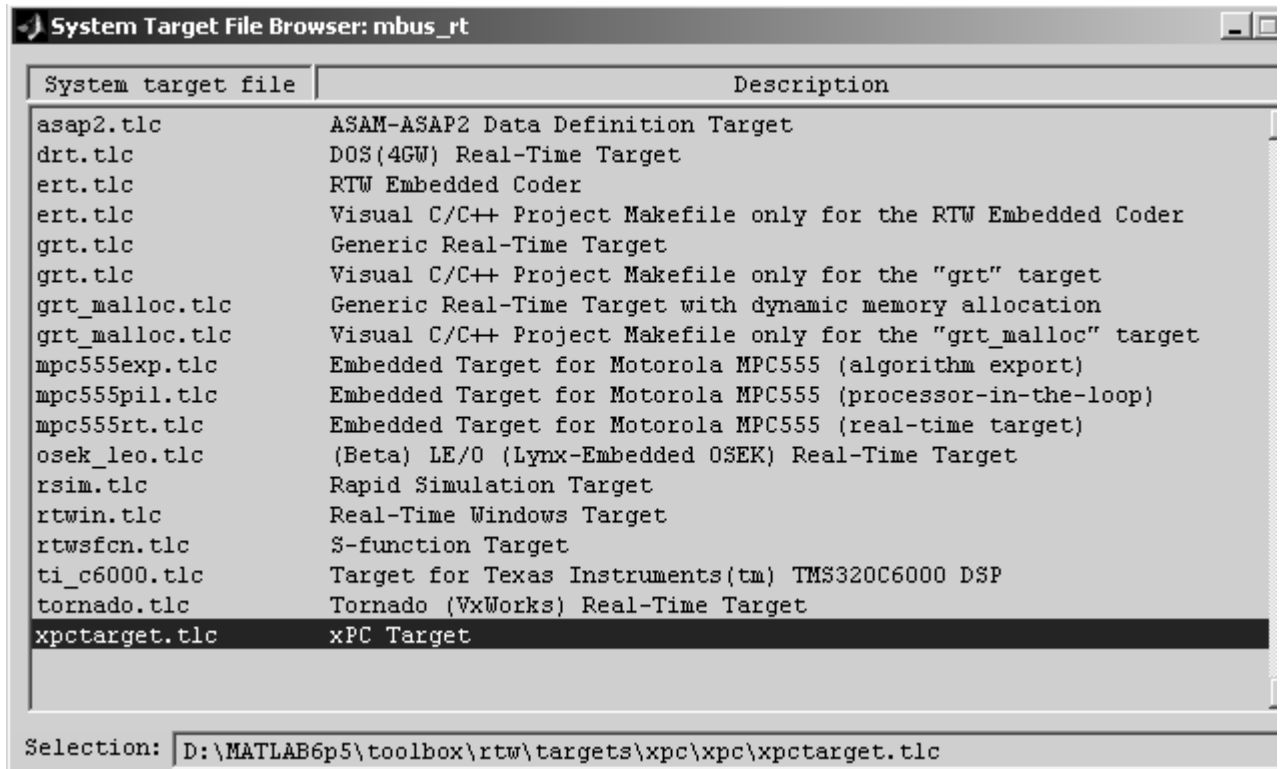


Рисунок 5.4 - Вікно System Target File Browser

5.4 Використання S-функції

Переважна більшість компонентів, що використовуються у розробленій моделі, є стандартними елементами, обраними з бібліотеки блоків Simulink (Simulink Library Browser). Винятком є блок csc_16, який реалізує алгоритм обчислення циклічного надлишкового коду (CRC – Cyclical Redundancy Check). Для створення цього специфічного блоку csc_16 застосовується механізм S-функцій (S-Functions).

S-функція являє собою програмний опис блоку Simulink, реалізований однією з підтримуваних мов програмування. Фактично, S-функція визначає поведінку та функціональність блоку під час симуляції.

Розробники мають можливість створювати S-функції, використовуючи MATLAB, C, C++, Ada або Fortran. У випадках, коли S-функція написана мовами C, C++, Ada або Fortran, вона підлягає компіляції у так звані MEX-файли. Цей процес компіляції здійснюється за допомогою спеціальної утиліти mex, детальний опис якої наведено в "Посібнику з інтерфейсу прикладного програмування" (Application Program Interface Guide) для MATLAB. Аналогічно до інших MEX-файлів, скомпільовані S-функції динамічно підключаються до середовища MATLAB у момент їх виклику або використання в моделі.

Найбільш поширеним призначенням S-функцій є розробка користувацьких блоків для середовища Simulink, що розширюють його стандартні можливості. Однак, їх застосування не обмежується лише цим. S-функції є потужним інструментом для вирішення широкого кола завдань, серед яких:

Інтеграція нових універсальних блоків до стандартної бібліотеки Simulink.

Розробка блоків, що моделюють роботу драйверів для взаємодії з реальним апаратним забезпеченням.

Включення наявного C-коду (або коду іншими мовами) безпосередньо до процесу моделювання в Simulink.

Формалізований опис динамічних систем у вигляді набору математичних рівнянь.

Реалізація графічної анімації для візуалізації процесів, що моделюються.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

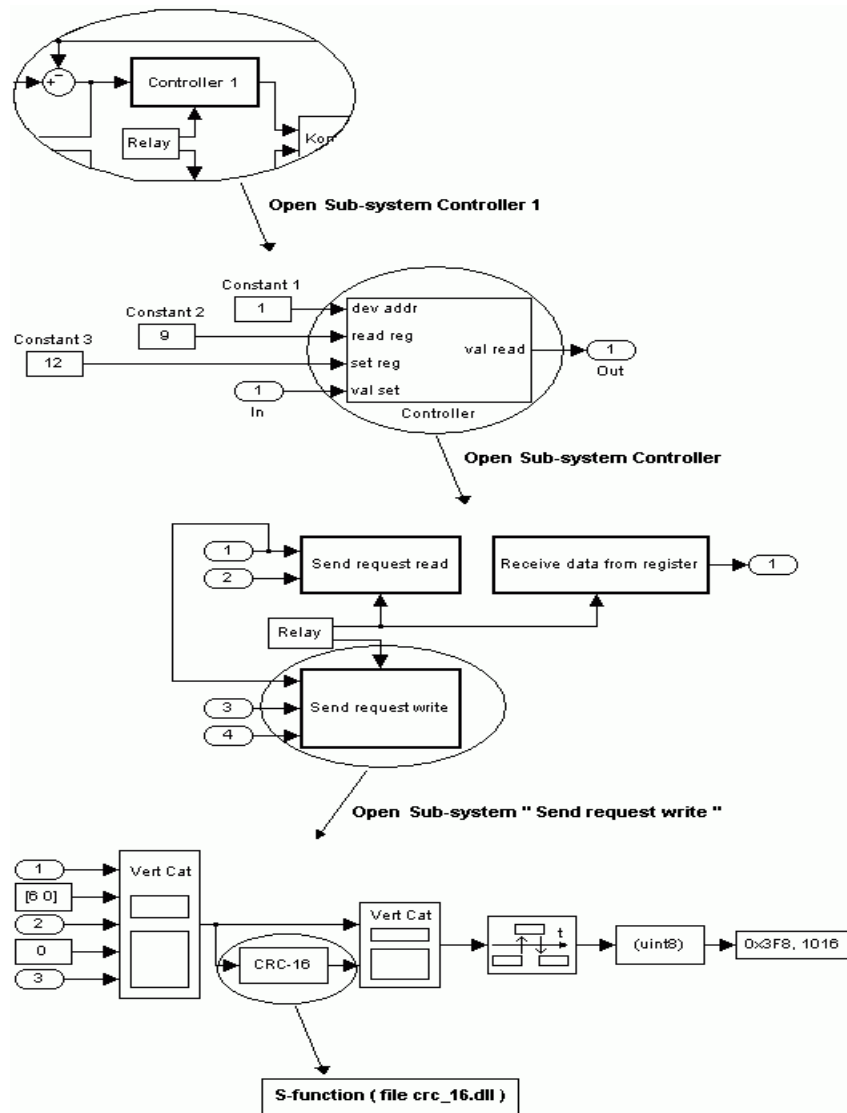


Рисунок 5.5 - Позиція блоку S-функції crc_16 в моделі

5.5 Процедура побудови та розгортання програмного коду

Етап компіляції та зв'язування моделі, керований Real-Time Workshop, передбачає генерацію С-коду на основі розробленої Simulink-моделі з подальшою компіляцією цього коду та створенням виконуваної програми. Для ініціації цього процесу необхідно активувати функцію "Build" (Побудувати) у діалоговому вікні "Simulation Parameters" (Параметри моделювання).

Під час виконання процесу побудови, у командному вікні MATLAB відображається послідовність інформаційних повідомлень, що деталізують етапи генерації об'єктного коду та трансляції. Типовими стартовими повідомленнями є:

Starting xPC Target build procedure for model: mbus_rt (Розпочато

процедуру побудови для цільової платформи xPC для моделі: mbus_rt)

Generating code into build directory: .\mbus_rt_xpc_rtw (Генерація коду у робочий каталог: .\mbus_rt_xpc_rtw)

Invoking Target Language Compiler on mbus_rt.rtw (Виклик компілятора цільової мови для файлу mbus_rt.rtw)

Слід зазначити, що конкретний зміст та вигляд цих повідомлень можуть варіюватися залежно від використовуваного компілятора C та конфігурації операційної системи. Успішне завершення процесу підтверджується фінальним повідомленням:

Successful completion of xPC Target build procedure for model: mbus_rt (Процедуру побудови для цільової платформи xPC для моделі mbus_rt успішно завершено)

Результатом успішної компіляції є створення двох підкаталогів: mbus_rt_xpc_rtw та mbus_rt_xpc_emb у стандартній робочій директорії MATLAB (MATLABrootpath\work). На завершальному етапі здійснюється копіювання системних файлів DOS, необхідних утиліт, файлів створеного додатку (розміщених у підкаталозі mbus_rt_xpc_emb) та допоміжних файлів на підготовлений завантажувальний носій (наприклад, дискету або флеш-накопичувач).

Висновки до розділу

У рамках цього розділу було здійснено синтез моделі системи керування, призначеної для функціонування в режимі реального часу (on-line). Ця модель включає два регулятори, які були попередньо розроблені та параметризовані в середовищі Matlab на основі розрахунків, виконаних у попередньому розділі. Також було детально описано блочну архітектуру розроблених моделей у програмному пакеті Simulink.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У представленій бакалаврській роботі здійснено комплексний аналіз абсорбційного апарату з перспективи його функціонування в умовах дистанційного керування. Було встановлено, що ключовим технологічним параметром, який визначає ефективність процесу та якість кінцевого насиченого абсорбенту, є температурний режим у нижній частині абсорбера. Відповідно, пріоритетну увагу в рамках дослідження було сконцентровано на розробці системи регулювання саме цього температурного каналу.

На основі експериментальних даних було визначено математичні моделі (передавальні функції) для основних каналів системи автоматичного керування. Було проведено обґрунтований розрахунок оптимальних параметрів налаштувань для регуляторів, що входять до складу автоматизованої системи керування (АСК). Динаміка розробленої АСК була досліджена шляхом моделювання в програмному середовищі Matlab, за результатами якого встановлено, що показники якості перехідних процесів відповідають заданим технологічним вимогам.

Додатково було розглянуто та адаптовано методику оптимізації параметрів запропонованих регуляторів з використанням інструментарію системи Matlab.

У контексті реалізації системи було розроблено концептуальну структурну схему для верхнього рівня автоматизації, що базується на технології xPC-Target від Matlab. Для забезпечення взаємодії з оператором було спроектовано інтерфейс на основі веб-браузера та здійснено вибір необхідних програмно-апаратних компонентів для реалізації верхнього рівня системи керування.

Завершенням практичної частини роботи став синтез on-line моделі системи керування, яка інтегрує два регулятори, розроблені в середовищі Matlab. Також було детально описано блочну архітектуру створених моделей у програмному пакеті Simulink, що забезпечує їх готовність до роботи в режимі реального часу.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Стасюк І. В., Сабадаш В. В., Пасека В. Р. Процеси і апарати хімічних виробництв. Навчальний посібник. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2004. – 336 с.
2. Мельничук Г.В. та ін. Процеси та апарати хімічної технології. Частина 1. Гідромеханічні та теплові процеси. Навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2007 – 218с.
3. Treybal R. E. Mass-Transfer Operations. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1980. – 784 p.
4. Sherwood T. K., Pigford R. L., Wilke C. R. Mass Transfer. New York: McGraw-Hill, 1975. – 677 p.
5. Kohl A. L., Nielsen R. B. Gas Purification. 5th ed. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1997. – 1395 p.
6. MATLAB Documentation (MathWorks) mathworks.com/help/matlab/

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

ДОДАТКИ

Додаток А

Програмне забезпечення системи керування

```

/* Copyright 2010 The MathWorks, Inc. */
#ifndef __SL_COMMON_TYPES_DEF_H__
#define __SL_COMMON_TYPES_DEF_H__

#include "sl_types_def.h"
#include "sl_fixpt.h"
#include "sl_datatype_access.h"

#define DYNAMICALLY_SIZED (-1)
#define DYNAMICALLY_TYPED (-1)

#define OVERWRITE_INPUT_ANY (-2)
#define OVERWRITE_INPUT_NONE (-1)

#define INVALID_PORT_IDX (-1)

typedef enum {
    COMPLEX_INHERITED = -1,
    COMPLEX_NO,
    COMPLEX_YES
} ssComplexity;

/*
 * Frame enum
 */
typedef enum {
    FRAME_INHERITED = -1,
    FRAME_NO,
    FRAME_YES
} Frame_T;

/*
 * - Ports cannot have INHERIT_DIMS_MODE after model compile;
 * 2) FIXED_DIMS_MODE
 * - Signal dimensions are fixed during simulation;
 * 3) VARIABLE_DIMS_MODE
 * - Signal dimensions are allowed to change during simulation.
 */
ssSetNumSampleTimes(S,PORT_BASED_SAMPLE_TIMES) -
Indicates that the sample times are assigned on a per port basis.
*/
#if !SS_SFCN_LEVEL_1
#define
PORT_BASED_SAMPLE_TIME S -1
#endif
#ifndef _DIMENSION_MODE_T
#define _DIMENSION_MODE_T
SS_VARIABLE_SIZE_FROM_INPUT_SIZE = 0, /* Output sizes only depend on input sizes */
SS_VARIABLE_SIZE_FROM_INPUT_VALUE_AND_SIZE /* Output sizes depend on input values */
} SS_VariableSizeComputeType;
#endif
typedef enum {
    INHERIT_DIMS_MODE = -1,
    FIXED_DIMS_MODE,
    VARIABLE_DIMS_MODE
} DimensionsMode_T;

#endif

```

```

                                # define
SS_VARIABLE_SIZE_STATE_N SSWRITE_VALUE_QSTR /*
O_NEED_RESET = 0,          1          * Enumeration of RTW storage
                                # define          class
SS_VARIABLE_SIZE_REQUIRE SSWRITE_VALUE_VECT_STR */
_STATE_RESET              2          typedef enum {
} SS_VariableSizeStateResetType; # define
                                SSWRITE_VALUE_NUM          SS_RTW_STORAGE_INVALID
typedef enum {              3          = -1,
    SS_PRM_NOT_TUNABLE = # define          SS_RTW_STORAGE_AUTO,
0,                          SSWRITE_VALUE_VECT          SS_RTW_STORAGE_EXPORTE
    SS_PRM_TUNABLE,        4          D_GLOBAL,
                                # define          SS_RTW_STORAGE_IMPORTE
SS_PRM_SIM_ONLY_TUNABL   SSWRITE_VALUE_2DMAT          D_EXTERN,
E                            5          SS_RTW_STORAGE_IMPORTE
} ssParamTunability;      # define          D_EXTERN_POINTER,
                                SSWRITE_VALUE_DTYPE_NU          SS_RTW_STORAGE_IMPORTE
#define M 6                  D_EXTERN_POINTER,
SS_NOT_REUSABLE_AND_GL # define          SS_RTW_STORAGE_IMPORTE
OBAL 0U /* default */    SSWRITE_VALUE_DTYPE_VE          D_EXTERN_POINTER,
#define CT 7                SS_RTW_STORAGE_CUSTOM,
SS_REUSABLE_AND_LOCAL # define          SS_RTW_STORAGE_SIMULIN
1U                          SSWRITE_VALUE_DTYPE_2D          K_GLOBAL,
#define MAT 8                SS_RTW_STORAGE_SIMULIN
SS_REUSABLE_AND_GLOBAL # define          K_GLOBAL,
2U                          SSWRITE_VALUE_DTYPE_ML          SS_RTW_STORAGE_MODEL_
#define _VECT 9              DEFAULT,
SS_NOT_REUSABLE_AND_LO # define          SS_RTW_STORAGE_NUM_CL
CAL 3U                      SSWRITE_VALUE_DTYPE_ML          ASSES
                                _2DMAT 10
                                # define          } ssRTWStorageType;
/* For mdlRTW              SSWRITE_VALUE_LIST_STR
ssWriteRTWParamSettings macro 11 /*
*/                          * Enumerations to specify the S-
# define SSWRITE_VALUE_STR #define DTINFO(id,          Function's compliance level with
0                            complexSignal)          the
                                ((complexSignal)?((id) |          * SimState save/restore feature
                                0x10000):(id))          */

```

```

typedef enum
{
    SIMULATION_FASTRESTART_RUNTIME_THREAD_SAFETY_
    NONCOMPLIANT_NEUTRAL COMPLIANCE_TRUE
SIM_STATE_COMPLIANCE_IN = 2U,
VALID = -1,
    RuntimeThreadSafetyCompliance;
    SIMULATION_FASTRESTART_
SIM_STATE_COMPLIANCE_U NONCOMPLIANT_FATAL =
NKNOWN = 0,
    3U
    USE_DEFAULT_SIM_STATE,
    HAS_NO_SIM_STATE,
    USE_CUSTOM_SIM_STATE,
    DISALLOW_SIM_STATE
} ssSimStateCompliance;
    VM_SIMULATIONS_COMPLIA
    NT = 0U,
    DISALLOW_SAMPLE_TIME_I
    NHERITANCE
typedef enum {
    VM_SIMULATIONS_NONCOM
    } ModelRefTsInhRule;
SIMULATION_ROLLBACK_UN
    PLIANT_NEUTRAL = 1U,
    /*
    VM_SIMULATIONS_NONCOM
    *
    ss(Set|Get)ModelReferenceNormal
    ModeSupport
    *
    /*
    * If this s-function has a
    mdlProcessParameters and
    mdlStart function,
    * and is used in a model
    referenced in normal mode,
    Simulink will error
    * out by default. If your
    mdlProcessParameters function is
    safe to call
    * before mdlStart, set it to
    MDL_START_AND_MDL_PRO
    CESS_PARAMS_OK
    */
} SimulationRollbackCompliance;
    typedef enum
    {
    RUNTIME_THREAD_SAFETY_
    COMPLIANCE_UNKNOWN = 0,
    * before mdlStart, set it to
    MDL_START_AND_MDL_PRO
    CESS_PARAMS_OK
    */
    SIMULATION_FASTRESTART_
    UNINITIALIZED = 0U,
    RUNTIME_THREAD_SAFETY_
    COMPLIANCE_FALSE,
    /*
    typedef enum {
    SIMULATION_FASTRESTART_
    COMPLIANT = 1U,

```

```

                                * one and there was no
DEFAULT_SUPPORT_FOR_NO alteration of the dialog parameter RTPARAM_MAKE_TRANSFORM
RMAL_MODE = 0,          */
                                MED_TUNABLE = 2
                                } TransformedFlag;

MDL_START_AND_MDL_PRO RTPARAM_NOT_TRANSFORM
CESS_PARAMS_OK = 1,    ED = 0,          typedef struct ssParamRec_tag {

TUNABLE_PARAMS_NOT_US /*          /*
ED_IN_MDL_START = 2    * Your run-time parameter is * The parameter characteristics
}                       transformed if          */
ssModelReferenceNormalModeSu nDialogParamIndices > 1 or    const char *name; /*
pport;                  * there was an alteration of the Name of the parameter. This must
                                dialog parameter value or data point
                                type.          * to persistent
/* Used by macro          */          memory. Do not set to a local
ssAddVariableSizeSignalsRuntime *          * variable
Checker */              RTPARAM_TRANSFORMED      (static char name[32] or strings
typedef enum {          = 1,          * "name" are
    INPUTS_DIMS_MATCH = 0,          /*          okay)
                                /*          */
INPUTS_DISALLOW_EMPTY_ * Your run-time parameter can          */
SIGNAL                  be marked as 'make transformed
} RuntimeCheckerType_T; tunable'
                                * if nDialogParamIndices is one #ifdef SYSTEM_OBJECTS_DEF
                                and you altered the dialog      char*   mName;
                                parameter          #endif
                                * value or data type. If the      int_T   nDimensions; /*
                                parameter          Number of dimensions for this
                                * tunable variable, say 'k', then parameter */
                                the transformed data type, etc.      int_T   *dimensions; /*
                                * version of k will be used in      Array giving the dimension (sizes)
                                the generated code. All references of
                                to          * the
                                * tunable parameters that have      parameter          */
                                been transformed must be done so #ifdef SYSTEM_OBJECTS_DEF
                                in          int_T   numTotalElements;
                                * the same fashion, otherwise #endif
                                an error will be generated.      DTypeId  dataTypeId; /* For
                                */          built-in data types, see
                                BuiltInDTypeId

```

```

                * in                */
simstruc_types.h                */
    boolean_T complexSignal; /*
FALSE or TRUE                    /*
*/                                * Run-time parameters to
                                dialog parameter map.
                                *
                                * For proper interaction with
                                'tunable parameter variables' that
                                * are set via the "Tunable
                                Parameters Dialog", Simulink
                                requires
                                * information about how the
                                run-time parameters are derived.
                                *
                                * It is an implicit assumption
                                that all run-time parameters are
                                derived
                                * from the dialog parameters,
                                i.e., ssGetSFcnParam(S,i). Thus
                                each
                                * run-time parameter is derived
                                from a subset of the dialog
                                parameters:
                                * run-time_parameter =
                                some_function(subset of dialog
                                parameters).
                                * In the simplest case,
                                * run-time_parameter = a
                                specific dialog parameter
                                *
                                * The following information
                                specifies which dialog parameters
                                are
                                * used in deriving a specific
                                run-time parameter. For the
                                simplest case,
                                * we have
                                * nDialogParamIndices = 1;
                                * dialogParamIndices = k;
                                * transformed = false;
                                * This case is important to
                                identify because this will allow for
                                * efficient and correct code
                                generation of run-time parameters
                                when they
                                * map directly back to tunable
                                parameter variables specified in
                                * the 'Tunable Parameters
                                Dialog'.
                                */
                                int_T nDlgParamIndices;
                                int_T *dlgParamIndices; /*
                                Array of length
                                nDialogParamIndices
                                * indicating
                                the dialog parameters that
                                * are used in
                                deriving the run-time
                                * parameter
                                */
                                TransformedFlag transformed;
                                /* Transformed status */
                                boolean_T outputAsMatrix;
                                /* Write out parameter as a vector
                                (false)
                                * [default] or
                                a matrix (true)
                                */
                                } ssParamRec;
                                #endif
                                #ifndef SYSTEM_OBJECTS_DEF

```



```

typedef enum {
    SS_DWORK_ORIGINATED_AS_IWORK,
    RTW_SUPPORT_BEYOND_32_BITS_NO = 0U, /* S-Function
    default */
    SS_DWORK_ORIGINATED_AS_PWORK,
    RTW_SUPPORT_BEYOND_32_BITS_FULLY = 1U,
    SS_DWORK_ORIGINATED_AS_DSTATE,
    RTW_SUPPORT_BEYOND_32_BITS_UP_TO_TARGET_LONG = 2U,
    SS_DWORK_ORIGINATED_AS_MASS_MATRIX_OFFSET,
}
SupportDataTypeBeyond32BitsInRTWFlag;
/*
 * Enumeration of work vector origin flag values.
 */
typedef enum {
    SS_DWORK_ORIGINATED_AS_DWORK = 0, /* default */
    SS_DWORK_ORIGINATED_AS_FORWARD_DATA_TRANSFER_MODE,
    SS_DWORK_ORIGINATED_AS_IWORK,
}
#endif /* _UNIT_ID */
sources of the signal are scheduled after its
* destinations.
* --
HYBRID_DATA_TRANSFER:
mixed case, some of sources of the signal are
* scheduled before, while others are scheduled after the destinations of
* the data transfer signal.
*/
typedef enum {
    NOT_A_DATA_TRANSFER,
    FORWARD_DATA_TRANSFER,
    REVERSE_DATA_TRANSFER,
    HYBRID_DATA_TRANSFER
} DataTransferSignalType;
#ifndef _UNIT_ID
#define _UNIT_ID
/*
 * Unit ID as registered in the model Unit Table - this is a unique ID assigned to
 * each unit expression.
 */
typedef int_T UnitId;
REVERSE_DATA_TRANSFER:

```