

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

АКПМ - 26.00.00.000 ПЗ

гр. АКПМ-24-1

Євген СЛІШКЕВИЧ

2025 рік

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

Сліпкевич Євген Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681. 5

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Побудова математичної моделі для керування технологічним

(назва роботи)

процесом отримання стиснутого повітря

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм-24-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

Є.А.Сліпкевич

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доц., к.т.н.

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

В.С.Борин

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доц., к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент-опонент

доц., к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

І.І.Чигур

(ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківськ - 2025

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 магістерський

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКИТ

(А.І. Лагойда)

«___» _____ 20__ року

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

Сліпкевичу Євгену Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Побудова математичної моделі для керування технологічним процесом отримання стиснутого повітря

керівник роботи доцент, к.т.н. Борин Василь Степанович

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «10» листопада 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Літературні джерела, матеріали переддипломної практики, технологічний регламент

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз існуючих технологій регулювання тиску на компресорній установці. 2. Створення математичної моделі керованого об'єкта

3. Аналіз та синтез автоматичної системи керування повітряним ресивером

4. Технічна реалізація та розробка scada-системи керування компресорною установкою 2вм-50/8. Висновки. Список використаних джерел

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

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 01 березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ	15.03 2025	
2.	Аналіз існуючих технологій регулювання тиску на компресорній установці	01.04 2025	
3.	Створення математичної моделі керованого об'єкта	15.06.2025	
4.	Аналіз та синтез автоматичної системи керування повітряним ресивером	15.10.2025	
5	Технічна реалізація та розробка scada-системи керування компресорною установкою 2вм-50/8	30.11.2025	

Студент _____
(підпис)

Сліпкевич Є.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Борин В.С.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто питання побудови математичної моделі технологічного процесу отримання стиснутого повітря як ключового елемента для удосконалення систем автоматизованого керування компресорними установками. Процес стискання повітря супроводжується складними термодинамічними та газодинамічними явищами, що потребують детального аналітичного опису для забезпечення ефективного регулювання робочих параметрів. З метою підвищення точності відтворення реальних режимів роботи компресора здійснено аналіз фізичних закономірностей, які визначають взаємозв'язок між тиском, температурою, витратою повітря, обертами приводу та споживаною електричною потужністю. На основі отриманих залежностей сформовано узагальнену математичну модель, що включає балансові рівняння маси та енергії, рівняння стану газу, а також передавальні функції або нелінійні регресійні залежності, які відображають динамічні характеристики компресорної системи. Особливу увагу приділено моделюванню інерційних властивостей та затримок у каналах керування, оскільки саме вони істотно впливають на якість регулювання тиску в пневматичній мережі.

Побудована модель слугує основою для подальшого синтезу алгоритмів адаптивного чи інтелектуального керування, що дозволяє оптимізувати споживання енергії, забезпечити стабільність параметрів повітря та мінімізувати знос обладнання. Практична значущість дослідження полягає у можливості інтеграції моделі в системи моніторингу та прогнозування технічного стану компресорів, що сприяє підвищенню надійності та ефективності експлуатації пневматичних комплексів на промислових підприємствах.

Ключові слова: АВТОМАТИЗАЦІЯ, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, РОЗРОБКА, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, КОМПРЕСОРНА УСТАНОВКА, РЕСІВЕР, СТИСНУТЕ ПОВІТРЯ

ANNOTATION

The paper considers the issue of constructing a mathematical model of the technological process of obtaining compressed air as a key element for improving automated control systems for compressor units. The process of air compression is accompanied by complex thermodynamic and gasdynamic phenomena that require a detailed analytical description to ensure effective regulation of operating parameters. In order to increase the accuracy of reproducing real compressor operating modes, an analysis of physical laws was carried out that determine the relationship between pressure, temperature, air flow, drive speed, and consumed electrical power. Based on the obtained dependencies, a generalized mathematical model was formed, which includes mass and energy balance equations, gas state equations, as well as transfer functions or nonlinear regression dependencies that reflect the dynamic characteristics of the compressor system. Particular attention is paid to modeling inertial properties and delays in control channels, since they significantly affect the quality of pressure regulation in the pneumatic network.

The constructed model serves as the basis for further synthesis of adaptive or intelligent control algorithms, which allows optimizing energy consumption, ensuring stability of air parameters, and minimizing equipment wear. The practical significance of the study lies in the possibility of integrating the model into systems for monitoring and predicting the technical condition of compressors, which contributes to increasing the reliability and efficiency of operation of pneumatic complexes at industrial enterprises.

Keywords: AUTOMATION, TECHNOLOGICAL PROCESS, DEVELOPMENT, MATHEMATICAL MODEL, COMPRESSOR INSTALLATION, RECEIVER, COMPRESSED AIR

ЗМІСТ

	ст.
ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ НА КОМПРЕСОРНІЙ УСТАНОВЦІ	12
1.1 Вибір об'єкту керування та визначення його структурної схеми.....	12
1.2 Формування мети керування та вимог до системи, що проектується.....	13
1.3 Аналіз існуючих технологій регулювання тиску в ресивері	14
1.4 Постановка задачі на магістерську роботу.....	18
Висновки до розділу 1.....	18
РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КЕРОВАНОГО ОБ'ЄКТА.....	20
2.1 Математична модель статичного режиму ресивера	20
2.2 Математична модель динамічного режиму ресивера.....	26
Висновки до розділу 2.....	30
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОВІТРЯНИМ РЕСИВЕРОМ	31
3.1 Розробка структурної схеми автоматичної системи керування повітряним ресивером.....	31
3.2 Вибір і обґрунтування алгоритму керування. Визначення параметрів налаштування регуляторів.....	32
3.3 Дослідження системи на стійкість.....	36
3.4 Визначення якісних показників перехідного процесу.....	39
3.5 Оптимальна система керування.....	42
Висновки до третього розділу.....	46
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА РОЗРОБКА SCADA-СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОМПРЕСОРНОЮ УСТАНОВКОЮ 2ВМ-50/8.....	47
4.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації	48

	6
4.2 Розробка програмного забезпечення SCADA-системи.....	63
Висновки до четвертого розділу.....	68
ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	71
ДОДАТКИ.....	

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АСК - автоматизована система керування

КС - компресорна станція

Р - ресивер

ОК - об'єкт керування

РО - регулюючий орган

АЧХ - амплітудно-частотна характеристика

АФХ - амплітудно-фазова характеристика

КВП - контрольно-вимірювальні прилади

ЗА - засоби автоматизації

НДР - науково-дослідна робота

ВСТУП

Актуальність теми. ВАТ "Дрогобицький завод автомобільних кранів" один з невеликої кількості машинобудівних заводів України, які спеціалізуються на виготовленні автомобільних кранів займає одне з перших місць по споживанню енергоносіїв на Львівщині. Завод забезпечений великою кількістю універсального і спеціального устаткування, значну кількість якого становлять пристрої, джерелом енергії для яких є стиснуте повітря. Середнє споживання стиснутого повітря на підприємстві становить 7500 м³/год.

Для забезпечення устаткування ВАТ „ДЗАК” стиснутим повітрям, на території заводу встановлена компресорна станція продуктивністю 9000 м³/год, яка складається з трьох компресорних установок типу 2ВМ-50/8 з електричним приводом потужністю 320 кВт.

Для кращого розуміння технологічного процесу отримання стиснутого повітря потрібно проаналізувати існуючі технології регулювання тиску, які в свою чергу потребують детального дослідження і обґрунтування з метою забезпечення оптимального керування. Для забезпечення оптимального керування компресорною установкою потрібно вирішити ряд наступних задач:

- визначити початкову структурну схему досліджуваного об'єкту ;
- провести подальше створення математичної моделі, її аналіз та дослідження;
- виконати технічну реалізацію виходячи з отриманих результатів;
- створити безпечні умови праці для обслуговуючого персоналу.

Оскільки технологічний процес отримання стиснутого повітря є досі потрібним у промисловості, проте невирішеною залишається проблема енергоефективності таких систем, оскільки вони вже відживають своє.

Саме тому є актуальним науковим завданням є створення математичної моделі технологічного процесу отримання стиснутого повітря.

Зв'язок роботи з науковими програмами планами, темами. Дана магістерська робота виконувалась автором відповідно до основного наукового

напрямку діяльності кафедри «Автоматизації та комп'ютерно - інтегрованих технологій» Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ). «Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» (ДР №011U005890) та комплексної цільової програми «Науково-організаційні засади нарощування видобутку вітчизняних нафти і газу та диверсифікації постачання енергетичних ресурсів для підвищення енергетичної безпеки України» (ДР №0115U007099). Автор роботи у рамках обраної теми безпосередньо виконав всі розділи, розробив математичну модель технологічного процесу отримання стиснутого повітря та вдосконалив структурну схему керування повітряним ресивером.

Мета і завдання дослідження. Завданням магістерської роботи є зміна структури автоматичної системи керування технологічним процесом отримання стиснутого повітря, а саме повітряним ресивером, як об'єктом дослідження з допомогою створення математичної моделі даного технологічного процесу.

Вирішення поставленої задачі здійснюється за допомогою розв'язання таких основних завдань:

- проведення детального аналізу існуючих технологій регулювання тиску в ресивері;
- створення математичної моделі технологічного процесу отримання стиснутого повітря;
- аналіз та синтез автоматичної системи керування повітряним ресивером;
- технічна реалізація та розробка SCADA-системи керування компресорною установкою;
- забезпечення належного стану охорони праці;
- обрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи, а також обґрунтування показників доречності її виконання.

Об'єктом дослідження є повітряний ресивер.

Предметом дослідження є методи математичного моделювання технологічного процесу отримання стиснутого повітря.

Методи дослідження. Методи теорії автоматичного керування – для розробки системи керування та алгоритму її функціонування; методи спектрально-кореляційного аналізу і обробки експериментальних даних – для аналізу закономірностей досліджуваного процесу і їх статистичних, динамічних характеристик; методи ідентифікації систем – для моделювання об’єкта керування на основі вхідних і вихідних даних про досліджуваний об’єкт; а саме повітряного ресивера .

Наукова новизна одержаних результатів. Науковою новизною роботи є розроблена математична модель процесу отримання стиснутого повітря, що дало змогу дослідити систему з різними законами регулювання. Проведено імітаційне моделювання технологічного процесу отримання стиснутого повітря та визначено якісні показники перехідного процесу у середовищі MATLAB.

Розроблено нову структуру системи керування повітряним ресивером на основі оптимальних параметрів.

Практичне значення одержаних результатів. Математична модель створена дала можливість дослідити систему автоматичного керування технологічним процесом отримання стиснутого повітря та отримати якісні показники розробленої системи. Результати магістерської роботи є основою для розробки нової технічної реалізації та SCADA-системи керування компресорною установкою.

Деякі підрозділи магістерської роботи можуть бути використані у навчальному процесі для проведення лекцій з курсу «Автоматизація технологічних процесів та втробництв».

Особистий внесок здобувача. Всі результати та положення магістерської роботи одержані автором особисто.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні результати роботи доповідались і одержали позитивну оцінку на міжнародній конференції. Boryn V.S., Slipkevych E.A. Construction of a mathematical model for controlling the technological process of obtaining compressed air. Modern aspects of

modernization of science: status, problems, development trends. Materials of the 63th International Scientific and Practical Conference. December 7, 2025, Olomouc (Czech Republic). Pp. 236-239. DOI: <https://doi.org/10.52058/63>

Публікації. Основні результати магістерської роботи викладено у 1 публікації.

Структура магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, чотирьох технічних розділів, розділу охорони праці та економічного розділу, а також списку використаних джерел. Повний обсяг роботи - 72 сторінки, що містять 23 рисунки, 11 таблиць. Списки використаних джерел складають 16 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ НА КОМПРЕСОРНІЙ УСТАНОВЦІ

1.1 Вибір об'єкту керування та визначення його структурної схеми

Надійність і якість роботи компресорної установки забезпечують компресор і двигун, буфери всмоктування і нагнітання, проміжний і кінцевий холодильники, ресивер.

Проаналізувавши компресорну установку, можемо сказати, що однією з найважливіших частин даної установки є повітряний ресивер, який забезпечує сталий тиск на виході установки. Саме його ми і виберемо в якості об'єкта моделювання і подальшого створення оптимальної системи керування.

Якість автоматичної системи управління визначається сукупністю властивостей, що забезпечують ефективне функціонування як самого об'єкта управління, так і керуючого пристрою.

Для нормальної роботи установки необхідно забезпечити теплові та матеріальні баланси за основними потоками.

Від інших апаратів ресивер Р-1 відділений опорами x_1 та x_2 . Кількість газу, яка протікає через вентилі x_1 та x_2 , залежить від тисків $P_{вх}$, P , $P_{вих}$ і від степені відкриття цих вентилів. Для підтримання тиску P на заданому рівні, як правило, змінюють степінь відкриття клапану на вході об'єкта або на його виході. В нашому випадку, для ресивера Р-1 підтримання потрібного тиску повітря в ньому буде досягатись шляхом зміни кількості повітря, що в нього подається. Для цього на вході ресивера буде встановлено регулюючий орган.

Керована (вихідна) величина – тиск в ресивері (P), а керуючі параметри (вхідні) – це x_1 і x_2 (переміщення регулюючих органів).

Вибраний об'єкт керування та його структурна схема зображені на рис. 1.1.

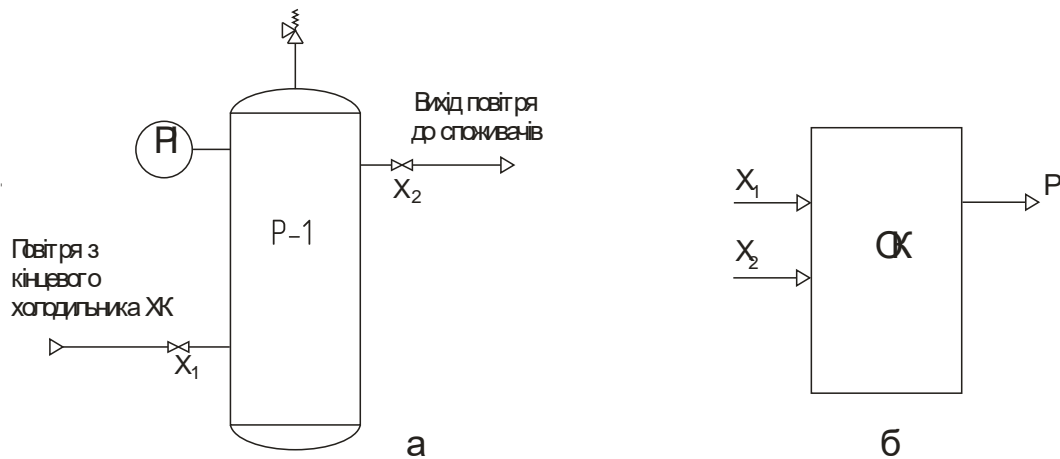


Рис. 1.1. Вибраний об'єкт керування (а) та його структурна схема (б)

1.2 Формування мети керування та вимог до системи керування, що проектується

Метою даної системи автоматизації є підтримання сталого тиску повітря в ресивері. При цьому ставиться умова, що незалежно від кількості споживання стиснутого повітря в будь-який момент часу, тиск в апараті повинен бути постійним. Тому регулюючим параметром є тиск, а збуреннями на об'єкт – зміна подачі і зміна відбору. Таке регулювання буде проводитись зміною положення регулюючого органу, що встановлений на лінії подачі стиснутого повітря в ресивер.

В практиці для систем автоматизації якість управління розглядають через якісні показники системи автоматичного керування.

Згідно до вимог технологічного регламенту установки система регулювання повітряним ресивером повинна забезпечити:

- час регулювання $t_{рег. доп.} = 50 \text{ с}$ (інтервал часу, на протязі якого регулюючий параметр доходить до встановленого значення з відхиленням менше 2%);

- перехідний процес з перерегулюванням $b = \frac{X_{вих.макс} - X_{вих.уст.}}{X_{вих.уст.}} * 100\% \leq 20\%$

- коефіцієнтколивальності $M \leq 1$;

- степінь затухання $X = 0,75 - 0,05$;
- статичну похибку регулювання $y_{ст. доп.} = 0,03$;
- динамічну похибку регулювання $y_{д. доп.} = 0,07$;
- степінь затухання коливань (інтервал часу, на протязі якого регулюючий параметр доходить до встановленого значення з відхиленням менше 2%);
- запас стійкості по амплітуді $\Delta A \geq 0,5 - 0,6$;
- запас стійкості по фазі $\Delta \varphi \geq 30^{\circ} \div 60^{\circ}$.

1.3 Аналіз існуючих технологій регулювання тиску в ресивері

Як було сказано вище, метою системи автоматизації є підтримання сталого тиску повітря на виході ресивера. Таке регулювання буде проводитись зміною положення регулюючого органу, що встановлений на лінії подачі стиснутого повітря в ресивер.

Тиск є показником співвідношення витрат газової фази на вході та виході апарата і характеризує умови збереження матеріального балансу за цією фазою. Тиск в цих апаратах, як правило, є мірою степені заповнення їх аналогічно рівню для рідинних систем.

Регулюючою дією при підтримуванні тиску є найчастіше зміна витрати вхідного або вихідного потоку. Необхідно відмітити, що газова ємність є демпфером високочастотних збурень, тому вимірний сигнал не має високочастотних складових.

Із зовнішніх систем регулювання велике розповсюдження одержали системи, які використовують регулятори прямої дії «до себе» і «після себе» (забезпечують підтримування тиску до регулюючого органу і після нього). Системи такого типу представлені на рис. 1.2а та 1.2б відповідно. Діаметр мембранної коробки і зусилля, створюване пружиною, підбираються таким чином, щоб підтримувати тиск на заданому рівні.

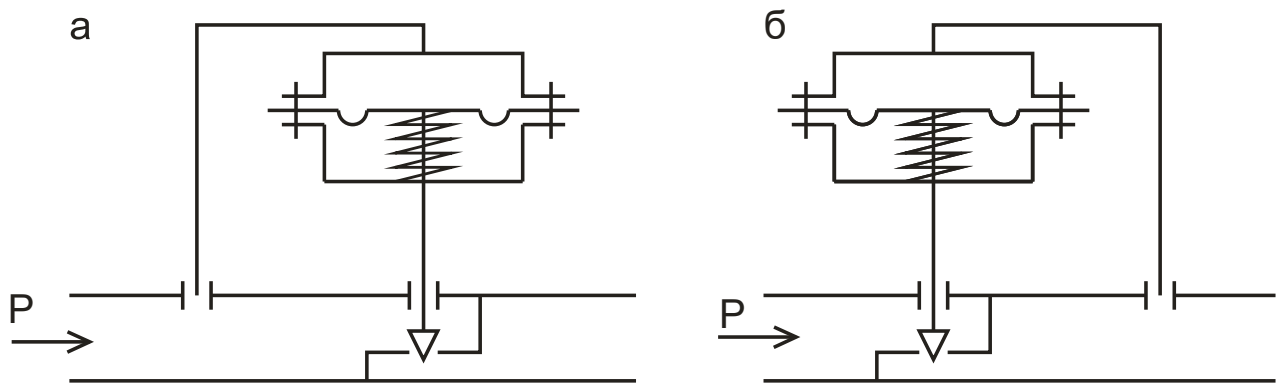


Рис. 1.2. Регулятор тиску прямої дії (а - принцип «до себе»,
б - принцип «після себе»)

Регулятори прямої дії, побудовані на основі П - закону регулювання. Вони мають високу стійкість, однак їм властива статична похибка. Проте їх з успіхом застосовують на блочному обладнанні нафтогазового промислу.

Якщо необхідно чітко підтримувати тиск, який змінюється у вузьких межах, використовують інтегральні регулятори тиску прямої дії. В ньому зусилля, розвинуте мембраною, урівноважується вантажем L і таким чином тиск P в ємності підтримується постійним (рис. 1.3).

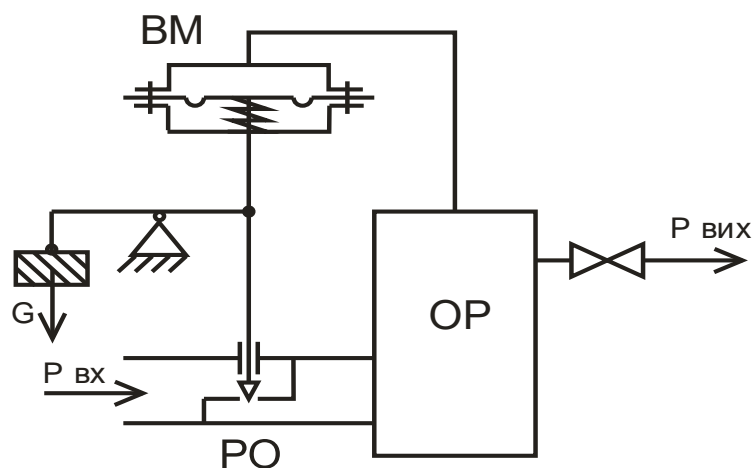


Рис. 1.3. Інтегральний регулятор тиску прямої дії (OP - об'єкт регулювання, PO - регулюючий орган, BM - виконавчий механізм)

Однак система автоматичного регулювання тиску з І – регулятором має низьку стійкість, оскільки при зміні тиску P повністю закривається або відкривається регулюючий орган.

Найчастіше для стабілізації тиску в ємностях і трубопроводах використовують одноконтурні системи автоматичного регулювання (САР) з регуляторами прямої дії. Типова схема такої САР приведена на рис. 1.4.

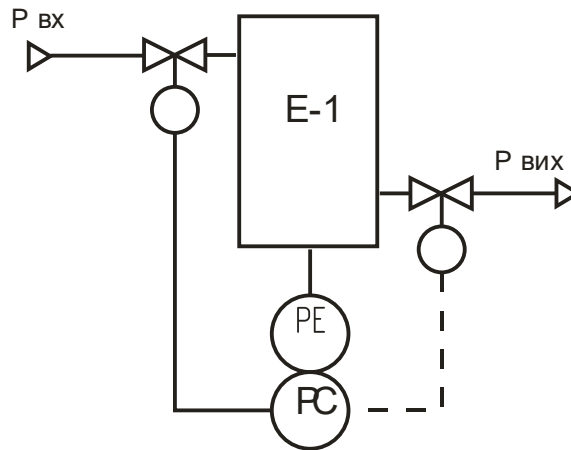


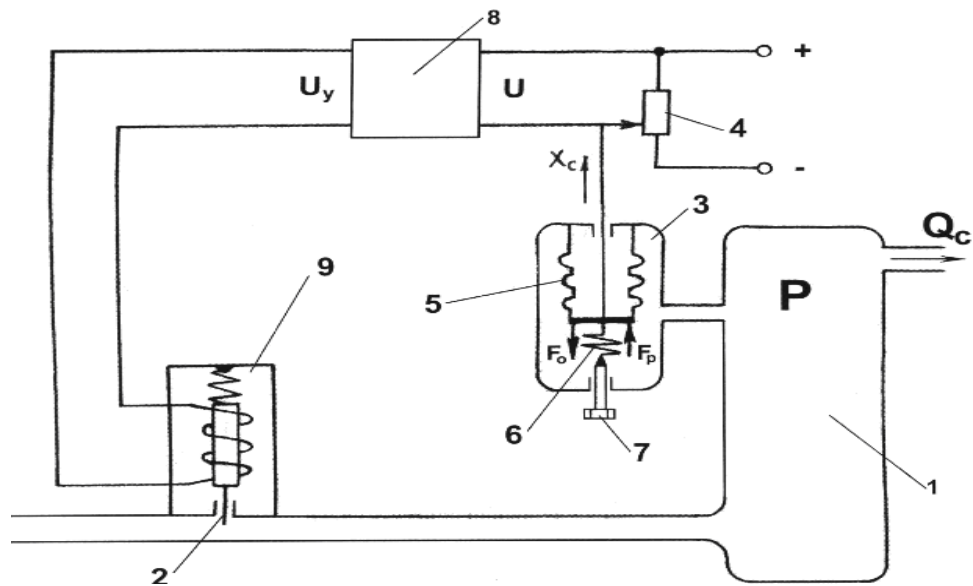
Рис. 1.4. Одноконтурна система автоматичного регулювання з регулятором прямої дії

Регулятори в таких системах функціонують за І – або ІІ – законом регулювання. Але при значній інерційності ОР підвищення якості регулювання можна добитися застосуванням ПД – і ПІД – регуляторів. Попереджуючі дії цих регуляторів створюють передумови високоякісного регулювання об'єктів зі значною інерційністю.

При використанні додаткових мало інерційних контурів для САР можна контролювати витрату газу по лінії можливого збурення або тиск в першій по ходу газу ємності при наявності ланцюжка послідовно включених ємностей. Двоконтурні САР такого типу аналогічні до вже розглянутих САР.

На рис. 1.5 приведена схема САР тиску P в ресивері (повітря-збірнику) 1, який є в даній системі об'єктом регулювання. Тиск в ресивері регулюється за допомогою зміни кількості повітря Q , що залежить від положення заслінки 2, тобто від його лінійного переміщення X_3 , яке можна розглядати як регулюючий вплив на вході об'єкта регулювання. Зовнішнім обуренням, викликаючим

відхилення регульованої величини - тиску P , є зміна витрати стисненого повітря Q_c .



1 - ресивер; 2 - заслінка; 3 - сільфонний давач; 4 - потенціометричний перетворювач; 5 - сільфон; 6 - пружина; 7 - гвинт; 8 - електронний підсилювач; 9 - електромагнітний привід.

Рис. 1.5. Схема САР тиску в ресивері

Тиск в даній системі контролюється за допомогою сільфонного давача 3, вихідна величина якого - переміщення X_c сільфона 5 однозначно залежить від різниці сил $\Delta F = F_0 - F_p$, де F_0 - сила, створювана тиском P ; F_0 - сила натягу пружини 6, яка може змінюватися за допомогою гвинта 7.

Переміщення сільфона X_c за допомогою потенціометричного перетворювача 4 перетворюється в електричний сигнал - напруги U , яка посилюється електронним підсилювачем 8. Вихідний сигнал підсилювача U_y управляє електромагнітним приводом 9, пов'язаним з заслінкою 2.

У даній САР сільфонний давач виконує функції сприймаючого, задаючого і порівняльного органу. Як сприймаючий орган він контролює тиск P , перетворюючи його в силу F_p . Завдання необхідного тиску в ресивері забезпечується за допомогою сили F_0 . Як порівняльний орган сільфон забезпечує порівняння величин F_0 і F_p , в результаті чого, як зазначалося вище, виходить $\Delta F = F_0 - F_p$ - сигнал неузгодженості.

1.4 Постановка задачі на магістерську роботу

Метою даної магістерської роботи є створення математичної моделі технологічного процесу отримання стиснутого повітря. Для цього потрібно вирішити ряд наступних задач:

- проаналізувати існуючі технології регулювання тиску для технологічного процесу отримання стиснутого повітря і на основі аналізу вибрати об'єкт керування;
- сформулювати вимоги до системи керування та мету її створення;
- розробити математичну модель об'єкта керування в статичному та динамічному режимах;
- синтезувати оптимальну систему керування;
- дослідити на стійкість отриману систему керування;
- визначити якісні показники синтезованої системи автоматичного керування;
- виконати технічну реалізацію та розробити SCADA-систему автоматичного керування;
- провести економічне обґрунтування доцільності проведення науково-дослідної роботи;
- згідно отриманих результатів зробити висновки.

Висновки до розділу 1

В першому пункті даного розділу зроблено та обґрунтовано вибір об'єкту керування з метою подальшого створення для нього оптимальної системи автоматичного керування. Сформовано мету керування та поставлено вимоги до створюваної систем керування (пункт 2 розділу). В третьому пункті

проведено аналіз існуючих технологій регулювання тиску. Сформульовано по пунктах задачі безпосередньо на магістерську роботу (пункт 4 розділу).

Отже, в даному розділі вибраний об'єкт керування для подальшого моделювання.

РОЗДІЛ 2

СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КЕРОВАНОВОГО ОБ'ЄКТА

2.1. Математична модель статичного режиму ресивера

Об'єкт керування може бути в сталому (стаціонарному, статичному) режимі та динамічному (нестационарному, перехідному) режимі.

Статичний та динамічний режими об'єкта керування знаходяться між собою в складному взаємозв'язку. Статичний, сталий режим можна розглядати як окремий випадок більш поширеного перехідного режиму, а динамічний режим можна розглядати як перехідний між двома сталими статичними режимами.

Аналітичний метод моделювання статички зв'язаний з отриманням рівнянь статички об'єкта моделювання для каналів впливу, що нас цікавлять. Кінцевою ціллю моделювання статички такого об'єкта є розрахунок основного статичного режиму або отримання рівнянь статички чи статичних характеристик.

Під основним статичним режимом розуміємо такий статичний режим, який характеризується значеннями технологічних параметрів, близькими до середини зони регламентних обмежень. Значення параметрів такого режиму повинні бути узгодженими, тобто такими, що цілком задовольняють рівняння статички.

Як було вказано вище, в якості об'єкта керування вибраний повітряний ресивер Р-1 компресорної установки типу 2ВМ-50/8, через який протікає повітря. Кількість газу, яка протікає через вентилі x_1 та x_2 , залежить від тисків $P_{вх}$, P , $P_{вих}$ і від степені відкриття цих вентилів.

Розрахункова схема для розробки математичної моделі ресивера приведена нижче на рис. 2.1.

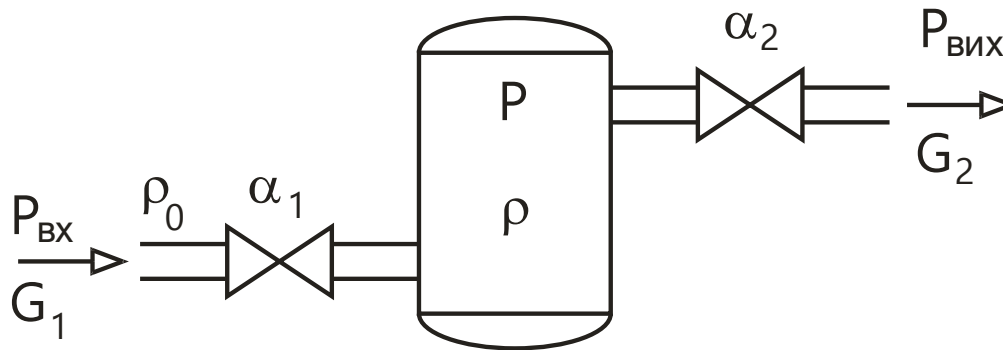


Рис. 2.1. Розрахункова схема для розробки математичної моделі ресивера

Керована (вихідна) величина – тиск в ресивері (P), а керуючі параметри (вхідні) – це x_1 і x_2 (переміщення регулюючих органів).

Модель складаємо на основі наступних припущень:

- тиски $P_{вх}$ і $P_{вих}$ – незмінні;
- немає теплообміну між ресивером та навколишнім середовищем, так що температура T стала;
- об'єм ресивера сталий;
- в ресивері відбувається ізотермічне розширення повітря.

Отже, розробимо статичну модель ресивера $P = f(x_1, x_2)$

Математичну модель розробимо виходячи з рівняння матеріального балансу:

$$G_1 = G_2 \quad (2.1)$$

$$G_1 = \alpha_1 x_1 \sqrt{(P_0 - P) \rho_0} \quad (2.2)$$

$$G_2 = \alpha_2 x_2 \sqrt{(P - P_1) \rho} \quad (2.3)$$

де: G_1, G_2 - масові витрати повітря в ресивер і з ресивера відповідно;

α_1, α_2 - коефіцієнти витрати на вході та виході ресивера відповідно;

x_1, x_2 – степені відкриття клапанів на вході та виході відповідно;

ρ_0, ρ - густина повітря перед вхідним клапаном та в ресивері відповідно;

$P_{вх}, P, P_{вих}$ – тиски повітря перед ресивером, всередині та на виході відповідно

Отже рівняння статички, яке зв'язує вихідну величину P із входами x_1 та x_2 , набуває наступного вигляду:

$$\alpha_1 x_1 \sqrt{(P_0 - P)\rho_0} = \alpha_2 x_2 \sqrt{(P - P_1)\rho} \quad (2.4)$$

Густина повітря ρ_0, ρ для ізотермічного розширення повністю визначаються значеннями тиску $P_{вх}$ і P . У зв'язку з тим, що $P_{вх}$ і ρ_0 є величини сталі, то слід виразити через тиск лише величину густини ρ . Використаємо рівняння Клапейрона-Менделєєва:

$$PV = mRT \quad (2.5)$$

Підставимо в дане рівняння формулу для обчислення маси через густину:

$$m = \rho V \quad (2.6)$$

$$PV = \rho VRT \quad (2.7)$$

$$P = \rho RT \quad (2.8)$$

Отримуємо:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (2.9)$$

Підставимо (2.9) в (2.4):

$$\alpha_1 x_1 \sqrt{(P_{вх} - P)\rho_0} = \alpha_2 x_2 \sqrt{(P - P_{вих})\frac{P}{RT}} \quad (2.10)$$

Знайдемо величину тиску P :

$$\alpha_1^2 x_1^2 (P_{вх} - P)\rho = \alpha_2^2 x_2^2 (P - P_{вих})\frac{P}{RT} \quad (2.11)$$

$$\frac{\alpha_2^2 x_2^2}{RT} P^2 + \left(\alpha_1^2 \rho_0 x_1^2 - \frac{\alpha_2^2 x_2^2 P_{вих}}{RT} \right) P - \alpha_1^2 \rho_0 x_1^2 P_{вх} = 0 \quad (2.12)$$

Рівняння (3.12) є квадратним. Знаходимо корені цього рівняння:

$$P = \frac{P_{вих}}{2} - \frac{\alpha_1^2 \rho_0 RT x_1^2}{2\alpha_2^2 x_2^2} \pm \frac{RT \cdot \sqrt{\left(\alpha_1^2 \rho_0 x_1^2 - \frac{\alpha_2^2 x_2^2 P_{вих}}{RT} \right)^2 + \frac{4\alpha_1^2 \alpha_2^2 \rho_0 P_{вх} x_1^2 x_2^2}{RT}}}{2\alpha_2^2 x_2^2} \quad (2.13)$$

Спростимо рівняння (3.13), підставивши у рівняння наступні дані:

Тиск повітря на вході $P_{вх} = 8$ кгс/см²

Тиск повітря на виході $P_{вих} = 6$ кгс/см²

Тиск повітря в ресівері $P = 7$ кгс/см²

Температура повітря $t = 30$ °С

Масова витрата $G = 100$ кг/год

Ступінь відкриття вхідного клапану $x_1 = 0,5$

Ступінь відкриття вихідного клапану $x_2 = 0,5$

Із довідника знаходимо, що густина повітря ρ_0 для тиску 8 кгс/см² при температурі 30 °С буде дорівнювати $\rho_0 = 11 \cdot 10^{-6}$ кг/см³. Густина повітря ρ для тиску 0,7 МПа розрахуємо через ρ_0 . Запишемо рівняння Бойля-Маріотта:

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P V}{T} \quad (2.14)$$

де: P_0, P - тиски повітря на вході в ресивер та всередині;

V_0, V - об'єми повітря початковий та в ресивері;

T_0, T - температури повітря на вході в ресивер та всередині.

Запишемо формулу знаходження густини:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.15)$$

де: m - маса повітря.

Так як маса газу залишається постійною, то отримуємо:

$$V_0 = \frac{m}{\rho_0}; \quad V = \frac{m}{\rho} \quad (2.16)$$

Згідно припущення про ізотермічне розширення повітря, тобто $T_0 = T$, отримуємо:

$$\frac{P_{ex}}{\rho_0} = \frac{P}{\rho} \quad (2.17)$$

Звідси:

$$\rho = \frac{P}{P_{ex}} \cdot \rho_0 = \frac{7}{8} \cdot 11 \cdot 10^{-6} = 9,712 \cdot 10^{-6} \text{ кг/см}^3 \quad (2.18)$$

Знаходимо коефіцієнти витрати α_1 і α_2

$$\alpha_1 = \frac{G_1}{x_1 \sqrt{(P_{ex} - P) \rho_0}} \quad (2.19)$$

$$\alpha_2 = \frac{G_2}{x_2 \sqrt{(P_{ex} - P_{eux}) \rho}} \quad (2.20)$$

$$\alpha_1 = \frac{100}{0,5 \sqrt{(8 - 7) \cdot 11,1 \cdot 10^{-6}}} = 60,03 \cdot 10^3 \text{ см}^{5/2}/\text{ГОД}$$

$$\alpha_2 = \frac{100}{0,5\sqrt{(7-6)} \cdot 9,712 \cdot 10^{-6}} = 64,17 \cdot 10^3 \text{ см}^{5/2}/\text{ГОД}$$

Тоді, згідно формули (2.9), маємо:

$$RT = \frac{P}{\rho} \quad (2.21)$$

$$RT = \frac{P}{\rho} = \frac{7}{9,712 \cdot 10^{-6}} = 7207 \cdot 10^3 \approx 7,21 \text{ Н} \cdot \text{м}^3/\text{КГ} \cdot \text{см}^2$$

Підставимо у (2.12) значення обчислених параметрів. Отримуємо:

$$P = \frac{6}{2} - \frac{60,03 \cdot 10^3 \cdot 11,1 \cdot 7,21 x_1^2}{2 \cdot 64,17 \cdot 10^3 x_2^2} \pm \frac{7,21}{2 \cdot 64,17 \cdot 10^3 x_2^2} \times \sqrt{\left(60,03 \cdot 10^3 \cdot 11,1 x_1^2 - \frac{64,17 \cdot 10^3 \cdot 6 x_2^2}{7,21}\right)^2 + \frac{4 \cdot 60,03 \cdot 10^3 \cdot 64,17 \cdot 10^3 \cdot 11,1 \cdot 8 x_1^2 x_2^2}{7,21}} \quad (2.22)$$

$$P = 3 - 37,434 \frac{x_1^2}{x_2^2} + \frac{5,618 \cdot 10^{-5}}{x_2^2} \cdot \sqrt{(6,663 \cdot 10^5 \cdot x_1^2 - 5,34 \cdot 10^4 \cdot x_2^2)^2 + 1,989 \cdot 10^{11} \cdot x_1^2 \cdot x_2^2} \quad (2.23)$$

Отримана залежність (2.23) є статичною моделлю об'єкта.

Розрахуємо статичні характеристики об'єкта ресивера $P = f(x_1)$ і $P = f(x_2)$.

Для цього в рівняння (2.23) підставимо значення $x_1=0,5$ і $x_2=0,5$ і отримуємо наступні залежності:

$$P_1 = f_1(x_1) = 3 - 149,735 x_1^2 + 2,247 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{(6,663 \cdot 10^5 \cdot x_1^2 - 1,335 \cdot 10^4)^2 + 4,744 \cdot 10^{10} \cdot x_1^2} \quad (2.24)$$

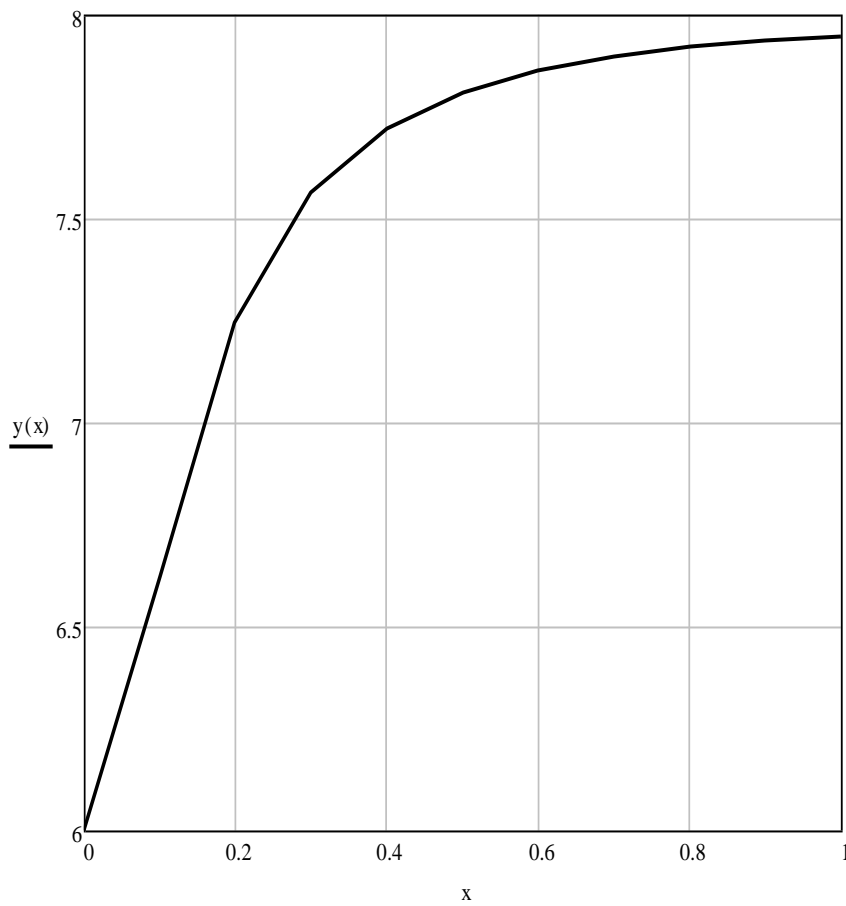
$$P_2 = f_2(x_2) = 3 - \frac{9,358}{x_2^2} + \frac{5,618 \cdot 10^{-5}}{x_2^2} \cdot \sqrt{(1,666 \cdot 10^5 - 5,340 \cdot 10^4 \cdot x_2^2)^2 + 4,744 \cdot 10^{10} \cdot x_2^2} \quad (2.25)$$

Розрахункові значення зведені в таблиці 2.1 і 2.2, а статичні характеристики приведені на рисунках 3.2 і 3.3. Як бачимо з графіків, статична характеристика є експонентою.

Таблиця 2.1

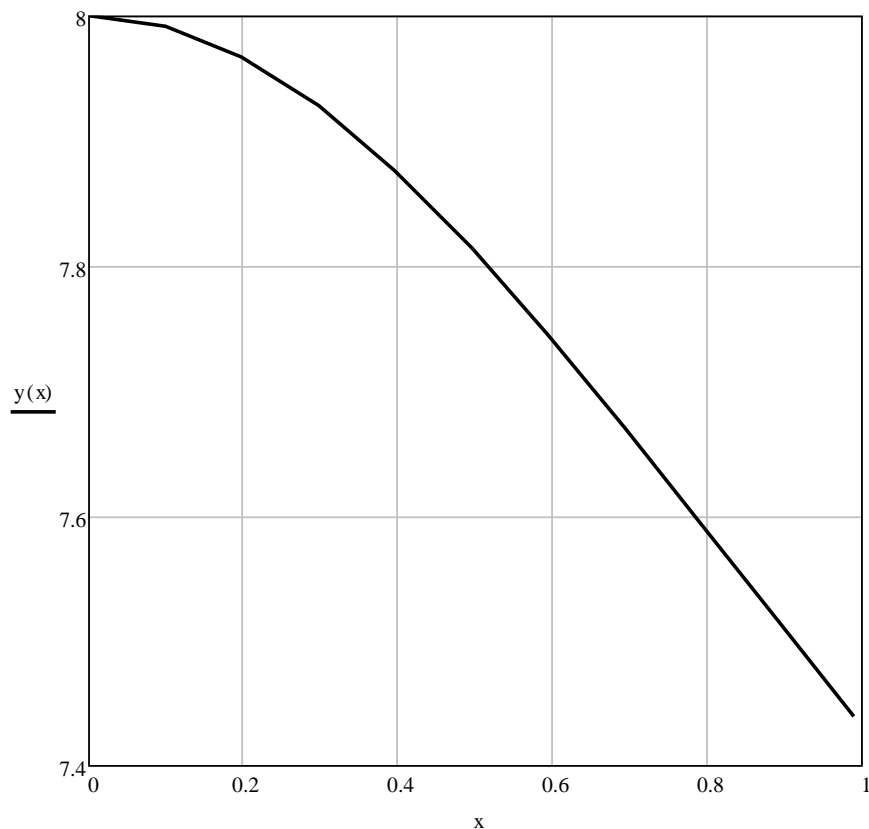
Відповідність P та x_1 в статичному режимі

N n/n	x_1	P , кг/см
1	0	6
2	0,1	6,623
3	0,2	7,246
4	0,3	7,562
5	0,4	7,722
6	0,5	7,811
7	0,6	7,864
8	0,7	7,898
9	0,8	7,921
10	0,9	7,937
11	1,0	7,948

Рис. 2.2. Статична характеристика ресивера $P = f(x_1)$

Відповідність P та x_2 в статичному режимі

N n/n	x_1	P , кг/см
1	0,0001	8
2	0,1	7,991
3	0,2	7,967
4	0,3	7,928
5	0,4	7,876
6	0,5	7,814
7	0,6	7,744
8	0,7	7,67
9	0,8	7,593
10	0,9	7,516
11	1,0	7,439

Рис. 2.3. Статична характеристика ресивера $P_2 = f(l)$

2.2 Математична модель динамічного режиму ресивера

В процесі нормальної експлуатації об'єкти керування, як правило, знаходяться в несталих, перехідних режимах.

Аналітичний метод отримання динамічних характеристик базується на складанні рівнянь матеріальних чи енергетичних балансів

акумулюючих емкостей об'єкта моделювання в перехідних режимах, тобто з врахуванням акумуляції речовин чи енергії, які мають місце при змінах вихідних параметрів. Результатом аналітичного моделювання динамічного режиму об'єкта є рівняння динаміки, яке зв'язує вихідну величину та її похідні із всіма входами об'єкта, що враховуються під час моделювання.

Рівняння динаміки ємкостей отримують із рівнянь їх балансів у статичних режимах шляхом врахування акумуляції речовин чи енергії в ємкості під час змін у часі вихідних її параметрів.

Отримані таким чином рівняння динаміки акумулюючих ємкостей з числовими коефіцієнтами являються кінцевим продуктом моделювання.

Враховуючи акумулюючу здатність ємкості перетворимо рівняння статички (3.1) на рівняння динаміки

$$\frac{dp}{dt} = G_1 - G_2 \quad (2.26)$$

або

$$\frac{d\rho}{dt} = \alpha_1 x_1 \sqrt{(P_{ex} - P)\rho_0} - \alpha_2 x_2 \sqrt{(P - P_{eux})\rho} \quad (2.27)$$

Таким чином, змінними в рівнянні (2.27) будуть x_1 , x_2 , P , ρ . Рівняння з врахуванням визначених змінних, буде нелінійне. Допустимо, що відхилення вихідної величини ΔP від рівноважного стану невелике, що дає можливість лінеаризувати диференціальне рівняння. Здійснюємо лінеаризацію даного рівняння розкладанням в ряд Тейлора.

Нехай:

$$P = P^0 + \Delta P,$$

$$x_1 = x_{01} + \Delta x,$$

$$x_2 = x_{02} + \Delta x,$$

Тоді:

$$\begin{aligned} V \frac{d(\Delta\rho)}{dt} &= \alpha_1 \sqrt{(P_{ex} - P)\rho_0} \Delta x_1(t) - \alpha_2 \sqrt{(P - P_{eux})\rho} \Delta x_2(t) - \\ &- \frac{\alpha_1 \rho_0 x_1}{2\sqrt{(P_{ex} - P)\rho_0}} \Delta P(t) - \frac{\alpha_2 \rho x_2}{2\sqrt{(P - P_{eux})\rho}} \Delta P(t) - \frac{x_2 \alpha_2 (P - P_{eux})}{2\sqrt{(P - P_{eux})\rho}} \Delta P(t) \end{aligned} \quad (2.28)$$

В рівнянні (2.28) є залежні між собою змінні. Це тиск ΔP та густина $\Delta \rho$. Їх однозначна залежність буде визначатися законом розширення газу. Якщо теплообмін з навколишнім середовищем близький до ідеального та не дуже великий перепад тиску, можна прийняти ізотермічний закон розширення $PV = mRT$, або якщо врахувати, що $V = \frac{m}{\rho}$, то отримуємо $\frac{P}{\rho} = RT$, звідки можна отримати залежності між відповідними змінними в приростах:

$$\Delta \rho(t) = \frac{\Delta P(t)}{RT} \quad (2.29)$$

Використавши (2.29) перетворимо рівняння (2.28) у:

$$\frac{V}{RT} \cdot \frac{d(\Delta P(t))}{dt} = B\Delta P(t) + D\Delta x_1(t) + M\Delta x_2(t), \quad (2.30)$$

де:

$$B = - \left(\frac{\alpha_1 \rho_0 x_1}{2\sqrt{(P_{ex} - P)\rho_0}} + \frac{\alpha_2 \rho x_2}{2\sqrt{(P - P_{eux})\rho}} + \frac{\alpha_2 x_2 (P - P_{eux})}{(2\sqrt{(P - P_{eux})\rho})RT} \right),$$

$$D = \alpha_1 \sqrt{(P_{ex} - P)\rho_0}; \quad M = -\alpha_2 \sqrt{(P - P_{eux})\rho}.$$

Розділимо праві і ліві частини рівняння (2.30) на величину $\frac{V}{RT}$

$$\frac{d(\Delta P(t))}{dt} = -\frac{BRT}{V} \Delta P(t) + \frac{DRT}{V} \Delta x_1(t) + \frac{MRT}{V} \Delta x_2(t) \quad (2.31)$$

Введемо наступні позначення:

$$\Delta P(t) = x, \quad -\frac{BRT}{V} = a, \quad \frac{MRT}{V} = b_2$$

$$\Delta x_1(t) = u_1,$$

$$\Delta x_2(t) = u_2, \quad \frac{DRT}{V} = b_1$$

Остаточно отримуємо модель:

$$\frac{dx}{dt} = ax + b_1 u_1 + b_2 u_2 \quad (2.32)$$

Обчислимо коефіцієнти моделі:

$$B = - \left(\frac{\alpha_1 \rho_0 x_1}{2\sqrt{(P_{ex} - P)\rho_0}} + \frac{\alpha_2 \rho x_2}{2\sqrt{(P - P_{eux})\rho}} + \frac{\alpha_2 (P - P_{eux})}{2RT\sqrt{(P - P_{eux})\rho}} \right) =$$

$$= - \left(\frac{60,03 \cdot 10^3 \cdot 11,1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5}{2\sqrt{1 \cdot 11,1 \cdot 10^{-6}}} + \frac{64,17 \cdot 10^3 \cdot 9,7125 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5}{2\sqrt{1 \cdot 9,7125 \cdot 10^{-6}}} + \frac{64,17 \cdot 10^3 \cdot 0,5}{2\sqrt{9,7125 \cdot 10^{-6} \cdot 720,721 \cdot 10^3}} \right) =$$

$$= -(49,999 + 49,996 + 0,007) = -100 [\text{см}^2 \cdot \text{кг} / \text{год} \cdot \text{Н}]$$

$$D = \alpha_1 \sqrt{(P_0 - P)\rho_0} = 60,03 \cdot 10^3 \sqrt{(8 - 7) \cdot 11,1 \cdot 10^{-6}} = 200 \text{ кг/год}$$

$$M = -\alpha_2 \sqrt{(P - P_1)\rho} = -64,17 \cdot 10^3 \sqrt{(7 - 6) \cdot 9,7125 \cdot 10^{-6}} = -200 \text{ кг/год}$$

$$a = -\frac{BRT}{V} = \frac{-100 \cdot 7,20721}{6,3} = -114,4 \text{ год}^{-1} = -0,032 \text{ с}^{-1}$$

$$b_1 = \frac{DRT}{V} = \frac{200 \cdot 7,20721}{6,3} = 228,8 \text{ Н/год} \cdot \text{см}^2 = 0,0636 \text{ Н/с} \cdot \text{м}^2$$

$$b_2 = \frac{MRT}{V} = -\frac{200 \cdot 7,20721}{6,3} = -0,0636 \text{ Н/с} \cdot \text{м}^2$$

Рівняння (2.31) запишеться у вигляді:

$$\frac{dx}{dt} = -0,032x + 0,0636u_1 - 0,0636u_2 \quad (2.33)$$

або

$$T \frac{dx}{dt} + x = k_1 u_1 - k_2 u_2, \quad (2.34)$$

де:

$$T = \frac{1}{0,032} = 31,25 \text{ с}$$

$$k_1 = 1,9875 \cdot 10^4 \frac{\text{Н} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}}{\text{м}^2}; \quad k_2 = -1,9875 \cdot 10^4 \frac{\text{Н} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}}{\text{м}^2}$$

Для підтримання тиску P на заданому рівні, як правило, змінюють степінь відкриття клапану на вході ресивера або його виході. Тоді зміна тисків ΔP буде виступати як збурення. В наступних розділах дослідження проводимо для випадку $x_2 = \text{const}$, тобто досліджуємо наступну модель:

$$T \frac{dx}{dt} + x = k_1 u_1 \quad (2.35)$$

З цього рівняння бачимо, що динамічні властивості вибраного об'єкту відповідають аперіодичній ланці (ланка першого порядку).

Розв'язком даного рівняння є наступна рівність:

$$x = k_1 u_1 (1 - e^{-t/T}) \quad (2.36)$$

Передавальна функція буде мати наступний вигляд:

$$W(p) = \frac{k_1}{T \cdot p + 1} \quad (2.37)$$

Постійна часу: $T = \frac{1}{0,032} = 31,25c$, коефіцієнт підсилення $k_1 = 1,9875 \cdot 10^4 \frac{H \cdot c \cdot кг}{м^2}$

Висновки до розділу 2

В даному розділі зроблений математичний опис вибраного об'єкта моделювання, а саме повітряного ресиверу, як для статичного, так і динамічного режиму. Динамічні властивості вибраного об'єкту відповідають аперіодичній ланці. Знайдено передавальну функцію об'єкту моделювання та обчислено постійну часу і коефіцієнт підсилення.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОВІТРЯНИМ РЕСИВЕРОМ

3.1. Розробка структурної схеми автоматичної системи керування повітряним ресивером

Синтез автоматичної системи – процедура визначення структури і параметрів системи за заданими показниками якості. Синтез являється важливим етапом проектування і конструювання системи.

Після вирішення задач синтезу виконується аналіз синтезованої системи, тобто перевіряють чи задовольняє синтезована система необхідним (заданим) показникам точності і якості.

Призначення регулювання – збереження значень змінних процесу близькими до заданих незалежно від збурень і коливань в його динаміці. Для систем регулювання тиску в повітряних ресиверах є метод управління по відхиленню. Для забезпечення стійкості САР у структурній схемі присутній зворотній зв'язок.

Структурна схема розробленої автоматичної системи із від'ємним зворотнім зв'язком приведена на рис. 3.1.

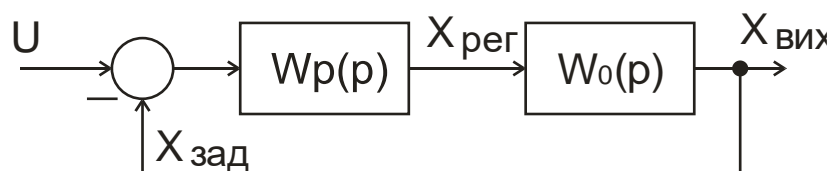


Рис. 3.1. Структурна схема автоматичної системи керування ($W_p(p)$, $W_0(p)$ - передавальні функції регулятора і об'єкта керування відповідно)

3.2 Вибір і обґрунтування алгоритму керування. Визначення параметрів налаштування регуляторів.

В системах регулювання тиску найбільше застосування знайшли П, ПІ та ПІД – алгоритми керування. Визначимо параметри налаштування регуляторів і за кращими показниками якості системи виберемо кращий алгоритм керування.

Запишемо передавальні функції регуляторів.

Статичний регулятор (П – регулятор)

$$W_p^I(p) = K_p. \quad (3.1)$$

Ізодромний регулятор (ПІ – регулятор)

$$W_p^{II}(p) = K_p \frac{Ti p + 1}{Ti p} \quad (3.2)$$

Ізодромний регулятор з веденням похідної від відхилення регульованої величини (ПІД – регулятор)

$$W_p^{III}(p) = \frac{K_p}{Ti p} (1 + Ti p + Ti T_d p^2) \quad (3.3)$$

Запишемо передавальну функцію об'єкта моделювання

$$W_0(p) = \frac{x(p)}{u_1(p)}; \quad (3.4)$$

Використаємо пряме перетворення за Лапласом до виразу (2.24)

$$L\left\{\frac{dx}{dt} + 0,032x\right\} = L\{0,0636u_1\} \quad (3.5)$$

Отримуємо наступний вираз

$$Px(p) + 0,032x(p) = 0,0636u_1(p) \quad (3.6)$$

або

$$x(p)(p + 0,032) = 0,0636u_1(p)$$

Із врахуванням запізнення системи, яке складає $0,25T_0$, отримуємо

$$W_0(p) = \frac{x(p)}{u_1(p)} = \frac{0,0636}{p + 0,032} e^{-8p} = \frac{1,9875}{31,25p + 1} e^{-8p} \quad (3.7)$$

Запишемо амплітудно-частотну характеристику об'єкта моделювання (АЧХ)

$$A_0(\omega) = \frac{1,9875}{\sqrt{1 + (31,25\omega)^2}} \quad (3.8)$$

Рівняння фазочастотної характеристики об'єкта моделювання (ФЧХ)

$$\varphi_0(\omega) = -\arctg 31,25\omega - 8\omega \quad (3.9)$$

Фазові кути регуляторів на резонансній частоті:

$$\varphi^I(\omega_p) = 0^0; \varphi^{II}(\omega_p) = -26,5^0; \varphi^{III}(\omega_p) = 0^0.$$

Фазовий кут об'єкта регулювання на резонансній частоті визначаємо за рівнянням

$$\varphi_0(\omega_p) = \varphi_{p.c}(\omega_p) - \varphi_p(\omega_p), \quad (3.10)$$

де $\varphi_{p.c}(\omega_p)$ - фазовий кут розімкнутої системи на резонансній частоті. Для статичних розімкнутих систем цей кут дорівнює -160^0 , для астатичних першого порядку -150^0 , для астатичних другого порядку $-141,5^0$.

Тоді

$$\varphi_0^I(\omega_p) = -160^0; \varphi_0^{II}(\omega_p) = -123,5^0; \varphi_0^{III}(\omega_p) = -150^0.$$

Будуємо ФЧХ об'єкта моделювання (рис. 3.2) і знаходимо резонансні частоти при допомозі програмного пакету Mathcad 14.

$$W01(p) := \frac{1,9875 \cdot e^{-8 \cdot p}}{31,25 \cdot p + 1}$$

$$A(w) := \frac{1,9875}{\sqrt{1 + 31,25^2 \cdot w^2}}$$

$$F(w) := -8 \cdot w - \text{atan}(31,25 \cdot w)$$

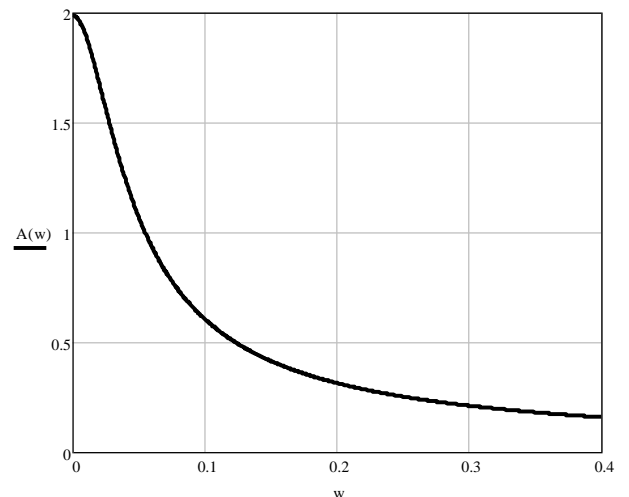


Рис. 3.2. Амплітудно-частотна характеристика об'єкта

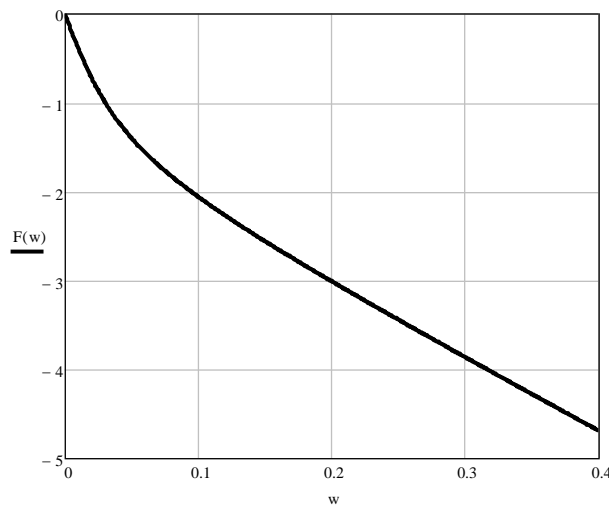


Рис. 3.3. Фазо-частотна характеристика об'єкта

Резонансні частоти наступні

$$\omega_p^{\text{II}} = 0,176 \text{ с}^{-1}; \quad \omega_p^{\text{III}} = 0,109 \text{ с}^{-1}; \quad \omega_p^{\text{IIIД}} = 0,156 \text{ с}^{-1}$$

Розрахуємо параметри налаштування регуляторів.

Для П – регулятора

$$K_p = \frac{0,683}{A_0(\omega_p)} = \frac{0,683\sqrt{31,25}}{1,9875} = 1,9210.$$

Для ПІ – регулятора

$$K_p = \frac{0,724}{A_0(\omega_p)} = 1,293;$$

$$T_i = \frac{2}{\omega_p^{\text{III}}} = \frac{2}{0,109} = 18,35 \text{ с.}$$

Для ПІД регулятора

$$K_p = \frac{0,808}{A_0(\omega_p)} = 2,023;$$

$$T_i = \frac{1}{\omega_p^{\text{IIIД}} \sqrt{c}} = \frac{1}{\sqrt{0,15} \cdot 0,156} = 16,55 \text{ с.}$$

$$T_d = \frac{\sqrt{c}}{\omega_p^{\text{IIIД}}} = \frac{\sqrt{0,15}}{0,156} = 2,48 \text{ с.}$$

При допомозі пакету Mathcad обчислимо коефіцієнти C_1 , C_0 , C_2 для електронного моделювання перехідних процесів та запишемо передавальні функції.

$$W^{II}(p) = 1,921; \quad W^{III}(p) = 1,293 \frac{18,35p + 1}{18,35p};$$

$$W^{IV}(p) = \frac{2,023}{16,55} (1 + 16,55p + 16,55 \cdot 2,48p^2)$$

$$W_{01}(p) := \frac{1,9875 \cdot e^{-8 \cdot p}}{31,25 \cdot p + 1}$$

$$A(w) := \frac{1,9875}{\sqrt{1 + 31,25^2 \cdot w^2}}$$

Регулятор II

$$w1 := 0.176$$

$$C10(w1) := \frac{1}{A(w1)}$$

$$C10(w1) = 2.813$$

$$C1 := 0.683 \cdot C10(w1)$$

$$C1 = 1.921$$

$$W1(p) := C1$$

$$W1(p) \text{ float, 4 } \rightarrow 1.921$$

Регулятор III

$$w1 := 0.109$$

$$C10(w1) := \frac{1}{A(w1)}$$

$$C10(w1) = 1.786$$

$$C0 := 0.534 \cdot C10(w1) \cdot w1$$

$$C0 = 0.104$$

$$C1 := 0.724 \cdot C10(w1)$$

$$C1 = 1.293$$

$$W2(p) := \frac{C1 \cdot p + C0}{p}$$

$$W2(p) \text{ float, 4 } \rightarrow \frac{1.293 \cdot p + 0.104}{p}$$

Регулятор ПД

$$w1 := 0.156$$

$$\tilde{N}1 := 0.808 \cdot C10(w1)$$

$$\tilde{N}1 = 2.023$$

$$\tilde{N}0 := 0.312 \cdot C10(w1) \cdot w1$$

$$\tilde{N}0 = 0.122$$

$$\tilde{N}2 := \frac{0.3126 \cdot C10(w1)}{w1}$$

$$\tilde{N}2 = 5.017$$

$$W3(p) := \frac{\tilde{N}2 \cdot p^2 + \tilde{N}1 \cdot p + \tilde{N}0}{p}$$

$$W3(p) \text{ float, 4} \rightarrow \frac{2.023 \cdot p + 5.017 \cdot p^2 + 0.1219}{p}$$

Отримані дані занесемо в таблицю 3.1

Таблиця 3.1

Параметри налаштування регуляторів по притоку

Тип регулятора	c_0	c_1	c_2
П	-	1,921	-
ПІ	0,104	1,293	-
ПІД	0,122	2,023	5,017

3.3 Дослідження системи на стійкість

Для визначення стійкості САР є розроблені спеціальні критерії, які дозволяють аналітично встановити стійкість системи. Для цього достатньо мати загальну передавальну функцію досліджуваної системи. По виду $W_{\text{заг}}(p)$ можна судити про можливу стійкість системи. Для цього використовують алгебраїчні критерії стійкості (Гурвіца, Рауса) або частотні (Михайлова, Найквіста).

Для дослідження нашої САР використаємо критерій Найквіста. Він використовується для замкнутих систем, але для дослідження використовується $W_{\text{роз}}(p)$ розімкнутої частини. Якщо по цьому критерію розімкнута система вийде стійкою, то і замкнута теж буде стійкою.

В нашому випадку передавальна функція розімкнутої має вид:

$$W_{\text{роз}}(p) = W_o(p) * W_p(p) \quad (3.11)$$

Згідно цього критерію у виразі $W_{\text{роз}}(p)$ робиться заміна оператора p на $j\omega$, виділяється дійсна і уявна частини і будується годограф при $\omega = 0 \rightarrow \infty$.

Для побудови годографа використаємо програмний пакет Mathcad 14.

$$i := \sqrt{-1}$$

$$G1(s) := W01(p) \cdot W1(p) \left| \begin{array}{l} \text{substitute, } p = s \cdot i \\ \text{simplify} \\ \text{float, 4} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(0.141i) \cdot s - 0.03525}{s^2 + 0.0625} - \frac{1.0 \cdot [(0.07952i) \cdot s - 0.002545]}{s^2 + 0.001024} *$$

$$G2(s) := W01(p) \cdot W2(p) \left| \begin{array}{l} \text{substitute, } p = s \cdot i \\ \text{simplify} \\ \text{float, 4} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(0.06439i) \cdot s - 0.0161}{s^2 + 0.0625} - \frac{0.104i}{s} + \frac{(0.08096i) \cdot s - 0.002591}{s^2 + 0.001024} *$$

$$G3(s) := W01(p) \cdot W3(p) \left| \begin{array}{l} \text{substitute, } p = s \cdot i \\ \text{simplify} \\ \text{float, 4} \end{array} \right. \rightarrow -\frac{1.0 \cdot [5.52e21 \cdot s + (8.395e22i) \cdot s^2 + 5.606e23 \cdot s^3 + (6.461e23i) \cdot s^4 + 5.017e24 \cdot s^5 + 2.437e20i]}{2.0e21 \cdot s + 1.985e24 \cdot s^3 + 3.125e25 \cdot s^5} *$$

$$P1(s) := \text{Re}(G1(s)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow \frac{0.002545}{s^2 + 0.001024} - \frac{0.03525}{s^2 + 0.0625}$$

$$Q1(s) := \text{Im}(G1(s)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow \frac{s \cdot (0.06148 \cdot s^2 - 0.0048256)}{(s^2 + 0.0625) \cdot (s^2 + 0.001024)}$$

$$s := 0, 0.01.. 1000$$

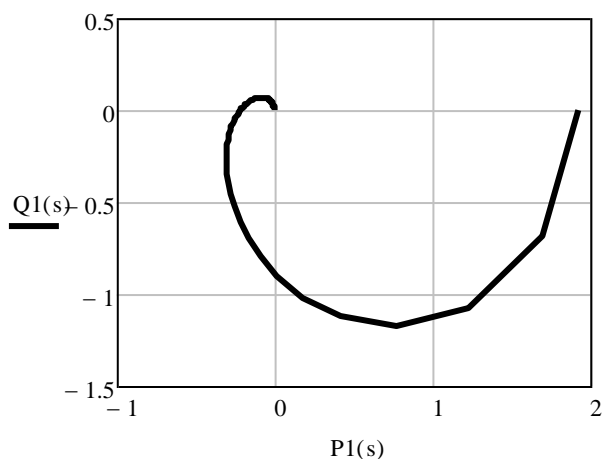


Рис. 3.3. Амплітудно-фазова характеристика розімкнутої системи з П-регулятором

$$P2(s) := \text{Re}(G2(s)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow -\frac{1.0 \cdot (1.8691e8 \cdot s^2 + 1.7842e6)}{6.3524e8 \cdot s^2 + 1.0e10 \cdot s^4 + 640000.0}$$

$$Q2(s) := \text{Im}(G2(s)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow \frac{0.06439 \cdot s}{s^2 + 0.0625} - \frac{0.104}{s} + \frac{0.08096 \cdot s}{s^2 + 0.001024}$$

$$s := 0, 0.01.. 1000$$

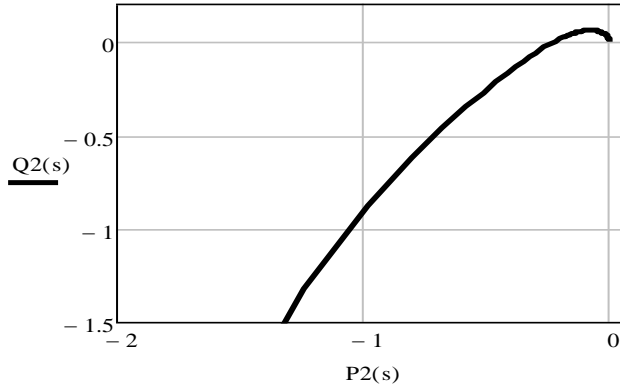


Рис. 3.4. Амплітудно-фазова характеристика розімкнутої системи з ПІ-регулятором

$$P3(s) := \text{Re}(G3(s)) \begin{cases} \text{complex} \\ \text{simplify} \rightarrow -\frac{0.005164}{s^2 + 0.062496} - \frac{0.0025774}{s^2 + 0.0010241} - 0.16054 \\ \text{float, 5} \end{cases}$$

$$Q3(s) := \text{Im}(G3(s)) \begin{cases} \text{complex} \\ \text{simplify} \rightarrow -\frac{1.0 \cdot (0.0026864 \cdot s^2 + 0.020675 \cdot s^4 + 0.0000077984)}{s \cdot (s^2 + 0.0010241) \cdot (s^2 + 0.062496)} \\ \text{float, 5} \end{cases}$$

$$s := 0, 0.01.. 100$$

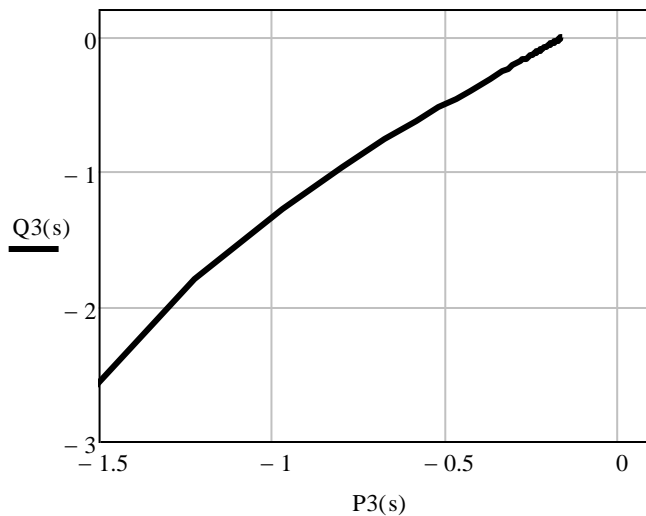


Рис. 3.5. Амплітудно-фазова характеристика розімкнутої системи з ПІД-регулятором

Для стійкості замкнутої системи необхідно і достатньо щоб АФХ стійкої розімкнутої системи при зміні $\omega=0 \rightarrow \infty$ не проходила через точку з координатами $(-1, j0)$.

Так як отримані графіки не проходять через точку з координатами $(-1, j0)$, то робимо висновок, що отримані САР є стійкими.

3.4 Визначення якісних показників перехідного процесу

Для моделювання перехідних процесів в системі використовуємо пакет програм MATLAB R2009a. Перехідні процеси в замкнутій системі при різних алгоритмах керування приведені на рисунках нижче.

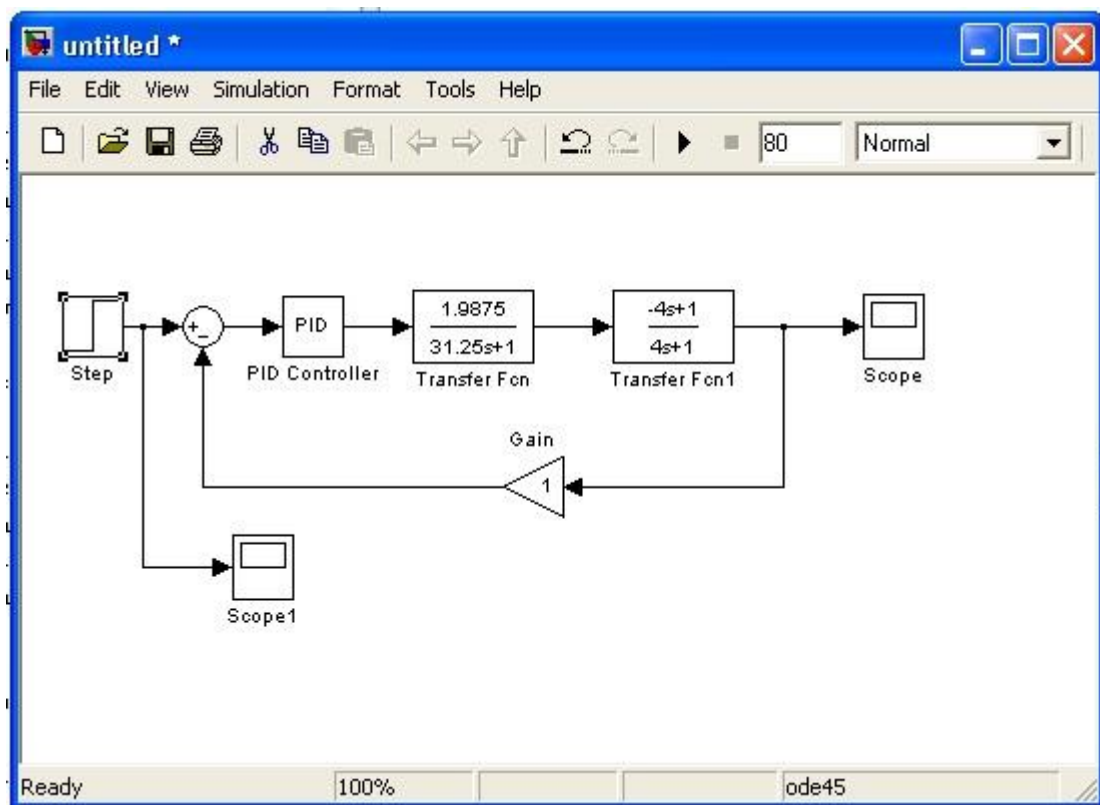


Рис. 3.6. Структурна схема САР

На вхід системи (блок Step) потрібно подати одиничний стрибкоподібний сигнал (збурення).

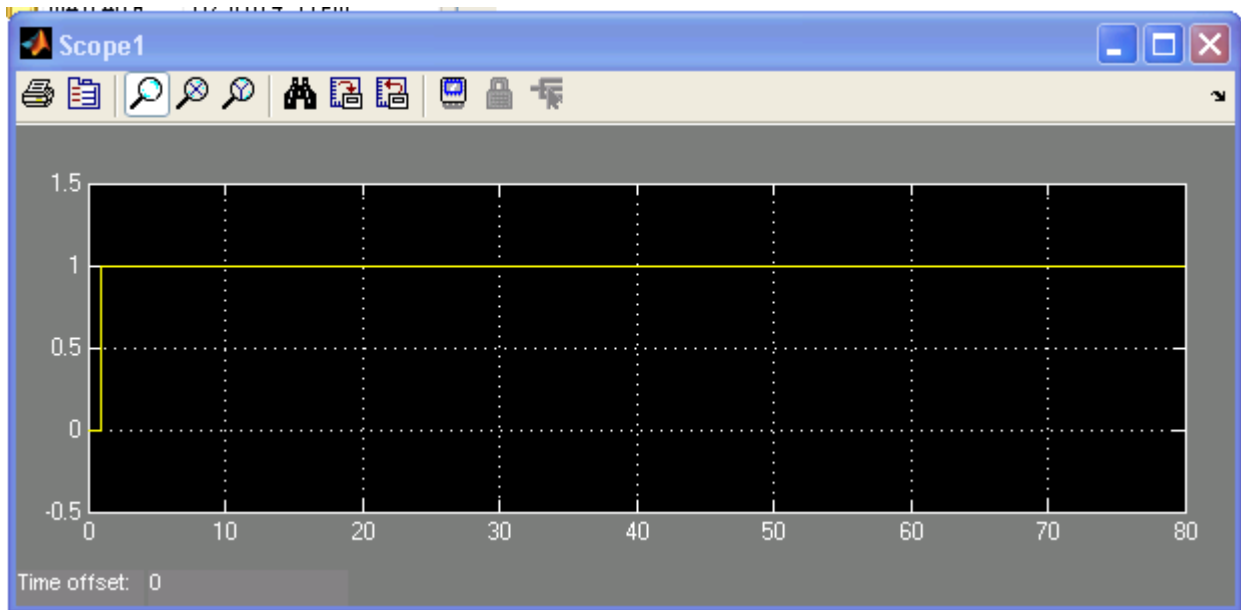


Рис. 3.7. Вхідний сигнал САР

Змінюючи параметри налаштування регулятора (блок PID Controller) відповідно до отриманих значень коефіцієнтів C_1 , C_0 , C_2 отримаємо наступні графіки перехідних процесів.

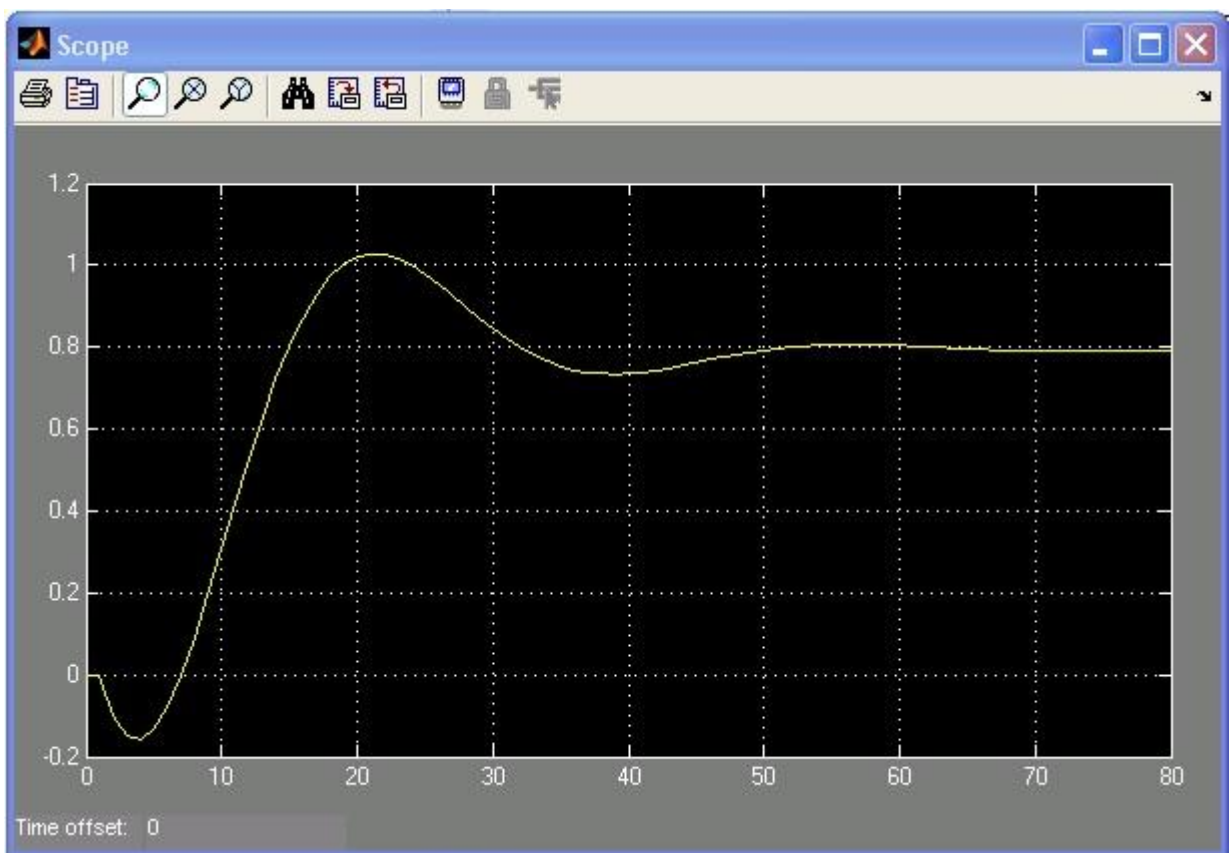


Рис. 3.8. Графік перехідного процесу системи з П-регулятором

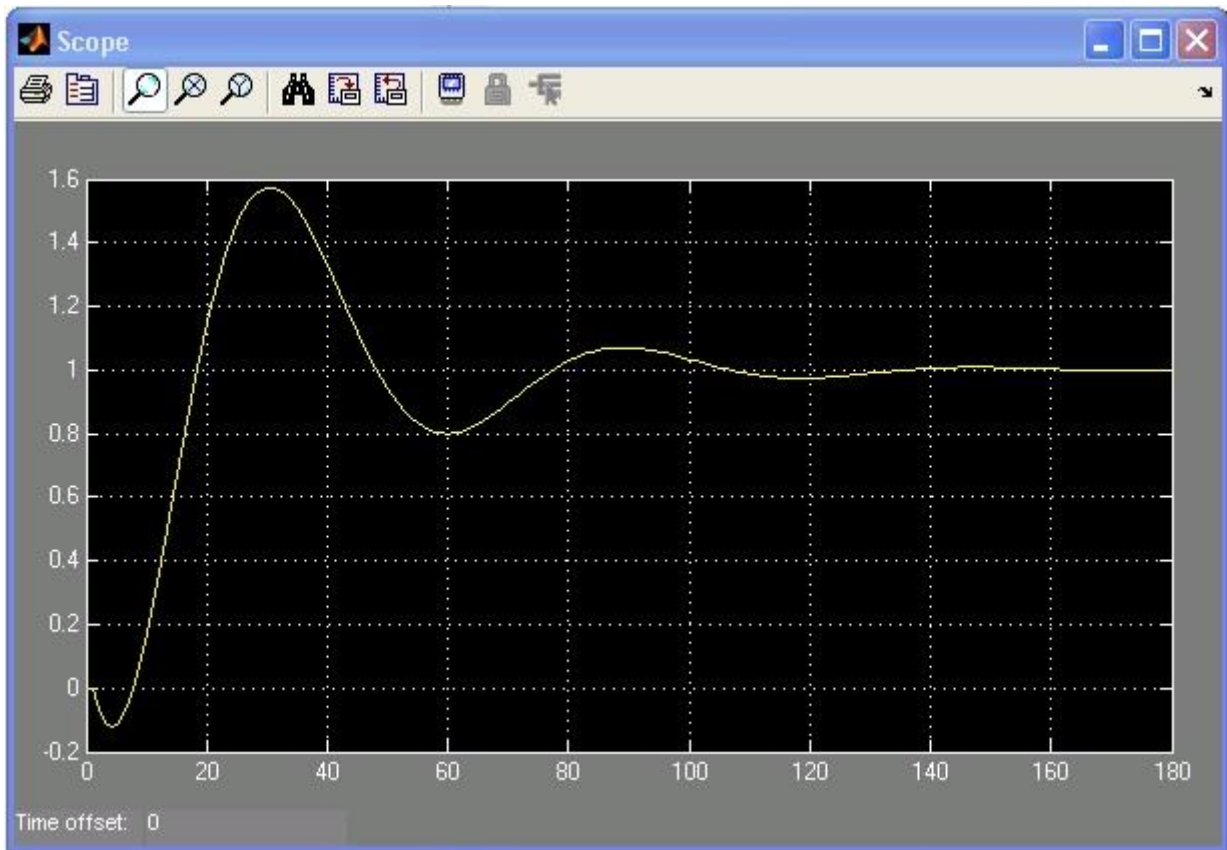


Рис. 3.9. Графік перехідного процесу системи з ПІ-регулятором

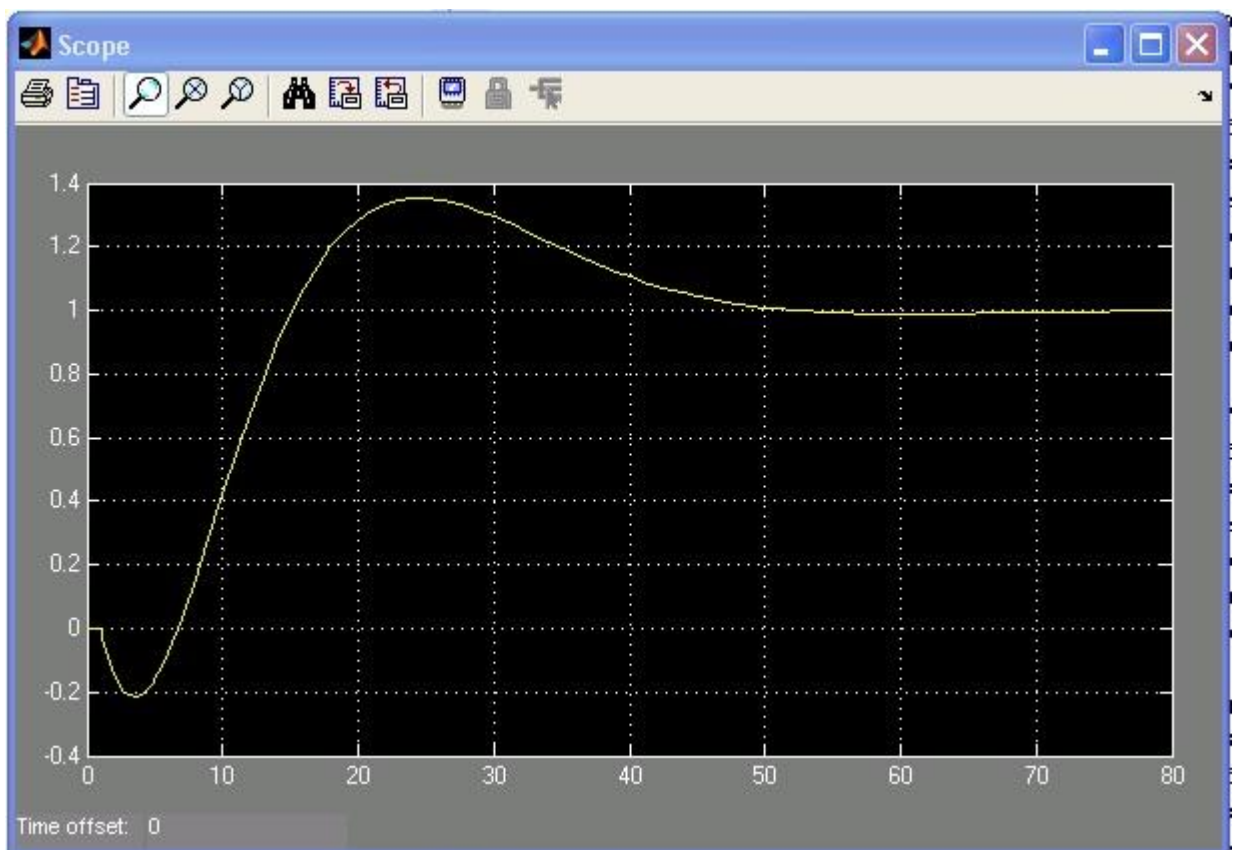


Рис. 3.10. Графік перехідного процесу системи з ПІД-регулятором

З отриманих графіків визначаємо параметри якості регулювання: час регулювання, пере регулювання і степінь затухання коливань. Вони визначаються наступним чином.

Перерегулювання $\sigma(\%)$

$$\sigma = \frac{x_m - x(\omega)}{x(\omega)} \cdot 100\%, \quad (3.12)$$

де: $x(\omega)$ - усталене значення змінної;

x_m - максимальне значення змінної.

Степінь затухання Ψ

$$\psi = 1 - \frac{A_3}{A_1}, \quad (3.13)$$

де A_1, A_3 - сусідні максимальні відхилення одного знаку.

Час регулювання визначається за умовою

$$|x(t) - x(\omega)| \leq \delta_r, \quad (3.14)$$

де δ_r - точність керування.

Показники якості перехідних процесів приведено в таблиці 3.2

Таблиця 3.2

Показники якості системи

Тип регулятора	Перерегулювання, $\sigma\%$	Степінь затухання, Ψ	Час регулювання, тр, с
П	25	0,7	50
ПІ	55	0,25	130
ПІД	30	0,76	50

Виходячи із отриманих результатів можна зробити висновок, що найкращі результати забезпечує ПІД-закон регулювання.

3.5 Оптимальна система керування

Важливий клас задач оптимального керування складають так звані лінійні задачі з квадратичним критерієм, розв'язком яких є регулятори із зворотнім зв'язком.

Необхідно знайти лінійне оптимальне керування, яке б компенсувало всі збудження, що виникають за кінцевий час t_k і при цьому мінімізувало функціонал:

$$R(\bar{x}, \bar{u}) = \int_{t_0}^{t_k} (qx^2 + ru^2) dt \quad (3.15)$$

де: q, r – вагові коефіцієнти, які впливають на якість перехідного процесу. Так, наприклад, із збільшенням q зростає швидкодія системи, а чим більше значення r , тим система інерційніша.

Отже модель об'єкта моделювання має вид

$$\frac{dx}{dt} = -ax + bu \quad (3.16)$$

де: $a = 0,032; b = 0,0636$.

Для цієї задачі рівняння Ріккати набуває вигляду

$$-\frac{dp}{dt} = -r^{-1}p^2(t)b^2 - 2ap(t) + q, \quad p(t_k) = 0, \quad (3.17)$$

або

$$\frac{dp}{dt} = r^{-1}b^2p^2(t) + 2ap(t) - q, \quad p(t_k) = 0. \quad (3.18)$$

Рівняння (4.18) це рівняння із розподіленими змінними. Запишемо його наступним чином:

$$\frac{\left(\frac{r}{b^2}\right)dp}{p^2 + \left(\frac{2ar}{b^2}\right)p - q\frac{r}{b^2}} = dt \quad (3.19)$$

В цьому випадку одержане рівняння може бути проінтегровано з граничною умовою $p(t_k) = 0$. Якщо p_1 і p_2 є коренями багаточлена

$p^2 + \left(\frac{2ar}{b^2}\right)p - q\frac{r}{b^2} = 0$, то загальний розв'язок рівняння (1.18) матиме вигляд

$$\frac{p(t) - p_1}{p(t) - p_2} = p_0 \exp(r^{-1}b^2(p_1 - p_2)t),$$

де: $p_{1,2} = -arb^2 = (b^{-2}ar)^2 + (qrb^{-2})^{1/2}$

p_0 – стала інтегрування.

Отже, $p(t)$ – матриця, що задає коефіцієнти зворотного зв'язку в автоматичній системі керування та має вид

$$p(t) = \frac{-p_2 p_0 \exp\left[\left(\frac{b^2}{r}\right)(p_1 - p_2)t + p_1\right]}{1 - p_0 \exp\left[\left(\frac{b^2}{r}\right)(p_1 - p_2)t\right]} \quad (3.20)$$

Використовуючи граничну умову $p(t_k) = 0$, знаходимо сталу інтегрування

$$p_0 = \frac{p_1}{p_2 \exp\left[\left(\frac{b^2}{r}\right)(p_1 - p_2)t_k\right]} \quad (3.21)$$

Таким чином закон оптимального керування

$$u^*(x) = -\frac{1}{r} b p(t) x \quad (3.22)$$

Одержана система керування зі зворотнім зв'язком подана нижче на рисунку 3.11.

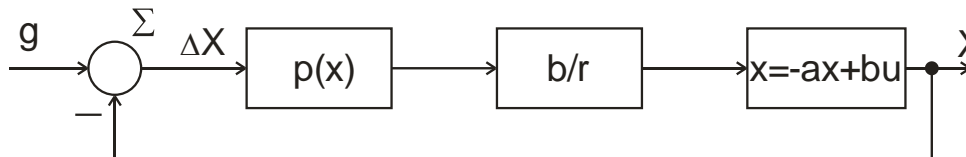


Рис. 3.11. Оптимальна система керування повітряним ресивером

Знаходимо числові значення $u^x(x)$ для випадку $q=0,1$ і $r=0,2$.

Корені багаточлена:

$$\begin{aligned} p_{1,2} &= -0,032 \cdot 0,2 \cdot 0,0636^{-2} \pm \sqrt{(0,0636^{-2} \cdot 0,032 \cdot 0,2)^2 + 0,1 \cdot 0,2 \cdot 0,0636^{-2}} = \\ &= -1,582 \pm \sqrt{2,503 + 4,944} = -1,582 \pm 2,729 \end{aligned}$$

$$p_2 = -4,31c^{-1}; \quad p_1 = 1,147c^{-1}.$$

Стала інтегрування при $t_k = 100c$ визначиться як:

$$p_0 = \frac{1,147}{(-4,31) \exp\left[\frac{(0,0636)^2}{0,1} (1,147 + 4,31) 100\right]} = -0,122$$

Визначаємо оптимальне керування для $t_k \rightarrow \infty$

Якщо $p_1 > p_2$, то $\lim p_0 = 0$ і $p(t) = p_1$

Якщо $p_1 < p_2$, то $\lim p_0 = \infty$ і $p(t) = p_2$

Таким чином:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p(t) = \max(p_1, p_2) \quad (3.23)$$

а ця величина є сталою величиною.

Отже: $u(x) = -P_{\max} b r^{-1} = -1,147 \cdot 0,0636 \cdot 10x = -0,7294x$

Змодельюємо перехідний процес в системі за допомогою інтерактивного на пакету MATLAB R2009a. Перехідний процес зображений на рисунку 3.12.

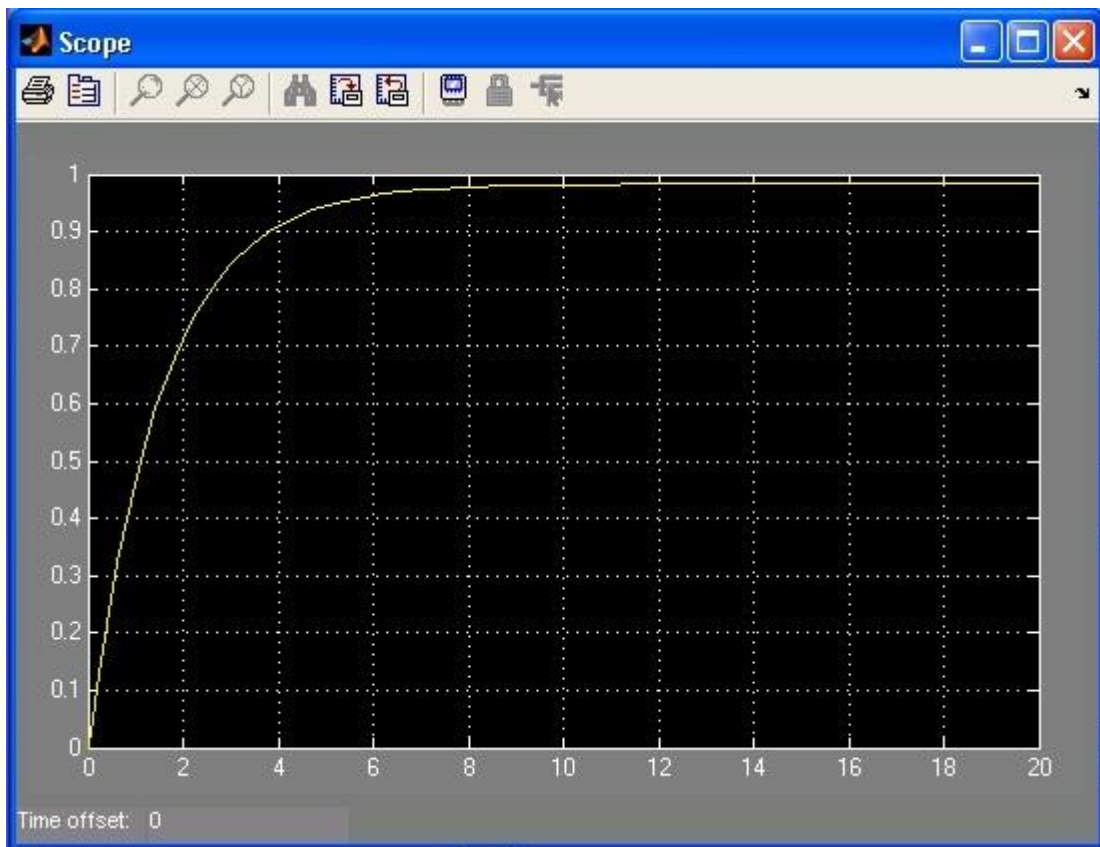


Рис. 3.12. Перехідний процес в оптимальній системі керування

Розрахуємо показники якості для отриманої оптимальної системи по приведених вище формулах (3.12) – (3.14). Отримуємо наступні показники:

перерегулювання: $\sigma = 0\%$

ступінь затухання коливань $\psi = 1$

час регулювання $t_p = 12$ с

статична похибка 0,2

Висновки до розділу 3

В даному розділі проведений синтез одноконтурної системи керування повітряним ресивером.

Визначено параметри налаштування і за показниками якості вибрано оптимальний алгоритм керування.

Побудовано АЧХ, ФЧХ і АФХ об'єкту моделювання.

За критерієм Найквіста досліджено нашу САР на стійкість.

Змодельовано перехідні процеси і отримано відповідні графіки.

З отриманих графіків визначено параметри якості регулювання: час регулювання, перерегулювання і степінь затухання коливань.

Визначено оптимальну систему керування та розрахували показники якості для отриманої оптимальної системи.

Автоматична система керування була досліджена з П, ПІ, ПІД алгоритмами керування, а також проведений синтез оптимальної системи керування на основі рівняння Ріккати. Як показує аналіз цих систем найкращі показники якості забезпечує оптимальна система керування, а саме: перехідний процес асимптотичний; перерегулювання та коливання відсутні, час регулювання складає 12с; статична похибка – 0,2.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА РОЗРОБКА SCADA-СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОМПРЕСОРНОЮ УСТАНОВКОЮ 2ВМ-50/8

Автоматизовану систему управління технологічним процесом та збору даних розробляємо із врахуванням наступних вимог:

- система повинна забезпечити надійну і продуктивну роботу підприємства, виконуючи необхідні функції управління, які пов'язані із регулюванням технологічними змінними і захистом технологічного процесу і обладнання ;
- система повинна забезпечувати взаємодію в реальному часі оператора і обслуговуючого персоналу з технологічним процесом і автоматизованим обладнанням, яке використовується в технологічному процесі;
- система повинна забезпечувати збереження інформації за період роботи установки і видавати інформацію, яка необхідна для обліку і управління роботою установки.

В даному випадку розроблена двохрівнева структура управління, яка приведена нижче на рис.4.1.

Для першого рівня передбачено такі режими управління:

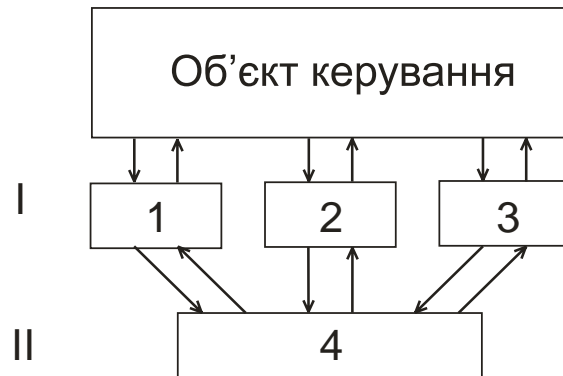
- 1) командами, які поступають від вищого рівня;
- 2) командами, які формуються безпосередньо першим рівнем;
- 3) командами, які поступають від вищого рівня і командами, які формуються безпосередньо першим рівнем

Для другого рівня передбачено наступні режими управління:

- 1) команди формуються безпосередньо на другому рівні;
- 2) всі функції управління з другого рівня передаються на апаратуру першого рівня;
- 3) частина команд формується на другому рівні, а частина функцій управління передана на апаратуру першого рівня.

Дана структура системи управління забезпечує її надійність, оперативність, ремонтпридатність. При цьому легко вирішується оптимальний

рівень централізації управління компресорною установкою з мінімальною кількістю засобів технологічного контролю та управління і ліній зв'язку між ними.



I – перший рівень управління (1, 2, 3 – цифрові регулятори, індикатори, реєстратори)

II – другий рівень управління (4 – ПЕОМ)

Рис. 4.1. Структурна схема автоматичної системи керування компресорною установкою 2ВМ-50/8)

4.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації

На сучасному етапі розвитку виробництва перспективним є впровадження комплексної автоматизації, тобто такої, при якій автоматизовані як основні, так і допоміжні процеси, а управління технологічним процесом здійснюється централізовано з операторної. Комплексна система автоматизації дозволяє використовувати набагато меншу кількість обслуговуючого персоналу. Робота обслуговуючого персоналу зводиться до пуско-зупиночних операцій, періодичного зняття показів приладів і виведення установки з аварійного стану.

Прилади вибираються у відповідності із їх призначенням, (по функціональних ознакам, кількості точок вимірювання, відстані передачі показів і т. д.) метрологічними характеристиками і умовами експлуатації.

Виходячи із сказаного вище, у даному випадку використані наступні ЗА:

Давачі

Термоперетворювач опору мідний типу ТСМ-6114 100М



Термоперетворювач опору використовується для вимірювання температури гарячих газових і рідинних потоків в температурному діапазоні - 50 °С..+100 °С. Основні характеристики приладу:

- діапазон вимірювання температури -50 °С..+100 °С
- клас точності 0,25
- довжина погрузної частини 200 мм

Термоперетворювач опору мідний типу ТСМ-5070 100М



Термоперетворювач опору використовується для вимірювання температури гарячих газових і рідинних потоків в температурному діапазоні -

50⁰С..+200 ⁰С. Основні характеристики приладу:

- діапазон вимірювання температури -50⁰С..+200 ⁰С
- клас точності 0,25
- довжина погрузної частини 200мм

Термометр спеціальний вібростійкий рідинний типу СП-В



Термометр використовується для вимірювання температури гарячих газових і рідинних потоків в температурному діапазоні 0 ⁰С..+100 ⁰С у умовах підвищеної вібрації. Основні характеристики приладу:

- діапазон вимірювання температури 0 ⁰С..+100 ⁰С
- клас точності 0,5
- довжина погрузної частини 100 мм
- матеріал нижньої частини оправы – латунь
- термометрична рідина – гас

Технічний манометр типу МТП-160



Манометр використовується для вимірювання тиску неагресивних рідин

та газів. Основні характеристики приладу:

- діапазон вимірювання 0-1 МПа (0-600 кПа; 0-400 кПа)
- клас точності 1,5

Діафрагма камерна нормальна ДК2,5-150

Діафрагма камерна для витратомірів призначена для створення перепаду тиску при вимірюванні витрати рідин, газів чи пару по методу змінного перепаду тиску. Діафрагма виготовлена по ГОСТ 8.563.1-97. Основні характеристики:

- умовний діаметр $D_u = 150$ мм
- тиск у трубопроводі – від 0,6 до 2,5 МПа

Давач рівня ДУ-1, що поставляється в комплекті МТМ900



Давач призначений для перетворювання значення рівня рідкого (в тому числі в'язкого, неоднорідного, випадаючого в осад, високоагресивного і т. д.) середовища в сигнал постійного струму. Основні характеристики приладу:

- діапазон вимірювання 0-4 м
- клас точності 0,25
- двохпровідна схема підключення
- робочий діапазон температур $-30..+50^{\circ}\text{C}$
- степінь захисту корпусу IP65
- матеріал 12X18H10T

Первинні перетворювачі

Інноваційне реле тиску з дисплеєм DPC 8380 і DPS 8381

trafag
sensors controls



Інноваційні зміни реле тиску. Компанія Trafag випустила нове покоління електронних перетворювачів тиску з дисплеєм DPC 8380 і DPS 8381 (рис. 1.7). Параметризація перетворювачів виконується дуже легко і швидко, декількома натисканням кнопок, за допомогою смартфонів з підтримкою безпроводної мережі NFC на Android, в яких встановлено додаток «SensorMaster». Нові електронні перетворювачі тиску з дисплеєм DPC 8380 і DPS 8381 є ідеальним поєднанням датчика і перетворювача з дисплеєм, який показує тиск. Встановлення таких параметрів, як точка перемикання, вихідні функції, перемикання часу затримки і режимів індикації, здійснюється за допомогою меню безпосередньо на пристрої або за допомогою Android-смартфона і зберігається для майбутнього використання. Два релейних виходи (PNP) доповнені одним аналоговим, який може бути налаштований на струм або напругу відповідно до системних вимог. Межу вимірювання можна регулювати від 50% до 100% номінального діапазону. Для зручності монтажу, особливо в умовах обмеженого простору, дисплей і корпус з електричними з'єднаннями можуть повертатися незалежно один від одного на 335 ° / 343 °. Електричне з'єднання M12x1 з 4-х і 5-й полюсним роз'ємом надає можливість наступних конфігурацій виходів: 2 PNP і 1 аналоговий, 1 PNP і 1 аналоговий або 2 PNP. Крім того, електронні реле тиску DPC 8380 і DPS 8381 включають в себе реєстратор даних, чий вибір часу легко встановити за допомогою смартфона з підтримкою NFC. Через смартфон з підтримкою NFC дані можуть бути проаналізовані і експортовані.

Перетворювач тиску типу МТМ700ДИ



Перетворювач призначений для перетворювання тиску газоподібного неагресивного середовища в уніфікований сигнал постійного струму. Основні характеристики приладу:

- діапазон вимірювання 0-1 МПа (0-600 кПа; 0-400 кПа)
- клас точності 0,25
- двохпровідна схема підключення
- вихідний сигнал – 4..20 мА
- робочий діапазон температур -40..+60⁰С
- степінь захисту корпусу IP54

Перетворювач перепаду тиску типу Сапфир-22М-ДД-2110



Перетворювач забезпечує безперервне перетворення значення перепаду тиску газоподібного неагресивного середовища в уніфікований сигнал постійного струму для дистанційної передачі. Основні характеристики приладу:

- діапазон вимірювання 0-0,25 кПа
- клас точності 0,5
- двохпровідна схема підключення
- вихідний сигнал – 4..20 мА
- робочий діапазон температур -40..+60°C
- степінь захисту корпусу IP54

Перетворювач перепаду тиску типу Сапфир-22М-ДД-2151



Перетворювач забезпечує безперервне перетворення значення перепаду тиску газоподібного неагресивного середовища в уніфікований сигнал постійного струму для дистанційної передачі. Основні характеристики приладу:

- діапазон вимірювання 0-1 МПа
- клас точності 0,25
- двохпровідна схема підключення
- вихідний сигнал – 4..20 мА
- робочий діапазон температур -40..+60⁰С
- степiнь захисту корпусу IP54

Вторинні прилади

Вторинний показуючий і реєструючий прилад типу МТМ-РЭ-160-МК-10



Прилад призначений для накопичення (архівування) в енергонезалежній пам'яті, зберігання і відображення інформації про стан технологічного параметру, заданого сигналами термоелектричних перетворювачів, термометрів опору, сигналами постійного струму 0..5 мА, 0..20 мА, 4..20 мА по 16 незалежним, гальванічно розв'язаним каналам. Основні характеристики приладу:

- кількість каналів перетворення і архівування 16
- період реєстрації з ряду 1, 2, 10, 40 с.

- тип дисплею TFT (640x480), 10,4" (264 мм)
- глибина архіву по кожному каналу - не менше 1792000 точок
- збереження даних при відключенні живлення
- сигналізація досягнення вимірюваним параметром вставок чотирьох рівнів.
Сигналізація норми
- сигналізація аварійних станів (обрив давача і т. д.)
- іскробезпечні вхідні кола с маркуванням вибухозахисту "ExialIC"
- вхідні сигнали 0...5 мА, 0...20 мА, 4...20 мА
- клас точності 0,05
- гальванічне розділення вхідних кіл, кіл живлення і сигналізації
- вивід на повноколірний рідкокристалічний дисплей до 12 екранних форм.
Переключення екранних форм здійснюється з клавіатури приладу або циклічно
- зміст екранної форми: час і дата, графік зміни параметру, миттєве значення параметру в цифровому виді, стовпчикову діаграму одночасно по всім каналам. На дисплеї також відображаються типи первинних перетворювачів (типи и діапазони вхідних сигналів), діапазони вимірювання, типи вставок и їх значення, журнал аварійних спрацювань, збоїв
- програмування даних з лицьової панелі або за допомогою USB-флеш диска
- зв'язок із зовнішніми пристроями через інтерфейс RS485 (MODBUS-RTU Slave)
- роздрук и перегляд графіків і параметрів на персональному комп'ютері

Вторинний показуючий прилад типу МТМ310С



Прилад призначений для цифрової індикації значення технологічного

параметру, заданого сигналами термоелектричних перетворювачів, термометрів опору, сигналами постійного струму 0..5 мА, 0..20 мА, 4..20 мА, для цифрової індикації інтегрованого і миттєвого значення витрати і інтегрованого значення витрати за попередню годину. Основні характеристики приладу:

- кількість каналів 1
- гальванічне розділення входних кіл, кіл живлення і інтерфейсу RS-485
- цифрова індикація вимірюваного параметру і значень вставок світлодіодним індикатором
- сигналізація досягнення технологічним параметром вставок верхнього та нижнього рівня
- зв'язок із зовнішніми пристроями через інтерфейс RS485 (MODBUS-RTU Slave)
- програмування всіх параметрів з лицевої панелі приладу

Блок електронний БЭ-1, що поставляється в комплекті МТМ900

Прилад призначений для забезпечення автоматичного дистанційного вимірювання значення рівня рідкого (в тому числі в'язкого, неоднорідного, випадаючого в осад, високоагресивного і т. д.) середовища. Основні характеристики приладу:

- діапазон вимірювання 0-4 м
- гальванічне розділення входних кіл, кіл живлення і інтерфейсу RS-485
- цифрова індикація вимірюваного параметру на 4-розрядному дисплеї і значень вставок світлодіодним індикатором
- сигналізація досягнення технологічним параметром вставок верхнього та нижнього рівня
- зв'язок із зовнішніми пристроями через інтерфейс RS485 (MODBUS-RTU Slave)
- програмування всіх параметрів з лицевої панелі приладу

Регулятори

ПДД – регулятор електронний одноканальний типу МТМ620



Прилад призначений для автономного і комплексного використання в АСУТП для керування технологічними процесами і дозволяє забезпечити високу точність підтримки значення вимірюваного параметра.

Регулятор призначений для вимірювання і регулювання технологічного параметру по заданому закону, відображення вимірюваного параметру (зелений колір) і положення клапану та величини заданого значення параметру (червоний колір) на двох цифрових індикаторах. Регулятор формує вихідний аналоговий чи імпульсний сигнал керування зовнішнім виконавчим механізмом, забезпечуючи аналогове, імпульсне чи позиційне регулювання вхідного параметра по П, ПІ, ПД чи ПДД закону відповідно до заданої користувачем логіки роботи і параметрами регулювання.

Структура регулятора за допомогою конфігурації може бути змінена таким чином, що можуть бути вирішені наступні задачі регулювання:

- двопозиційного чи трьохпозиційного регулятора;
- ПДД-регулятора з аналоговим виходом чи ПДД-регулятора з імпульсним виходом із зовнішнім чи внутрішнім зворотним зв'язком за положенням виконавчого механізму;
- каскадні схеми регулювання;
- регулювання співвідношення двох величин;
- регулятори з внутрішнім чи зовнішнім зворотним зв'язком (кінцеві вимикачі);
- контури автоматичного регулювання з керуванням від ЕОМ;

- приладу ручного управління імпульсним виконавчим механізмом, з індикацією впливу, що задається, і індикацією реального значення положення виконавчого механізму;
- індикатора фізичних величин;
- задатчика функцій.

Регулятор МТМ620 конфігурується через передню панель приладу через гальванічно розділений інтерфейс RS-485 (протокол MODBUS), що також дозволяє використовувати прилад як контролер при роботі в сучасних мережах керування і збору інформації.

Параметри конфігурації регулятора зберігаються в енергонезалежній пам'яті і прилад здатний відновити виконання задач керування після переривання напруги живлення. Батарея резервного живлення не використовується.

Основні характеристики приладу:

- П/П/ПД/ПД-ШИМ регулятор
- режим статичної чи динамічної корекції параметра по другому параметру
- робота с давачами ТВР, ТІР, ТІІ, ТХА, ТХК, ТМК, ТНН, ТСС, ТСП (50П, 100П), ТСМ (50М, 100М), ТСН (100Н), гр21, гр23 Pt100, уніфікованими сигналами 0...5 мА, 0...20 мА, 4...20 мА
- клас точності 0,25
- визначення помилок роботи і причин несправності
- стабілізуюче і слідкуюче регулювання
- пряме і зворотне регулювання
- цифрове калібрування початку шкали и діапазону вимірювання
- зв'язок із зовнішніми пристроями через інтерфейс RS485 (MODBUS-RTU Slave)

Вторинні перетворювачі

Електропневматичний перетворювач МТМ810



Прилад призначений для неперервного перетворення уніфікованого сигналу постійного струму в уніфікований аналоговий пневматичний сигнал.

Основні характеристики приладу:

- вибухозахисне виконання "ОЕхіаІІСТ6"
- вхідні сигнали: 4..20мА (двохпровідна схема включення) ($R_{вх}=420 \text{ Ом}$)
- вихідний сигнал 20..100 кПа
- клас точності 0,5
- пневматичне живлення – повітря тиском 140 кПа
- робочий діапазон температур +5..+50 °С
- степінь захисту корпусу IP54

Регулюючі органи

Регулюючий орган РК701С040РНЗУ

Регулюючий орган призначений для збільшення чи зменшення потоку рідини або газу шляхом зміни прохідного отвору. Основні характеристики приладу:

- робочий діапазон температур -40..+60 °С
- вхідний сигнал - уніфікований аналоговий пневматичний сигнал 20..100 кПа.

Функціональні блоки

Блок перетворення інтерфейсів типу МТМ4000F



Блок призначений для організації обміну інформацією по одному каналу послідовного зв'язку. Перетворює сигнали інтерфейсу RS-232 в сигнали інтерфейсу RS-485. Основні характеристики приладу:

- кількість каналів перетворення 1
- гальванічна ізоляція – трьохрівнева (по входу, виходу, живленню)
- світодіодна індикація стану: живлення, прийому і передачі даних
- робочий діапазон температур +5..+50⁰C

Характеристики інтерфейсу RS-232:

- швидкість передачі даних 50-115200 біт/с
- режим FullDuplex
- підключення лінії RxD, TxD RTS, CTS, DTR, DSR, GND
- тип обладнання: термінальне DTE, зв'язку DCE

Характеристики інтерфейсу RS-485:

- тип приймачів-передавачів інтерфейсу: диференціальний, потенціальний
- тип лінії зв'язку: 2-х провідна
- кількість вузлів: 32 на одному сегменті мережі
- швидкість обміну до 1Мбіт/с
- кількість вузлів в мережі: 255 (250 з врахуванням магістральних підсилювачів)
- режими роботи: дуплексний, напівдуплексний
- режим автоматичного визначення напрямку передачі даних
- режими управління прийомом-передачею: по сигналу RTS (CTS, DTR, DSR)

Блок пристроїв оперативної сигналізації типу БС-2-8-00 в комплекті з блоком БПС-2



Блок призначений для попередження оператора світловим і звуковим сигналами про відхилення контрольованих параметрів від норми по кожному каналу, реєстрації і зберігання часу спрацювання по каналам. Основні характеристики блоку БП-2-8-00:

- кількість входів – 8
- тип давачів, що підключаються – електроконтактні (типу «сухий контакт»), згідно ГОСТ 22782.5
- вибір типу давача по кожному входу – нормально закриті чи нормально відкриті
- установка режиму роботи «ПУСК» або «РОБОТА» з заданням в кожному режимі по кожному входу затримки на спрацювання вихідного ключа при спрацюванні вхідного контакту каналу від 0 до 255с (з дискретністю 1с)
- задання відповідності входів-виходів в межах одного блоку BC-2-8
- живлення від блоку БПС-2

Основні характеристики блоку БПС-2:

- загальна кількість входів – від 9 до 65
- задання пульсуючої світлової і звукової сигналізації по кожному каналу
- програмування всіх параметрів приладу з передньої панелі або через інтерфейс RS-485
- світлова сигналізація по кожному каналу на лицьовій панелі блоку сигналізації і виносними лампами на щиті оператора (мнемосхемі, ТС-2-8)

- загальна звукова сигналізація, що скидається з пульта оператора чи передньої панелі блоку
- перевірка роботи блоку сигналізації (кнопка «ТЕСТ»)
- виносний (до 50м) пульт дистанційного управління з кнопками управління («ТЕСТ», «КВИТАЦИЯ») та звуковою сигналізацією
- зв'язок із зовнішніми пристроями через інтерфейс RS-485 (протокол MODBUS-RTU Slave)

Табло світлове типу ТС-2-8



Табло призначене для світлової попереджувальної сигналізації як при роботі з блоками БС-1-4 чи БС-2-8, так і в автономному режимі. Основні характеристики:

- табло має 8 світлодіодних комірки 50x40 мм
- пояснюючі написи можуть бути надруковані на папері
- монтаж щитовий
- можливий монтаж в 2 вертикальних чи горизонтальних ряди

4.2 Розробка програмного забезпечення SCADA-системи

Щоб успішно керувати виробництвом потрібно мати постійний доступ до інформації про хід технологічного процесу і вчасно здійснювати необхідні керуючі впливи. Усі ці функції можна реалізувати як єдину систему збору і обробки даних. Це так звані SCADA – системи (Supervisorcontrolanddataacquisition). Така система є основним джерелом інформації про хід технологічного процесу. SCADA система ставить перед собою задачу надати розроблювачам АСУ ТП максимально зручне середовище

для побудови і експлуатації системи. Такими програмними продуктами є Ultralogic, Genie, GraphWorX32, TraceMode та інші.

Пакет GENIE (в перекладі – «джин»), розроблений фірмою Advantech, є інструментальним засобом для створення програмного забезпечення збору даних і оперативного диспетчерського управління (SCADA), що працює в середовищі MS Windows. GENIE може використовуватись для розробки розподілених АСУ ТП масштабу технологічної ділянки чи цеху, з початковим чи середнім рівнем складності. Починаючи з версії GENIE 3.0, даний пакет повністю локалізований на російську мову, де переведені всі діалоги, команди, файли підказок та документація. Системи, розроблені на GENIE, працюють в енергетиці, газовій, нафтовій, хімічній та інших галузях народного господарства.

GENIE автоматизує найбільш складні етапи розробки систем управління і збору даних:

- забезпечує обмін інформації з СУБД рівня керування підприємством, створення АРМ диспетчерів і операторів;
- прийом даних і управління технологічними процесами.

Пакет GENIE складається з двох основних програмних модулів: Построительстратегий GENIE (Genie.exe) та Исполнительнаясреда GENIE (GWRun.exe). Побудова стратегій використовується для проектування і тестування проектів, що називаються стратегіями, а Середовище виконання – тільки для виконання стратегій.

Крім того, в складі пакету є програма установки та настройки пристроїв вводу/виводу, а також набір динамічно компонованих бібліотек (DLL), що виконують різні функції в процесі розробки і виконання програмного забезпечення SCADA.

GENIE має модульно-орієнтовану, відкриту інтегровану архітектуру. Відкритість архітектури дозволяє легко реалізовувати взаємодію GENIE з іншими програмами для спільного доступу до даних під час виконання стратегій.

Результат розробки програми в GENIE зберігається в файлі стратегії. Файл стратегії (з розширенням .GNI) представляє собою двійковий файл, що містить всю інформацію останнього сеансу редагування. Стратегія – це сукупність одної чи кількох задач разом з одною чи більшою кількістю екранних форм, а також одним основним сценарієм. Задача, екранна форма і основний сценарій є трьома основними елементами, що використовуються при побудові стратегії. Найпростіша стратегія має одну задачу з одною екранною формою і не має основного сценарію.

Задача представляє собою набір функціональних блоків, що відображаються у вікні задачі у виді піктограм. Екранна форма представляє собою набір елементів відображення і елементів управління. З'єднання між функціональними блоками в процесі розробки стратегії можуть встановлюватись за допомогою видимих і невидимих зв'язків. З'єднання між піктограмами блоків є видимими у вікні Редактора задач. Таке з'єднання називається провідником, оскільки по своєму призначенню воно аналогічне провідникам в електричних схемах. З'єднання між піктограмами блока і елементами відображення невидимі. Тому вони називаються зв'язками.

Редактор задач призначений для реалізації прикладних алгоритмів створеної системи. GENIE має велику кількість встроєних стандартних функціональних блоків для реалізації різних алгоритмів збору даних і управління. Розробка системи зводиться до розміщення користувачем функціональних блоків у вікні задачі і встановленню між ними зв'язків, що відповідають алгоритму обробки даних. GENIE забезпечує можливість розробки і одночасного виконання до 8 задач. Таким чином складна системи може бути розділена на декілька незалежних одночасно виконуваних задач, що не лише спрощеє процес розробки, а й також збільшує продуктивність при виконанні задач.

Редактор форм відображення призначений для створення динамічних екранних форм відображення, зв'язаних з виконуваною стратегією збору даних і управління. При необхідності створення графічного інтерфейсу оператора Редактор форм відображення забезпечує можливість розробки зручних для

сприйняття екранних форм в найкоротші строки шляхом використання включених в пакет стандартних елементів відображення і управління. Крім того, графічний інтерфейс оператора може бути вдосконалений з допомогою спеціальних інструментів малювання та елементів відображення, визначених користувачем.

Редактор сценаріїв (ScriptDesigner) призначений для управління задачами, обчисленнями і аналізом даних в процесі виконання стратегії. Даний потужний засіб створення сценарних процедур, сумісний з Microsoft VisualBasic, ліцензовано в компанії SummitSoftwareInc. Бейсік-сценарії є найважливішим компонентом пакету GENIE, що забезпечує можливість розробки спеціалізованих фрагментів стратегії на мові програмування високого рівня.

Редактор звітів призначений для розробки і генерування звітів. Редактор звітів пакету GENIE надає розробнику на етапі проектування, а користувачеві - в процесі експлуатації системи можливість визначати зміст звіту, сформованого на основі зібраних даних і дій оператора, з подальшим автоматичним роздруком у визначений час. Засоби, що входять до редактора звітів, можуть бути використані для вибору і друку звітів вручну в потрібний момент часу. Редактор звітів пакету GENIE забезпечує виконання п'яти основних функцій: збір даних, конфігурування формату звітів, складання розкладу автоматичного друку звітів, генерацію звіту подій і генерацію звіту тривоги.

Створена стратегія управління компресорною установкою 2BM-50/8 із назвою Compressor.GNI включає в себе одну задачу TASK1 і дві форми відображення DISP1 та DISP2. На рис. 4.2 відображено блок-схему задачі, яка забезпечує контроль і регулювання тиску в ресівері P-1.

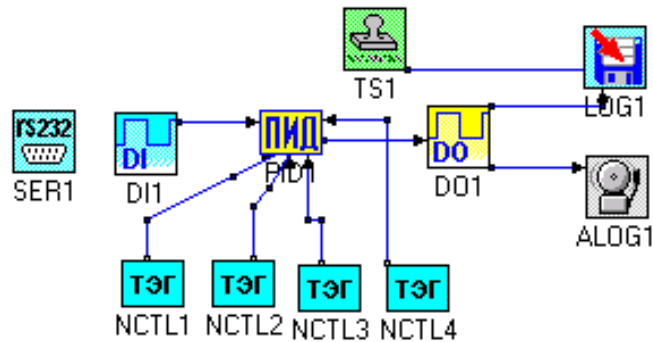


Рис. 4.2. Блок-схема задачі контролю та регулювання тиску в редакторі задач TASK1

Здійснюється задача наступним чином:

Блок обміну даних через послідовний порт SER1 визначає номер COM-порту для зв'язку з мережею, параметри підключення та рядок ініціалізації. Блок дискретного вводу DI1 визначає, який саме прилад буде підключений. Блок ПІД-регулювання PID1 визначає параметри налаштування регулятора та зворотній зв'язок. Параметри налаштування беруться з тегів NCTL1-4. В ці теги необхідні дані вводяться диспетчером з форми DISP1 (рис 4.3). Блок дискретного виводу визначає параметри виводу інформації. Підключені до нього блок архівації даних LOG1 та блок архіву тривог ALOG1 забезпечуються архівацію даних. Блок мітки часу TS1 забезпечує роздрук даних в певний час.

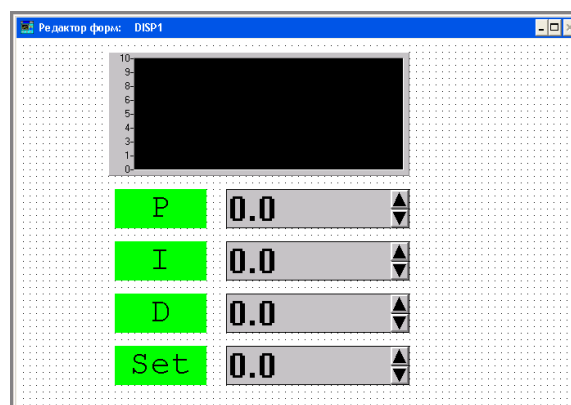


Рис. 4.3. Форма для управління параметрами налаштування регулятора в редакторі форм DISP1

Основним завданням даної стратегії є відображення на дисплеї ПЕОМ диспетчера повної картини ходу технологічного процесу. Мнемосхема компресорної установки в повноекранному вигляді (форма DISP2) приведена в презентації. Вона забезпечує відображення технологічного процесу та значень технологічних параметрів. Диспетчер може змінити значення вставок сигналізації та захисту технологічних параметрів, клацнувши по потрібній піктограмі приладу.

Висновки до розділу 4

В даному розділі магістерської роботи проведено вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації, які необхідні для експлуатації розглянутого об'єкту, виходячи з умов протікання технологічного процесу. За допомогою пакету GENIE розроблено програмне забезпечення для SCADA-системи управління компресорною установкою.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В даній магістерській роботі проведений аналіз технологічного процесу отримання стиснутого повітря, з якого випливає, що суть процесу полягає в стисненні газу (в даному випадку – повітря) до певного тиску, у відповідності до потужності компресорної установки, призначення якої полягає у виробленні стиснутого повітря і забезпечення постійного його тиску.

Зроблено та обґрунтовано вибір об'єкту керування з подальшим створенням для нього оптимальної системи автоматичного керування. Сформовано мету керування та поставлено вимоги до створюваної систем керування. Проведено аналіз існуючих технологій регулювання тиску.

Розроблена математична модель вибраного об'єкта керування в статичному та динамічному режимах, а саме повітряного ресиверу, як для статичного, так і динамічного режиму. Динамічні властивості вибраного об'єкту відповідають аперіодичній ланці. Знайдено передавальну функцію об'єкту моделювання та обчислено постійну часу і коефіцієнт підсилення.

На основі математичної моделі технологічного процесу отримання стисненого повітря проведений синтез одноконтурної системи керування. Досліджена система з різними алгоритмами керування: П, ПІ, ПІД, а також проведений синтез оптимальної системи керування на основі рівняння Ріккати. Проведено дослідження отриманої системи керування на стійкість, визначено якісні показники синтезованої системи автоматичного керування.

Проведено вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації, які необхідні для експлуатації розглянутого об'єкту, виходячи з умов протікання технологічного процесу.

В розділі „Охорона праці” дано аналіз потенційної небезпеки і шкідливості виробничої сфери. До джерел небезпеки віднесено електрообладнання, посудини, що працюють під тиском, трубопровід під тиском, електродвигун. Забезпечення нормальних умов праці досягається за допомогою штучного

освітлення, наявності побутових приміщень, достатньої кількості засобів індивідуального захисту.

Розроблена SCADA-система дозволяє якісно і оперативно контролювати та управляти ходом всього технологічного процесу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1 Технологічний регламент вакуумно-компресорної станції на ВАТ “ДЗАК”

2 Горбійчук М.І. Моделювання об’єктів та систем керування в нафтовій і газовій промисловості. В 3-х частинах. Навчальний посібник. – част. 1, Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 1999. – 150 с.; част. 2, Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 1999. – 226 с.; част. 1, Івано-Франківськ: Факел, 1999. С.235.

3 Методичні вказівки для самостійної роботи студентів по курсу “Моделювання на ЕОМ об’єктів і систем керування” для студентів спеціальності 0639, 0634, 21.03. – Івано-Франківськ, 2017. С.60.

4 Методичні вказівки до практичних занять з курсу “Оптимізація та оптимальне керування технологічними процесами” для студентів спеціальності 7.092501. – Івано-Франківськ, 1995. С.45.

5 Compernelle, Tine & Witters, Nele & Van Passel, Steven & Thewys, Theo, 2011. "Analyzing a self-managed CHP system for greenhouse cultivation as a profitable way to reduce CO2-emissions," Energy, Elsevier, vol. 36(4), pages 1940-1947.

Режим
доступу:
<https://uhdSPACE.uhasselt.be/dSPACE/bitstream/1942/11943/1/compernelle%201.pdf>

6. Silva R.N. Adaptive regulation of super-heated steam temperature: a case study in an industrial boiler [Текст] / R.N. Silva et al. // Control Engineering Practice. – 2020. – Vol. 8. - Issue 12. – P. 1405-1415.

7. Bova, S., Codara, P., Maccari, D., Marra, V. A., Logical analysis of Mamdani-type fuzzy inference, I theoretical bases, IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona, pp. 1-8, 2021.

8 Горбійчук М.І. Математичне моделювання на ЕОМ технологічних об’єктів: навч. посіб. - Івано-Франківськ: Факел, 2001. С.240.

9 Методичні вказівки і завдання для індивідуальної підготовки студентів по курсах "Проектування, монтаж і експлуатація систем автоматизації" та "Автоматизація технологічних процесів" (Надійність механічних пристроїв автоматики та автоматичних систем керування), 2013. С.30.

- 10 Теорія систем керування: підручник / В. І. Корнієнко, О. Ю. Гусєв, О. В. Герасіна, В. П. Щокін. Дніпро: НГУ, 2017. С.497.
- 11 Шаруда, В. Г. Дослідницька частина в кваліфікаційній роботі магістра [Текст]: навч. посіб. / В. Г. Шаруда, В. В. Ткачов, А. В. Бубліков; Держ. ВНЗ "Нац. гірн. ун-т". - Дніпропетровськ: НГУ, 2015. С. 489.
- 12 Critten DL, Bailey VJ. A review of greenhouse engineering developments during the 1990s. *Agricultural and Forest Meteorology* 2002;122:1e22.
- 13 Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the Council of 11 February 2004.
- 14 Семенцов Г.Н. Теорія автоматичного управління (нелінійні та дискретні системи): навч. посіб. / Г.Н.Семенцов, І.І.Чигур. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2014. С. 96.
- 15 Лагойда А.І., Шавранський М.В., Когутяк М.І., Борин В.С., Чигур І.І. «Магістерська робота»: Методичні вказівки. – Івано-Франківськ: Факел, 2024. – 30 с.
- 16 Boryn V.S., Slipkevych E.A. Construction of a mathematical model for controlling the technological process of obtaining compressed air. Modern aspects of modernization of science: status, problems, development trends. Materials of the 63th International Scientific and Practical Conference. December 7, 2025, Olomouc (Czech Republic). Pp. 236-239. DOI: <https://doi.org/10.52058/63>