

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
Теплоенергетичний факультет
Кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
в.о. завідувача кафедри

_____/ **Володимир ВОЛОЩУК**/
“ _____ ” _____ 2020 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою
**“Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології
кібер-енергетичних систем”**
зі спеціальності
**151“Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані
технології”**

на тему: Автоматизація котлоагрегату ТПП-210А з використанням
прогнозуючих моделей

Виконав: студент II курсу, групи ТА-91мп

Єфремов Олексій Юрійович

(прізвище ім’я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник Ст. викладач Любицький С.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”

Факультет Теплоенергетичний
Кафедра Автоматизації теплоенергетичних процесів
Рівень вищої освіти – другий(магістерський)

Спеціальність 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”

Освітньо-професійна програма (“Автоматизація та комп’ютерно -інтегровані технології кібер-енергетичних систем”)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

(підпис) /ВОЛОДИМИР ВОЛОЩУК/

“ “ _____ (ім’я, ПРІЗВИЩЕ)
_____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Єфремову Олексію Юрійовичу

(прізвище, ім’я, по-батькові)

1. Тема дисертації Автоматизація котлоагрегату ТПП-210А з використанням прогнозуючих моделей

науковий керівник дисертації Ст. викладач Любицький С.В.
(прізвище, ім’я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «6» листопада 2020 р. № 3247-с

2. Термін подання студентом дисертації «10» грудня 2020 р.

3. Об’єкт дослідження Прямоточний котлоагрегат ТПП-210А

4. Вихідні дані

Номінальна паропродуктивність котла – 950 т/год.

Температура вихідних газів – 147 °С

Температура холодного повітря – 30 °С

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

Дослідити динамічні властивості котлоагрегату; розробити математичну модель газоповітряного тракту; проаналізувати існуючі рішення для АСК газоповітряного тракту; розробити АСР горіння палива та АСР розрідження з використанням прогнозуючих моделей і провести порівняльний аналіз з системами, які використовують лінійні закони регулювання; провести тестування запропонованої системи на контролерній техніці; розробити стартап-проект.

6. Орієнтований перелік графічного (ілюстративного) матеріалу
структурні схеми систем регулювання; графіки перехідних процесів в системах регулювання

7. Орієнтований перелік публікацій

Єфремов О.Ю. Augmented reality technologies in production management systems // X Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Сучасний рух науки»;
Єфремов О.Ю. AR технології в промисловості // XVIII міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики»

8. Дата видачі завдання " 01 " вересня 2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Видача завдання	01.09.2020	
2	Пошук літературних джерел	08.09.2020	
3	Постановка задачі дослідження	22.09.2020	
4	Опис об'єкта керування	29.09.2020	
5	Розгляд існуючих АСР котла	6.10.2020	
6	Розробка математичної моделі газоповітряного тракту	13.10.2020	
7	Синтез типової АСК газоповітряного тракту	27.10.2020	
8	Синтез АСК газоповітряного тракту з використанням прогнозуючих моделей	10.11.2020	
9	Порівняльний аналіз створених систем	24.11.2020	
	Імітаційне моделювання	1.11.2020	
10	Стартап-проект	8.11.2020	
10	Оформлення дисертації	15.11.2020	
11	Підпис керівника магістерської дисертації	17.12.2020	
12	Попередній захист магістерської дисертації	18.12.2020	
13	Захист	22.12.2020	

Студент

_____ (підпис)

_____ (імя, ПРІЗВИЩЕ)

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

_____ (імя, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається зі вступу, чотирьох основних розділів, висновку та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 104 сторінок.

Експлуатація котельних агрегатів характеризується підвищеними вимогами до безпеки та екологічності. Тому метою дослідження є удосконалення системи керування таким об'єктом для підвищення ефективності та економічності його роботи. Об'єктом дослідження є газоповітряний тракт прямоточного парового котлоагрегату ТПП-210А.

Метою магістерської дисертації є створення автоматизованої системи керування газоповітряного тракту котлоагрегату з використанням прогнозуючих моделей та проведення порівняльного аналізу використання такого підходу зі стандартними методами регулювання.

Ключові слова: MPC, Simulink, автоматизована система регулювання, котлоагрегат.

SUMMARY

The master's dissertation consists of an introduction, four main sections, a conclusion, and bibliography. The total pages of the work are 104.

Increased requirements for safety and environmental friendliness is required for operation of boiler units. Therefore, the purpose of the research is to improve the control system of such an object to increase the efficiency and cost-effectiveness of its work. The object of the research is the gas-air path of the uniflow steam boiler ТПП-210А.

The purpose of the master's dissertation is to create an automated control system of the gas-air path of the boiler using predictive models and comparative analysis of the use of such an approach with standard control methods.

Keywords: MPC, Simulink, automated control system, boiler unit.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП.....	8
1. Огляд проблеми керування об'єктом.....	9
1.1 Складові елементи парового котла	9
1.2 Опис об'єкта керування.....	10
1.3 Прямоточний котлоагрегат як об'єкт керування	12
1.3.1 АСР економічного спалювання палива	13
1.3.2 АСР розрідження в топці котла	18
1.4 Характеристика режимів роботи котлоагрегату	20
1.5 Методи керування складними динамічними об'єктами	22
1.6 Система автоматичного керування з МРС – регулятором	23
1.7 Постановка задачі дослідження	26
2. Моделювання та синтез АСР	28
2.1 Математична модель газоповітряного тракту котла.....	28
2.2 Визначення витрати повітря та димових газів	29
2.3 Ідентифікація моделі	31
2.4 САР економічного горіння палива.....	34
2.4.1 Схема регулювання.....	34
2.4.2 Розрахунок каскадної системи.....	36
2.4.3 Розрахунок одноконтурної системи	45
2.5 САР розрідження в топці котла	48
2.5.1 Схема регулювання розрідження в топці котла	48
2.5.2 Розрахунок комбінованої системи.....	48
2.6 Створення АСР на основі МРС-регулятора	52
2.6.1 Представлення моделі в просторі станів	52
2.6.2 Створення структури МРС.....	54
2.6.3 Налаштування сценарію моделювання при нанесенні збурення.....	56
2.7 Порівняння результатів	59
2.8 Аналіз чутливості АСР економічного горіння палива.....	64
2.9 Аналіз чутливості АСР розрідження	76
3. Приклад технічної реалізації.....	80
4. Розробка стартап проекту.....	85
4.1 Опис ідеї проекту.....	85

4.2 Розроблення ринкової стратегії проекту	88
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	91
4.4 Обґрунтування ресурсів та витрат проекту	92
ВИСНОВОК	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	97

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ТЕС – теплова електрична станція.

ПЗ – програмне забезпечення.

ККД – коефіцієнт корисної дії.

ДО – димосос осьовий.

ДВ – дуттєвий вентилятор.

ПІ – пропорційно-інтегральний.

АСР – автоматизована система регулювання.

МРС – model predictive control.

НРЧ – нижня радіаційна частина.

ВРЧ – верхня радіаційна частина.

ПП – пароперегрівач.

ЦСТ – циліндр середнього тиску.

РП – регулятор повітря.

ST – structured text.

POU – program organization unit.

IDE – інтегроване середовище розробки.

ВСТУП

Автоматизація технологічних процесів є одним із суттєвих факторів збільшення продуктивності, підвищення якості виробництва, а також прибутковості підприємства. До того ж це дозволяє зменшити негативний вплив людського фактору. Надійність та ефективність роботи системи автоматизації залежить від правильно зроблених проектних розрахунків, якісно обраного обладнання та якості застосовуваного ПЗ для цієї системи.

Великий розвиток отримала автоматизація в сучасній енергетиці, в основі якої знаходяться теплові електричні станції. На ТЕС здійснюється перетворення хімічної енергії палива (газу, мазуту, вугілля тощо) в електричну енергію. Теплові електростанції на сьогоднішній день можна вважати одними з основних об'єктів з виробництва електроенергії у світі. Сумарно теплові станції забезпечують близько 2/3 від загального виробітку всіх електростанцій світу.

Експлуатація промислових водогрійних та парових котельних агрегатів характеризується підвищеними вимогами до безпеки та екологічності. Покращення якості роботи усіх систем котельного агрегату значно вплине як на економічну, так і на екологічну складову. Адже більшу частину шкідливих викидів в атмосферу складають продукти згоряння палива, яке потребує значних витрат.

Системи автоматичного регулювання основних технологічних параметрів газоповітряного тракту котла призначені для забезпечення безаварійного та ефективного управління котлом з метою стабілізації параметрів на заданому рівні в різних режимах роботи основного устаткування. В основу проектування систем регулювання котла покладений принцип створення систем на базі сучасних технічних засобів автоматики здатних забезпечити виконання всіх вимог технологічного регламенту та полегшити працю оператора – технолога.

1. Огляд проблеми керування об'єктом

1.1 Складові елементи парового котла

Паровим котлом називають технологічний агрегат для вироблення пари з тиском вище атмосферного за рахунок теплоти палива, що спалюється. У паровому котлі енергія палива перетворюється в потенційну енергію пари. У паровій турбіні кінетична енергія пари перетворюється в механічну енергію (обертання валу турбогенератора). В електричному генераторі механічна енергія перетворюється в електричну. Основним робочим тілом при виробленні електроенергії з енергії палива на теплових електростанціях є водяна пара.

Паровий котел, що використовує як паливо вугілля в пилоподібному стані, мазут або природний газ, складається з декількох пристроїв (економайзери, пароперегрівачі, топкові екрани та ін.). Для підготовки і транспортування палива служать відповідні подачі палива. Паливо через пальники надходить в топку парового котла, де згорає, віддаючи тепло різних поверхонь нагріву парового котла, заповненим основною робочою середовищем (водою, паром). Живильна вода насосом подається від підігрівачів високого тиску в паровий котел, проходить поверхні нагрівання, в яких випаровується. Пар перегрівається в пароперегрівачах і направляється до парової турбіни.

Основними робочими елементами парового котла є поверхні нагріву, які представляють собою металеві трубчасті поверхні. До числа поверхонь нагріву відносяться: економайзер, випарні поверхні, конвективні і ширмового пароперегрівачі, трубчасті і регенеративні підігрівачі повітря.

Економайзер - трубчаста поверхня нагріву, призначена для підігріву гарячими димовими газами живильної води, яка подається в котел живильним насосом.

Випарна поверхня котла - трубчаста поверхня нагріву, в якій здійснюється випаровування води за рахунок теплоти димових газів.

Повітропідігрівач - поверхня нагріву, призначена для підігріву первинного і вторинного повітря димовими газами.

Топка котла призначена для спалювання органічного палива, часткового охолодження продуктів згоряння за рахунок передачі теплоти топковим екранам і виділення з продуктів згоряння золи.

До числа допоміжного обладнання, що забезпечує роботу котла, відносяться: дуттьові вентилятори, димососи, пристрої пилоприготування та інші.

Дуттєвий вентилятор призначений для забору повітря з-під даху котельні та подачі його на підігрів в повітропідігрівач. Димосос призначений для викиду димових газів через димову трубу в атмосферу при температурі відхідних газів 120-160 ° С.

1.2 Опис об'єкта керування

Котельний агрегат потужністю 300 МВт типу ТПП-210А прямоточний, П-образної компоновки, спроектований для роботи на антрацитовому штибі (АШ) з рідким шлаковидаленням. Передбачена можливість спалювання донецького вугілля марки Т. Температура первинного перегріву дорівнює 565 ° С, ККД парового котла $\eta = 90\%$. Пальники в топці зроблені пило-газовими, а пилосистема обладнана запобіжними вибуховими клапанами. Розпалювальним паливом є мазут марок М40, М100.

Пароводяний тракт розділений на чотири потоки з самостійним регулюванням живлення і перегріву. Послідовність включення елементів пароводяного тракту наступна: після НРЧ включена ВРЧ, потім слідує екрани поворотної камери і стелі топки

Котлоагрегат ТПП-210А обладнаний: двома дуттьовими вентиляторами типу ВДН-24х2, двома регенеративними повітрянагрівачами типу РВВ-68МА та двома димососами типу ДОД-31,5. Регульовальний діапазон навантажень енергоблоку без зміни складу обладнання становить 300-225 МВт при роботі на пилувугільному паливі. Повздовжній розріз котлоагрегату зображено на рис. 1.1, а технологічна схема на рис. 1.2.

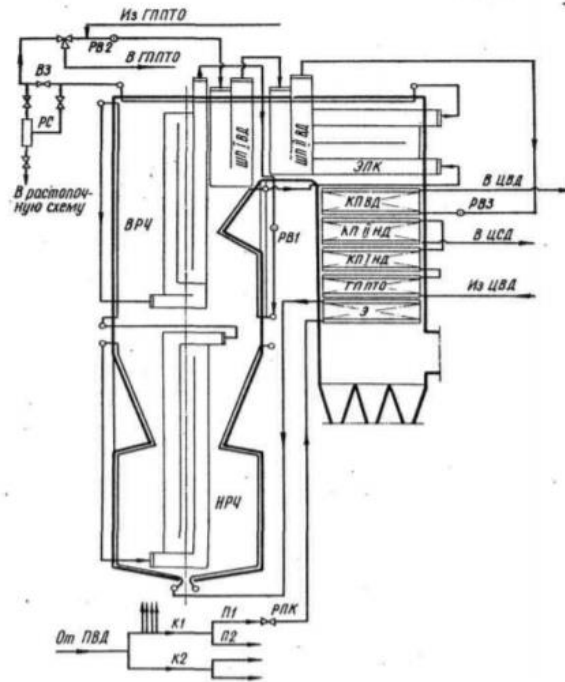


Рис. 1.1 Повздовжній розріз котлоагрегату ТПП-210А

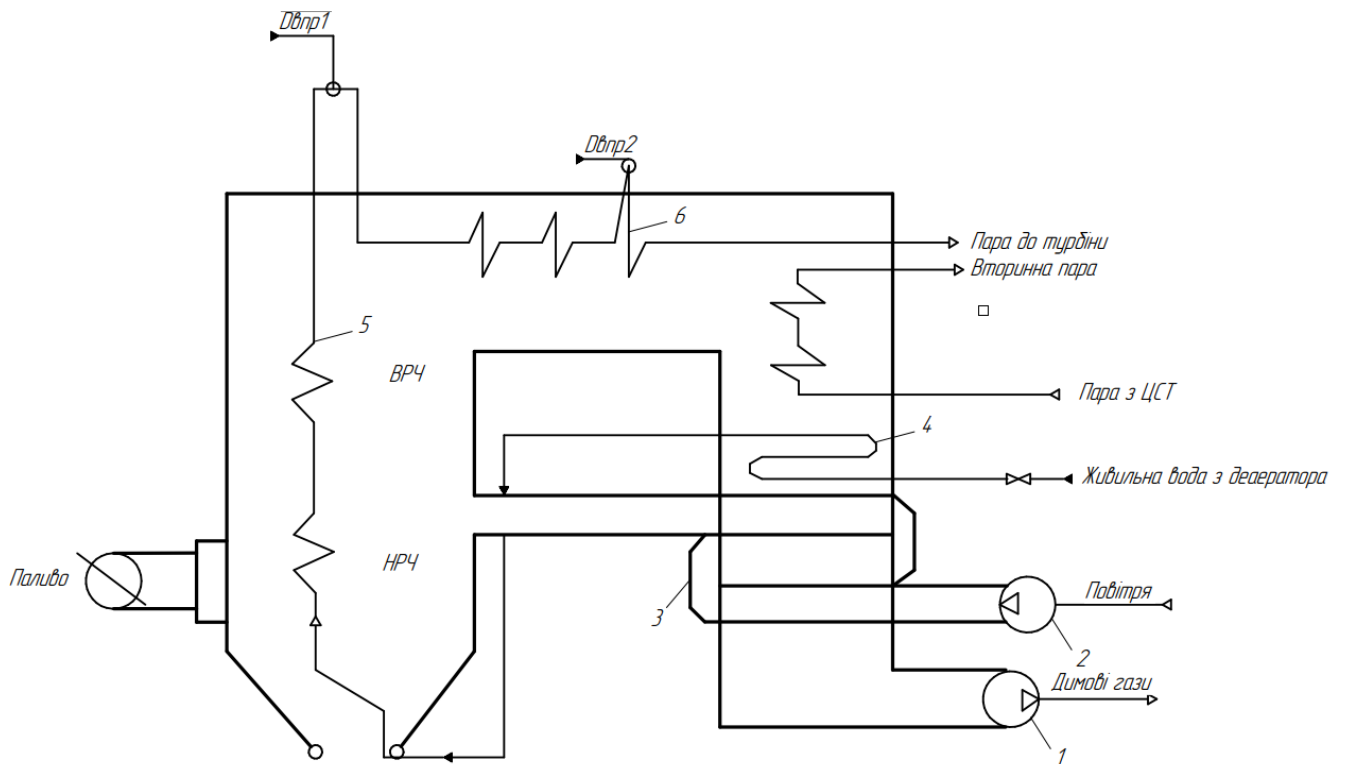


Рис. 1.2 Технологічна схема прямиоточного котлоагрегату

На рис. 1.2: 1 – димосос; 2 – дуттєвий вентилятор ; 3 – повітропідігрівач; 4 – водяний економайзер; 5 – радіаційний ПП; 6 – конвективний ПП

Основні технологічні параметри прямиоточного котла ТПП-210А зведені в Таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 - Основні технологічні параметри котла ТПП-210А (на один корпус)

Характеристика	Значення
Паропродуктивність, т/год	475
Тиск первинної пари, кгс/см ²	255
Температура первинної пари, °С	545
Витрата вторинної пари, т/год	400
Температура вторинної пари на виході з котла, °С	545
Температура вторинної пари на вході в котел, °С	307
Тиск вторинної пари на вході в котел, кгс/см ²	39.5
Температура вихідних газів, °С	147
Об'єм топки, м ³	2310

1.3 Прямоточний котлоагрегат як об'єкт керування

У прямоточному котлоагрегаті тісно пов'язані регулювання теплового та матеріального балансів. Спрощена схема зв'язків між вхідними та вихідними величинами представлена на рисунку 1.3.

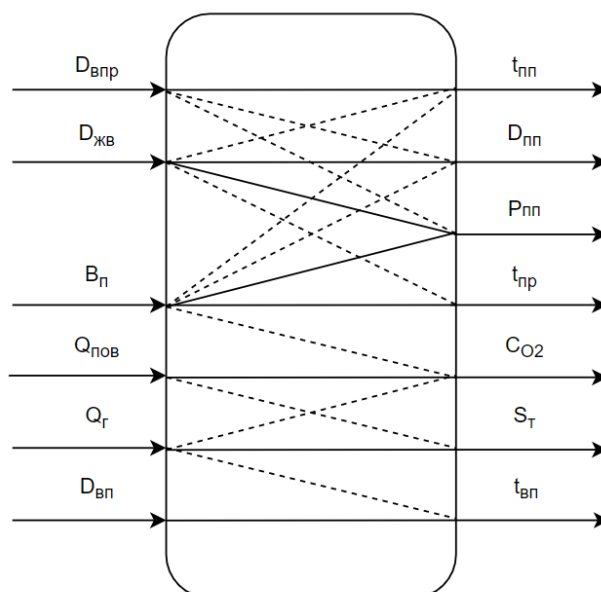


Рис. 1.3 Схема зв'язків між вхідними та вихідними величинами в прямоточному котлі

Як можна побачити зі схеми наприклад на розрідження в топці впливає витрата повітря та димових газів. Найскладнішим є регулювання температури (тиску) перегрітої пари, так як вона залежить від одночасного впливу багатьох вхідних величин, таких як витрата живильної води, палива та вприску охолоджуючої води. На відміну від барабанних котлів витрата на вприск займає 10 % номінальної продуктивності, а не 5%. Загалом АСР прямоочного котла складається з:

- АСР економічного процесу горіння;
- АСР розрідження в топці;
- АСР теплового навантаження;
- АСР перегріву пари
- АСР температурного режиму

Розглянемо детально АСР газоповітряного тракту котла, який можна поділити на АСР розрідження в топці котла та АСР економічного процесу горіння.

1.3.1 АСР економічного спалювання палива

Основним показником економічності горіння є так званий коефіцієнт надлишку повітря « α ». Значення коефіцієнта надлишку повітря можна оцінити за змістом вільного кисню в газах, які покидають топку, за наближеною формулою:

$$\alpha = 21 / (21 - O_2) \quad (1.1)$$

Також коефіцієнт можна виразити як відношення дійсної витрати повітря, необхідної для повного згорання палива до теоретично необхідної.

$$\alpha = \frac{V_{\text{дійсне}}}{V_{\text{теор}}} \quad (1.2)$$

Його значення тісно пов'язане з величиною втрат теплоти з димовими газами та втрат від механічного та хімічного недопалу палива. Залежність ККД котла від теплових втрат виражається наступною формулою:

$$\eta_k = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \quad (1.3)$$

де q_2 – втрати з димовими газами; q_3 – втрати теплоти через неповноту згоряння палива; q_4 – втрати через хімічний недопал; q_5 – втрати від зовнішнього охолодження; q_6 – втрати з теплом шлаків.

Збільшення втрат теплоти пояснюється зниженням температури в топці і зменшенням швидкості хімічної реакції горіння палива. Залежність ККД та теплових втрат від α наведені на рис. 1.4.

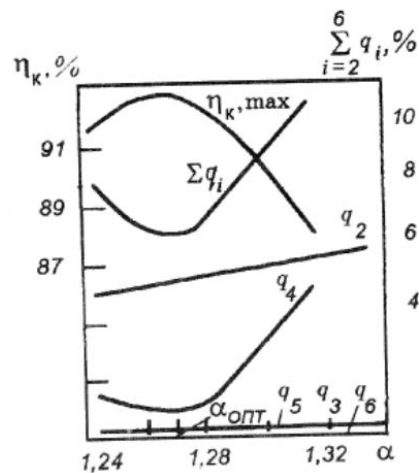


Рис. 1.4 Графік залежності ККД котла та теплових втрат від коефіцієнту надлишку повітря

Як можна побачити на рис. 1.4 теплові витрати q_i зменшуються при меншому коефіцієнту надлишку повітря, а η_k (ККД) збільшується.

Взагалі одним з найкращих непрямих методів оцінювання економічності процесу горіння можна вважати аналіз складу димових газів, які з'являються в процесі згоряння палива. Залежність ККД котла та концентрації компонентів димових газів від коефіцієнту надлишку повітря наведено на рис. 1.5.

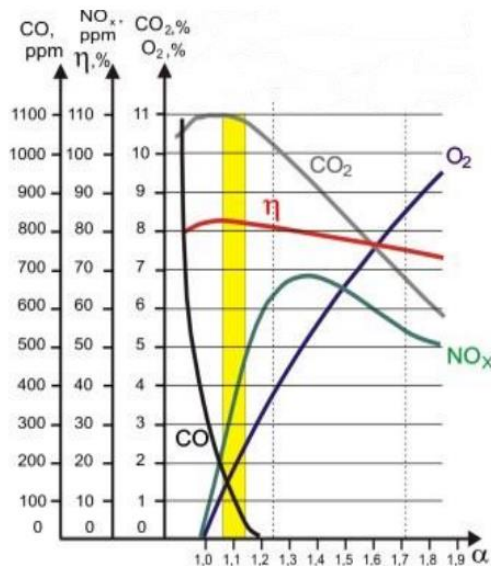


Рис. 1.5 Залежність ККД котла та концентрації компонентів димових газів від коефіцієнту надлишку повітря

Як видно з рисунку підтримка коефіцієнту надлишку повітря в оптимальних межах також допоможе зменшити викид шкідливих речовин в атмосферу. Оптимальне значення цього коефіцієнту знаходиться в межах 1.05 – 1.2 в залежності від котлоагрегату.

Основним способом регулювання надлишку повітря є зміна кількості цього повітря, яке подається в топку за допомогою дуттьових вентиляторів. Існує кілька варіантів схем автоматичного управління подачею повітря в залежності від способів непрямой оцінки економічності процесу горіння по співвідношенню різних сигналів.

Схема «паливо – повітря»

Якщо вимірювання витрати палива виконуються точно, то для підтримки оптимального надлишку повітря можна використовувати схему на рис. 1.6.

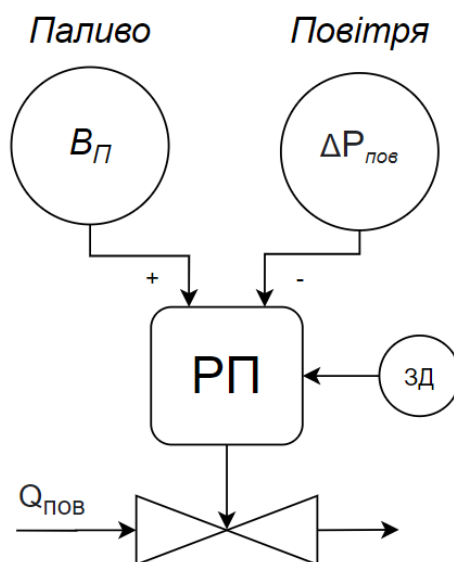


Рис. 1.6 Схема «паливо – повітря»

На схемі $V_{\text{п}}$ – витрата палива; $\Delta P_{\text{пов}}$ – перепад тиску на звужуючому пристрої; РП – регулятор палива; $Q_{\text{пов}}$ – витрата повітря.

Якщо використовується така схема, то просто порівнюється сигнали перепаду тиску з газопроводу та повітропідігрівача. Різниця цих сигналів подається на вхід регулятора повітря, який керує продуктивністю дуттьового регулятора. Але неперервне вимірювання витрати твердого палива є складним завданням, тому дану схему доцільно використовувати лише при наявності рідкого або газоподібного палива постійного складу.

Схема «теплота – повітря»

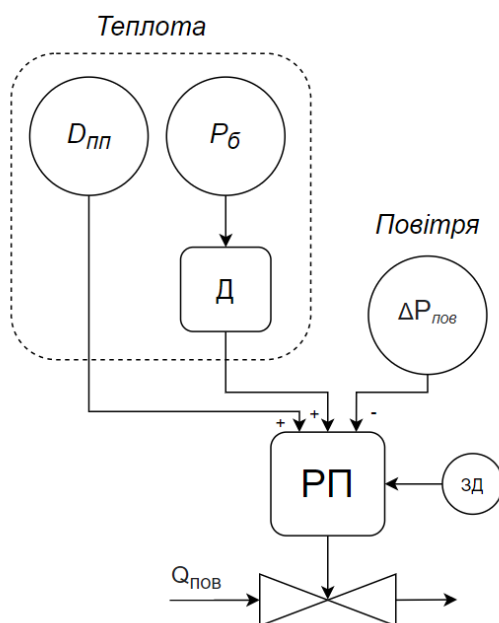


Рис. 1.7 Схема «теплота – повітря»

На схемі $D_{пп}$ – витрата перегрітої пари; $\Delta P_{пов}$ – перепад тиску на звужуючому пристрої; $P_б$ – тиск в барабані котла; РП – регулятор палива; $Q_{пов}$ – витрата повітря; Д – диференціатор.

Ця схема підходить для барабанних котлів. Тепловиділення в топці можна оцінити по витраті перегрітої пари и швидкості зміни тиску пари в барабані котла. Відповідне заданому тепловиділенню значення витрати повітря можна виміряти по перепаду тисків на звужуючому пристрої встановленому на повітропідігрівачі. Різниця цих сигналів і використовується в якості вхідного сигналу регулятора економичності.

Схема «завдання – повітря»

Так як концентрація O_2 в димових газах характеризує надлишок повітря за формулою (1.1), то можна використовувати значення концентрації в якості вхідного сигналу регулятора. Проте через значну інерційність роботи газоаналізаторів набули поширення схеми регулювання не з прямим, а з коригуючим впливом по концентрації O_2 . Одна з таких схем, а саме схема регулювання економичності за співвідношенням «завдання – повітря» з додатковим сигналом за змістом O_2 в димових газах наведена на рис. 1.8.

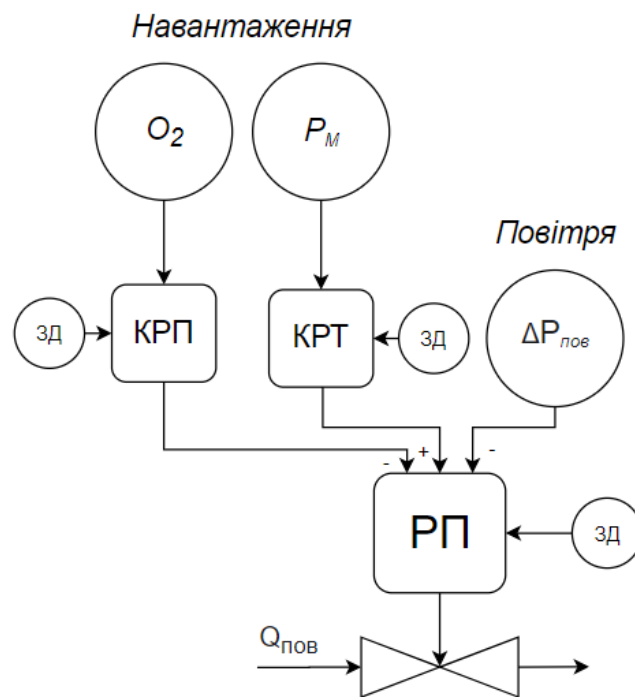


Рис. 1.8 Схема «навантаження – повітря»

На схемі O_2 – концентрація кисню в димових газах; $\Delta P_{\text{пов}}$ – перепад тиску на звужуючому пристрої; P_m – тиск перегрітої пари; РП – регулятор палива; $Q_{\text{пов}}$ – витрата повітря; КРТ – коригуючий регулятор тиску перегрітої пари (регулятор завдання по навантаженню), КРП – коригуючий регулятор повітря (по концентрації кисню).

Введення додаткового коригуючого сигналу підвищує точність підтримки оптимального надлишку повітря в будь-якій системі регулювання економічності. Насправді це не всі можливі схеми регулювання. Наприклад при недостатній кількості кисню можна спостерігати значне підвищення концентрації чадного газу (СО) у димових газах, що було зображено на рис. 1.5. Тоді можна побудувати схему регулювання економічності горіння, яка базується на вимірюванні концентрації СО. Таке регулювання буде зводитися до підтримки режиму на межі хімічного недопалу, не допускаючи значної перевитрати палива.

Проте найоптимальнішим буде використовувати для регулювання інформацію про декілька основних компонентів димових газів. Наприклад одночасне використання інформації про вміст кисню, чадного газу та трьохатомних газів (основні компоненти димових газів) дозволить значно підвищити точність регулювання процесу горіння.

1.3.2 АСР розрідження в топці котла

АСР розрідження призначена для підтримки постійного розрідження у верхній частині топки, який характеризує спільну роботу дуттєвих вентиляторів, що нагнітають повітря в топку, та димососів, які відводять димові гази, при різних режимах роботи котлоагрегату та видах палива, що спалюється. Об'єктом регулювання являється газовий тракт від газоходу до димососу. Характерними особливостями даного об'єкта регулювання є досить мала інерційність та значні пульсації підтримуваного параметра, які залежать від пульсацій витрат палива і повітря.

Зростання St (розрідження) може привести до зриву факела і останову котла (спрацьовує захист по загасанню факела). Зменшення St може привести до вибивання продуктів згорання з топки котла в виробничі приміщення за рахунок

збільшення витрати повітря вище допустимого значення при незмінному відводі димових газів.

Завдяки своїй простоті і надійності, найбільшого поширення набула схема регулювання розрідження з ПІ-регулятором. Регулювання розрідження зазвичай здійснюють за допомогою зміни кількості газів, відсмоктуються димососами. При цьому їх відведення можна регулювати:

- зміною положення дросельних заслінок (на рис.1.9 крива 1);
- зміною положення напрямних апаратів (на рис.1.9 крива 2);
- швидкісним регулюванням (змінюючи частоту обертання) (на рис.1.9 крива 3);

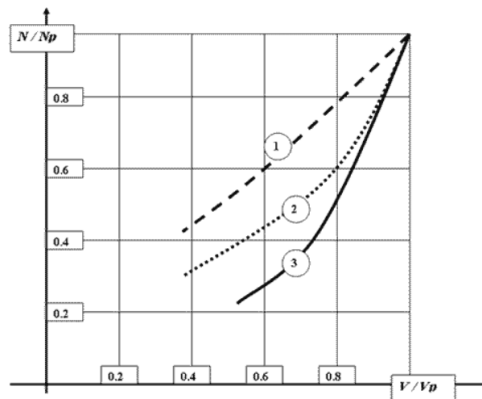


Рис. 1.9 Порівняння різних способів регулювання за питомими витратами електричної енергії на привід димососів

З графіків видно, що при навантаженнях відмінних від 100% найбільш економічним є швидкісний спосіб реалізації регулюючого впливу. Загалом схема регулювання розрідження в топці наведена на рис. 1.10.

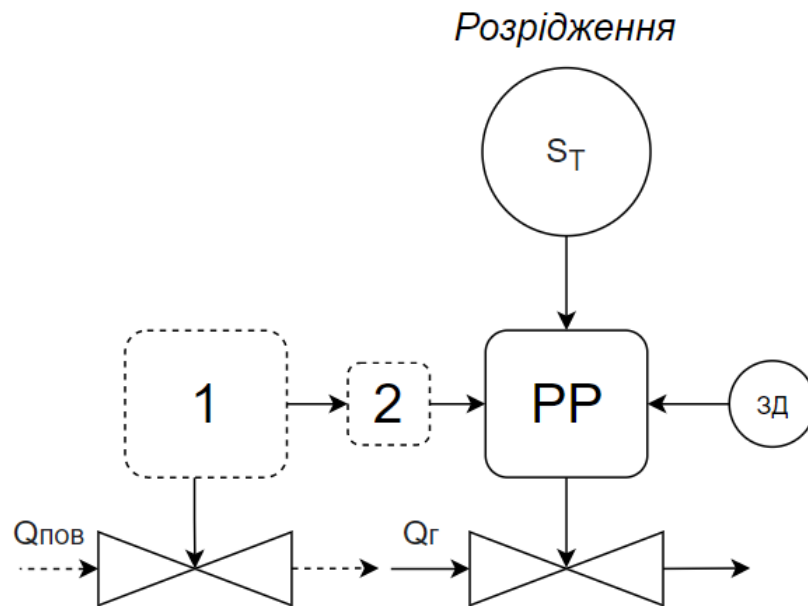


Рис. 1.10 Схема регулювання розрідження в топці

Робота регулятора повітря (1) призводить до тимчасового порушення матеріального балансу між повітрям і димовими газами. Для попередження цього порушення і збільшення швидкодії регулятора розрідження (PP) рекомендують ввести на його вхід додатковий сигнал з регулятора повітря через пристрій динамічної зв'язки (2). Як пристрій динамічної зв'язки використовують аперіодичну ланку, вихідний сигнал якої надходить на вхід регулятора розрідження лише в моменти переміщення виконавчого механізму регулятора повітря.

1.4 Характеристика режимів роботи котлоагрегату

Електрична енергія, яку виробляє електростанція, використовується як для технологічних потреб, так і для потреб населення. Електроенергія використовується на промислових та сільськогосподарських підприємствах, комунальних господарствах, для опалення житлових будинків і т.д. Кожен вид споживача характеризується власним графіком навантажень. Графіки навантажень можуть бути зняті і побудовані для будь-якого проміжку часу або для будь-якого періоду технологічного процесу. На практиці найбільший інтерес представляють добові (рис. 1.11) і річні графіки навантажень (1.12).

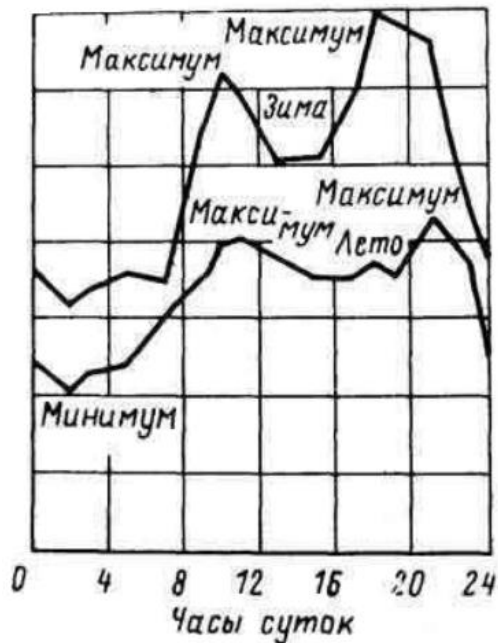


Рис. 1.11 Добовий графік навантажень

Добові графіки навантажень показують послідовність зміни навантаження протягом доби. З рис. 1.12 видно, що електричне навантаження взимку більше, ніж влітку і різко знижується в нічні години. Найменше її значення називають мінімумом навантаження. У денні та вечірні години спостерігається підвищення навантаження, причому більш значна зміна - взимку.

На основі характерних добових графіків можуть бути побудовані річні графіки навантажень. Річні графіки навантажень, як правило, характеризують тривалість існування навантаження будь-якої величини в часі. У зв'язку з цим їх називають «графіками по тривалості» і вони представляють собою впорядковані діаграми, на яких функції зображені спадаючими від максимальних значень до мінімальних.

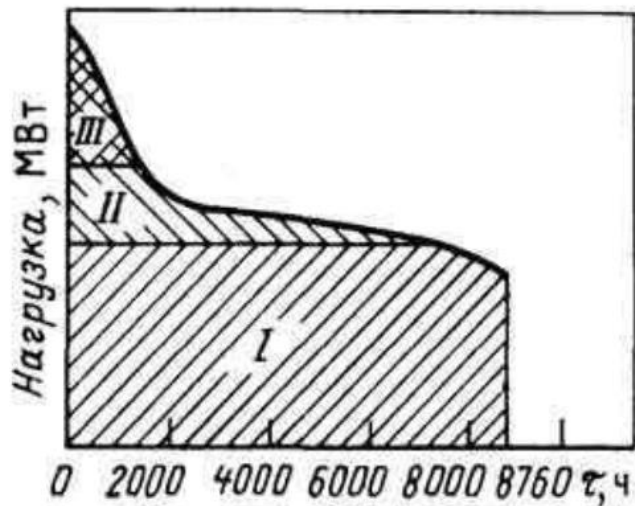


Рис. 1.12 Річний графік навантажень

Навантаження, характерне для найбільшого числа годин роботи, називають базовою (I); для найменшого - пікової (III). Станції, що працюють в режимі максимального навантаження значну частину року і тим самим беруть участь у покритті нижньої частині графіка тривалості навантаження, називають базовими; станції, що використовуються протягом невеликої частини року тільки для покриття пікового навантаження - піковими. Крім того, в системі є ряд електростанцій, що несуть проміжну (II) навантаження між базовою і піковою.

Котлоагрегат ТПП-210А має 4 режими роботи:

- Режим 1 – (215-225 МВт навантаження енергоблоку);
- Режим 2 – (230-250 МВт навантаження енергоблоку);
- Режим 3 – (260-280 МВт навантаження енергоблоку);
- Режим 4 – (290-300 МВт навантаження енергоблоку);

При різних навантаженнях котлоагрегата, його параметри будуть змінюватися, що значно ускладнює керування. Існують різні способи керувати такими складними динамічними об'єктами. Як показала практика, керування такими об'єктами за допомогою традиційних лінійних законів регулювання не завжди дозволяє домогтися необхідної якості керування. Тому для управління такими складними динамічними об'єктами знайшли широке застосування наступні методи.

1.5 Методи керування складними динамічними об'єктами

По-перше це використання адаптивних систем, в яких алгоритм керування змінюється автоматично в залежності від зміни параметрів об'єкту. За характером змін в керуючому пристрої адаптивні системи ділять на дві великі групи:

- самоналагоджувальні (змінюються лише значення параметрів регулятора);
- самоорганізуючі (змінюється структура самого регулятора).

В таких системах можуть бути використані комбінації лінійних регулюючих законів. Наприклад, якщо відомо, що з одним законом регулювання відбувається швидка зміна початкової настройки, але з великими подальшими коливаннями, а

при іншому - повільна зміна, але відсутність коливань, то можна спочатку використати перший, а коли відхилення досягне певного значення застосувати другий. Використовуючи даний підхід, ми отримуємо процес регулювання без характерних для ПІ- і ПІД-регуляторів коливань і перерегулювання, при малому часу регулювання.

По-друге – використання систем на базі нечіткої логіки. На відміну від традиційної математики, що вимагає на кожному кроці моделювання точних і однозначних формулювань закономірностей, нечітка логіка пропонує інший підхід, при якому потребується лише мінімальний набір залежностей. У порівнянні з імовірнісним методом, нечіткий метод дозволяє різко скоротити обсяг обчислень, що, в свою чергу, призводить до збільшень швидкодії нечітких систем.

Ключовими поняттями нечіткої логіки є:

- фазифікація - зіставлення безлічі значень аргументу (x) деякої функції приналежності $M(x)$, тобто перетворення значень (x) в нечіткий формат.
- дефазифікація - процес, зворотний фазифікації.

Всі системи з нечіткою логікою функціонують за одним принципом: показання вимірювальних приладів фазифікуються (переводяться в нечіткий формат), обробляються, дефазифікуються і у вигляді звичних сигналів подаються на виконавчі пристрої.

По-третє – системи з використанням нейронних мереж. Але основним недоліком таких систем є неможливість передбачення ситуацій, які не враховувалися при навчанні нейронної мережі, та тривалість навчання останньої.

Ще одним варіантом є використання систем на основі прогнозуючих моделей, які детальніше розглянемо в наступному розділі.

1.6 Система автоматичного керування з МРС – регулятором

Керування з прогнозуючими моделями почало застосовуватися ще з початку 80-х років. Загалом таке керування є покращенням класичного з негативним зворотним зв'язком, в якому враховується прогнозування поведінки об'єкта. Зворотній зв'язок в такого виду системах використовується для коригування похибок, які пов'язані з зовнішніми збуреннями та неточністю математичної

моделі об'єкта керування. Схема системи автоматичного керування з MPC-регулятором представлена на рис. 1.13.

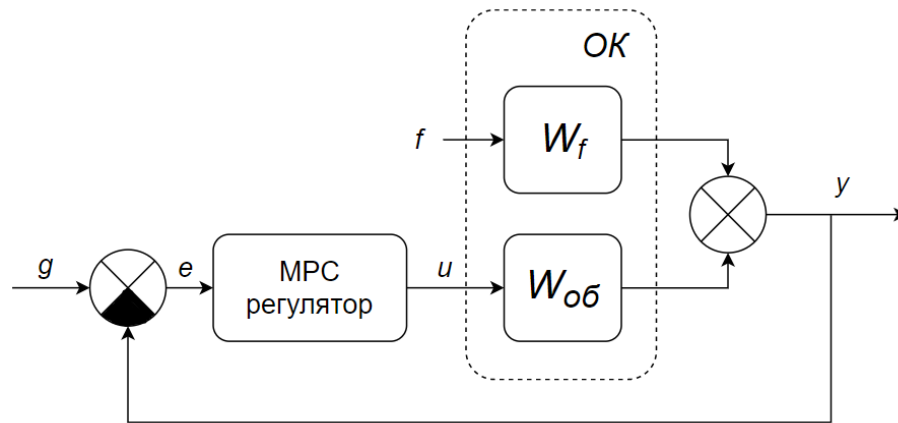


Рис. 1.13 Схема системи автоматичного керування з MPC-регулятором

Наведені на рис. 1.13 змінні мають наступне значення: g – уставка; f – збурення; u – керуюча дія; W_f – канал об'єкта по збуренню; $W_{об}$ – канал об'єкта по керуванню; y – контрольована змінна; e – похибка керування.

Структурна схема MPC регулятора представлена на рис. 1.14. До складу регулятора входить прогнозуюча модель та блок оптимізації.

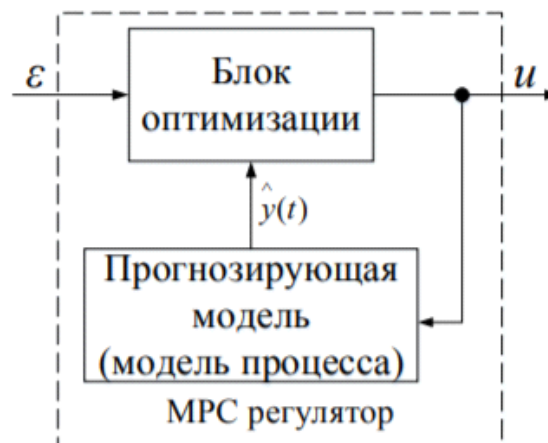


Рисунок 1.14 Структурна схема MPC-регулятора

Основну ідею керування з використанням прогнозуючої моделі можна представити в такий спосіб: ϵ – вхід об'єкта по керуванню $u(t)$ і $y(t)$ – вихідна контрольована змінна. Розглянемо систему в дискретному часі, тобто тільки в моменти часу $t = k \cdot \Delta T$, при цьому ΔT – деякий період квантування, а k – деяке ціле число.

Основною особливістю управління за допомогою MPC регулятора є наявність математичної моделі об'єкта управління, яка досить точно описує його поведінку. Наявність адекватної математичної моделі об'єкта управління дозволяє прогнозувати значення контрольованої змінної на певне число кроків вперед (рис. 1.15).

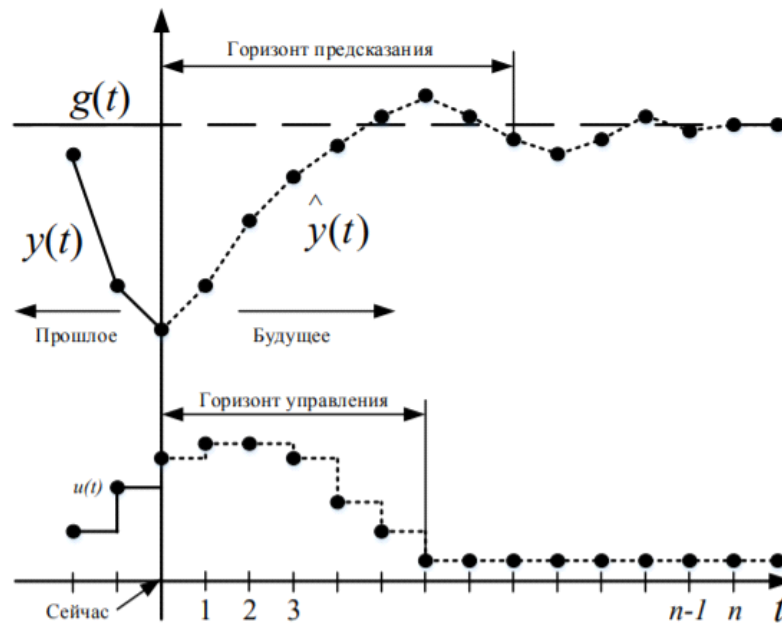


Рис. 1.15 Графічне представлення концепції керування за допомогою MPC-регулятора

Значення контрольованої змінної $y(t)$, передбачені в певний момент часу t , на рис. 1.15 позначені таким чином $\hat{y}(t)$. Горизонт передбачення будується на певне число тактів. Прогнозована траєкторія контрольованої змінної буде залежати від майбутніх значень керуючого впливу $u(t)$.

Суть методу полягає в знаходженні деякої послідовності значень керованої змінної $u(t)$, яка дозволить забезпечити найкращу прогнозовану траєкторію для контрольованої змінної $y(t)$. Довжина послідовності керуючих впливів $u(t)$ є фіксованою величиною і називається горизонтом керування. Шукана послідовність значень керуючого впливу визначається в результаті рішення деякої задачі оптимізації. Вибір найкращої траєкторії контрольованої змінної визначається показниками якості управління [1].

У роботі застосовується показник якості, який містить квадрат різниці між прогнозованою вихідною змінною об'єкта керування $y(t)$ та бажаною траєкторією

$g(t)$. При виборі оптимальних значень керованої змінної $u(t)$, регулятор прагне мінімізувати значення, яке розраховується за наступною формулою:

$$J = Q * \sum_{i=1}^p (y(k+i) - g(k+i))^2 + R * \sum_{i=0}^{m-1} u^2(k+i), \quad (1.4)$$

де: Q і R - вагові коефіцієнти, p - число тактів, на які будується прогноз поведінки контрольованого змінної $y(t)$ (prediction horizon), m - довжина послідовності майбутніх значень керуючого впливу $u(t)$ (control horizon).

Після подачі на об'єкт управління першого елемента обчисленої оптимальної послідовності керуючого впливу $u(t)$, на наступному такті вся процедура повторюється заново, з урахуванням нової інформації.

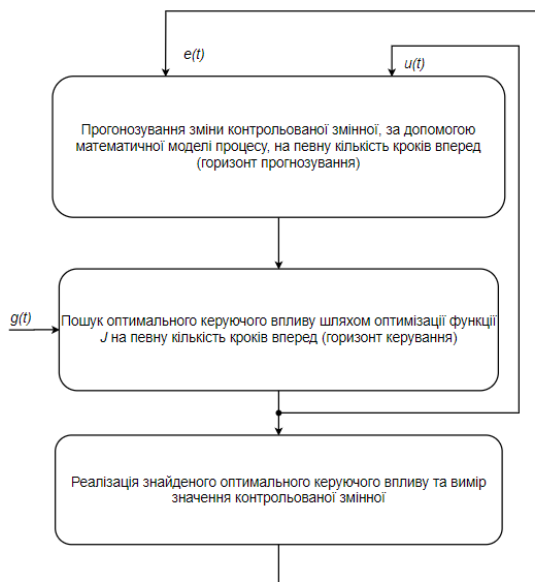


Рис. 1.16 Алгоритм функціонування MPC-регулятора

В середовищі розробки Matlab вже присутня реалізація MPC-логіки. Model Predictive Control Toolbox надає функції і блоки Simulink для проектування і моделювання регуляторів для управління з прогнозуючими моделями. Інструмент дозволяє вказати моделі об'єктів керування і збурень, горизонти та обмеження.

1.7 Постановка задачі дослідження

Як правило, в наш час більшість технологічних процесів (установок), що зустрічаються на сьогоднішній день в промисловості, представляють з себе складні динамічні об'єкти. Як показала практика, керування такими об'єктами за

допомогою традиційних лінійних законів регулювання не завжди дозволяє домогтися необхідної якості керування. Тому для управління складними динамічними об'єктами можна застосувати регулятори на основі прогнозуючої моделі - MPC регулятори (Model Predictive Control). Маючи адекватну математичну модель такий регулятор буде прогнозувати зміни параметрів об'єкту на певний проміжок часу вперед, що забезпечить більш оптимальне регулювання.

2. Моделювання та синтез АСР

2.1 Математична модель газоповітряного тракту котла

Газо-повітряний тракт котла складається з газоходу і повітропроводу. Регульованими параметрами газоповітряного тракту котла є відхилення від номінального значення концентрації кисню у вихідних газах ΔC_{O_2} і відхилення розрідження в топці котла ΔP_p . При виведенні диференціальних рівнянь газоходу і повітропроводу, як ділянок регулювання розрідження в топці, були прийняті наступні допущення: газохід після димососа і повітропровід після дуттєвого вентилятора дуже короткий і що зворотною реакцією тиску в топці на витрату мазуту і повітря на вході можна знехтувати; акумулююча ємність топки і газоходів зосереджена в одному обсязі, а дроселююча здатність газоходів і поверхонь нагріву зосереджена в одній точці [2].

Динамічні властивості повітропроводу, що визначаються залежністю між зміною подачі повітря в топку котла і продуктивністю дуттєвого вентилятора описуються рівнянням виду:

$$T_2 \Delta \ddot{M}_L + T_1 \Delta \dot{M}_L + \Delta M_L = k_2 \Delta \dot{\phi}_B + k_1 \Delta \phi_B \quad (2.1)$$

Залежність концентрації кисню при згорянні палива від витрати повітря може бути апроксимована у вигляді:

$$T_4 \Delta \ddot{C}_{O_2} + T_3 \Delta \dot{C}_{O_2} + \Delta C_{O_2} = k_4 \Delta M_L(t - \tau) + k_3 \Delta M_B(t - \tau) \quad (2.2)$$

де τ - час транспортного запізнювання (приймається рівним інерційності самого газоаналізатора). Числові коефіцієнти рівняння розраховуються за допомогою аеродинамічних характеристик газоходу та димососа.

Регульованою величиною є відхилення тиску в топці ΔP від заданого значення; вхідною величиною (регулюючим впливом) - зміна продуктивності димососа. В якості збурення - зміна витрати повітря ΔM . Таким чином, диференціальне рівняння ділянки має вигляд:

$$T_6 \Delta \ddot{P}_p + T_5 \Delta \dot{P}_p + \Delta P_p = k_8 \Delta \dot{\phi}_T + k_7 \Delta \phi_T + k_6 \Delta \dot{M} + k_5 \Delta M \quad (2.3)$$

2.2 Визначення витрати повітря та димових газів

Паливо в тому вигляді, в якому воно подається для спалювання називається робочим. В його складі є вуглець, водень, кисень, сірка, азот, зола та волога. Робочий склад палива по масі виражається наступним рівнянням:

$$C^P + H^P + O^P + N^P + S^P + A^P + W^P = 100\% \quad (2.4)$$

В таблиці 2.1 наведено хімічний склад спалюваного палива (АШ).

Таблиця 2.1 Хімічний склад палива

	W^P	A^P	S^P	C^P	H^P	N^P	O^P
% робочої маси	8.5	22.9	1.7	63.8	1.2	0.6	1.3

Теоретична витрата повітря, необхідна для повного окислення всіх горючих компонентів палива, розраховується по рівнянням реакцій горіння. Розрахуємо теоретичну витрату повітря за формулою (2.5) [3]:

$$V_o = 0.0889C^P + 0.267H^P - 0.033(O^P - S^P) \quad (2.5)$$

$$= 0.0889 * 63.8 + 0.267 * 1.2 - 0.0333 * (1.3 - 1.7) = 6 \text{ м}^3$$

Загальний обсяг продуктів горіння складається з обсягів продуктів окислення горючих складових палива, обсягу азоту, що надходить з палива та повітря, і обсягу кисню, що не бере участь в окисленні палива. Тоді за формулами з [3]:

Об'єм трьохатомних газів:

$$V_{RO2} = V_{CO2} + V_{SO2} = 0.01868(C^P + 0.375S^P) \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (2.6)$$

теоретичний об'єм сухих газів:

$$V_{cr}^0 = V_{RO2} + V_{N2} = 0.01868(C^P + 0.375S^P) + 0.79V_o + 0.008N^P \quad (2.7)$$

дійсний об'єм сухих газів:

$$V_{cr} = 0.01868(C^P + 0.375S^P) + 0.79V_o + 0.008N^P + (\alpha - 1)V_o \text{ м}^3 \quad (2.8)$$

Тоді повний об'єм продуктів згоряння:

$$V_{\Gamma} = 0.01868(C^P + 0.375S^P) + 0.79V_o + 0.008N^P + (\alpha - 1)V_o + 0.0161 + 0.01242(9H^P + W^P) = 7.4 \text{ м}^3/\text{кг} \quad (2.9)$$

Знаючи повний об'єм продуктів згоряння можемо розрахувати приблизну витрату димових газів через димосос за формулою (2.10) [4]:

$$Q_{\Gamma}^P \approx B_p V_{\Gamma} \frac{v_d + 273}{273} \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.10)$$

де B_p – витрата палива (кг/с); v_d – температура газів перед газоходом (°C).

Витрата повітря через вентилятор розраховується за формулою (2.11) [4]:

$$Q_{\Pi}^P \approx B_p V_o \alpha_T \frac{t_{\text{хп}} + 273}{273} \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.11)$$

де α_T – коефіцієнт надлишку повітря в топці; $t_{\text{хп}}$ – температура холодного повітря перед дуттєвим вентилятором (°C).

Для забезпечення надійної роботи установки при коливаннях барометричного тиску та можливих змінах в процесі експлуатації необхідно врахувати коефіцієнт запасу β . Розрахуємо значення витрати повітря та димових газів при витраті палива 31.5 кг/с з коефіцієнтом запасу за формулою (2.12) та (2.13) відповідно:

$$Q_{\Pi}^P \approx 1.1 * 31.5 * 6 * 1.2 * \frac{30 + 273}{273} = 276.9 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.12)$$

$$Q_{\Gamma}^P \approx 1.1 * 31.5 * 7.4 * \frac{147 + 273}{273} = 394.4 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.13)$$

Так як котлоагрегат оснащений двома димососами та вентиляторами, то відповідно продуктивність одного вентилятора та димососа визначається за формулами (2.14) та (2.15).

$$Q_{\Pi} = \frac{Q_{\Pi}^P}{2} = 138.4 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.14)$$

$$Q_{\Gamma} = \frac{Q_{\Gamma}^P}{2} = 197.2 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.15)$$

2.3 Ідентифікація моделі

Для розрахунку САР спочатку потрібно визначити математичну модель газоповітряного тракту. Для цього використаємо метод описаний в [2]. Для розрахунку моделі повітряного тракту використаємо розраховане значення витрати повітря з формули (2.13), вихідні дані з [5] та аеродинамічну характеристику вентилятора ВДН-24х2 [6] (рис. 2.3).

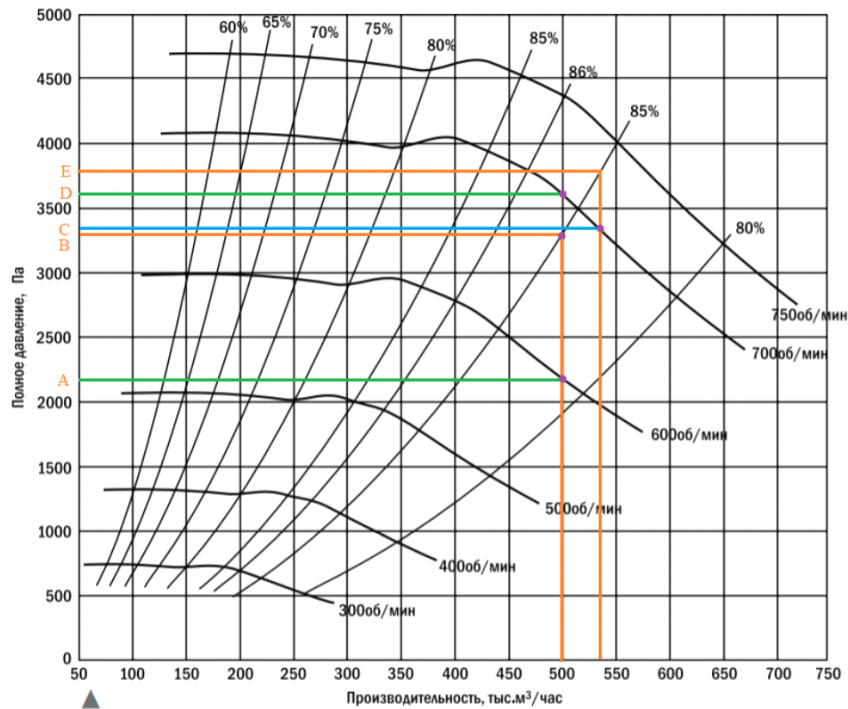


Рис. 2.1 Аеродинамічна характеристика вентилятора

Числові значення коефіцієнтів диференціального рівняння (1) визначаються за допомогою наступних співвідношень:

$$T_2 = \frac{2.1 \cdot 10^{-3} (a_p^B a_L^{B^2})}{a_p^B + a_L^B}; T_1 = \frac{(2a_p^B a_L^B + (a_L^B)^2) \cdot 2.9 \cdot 10^{-1}}{a_p^B + a_L^B}; k_1 = \frac{b_p^B}{a_p^B + a_L^B} \quad (2.16)$$

$$\text{де } a_L^B = \frac{\Delta H_M}{\Delta Q} = \frac{BE}{\Delta Q}; b_p^B = \frac{\Delta H_\varphi}{\Delta \varphi} = \frac{AD}{\Delta \varphi}; a_p^B = \frac{\Delta H^F}{\Delta Q} = \frac{CD}{\Delta Q}$$

$$T_4 = 0.9(T_B)^2; T_3 = 2T_B; T_B = \frac{\bar{T}_B}{3}; k_4 = 0.05 \frac{\%O_2}{\%PO} \quad (2.17)$$

де \bar{T}_B – середній час проходження димових газів від топки до місця вимірювання (90с).

Тоді за формулою (2.17) маємо

$$W_{\Delta M_L \rightarrow CO_2}(p) = \frac{0.029e^{-45p}}{810p^2 + 60p + 1} \quad (2.18)$$

За формулами (2.16) маємо

$$W_{\Delta \varphi_B \rightarrow \Delta M_L}(p) = \frac{1.69e^{-2p}}{1.2p^2 + 15.3p + 1} \quad (2.19)$$

Перевіримо адекватність знайденої моделі об'єкта по каналу взаємодії «положення регулюючого органу подачі повітря – витрата повітря». Для цього скористаємось розгінною характеристикою об'єкта при зміні положення регулюючого органу подачі повітря з 90% до 95% (рис. 2.2).

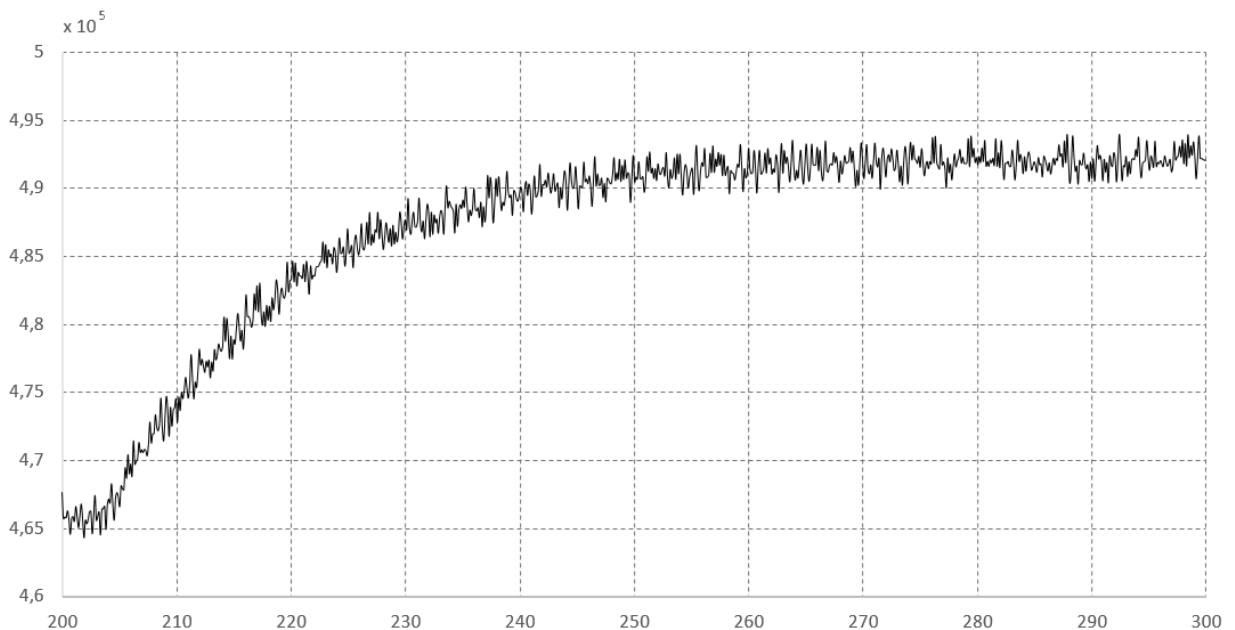


Рис.2.2 Розгінна характеристика об'єкта керування по каналу «положення регулюючого органу подачі повітря – витрата повітря»

Так як розгінна характеристика зашумлена, то для подальшої апроксимації зробимо згладжування розгінної. Для згладжування кривої використаємо метод ковзного середнього по трьом точках. В загальному випадку метод ковзного середнього описується формулою:

$$y_3(t_i) = \frac{1}{b} \sum_{k=-\frac{b-1}{2}}^{\frac{b-1}{2}} y(t_{i+k}) \quad (2.20)$$

де b – кількість точок вимірювання; $i = 0, 1, 2, \dots, n$. Згладжена розгінна наведена на рис. 2.3.

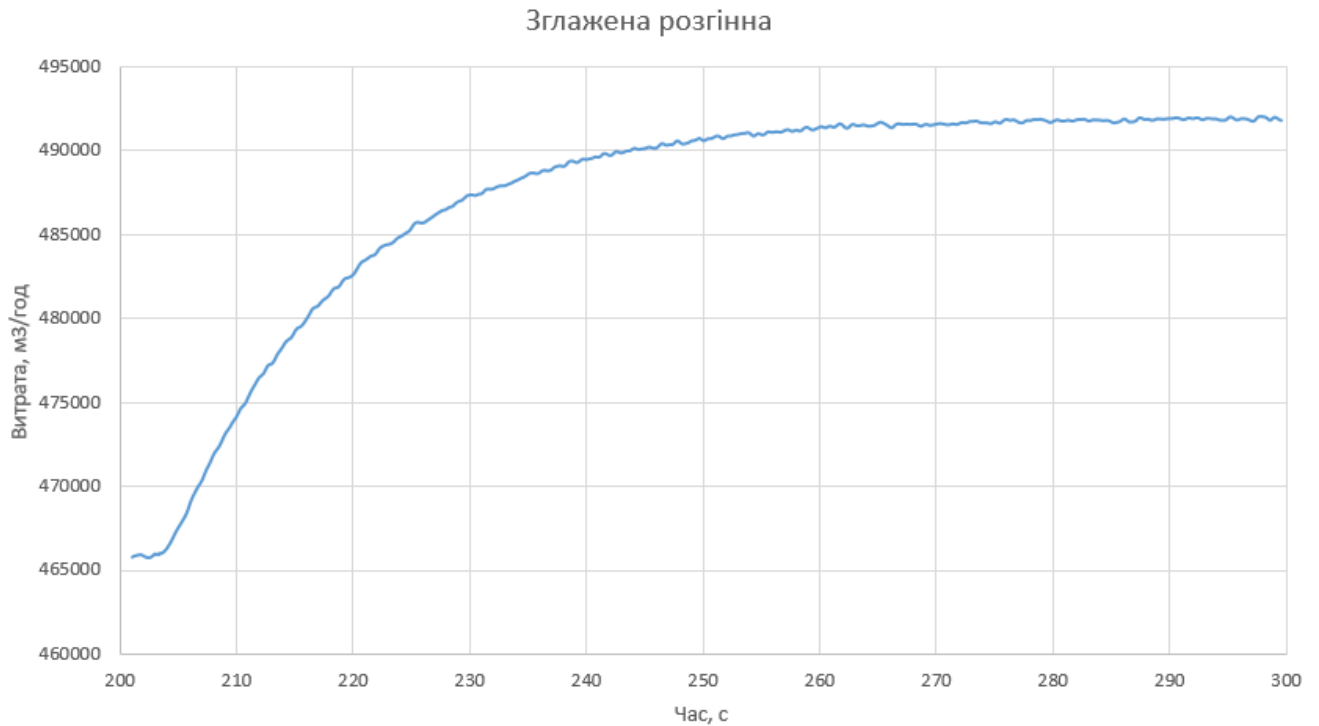


Рис. 2.3 Згладжена розгінна характеристика

На основі отриманої розгінної побудуємо графік перехідної характеристики, яка визначається за формулою:

$$h(t_i) = \frac{y_3(t_i) - y_3(t_1)}{\Delta U} \quad (2.21)$$

Так як в передавальній функції $K_{об} = 1.69$ кг/с, то це еквівалентно 5232.31 м³/год при щільності повітря 1.16 кг/м³. Тоді побудуємо перехідну характеристику змінивши коефіцієнт підсилення до 5232.31 та визначимо її адекватність порівнявши її з отриманою перехідною характеристикою після згладжування. Для цього розрахуємо середньоквадратичну похибку за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 1}} \quad (2.22)$$

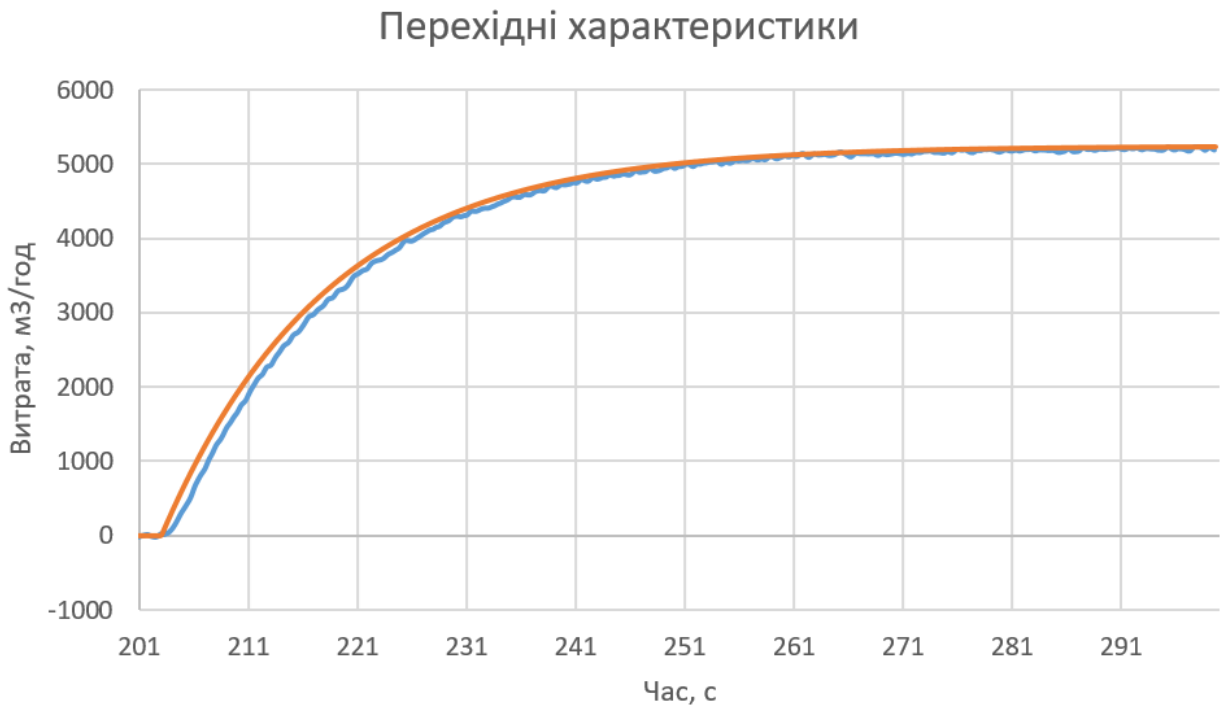


Рис. 2.4 Порівняння перехідних характеристик

Значення середньоквадратичної похибки дорівнює 113.55, що дає змогу зробити висновок про адекватність моделі.

Для розрахунку газового тракту використаємо розраховане значення витрати димових газів з формули (2.14), вихідні дані з [5] та аеродинамічну характеристику димососа ДО-31.5 [6] (рис. 2.4). Розрахунок аналогічний розрахунку газового повітряного тракту. Числові значення коефіцієнтів диференціального рівняння (3) визначаються за допомогою співвідношень наведених в [2]. Після підстановки усіх коефіцієнтів і виконання перетворення Лапласа отримані передавальні функції для САР розрідження:

$$W_{\Delta\varphi_r \rightarrow \Delta P}(p) = -\frac{0.012p + 0.58}{1.45p^2 + 5.54p + 1} \quad (2.23)$$

$$W_{\Delta M \rightarrow \Delta P}(p) = \frac{0.013p + 0.11}{1.45p^2 + 5.54p + 1} \quad (2.24)$$

2.4 АСР економічного горіння палива

2.4.1 Схема регулювання

Показником економічності горіння палива є коефіцієнт надлишку повітря, який є відношенням кількості повітря, яке використовується для горіння палива до теоретично необхідного для повного згорання цього палива.

Для регулювання економічності процесу горіння ми використаємо схему з додатковим коригуванням по вмісту кисню в димових газах (рис. 2.2), де PO_2 – регулятор вмісту кисню в димових газах, РКП – регулятор коефіцієнту витрати повітря, БМО – блок математичних обчислень. В такій схемі поєднуються принципи регулювання по збуренню та відхиленню.

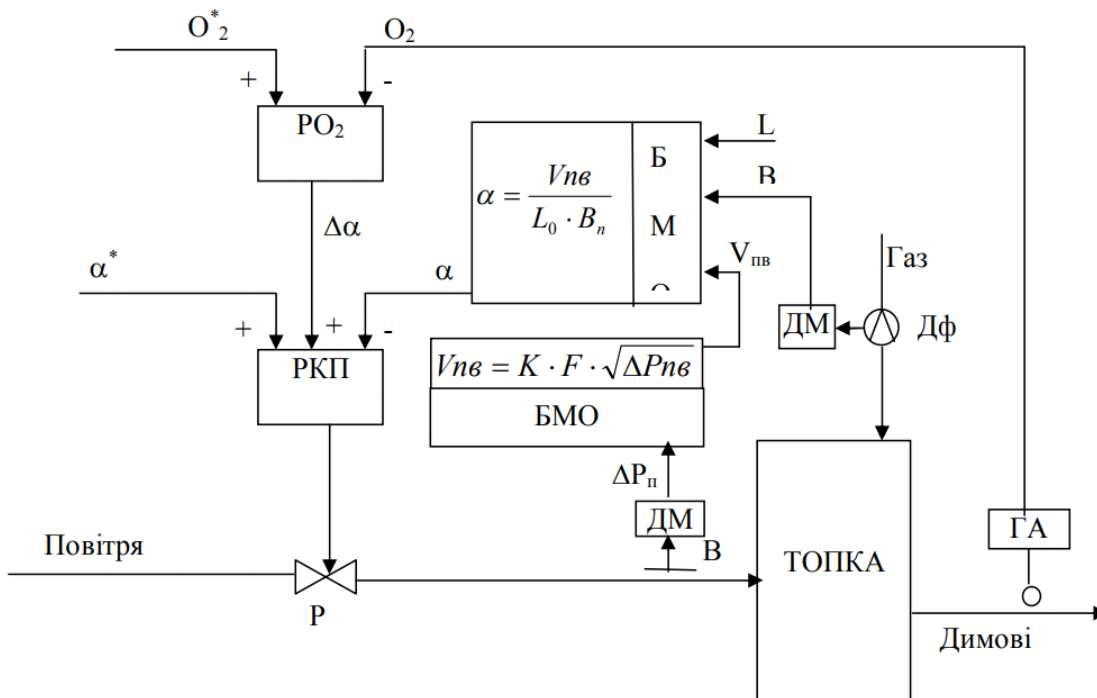


Рис. 2.5 Схема регулювання економічності процесу горіння палива з корекцією по вмісту кисню в димових газах

Стабілізуючий (внутрішній) регулятор виконує стабілізацію витрати повітря на певному заданому рівні у відповідності до витрати палива для підтримання потрібного коефіцієнту надлишку повітря. Коригуючий (зовнішній) регулятор вмісту кисню здійснює корекцію завдання внутрішньому регулятору для забезпечення заданої концентрації кисню. Загалом схема на рисунку 1 відповідає каскадній схемі регулювання, яка наведена на рисунку 2.6.

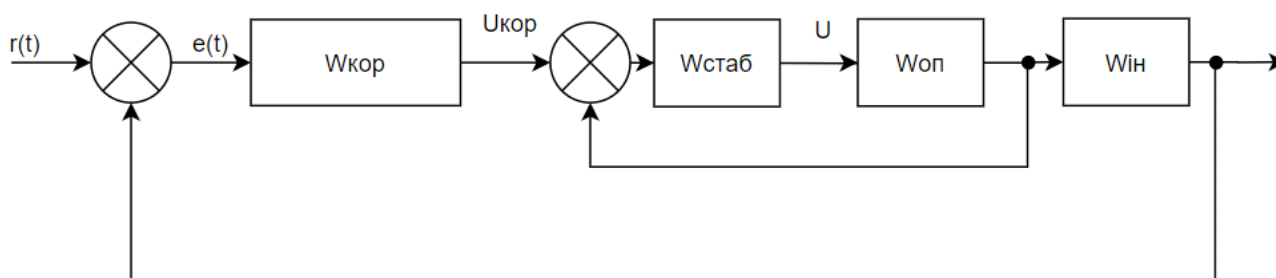


Рис. 2.6 Каскадна схема регулювання

Інерційність об'єкту регулювання W_{on} мала, що забезпечує високу швидкодію і якість стабілізації витрати повітря. Корируючий регулятор $W_{кор}$ формує завдання регулятору повітря $W_{стаб}$. По відношенню до зовнішнього контуру внутрішній контур є практично безінерційним, тому перехідні процеси, що виникають при зміні витрати палива, не встигають значно вплинути на вихідну величину зовнішнього контуру.

2.4.2 Розрахунок каскадної системи

Регулюючим впливом є витрата повітря, яка змінюється за допомогою зміни продуктивності вентилятора (Y_{vent}). Регульованою величиною в схемі є концентрація кисню (CO_2) димових газах, так як вона і є показником економічності процесу горіння. Перехідна характеристика об'єкту керування зображена на рис. 2.7.

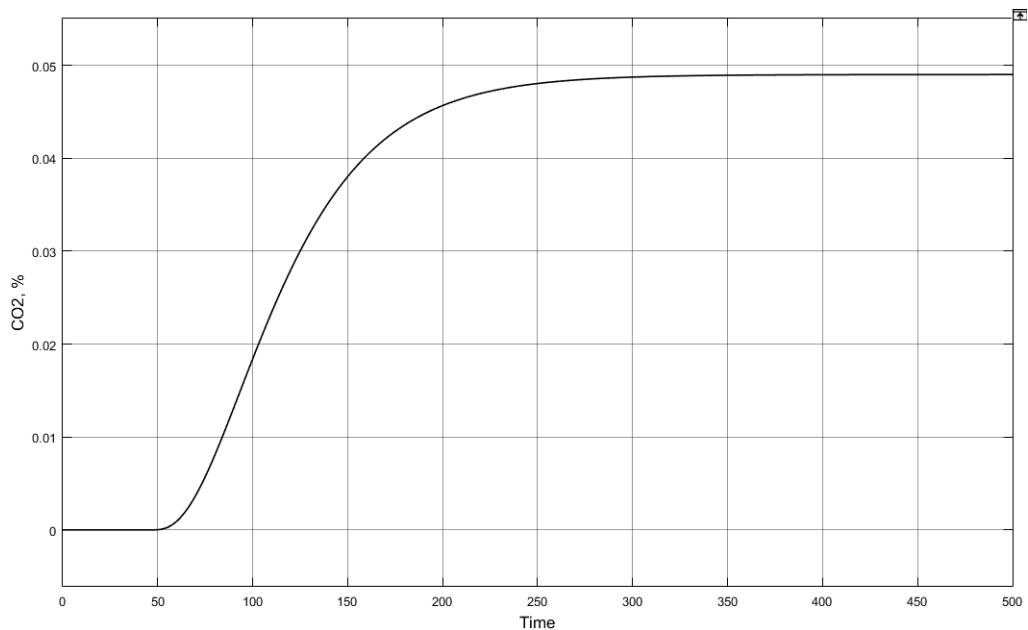


Рис. 2.7 Перехідна характеристика об'єкта

Спочатку розрахуємо стабілізуючий регулятор на W_{on} . Для розрахунку налаштувань регулятора застосуємо аналітичний метод РАФХ. Для розрахунку задаємося ступенем коливальної стійкості $m = 0.5$, $m = 0.6$ та $m = 0.7$, що має забезпечити значення степені затухання більше 0.95. Криві m заданого наведені на рис. 2.8 – 2.10.

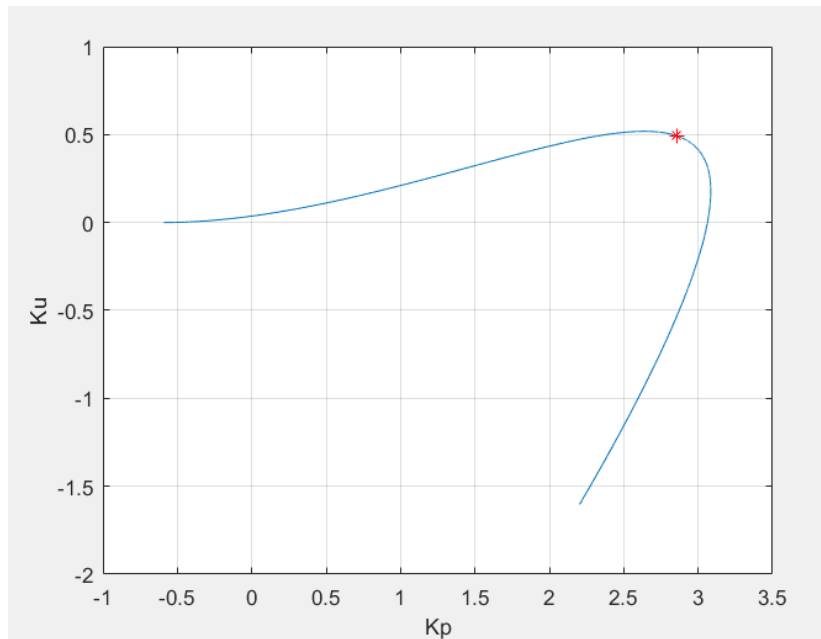


Рис. 2.8 Крива ступеня коливальної стійкості $m = 0.5$

Червона точка на кривій відповідає мінімуму квадратичного інтегрального показника якості. Тоді замкнута система має ступінь коливальної стійкості не гірше $m=0.5$ при наступних налаштуваннях регулятора:

$$W_{ст1}(p) = 2.85 * \left(1 + \frac{1}{5.79p}\right) \quad (2.25)$$

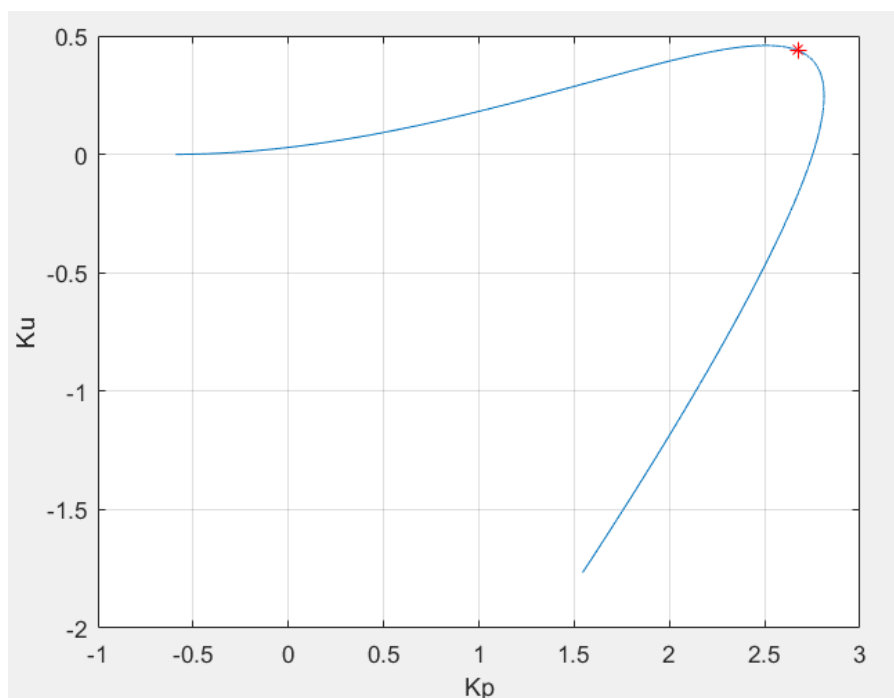


Рис. 2.9 Крива ступеня коливальної стійкості $m = 0.6$

Тоді замкнута система має ступінь коливальної стійкості не гірше $m=0.6$ при наступних налаштуваннях регулятора:

$$W_{ст2}(p) = 2.67 * \left(1 + \frac{1}{6.13p}\right) \quad (2.26)$$

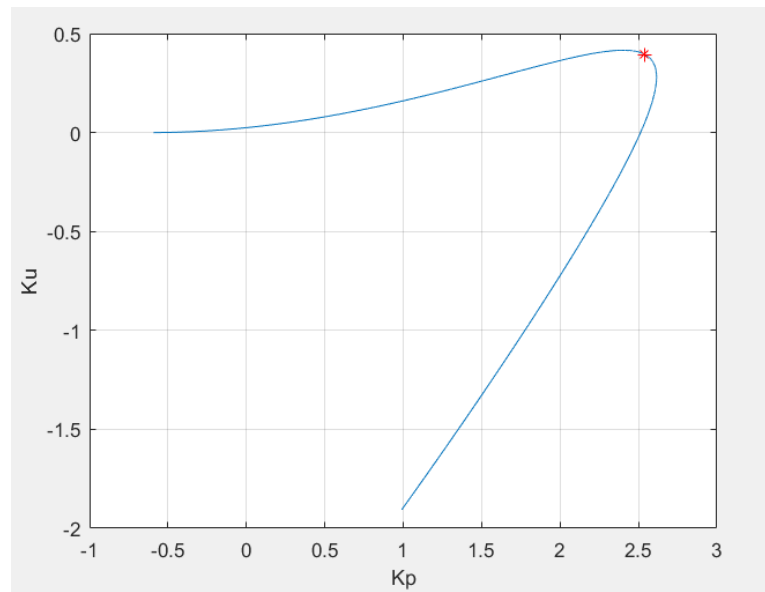


Рис. 2.10 Крива ступеня коливальної стійкості $m = 0.7$

Тоді замкнута система має ступінь коливальної стійкості не гірше $m=0.6$ при наступних налаштуваннях регулятора:

$$W_{ст3}(p) = 2.53 * \left(1 + \frac{1}{6.43p}\right) \quad (2.27)$$

Порівняємо перехідні процеси внутрішнього контуру при різних налаштуваннях стабілізуючого регулятора по каналу завдання-вихід (рис. 2.11), та збурення – вихід (рис. 2.12).

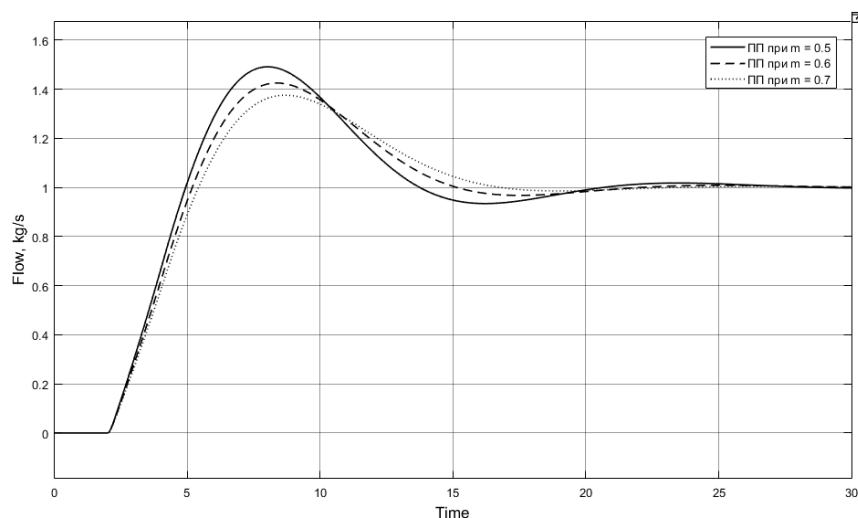


Рис. 2.11 Перехідні процеси внутрішнього контуру по каналу завдання-вихід при різних налаштуваннях регулятора

Таблиця 2.1 Прямі показники якості для перехідних процесів зображених на рис.

2.11

	$m = 0.5$	$m = 0.6$	$m = 0.7$
Статична похибка, кг/с	0	0	0
Динамічна похибка кг/с	0.49	0.42	0.37
Степінь затухання	0.96	0.98	0.99
Час регулювання, с	17	14	15
Перерегулювання, %	49	42	37

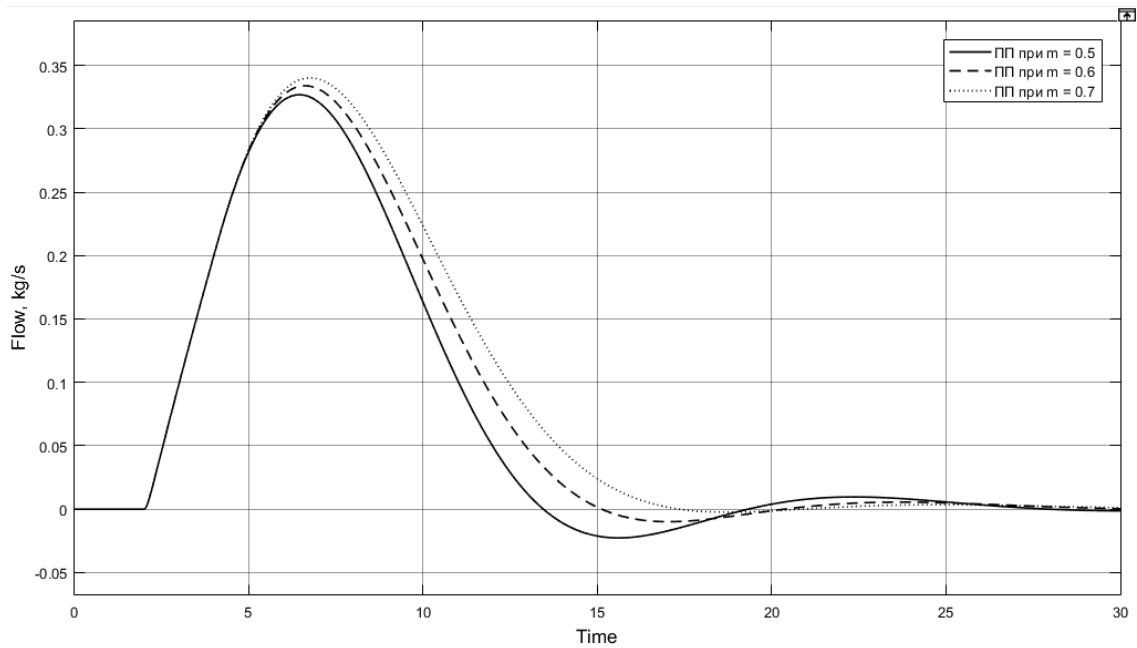


Рис. 2.12 Перехідні процеси внутрішнього контуру по каналу збурення-вихід при різних налаштуваннях регулятора

Таблиця 2.2 Прямі показники якості для ПП зображених на рис. 2.12

	$m = 0.5$	$m = 0.6$	$m = 0.7$
Статична похибка, кг/с	0	0	0
Динамічна похибка кг/с	0.32	0.33	0.34
Степінь затухання	0.97	0.98	0.99
Час регулювання, с	17.2	14.1	15.3
Перерегулювання, %	6.8	2.9	1

Найоптимальнішими параметрами регулятора є ті, які отримані для $m = 0.7$, так як вони забезпечують найменше перерегулювання по обом каналам.

Тепер виконаємо розрахунок коригуючого регулятора методом РАФХ для різних значень m ($m = 0.6, m = 0.7, m = 0.8$). Так як для зовнішнього контуру об'єктом керування являється внутрішній, то виконаємо розрахунок на еквівалентний об'єкт. Побудовані криві m -заданого наведені на рис. 2.13.

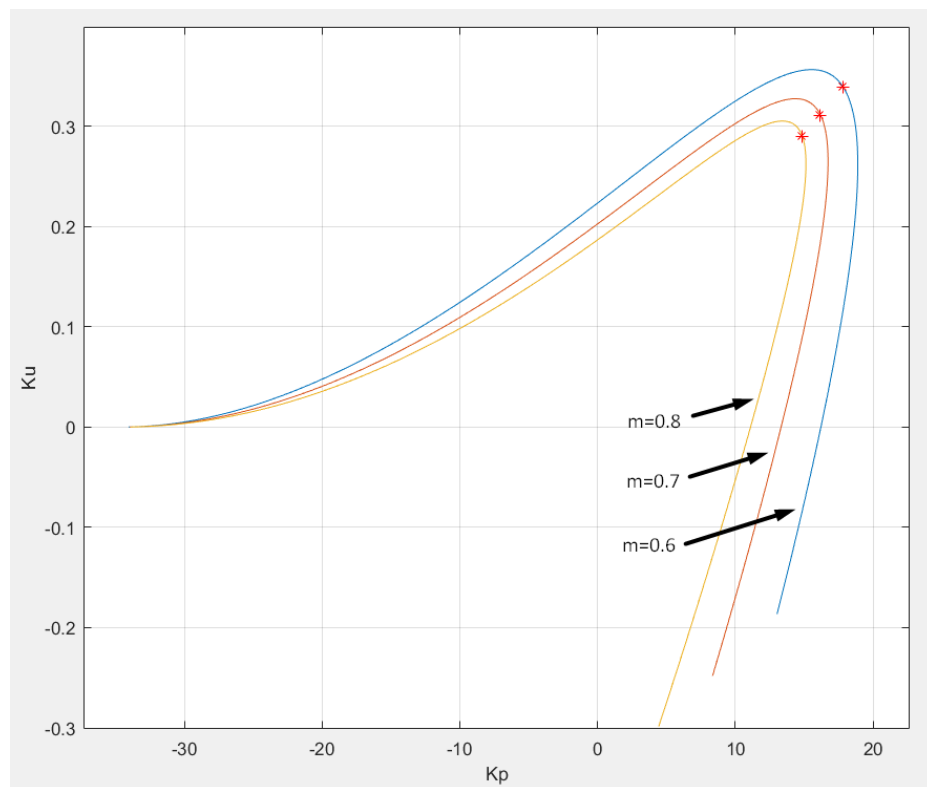


Рис. 2.13 Криві ступеня коливальної стійкості

Для $m=0.6$ ми отримали налаштування наступні налаштування регулятора:

$$W_{\text{кор1}}(p) = 17.43 * \left(1 + \frac{1}{53.12p}\right) \quad (2.28)$$

Для $m=0.7$ ми отримали налаштування наступні налаштування регулятора:

$$W_{\text{кор2}}(p) = 15.79 * \left(1 + \frac{1}{52.34p}\right) \quad (2.29)$$

Для $m=0.8$ ми отримали налаштування наступні налаштування регулятора:

$$W_{\text{кор3}}(p) = 14.54 * \left(1 + \frac{1}{51.68p}\right) \quad (2.30)$$

Після того як обраховані налаштування коригуючого та стабілізуючого регулятора використаємо модель системи в Simulink (рис. 2.14) та побудуємо перехідні процеси замкненої каскадної системи по каналам «завдання-вихід» (рис. 2.15), «збурення зміною витрати палива – вихід» (рис. 2.16) та «збурення РО витрати повітря – вихід» (рис. 2.17) при використанні трьох різних налаштувань коригуючого регулятора.

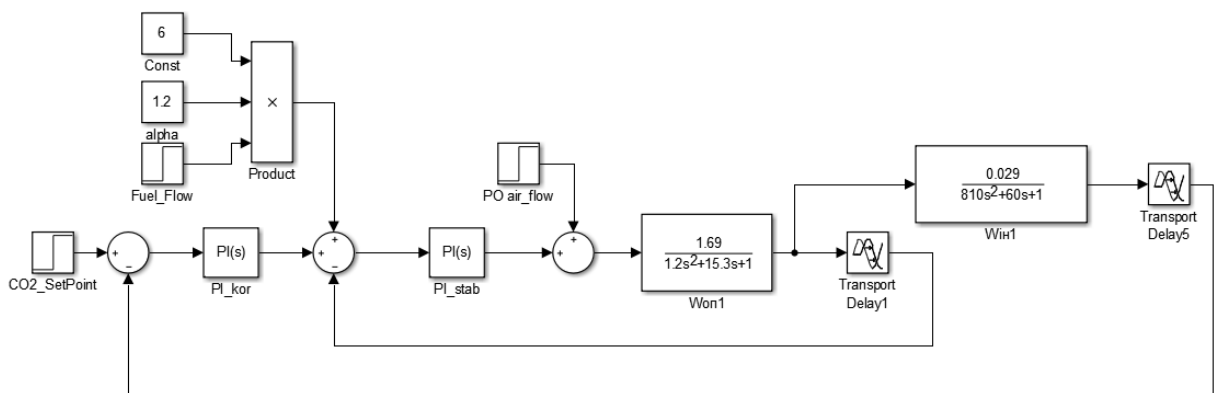


Рис. 2.14 Модель САР економічного горіння палива в середовищі Simulink

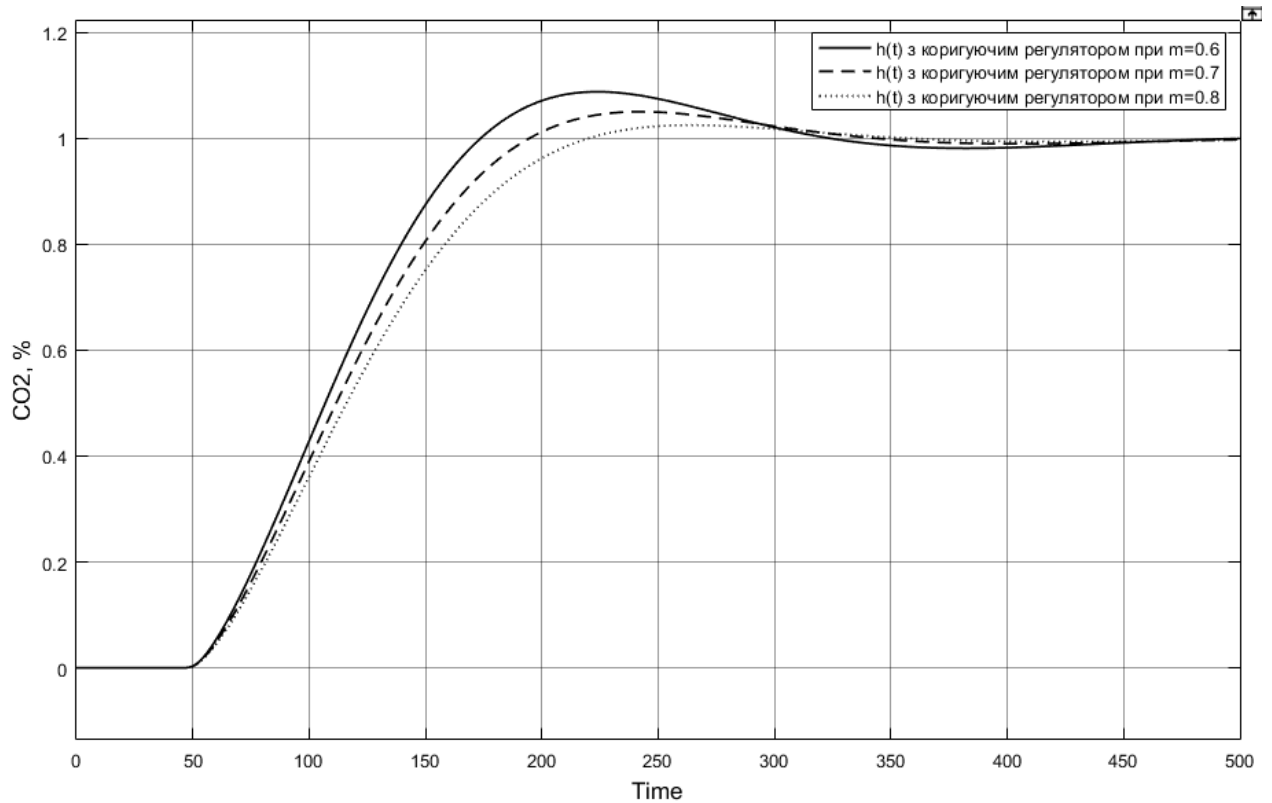


Рис. 2.15 Перехідний процес по каналу «завдання-вихід»

Таблиця 2.3 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «завдання-вихід», зображених на рис.2.15

	$m = 0.6$	$m = 0.7$	$m = 0.8$
Статична похибка, % O ₂	0	0	0
Динамічна похибка % O ₂	0.088	0.05	0.012
Степінь згасання	0.97	1	1
Час регулювання, с	420	318	298
Перерегулювання, %	8.8	5	1.2

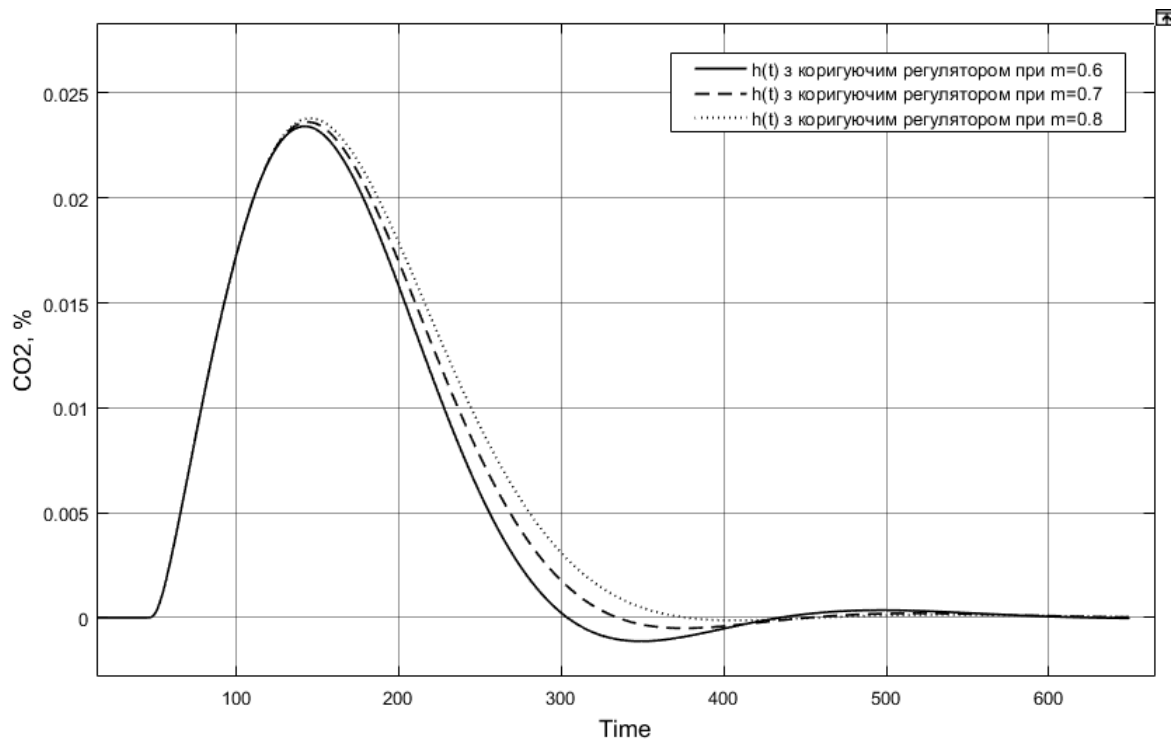


Рис. 2.16 Перехідний процес по каналу «збурення витратою палива-вихід»

Таблиця 2.4 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу по каналу збурення зміною витрати палива - вихід, зображених на рис. 2.16

	$m = 0.6$	$m = 0.7$	$m = 0.8$
Статична похибка, % O_2	0	0	0
Динамічна похибка % O_2	0.0234	0.0236	0.0238
Степінь затухання	0.98	0.99	1
Час регулювання, с	407	390	350
Перерегулювання, %	4.8	2.1	0

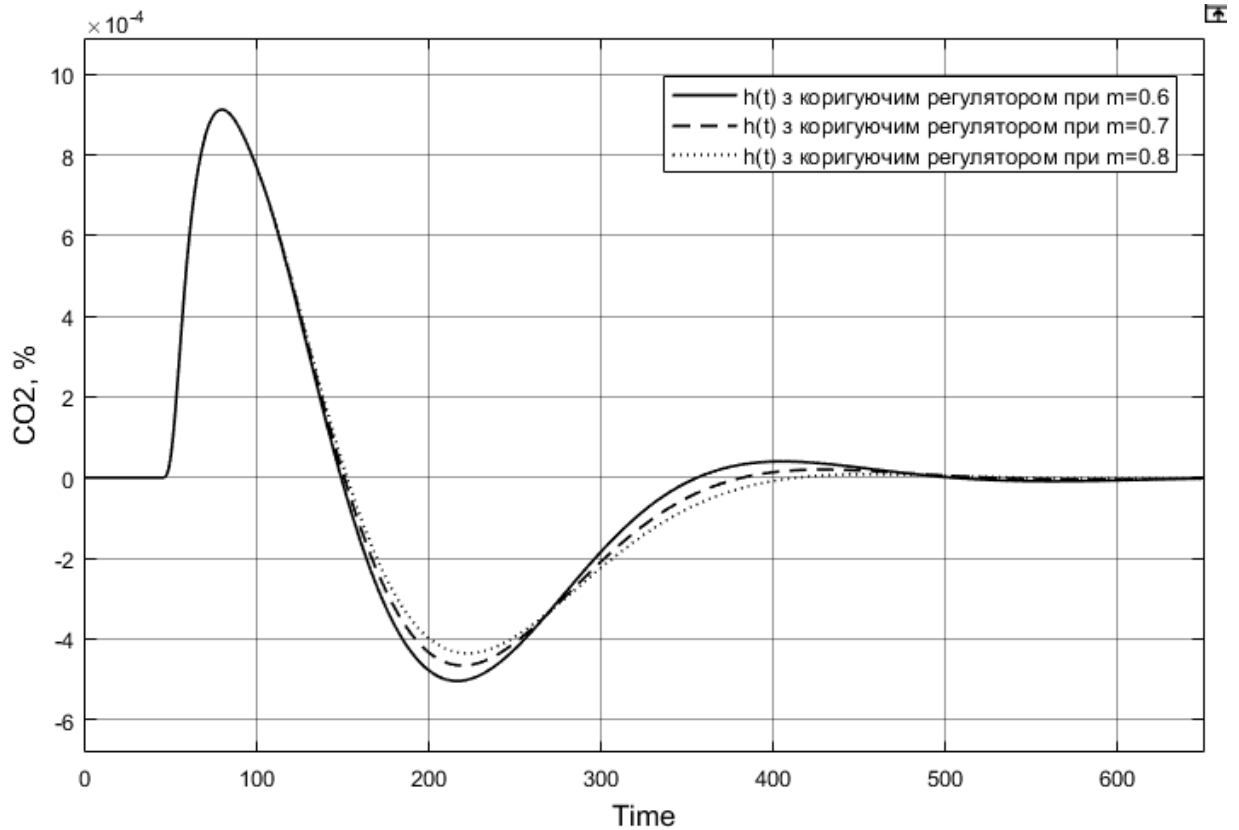


Рис. 2.17 Перехідний процес по каналу «збурення РО витрати повітря-вихід»

Таблиця 2.5 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «збурення РО витрати повітря-вихід», зображених на рис. 2.17

	$m = 0.6$	$m = 0.7$	$m = 0.8$
Статична похибка, % O_2	0	0	0
Динамічна похибка % O_2	0.00091	0.00091	0.00091
Степінь затування	0.96	0.98	1
Час регулювання, с	465	450	385
Перерегулювання, %	55	51	46

Порівнявши показники якості по всім каналам для трьох різних налаштувань коригуючого регулятора, робимо висновок, що найкращі показники забезпечує регулятор, який був розрахований на ступінь коливальної стійкості $m = 0.8$. По каналу «завдання-вихід» маємо перерегулювання більш ніж втричі менше, ніж з регулятором, розрахованим для $m = 0.6$, а час регулювання менше на 115 с, та на 80

с по каналу «збурення РО витрати повітря» – вихід. Для каналу «збурення зміною витрати палива – вихід» відсутнє перерегулювання.

2.4.3 Розрахунок одноконтурної системи

Виконаємо розрахунок налаштувань регулятора методом РАФХ для різних значень ступеня коливальної стійкості. Побудовані криві m -заданого наведені на рис. 2.18.

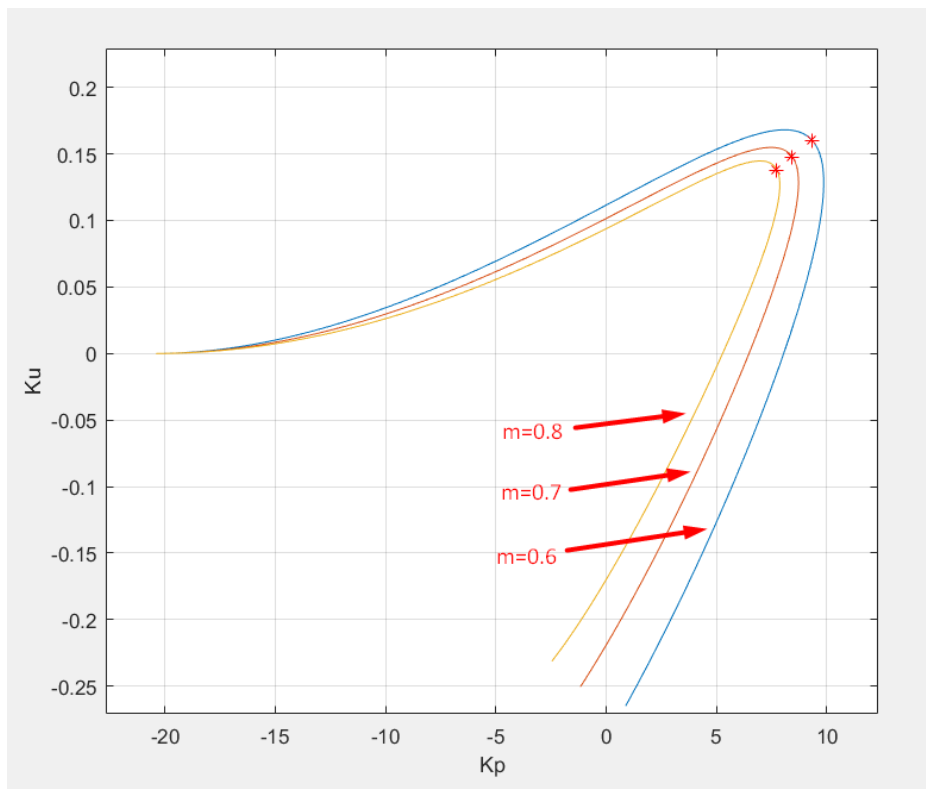


Рис. 2.18 Криві ступеня коливальної стійкості

Як результат ми отримали наступні налаштування регулятора, які відповідають $m=0.6$, $m=0.7$ та $m=0.8$ відповідно:

$$W_{p1}(p) = 9.33 * \left(1 + \frac{1}{58.44p}\right) \quad (2.31)$$

$$W_{p2}(p) = 8.43 * \left(1 + \frac{1}{57.31p}\right) \quad (2.32)$$

$$W_{p3}(p) = 7.73 * \left(1 + \frac{1}{56.24p}\right) \quad (2.33)$$

Побудуємо модель одноконтурної системи в середовищі Simulink (рис. 2.19) та порівняємо перехідні процеси по каналу «завдання-вихід» (рис. 2.20) та «збурення-вихід» (рис. 2.21) з використанням різних налаштувань регулятора.

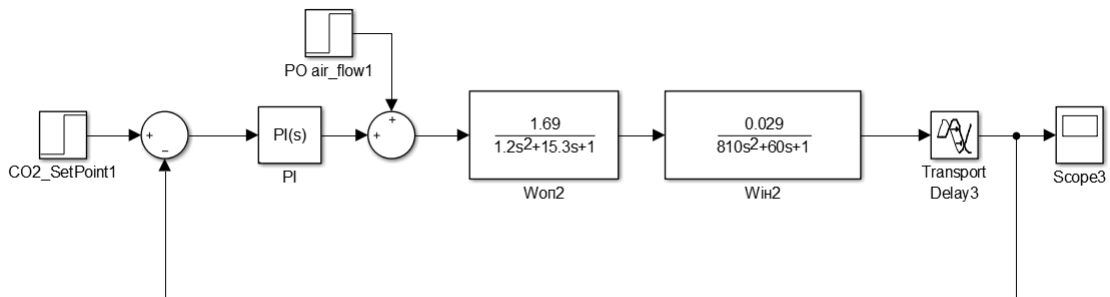


Рис 2.19 Модель одноконтурної САР в середовищі Simulink

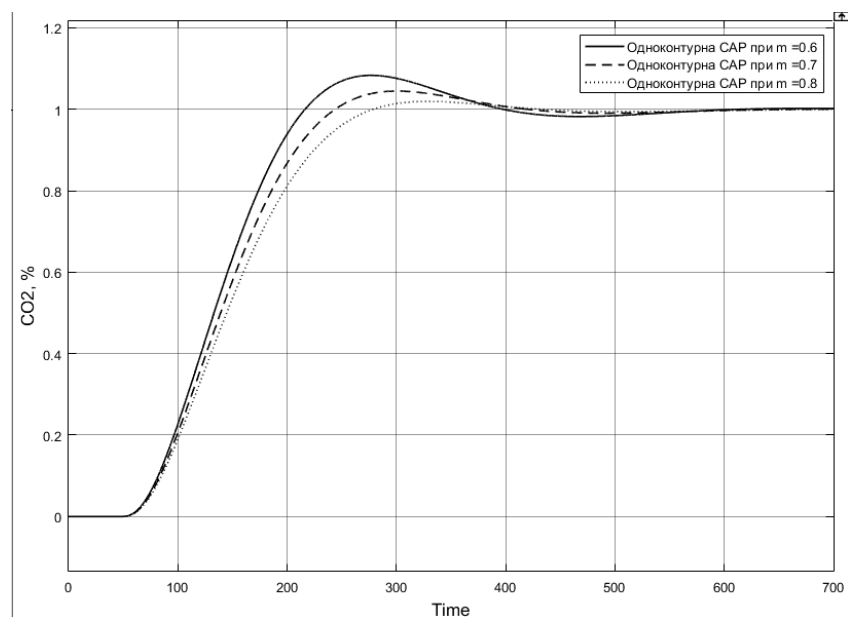


Рис. 2.20 Перехідні процеси в одноконтурній системі по каналу «завдання-вихід»

Таблиця 2.6 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «завдання – вихід», зображених на рис. 2.20

	$m = 0.6$	$m = 0.7$	$m = 0.8$
Статична похибка, % O ₂	0	0	0
Динамічна похибка % O ₂	0.083	0.045	0.019
Степінь затухання	1	1	1
Час регулювання, с	360	360	330
Перерегулювання, %	8.3	4.5	1.9

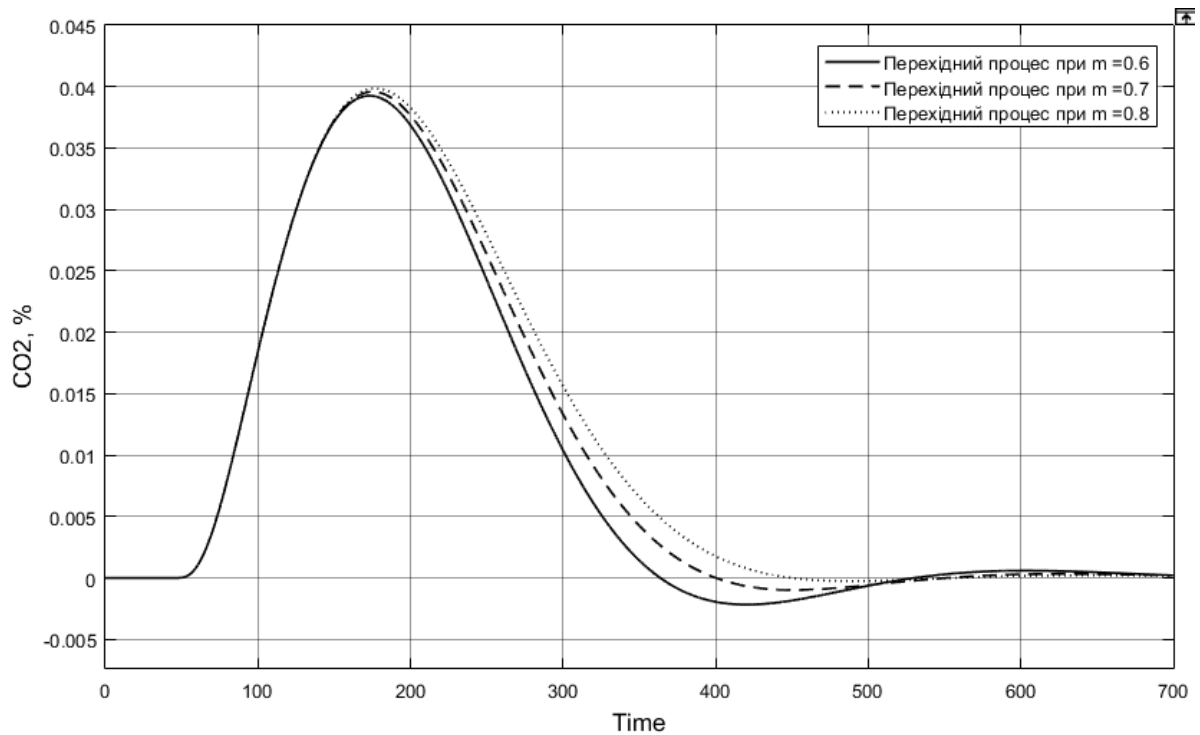


Рис. 2.21 Перехідні процеси в одноконтурній системі по каналу «збурення-вихід»

Таблиця 2.7 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «збурення – вихід», зображених на рис.2.21

	$m = 0.6$	$m = 0.7$	$m = 0.8$
Статична похибка, % O_2	0	0	0
Динамічна похибка % O_2	0.039	0.0395	0.0398
Степінь згасання	0.98	0.99	1
Час регулювання, с	497	482	422
Перерегулювання, %	5.5	2.4	0

Порівнявши показники якості по всім каналам для трьох різних налаштувань коригуючого регулятора, робимо висновок, що найкращі показники забезпечує регулятор, який був розрахований на ступінь коливальної стійкості $m = 0.8$.

2.5 САР розрідження в топці котла

2.5.1 Схема регулювання розрідження в топці котла

Найбільше розповсюдження отримала схема регулювання розрідження з одно імпульсним ПІ-регулятором, яка реалізує принцип регулювання за відхиленням.

Математично схема регулювання розрідження в топці котла є схемою із компенсатором збурень. Основним регулятором є ПІ регулятор, компенсатор розрахований таким чином, щоб компенсувати збурення по зміні витрати димових газів. Схема САР розрідження з каналом компенсації збурення в стабілізуючому контурі зображена на рис. 2.22.

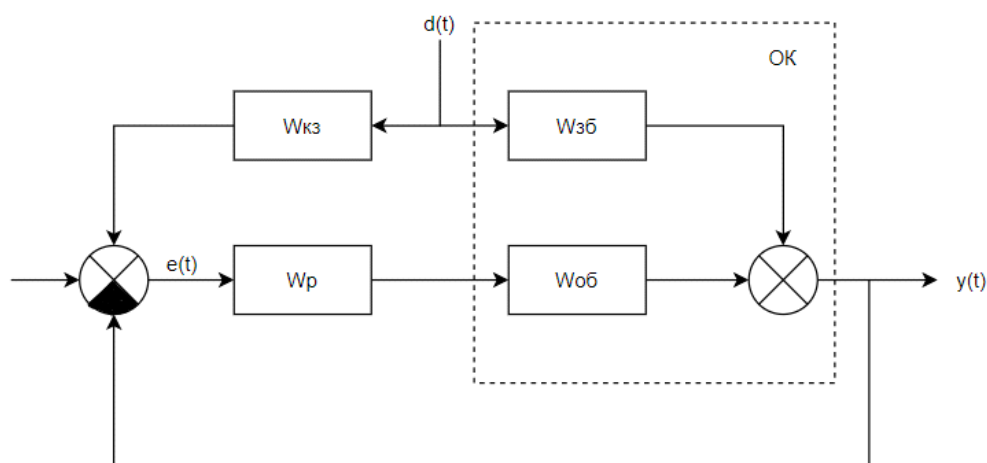


Рис. 2.22 Схема САР розрідження з каналом компенсації збурення в стабілізуючому контурі

На схемі $W_{об}$ – передавальна функція об'єкту; $W_{зб}$ – передавальна функція збурення; W_p – передавальна функція регулятора; W_p – передавальна функція компенсатора.

2.5.2 Розрахунок комбінованої системи

Для розрахунку налаштувань основного ПІ-регулятора застосуємо метод РАФХ. Задаємося трьома значеннями m ($m = 0.5$, $m = 0.6$ та $m = 0.7$), що має забезпечити перехідні процеси показником затухання більше 0.9. Побудовані лінії m -заданого наведені на рис. 2.23.

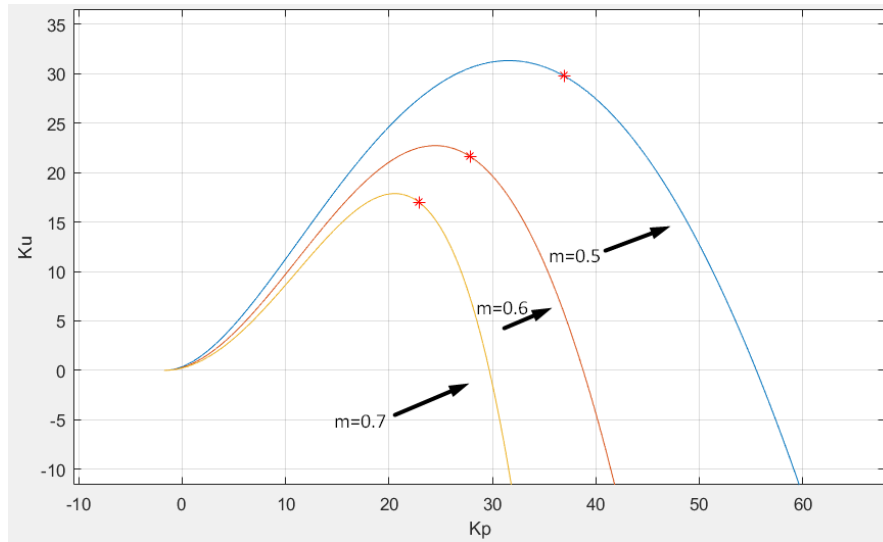


Рис. 2.23 Криві ступеня коливальної стійкості

Як результат ми отримали наступні налаштування регулятора, які відповідають $m=0.5$, $m=0.6$ та $m=0.7$ відповідно:

$$W_{p1}(p) = 36.95 * \left(1 + \frac{1}{1.24p}\right) \quad (2.34)$$

$$W_{p2}(p) = 27.89 * \left(1 + \frac{1}{1.29p}\right) \quad (2.35)$$

$$W_{p3}(p) = 22.92 * \left(1 + \frac{1}{1.35p}\right) \quad (2.36)$$

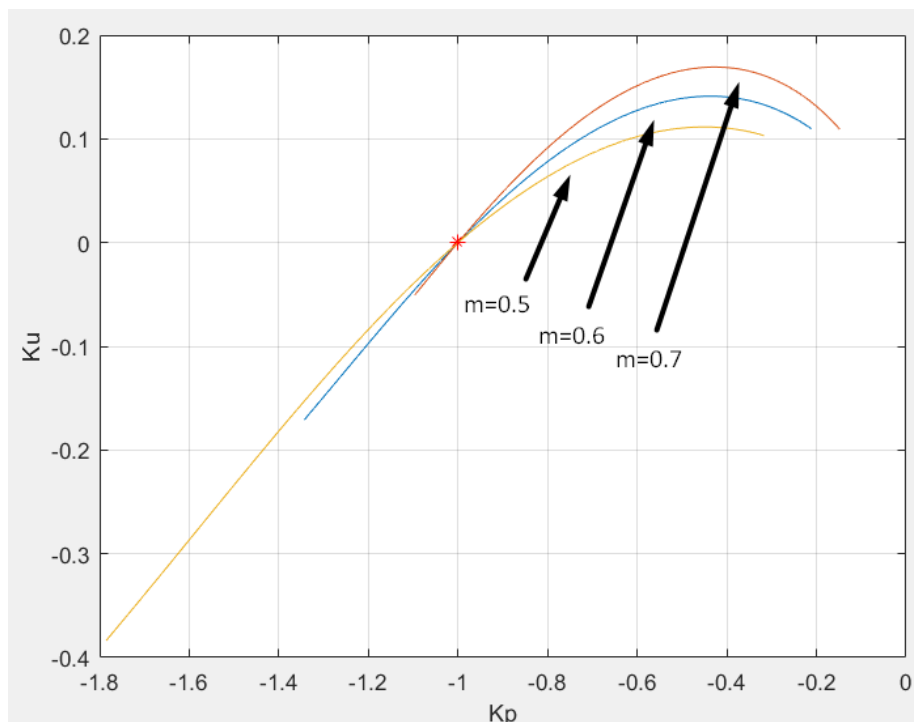


Рис. 2.24 РАФХ розімкненої системи для різних налаштувань регулятора

Як видно з рис. 2.24, РАФХ розімкнутої системи для всіх розрахованих налаштувань проходить через точку $(-1; j0)$. Це означає, що отримані системи будуть мати заданий ступінь коливальної стійкості. Побудуємо перехідні процеси по каналам завдання-вихід (рис. 2.25) та «збурення-вихід» (рис. 2.26).

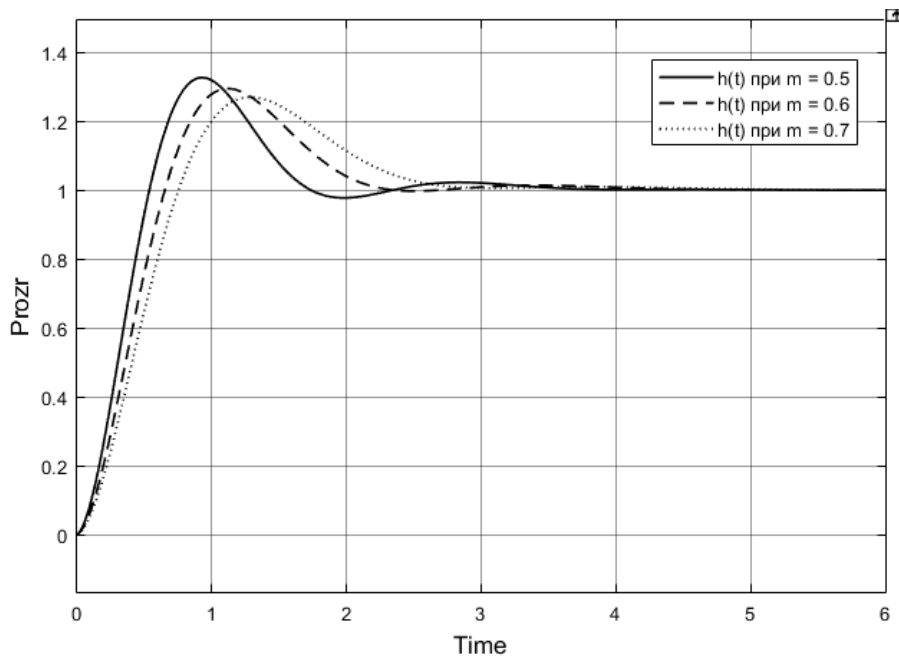


Рис. 2.25 Перехідні процеси по каналу «завдання-вихід»

Таблиця 2.8 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «завдання – вихід», зображених на рис.2.25

	$m = 0.5$	$m = 0.6$	$m = 0.7$
Статична похибка, % Prozr	0	0	0
Динамічна похибка % Prozr	0.32	0.29	0.27
Степінь затухання	0.95	0.97	1
Час регулювання, с	3.1	2.15	2.6
Перерегулювання, %	32	29	27

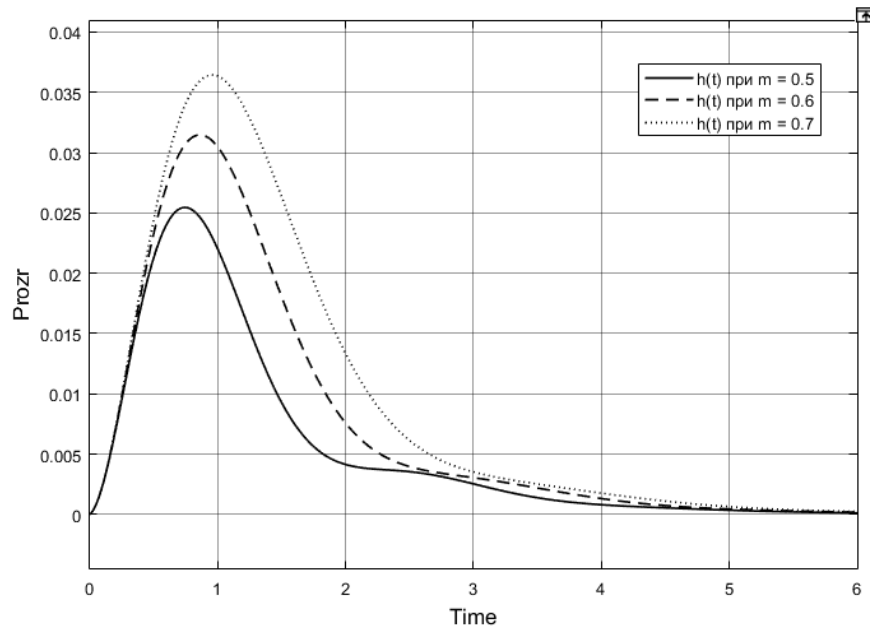


Рис. 2.26 Перехідні процеси в по каналу «збурення-вихід»

Таблиця 2.9 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «завдання – вихід», зображених на рис. 2.26

	$m = 0.5$	$m = 0.6$	$m = 0.7$
Статична похибка, % Prozr	0	0	0
Динамічна похибка % Prozr	0.0254	0.0314	0.0364
Степінь затухання	1	1	1
Час регулювання, с	4.2	4.5	4.7
Перерегулювання, %	0	0	0

Порівнявши показники якості по всім каналам для трьох різних налаштувань регулятора, робимо висновок, що найкращі показники забезпечує регулятор розрахований на $m = 0.5$, так як по каналу «збурення-вихід» він забезпечує значну меншу динамічну похибку на відміну від двох інших.

Виконаємо розрахунок ідеального компенсатора (2.37) для стабілізуючого контуру. Модель системи з компенсатором наведена на рисунку 2.27.

$$W_{ik}(p) = \frac{W_{зб}(p)}{W_p(p) * W_{об}(p)} = \frac{\frac{0.013p + 0.11}{1.45p^2 + 5.54p + 1}}{\frac{0.012p + 0.58}{1.45p^2 + 5.54p + 1} * 36.95 * \left(1 + \frac{1}{1.24p}\right)}, \quad (2.37)$$

$$= \frac{0.023s^4 + 0.267s^3 + 0.771s^2 + 0.136s}{0.797s^4 + 42.22s^3 + 181.3s^2 + 145.7s + 21.43}$$

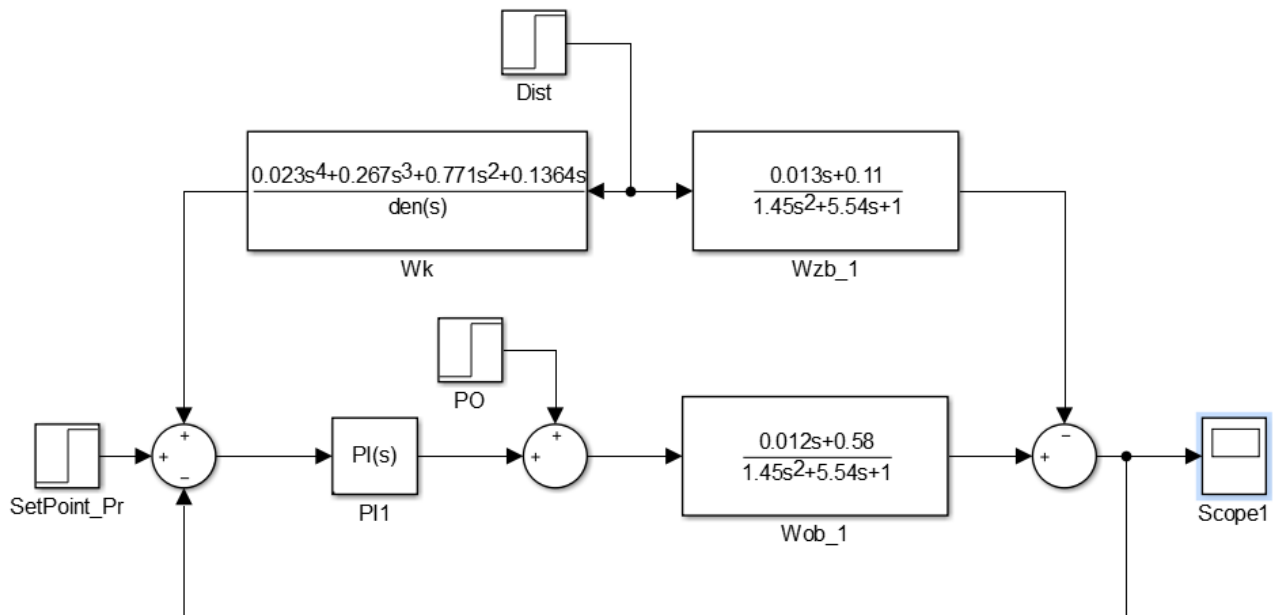


Рис. 2.27 Модель АСР розрідження з компенсатором

2.6 Створення АСР на основі МРС-регулятора

2.6.1 Представлення моделі в просторі станів

У просторі станів створюється модель динамічної системи, що включає набір змінних входу, виходу і стану, пов'язаних між собою диференціальними рівняннями першого порядку або різницевиими рівняннями, які записуються в матричній формі. Крім того, в просторі станів просто працювати з МІМО-системами.

Для випадку системи з p входами, q виходами та n змінними стану опис має вигляд:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ \dot{y}(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \end{cases} \quad (2.38)$$

де x – вектор стану; y – вектор виходу; u – вектор керування; A – матриця системи ($n*n$); B – матриця керування ($n*p$); C – матриця виходу ($q*n$); D – матриця

прямого зв'язку (q^*p). Структурна схема системи, описаної у вигляді змінних стану наведена на рис. 2.28.

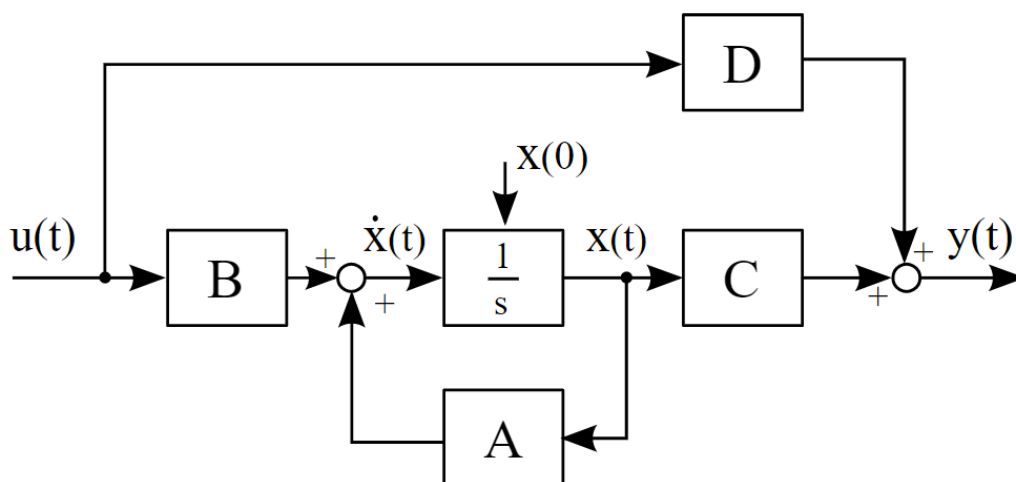


Рис. 2.28 Структурна схема системи, описаної у вигляді змінних стану

Використаємо Matlab для перетворення передавальних функцій в еквівалентне представлення методом простору станів. Реалізуємо модель у просторі станів в Simulink (рис. 2.29) і перевіримо результати із моделлю, записаною у вигляді передавальних функцій. Перехідні процеси наведені на рис. 2.30.

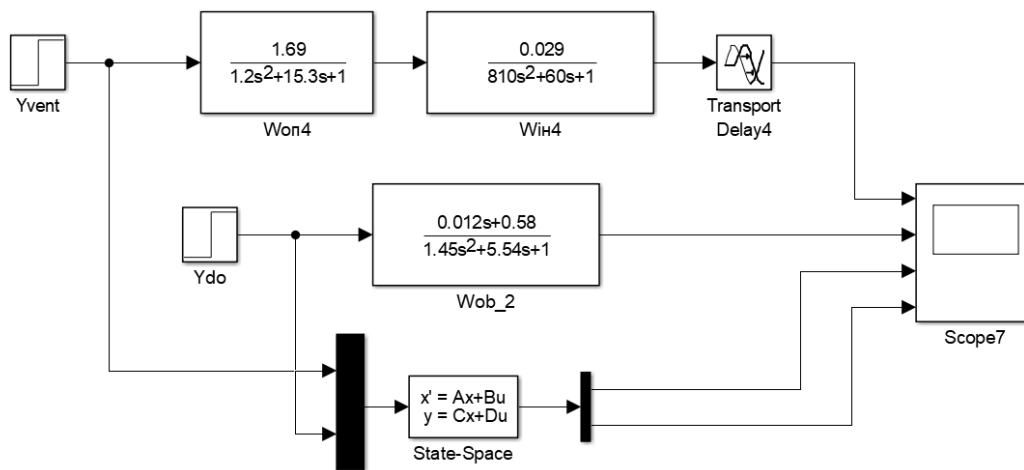


Рис. 2.29 Моделі об'єктів у вигляді передавальних функцій та у вигляді змінних стану

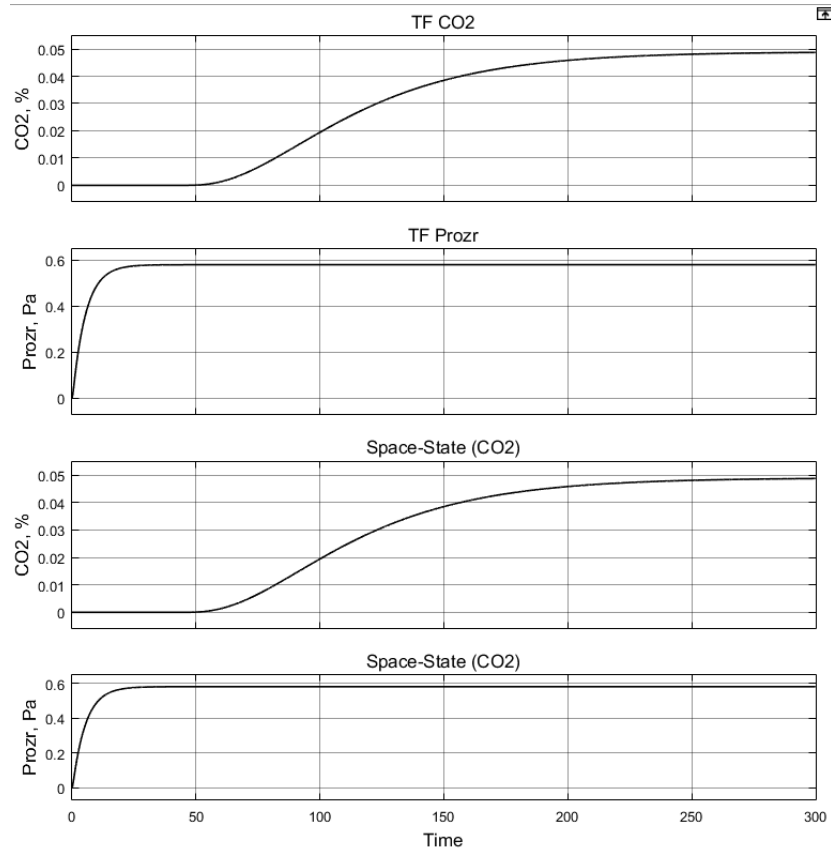


Рис. 2.30 Порівняння перехідних процесів

Бачимо, що результати повністю сходяться. Така перевірка дає можливість стверджувати про коректність моделі у просторі станів

2.6.2 Створення структури MPC

Вікно налаштування структури MPC – контролера наведено на рис. 2.31. Ми обираємо створену модель (“sys”). За замовчуванням всі вхідні параметри об'єкта задані як керовані, а вихідні параметри - як ті, що вимірюються.

MPC Structure

Select a plant model or an MPC controller from MATLAB Workspace:

Select	Name	Type	Order	Inputs	Outputs
<input type="radio"/>	IF	tf	1	4	2
<input type="radio"/>	W1	tf	2	1	1
<input type="radio"/>	W2	tf	2	1	1
<input type="radio"/>	W3	tf	2	1	1
<input type="radio"/>	W4	tf	2	1	1

Controller Sample Time
Specify MPC controller sample time:

Assign plant i/o channels to desired signal types:

Manipulated variable (MV) channel indices:

Measured disturbance (MD) channel indices:

Unmeasured disturbance (UD) channel indices:

Measured output (MO) channel indices:

Unmeasured output (UO) channel indices:

Рисунок 2.31 Вікно налаштування структури MPC

Тепер необхідно встановити атрибути каналів введення та виведення (рис. 2.32). У розділі «I/O Attributes» необхідно задати індекси каналу введення і виведення, наступним чином:

- перший вхід, продуктивність вентилятора, яким здійснюється регулювання витрати повітря, що впливає на концентрацію кисню в димових газах;
- другий вхід, збурення зі сторони РО витрати повітря
- третій вхід, збурення зі сторони РО розрідження в топці
- четвертий вхід, продуктивність димососа, яким здійснюється регулювання розрідження в топці;
- перший вихід, концентрація кисню в димових газах, є вихідним параметром, що вимірюється і регулюється;
- другий вихід, розрідження в топці, є вихідним параметром, що вимірюється і регулюється.

Plant Inputs					
Channel	Type	Name	Unit	Nominal Value	Scale Factor
u(1)	MV	Yvent	%	0	1
u(2)	MD	Dist_1	%	0	1
u(3)	MD	Dist_2	%	0	1

Plant Outputs					
Channel	Type	Name	Unit	Nominal Value	Scale Factor
y(1)	MO	CO2	%	0	1
y(2)	MO	Prozr	Pa	0	1

Рис. 2.32 Атрибути каналів введення та виведення

2.6.3 Налаштування сценарію моделювання при нанесенні збурення

По-перше треба встановити обмеження параметрів, якими здійснюється регулювання. Встановимо нижню та верхню межу для продуктивності димососа та вентилятора у вікні «Constraints». У вкладці «Tuning» встановимо горизонт прогнозування – 500 с, та горизонт керування – 40 с. Значення контрольованих змінних, а саме концентрації кисню в димових газах, та розрідження в топці, будуть передбачатися на кожному такті впродовж усього горизонту прогнозування. Прогнозована траєкторія контрольованої змінної буде залежати від майбутніх значень керуючого впливу. Горизонт керування визначає довжину послідовності керуючих впливів.

Також для зменшення агресивних регулюючих впливів встановимо вагові коефіцієнти для обох MV (рис. 2.33). Як вже зазначалося у розділі 1.6 ці коефіцієнти мають значний вплив на зміну значення в формулі (1.4). Для контрольованих параметрів залишаємо вагові коефіцієнти за замовчуванням.

Input Weights (dimensionless)				
Channel	Type	Weight	Rate Wei...	Target
u(1)	MV	0	0.6	nominal
u(2)	MV	0	0.4	nominal

Output Weights (dimensionless)		
Channel	Type	Weight
y(1)	MO	1
y(2)	MO	1

Рис. 2.33 Налаштування вагових коефіцієнтів

Тепер в розділі «Scenario» налаштуємо час симуляції, завдання для регульованих параметрів та значення збурень. Далі наведені перехідні процеси при:

- збільшенні уставки для розрідження в топці з 25 Па до 30 Па. (рис. 2.34, перший графік);
- збуренні з боку РО розрідження в 1 момент часу (рис. 2.34, другий графік);
- збуренні зміною витрати повітря в 1 момент часу (рис. 2.34 третій графік);
- зміною уставки концентрації кисню з 1% до 2% (рис. 2.35, перший графік);
- збуренні з боку РО витрати повітря в 1 момент часу (рис. 2.35, другий графік).

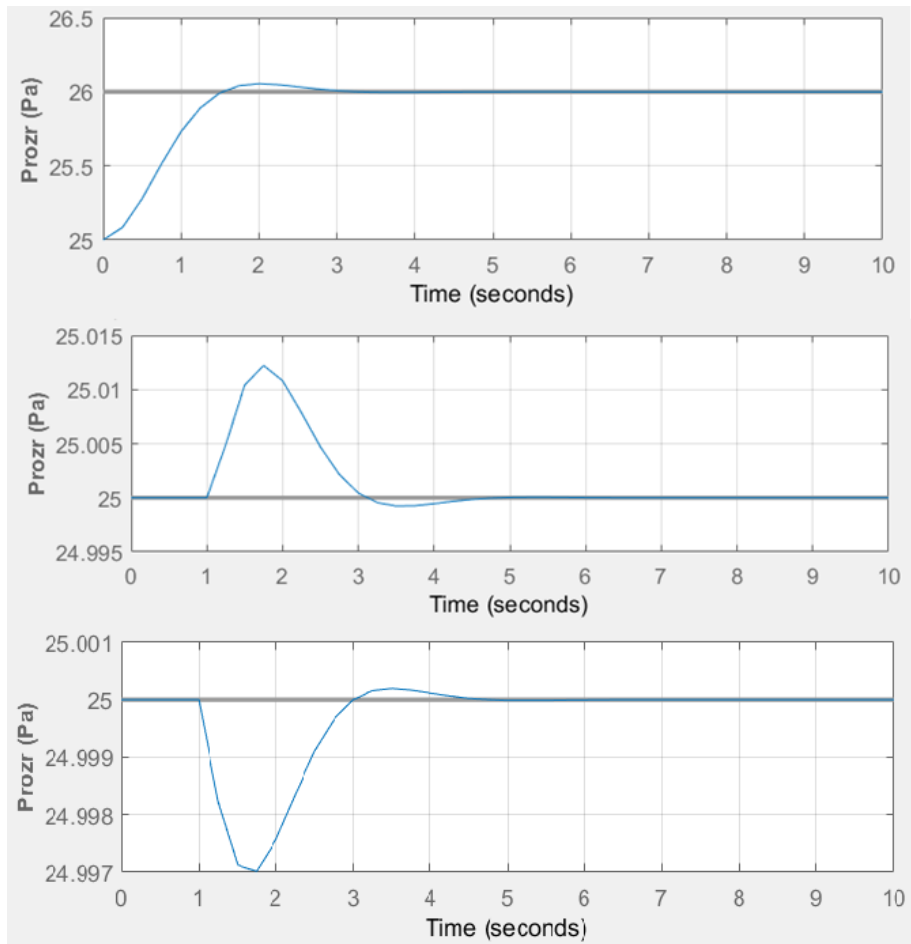


Рис. 2.34 Перехідні процеси при налаштуванні MPC

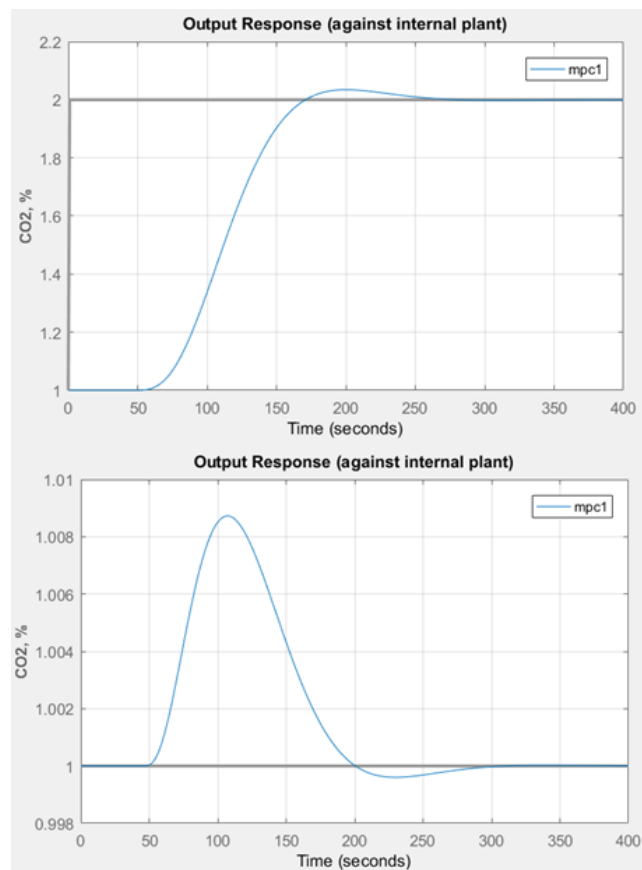


Рис. 2.35 Перехідні процеси при налаштуванні MPC

Після усіх налаштувань спробуємо порівняти перехідні процеси з тими, що ми отримали в минулому розділі для обох АСР. Для цього експортуємо створений контролер в Simulink.

2.7 Порівняння результатів

Спочатку порівняємо перехідні процеси по каналу завдання-вихід та збурення-вихід для АСР економічного спалювання палива. Для порівняння використаємо каскадну систему з коригуючим та стабілізуючим регулятором, з якими перехідні процеси мали найкращі показники якості, та одноконтурну систему. Порівняння перехідних процесів для АСР економічності спалювання палива по каналу «завдання-вихід» наведено на рис. 2.36, а по каналу «збурення-вихід». – на рис. 2.37.

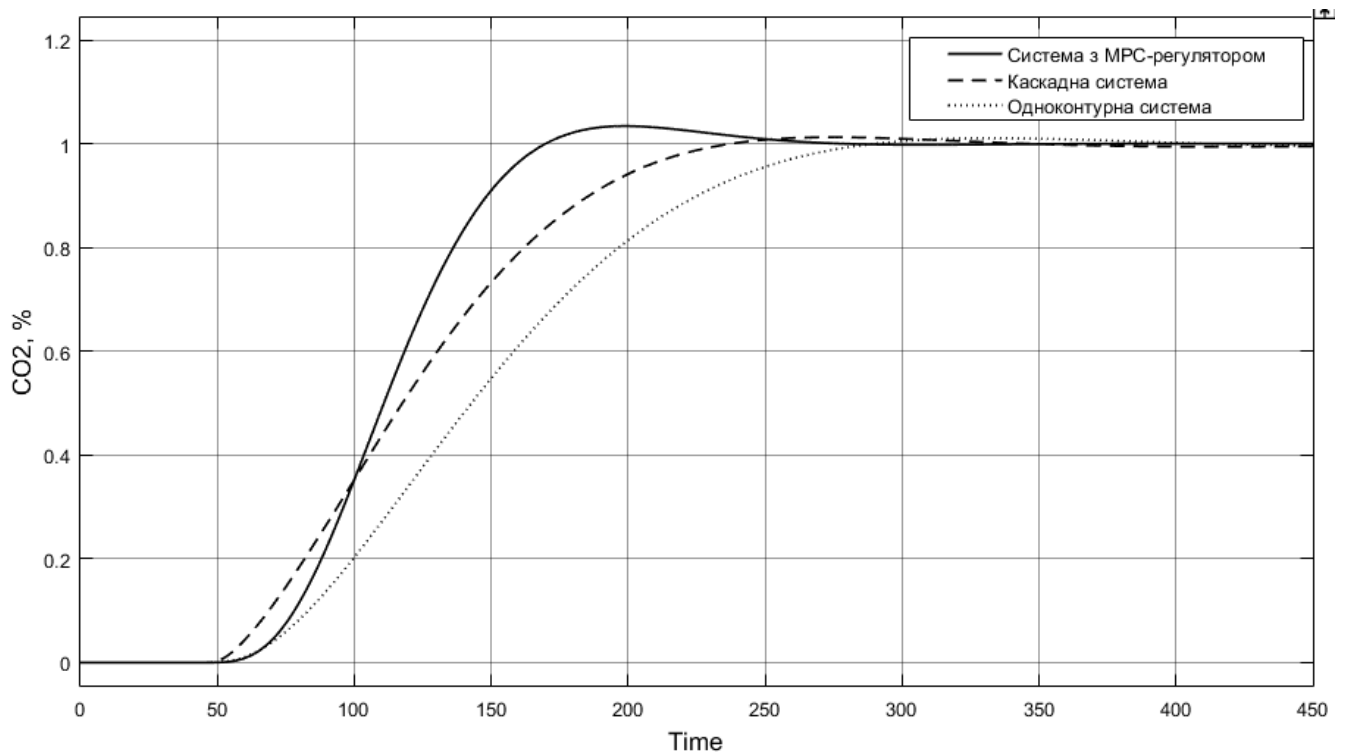


Рис. 2.36 Перехідні процеси по каналу «завдання-вихід»

Таблиця 2.10 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «завдання-вихід», зображених на рис. 2.36

Показник	Тип системи		
	З MPC-регулятором	Каскадна	Одноконтурна
Статична похибка, % O ₂	0	0	0
Динамічна похибка % O ₂	0.034	0.012	0.019
Степінь затування	1	1	1
Час регулювання, с	220	298	330
Перерегулювання, %	3.4	1.2	1.9

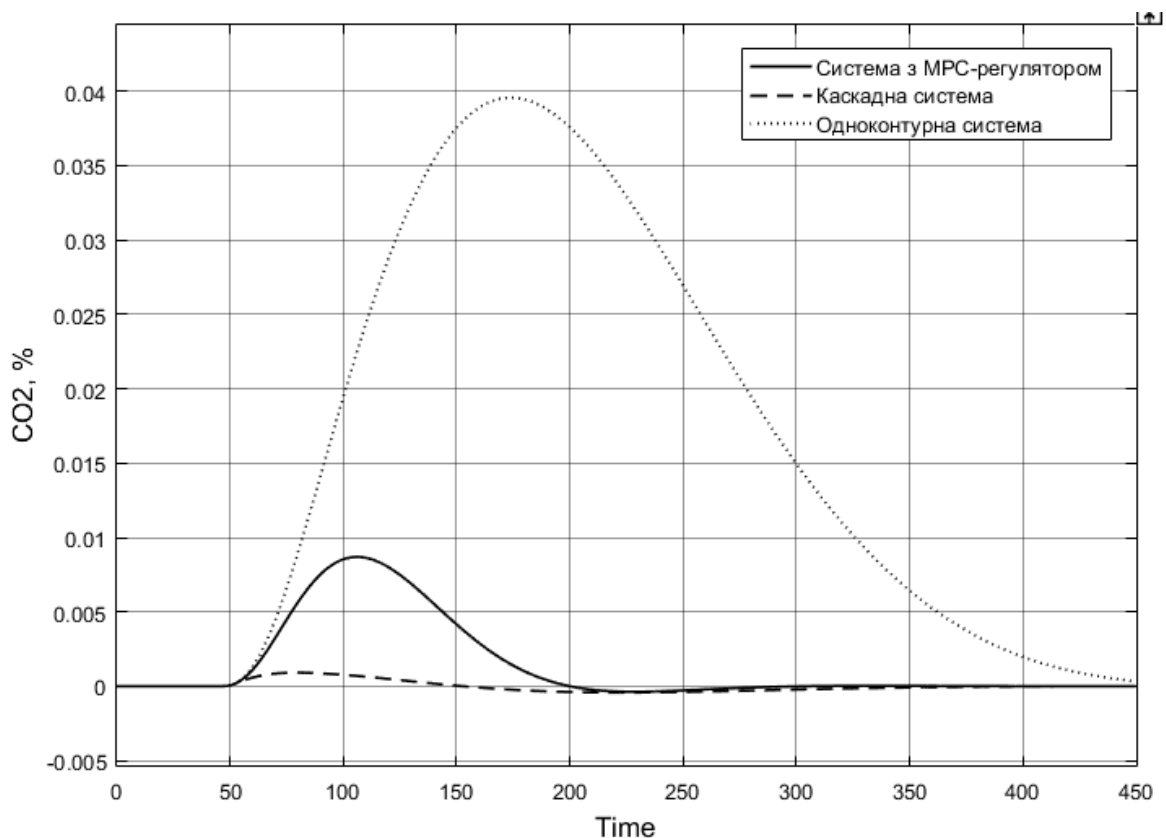


Рис. 2.37 Перехідні процеси по каналу «збурення-вихід»

Таблиця 2.11 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «збурення - вихід», зображених на рис. 2.37

Показник	Тип системи		
	З MPC-регулятором	Каскадна	Одноконтурна
Статична похибка, % O ₂	0	0	0
Динамічна похибка % O ₂	0.0086	0.00091	0.0398
Степінь затування	1	1	1
Час регулювання, с	246	385	422
Перерегулювання, %	4.2	46	0

Тепер порівняємо перехідні процеси для АСР розрідження в топці. Для порівняння використаємо комбіновану схему розраховану раніше. Порівняння перехідних процесів для по каналу «завдання-вихід» наведено на рис. 2.38, по каналу «внутрішнє збурення-вихід» – на рис. 2.39, а по каналу «зовнішнє збурення – вихід» на рис. 2.40.

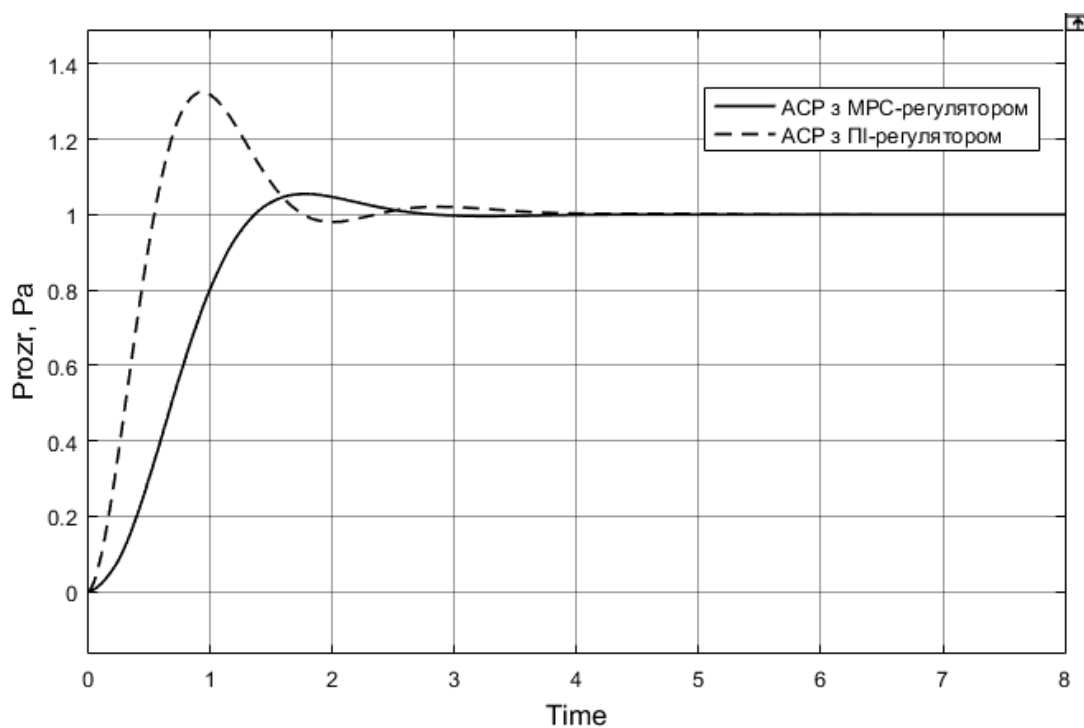


Рис. 2.39 Перехідні процеси по каналу «завдання-вихід»

Таблиця 2.12 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «завдання – вихід», зображених на рис.2.39

	Система з MPC	Система з ПІ-регулятором
Статична похибка, Па	0	0
Динамічна похибка, Па	0.055	0.32
Степінь затухання	1	0.95
Час регулювання, с	2.35	3.1
Перерегулювання, %	5.5	32

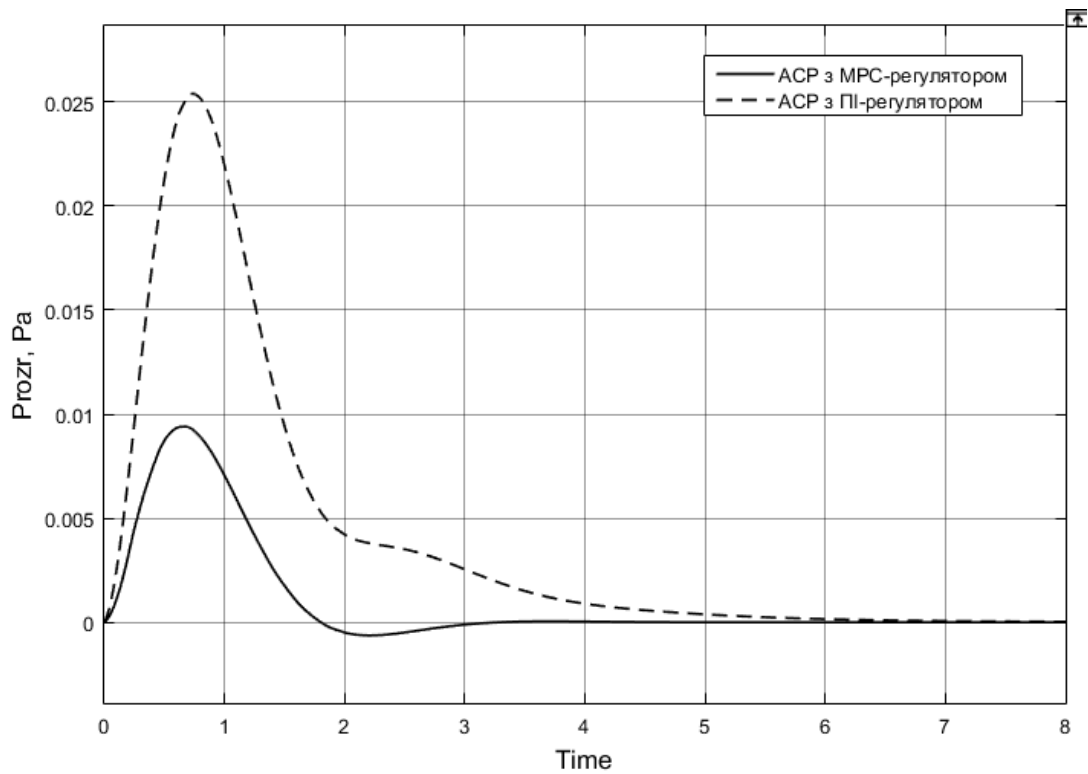


Рис. 2.40 Перехідні процеси по каналу «внутрішнє збурення-вихід»

Таблиця 2.13 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «збурення РО – вихід», зображених на рис.2.40

	Система з MPC	Система ПІ-регулятором
Статична похибка, $\text{Па} \cdot 10^{-3}$	0	0
Динамічна похибка, $\text{Па} \cdot 10^{-3}$	9.3	25.4
Степінь затухання	1	1
Час регулювання, с	2.55	4.2
Перерегулювання, %	6.6	0

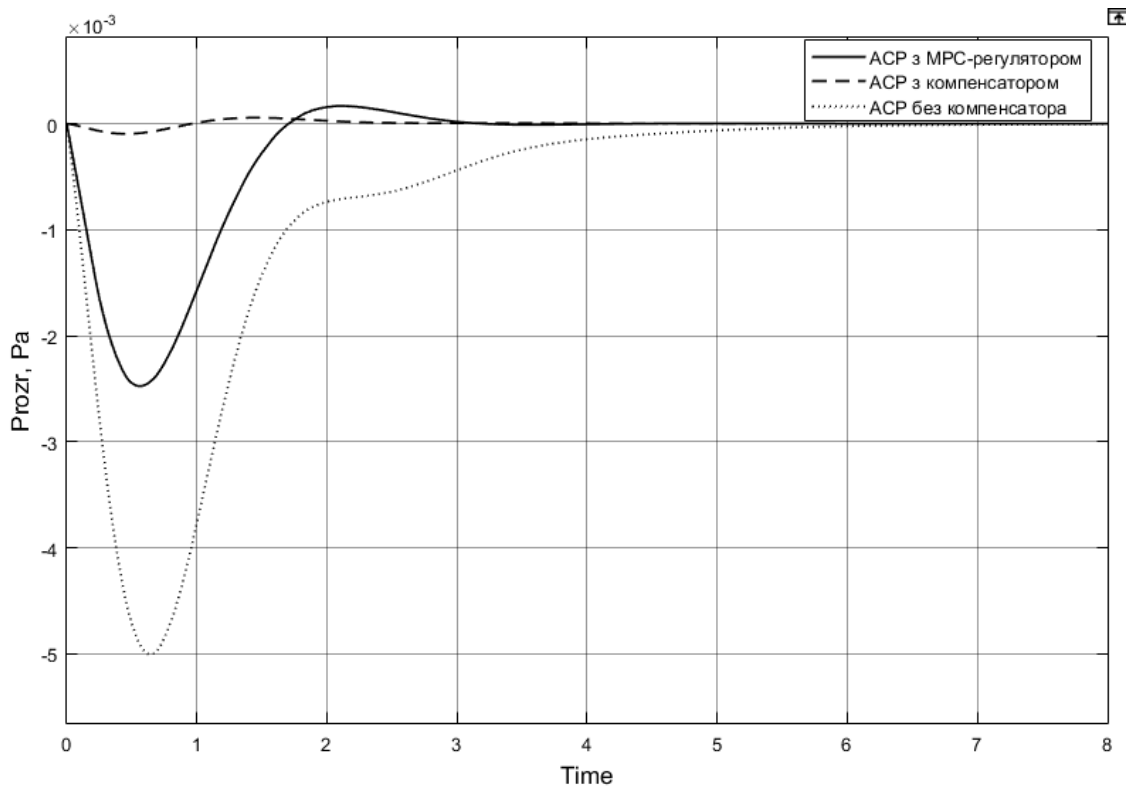


Рис. 2.41 Перехідні процеси по каналу «зовнішнє збурення-вихід»

Таблиця 2.14 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «зовнішнє збурення – вихід», зображених на рис. 2.41

	Система з МРС	Система з компенсатором	Система без компенсатора
Статична похибка, Па*10 ⁻³	0	0	0
Динамічна похибка, Па*10 ⁻³	2.47	0.1	5
Степінь затухання	1	1	1
Час регулювання, с	2.76	3.7	3.5
Перерегулювання, %	6.7	58	0

Порівняльний аналіз наведених прикладів реалізації традиційних алгоритмів керування та МРС-керування показує, що використання технології МРС має значний потенціал для підвищення якості автоматичного управління

2.8 Аналіз чутливості АСР економічного горіння палива

Під час функціонування системи керування, об'єкт може змінювати свої характеристики, тому проведемо аналіз чутливості наших систем. Для аналізу чутливості систем проведемо аналіз поведінки АСР при зміні параметрів моделі об'єкта керування. Для цього здійснимо моделювання перехідних процесів в при зміні параметрів об'єкта. Для цього візьмемо 80% та 60% від необхідної витрати повітря розрахованої за формулою (2.14), а саме 110.72 м³/с та 83.04 м³/с. При витраті повітря 110.72 м³/с, розрахувавши передавальну функція об'єкту керування «продуктивність вентилятора → витрата повітря» методом описаним в розділі 2.3, маємо $K_{об} = 1.46$ кг/(%*с), $T_{об} = 12.42$ с, $\sigma_{об} = 0.71$ с, а для витрати повітря 83.04 м³/с – $K_{об} = 1.12$ кг/(%*с), $T_{об} = 9.27$ с, $\sigma_{об} = 0.47$ с. Тоді побудуємо перехідні процеси та проаналізуємо як відпрацюють вже налаштовані регулятори при зміні параметрів об'єкта керування. Спочатку оцінимо як відпрацює система з МРС-регулятором по каналу «завдання-вихід» (рис. 2.42) та по каналу «збурення-вихід» (рис. 2.43).

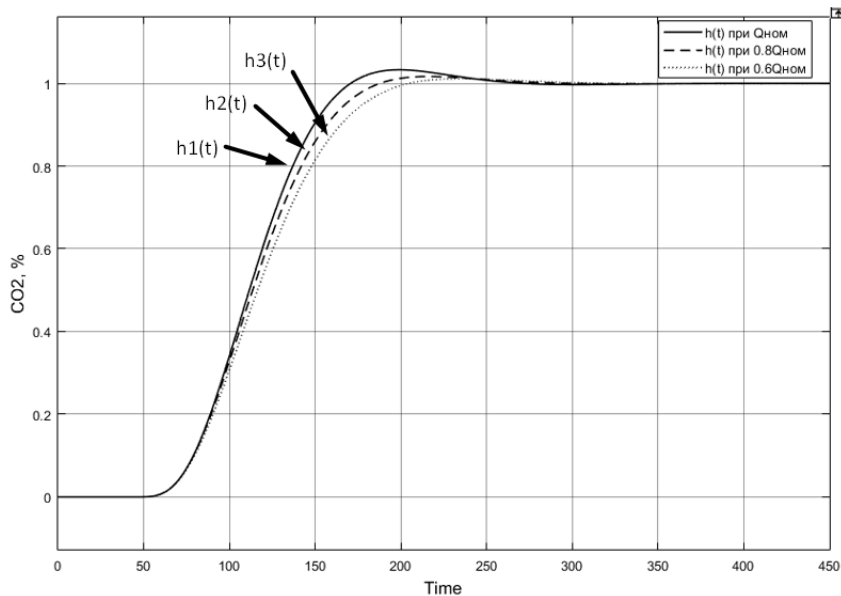


Рис. 2.42 Перехідні процеси в системі з МРС-регулятором по каналу «завдання-вихід» при зміні параметрів об'єкту керування «продуктивність вентилятора – витрата повітря»

Таблиця 2.15 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «завдання-вихід», зображених на рис. 2.42

Показник	Перехідні процеси на рис. 2.42		
	$h_1(t)$	$h_2(t)$	$h_3(t)$
Статична похибка, % O ₂	0	0	0
Динамічна похибка % O ₂	0.034	0.015	0.009
Степінь затухання	1	1	1
Час регулювання, с	220	187	192
Перерегулювання, %	3.4	1.5	0.9

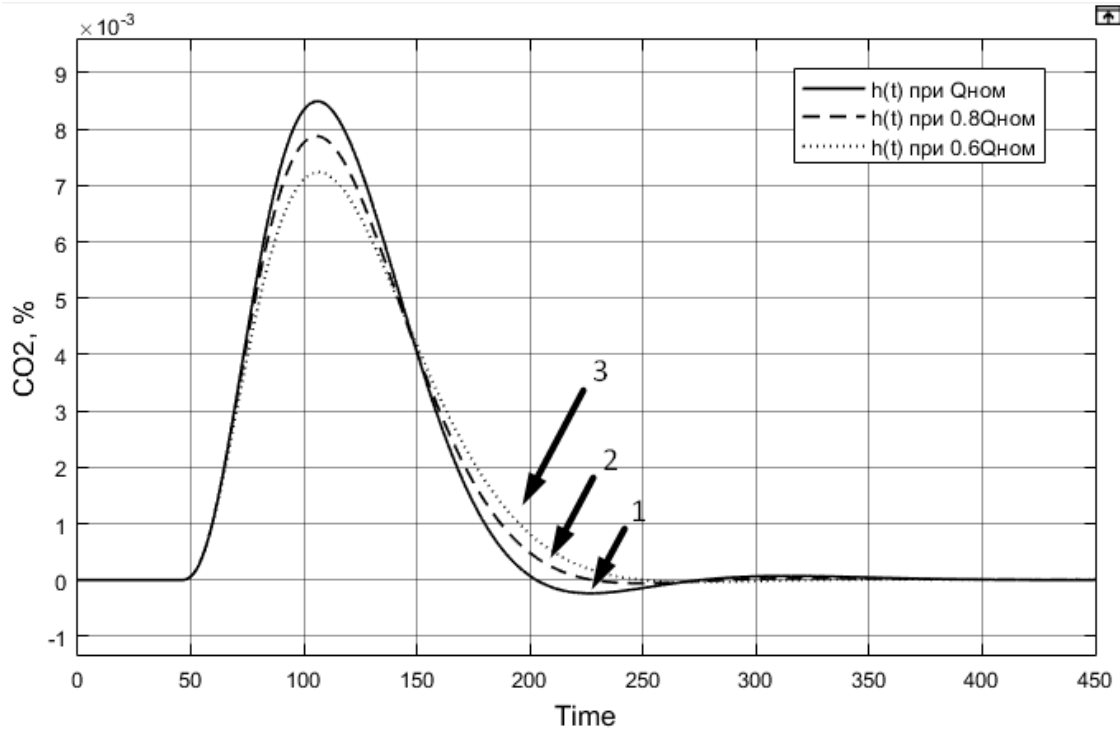


Рис. 2.43 Перехідні процеси в системі з МРС-регулятором по каналу «збурення – вихід» при зміні параметрів об’єкта «продуктивність вентилятора – витрата повітря»

Таблиця 2.16 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «завдання-вихід», зображених на рис. 2.43

Показник	Перехідні процеси на рис. 2.43		
	$h_1(t)$	$h_2(t)$	$h_3(t)$
Статична похибка, % O_2	0	0	0
Динамічна похибка % O_2	0.0086	0.0078	0.0072
Степінь затухання	1	1	1
Час регулювання, с	246	213	227
Перерегулювання, %	4.2	0.7	0

Тепер оцінимо як відпрацює каскадна система на зміну параметрів об’єкта керування внутрішнього контуру по каналу «завдання-вихід» (рис. 2.44) та по каналу «збурення-вихід» (рис. 2.45).

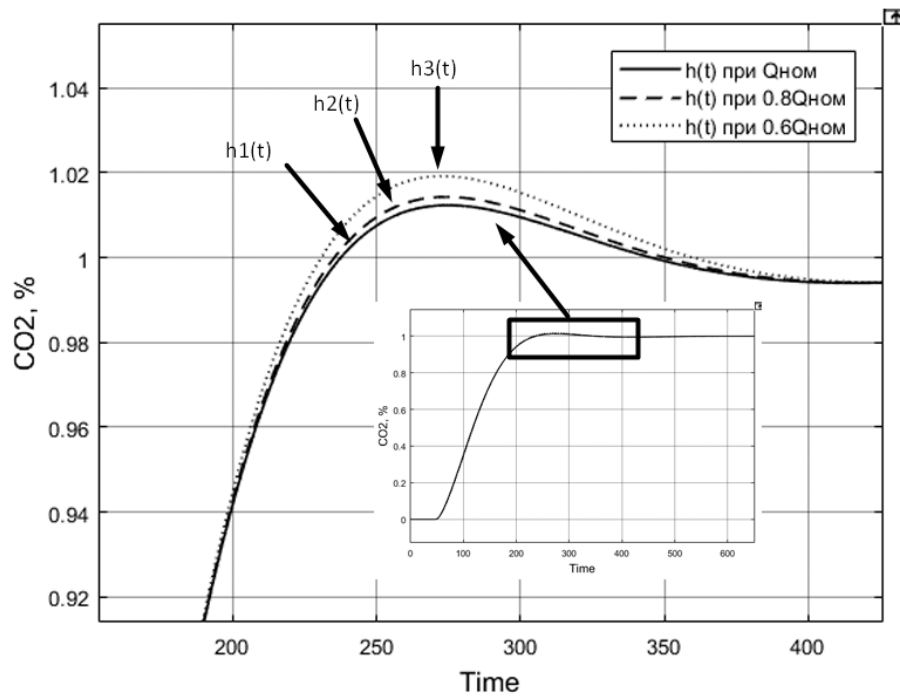


Рис. 2.44 Перехідна характеристика по каналу «завдання-вихід»

Таблиця 2.17 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «завдання-вихід», зображених на рис. 2.44

Показник	Перехідні характеристики на рис. 2.44		
	$h_1(t)$	$h_2(t)$	$h_3(t)$
Статична похибка, % O ₂	0	0	0
Динамічна похибка % O ₂	0.012	0.014	0.019
Степінь затухання	1	1	1
Час регулювання, с	298	312	335
Перерегулювання, %	1.2	1.4	1.9

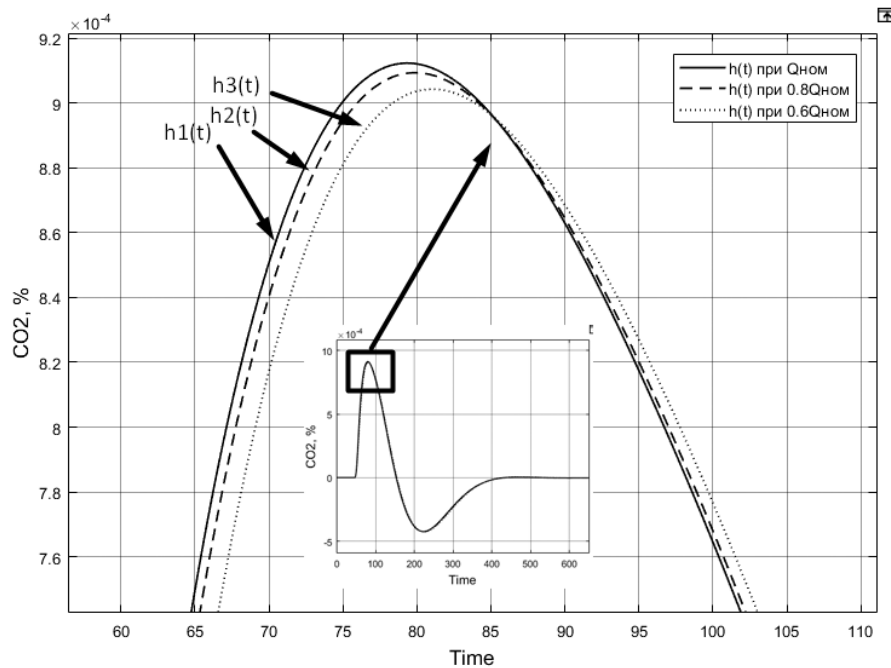


Рис. 2.45 Перехідна характеристика по каналу «збурення-вихід»

Таблиця 2.18 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «збурення-вихід», зображених на рис. 2.45

Показник	Перехідні характеристики на рис. 2.45		
	$h_1(t)$	$h_2(t)$	$h_3(t)$
Статична похибка, % O ₂	0	0	0
Динамічна похибка % O ₂	0.00091	0.000907	0.000904
Степінь затухання	0.98	0.97	0.96
Час регулювання, с	385	391	395
Перерегулювання, %	46	47	50

Дослідимо поведінку АСР при зміні параметрів об'єкту «витрата повітря-концентрація». Виконаємо варіацію параметрів об'єкту в діапазоні $\pm 15\%$. Так як оптимальне $T_{об} = 60$ с, то побудуємо перехідні процеси для каскадної системи при $T_{об} = 69$ с та $T_{об} = 51$ с. Графіки перехідних процесів по каналу «завдання-вихід» наведені на рис. 2.46, а по каналу «збурення-вихід» - на рис. 2.47.

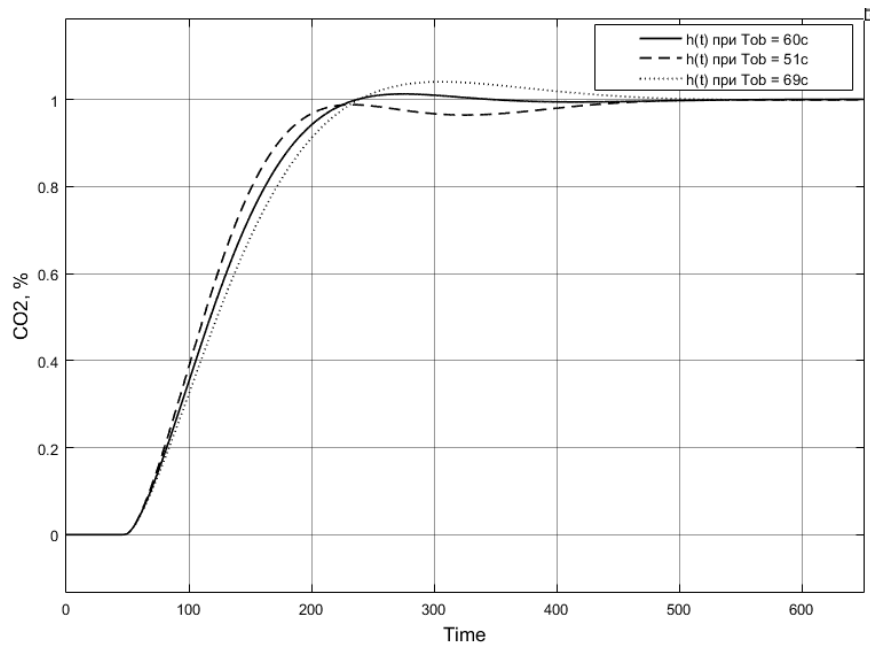


Рис. 2.46 Перехідна характеристика каскадної системи по каналу «завдання-вихід» при зміні $T_{об}$ зовнішнього контуру

Таблиця 2.19 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «завдання-вихід», зображених на рис. 2.46

Показник	Стала часу об'єкта		
	$T_{об}=60c$	$T_{об}=69c$	$T_{об}=51c$
Статична похибка, % O ₂	0	0	0
Динамічна похибка % O ₂	0.012	0.04	0
Степінь згасання	1	1	1
Час регулювання, с	298	435	425
Перерегулювання, %	1.2	4	0

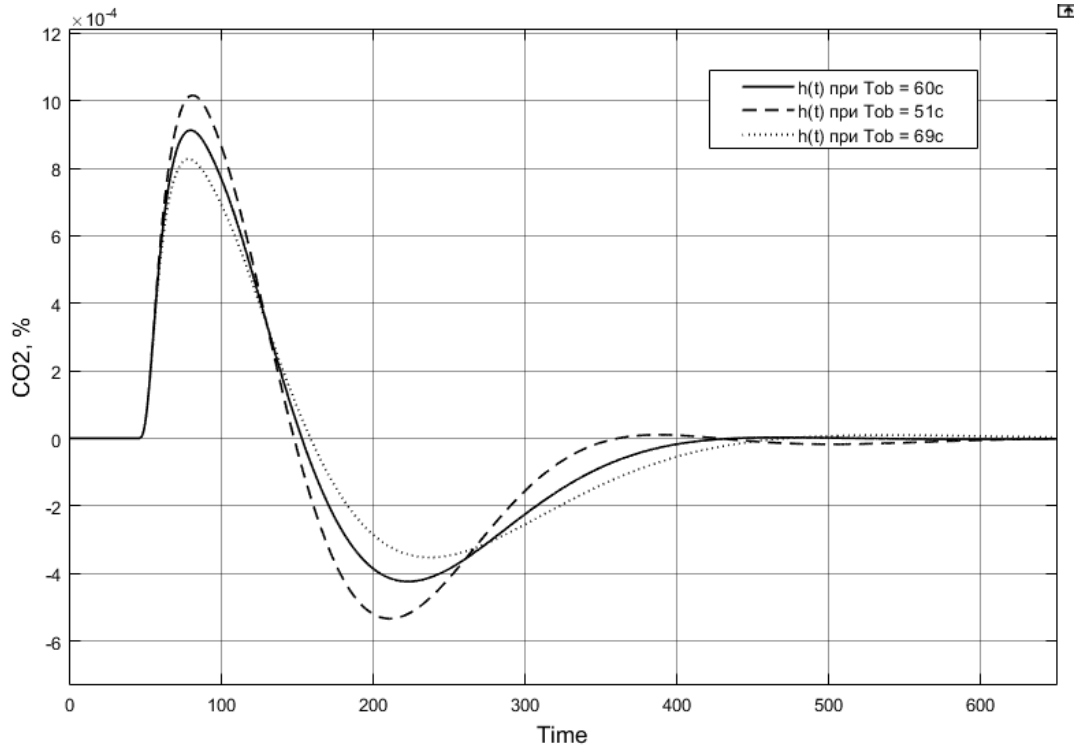


Рис. 2.47 Перехідна характеристика каскадної системи по каналу «збурення-вихід» при зміні $T_{об}$ зовнішнього контуру

Таблиця 2.20 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «збурення-вихід», зображених на рис. 2.47

Показник	Стала часу об'єкта		
	$T_{об}=60c$	$T_{об}=69c$	$T_{об}=51c$
Статична похибка, % O_2	0	0	0
Динамічна похибка % O_2	0.00091	0.00082	0.001
Степінь згасання	1	1	0,98
Час регулювання, с	385	440	345
Перерегулювання, %	46	42	52

Побудуємо графіки перехідних процесів по каналу «завдання-вихід» (рис. 2.48) та каналу «збурення-вихід» (рис. 2.49) для системи з МРС-регулятором.

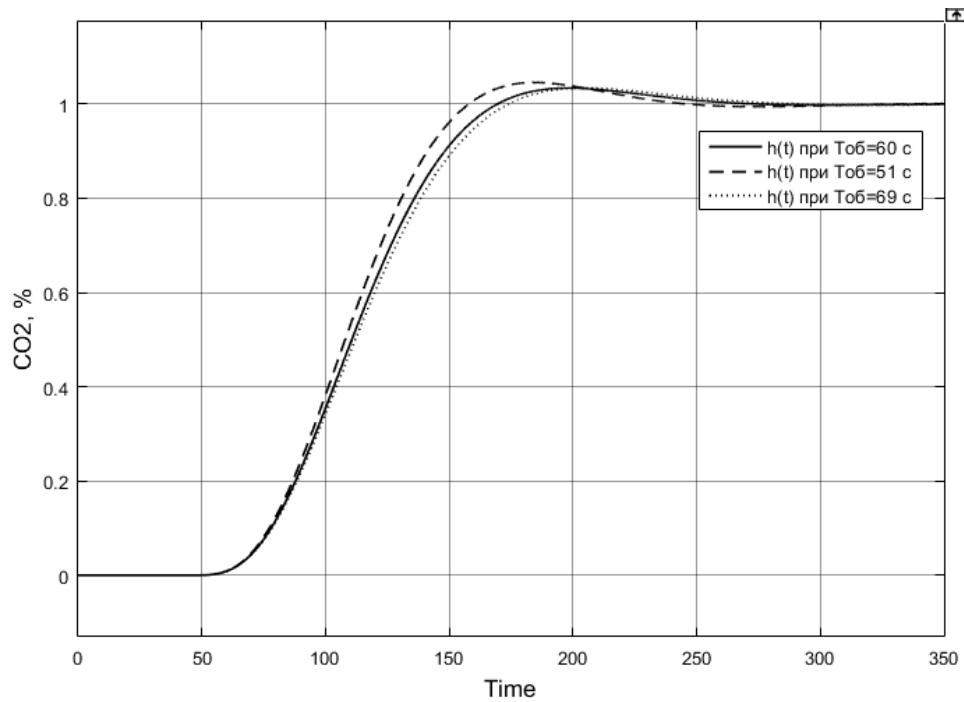


Рис. 2.48 Перехідна характеристика системи з МРС-регулятором по каналу «завдання-вихід» при зміні $T_{об}$ об'єкту «витрата повітря-концентрація»

Таблиця 2.21 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «завдання-вихід», зображених на рис. 2.48

Показник	Стала часу об'єкту керування		
	$T_{об}=60c$	$T_{об}=69c$	$T_{об}=51c$
Статична похибка, % O_2	0	0	0
Динамічна похибка % O_2	0.034	0.034	0.045
Степінь затухання	1	1	1
Час регулювання, с	220	235	210
Перерегулювання, %	3.4	3.4	4.5

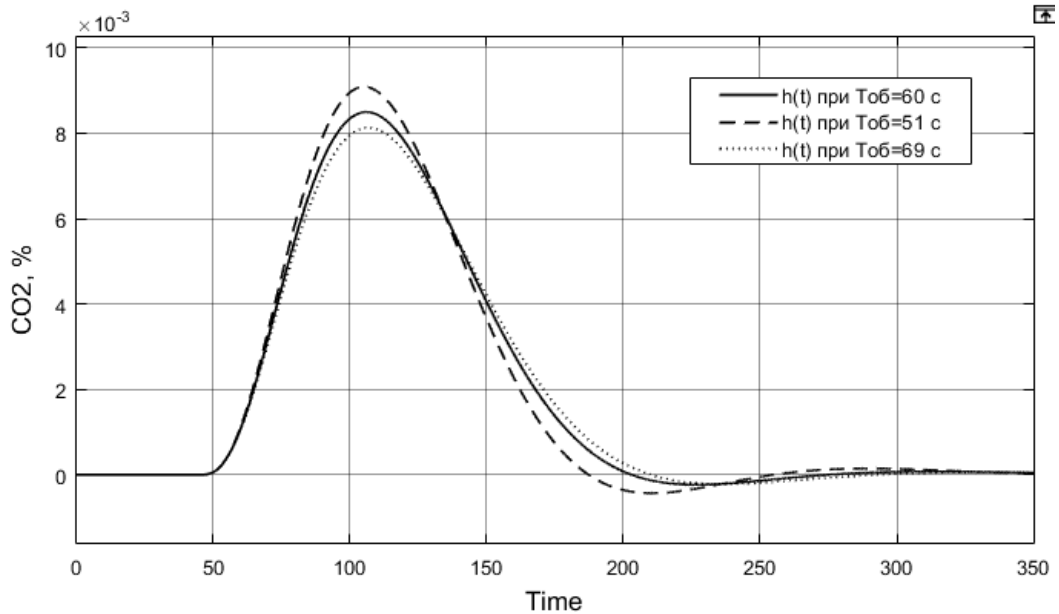


Рис. 2.49 Перехідна характеристика системи з МРС-регулятором по каналу «збурення-вихід» при зміні $T_{об}$ об'єкту «витрата повітря-концентрація»

Таблиця 2.22 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «завдання-вихід», зображених на рис. 2.49

Показник	Стала часу об'єкта		
	$T_{об}=60c$	$T_{об}=69c$	$T_{об}=51c$
Статична похибка, % O_2	0	0	0
Динамічна похибка % O_2	0.0086	0.0081	0.0098
Степінь затухання	1	1	0.98
Час регулювання, с	246	258	239
Перерегулювання, %	4.2	2.7	4.6

Тепер виконаємо варіацію параметру $\tau_{об}$ об'єкту в діапазоні $\pm 15\%$. Так як оптимальне $\tau_{об} = 45c$, то побудуємо перехідні процеси для каскадної системи при $\tau_{об} = 38.25c$ та $\tau_{об} = 51.75c$. Графіки перехідних процесів по каналу «завдання-вихід» наведені на рис. 2.50, а по каналу «збурення-вихід» - на рис. 2.51.

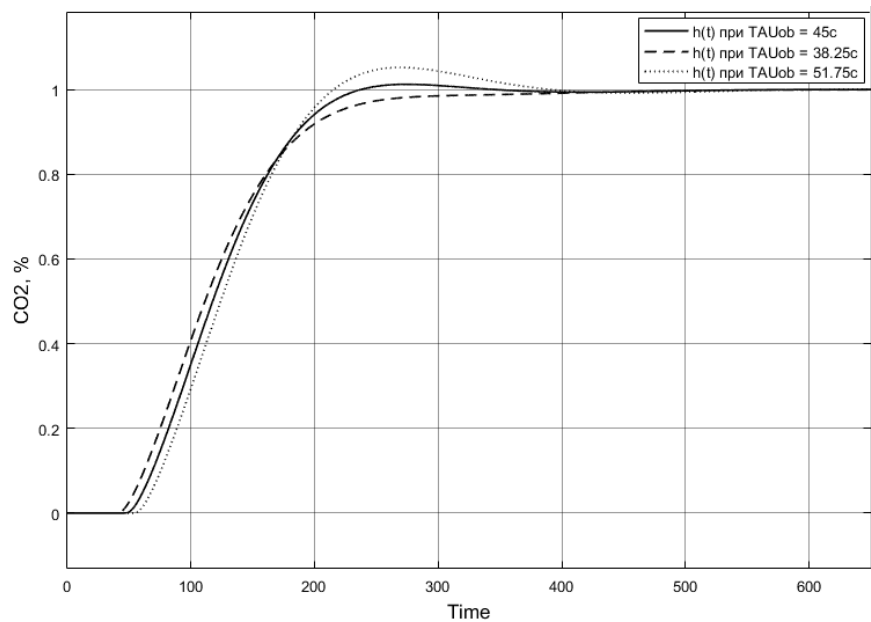


Рис. 2.50 Перехідна характеристика каскадної системи по каналу «завдання-вихід» при зміні $\tau_{об}$ зовнішнього контуру

Таблиця 2.23 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «завдання-вихід», зображених на рис. 2.50

Показник	Перехідні процеси на рис. 2.50		
	$\tau_{об} = 45c$	$\tau_{об} = 38.25c$	$\tau_{об} = 51.75c$
Статична похибка, % O ₂	0	0	0
Динамічна похибка % O ₂	0.012	0	0.052
Степінь згасання	1	1	1
Час регулювання, с	298	380	363
Перерегулювання, %	1.2	0	5.2

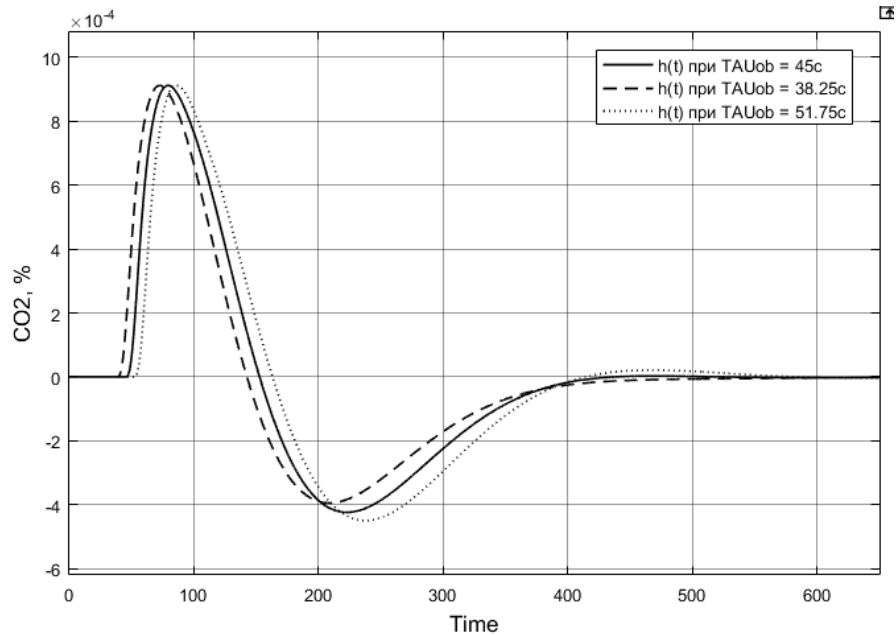


Рис. 2.51 Перехідна характеристика каскадної системи по каналу «збурення-вихід» при зміні $\tau_{об}$ зовнішнього контуру

Таблиця 2.24 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «збурення-вихід», зображених на рис. 2.51

Показник	Перехідні процеси на рис. 2.51		
	$\tau_{об} = 45c$	$\tau_{об} = 38.25c$	$\tau_{об} = 51.75c$
Статична похибка, % O ₂	0	0	0
Динамічна похибка % O ₂	0.00091	0.00091	0.00091
Степінь затухання	1	1	0.98
Час регулювання, с	385	393	450
Перерегулювання, %	46	43	49

Побудуємо графіки перехідних процесів по каналу «завдання-вихід» (рис. 2.52) та каналу «збурення-вихід» (рис. 2.53) для системи з МРС-регулятором.

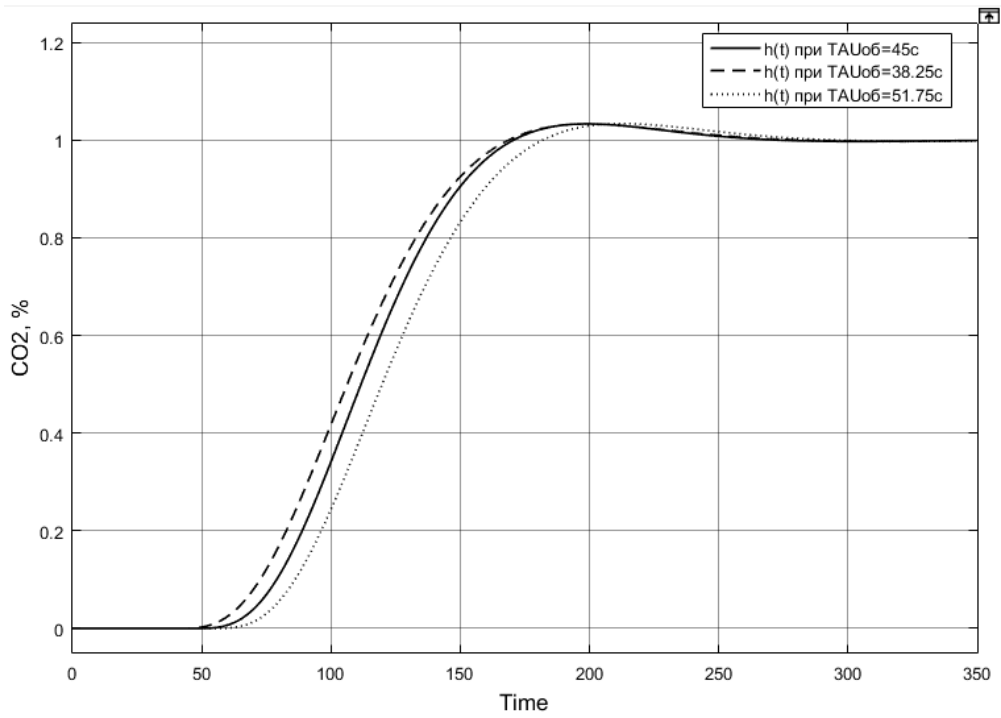


Рис. 2.52 Перехідна характеристика системи з МРС-регулятором по каналу «завдання-вихід» при зміні $\tau_{об}$ об'єкту «витрата повітря-концентрація»

Таблиця 2.25 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «завдання-вихід», зображених на рис. 2.52

Показник	Перехідні процеси на рис. 2.52		
	$\tau_{об} = 45c$	$\tau_{об} = 38.25c$	$\tau_{об} = 51.75c$
Статична похибка, % O ₂	0	0	0
Динамічна похибка % O ₂	0.034	0.032	0.033
Степінь затухання	1	1	1
Час регулювання, с	220	230	243
Перерегулювання, %	3.4	3.2	3.3

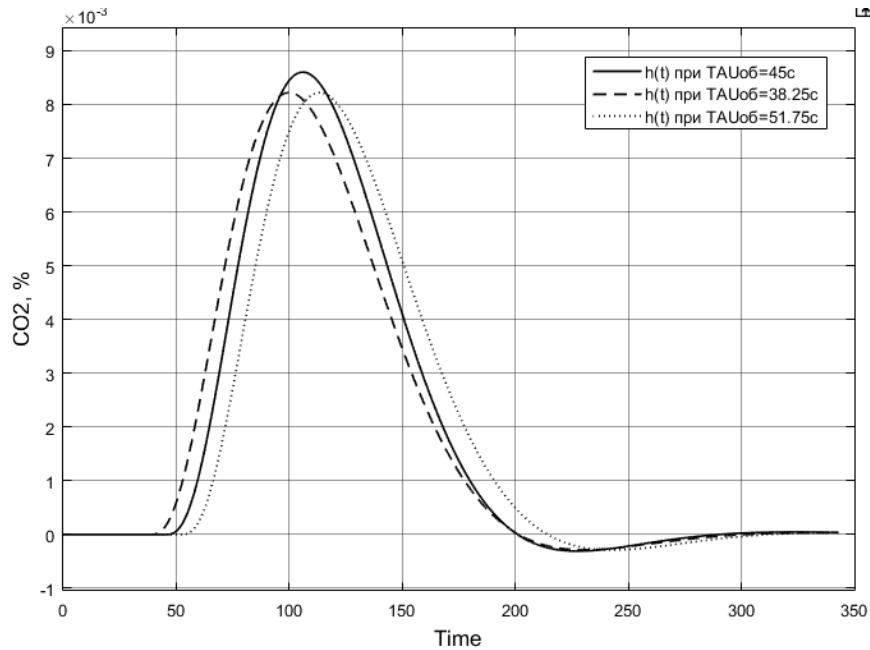


Рис. 2.53 Перехідна характеристика системи з МРС-регулятором по каналу «збурення-вихід» при зміні $\tau_{об}$ об'єкту «витрата повітря-концентрація»

Таблиця 2.26 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «завдання-вихід», зображених на рис. 2.53

Показник	Перехідні процеси на рис. 2.53		
	$\tau_{об} = 45c$	$\tau_{об} = 38.25c$	$\tau_{об} = 51.75c$
Статична похибка, % O ₂	0	0	0
Динамічна похибка % O ₂	0.0086	0.0082	0.0082
Степінь затухання	1	1	1
Час регулювання, с	246	240	260
Перерегулювання, %	4.2	3.3	3.2

2.9 Аналіз чутливості АСР розрідження

Для аналізу чутливості систем проведемо аналіз поведінки АСР при зміні параметрів моделі об'єкта керування. Для цього здійснимо моделювання перехідних процесів в при зміні параметрів об'єкта. Для цього візьмемо 80% від необхідної витрати димових газів, розрахованих за формулою (2.15), а саме 157.76 м³/с. При витраті димових газів 157.76 м³/с, розрахувавши передавальну

функція об'єкту керування «продуктивність димососа → розрідження» методом описаним в розділі 2.3, маємо $K_{об} = 0.007s + 0.5 \text{ кг}/(\% \cdot \text{с})$, $T_{об} = 4.47 \text{ с}$, $\sigma_{об} = 0.65 \text{ с}$. Тоді побудуємо перехідні процеси та проаналізуємо як відпрацюють вже налаштовані регулятори при зміні параметрів об'єкта керування.

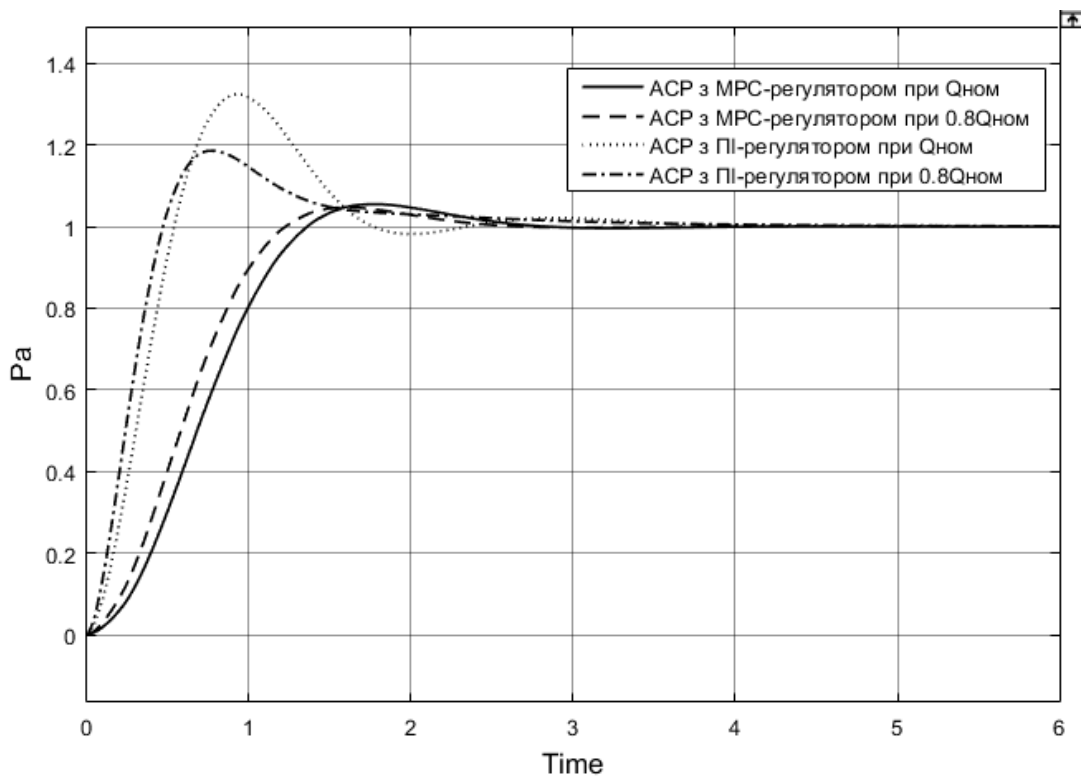


Рис. 2.54 Перехідні характеристики АСР розрідження по каналу «завдання-вихід» при зміні параметрів об'єкта керування

Таблиця 2.27 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «завдання-вихід», зображених на рис.2.54

	Система з МРС при $Q_{ном}$	Система з МРС при $0.8Q_{ном}$	Система з ПІ- регулятором при $Q_{ном}$	Система з ПІ- регулято- ром при $0.8Q_{ном}$
Статична похибка, Па	0	0	0	0
Динамічна похибка, Па	0.055	0.047	0.32	0.18
Степінь згасання	1	1	0.95	1
Час регулювання, с	2.35	2.15	3.1	2.6
Перерегулювання , %	5.5	4.7	32	18

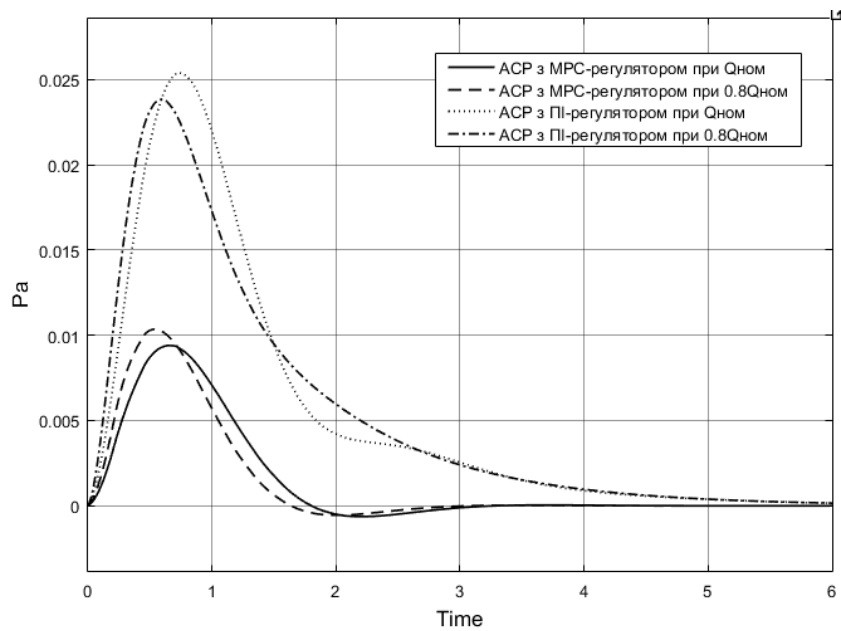


Рис. 2.55 Перехідні характеристики АСР розрідження по каналу «збурення-вихід» при зміні параметрів об'єкту керування

Таблиця 2.28 Прямі показники якості перехідних процесів по каналу «збурення-вихід», зображених на рис.2.55

	Система з МРС при $Q_{ном}$	Система з МРС при $0.8Q_{ном}$	Система з ПІ- регулятором при $Q_{ном}$	Система з ПІ- регулятор ом при $0.8Q_{ном}$
Статична похибка, $Pa \cdot 10^{-3}$	0	0	0	0
Динамічна похибка, $Pa \cdot 10^{-3}$	9.3	10.33	25.4	23.8
Степінь затухання	1	1	1	1
Час регулювання, с	2.55	2.2	4.2	4.1
Перерегулювання, %	6.6	5.3	0	0

Висновки до розділу

При зміні параметрів об'єкту керування внутрішнього контуру каскадної системи регулювання економічності горіння ми отримали незначні зміни перехідних процесів, проте це зумовлено тим, що інерційність зовнішнього контуру значно більша від внутрішнього, тому зміни у внутрішньому контурі не

сильно вплинули на зміну контрольованого параметру. А ось при зміні параметрів об'єкту зовнішнього контуру ми отримали помітні зміни в перехідних процесах. Наприклад по каналу «завдання-вихід» час регулювання при зміні $T_{об}$ збільшився на 100с в обох випадках. МРС – регулятор в свою чергу, опираючись на внутрішню модель об'єкта та намагаючись мінімізувати функцію, описану в формулі (1.4), зміг вивести контрольовану величину на заданий рівень майже без погіршення прямих показників якості. Для АСР розрідження в топці котла ситуація аналогічна.

3. Приклад технічної реалізації

Для можливості застосування розробленого регулятора на практиці потрібно імплементувати його на контролер. Проведемо тестування для АСР розрідження в топці котла (рис. 3.1). Так як ПЗ для програмування контролерів не має готової реалізації MPC, то згенеруємо код MPC регулятора в еквівалентний код ST. Для цього потрібно створити підсистему зі створеного MPC.

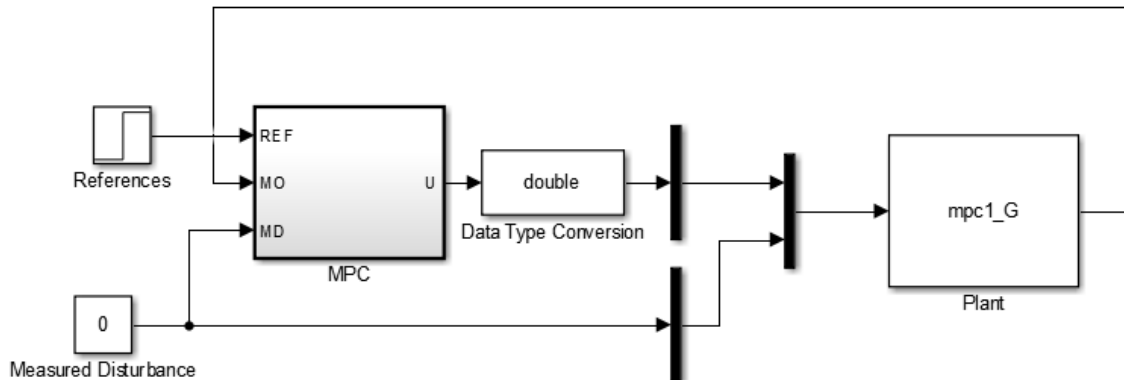


Рис. 3.1 Підготовлена схема АСР розрідження в топці котла

Використовуючи аддон «PLC Coder» для Matlab оберемо IDE для якого треба згенерувати код ST (рис. 3.2). PLC Coder дає великий вибір IDE, таких як CodeSys, PC Worx, TIA Portal та ін.

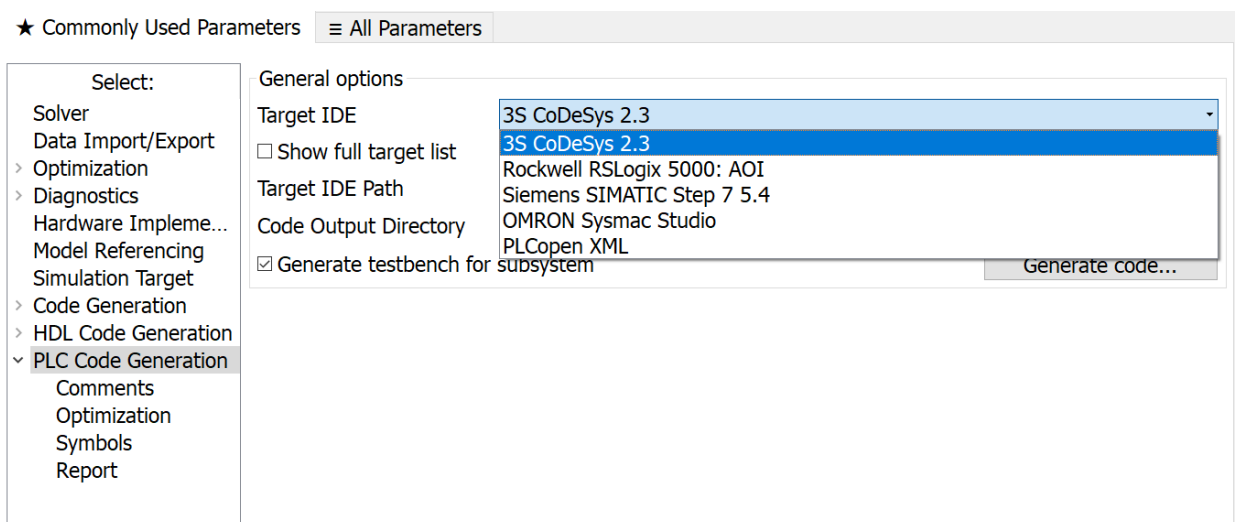


Рис. 3.2 Вибір IDE для генерації ST-коду

Для прикладу візьмемо «CodeSys 2.3». Створимо новий проект та імпортуємо згенерований код MPC. Для додаткової перевірки додатково згенеруємо так званий «testbench» (випробувальний стенд), тобто ми отримаємо не тільки код MPC

регулятора, а й код усієї нашої системи з об'єктом. Після імпорту CodeSys автоматично згенерує усі необхідні POU's (функції та функціональні блоки) (рис. 3.3).

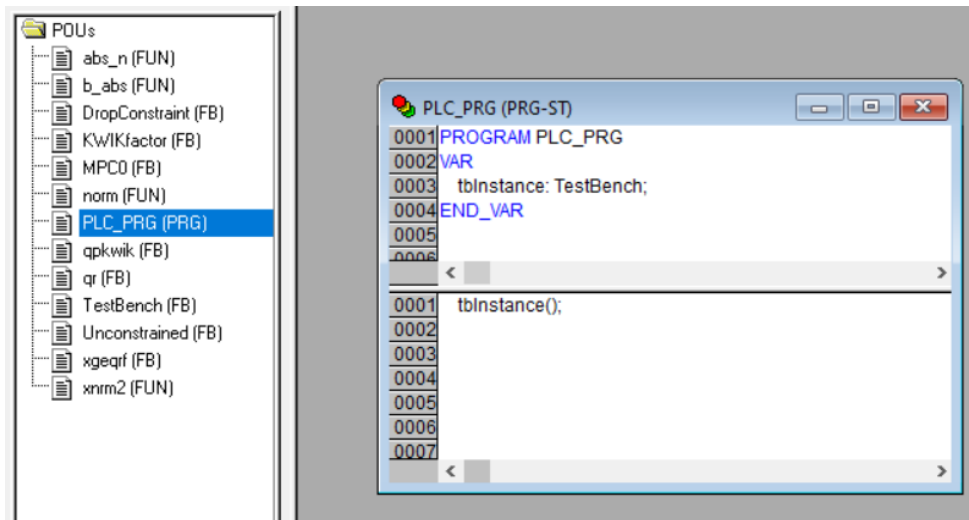


Рис. 3.3 Створений проект з MPC – регулятором та «testbench»

Для тестування створеної системи використаємо віртуальний контролер, що входить до складу CodeSys – SP PLCWinNT V2.4.7. Спочатку протестуємо роботу системи, використовуючи «testbench». Для цього завантажуюмо програму на контролер (рис. 3.4). Результати роботи можна побачити на рис. 3.5 (значення уставки – 1)

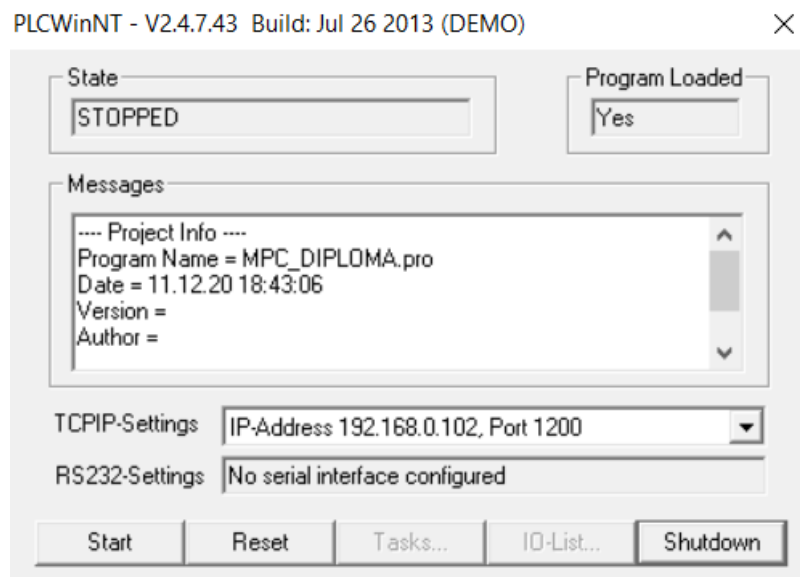


Рис. 3.4 Контролер із завантаженою програмою

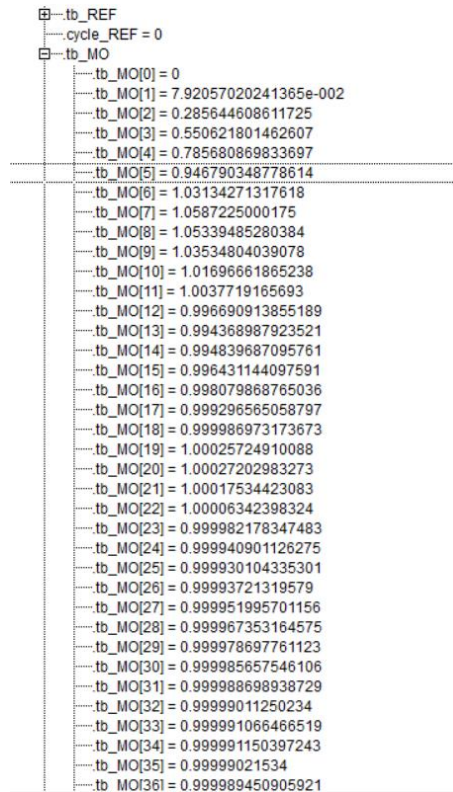


Рис. 3.5 Значення точок перехідного процесу

Як видно з рис. 3.5 має досить швидкий вихід на задане значення з мінімальним перерегулюванням, що досить схоже на той перехідний процес, що ми отримали в Simulink в попередньому розділі.

Для подальшої імітації роботи системи з регулятором використаємо модель об'єкта у середовищі Simulink. Змінимо для цього програму в Codesys (рис. 3.6).

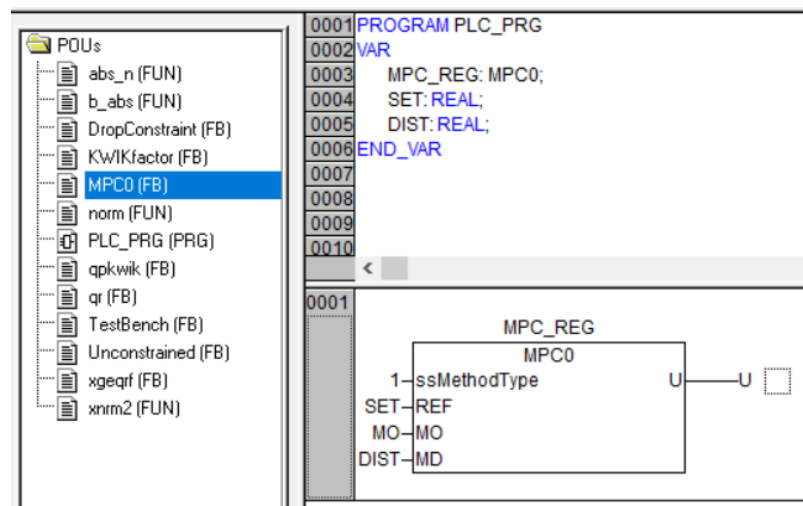


Рис. 3.6 Програма АСР регулювання розрідження

Функціональний блок MPC0 і є нашим MPC. Вхід «МО» - вхід для сигналу зворотнього зв'язку від об'єкта керування (імітація сигналу від датчика), вхід «REF» - значення уставки для контрольованого параметра (в даному випадку це

уставка для розрідження в топці), вхід «MD» - сигнал збурення (збурення зміною витрати повітря), вихід «U» - керуючий вплив регулятора. Для передачі даних між Simulink та Codesys використаємо протокол передачі OPC. Тепер можна завантажити зроблений проект в контролер та запустити його. Після цього налаштуємо OPC – сервер.

OPC-клієнтом буде виступати Simulink, в якому відбуватиметься імітація роботи об'єкта керування. OPC-клієнт отримуватиме від OPC-сервера CoDeSys значення виходу MPC-регулятора. Отримане значення поступатиме на вхід об'єкта, а його вихід передаватиме своє поточне значення назад до OPC-сервера. Для роботи з OPC-сервером в Simulink є бібліотека OPC Toolbox. Для роботи нам знадобляться блоки OPC Configuration, який містить основні налаштування підключення до сервера, OPC Read для зчитування даних з OPC-сервера та OPC Write для запису даних на сервер. Створена в Simulink система наведена на рис. 3.7. Отримали перехідний процес для АСР розрідження при зміні уставки на 5 Па, який наведено на рис. 3.8.

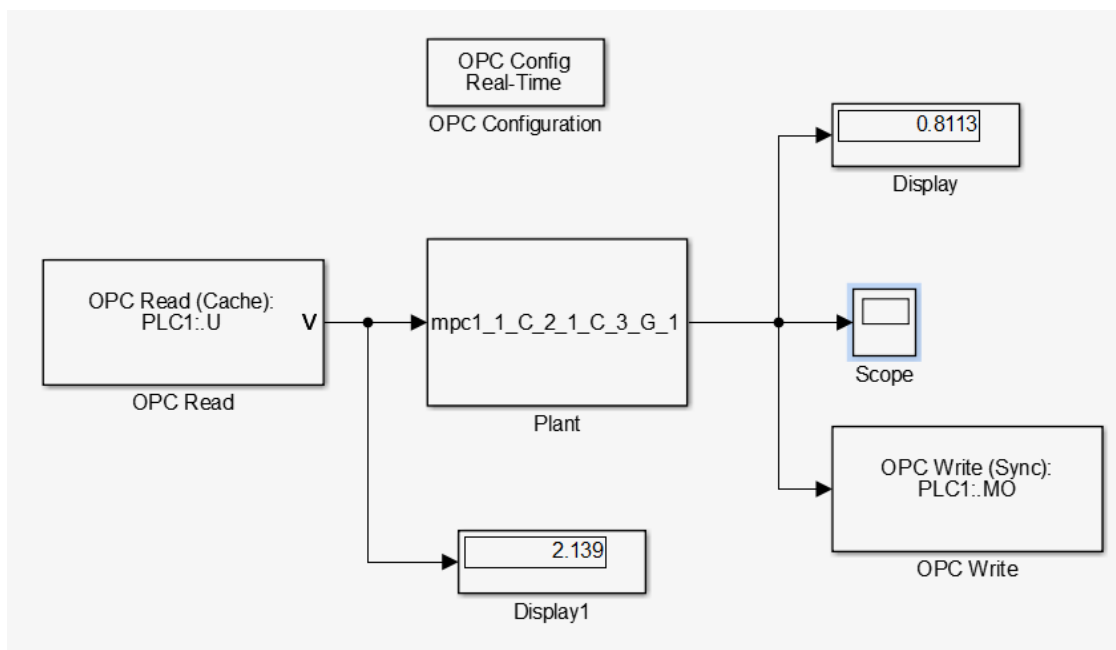


Рис. 3.7 Система в Simulink

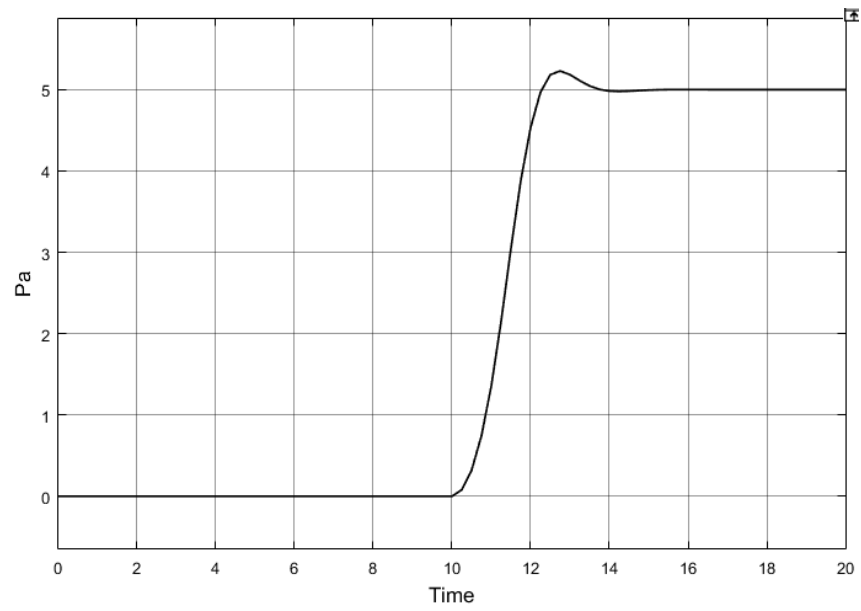


Рис. 3.8 Перехідний процес при зміні уставки на 5 Па

4. Розробка стартап проекту

4.1 Опис ідеї проекту

Ідея даного проекту полягає у методології створення системи регулювання об'єктів керування з використанням технології МРС, робота якого базується на основі математичної моделі об'єкта. По-перше для цього потрібна адекватна математична модель об'єкту, яка буде описувати його поведінку в різних режимах роботи. Точну модель можна побудувати на основі експериментальних даних чи в ході аналітичного розрахунку. В цьому випадку необхідно перевірити адекватність такої моделі. МРС-регулятор налаштовується відповідно до вимог, які висуваються до роботи автоматизованої системи керування. Відповідно до необхідної точності регулювання, збурюючих впливів та певних показників якості виконується налаштування обмежень, горизонтів та вагових коефіцієнтів МРС-регулятора. Так як в основі роботи регулятора закладена задача мінімізації спеціальної функції в основі якої закладено розрахунок прогнозованого значення контрольованої величини, то така система зможе підтримувати якісне регулювання при зміні технологічних параметрів об'єкту в ході експлуатації. Запропонована процедура створення АСР об'єкта керування придатна для більшості технологічних об'єктів. Така автоматизована система дозволяє значно покращити якість проходження технологічного процесу.

Незважаючи на те, що МРС підходить практично для вирішення будь-яких задач автоматизації, він найкраще показує себе при вирішенні наступних проблем:

- велика кількість маніпульованих змінних;
- обмеження накладені як на маніпульовані, так і на контрольовані змінні;
- несправності обладнання (датчиків);
- часові затримки.

Основними ознаками ефективного керування технологічними об'єктами:

- виключення аварій, що може призвести до великих втрат як промислових ресурсів, так і людських;
- забезпечення мінімально можливої швидкості зносу обладнання;

- досягнення максимальної тривалості експлуатації обладнання і виробництва в цілому;

Побудуємо морфологічну карту (табл. 4.1), на якій покажемо можливі варіанти рішень реалізації кожної функції.

Таблиця 4.1 Морфологічна карта

Основні параметри	Проміжні рішення			
	1-ше	2-ге	3-тє	4-тє
Використання технологій керування на основі прогнозуючих моделей	MPC	Adaptive MPC	Gain-Scheduled MPC	Non-Linear MPC
Типи технологічних об'єктів	1	5	10	20
Кількість підтримуваних IDE	Codesys	TIA Portal, PC Worx, CodeSys	Rockwell RSLogix, B&R Automation Studio 3.0, TIA Portal, PC Worx, CodeSys	Rockwell RSLogix, B&R Automation Studio 3.0, TIA Portal, PC Worx, CodeSys, PLCopen XML, KW-Software MULTIPROG

Таким чином, ідею проекту можна сформулювати так: Розробити автоматизовану систему керування парового котлоагрегату з використанням технології MPC. Задум товару:

Товар за задумом. Контролерне ПЗ, яке реалізує автоматизовану систему керування котлоагрегатом.

Товар у реальному виконанні. Автоматизована система керування паровим котлоагрегатом з використанням технології MPC, який базується на основі математичної моделі котла в типових режимах роботи.

Товар з підкріпленням. Створення систем керування для більшої кількості теплоенергетичних промислових об'єктів, таких як барабанні та прямоточні котли, методичні печі, тепlopункти та ін.

Таблиця 4.2 Опрацювання питань удосконалення продукту

№ з/п	Запитання	Відповідь
1	Частиною яких систем є продукт?	ТЕС, ГЕС, АЕС.
2	Які функції надсистеми може виконувати продукт?	Вирішення задач автоматизації у теплоенергетиці.
3	Чи можна розділити продукт на етапи?	<ul style="list-style-type: none"> - Збір, вивчення і аналіз теоретичної і експериментальної інформації по об'єкту керування (процесу). - Побудова адекватної математичної моделі. - Налаштування МРС регулятора на бажані показники якості з врахуванням накладених обмежень та вихідних коефіцієнтів. - Генерація еквівалентного ST коду для потрібного ПЗ для програмування контролерів. - Тестування розробленої АСР.
4	Яким має бути ідеальний продукт?	Ефективне регулювання та підтримка регульованих параметрів на заданому рівні в усіх режимах роботи та забезпечення бажаних показників якості.
6	Що відбудеться, якщо вилучити цей продукт? Чим його можна замінити?	Можна буде використовувати предиктивні модулі від компаній Emerson Electric та Siemens.
7	Яким цей продукт був у минулому?	Використання простих та надійних лінійних законів регулювання
8	На розвиток яких функцій було спрямоване удосконалення продукту?	Удосконалення продукту спрямоване на більш ефективне регулювання при різних режимах роботи об'єкту.

4.2 Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 4.3 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Керування великою кількістю параметрів	АСК на основі MPC дає можливість одночасного керування великою кількістю маніпульованих змінних	Керування великою кількістю маніпульованих параметрів за допомогою невеликої кількості функціональних блоків
2.	Довгострокова робота системи	Опираючись на математичну модель процесу (об'єкту) маємо можливість роботи АСК при зносі датчиків та обладнання	Незначне зниження ефективності роботи при зносі обладнання
3.	Використання на різному контролерному обладнанні	Генерація для MPC еквівалентного ST-коду, який відповідає стандарту ІЕС 61131-3 та підтримується більшістю контролерного обладнання від різноманітних виробників	Відповідність стандарту ІЕС 61131-3, що дає змогу використання на більшості контролерів
4.	Якісна та ефективна робота об'єкту у різних режимах роботи	Можливість використання Gain Scheduled MPC, який дозволяє перемикатися на різні налаштування MPC відповідно до режиму роботи	Ефективна робота при різних режимах роботи

Таблиця 4.4 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові				
I. Товар за задумом	Автоматизована системи керування котлоагрегатом				
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	В/НВ	М/Нм	Вр/Тх/Тл	О/К/С
	Використання технологій керування на основі прогнозуючих моделей	В	М	Тл	О
	Типи технологічних об'єктів	В	М	Тл	К
	Кількість підтримуваних IDE	В	Нм	Тл	К
	Якість: відповідає ІЕС 61131-3				
	Пакування: -				
	Марка: PreAutomation				
III. Товар з підкріпленням	До продажу: бібліотека функціональних блоків, які реалізують автоматизовану систему керування котлоагрегатом на основі прогнозуючої моделі з використанням МРС.				
	Після продажу: Створення ПЗ систем керування для більшої кількості теплоенергетичних промислових об'єктів.				

В/Нв – відчутні/невідчутні; М/Нм – монотонні/немонотонні; Вр/Тх/Тл/Е/Ор – вартісні/ технічні/ технологічні; О/К/С – обов'язкові/ кількісні/ сюрпризні.

Таблиця 4.5 Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Клієнти купують продукт безпосередньо у компанії-розробника	<ul style="list-style-type: none"> - Аналіз ринку - Встановлення безпосередніх контактів з покупцями - Проведення рекламних заходів - Інформаційне забезпечення 	0 - Канал нульового рівня (виробник безпосередньо продає товар клієнту)	Через сайт виробника

Таблиця 4.6 Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Клієнти дізнаються про товар на виставках, наукових конференціях	<ul style="list-style-type: none"> - Глобальна мережа - Наукові публікації 	Більш якісна та ефективна автоматизація з використанням технології МРС	Продемонструвати ефективність та меншу ціну в порівнянні з товарами аналогами	АСК на основі прогнозуючої моделі

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 4.7 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
<ul style="list-style-type: none"> - Керування великою кількістю параметрів - Довгострокова робота системи - Використання на різному контролерному обладнанні - Якісна та ефективна робота об'єкту у різних режимах роботи 	<ul style="list-style-type: none"> - Електроенергетика - Нафтопереробна промисловість - Хімічна промисловість 	<ul style="list-style-type: none"> Зменшена ціна Легке впровадження 	<ul style="list-style-type: none"> Якість Стабільність роботи

Таблиця 4.8 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Мала розповсюдженість використання технології МРС в енергетиці	Багато потенційних клієнтів в теплоенергетичній промисловості	Багато пропозицій клієнтам в теплоенергетичній промисловості
2.	Мала кількість конкурентів на вітчизняному ринку	Вільний ринок	Можливість швидкого розвитку
3.	Відсутність потреби в постачальниках	Розробка ПЗ для АСК не потребує специфічного дорогого обладнання та сировини	Незалежність від постачальників дасть змогу швидше розвивати продукт
4.	Наявність спеціалістів у даній сфері	Високий попит спеціалістів у сфері автоматизації	Якісні алгоритми, швидке зростання ідей

Таблиця 4.9 SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ul style="list-style-type: none"> • Відносно низька ціна на продукт • Використання на різному контролерному обладнанні • Забезпечення якісної та ефективної роботи об'єкту у різних режимах роботи та при навіть при зносі обладнання • Можливість налаштування системи для будь-якого процесу (об'єкту). 	<ul style="list-style-type: none"> • Недостатня універсальність (певні вимоги у кожного підприємства) • Відсутність репутації на ринку
Можливості	Загрози
<ul style="list-style-type: none"> • Мала розповсюдженість використання технології MPC в енергетиці • Мала кількість конкурентів на вітчизняному ринку • Відсутність потреби в постачальниках • Наявність спеціалістів у даній сфері 	<ul style="list-style-type: none"> • Велика конкуренція на світовому ринку • Відсутність значних коштів для масштабного розповсюдження та популяризації продукту

4.4 Обґрунтування ресурсів та витрат проекту

Блок структури витрат описує найбільш суттєві витрати необхідні для роботи в рамках конкретної бізнес-моделі. Це витрати пов'язані з функціонуванням бізнес-моделі. Створення і здійснення ціннісних пропозицій, підтримання взаємовідносин з клієнтами, отримання прибутку – всі ці процеси пов'язані з будь-якими витратами.

Таблиця 4.10 Планова потреба у виробничому обладнанні та устаткуванні

№ з/п	Вид обладнання (устаткування, пристрою)	Тип (модель)	Виробник обладнання (устаткування, пристрою)	Терміни постачання	Вартість, тис. грн.
1.	GPU (1 шт)	Nvidia RTX2070	Nvidia	1 тиждень	18
2.	CPU (1шт)	I7 9700Q	Intel	1 тиждень	13
3.	Материнська плата (1 шт)	ASUS TUF Z390+	Asus	1 тиждень	7
4.	Монітор (1шт)	ASUS VG 259 FHD	Asus	1 тиждень	6
5.	RAM (2 шт)	Predator DDR4 16GB	Kingston	1 тиждень	3
6.	SSD (1 шт)	Samsung 970 EVO	Samsung	1 тиждень	3
7.	Блок живлення (1 шт)	be quiet! System Power 9	be quiet!	1 тиждень	2.7
Разом:					52.7

Таблиця 4.11 Планова вартість нематеріальних активів

№ з/п	Вид активів	Активи, що можуть бути віднесені до даного виду	Вартість, тис. грн.
1.	Авторське право та суміжні з ним права	Право на комп'ютерні програми, програми для електронно-обчислювальних машин, компіляції даних (бази даних)	65.7

Таблиця 4.12 Загальні початкові витрати проекту

№ з/п	Стаття витрат	Обсяги витрат в 0-й рік, тис. грн.
1.	Витрати на придбання й оренду земельних ділянок, будівель, приміщень, споруд	122.4
2.	Витрати на придбання обладнання та устаткування та пристроїв	52.7
3.	Витрати на придбання нематеріальних активів	65.7
4.	Оплата юридичних послуг	15
6.	Витрати на передвиробничі маркетингові дослідження і створення збутової мережі	20
7.	Витрати, пов'язані з діяльністю персоналу	168.5
	Разом	444.55

Таблиця 4.13 Планові загальногосподарські витрати

№ з/п	Стаття витрат	Витрати за період, тис. грн.		
		1-й рік	2-й рік	3-й рік
1.	Витрати на оренду земельних ділянок, будівель, приміщень, споруд	122.4	122.4	122.4
2.	Витрати на обладнання, устаткування та пристрої	0	52.7	0
3.	Витрати на придбання нематеріальних активів	0	65.7	0
4.	Витрати на персонал	168.5	400	400
5.	Витрати на електроенергію	15	20	25
6.	Витрати на водопостачання	10	15	17
7.	Витрати на просування та рекламу	20	35	60
8.	Оплата юридичних послуг	15	20	30
	<i>Разом:</i>	350.9	730.8	654.4

ВИСНОВОК

В магістерській дисертації було розроблено систему автоматичного керування газоповітряного тракту котла. Її можна поділити на АСР економічного горіння палива та АСР розрідження в топці котла. По-перше було виконано розрахунок та створення спрощеної математичної моделі тракту при номінальному режимі роботи. Для цього спочатку виконали розрахунок продуктивності вентилятора та димососа, а вже на основі цих даних використовуючи відповідні аеродинамічні характеристики і була виведена модель тракту.

Для АСР економічного горіння палива була розрахована каскадна система регулювання з додатковим коригуючим сигналом по вмісту кисню в димових газах, а для АСР розрідження – комбінована система з компенсацією збурення по зміні витрати повітря. Наступним кроком було створення автоматизованої системи в основі якої лежить використання технології MPC.

Основною особливістю управління за допомогою MPC регулятора є наявність математичної моделі об'єкта управління, яка досить точно описує його поведінку. Наявність адекватної математичної моделі об'єкта управління дозволяє прогнозувати значення контрольованої змінної на певне число кроків вперед (горизонт передбачення).

Перед налаштуванням регулятора була створена модель системи в просторі станів та перевірена на адекватність. Після усіх налаштувань MPC – регулятора та створення системи було проведено порівняльний аналіз з системами, які використовують лінійні закони регулювання.

Згідно з висновку до 2 розділу система з MPC – регулятором значно краще реагує на зміну параметрів об'єкту, так як орієнтується на «еталонну» модель об'єкту, яка «зашията» в нього.

В третьому розділі розглядається приклад технічної реалізації АСР розрідження з використанням MPC – регулятора. Проведено імітаційне моделювання системи, де сам регулятор працює на віртуальному контролері, а модель об'єкту імітується в середовищі Simulink. Передача даних здійснюється за допомогою протоколу OPC. Як результат ми отримали перехідний процес

ідентичний тому, що був у 2 розділі, тому можна зробити висновок, що все працює правильно. В 4 розділі було виконано розробку стартап-проекту. В цьому розділі описана сама ідея стартапу, розроблена морфологічна карта та ринкова стратегія проекту. Також проведено аналіз ринкових можливостей запуску проекту та виконано обґрунтування необхідних ресурсів та витрат.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Системы управления нестационарным объектом на основе МРС регулятора и ПИД регулятора с нечеткой логикой. Надеждин И. С., Горюнов А. Г. // Национальный исследовательский томский политехнический университет, Томск
2. Ложечников В. Ф. Аналитическая многорежимная математическая модель динамики газовоздушного тракта барабанного котла средней мощности. В. Ф. Ложечников, В. С. Михайленко, И. Н. Максименко // Автоматика. Автоматизация. Електротехнічні комплекси та системи. - 2007. - № 2. - С. 29-33
3. Методические указания к самостоятельной работе и курсовому проектированию по дисциплинам «Теплотехника» и «Тепловые процессы и агрегаты в технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов» для студентов очной и заочной формы обучения направления 240100 «Химическая технология и биотехнология» и специальности 240304 «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов» - Томск: Изд. ТПУ, 2010. – 44 с.
4. Топливо, основы теории горения и топочные устройства. Текст лекций по курсу «Топливо и топочные устройства» для студентов заочного обучения специальностей 7.090510 «Теплоэнергетика» и 7.000008 «Энергетический менеджмент»: – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – 68с
5. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. Кузнецов Н.В. и др. (ред.). 1973
6. ТЯГОДУТЬЕВЫЕ МАШИНЫ [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.sibem-bkz.com/_upload/upl_file1338368486_1.pdf
7. Кузьменко Д.Я. «Регулирование и автоматизация паровых котлов»: Учебник для машиностроительных техникумов. Изд. 2-е, перераб. И доп. М.: Энергия, 1978. -160с.

8. Смородин С.Н., Иванов А.Н., Белоусов В.Н., Лакомкин В.Ю. // Тепловой и аэродинамический расчеты котельных установок: учеб. пособие. - 5-е изд.: - 2018. - 200 с., ил. 41.
9. Довідковий посібник до лекцій і курсового проектування з дисциплін “Основи автоматизації теплоенергетичних процесів”, “Автоматизація теплоенергетичних процесів і виробництв”, дипломного проектування. Для студентів спеціальностей 7.092501 “Автоматизоване управління технологічними процесами” і 7.092502 “Комп’ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва” напряму 6.0925 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології.
10. Кулаков Г. Т. К 88 Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: — Мн.: Выш. шк., 1984. — 192 е., ил.
11. ВЧЕНІ ЗАПИСКИ Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки Том 30 (69) № 3 2019 Частина 1
12. Ключев, А. С. Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов [Текст] / Ключев А. С., Товарнов А. Г. – М.: Энергия, 1970. – 280 с.
13. Тодорцев Ю.К., Бундюк А.М., Ларіонова О.С. Математична модель контура теплопостачання когенераційної енергетичної установки. Автоматика, автоматизація, електротехнічні комплекси та системи. 2009. № 2. С. 8–11. 3. Брунеткин А.И., Максимов М.В., Бондаренко А.В.
14. Демченко, В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. - О.: Астропринт, 2001. - с. 305.
15. MODEL PREDICTIVE CONTROL TOOLBOX [Електронний ресурс]: exponenta.ru – 2020. – Режим доступу: <https://exponenta.ru/model-predictive-control-toolbox>
16. Эффективные направления технического перевооружения угольных энергоблоков 200-300 МВт [Електронний ресурс]: niss.gov.ua – 2012. - https://niss.gov.ua/sites/default/files/2012-12/Pr10_25_12_2012.pdf

17. Расчет процессов горения и взрыва: учебное пособие / В.А. Портола, Н.Ю. Луговцова, Е.С. Торосян; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 108 с.
18. Плетнев Г.П. Автоматизированные управление объектами тепловых электростанций: Учебн. Пособие для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. -368 с., ил.