

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП-46.00.00.000 ПЗ

група АКП_з -22-1

Андрій Синяк

2026 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

Синяк Андрій Михайлович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.515.52
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Синтез системи автоматичного керування газоперекачувальним
(назва роботи)

агрегатом із використанням ПІД-регулювання

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

доцент О. В. Кучмистенко
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент М. В. Шавранський
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП₃-22-1 А. М. Синяк
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Науковий керівник

асистент Г. Г. Зварич
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Допущено до захисту Завідуючий кафедри

доцент А. І. Лагойда
(посада) (підпис) (дата) (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

А.І. Лагойда.

« » 20 року

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

Синяку Андрію Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Синтез системи автоматичного керування
газоперекачувальним агрегатом із використанням ПІД-регулювання.

керівник роботи Зварич Галина Григорівна.

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «29» квітня 2026 року № 38/8

2. Строк подання студентом роботи 14.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: матеріали переддипломої практики,
технічна література, інтернет-ресурс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз алгоритмів керування та вибір регуляторів, для
автоматичного керування неперервними технологічними процесами. 2. Розробка
структурних рішень і методів керування газоперекачувальним агрегатом.

3. Дослідження розробленої системи автоматичного керування.

4. Експериментальні оцінювання ефективності функціонування розробленої
САК. Загальні висновки. Перелік посилань на джерела.

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

1. БР.АКП-46.00.00.001 – Результати апроксимації.

2. БР.АКП-46.00.00.002 – Функціональна схема. Алгоритмічна структура.

3. БР.АКП-73.00.00.003 – Дослідження САК ГПА на стійкість.

4. БР.АКП-46.00.00.004 – Перехідні та частотні характеристики САК.

5. БР.АКП-46.00.00.005 – Синтез моделі САК.

6. БР.АКП-46.00.00.006 – Результати параметричної оптимізації.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз алгоритмів керування та вибір регуляторів, для автоматичного керування неперервними технологічними процесами.	23.04.2026	
2	Розробка структурних рішень і методів керування газоперекачувальним агрегатом.	03.05.2026	
3	Дослідження розробленої системи автоматичного керування.	25.05.2026	
4	Експериментальне оцінювання ефективності функціонування розробленої САК	03.06.2026	
5	Оформлення бакалаврської роботи	13.06.2026	

Студент _____
(підпис)

А. М. Синяк _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Г. Г. Зварич _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 59 сторінок, 23 рисунків, 1 таблицю, 7 літературних джерел.

Тема: «Синтез системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом із використанням ПД-регулювання».

Метою роботи є синтез системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом із використанням ПД-регулятора для забезпечення стабільної та енергоефективної роботи технологічного процесу транспортування газу.

Об'єктом дослідження процес роботи газоперекачувального агрегату у газотранспортній системі.

Предметом дослідження є методи та засоби автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом на основі ПД-регулювання.

Результати роботи. Виконано дослідження технологічного процесу підвищення тиску природного газу та проаналізовано особливості роботи газоперекачувальних агрегатів у складі газотранспортної системи. Розглянуто основні вимоги до систем автоматизованого керування та обґрунтовано використання ПД-регулювання для підвищення надійності обладнання й зменшення енергетичних витрат. Проведено аналіз впливу параметрів регулятора на динамічні характеристики системи із застосуванням методу Циглера–Нікольса, на основі чого визначено раціональні параметри налаштування за частотними показниками.

Створено модель системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом у середовищі MATLAB Simulink та виконано її експериментальне дослідження, що дозволило здійснити параметричну оптимізацію й отримати оптимальні налаштування регулятора.

Ключові слова: система автоматичного керування; налаштування регулятора; процес стиснення газу; частотні характеристики; функція передачі.

ANNOTATION

Bachelor's thesis contains: 59 pages, 23 figures, 1 table, 7 references.

Topic: "Synthesis of an automatic control system for a gas pumping unit using PID control".

The purpose of the work is to synthesize an automatic control system for a gas pumping unit using a PID controller to ensure stable and energy-efficient operation of the technological process of gas transportation.

The object of the study is the process of operation of a gas pumping unit in a gas transportation system.

The subject of the study is methods and means of automatic control of a gas pumping unit based on PID control.

Results of the work. The technological process of increasing the pressure of natural gas was studied and the features of the operation of gas pumping units as part of a gas transportation system were analyzed. The main requirements for automated control systems were considered and the use of PID control was justified to increase the reliability of equipment and reduce energy costs. The influence of the controller parameters on the dynamic characteristics of the system was analyzed using the Ziegler–Nichols method, based on which rational tuning parameters were determined by frequency indicators.

A model of the automatic control system of the gas pumping unit was created in the MATLAB Simulink environment and its experimental study was performed, which allowed parametric optimization and obtaining optimal controller settings.

Keywords: automatic control system; controller settings; gas compression process; frequency characteristics; transfer function.

З М І С Т

ст.

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ТА ВИБІР РЕГУЛЯТОРІВ, ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НЕПЕРЕРВНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ.....	10
1.1. Підходи до керування ГПА та проблеми реалізації систем автоматичного керування.....	10
1.2. Розроблення функціонально орієнтованих підходів до керування ГПА.....	12
Висновок до розділу.....	17
2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНИХ РІШЕНЬ І МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИМ АГРЕГАТОМ.....	18
2.1. Розробка динамічної моделі процесу стиснення газу	18
2.2. Створення функціональної структури САК	25
2.3. Формування алгоритмічної структури САК.....	28
2.4. Дослідження стійкості та оцінювання якісних характеристик розробленої системи.....	30
Висновки до розділу.....	38
3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	39
3.1. Дослідження впливу параметрів налаштування ПД-регулятора на швидкодію системи керування методом Ціглера-Нікольса	39
3.2. Дослідження перехідної характеристики замкнутої одноконтурної системи за каналом “завдання-вихід”	41

					БР.АКП ₃ - 46.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Синтез системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом із використанням ПД-регулювання	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Синяк А.М.						
Перевір.		Зварич Г.Г.					6	59
Реценз.		Шавранський М.В				ІФНТУНГ АКПз-22-1		
Н. Контр.		Кучмистенко О.В						
Затверд.		Лагойда А.І.						

3.3. Визначення оптимальних параметрів налаштування регулятора.....	42
Висновки до розділу.....	46

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ

АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	47
--------------------------------------	-----------

4.1.Представлення експериментальної моделі САК.....	47
---	----

4.2. Методика досліджень та формування структурної схеми САК.....	53
---	----

Висновки до розділу.....	57
--------------------------	----

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	58
-------------------------------	-----------

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	59
---	-----------

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АФХ – амплітудно-фазова характеристика

ГПА – газоперекачувальний агрегат.

ВК – вимірювальний канал.

ВН – відцентровий насос.

ЗП – задаючий пристрій.

ЕП – елемент порівняння.

КП – керуючий пристрій.

МГ – магістральні трубопроводи.

ПД – пропорційно-диференціальний.

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний.

РО – регулюючий орган.

УОР – узагальнений об'єкт регулювання.

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність проблеми. Сучасна газотранспортна система (ГТС) становить собою стратегічно важливий елемент енергетичної інфраструктури держави, ефективність та експлуатаційна надійність якого критично залежать від стабільності функціонування компресорних станцій та газоперекачувальних агрегатів (ГПА). Основною технологічною функцією ГПА є забезпечення безперебійного транспортування природного газу магістральними газопроводами шляхом компенсації втрат енергії потоку та підтримання регламентного рівня тиску в магістралі. У зв'язку з цим до локальних систем автоматичного керування (САК) даним обладнанням висуваються вимоги щодо статичної точності, динамічної швидкодії, стійкості та мінімізації питомих енерговитрат.

У процесі промислової експлуатації ГПА зазнають безперервного впливу комплексу суттєвих координатних і параметричних збурень, обумовлених нестаціонарністю режимів роботи ГТС, коливаннями фізико-хімічних властивостей газового середовища та флуктуаціями навантаження на приводні двигуни й нагнітачі. За умов високої інерційності та нелінійності об'єкта регулювання, впровадження класичних алгоритмів пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) керування є науково та інженерно обґрунтованим рішенням. Необхідність адаптації САК ГПА до змінних режимів магістрального транспорту, підвищення загальної енергоефективності компресорного устаткування та подовження міжремонтного ресурсу шляхом параметричного синтезу й оптимізації налаштувань регулювальних пристроїв обумовлюють актуальність теми бакалаврської роботи.

Метою роботи є синтез системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом на базі ПІД-закону регулювання для забезпечення стабілізації та інтенсифікації технологічних режимів компримування та транспортування природного газу із заданими показниками динамічної якості.

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'єктом дослідження є технологічний процес функціонування газоперекачувального агрегату в структурі магістрального транспортування газу.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та програмно-технічні засоби автоматичного керування режимами роботи ГПА на основі триканальних законів регулювання.

Методи дослідження: методи математичного й комп'ютерного моделювання для ідентифікації та дослідження динамічних властивостей системи; методи числової параметричної оптимізації для раціонального коригування коефіцієнтів налаштування регулятора; частотні й алгебраїчні методи аналізу (критерії Гурвіца та Михайлова) для комплексного оцінювання стійкості та запасів стійкості замкненої системи; інструментарій комп'ютерного моделювання в інтегрованому інженерному середовищі Matlab/Simulink.

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ТА ВИБІР РЕГУЛЯТОРІВ, ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НЕПЕРЕРВНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Автоматизоване керування неперервними технологічними процесами займає важливе місце у сучасних промислових системах. У газотранспортній, енергетичній, хімічній та нафтогазовій галузях ефективність функціонування обладнання значною мірою визначається якістю роботи систем автоматичного керування. Основним призначенням таких систем є забезпечення стабільного режиму роботи технологічного обладнання, підтримання параметрів процесу у допустимих межах та компенсація впливу зовнішніх і внутрішніх збурень.

Під алгоритмом керування розуміють послідовність математичних і логічних операцій, відповідно до яких формується керуючий вплив на об'єкт. Вибір алгоритму залежить від характеристик технологічного процесу, ступеня інерційності об'єкта, вимог до точності регулювання, швидкодії системи та допустимого рівня похибки..

1.1 Підходи до керування ГПА та проблеми реалізації систем автоматичного керування

Вибір залежить від динамічних характеристик технологічного процесу, вимог до точності регулювання, швидкодії системи та допустимих відхилень параметрів. У системах автоматизації реалізуються принципи аварійного захисту та діагностики, що забезпечують виявлення небезпечних режимів роботи й автоматичне вимкнення обладнання у разі виникнення аварійної ситуації. Розглянемо декілька алгоритмів:

1) Алгоритм плавного пуску та зупинки.

Процеси запуску і вимкнення газоперекачувального агрегату супроводжуються значними механічними та тепловими навантаженнями, які можуть негативно впливати на технічний стан обладнання. З цієї причини застосовуються алгоритми поетапного пуску та зупинки.

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перед запуском здійснюється автоматична перевірка допоміжних систем, зокрема системи змащування, охолодження та подачі газу. Після цього виконується поступове збільшення частоти обертання приводу із контролем температурних параметрів, рівня вібрації та тиску.

Виведення агрегату з експлуатації виконується у зворотній послідовності шляхом плавного зниження навантаження. Такий підхід дозволяє зменшити ризик виникнення гідродинамічних ударів і термічних деформацій елементів обладнання.

2) Алгоритм обмеження навантаження.

Для запобігання роботі ГПА у небезпечних режимах застосовують алгоритми контролю граничних параметрів. У процесі функціонування системи безперервно контролюються температура, тиск, потужність приводу та крутний момент. У випадку перевищення допустимих значень формується керуючий сигнал, який забезпечує зменшення навантаження агрегату шляхом зміни подачі палива або корекції положення регулюючих органів. Реалізація такого алгоритму дозволяє забезпечити роботу обладнання у межах допустимих експлуатаційних режимів.

3) Алгоритм розподілу навантаження між агрегатами.

Основою такого підходу це оптимальне співвідношення продуктивності агрегатів з урахуванням їх технічного стану, коефіцієнта корисної дії та поточного навантаження. Координаційний регулятор формує відповідні сигнали для локальних контурів керування кожного агрегату, що забезпечує зменшення сумарних енергетичних витрат і рівномірний розподіл ресурсу обладнання.

Таким чином, розроблення систем автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами є складною технічною задачею, яка потребує врахування значної кількості факторів, пов'язаних із динамікою об'єкта, умовами експлуатації та вимогами до безпечності роботи. Використання сучасних алгоритмів керування дозволяє підвищити ефективність функціонування ГПА та забезпечити стабільність роботи газотранспортної системи.

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При створенні підходів керування необхідно враховувати обмеження виконавчих механізмів, інерційність технологічних процесів та можливість виникнення аварійних ситуацій. Тому сучасні алгоритми повинні забезпечувати не лише високу точність регулювання, але й надійність, швидкодію та безпечність роботи обладнання.

1.2 Розроблення функціонально орієнтованих підходів до керування ГПА

Побудова адаптованих алгоритмів керування газоперекачувальними агрегатами базується на використанні математичних моделей, які описують взаємозв'язок між основними параметрами технологічного процесу. До таких параметрів належать тиск, температура, витрата природного газу та частота обертання ротора. Наявність адекватної математичної моделі дає змогу досліджувати динамічні властивості системи, оцінювати її стійкість та визначати оптимальні параметри регуляторів для різних режимів роботи.

Одним із основних напрямів автоматизації є реалізація підходів до регулювання продуктивності ГПА. Такі алгоритми забезпечують підтримання необхідного тиску та витрати газу шляхом зміни швидкості обертання приводу або положення регулюючих органів.

У промислових системах автоматизації найбільш поширеними є такі закони регулювання:

Пропорційний закон регулювання (П)

Пропорційний регулятор формує керуючий сигнал, величина якого прямо пропорційна значенню помилки регулювання. Основною перевагою П-регулятора є простота реалізації та висока швидкодія. Разом із тим використання такого регулятора часто супроводжується появою статичної похибки, що реалізується статичним або пропорційним регулятором

Пропорційний регулятор (надалі П-регулятор) є найпростішою у підсилювальній ланці. Вихідний сигнал П-регулятора $u(t)$ пропорційний помилці регулювання $e(t)$.

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (1.1)$$

де K_p - коефіцієнт підсилення регулятора

Передавальна функція П-регулятора:

$$W_p(p) = K_p \quad (1.2)$$

Перехідна характеристика:

$$h(t) = K_p \cdot 1(t) \quad (1.3)$$

Зазвичай на практиці підсилювальні властивості П-регулятора характеризують наступними величинами: межа пропорційності $d = 1/K_p$ - величина, зворотна K_p , межа пропорційності, виражена у відсотках $D = d \cdot 100\% = 100\% / K_p$

На рис. 1.1 зображено перехідну і амплітудно-фазову характеристики П-регулятора

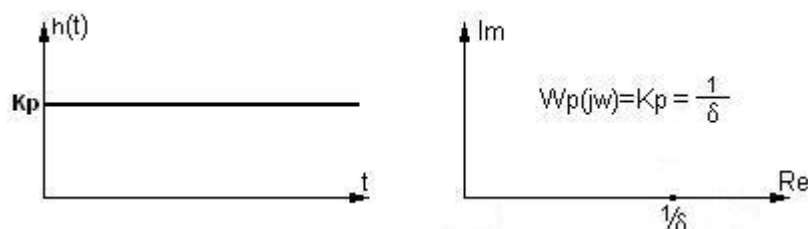


Рисунок 1.1– Перехідна і амплітудно-фазова характеристики П-регулятора

Основними перевагами П-регуляторів є їх відносна простота і мала кількість елементів установки.

2. Інтегральний закон регулювання (І), що реалізовується астатичним або І-регулятором з параметром налаштування K_0 .

І-регуляторами вважають такі, у яких встановлене значення регульованого параметра не залежить від навантаження об'єкта. Після того як параметр відхилився від заданого значення, наприклад у бік підвищення, астатичними регулятор перестає враховувати величину відхилення параметра. Якщо регульований параметр знижується, то регулюючий орган все одно буде поступово закриватися. Зміна напрямку дії регулюючого органу станеться тоді, коли параметр, змінюючись, переходить через задане значення.

На відміну від статичного регулятора швидкість переміщення регулюючого органу астатичними пропорційна не швидкості зміни, а величиною відхилення регульованого параметра. Прикладом регулятора з постійною швидкістю переміщення регулюючого органу може служити контактний термометр, що включає електродвигун, який приводить в дію якої-небудь вентиля або затвор. Якщо температура відхилиться від заданого значення, електродвигун буде забезпечувати обертання вентиля до тих пір, поки температура не прийме заданого значення.

На рис. 1.2 зображено перехідну й амплітудно-фазову характеристики І-регулятора.

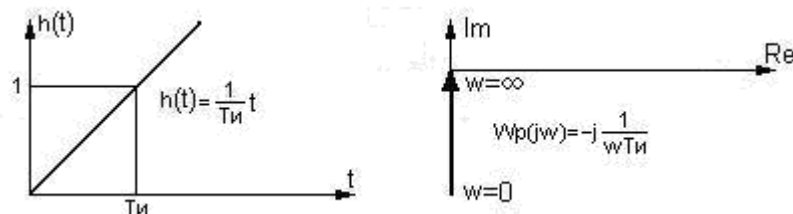


Рисунок 1.2 – Перехідна й амплітудно-фазова характеристики І-регулятора

Передавальна функція І-регулятора:

$$W_p(p) = K_0 / p \quad (1.4)$$

де K_0 - коефіцієнт підсилення регулятора або по іншому: $du / dt = K_0 e(t)$, тобто швидкість зміни виходу І-регулятора (швидкість переміщення регулюючого органу) пропорційна помилці регулювання.

3) Пропорційно-інтегральний закон регулювання (ПІ), реалізовується ізодромним або ПІ-регулятором з параметрами налаштування K_1 :

$$u = K_1 \varepsilon + K_2 \int \varepsilon dt = K_1 \left(\varepsilon + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon dt \right) \quad (1.5)$$

Ізодромні ПІ-регулятори застосовують при швидко і різко мінливих навантаженнях і при регулюванні об'єктів як з самовирівнювання, так і без нього, з малим коефіцієнтом ємності.

На рис. 1.3 зображено перехідну і амплітудно-фазову характеристики ПІ-регулятора

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

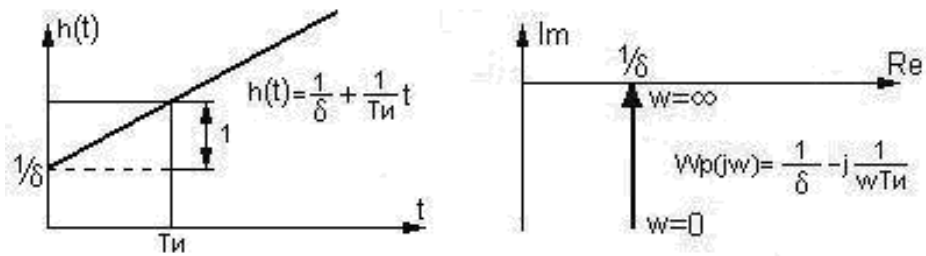


Рисунок 1.3 – Перехідна і амплітудно-фазова характеристики ПІ-регулятора

4) Пропорційно-інтегрально-диференціальний закон регулювання (ПІД):

$$u = K_1 \varepsilon + K_2 \int \varepsilon dt + K_3 \frac{d\varepsilon}{dt} = K_1 \left(\varepsilon + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon dt + T_p \frac{d\varepsilon}{dt} \right), \quad (1.6)$$

Що реалізовується ізодромним регулятором з передуванням або ПІД-регулятором з параметрами налаштування K_1 .

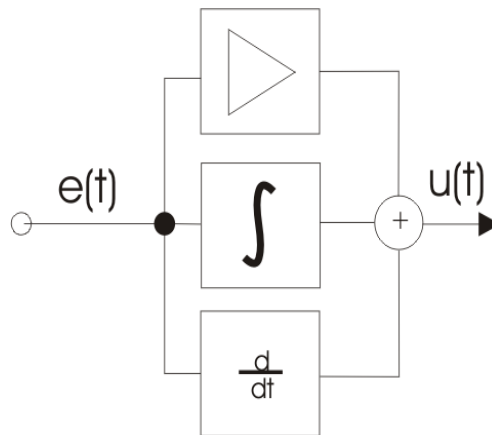


Рисунок 1.3 – Структурна схема ПІД-регулятора

ПІД-регулятор - це паралельно з'єднані П-, І-і Д-ланки (рис 1.1). Вихідний сигнал ПІД-регулятора ($u(t)$) залежить від помилки регулювання ($e(t)$), від інтеграла від цієї помилки і від похідної від цієї помилки:

K_1 - коефіцієнт передачі пропорційної складової.

K_2 - коефіцієнт передачі інтегральної складової.

K_3 - коефіцієнт передачі диференціальної складової.

Передавальна функція ПД-регулятора:

$$W_p(s) = K_1 + K_0/s + K_2 \cdot s. \quad (1.7)$$

Підсилювальні властивості ПД-регулятора характеризують три параметри:

- 1) межа пропорційності $d = 1/K_1$ – величина, зворотна K_1 ;
- 2) час ізодрома $T_i = 1/K_2$ - величина, зворотна K_2 ;
- 3) постійна часу диференціювання $T_D = K_3$.

На рис. 1.4 зображено перехідну і амплітудно-фазову характеристики ПД-регулятора.

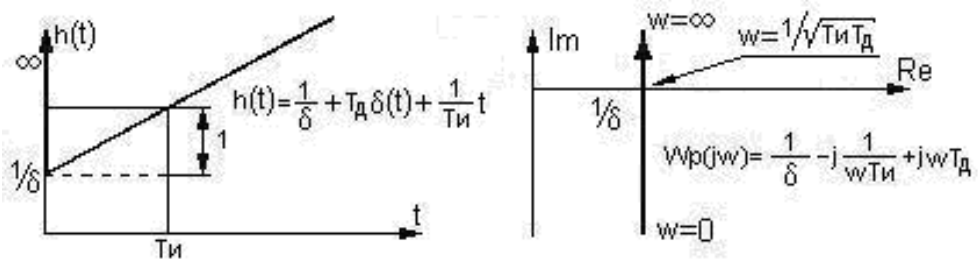


Рисунок 1.4 – Перехідна і амплітудно-фазова характеристики ПД-регулятора

5) Пропорційно-диференціальний закон регулювання (ПД):

ПД-регулятор представляє собою паралельне з'єднання безінерційної і ідеальної диференціувальної ланки. ПД-регулятори застосовують для регулювання об'єктів, які допускають наявність статичної помилки регулювання.

Пропорційні регулятори з випередженням, або ПД-регулятортори, поліпшують перехідний процес при статичному регулюванні. Вони здійснюють регулювання від швидкості протікання збурюючого впливу, тобто регулювання йде за величиною збурення і першої похідної від нього.

Функція передачі ПД-регулятора:

$$W_p(s) = K_1 + K_2 s \quad (1.8)$$

де K_1 – коефіцієнт передачі пропорційної складової; K_2 - коефіцієнт передачі диференціюючої складової.

Підсилювальні властивості ПД-регулятора характеризують два параметри:

- 1) межа пропорційності $d = 1/K_1$ - величина, зворотна K_1 ;
- 2) постійна часу диференціювання (час випередження) $T_D = K_2$.

Якщо $de/dt > 0$, помилка зростає і диференціюються частина, сумуючись з пропорційною, збільшує вплив регулятора на об'єкт. Якщо $de/dt < 0$ – помилка зменшується і диференціюються частина, сумуючись з пропорційної, зменшує вплив регулятора на об'єкт.

На рис.1.5 зображено перехідну і амплітудно-фазову характеристики ПД-регулятора [4]:

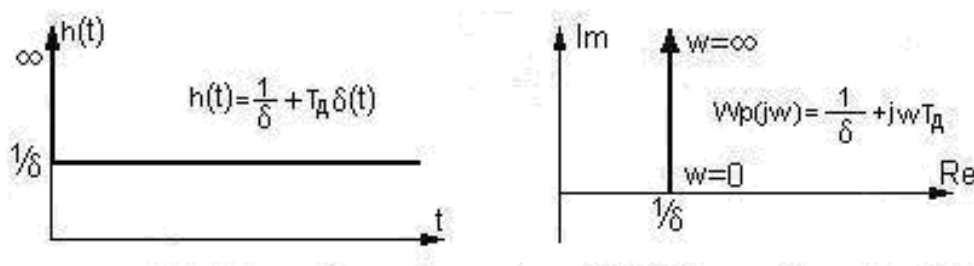


Рисунок. 1.5– Перехідна і амплітудно-фазова характеристики ПД-регулятора

Під час вибору типу регулятора для неперервних технологічних процесів необхідно враховувати: динамічні характеристики об'єкта; наявність транспортного запізнення; вимоги до точності регулювання; допустимий час перехідного процесу; запас стійкості системи;

Висновок до розділу

У результаті аналізу алгоритмів автоматичного керування встановлено, що ефективність функціонування неперервних технологічних процесів значною мірою визначається правильністю вибору закону регулювання та параметрів налаштування регулятора. Для газоперекачувальних агрегатів, які характеризуються інерційністю та складною динамікою процесів, найбільш доцільним є використання ПД-регуляторів.

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНИХ РІШЕНЬ І МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИМ АГРЕГАТОМ

Особливістю ГПА як об'єкта керування є наявність складних газодинамічних процесів, значної інерційності, транспортного запізнення та нелінійності характеристик компресорного обладнання. Крім того, агрегат функціонує в умовах змінних навантажень, що вимагає забезпечення високої точності регулювання та стійкості системи.

У зв'язку з цим система автоматичного керування повинна мати багаторівневу структуру, до складу якої входять локальні контури регулювання, координаційні алгоритми та засоби диспетчерського контролю. Такий підхід дозволяє підтримувати задані режими роботи агрегату та забезпечувати стабільне транспортування природного газу.

2.1 Розробка динамічної моделі процесу стиснення газу

Для аналізу динамічних властивостей системи автоматичного керування необхідно побудувати математичну модель газоперекачувального агрегату. У більшості випадків ГПА можна моделювати інерційною ланкою із транспортним запізненням. Передавальна функція об'єкта керування має вигляд::

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s},$$

де K – коефіцієнт підсилення об'єкта; T – стала часу (інерційність газодинамічних процесів); τ – транспортне запізнення.

Передавальна функція може розглядатися як умовний запис диференціального рівняння, в якому символ диференціювання $\frac{d}{dt}$ замінений на оператор p .

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для визначення передавальної функції керованого об'єкту необхідно побудувати його криву розгону. Вихідні дані для її побудови беремо із табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Дані для побудови перехідної характеристики

x	1	1	1	1	1	1	1	1
Y	0	0,26	0,54	0,76	0,86	0,93	0,97	1
t,c	0	1	2	3	4	5	6	7

Проводимо приблизне відтворення методом площ для різних значень знаменника і чисельника передавальної функції, щоб одержати найбільш точну модель об'єкта, з допомогою програми AproxV1.0.:

Результати: Поліном знаменника $N=1$. Поліном чисельника $M=0$. Кількість дискрет $N_k=8$. Крок дискретизації $T_s=1$. Вхідне збурення $X_0=1,0000$. (табл.2.1).

Таблиця 2.1 – Максимальна похибка $\Delta_{\max}=11,70\%$ в точці $T=1c$

t,c	y(t)	h(t)	Delta%
0	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,2500	0,3700	0,1200
2	0,5300	0,6000	0,0690
3	0,7500	0,7500	0,0040
4	0,8700	0,8400	0,0310
5	0,9200	0,9000	0,0220
6	0,9800	0,9350	0,0450
7	1,0001	0,9600	0,0410

Функція передачі:

$$W(s)=(1)/(2,186s+1,000)$$

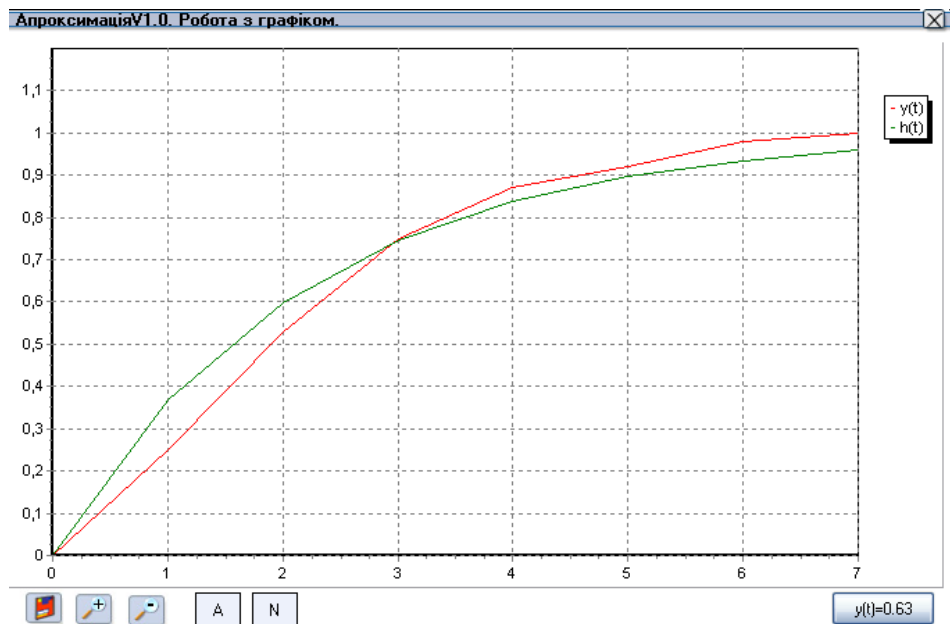


Рисунок 2.1 – Результати приблизного відтворення у програмі АproxV1.0.

Приблизне відтворення у точці $T=0$ с .

Результати: поліном знаменника $N=1$. Поліном чисельника $M=1$. Кількість дискрет $N_k=8$. Крок дискретизації $T_s=1$. Вхідне збурення $X_0=1,0000$.

Таблиця 2.2 – Максимальна похибка $\Delta_{\text{Max}}=33,30\%$ в точці $T=0$ с

t,c	y(t)	h(t)	Delta%
0	0,0001	-0,3400	0,3500
1	0,2600	0,2900	0,0260
2	0,5400	0,6300	0,0840
3	0,7700	0,7500	0,0460
4	0,8600	0,8600	0,0120
5	0,9200	0,9400	0,0160
6	0,9500	0,9600	0,0180
7	1,0000	0,9800	0,0180

Функція передачі:

$$W(s)=(1,001*(-0,545s^2+1,000))/(1,640s+1,000)$$



Рисунок 2.2 – Результати приблизне відтворення у програмі AproxV1.0.

Приблизне відтворення у точці $T=5c$.

Результати: поліном знаменника $N=2$; поліном чисельника $M=0$; кількість искрет $N_k=8$. крок дискретизації $T_s=1$; вхідне збурення $X_0=1,0000$ (табл. 2.3)

Таблиця 2.3 – Максимальна похибка $\Delta_{\max}=2,20\%$ в точці $T=5c$

t, c	$y(t)$	$h(t)$	Delta%
0	0,0001	-0,0070	0,0070
1	0,2600	0,2400	0,0180
2	0,5400	0,5300	0,0260
3	0,7400	0,7500	0,0080
4	0,8600	0,8600	0,0101
5	0,9400	0,9200	0,0230
6	0,9800	0,9200	0,0180
7	1,0000	0,9800	0,0230

Функція передачі:

$$W(s) = (1) / (1,194s^2 + 2,186s + 1,000)$$



Рисунок 2.3 – Результати приблизного відтворення у програмі АпрохV1.0.

Результати: Поліном знаменника N=2. Поліном чисельника M=1. Кількість дискрет $N_k=8$. Крок дискретизації $T_s=1$. Вхідне збурення $X_0=1,0000$

Таблиця 2.4 – Максимальна похибка $\Delta_{\text{Max}}=1,80\%$ в точці $T=5\text{c}$

t,c	y(t)	h(t)	Delta%
0	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,2500	0,2500	0,0040
2	0,5300	0,5300	0,0040
3	0,7500	0,7400	0,0110
4	0,8700	0,8700	0,0030
5	0,9200	0,9400	0,0180
6	0,9800	0,9740	0,0060
7	1,0000	0,9900	0,0100

Функція передачі:

$$W(s)=(1,000*(0,281s^2+1,000))/(1,811s^2+2,468s+1,000)$$



Рисунок 2.4 – Результати приблизного відтворення у програмі AproxV1.0.

Результати. Поліном знаменника $N=.$ / Поліном чисельника $M=2$. Кількість дискрет $N_k=8$. Крок дискретизації $T_s=1$. Вхідне збурення $X_0=1,0000$

Таблиця 2.5 – Максимальна похибка $\Delta_{\text{Max}}=4,40\%$ в точці $T=0\text{с}$

$t, \text{с}$	$y(t)$	$h(t)$	Delta%
0	0,0001	0,0440	0,0440
1	0,2500	0,2400	0,0070
2	0,5300	0,5300	0,0040
3	0,7500	0,7400	0,0110
4	0,8700	0,8700	0,0000
5	0,9200	0,9400	0,0210
6	0,9800	0,9750	0,0050
7	1,0000	0,9900	0,0090

Функція передачі:

$$W(s) = (1,000 \cdot (0,070s^2 + 0,152s + 1,000)) / (1,599s^2 + 2,339s + 1,000)$$



Рисунок 2.5 – Результати приблизного відтворення у програмі АproxV1.0.

Результати. Поліном знаменника $N=3$. Поліном чисельника $M=2$. Кількість дискрет $N_k=8$. Крок дискретизації $T_s=1$. Вхідне збурення $X_0=1,0000$

Таблиця 2.6 – Максимальна похибка $\Delta_{\text{Max}}=1,80\%$ в точці $T=5\text{c}$

t,c	y(t)	h(t)	Delta%
0	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,2500	0,2600	0,0060
2	0,5300	0,5300	0,0010
3	0,7500	0,7400	0,0130
4	0,8700	0,8700	0,0040
5	0,9200	0,9400	0,0180
6	0,9800	0,9750	0,0050
7	1,0000	0,9900	0,0090

Функція передачі:

$$W(s)=(1,000*(0,650s^2+2,211s^2+1,000))/(3,728s^3+6,681s^2+4,397s+1,000)$$



Рисунок 2.6 – Результати приблизного відтворення у програмі АпрохV1.0.

Результати. Поліном знаменника N=3. Поліном чисельника M=3. Вхідне збурення $X_0=1,0000$

Таблиця 2.7 – Максимальна похибка DeltaMax=11,00% в точці T=0с

t,c	y(t)	h(t)	Delta%
0	0,0000	-0,1100	0,1100
1	0,2500	0,2900	0,0380
2	0,5300	0,5300	0,0030
3	0,7500	0,7200	0,0260
4	0,8700	0,8600	0,0090
5	0,9200	0,9400	0,0200
6	0,9800	0,9780	0,0020
7	1,0000	0,9900	0,0060

Функція передачі:

$$W(s)=(1,000*(-0,117s^3+0,396s^2+0,543s+1,000))/(1,061s^3+2,779s+1,000)$$

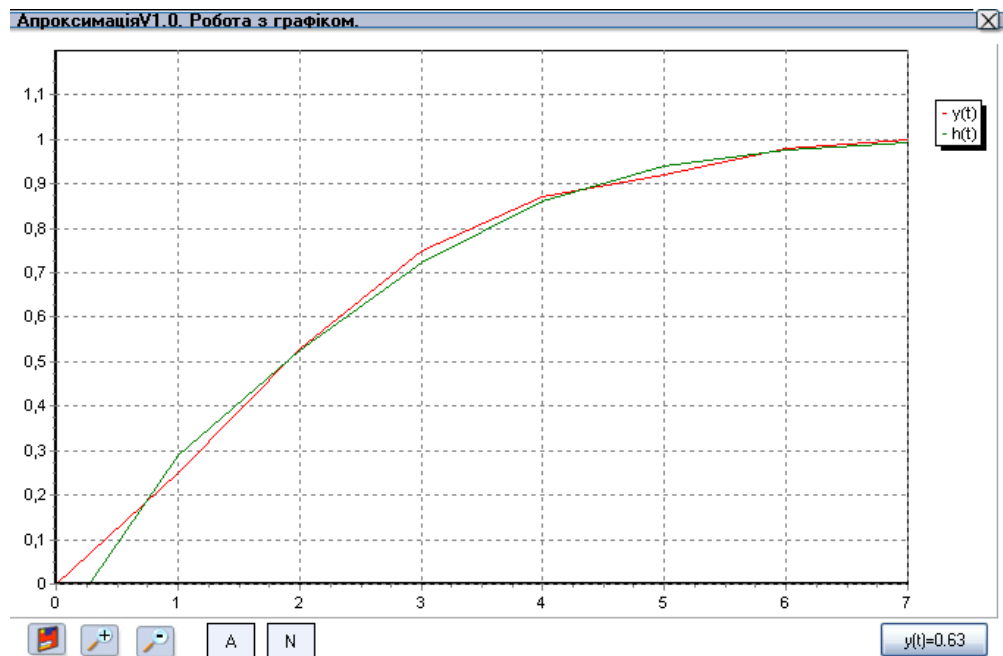


Рисунок 2.7 – Результати приблизного відтворення у програмі AproxV1.0.

Згідно проведених розрахунків можемо зробити висновок, що модель керованого об'єкта, що описується передавальною функцією із порядком знаменника 2 і чисельника 1 найбільш точно описує даний керований об'єкт, оскільки відносна похибка приблизного відтворення у дискретні моменти часу не перевищує величини 1,8%.

Таким чином, при проведенні апроксимування було отримано таку функцію передачі об'єкта керування:

$$W(s) = (1,000 \cdot (0,281s + 1,000)) / (1,811s^2 + 2,468s + 1,000)$$

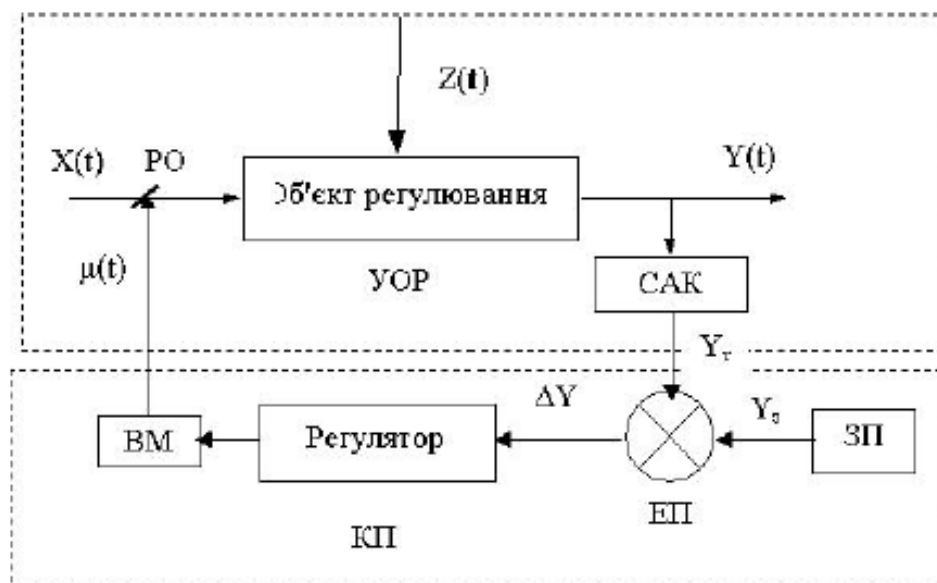
2.2 Створення функціональної структури САК

Якщо в автоматичній системі керуючий вплив виробляється на основі інформації про відхилення регульованої величини від заданого значення, то кажуть, що система побудована на основі принципу регулювання за відхиленням, або принципу зворотного зв'язку.

Для реалізації цього принципу в регулюючому пристрої необхідно здійснювати порівняння дійсного значення регульованої величини із заданим значенням та управляти об'єктом в залежності від результатів цього порівняння.

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Функціональна структура відображає функції, які виконуються системою і окремими її частинами (рис. 2.8).



УОР - узагальнений об'єкт регулювання; КП- керуючий пристрій; $X(t)$ - вхідний параметр об'єкту, $Y(t)$ -вихідний параметр, $Z(t)$ - збурюючий вплив, Y_t , Y_z – поточне і задане значення параметра, ΔY - сигнал розузгодження, $\mu(t)$ - керуючий вплив, САК- система автоматичного контролю, ЗП- задаючий пристрій, ЕП- елемент порівняння, ВМ- виконавчий механізм, РО- регулюючий орган

Рисунок 2.8 – Функціональна схема САК

На рис. 2.8 об'єкт керування, регулюючий орган (РО) і система автоматичного контролю вихідного параметра (САК) об'єднані в окремий блок узагальнений об'єкт регулювання. У свою чергу, регулятор, виконавчий механізм (ВМ), елемент порівняння і задаючий пристрій утворюють блок керування або керуючий пристрій. Система автоматичного контролю вихідного параметра дає змогу вимірювати абсолютні значення регульованої величини і виробляти сигнал її поточного значення (Y_t). Згідно з вимогами вихідний сигнал вимірювального пристрою повинен бути пропорційним до вимірюваної величини.

Елемент порівняння (ЕП) — елемент автоматики виробляє сигнал розузгодження $\Delta(y)$: $\Delta(y) = Y_m - Y_z$.

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Робота представленої системи проста. При відхиленні регульованої величини від заданого значення на елементі порівняння формується сигнал розузгодження (за рівнянням), який після підсилення і перетворення за необхідним алгоритмом у регуляторі керує роботою виконавчого механізму.

Останній впливає на регулюючий орган, змінюючи значення вхідного сигналу доти, поки не зникне відхилення поточного значення регульованої величини від заданого, тобто до виконання умови $\Delta Y=0$.

Принцип керування за відхиленням є універсальним і ефективним, оскільки він дозволяє враховувати всі впливи на об'єкт (всіх збурень і завад), управляти складними об'єктами, а також здійснювати необхідний закон зміни керованої величини з допустимо малим відхиленням (помилкою) незалежно від того, якими причинами воно викликане.

Характерною рисою автоматичних систем, побудованих на основі принципу керування за відхиленням, є наявність контролю регульованої величини і головного зворотного зв'язку. Зворотний зв'язок в цьому випадку утворений керуючим пристроєм [2].

2.3 Формування алгоритмічної структури САК

Алгоритмічна ланка – це частина алгоритмічної структури системи, що відповідає елементарному алгоритму перетворення сигналу.

Кожна елементарна ланка виконує одну просту математичну або логічну операцію. На схемах такі ланки зображуються у вигляді прямокутників, в яких записують оператор перетворення сигналу. Елементарні алгоритмічні ланки бувають 5 типів: статичні; динамічні; арифметичні; логічні; формуючі.

В статичних ланках миттєве значення вихідного сигналу залежить тільки від вхідного сигналу в даний момент часу і не залежить від зміни вхідного сигналу в часі. Зв'язок між виходом і входом зображується у вигляді алгебраїчних функцій:

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Динамічна ланка перетворює вхідний сигнал у відповідності з операціями диференціювання та інтегрування. Записується так: арифметична ланка проводить операції додавання, віднімання, множення і ділення.

Логічні ланки виконують одну із логічних операцій: НІ, АБО, І та записуються в середині прямокутника: формуюча ланка здійснює заміну параметрів вхідного сигналу іншим параметром[2].

Розроблювана нами система автоматичного керування матиме наступну алгоритмічну структуру (рис 2.9):

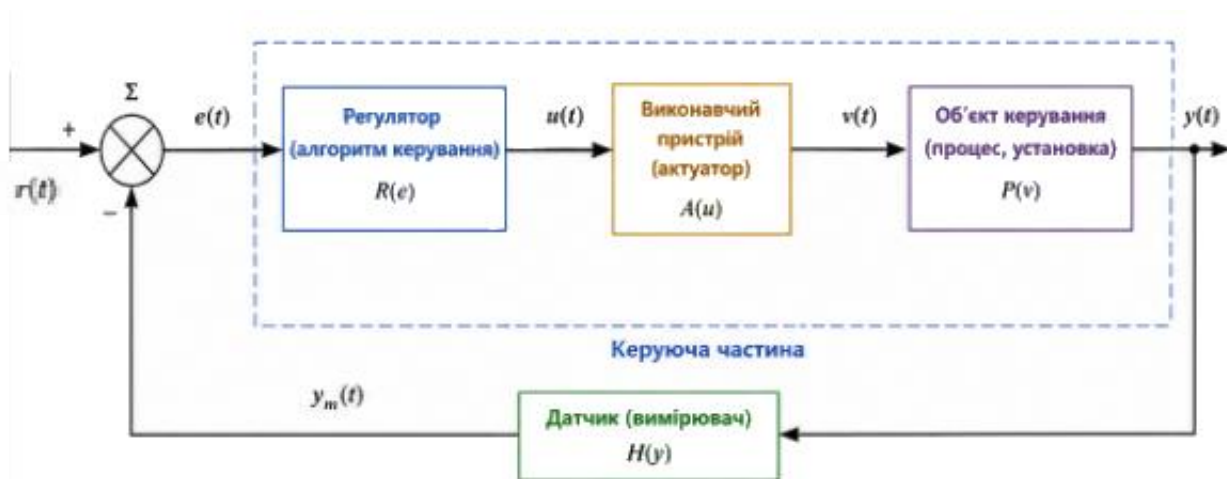


Рисунок 2.9 – Алгоритмічна структура САК

Як було визначено вище передавальна функція керованого об'єкту має наступний вигляд:

$$W_O(s) = \frac{0,281s + 1}{1,811s^2 + 2,468s + 1} \quad (2.1)$$

Тепер визначимо параметри налаштування регулятора

Параметри налагодження розраховуємо за допомогою програми “Optima.bas”:

Отже передавальна функція ПІД-регулятора матиме вид:

$$W_{PEГ}(s) = \frac{T_d \cdot T_i \cdot K_s \cdot s^2 + T_i \cdot K_p \cdot s + K_p}{T_i \cdot s} \quad (2.2)$$

Підставивши числові значення параметрів отримаємо:

$$W_{PEГ}(s) = \frac{1.564s^2 + 19.55s + 8.5}{2.3s} \quad (2.3)$$

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Дослідження стійкості та оцінювання якісних характеристик розробленої системи

Основне призначення САК полягає в підтримці заданого постійного значення регульованого параметра або зміна його по певному закону.

При відхиленні регульованого параметра від заданої величини (наприклад, під дією зовнішнього збурення або зміни завдання) регулятор впливає на систему так, щоб ліквідовувати це відхилення. Якщо система в результаті цієї дії повертається в початковий(вихідний) стан або переходить в інший рівноважний стан, то така система називається стійкою. Якщо ж виникають коливання із все зростаючою амплітудою або відбувається монотонне збільшення помилки, то система називається нестійкою.

Через складність автоматичних систем для оцінки їх стійкості тільки фізичних уявлень недостатньо. Для цього необхідне використання математичного апарата. Тому розглянемо, в чому полягає особливість математичного трактування стійкості автоматичних систем.

У теорії автоматичного керування розроблено методи, що дозволяють досліджувати стійкість САК без знаходження коренів характеристичного рівняння, які дістали назву критеріїв стійкості. Існують два основних види критеріїв стійкості: алгебраїчні й частотні.

До алгебраїчних критеріїв стійкості належать критерії Вишнеградського, Рауса, Льєнара, Мінара, Гурвіца та ін., що дозволяють оцінювати стійкість САК за коефіцієнтами характеристичного рівняння цієї системи. Аналіз перехідних характеристик першого і другого порядків показує, що для рівнянь динаміки першого і другого порядків необхідною і достатньою умовами стійкості є додатне значення коефіцієнтів відповідних характеристичних рівнянь, що зумовлюється від'ємними знаками дійсних коренів або дійсних частин комплексних коренів. Для САК вищих порядків ($m \geq 3$), крім додатного знака коефіцієнтів характеристичного рівняння замкнутої системи необхідно, щоб виконувалися також інші умови.

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Серед наведених алгебраїчних критеріїв стійкості САК критерій Гурвіца більш просто формує умови стійкості і здебільшого використовується для систем, що описують характеристичним рівнянням не вище 4-го порядку [5,6].

Критерій Гурвіца формулюється так:

Система з характеристичним рівнянням

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0 \quad (2.4)$$

буде стійкою, якщо визначник і всі його діагональні мінори додатні:

$$\Delta_n > 0, \Delta_{n-1} > 0, \dots, \Delta_2 > 0, \Delta_1 = a_{n-1} > 0. \quad (2.5)$$

При складанні визначника Гурвіца спочатку по діагоналі розміщують коефіцієнти, починаючи з a_{n-1} до a_0 :

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_2 & a_0 \end{vmatrix}. \quad (2.6)$$

Потім визначник заповнюють по стовпцях: вище діагональних коефіцієнтів записуються коефіцієнти із індексами, що зменшуються, а нижче – із зростаючими. При досягненні нульового або n -го індексу далі ставляться нулі.

Кожен діагональний мінор Δ_{k-1} визначника Гурвіца отримують з попереднього мінору Δ_k шляхом викреслювання нижнього рядка і правого стовпчика. Мінор Δ_{n-1} отримують з визначника Гурвіца Δ_n за загальним правилом, тобто шляхом викреслювання з Δ_n нижнього рядка і правого стовпчика. Нижчий діагональний мінор Гурвіца $\Delta_1 = a_{n-1}$.

Для лінійних САК технологічними процесами більш зручно використовувати критерій Михайлова. Оцінку стійкості САК за цим критерієм виконують на основі годографа Михайлова, алгоритм будови якого передбачає:

- запис відомих передаточних функцій САК (для замкненої САК – $W_3(s)$, для розімкненої САК – $W_p(s)$);
- одержання нових функцій, що позначають через $G(s)$, для замкненої САК це знаменник передаточної функції ($G_3(s)$), а для розімкненої САК – це сума

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

чисельника і знаменника ($G_s(s)$);

- заміну у функціях $G_3(s)$ та $G_s(s)$ оператора Лапласа добутком $i \cdot \omega$, тобто $s = i \cdot \omega$, де $i = \sqrt{-1}$ ($i^2 = -1$; $i^3 = -i$; $i^4 = 1$ і т.д.), а ω - частота ($0 \leq \omega \leq \infty$) і отримання комплексних функцій $G_3(\omega)$ та $G_s(\omega)$;

- перетворення одержаних комплексних функцій $G_3(\omega)$ та $G_p(\omega)$ до вигляду, що має відповідні дійсні $\text{Re}(\omega)$ та уявні $\text{Im}(\omega)$ частини, тобто

$$G_3(\omega) = \text{Re}_3(\omega) + i\text{Im}_3(\omega), \quad G_s(\omega) = \text{Re}_s(\omega) + i\text{Im}(\omega);$$

- зміну значення ω в межах від 0 до ∞ , обчислення відповідних значень $\text{Re}(\omega)$ та $\text{Im}(\omega)$ і запис їх в таблицю;

Частотний критерій Михайлова виражають таким чином: для стійкості САК необхідно і достатньо, щоб радіус-вектор годографа Михайлова для передаточної функції n -го порядку при зміні частоти від 0 до ∞ , почавши обертання з точки, яка лежить на дійсній осі праворуч від 0, обертаючись проти годинникової стрілки, пройшов послідовно n квадрантів комплексної площини і повернувся на кут менше $\frac{\pi}{2} \cdot n$.

При невиконанні цих умов САК буде нестійкою [4, 5].

Для дослідження нашої САК використаємо два критерії: Гурвіца і Михайлова. Для цього визначимо передавальну функцію замкнутої системи керування за допомогою програмного пакету MATLAB.

Створюємо передавальну функцію об'єкту:

$W_o = \text{tf}([0, 0.281, 1], [1.811, 2.468, 1])$

Transfer function:

$$0.281 s + 1$$

$$1.811 s^2 + 2.468 s + 1$$

Задаємо параметри ПІД-регулятора, який функціонує в САК:

$$T_i = 2.3; K_s = 8.5; T_d = 0.08;$$

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Створено передавальну функцію регулятора:

$$W(s)=tf([T_d*T_i*K_s \quad T_i*K_s \quad K_s],[T_i \quad 0])$$

Transfer function:

$$1.564 s^2 + 19.55 s + 8.5$$

$$2.3 s$$

Передавальна функція розімкнутої АСР:

$$W(sp)=W_o*W_p$$

Transfer function:

$$0.4395 s^3 + 7.058 s^2 + 21.94 s + 8.5$$

$$4.165 s^3 + 5.676 s^2 + 2.3 s$$

Передавальна функція замкнутої АСР:

$$W_{wzg}=\text{feedback}(W(s),1,-1)$$

Transfer function:

$$0.4395 s^3 + 7.058 s^2 + 21.94 s + 8.5$$

$$4.605 s^3 + 12.73 s^2 + 24.24 s + 8.5$$

Отже, характеристичне рівняння замкнутої САК таке:

$$F(s) = 4.605s^3 + 12.73s^2 + 24.24s + 8.5 \quad (2.7)$$

Визначаємо стійкість системи за критерієм Михайлова за допомогою програми Matlab [6]:

Передавальна функція замкнутого контуру:

$$Wz(p) := \frac{0.4395p^3 + 7.058p^2 + 24.24p + 8.5}{4.605p^3 + 12.73p^2 + 24.24p + 8.5}$$

$$F(p) := 4.605p^3 + 12.73p^2 + 24.24p + 8.5$$

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

$F(w) := F(p)$	substitute, p = i·w	$\rightarrow -12.73w^2 + 8.5 + (w \cdot 24.24 + w^3 \cdot -4.605) \cdot i$
	complex	
	simplify	
	expand	
	float, 4	

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$w := 0,001..5$$

Виділимо дійсну та уявну частину:

$$PF(w) := -12.73w^2 + 8.1$$

За результатами обчислень побудовано годограф Михайлова (рис. 2.10).

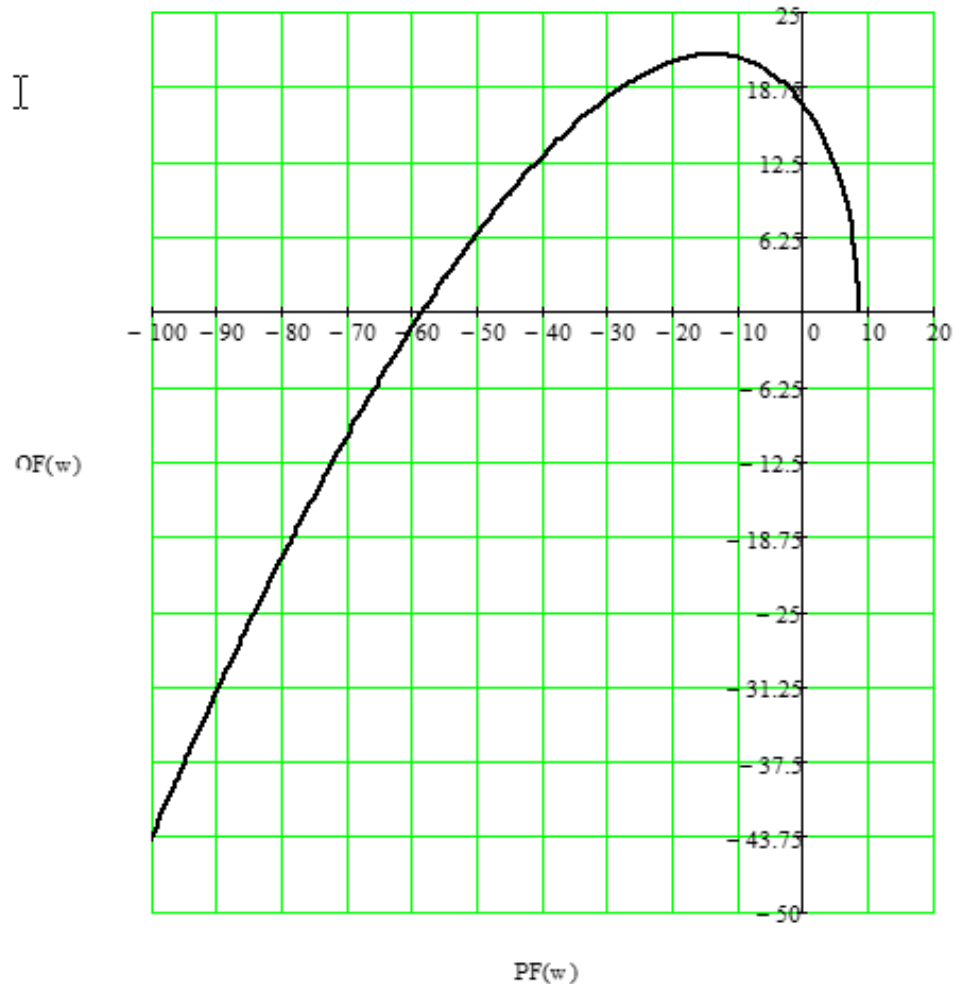


Рисунок 2.10 – Годограф Михайлова

Якість автоматичної системи керування є сукупністю властивостей як самого об'єкта керування, так і керуючого пристрою.

Точність системи в перехідних режимах оцінюють за допомогою прямих і непрямих показників. Прямі показники визначають по графіку перехідного процесу, що виникає в системі при ступеневому зовнішньому впливі.

Одним із головних прямих показників якості є перерегулювання $\sigma(\%)$:

$$\sigma = \frac{x_m - x(\infty)}{x(\infty)} \cdot 100\% \quad (2.8)$$

де x_m – перше максимальне відхилення; $x(\infty)$ - усталене значення.

Час регулювання t_n – інтервал часу від моменту прикладання ступеневого впливу до моменту, після відхилення керованої величини від її кінцевого значення, що не перевищує деяке задане число δ_n . Як правило в промисловій автоматизації $\delta_n = 0,05 \cdot x(\infty)$.

Прямим показником якості служить і степінь затухання:

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_3} \quad (2.9)$$

де A_1 і A_3 - сусідні максимальні відхилення амплітуди одного знаку.

Щодо непрямих показників якості, то найважливіші серед них є частотний показник коливальності M , який визначається по АЧХ замкнутого контуру; запас стійкості по фазі та амплітуді.

Всі задані показники якості нормуються.

Будуємо графік перехідного процесу:

```
w=tf([0.4395 7.058 21.94 8.5],[4.605 12.73 24.24 8.5])
```

Transfer function:

```
0.4395 s^3 + 7.058 s^2 + 21.94 s + 8.5
```

```
-----
```

```
4.605 s^3 + 12.73 s^2 + 24.24 s + 8.5
```

```
step(w)
```

На рис. 2.11 наведено типові перехідні характеристики коливальної системи другого порядку з перерегулюванням приблизно 10–12 %.

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

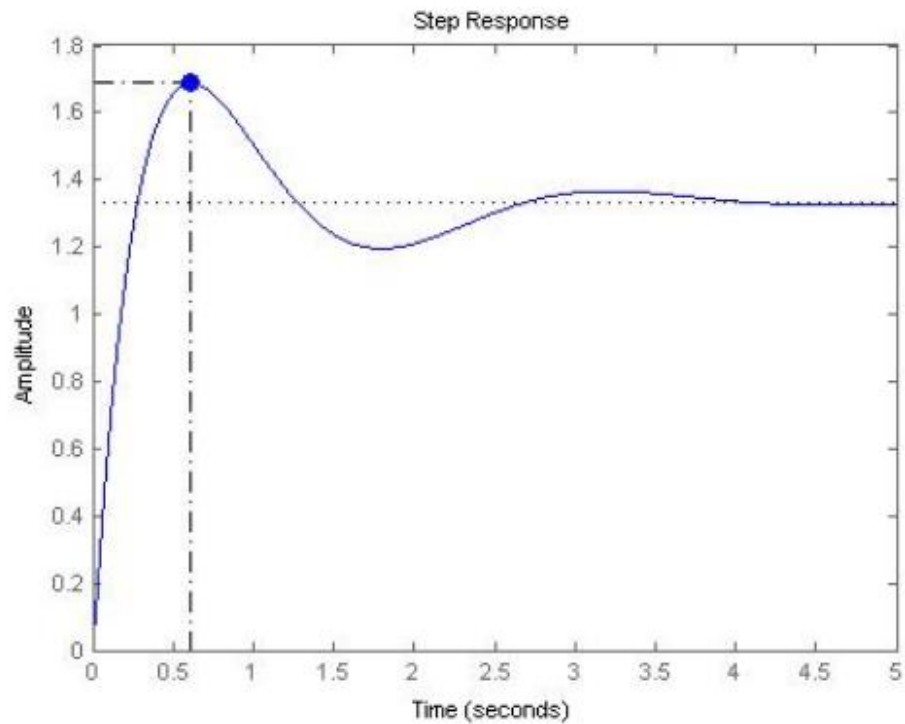


Рисунок 2.11 – Перехідна характеристика замкнутої САК

Визначаємо прямі показники якості:

- Перерегулювання $\sigma = \frac{1,12 - 1}{1} \cdot 100\% = 12\%$
- Час регулювання $t = 2,5\text{с}$

Непрямі показників якості. Знаходимо запас стійкості по фазі та амплітуді для чого також використаємо програмний пакет Matlab [6]:

`w=tf([0.4395 7.058 21.94 8.5],[4.605 12.73 24.24 8.5])`

Transfer function:

$0.4395 s^3 + 7.058 s^2 + 21.94 s + 8.5$

 $4.605 s^3 + 12.73 s^2 + 24.24 s + 8.5$

`margin(w)`

`bode(w)`

На рис 2.12 наведено частотні характеристики системи.

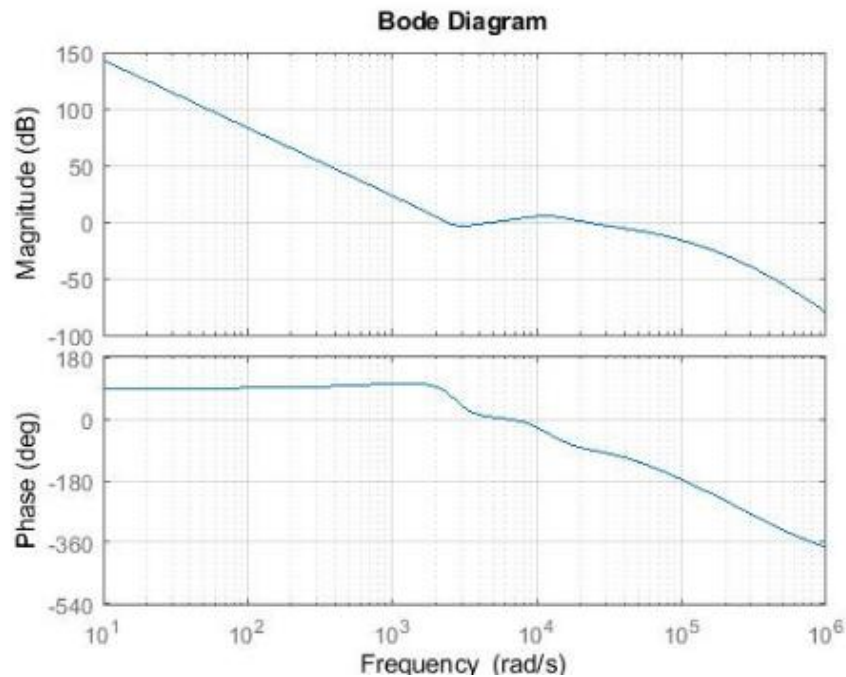


Рисунок 2.12 – Частотні характеристики САК

Аналізуючи графіки на рис. 2.11 і 2.12 можна стверджувати, що запас стійкості по амплітуді: $\Delta A = 2,76$; запас стійкості по фазі: $\Delta \varphi = 81^\circ$.

Ці непрямі показники характеризують віддаленість кривої $w(j\omega)$ від критичної точки $(-1; j0)$. При проектуванні систем для забезпечення доброї якості керування задаються запасом стійкості по амплітуді $\Delta A \geq 0,5 \div 0,6$ і по фазі $\Delta \varphi \geq 30 \div 60^\circ$. Як бачимо отримані нами значення задовольняють цим умовам.

Щоб остаточно говорити про відповідність системи всім показникам якості необхідно визначити частотний показник коливальності. Частотний показник коливальності M знайдемо з графіка АЧХ передавальної функції замкнутого контуру. Знаходимо показник коливальності M для чого також використаємо програмний пакет Matlab [6]:

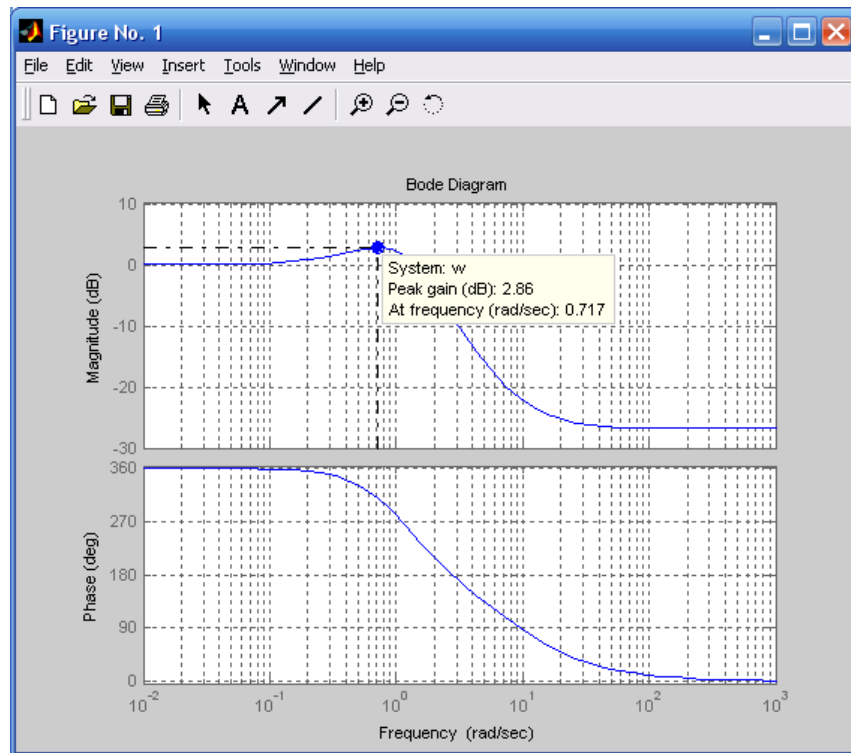
```
w=tf([0.4395 7.058 21.94 8.5],[4.605 12.73 24.24 8.5])
```

Transfer function:

$$0.4395 s^3 + 7.058 s^2 + 21.94 s + 8.5$$

$$4.605 s^3 + 12.73 s^2 + 24.24 s + 8.5$$

bode(w)



Рисунлк 2.13 – Діаграма Бодє САК

Частотний показник коливальності $M = 0,717$.

Висновок до розділу

У ході виконання цього розділу було обґрунтовано структурну схему автоматизації газоперекачувального агрегату та побудовано математичний опис процесу стиснення газу. На основі апроксимації експериментальних даних отримано динамічну модель об'єкта керування у вигляді операторного коефіцієнта передачі, яка з високою точністю відображає його поведінку в перехідних режимах. Поряд із цим розроблено алгоритмічне та функціональне забезпечення системи, розраховано оптимальні налаштування ПД-регулятора, а також виконано оцінювання стійкості контуру регулювання за допомогою критеріїв Гурвіца та Михайлова.

З ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

3.1 Синтез ПД-регулятора методом Зіглера-Нікольса та дослідження швидкодії системи

Ключовим етапом параметричного синтезу систем автоматичного керування (САК) є визначення оптимальних коефіцієнтів налаштування ПД-регулятора, оскільки саме вони визначають такі фундаментальні динамічні та статичні показники якості, як швидкодія, точність та стійкість контуру регулювання. З метою оцінювання впливу параметрів закону регулювання на показники перехідних процесів у роботі застосовано метод Зіглера-Ніколса. Даний підхід набув значного поширення в промисловій практиці автоматизації завдяки відносній простоті інженерної реалізації та прийнятній ефективності функціонування.

Відповідно до зазначеної методики, процедура розрахунку параметрів налаштування регулювальних пристроїв здійснюється у два етапи:

1) розрахунок критичного параметра налаштування пропорційної частини S_1^{kp} (при $S_0 = S_2 = 0$), при якій АСР буде знаходитись на межі стійкості і відповідну цьому параметру ω_{kp} .

2) Визначають за S_1^{kp} і ω_{kp} оптимальні параметри налаштування регулятора:

S_1^{onm} , S_2^{onm} , S_0^{onm} , які забезпечують степінь затухання $\psi = 0,8 \div 0,9$.

Рівняння для розрахунку S_1^{kp} і відповідної йому частоти ω_{kp} отримують при $m=0$: $\varphi_o(\omega) + \pi = 0 \Rightarrow$ з цього рівняння визначаємо ω_{kp} ,

$$S_1^{kp} = \frac{1}{A_o(\omega_{kp})}.$$

Оптимальні параметри налаштування розраховують таким чином [4]:

П – регулятор:

$$S_1^{onm} = 0,5S_1^{kp};$$

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПІ – регулятор:

$$S_1^{onm} = 0,45S_1^{kp}; \quad \frac{S_0^{onm}}{S_1^{onm}} = 0,19\omega_{кр}; \quad \text{або} \quad S_0^{onm} = 0,086S_1^{kp}\omega_{кр}$$

ПІД – регулятор:

$$S_1^{onm} = 0,6S_1^{kp}; \quad \frac{S_0^{onm}}{S_1^{onm}} = 0,32\omega_{кр}; \quad \text{або} \quad S_0^{onm} = 0,192S_1^{kp}\omega_{кр}.$$

$$\frac{S_2^{onm}}{S_1^{onm}} = \frac{0,785}{\omega_{кр}}, \quad \text{або} \quad S_2^{onm} = \frac{0,471S_1^{kp}}{\omega_{кр}}$$

Проведемо розрахунок параметрів налаштування регулятора згідно даного методу для досліджуваної нами САК, для цього використаємо програму Matlab [7]:

$$W(p) := \frac{0.4395p^3 + 7.058p^2 + 21.94p + 8.5}{4.605p^3 + 12.73p^2 + 24.24p + 8.5}$$

$$j\omega \leftarrow p \quad W(j\omega) := \frac{-0.4395\omega^3 - 7.058\omega^2 + 21.94\omega + 8.5}{-4.605\omega^3 - 12.73\omega^2 + 24.24\omega + 8.5}$$

$$W(j\omega) = \frac{-0.4395\omega^3 - 7.058\omega^2 + 21.94\omega + 8.5}{-4.605\omega^3 - 12.73\omega^2 + 24.24\omega + 8.5}$$

Записуємо ФЧХ і АФХ об'єкту

$$\phi(\omega) := \operatorname{atan} \left[\frac{(-0.4395\omega^3 + 21.94\omega)}{(-7.058\omega^2 + 8.5)} \right] - \operatorname{atan} \left[\frac{(-4.605\omega^3 + 24.24\omega)}{(-12.73\omega^2 + 8.5)} \right]$$

$$A_o(\omega) := \frac{\sqrt{(-0.4395\omega^3 + 21.94\omega)^2 + (-7.058\omega^2 + 8.5)^2}}{\sqrt{(-4.605\omega^3 + 24.24\omega)^2 + (-12.73\omega^2 + 8.5)^2}}$$

Визначимо критичну частоту за наступною підпрограмою:

$\omega := C$

Given

$$\operatorname{atan} \left[\frac{(-0.4395\omega^3 + 21.94\omega)}{(-7.058\omega^2 + 8.5)} \right] - \operatorname{atan} \left[\frac{(-4.605\omega^3 + 24.24\omega)}{(-12.73\omega^2 + 8.5)} \right] = -\pi$$

окр := Find(ω)

$\omega_{кр} = 11.1$

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	С. № докум.	Підпис	Дата		

3.2 Оцінювання кривої розгону замкненої одноконтурної САК за вектором “установка-вихідний сигнал”

На основі проведених розрахунків проведемо дослідження перехідної характеристики замкнутої одноконтурної системи за каналом завдання-вихід

Згідно означення передавальної функції по каналу $x_3 - x$ маємо:

$$W_{x_3-x}(s) = \frac{x(s)}{x_3(s)} \quad (3.1)$$

Передавальна функція по каналу $x_3 - x$ рівна

$$W_{x_3-x}(s) = W_{3C}(s) = \frac{W_{PC}(s)}{1 + W_{PC}(s)} \quad (3.2)$$

Передавальна функція замкненої системи таке:

$$W = \text{tf}([0.281 \ 1], [1.811 \ 2.468 \ 1])$$

Transfer function:

$$0.281 s + 1$$

$$1.811 s^2 + 2.468 s + 1$$

$$W_p = \text{tf}([0.17 \cdot 2.46 \cdot 8.73 \ 2.46 \cdot 8.73 \ 8.73], [2.46 \ 0])$$

Transfer function:

$$3.651 s^2 + 21.48 s + 8.73$$

$$2.46 s$$

$$W_r = W \cdot W_p$$

Transfer function:

$$1.026 s^3 + 9.686 s^2 + 23.93 s + 8.73$$

$$4.455 s^3 + 6.071 s^2 + 2.46 s$$

$$W_z = \text{feedback}(W_r, 1, -1)$$

Transfer function:

$$1.026 s^3 + 9.686 s^2 + 23.93 s + 8.73$$

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Побудуємо графік перехідного процесу.

step(Wz)

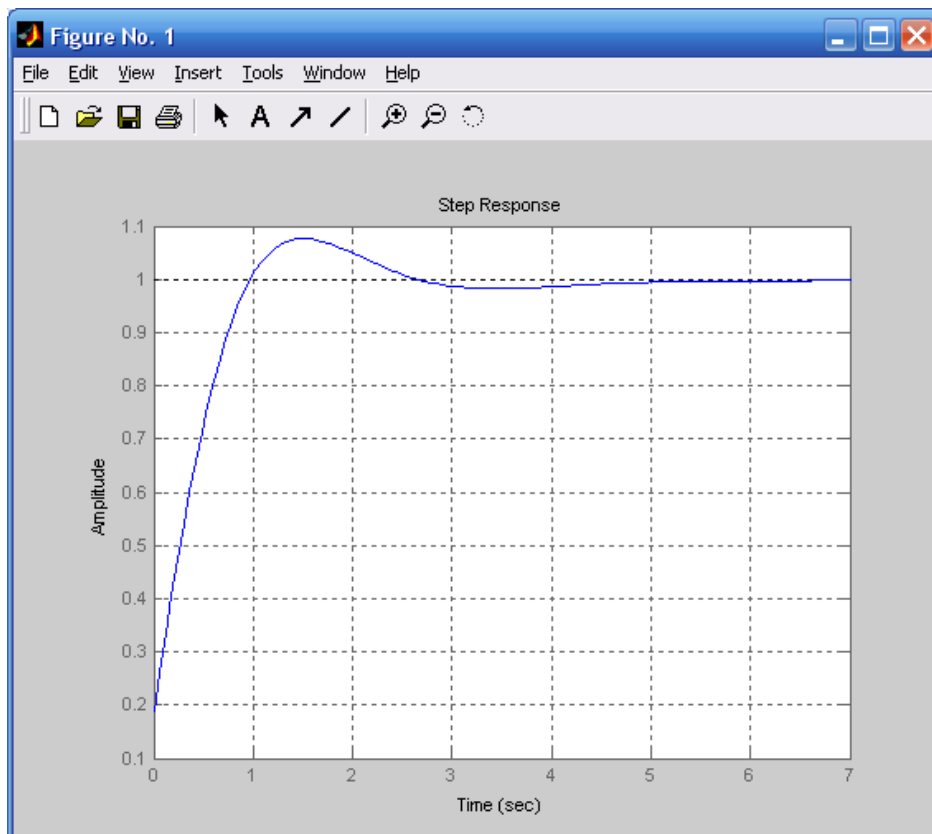


Рисунок 3.1 – Перехідна характеристика системи за каналом ”завдання-вихід”

3.3 Пошук раціональних значень динамічних параметрів налаштування регулятора

Задача пошуку раціональних значень зазначених параметрів полягає у забезпеченні такого компромісу між швидкістю відпрацювання збурень та стійкістю системи, за якого перехідний процес у контурі регулювання тиску (або витрати) газу відповідав би заданим технологічним вимогам (мінімальне перерегулювання, заданий час регулювання, відсутність статичної похибки).

Для первинного визначення параметрів налаштування ПД-регулятора в інженерній практиці широко застосовується метод Зіглера–Ніколса (Ціглера–Нікольса), який базується на аналізі динамічних характеристик об'єкта у замкненому стані або за його кривою розгону (експериментальними даними).

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Час регулювання однозначно зв'язано з резонансною частотою $t_p \approx \frac{3\pi}{\omega_p}$.

Це вказує на те, що для збільшення швидкодії автоматичної системи регулювання (зменшення часу регулювання) потрібно прагнути досягти максимального збільшення резонансної частоти ω_p . Збільшення резонансної частоти може бути досягнуто тільки застосуванням більш сучасного регулятора. Таким чином, залишаються тільки показники якості, які пов'язані з амплітудно-фазовою характеристикою розімкнутої системи, тобто показник коливальності M й запас стійкості за модулем і фазою.

Частотні методи ґрунтуються на АФХ об'єкта керування. Тут розрізняють точні методи, які запропоновані проф. В.Я. Ротачем та наближені методи (метод Зіглера-Нікольса). Налаштування методом параметричної оптимізації передбачає пошук параметрів регулятора, які забезпечують мінімізацію інтегрального критерію якості шляхом розв'язку оптимізаційної задачі на комп'ютері.

Чисельні досліди на реальних об'єктах регулювання, показали також, що найкращі перехідні процеси за задаючою дією і за збуренням отримуємо при показнику коливальності $M=1,6$. При цьому перерегулювання не перебільшує 30% і максимальне відхилення параметра регулювання при внутрішніх збуреннях не перевищує 10%. [2, 3].

Розглянемо детальніше методику розрахунку. Нехай передавальна функція розімкнутої системи:

$$W_{p.c}(s) = W_0(p)W_p(s);$$

тоді передавальна функція замкнутої системи така:

за завданням:

$$W_{z.c}^q(p) = \frac{W_{p.c}(p)}{1 + W_{p.c}(p)},$$

а за збуренням:

$$W_{z.c}^z(p) = \frac{W_0(p)}{1 + W_{p.c}(p)}.$$

Значення фазових кутів регуляторів при резонансній частоті для П - і І - законів регулювання очевидно, так як вони постійні для всіх частот і відповідно

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рівні 0° і -90° . Оптимальними кутами при резонансній частоті для ПД-регулятора буде 0 градусів, для ПІ-регулятора $-26^\circ 30'$ і для ПД-регулятора $+26^\circ 30'$.

Таким чином, знаючи фазовий кут регулятора, визначаємо фазовий кут об'єкта регулювання при резонансній частоті

$$\varphi_0(\omega_p) = \varphi_{p.c}(\omega_p) - \varphi_p(\omega_p), \quad (3.3)$$

за яким визначаємо резонансну частоту ω_p .

Для визначення резонансної частоти обраховуємо фазо - частотну характеристику об'єкта регулювання у вузькому діапазоні частот, поблизу фази розімкнутої системи мінус фаза регулятора:

Будуємо ділянку кривої (рис.4.6) $\varphi_0(\omega) = F(\omega)$, на осі ординат відкладаємо значення

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

а на осі абсцис відраховуємо відповідну резонансну частоту ω_p .

Потім при знайденому значенні резонансної частоти визначаємо модуль об'єкта регулювання $A_0(\omega_p)$, а тоді модуль регулятора при резонансній частоті

$$A_p(\omega_p) = \frac{A_{p.c}(\omega_p)}{A_0(\omega_p)}. \quad (3.4)$$

Із рівнянь амплітудно-частотної і фазо-частотної характеристики регулятора визначаємо коефіцієнт підсилення регулятора і постійну часу.

Знаючи передавальну функцію або амплітудно-фазову характеристику об'єкта регулювання за каналом регулюючої дії, визначення ω_p і $A_0(\omega_p)$ не викликає ніяких труднощів, при цьому необхідно зовсім невеликий об'єм обчислювальних робіт [2,3].

Визначимо оптимальні параметри ПД-регулятора для нашої САК за даним методом за допомогою програми Matlab [6]:

Функція передачі має такий вигляд:

$$W(p) = \frac{0.28p}{1.81p^2 + 2.468p + 1}$$

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Робимо заміну $p \rightarrow j$

$$W(j \cdot \omega) = \frac{0.281 \cdot j \cdot \omega}{2.468 \cdot j \cdot \omega + 1 - 1.81 \omega^2}$$

Записуємо ФЧХ і АФХ об'єкту: $\phi(\omega) := \text{atan}(0.281 \cdot \omega) - \text{atan}\left(\frac{2.468 \cdot \omega}{1 - 1.81 \omega^2}\right)$

ФЧХ об'єкта має вигляд: $A_0(\omega) := \frac{\sqrt{1 + (0.281 \omega)^2}}{\sqrt{(1 - 1.81 \omega^2)^2 + (2.468 \omega)^2}}$

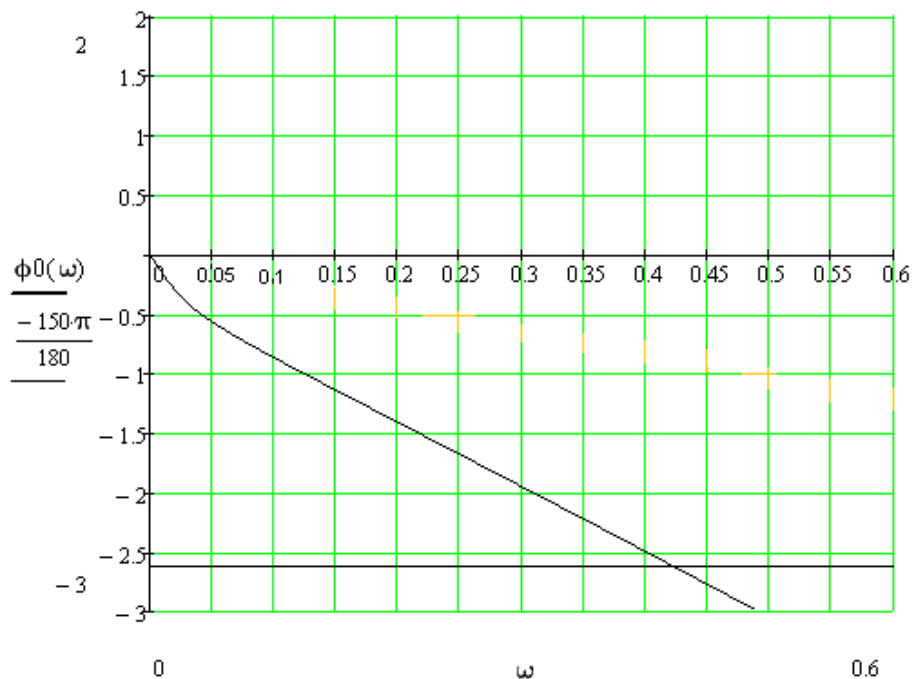


Рисунок 3.2 – Амплітудно-фазова характеристика об'єкта регулювання

Представлена на рис. 3.2 характеристика відображає динаміку розімкненого об'єкта керування. Годограф є гладким, не має особливих точок чи петель, що підтверджує стійкість самого об'єкта у розімкненому стані. Дана крива у подальшому використовується для параметричного синтезу регулятора та оцінювання запасів стійкості (за амплітудою та фазою). Резонансна частота: $\omega_r = 1.4$

Модуль об'єкта
регулювання:

$$A0(\omega)=1.12$$

Параметр K_p : $K_p := \frac{0.808}{A0(\omega_p)}$

Параметр T_i : $T_i := \frac{1}{\omega_p \cdot \sqrt{c}}$

Параметр T_d : $T_d := \frac{\sqrt{c}}{\omega_p}$

Висновок до розділу

Виконано дослідження динамічних показників якості розробленої САК ГПА. Завдяки аналізу частотних характеристик розімкненої системи та використанню класичної методики Зіглера–Ніколса, реалізовано процедуру пошуку оптимальних параметрів налаштування ПД-регулятора. Отримані результати дозволили мінімізувати тривалість перехідних процесів у системі та досягти необхідного запасу стійкості, що підтверджує високу ефективність запропонованого алгоритму керування в реальних умовах експлуатації компресорної станції.

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ САК

Експериментальні дослідження системи автоматичного керування (САК) виконуються із застосуванням програмного середовища Simulink [7], яке входить до складу пакета Matlab [6]. У середовищі Simulink реалізовано принцип візуального моделювання, за якого користувач формує модель досліджуваного об'єкта на основі стандартних бібліотечних блоків і виконує відповідні розрахунки. Такий підхід, на відміну від традиційного програмного моделювання, не потребує глибоких знань мов програмування та чисельних методів, а базується на загальних навичках роботи з комп'ютерними системами та фахових знаннях предметної області.

Simulink є відносно автономним інструментом середовища Matlab [7] і може використовуватись без детального опанування його основних функцій. Водночас забезпечується повна інтеграція з Matlab, що дозволяє застосовувати його обчислювальні можливості та додаткові інструментальні засоби безпосередньо в процесі моделювання. До складу пакета входять спеціалізовані розширення, які інтегруються в Simulink, зокрема LTI Viewer із Control System Toolbox для аналізу систем керування. Також доступні додаткові бібліотеки блоків для різних предметних областей, наприклад Power System Blockset для моделювання електроенергетичних систем або Digital Signal Processing Blockset для розробки цифрових пристроїв.

Під час роботи в Simulink користувач має можливість модифікувати стандартні бібліотечні блоки, створювати власні функціональні елементи та формувати нові бібліотеки. У процесі моделювання також доступний вибір методів розв'язання диференціальних рівнянь і способу організації модельного часу.

Перевага Simulink полягає також у тому, що він дозволяє поповнювати бібліотеки блоків за допомогою підпрограм написаних як мовою MATLAB, так і на мовах C++, Fortran й Ada.

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після відкриття основного вікна програми Matlab потрібно запустити програму Simulink. Це можна зробити одним із трьох способів:

- натиснути кнопку (Simulink) на панелі інструментів командного вікна Matlab.

- у командному рядку головного вікна Matlab [6] надрукувати Simulink і натиснути клавішу Enter на клавіатурі.

- виконати команду Open... у меню File і відкрити файл моделі (mdl - файл).

Останній варіант зручно використати для запуску вже готової й налагодженої моделі, коли потрібно лише провести розрахунки й не потрібно додавати нові блоки в модель. Використання першого й другого способів приводить до відкриття вікна оглядача розділів бібліотеки Simulink (рис.4.1).

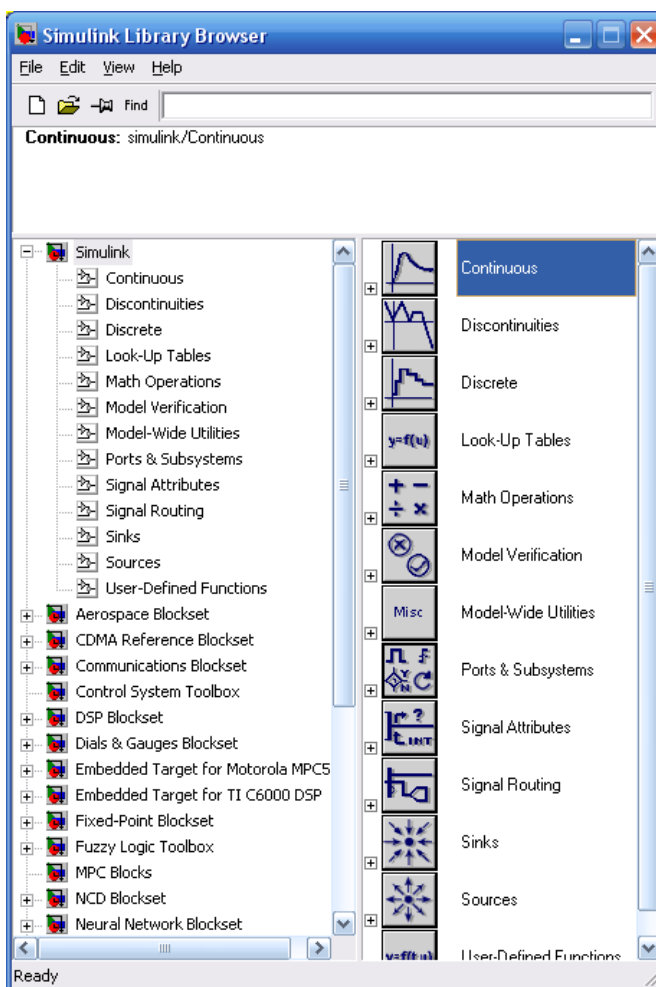


Рисунок 4.1 – Вікно оглядача розділів бібліотеки Simulink [7]

Вікно оглядача бібліотеки блоків містить наступні елементи (рис. 4.1):

1. Заголовок, з назвою вікна - Simulink Library Browser.

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Меню, з командами File, Edit, View, Help.
3. Панель інструментів, з ярликами найбільше часто використовуваних команд.
4. Вікно коментарю для висновку повідомлення, що пояснює, про обраний блок.
5. Список розділів бібліотеки, реалізований у вигляді дерева.
6. Вікно вмісту роздягнула бібліотеки (список вкладених розділів бібліотеки або блоків)
7. Рядок стану, що містить підказку по виконуваній дії.

На рис. 4.1 виділена основна бібліотека Simulink (у лівій частині вікна) і показані її розділи (у правій частині вікна).

Бібліотека Simulink містить наступні основні розділи:

1. Continuous - лінійні блоки.
2. Discrete - дискретні блоки.
3. Functions & Tables - функції й таблиці.
4. Math - блоки математичних операцій.
5. Nonlinear - нелінійні блоки.
6. Signals & Systems - сигнали й системи.
7. Sinks - пристрої, що реєструють.
8. Sources - джерела сигналів і впливів.
9. Subsystems - блоки підсистем.

Для створення моделі в середовищі Simulink необхідно послідовно виконати ряд дій:

- Створити новий файл моделі за допомогою команди File/New/Model, або використовуючи кнопку на панелі інструментів (тут і далі, за допомогою символу "/", зазначені пункти меню програми, які необхідно послідовно вибрати для виконання зазначеної дії).

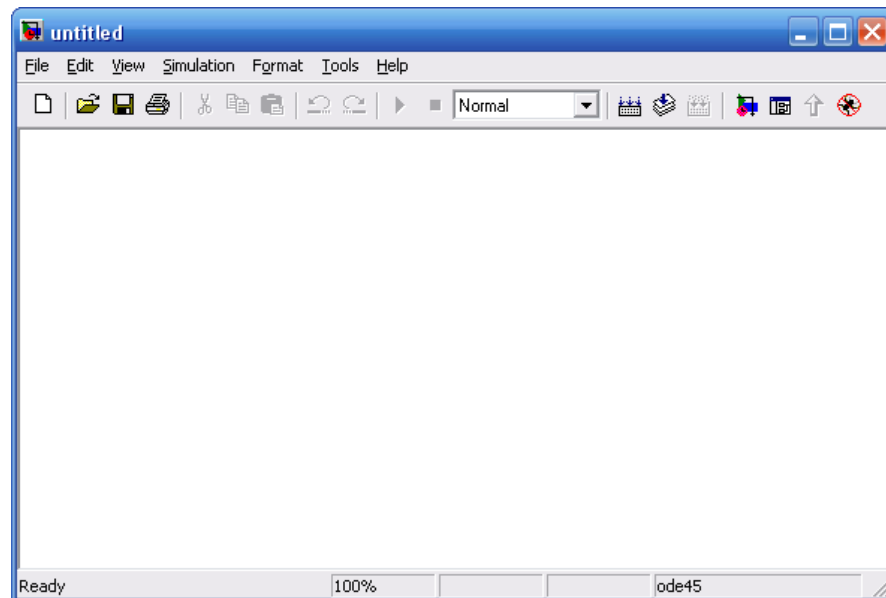


Рисунок 4.2 – Порожнє вікно моделі

- Розташувати блоки у вікні моделі. Для цього необхідно відкрити відповідний розділ бібліотеки (Наприклад, Sources - Джерела). Далі, указавши курсором на необхідний блок і нажавши на ліву клавішу "миші" - "перетягнути" блок у створене вікно.

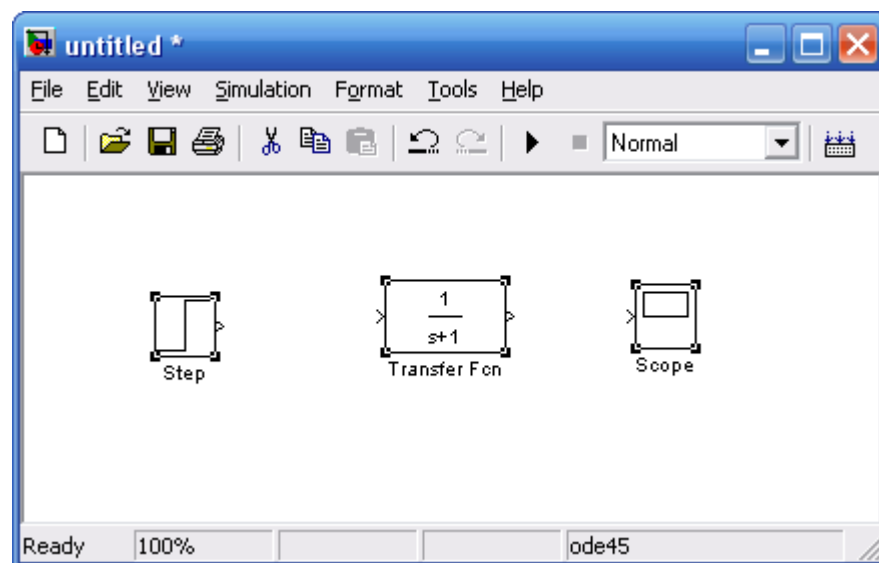


Рисунок 4.3 – Вікно моделі, що містить блоки

Для видалення блоку необхідно вибрати блок (вказати курсором на його зображення й нажати ліву клавішу "миші"), а потім нажати клавішу Delete на клавіатурі.

Для зміни розмірів блоку потрібно вибрати блок, установити курсор в один з кутів блоку й, нажавши ліву клавішу "миші", змінити розмір блоку (курсор при цьому перетвориться у двосторонню стрілку).

- Далі, якщо це потрібно, потрібно змінити параметри блоку, установлені програмою "за замовчуванням". Для цього необхідно двічі клацнути лівою клавішею "миші", указавши курсором на зображення блоку. Відкриється вікно редагування параметрів даного блоку. При завданні чисельних параметрів варто мати на увазі, що як десятковий роздільник повинна використатися крапка, а не кома. Після внесення змін потрібно закрити вікно кнопкою ОК (рис.4.3)

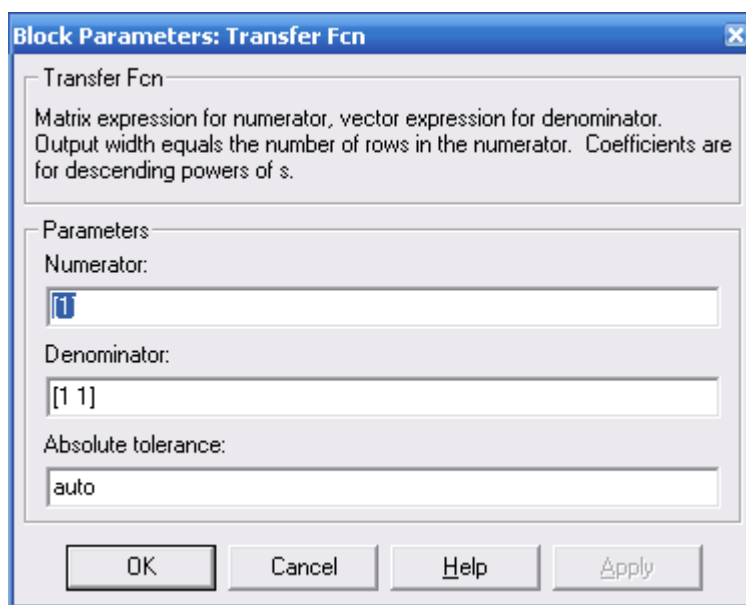
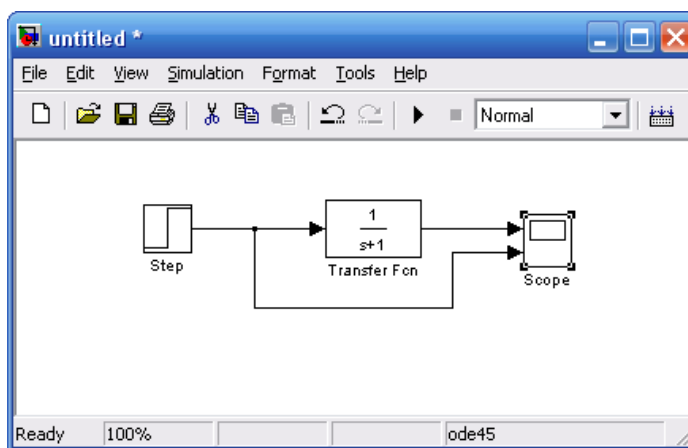


Рисунок 4.4 – Вікно редагування параметрів блоку передавальна функція

- Після установки на схемі всіх блоків з необхідних бібліотек потрібно виконати з'єднання елементів схеми. Для з'єднання блоків необхідно вказати курсором на "вихід" блоку, а потім, нажати й, не відпускаючи ліву клавішу "миші", провести лінію до входу іншого блоку. Після чого відпустити клавішу. У випадку правильного з'єднання зображення стрілки на вході блоку змінює колір. Для створення точки розгалуження в сполучній лінії потрібно підвести курсор до передбачуваного вузла й, нажавши праву клавішу "миші", простягнути лінію. Для видалення лінії потрібно вибрати лінію (так само, як це виконується для блоку), а потім нажати клавішу Delete на клавіатурі.

Схема моделі, у якій виконані з'єднання між блоками, показана на рис. 4.4.



Риунок 4.5 – Схема моделі

Після складання розрахункової схеми необхідно зберегти неї у вигляді файлу на диску, вибравши пункт меню File/Save As... у вікні схеми й указавши папку й ім'я файлу. Варто мати на увазі, що ім'я файлу не повинне перевищувати 32 символів, повинне починатися з букви й не може містити символи кирилиці й спецсимволи. Ця ж вимога ставиться й до шляху файлу (до тих папок, у яких зберігається файл). При наступному редагуванні схеми можна користуватися пунктом меню Fille/Save. При повторних запусках програми SIMULINK завантаження схеми здійснюється за допомогою меню File/Open... у вікні оглядача бібліотеки або з основного вікна Matlab [6].

Отже, експериментальна модель досліджувальної САК матиме вид:

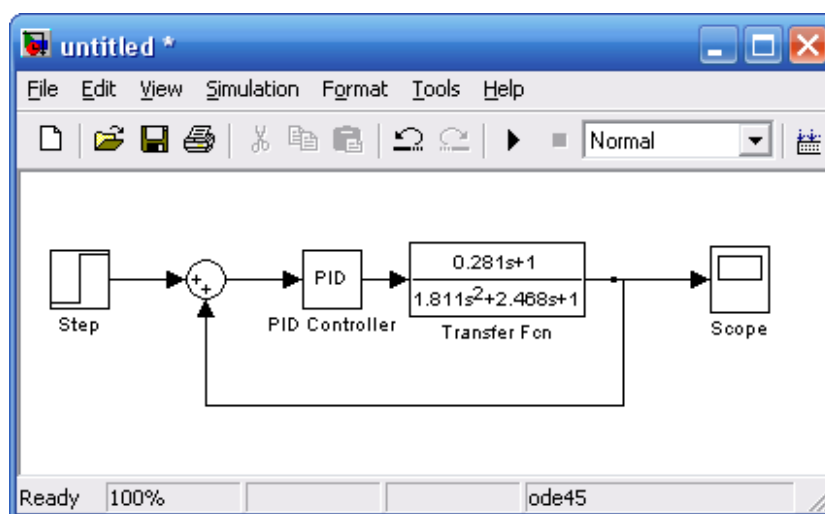


Рисунок 4.6 – Експериментальна модель САК

4.1 Методика досліджень та формування структурної схеми САК

На першому етапі здійснюється формування структурної схеми САК шляхом побудови моделі з використанням стандартних бібліотечних блоків Simulink. Далі виконується параметризація моделі, яка включає задання передавальних функцій, коефіцієнтів регуляторів та характеристик об'єкта керування.

На другому етапі обираються чисельні методи інтегрування диференціальних рівнянь та визначається режим моделювання (з фіксованим або змінним кроком інтегрування). Це забезпечує коректне відтворення динаміки системи в часі. Третій етап передбачає проведення серії імітаційних експериментів із подачею типових тестових впливів (ступінчастих, імпульсних або гармонічних сигналів) для оцінювання перехідних процесів та стійкості системи.

Пакет розширення NCD є частиною пакета Simulink [7] і наслідує всі аспекти роботи з ним. NCD Blockset має блоки подані на рис. 4.7, але основним блоком для параметричної оптимізації параметрів налаштування регулятора є блок NCD Output.

Розглянемо детальніше правила роботи з даним блоком.

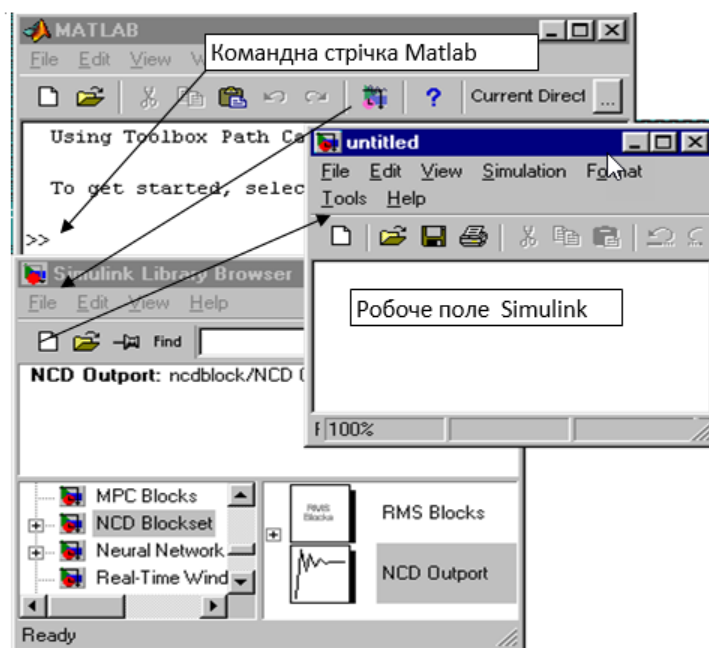


Рисунок 4.7 – знайомство з NCD Blockset

Типовий сеанс роботи в середовищі Simunink складається з низки стадій.

1. В середовищі Simunink створюється динамічна модель АСР.
2. Вхід блока NCD Output з'єднується з тим сигналом системи, на який накладають обмеження, в даному випадку регульовану координату.
3. В режимі командного рядка Matlab задають початкові значення параметрів, які підлягають оптимізації $K_p; K_I = 1/T_i; K_d = T_d$ – параметри налаштування регулятора.
4. Подвійним клацанням мишкою на піктограмі NCD Output“ розкривають “ його.
5. За допомогою миші потрібним чином змінюють конфігурацію й розміри областей обмежень на перехідну функцію регульованої координати.
6. З допомогою меню NCD Output Optimization►Parameters задають інтервал дискретизації (1% або 2% від тривалості процесу моделювання) і вказують параметри, які підлягають оптимізації (K_p, K_I, K_d).
7. Процес оптимізації у системі ініціалізується натисканням кнопки Start.

Розглянемо дану процедуру для оптимізації параметрів ПД-регулятора нашої САК. Необхідно налаштувати ПД-регулятор у САК з об'єктом керування заданим у вигляді:

$$W_0(s) = \frac{0.281s}{1.811s^2 + 2.468s + 1},$$

так щоб процес регулювання характеризувався наступними параметрами: максимальне перерегулювання – не більше 5%; час регулювання – не більше 2с.

У модель крім регулятора введене джерело вхідного сигналу у вигляді одиничного стрибка і блок типу NCD Output, який під'єднаний до виходу АСР. Клацнувши двічі по піктограмі PID -контролер необхідно у вікні налагодження задати параметри регулятора K_p, K_I, K_d .

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

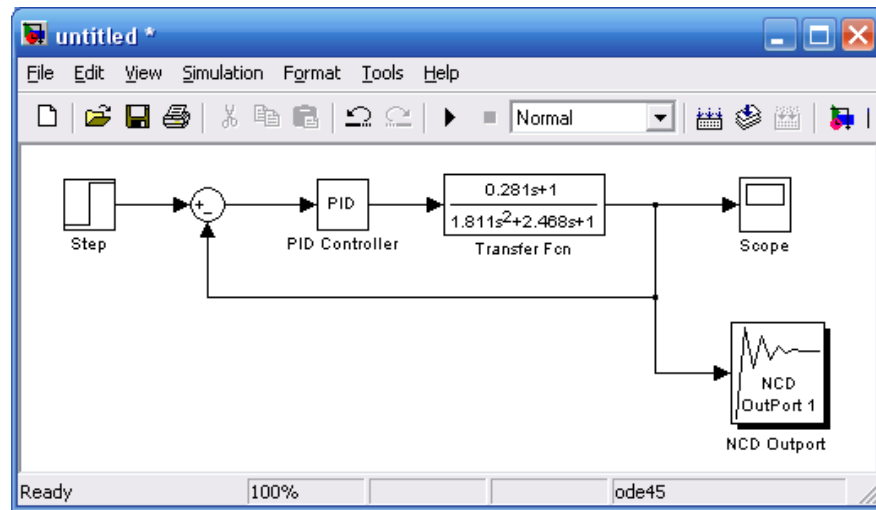


Рисунок 4.8 – Структурна схема синтезу моделі системи автоматичного керування

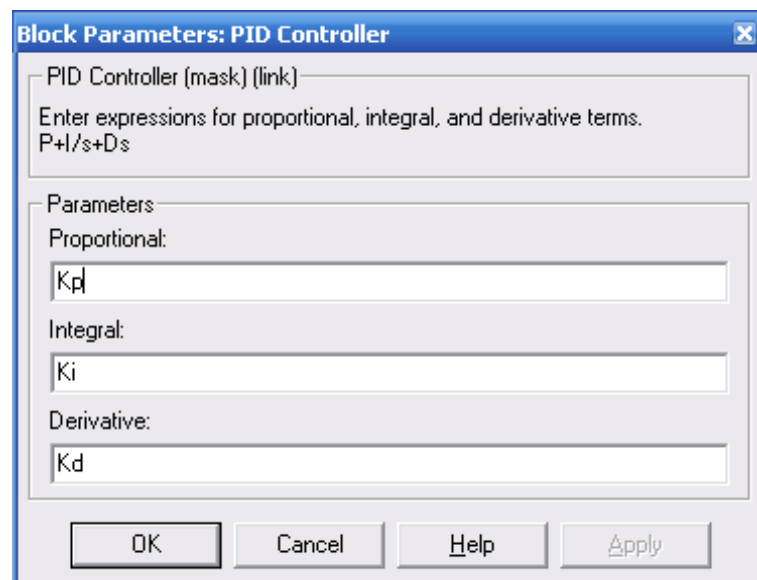


Рисунок 4.9 – Введення параметрів ПІД-регулятора

Далі у командній стрічці Matlab [6] задаємо початкові значення параметрів налагодження регулятора:

$$K_p=8.73$$

$$K_p = 8.7300$$

$$>> K_i=2.31$$

$$K_i = 2.3100$$

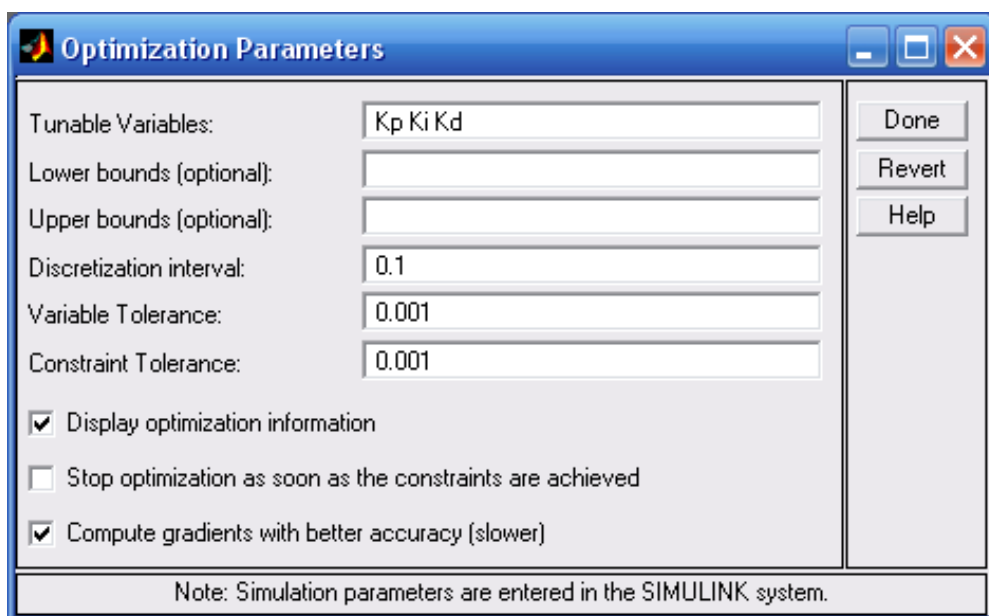
$$>> K_d=0.174$$

$$K_d = 0.1740$$

Початкове наближення параметрів доцільно визначити, користуючись спрощеною інженерною методикою (наприклад, Ціглера-Нікольса), або шляхом ручного підбору.

Відкриваємо вікно NCD Output і у його графічній частині, при допомозі миші, конструюємо обмеження на перехідну функцію, враховуючи поставлені вище вимоги. Треба намагатись, щоб перехідна функція якомога краще наближалась до заданих обмежень, інакше необхідно продовжити підбір параметрів.

Параметри, які підлягають оптимізації, установлюють у вікні, яке відкривається командою меню Optimization ► Parameters (рис. 4.10).



Рисунлк 4.10 – Введення параметрів оптимізації

Після завершення підготовчих етапів можна переходити до розв’язання задачі оптимізації, а запуск процедури пошуку параметрів налаштування здійснюється натисканням кнопки Start на панелі інструментів.

Знайдені величини оптимальних параметрів налаштування K_p, K_I, K_d можна отримати, набравши у командній стрічці імена даних параметрів:

>> K_p

$K_p = 6.25$

>> K_i

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$K_i = 1.86$

$\gg K_d$

$K_d = 0.35$.

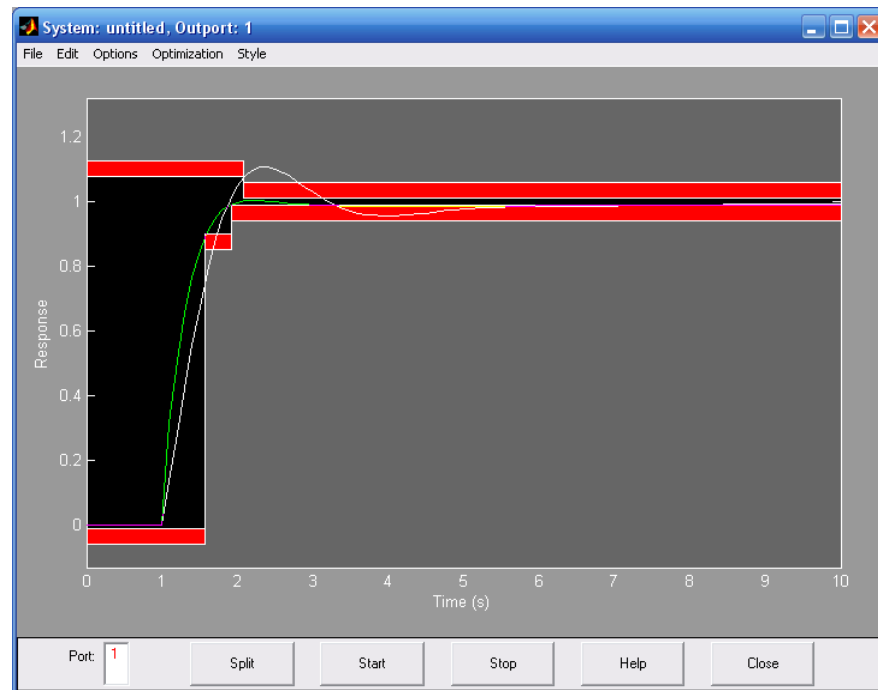


Рисунок 4.11 – Результати параметричної оптимізації

Показники якості:

- Перерегулювання $\sigma = 0\%$.
- Час регулювання $t = 2$ с.

Висновки до розділу

Завдяки проведеному комп'ютерному експерименту було синтезовано імітаційну модель САК ГПА в програмному комплексі Matlab/Simulink. Процедура параметричної оптимізації настроювальних характеристик регулювального пристрою дозволила досягти максимальної відповідності системи критеріям якості керування. Віртуальні випробування підтвердили покращення динамічних властивостей системи, високу швидкодію та її адекватну реакцію на зовнішні збурення.

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі на основі проведених теоретичних досліджень та комп'ютерного моделювання вирішено актуальне науково-технічне завдання, що полягає у синтезі ефективної системи автоматичного керування (САК) газоперекачувальним агрегатом із забезпеченням заданих показників якості регулювання технологічного процесу компримування газу.

За результатами виконання роботи сформовано такі основні висновки:

1. Проаналізовано сучасний стан типізації, методичні підходи та технічні рішення у сфері автоматизації компресорних станцій та управління режимами роботи ГПА. Узагальнення наявного досвіду дозволило обґрунтувати доцільність застосування ПД-регулювання та окреслити вектор подальшого математичного й програмного забезпечення для оптимізації досліджуваних процесів.

2. Оцінено характер динамічного впливу коефіцієнтів регулювального пристрою на показники перехідних процесів у контурі керування. На основі аналізу частотних характеристик розімкненого об'єкта (АФЧХ) та за допомогою інженерної методики Зіглера–Ніколса визначено базові настроювальні параметри регулятора, що гарантують стійкість замкненої системи за критеріями Гурвіца та Михайлова.

2. Синтезовано комплексну імітаційну модель САК ГПА в інтегрованому середовищі MATLAB/Simulink, яка адекватно відтворює динаміку процесу стиснення газу. Завдяки процедурі числової параметричної оптимізації уточнено значення коефіцієнтів регулятора, що дозволило мінімізувати динамічну похибку, скоротити час відпрацювання зовнішніх збурень та підтвердити високу працездатність і технологічну ефективність розробленої системи.

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Горбійчук М.І. Теорія автоматичного керування: [конспект лекцій] / М.І. Горбійчук: ІФНТУНГ, 2021. – 78 с.
2. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування/М.Г. Попович, О.В.Ковальчук– Київ: Либідь, 2007. – 200с.
3. Семенцов Г.Н. Інтегровані та адаптивні системи керування/ Г.Н. Семенцов, І.І. Чигур, Я.Р. Когуч, М.М. Дранчук – Івано-Франківськ: Факел, 2010. – 244с.
4. Семенцов Г. Н. Автоматизація неперервних технологічних процесів. Регулятори: [навч.посібн.] / Г. Н. Семенцов. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. – 201 с.
5. Когутяк М.І. Автоматизація неперервних технологічних процесів в нафтовій та газовій промисловості/ М.І. Когутяк. – Івано-Франківськ: Факел, 2006. – 286с.
6. Програмування у середовищі Matlab. Режим доступу: <http://www.mathworks.com/discovery/matlab-mapreduce-hadoop.html>
7. Моделювання у середовищі Simulink. Режим доступу: https://profbook.com.ua/index.php?route=product/product/download&product_id=7084&download_id=645&srsId=AfmBOoq5fn86Fi-fbhEVL0ULD-kX6Nd_-Lu3LEa40NTjaC7mWS_lpH7p

					БР.АКП ₃ -46.00.00.000ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		