

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПмз-04.00.00.000 ПЗ

Група АКПмз-24-1

Олексій Фешанич

2025

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

Фешанич Олексій Орестович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.518:621.45

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення автоматизованої системи управління газотурбінним двигуном

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПмз-24-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

О.О. Фешанич

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

к.т.н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання)

В.С. Борин

(підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент

к.т.н., доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут післядипломної освіти
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Освітній рівень магістерський
Спеціальність 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

«___» _____ 20__ року

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

Фешаничу Олексію Орестовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматизованої системи управління
газотурбінним двигуном

керівник роботи Борин Василь Степанович, канд. техн. наук, доцент

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

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

2. Строк подання студентом роботи 19.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Опис технологічного процесу, технологічна схема,
статті науково – технічних журналів, збірники, підручники.

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

1. Аналіз газотурбінного двигуна як об'єкта автоматизації

2. Розроблення структурної схеми системи автоматичного керування

3. Розроблення функціональної схеми автоматизації системи керування
газотурбінним двигуном

4. Синтез системи автоматичного регулювання

5. Створення програми керування

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

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 30.10.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз газотурбінного двигуна як об'єкта автоматизації	05.12.2025	
2	Розроблення структурної схеми системи автоматичного керування	09.12.2025	
3	Розроблення функціональної схеми автоматизації системи керування газотурбінним двигуном	12.12.2025	
4	Синтез системи автоматичного регулювання	15.12.2025	
5	Створення програми керування	17.12.2025	

Студент _____
(підпис)

Фешанич О.О. _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Борин В.С. _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У магістерській роботі розглянуто питання розроблення та дослідження автоматизованої системи керування газотурбінним двигуном як складним динамічним об'єктом керування. Проведено аналіз конструктивних особливостей, принципу дії та основних сфер застосування газотурбінних двигунів у сучасних енергетичних і промислових установках. Обґрунтовано доцільність використання сучасних засобів автоматизації з метою підвищення ефективності, надійності та безпеки експлуатації газотурбінних установок.

У роботі визначено основні контрольні точки технологічного процесу та параметри, що підлягають вимірюванню й регулюванню. На цій основі сформовано структуру автоматизованої системи керування та розроблено функціональну схему автоматизації. Здійснено обґрунтований вибір вимірювальних приладів, керуючих і виконавчих механізмів, а також програмно-технічних засобів автоматизації.

Виконано синтез системи автоматичного регулювання газотурбінного двигуна, побудовано математичну модель об'єкта керування у вигляді передатної функції та проаналізовано його динамічні властивості. Налаштування параметрів регулятора здійснено з використанням класичного методу Циглера–Нікольса, що дозволило забезпечити задані показники якості перехідних процесів і стійкості системи.

Реалізацію алгоритмів керування витратою палива газотурбінного двигуна виконано на базі програмованого логічного контролера в середовищі TIA Portal. Розроблено систему візуалізації роботи газотурбінної установки з використанням панелі оператора, що забезпечує зручний контроль технологічних параметрів та оперативне керування процесом.

Ключові слова:автоматизована система керування, газотурбінний двигун, система автоматичного регулювання, програмований логічний контролер, TIA Portal, функціональна схема автоматизації, регулятор, метод Циглера–Нікольса, візуалізація, витрата палива.

ANNOTATION

The master's thesis addresses the development and investigation of an automated control system for a gas turbine engine considered as a complex dynamic control object. An analysis of the design features, operating principle, and main fields of application of gas turbine engines in modern power and industrial installations is carried out. The feasibility of implementing modern automation tools in order to improve the efficiency, reliability, and safety of gas turbine unit operation is substantiated.

The main control points of the technological process and the parameters to be measured and regulated are identified. On this basis, the structure of the automated control system is formed and a functional automation diagram is developed. A justified selection of measuring instruments, control and actuating devices, as well as software and hardware automation tools is performed.

The synthesis of the automatic control system for the gas turbine engine is carried out; a mathematical model of the control object in the form of a transfer function is developed, and its dynamic properties are analyzed. The controller parameters are tuned using the classical Ziegler–Nichols method, which ensures the required quality indicators of transient processes and system stability.

The implementation of fuel flow control algorithms for the gas turbine engine is performed on the basis of a programmable logic controller in the TIA Portal environment. A visualization system for the operation of the gas turbine unit using an operator panel is developed, providing convenient monitoring of technological parameters and prompt process control.

Keywords:

automated control system, gas turbine engine, automatic control system, programmable logic controller, TIA Portal, functional automation diagram, controller, Ziegler–Nichols method, visualization, fuel flow.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА ЯК ОБЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	12
1.1. Опис газотурбінного двигуна.....	12
1.2. Сфери застосування газотурбінного двигуна.....	14
1.3. Сфери застосування газотурбінного двигуна	16
Висновки до розділу 1.....	19
РОЗДІЛ 2	
РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	20
2.1. Визначення контрольних точок.....	20
2.2. Визначення структури автоматизованої системи керування технологічним процесом.....	21
Висновки до розділу 2.....	24
РОЗДІЛ 3	
РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГАЗОТУРБІННИМ ДВИГУНОМ.....	25
3.1. Побудова функціональної схеми автоматизації	25
3.2. Вибір обладнання.....	26
3.2.1. Підбір витратоміра.....	26
3.2.2. Підбір датчика тиску.....	28
3.2.3. Підбір датчика температури.....	30
3.2.4. Підбір тахометра.....	32
3.2.5. Вибір програмованого логічного контролера.....	34
3.2.6. Вибір клапанів.....	36
Висновки до розділу 3.....	38

РОЗДІЛ 4

СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ.....	39
4.1. Постановка задачі для синтезу контуру керування.....	39
4.2. Побудова передатної функції.....	40
4.3. Аналіз динамічних властивостей системи.....	43
4.4. Синтез типового регулятора.....	52
4.5. Метод Циглера–Нікольса (ZN1).....	54
Висновки до розділу 4.....	60

РОЗДІЛ 5

СТВОРЕННЯ ПРОГРАМИ КЕРУВАННЯ.....	62
5.1. Розроблення алгоритму для програми керування.....	62
5.2. Розроблення програми керування витратою палива в газотурбінному двигуні в ТІА Portal.....	64
5.3. Розроблення візуалізації роботи газотурбінної установки з використанням панелі оператора.....	67
Висновки до розділу 5.....	68
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70

ВСТУП

Актуальність теми.

Газотурбінні двигуни займають важливе місце в сучасних енергетичних, авіаційних та промислових установках завдяки високій питомій потужності, надійності та можливості роботи в широкому діапазоні навантажень. У контексті глобальних тенденцій до підвищення енергоефективності, зниження шкідливих викидів та оптимізації споживання паливно-енергетичних ресурсів особливої актуальності набувають питання вдосконалення систем автоматичного керування газотурбінними двигунами.

Складність газотурбінного двигуна як об'єкта керування зумовлена його багатоканальністю, суттєвими нелінійностями, взаємним впливом параметрів та жорсткими обмеженнями за температурними і швидкісними режимами. За таких умов традиційні підходи до керування без використання автоматизованих систем не забезпечують необхідного рівня стабільності, безпеки та економічності роботи. Тому розроблення та дослідження сучасних систем автоматичного керування газотурбінними двигунами з використанням програмованих логічних контролерів, цифрових регуляторів і методів математичного моделювання є актуальним науково-практичним завданням.

Особливої значущості ця проблема набуває в умовах модернізації енергетичної інфраструктури України, розвитку розподіленої генерації та впровадження автоматизованих систем керування технологічними процесами відповідно до концепцій Industry 4.0.

Обґрунтування вибору теми дослідження

Вибір теми магістерської роботи зумовлений необхідністю поєднання теоретичних положень сучасної теорії автоматичного керування з практичними аспектами проектування та реалізації систем автоматизації складних технічних об'єктів. Газотурбінний двигун є показовим прикладом складної динамічної системи, дослідження якої дозволяє поглибити знання з аналізу, синтезу та програмної реалізації систем керування.

Актуальність теми також обумовлена широким використанням сучасних програмно-апаратних комплексів автоматизації, зокрема програмованих логічних контролерів та середовищ розроблення типу TIA Portal, які є стандартом у промислових системах керування. Це дозволяє реалізувати розроблені алгоритми на практиці та наблизити результати дослідження до реальних умов експлуатації.

Крім того, тема роботи відповідає сучасним науковим напрямкам у галузі автоматизації енергетичних і теплотехнічних установок та має прикладний характер, що є важливим для магістерського рівня підготовки.

Мета і завдання дослідження

Метою магістерської роботи є розроблення та дослідження системи автоматичного керування газотурбінним двигуном із застосуванням сучасних методів синтезу регуляторів і програмно-технічних засобів автоматизації.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати такі **основні завдання**:

- здійснити детальний аналіз газотурбінного двигуна як об'єкта автоматизації та керування;
- визначити технологічні параметри, що підлягають контролю та регулюванню;
- обґрунтувати вибір контрольних точок і каналів вимірювання;
- розробити структурну схему системи автоматичного керування газотурбінним двигуном;
- побудувати функціональну схему автоматизації з вибором сучасних технічних засобів;
- виконати математичне моделювання об'єкта керування та побудувати його передатну функцію;
- дослідити динамічні властивості системи в різних режимах роботи;
- здійснити синтез системи автоматичного регулювання з використанням типових регуляторів;
- виконати налаштування регулятора за методом Циглера–Нікольса;

- розробити алгоритм керування та реалізувати його програмно на базі ПЛК у середовищі TIA Portal;
- створити систему візуалізації для контролю та управління роботою газотурбінної установки;
- провести аналіз ефективності розробленої системи автоматичного керування.

Об'єктом дослідження є газотурбінний двигун як складний динамічний об'єкт керування в складі автоматизованої технологічної установки.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби автоматичного керування і регулювання параметрів газотурбінного двигуна, а також програмна реалізація системи керування.

Методи дослідження

У процесі виконання магістерської роботи було застосовано комплекс наукових та інженерних методів дослідження. Аналіз газотурбінного двигуна здійснювався з використанням методів системного аналізу складних технічних об'єктів, що дало змогу розглянути його як багатопараметричну динамічну систему. Для побудови та дослідження системи автоматичного керування використовувалися методи теорії автоматичного керування та регулювання.

Математичний опис об'єкта керування та дослідження його динамічних властивостей виконувалися за допомогою методів математичного й імітаційного моделювання, що дозволило проаналізувати стійкість системи та якість перехідних процесів у різних режимах роботи. Синтез регулятора здійснювався з використанням класичних методів налаштування, зокрема методу Циглера–Нікольса.

Під час проектування системи автоматизації застосовувалися інженерні методи вибору та узгодження технічних засобів, а реалізація алгоритмів керування виконувалася шляхом програмування промислових логічних контролерів. Оцінювання ефективності розробленої системи автоматичного керування здійснювалося на основі експериментально-розрахункових методів, що забезпечило обґрунтованість отриманих результатів.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна магістерської роботи полягає в удосконаленні підходу до побудови системи автоматичного керування газотурбінним двигуном шляхом комплексного поєднання математичного моделювання, синтезу регулятора та програмної реалізації алгоритмів керування з урахуванням динамічних особливостей об'єкта. Отримані результати дозволяють підвищити точність регулювання основних параметрів газотурбінного двигуна та покращити показники стійкості й якості перехідних процесів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами

Магістерська робота виконана відповідно до освітньо-наукової програми підготовки магістрів та навчального плану закладу вищої освіти. Тематика дослідження узгоджується з основними напрямками наукових досліджень у галузі автоматизації, систем автоматичного керування та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Результати роботи відповідають сучасним науково-технічним тенденціям розвитку автоматизованих систем керування технологічними процесами та можуть бути використані в межах подальших наукових досліджень і прикладних розробок у зазначеній галузі.

Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання розробленої системи автоматичного керування, алгоритмів і програмного забезпечення для проектування, модернізації та експлуатації газотурбінних установок. Матеріали роботи можуть бути використані в навчальному процесі, під час виконання курсових і дипломних робіт, а також у практиці проектування автоматизованих систем керування технологічними процесами.

Структура та обсяг магістерської роботи.

Робота складається зі вступу, п'яти основних розділів, висновків і списку використаних джерел, що охоплює 72 сторінку основного тексту, включає 32 рисунки, 25 таблиці і 11 літературних джерел .

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1.Опис газотурбінного двигуна

Газотурбінний двигун є різновидом теплової машини внутрішнього згорання, що характеризується високою енергетичною ефективністю та значною питомою потужністю за компактних конструктивних розмірів. Завдяки цим властивостям такі установки широко застосовуються в енергетиці, авіації, транспортній сфері та різних промислових галузях, де необхідне надійне джерело механічної енергії [1].

Функціонування двигуна ґрунтується на перетворенні енергії, що виділяється в процесі згорання палива в камері згорання, у механічну роботу, яка здійснюється за рахунок обертання турбіни та жорстко з'єднаних із нею елементів конструкції.

Робочий цикл такої установки умовно можна поділити на чотири послідовні етапи: забір повітря з навколишнього середовища, його стиснення, подальше згорання паливоповітряної суміші та розширення отриманих продуктів згорання. Ці процеси реалізуються в окремих функціональних вузлах, послідовно з'єднаних між собою.

На першому етапі атмосферне повітря надходить через вхідний пристрій і спрямовується в компресор. Компресор виконує функцію підвищення тиску та температури повітряного потоку, що необхідно для ефективного займання й стабільного горіння палива на наступній стадії.

Стиснене повітря подається в камеру згорання, де змішується з поданим паливом. Отримана горюча суміш займається, унаслідок чого утворюються гарячі гази з високим тиском і температурою. Ці гази спрямовуються в бік турбіни, приводячи її в рух.

Газовий потік, діючи на робочі лопатки турбінного блока, передає їм свою кінетичну енергію. Турбіна приводить у обертання вал, механічно з'єднаний із компресором і вихідним механізмом. Після виконання роботи продукти згорання викидаються в навколишнє середовище через сопловий пристрій. В авіаційних

установках це забезпечує створення реактивної тяги, а в стаціонарних — передавання крутного моменту до виконавчих механізмів.

Конструкція газотурбінного двигуна включає кілька основних компонентів, незмінних незалежно від сфери застосування. До них належать вхідний пристрій, компресорний модуль, камера згоряння, турбінний блок, сопло та приводний вал. Усі елементи розташовуються в чітко визначеній технологічній послідовності та виконують задані функції [2].

Вхідний тракт необхідний для забезпечення стабільного надходження повітря, зниження аеродинамічного опору та запобігання потраплянню забруднень усередину конструкції. Це особливо важливо під час експлуатації двигуна в умовах підвищеної запиленості.

Компресор здійснює стиснення повітря, що надходить. Залежно від конструкції він може бути осьового або відцентрового типу. Осьовий компресор спрямовує повітря вздовж поздовжньої осі установки та забезпечує високий ступінь стиснення за збільшеної довжини агрегату. Відцентровий тип компресора здійснює стиснення за рахунок відхилення повітряного потоку під дією відцентрових сил, що виникають під час обертання робочих коліс.

Камера згоряння є ділянкою, у якій здійснюється тепловий процес. Тут відбувається рівномірне змішування повітря з паливом, займання та стійке згоряння. При цьому конструкція камери має забезпечувати стабільну роботу за високих температур і тисків, а також сприяти зниженню викидів шкідливих речовин.

Турбіна слугує для перетворення теплової енергії на механічну. Вона складається з кількох ступенів, кожен з яких включає нерухомі напрямні елементи та рухомі робочі лопатки. Направні апарати формують оптимальний напрям руху газового потоку, а лопатки сприймають його енергію, забезпечуючи обертання ротора.

Сопло завершує тракт двигуна та перетворює залишковий тиск газів у кінетичну енергію, формуючи реактивний струмінь відповідно до третього закону

класичної механіки. Для підвищення ефективності створюваної тяги в конструкції передбачається звуження соплового каналу.

Окрім основного набору компонентів, газотурбінна установка включає значну кількість допоміжних систем: від паливоподачі та змащування до систем автоматичного регулювання й керування. Конкретне виконання установки визначається умовами експлуатації, технічними характеристиками та висунутими вимогами до надійності й ефективності.

1.2. Сфери застосування газотурбінного двигуна

Газотурбінні силові установки характеризуються високим рівнем універсальності, надійності та питомої енергетичної потужності, завдяки чому знаходять широке застосування в різних галузях промисловості та транспортній сфері. Одним із ключових напрямів їх використання є виробництво електроенергії. На об'єктах теплоенергетики, а також на промислових підприємствах такі установки функціонують як основні, резервні або пікові джерела генерації енергії. Їх висока динамічна пристосовуваність дає змогу оперативно реагувати на коливання споживання, забезпечуючи стійкість і гнучкість енергопостачання.

Особливої уваги заслуговує можливість одночасного виробництва електричної та теплової енергії в межах єдиного технологічного циклу. Такий підхід, відомий як комбінована енергетична генерація, дає змогу суттєво підвищити загальний коефіцієнт корисної дії установки, мінімізувати втрати теплової енергії та знизити витрати палива, тим самим підвищивши загальну економічну й екологічну ефективність енергетичного об'єкта.

Окрім функції генерації енергії, газотурбінні двигуни застосовуються як привід різних механізмів і агрегатів. У нафтогазовій промисловості вони широко використовуються для приведення в дію насосного та компресорного обладнання, забезпечуючи транспортування вуглеводневої сировини магістральними трубопроводами, підтримання необхідного тиску на родовищах, а також надійну роботу компресорних станцій.

У хімічній галузі установки цього типу експлуатуються для створення та стабілізації тиску в складних технологічних системах. Вони застосовуються в процесах перекачування та стиснення як газоподібних, так і рідких середовищ, у системах охолодження, рециркуляції та подавання вихідної сировини. Крім того, в енергетичних установках газотурбінні двигуни нерідко включаються до складу допоміжних агрегатів: насосних станцій парогенераторів, установок подавання кисню, азоту та інших технологічних газів.

У транспортній галузі найбільшого поширення газотурбінні установки набули в авіації та морському судноплаванні [3]. Їх застосування зумовлене поєднанням високої питомої тяги, надійності та стійкості до впливу несприятливих умов експлуатації. В авіаційній техніці переважно застосовуються турбореактивні конструкції, що встановлюються на пасажирські, вантажні та військові повітряні судна. Принцип їх функціонування ґрунтується на формуванні тяги за рахунок реактивного викиду продуктів згоряння, що забезпечує досягнення значної крейсерської швидкості та реалізацію складних маневрів.

Такі установки характеризуються високою енергетичною щільністю та можливістю роботи в широкому діапазоні експлуатаційних режимів, що робить їх оптимальним вибором для сучасної авіаційної техніки.

У морській сфері газотурбінні двигуни застосовуються на великих транспортних і військових суднах, включно з нафтоналивними танкерами, контейнеровозами, пасажирськими лайнерами та надводними кораблями різного призначення. Висока чутливість до зміни подачі палива дає змогу швидко змінювати режим руху, що є критично важливим під час маневрування в обмежених умовах або за потреби оперативного реагування на змінювану обстановку.

У разі застосування на військових платформах газотурбінні двигуни забезпечують мобільність, маневровість і стійкість до перевантажень, що сприяє підвищенню бойової ефективності кораблів та авіаційних комплексів.

Широкий спектр технічних рішень і конструктивних модифікацій дає змогу адаптувати газотурбінні двигуни до специфічних вимог конкретної галузі. Діапазон

їх застосування охоплює як великомасштабні енергетичні комплекси, так і компактні силові агрегати, встановлювані на мобільних платформах. Вибір конфігурації, режимів функціонування та експлуатаційних характеристик установки визначається умовами середовища, необхідною потужністю, економічними міркуваннями та технічними регламентами. Усе це підтверджує універсальність, технологічну зрілість і актуальність газотурбінних силових установок у сучасній промисловості та транспорті.

1.3. Опис обраного об'єкта автоматизації

Як об'єкт автоматизації для проєктованої системи керування обрано газотурбінний двигун промислового призначення Siemens серії SGT-100. Зображення цього газотурбінного двигуна наведено на рисунку 1.1. Зазначений тип двигуна є високотехнологічним агрегатом, призначеним для використання у складі газоперекачувального, нафтового та іншого промислового обладнання, де висуваються підвищені вимоги до надійності, енергетичної ефективності та пристосованості до різних умов експлуатації [4].



Рис. 1.1. Газотурбінний двигун Siemens SGT-100

Газотурбінний двигун Siemens серії SGT-100 спроектований з урахуванням необхідності функціонування у широкому діапазоні кліматичних умов, включаючи

як низькі, так і високі температури навколишнього середовища, а також на висотах до двох тисяч метрів над рівнем моря. Такий діапазон експлуатаційної стійкості робить цю установку універсальною у застосуванні. Модульна архітектура конструкції двигуна значно спрощує проведення технічного обслуговування та планового ремонту. У сукупності з продуманою газодинамічною схемою та високим рівнем автоматизації робочих процесів це забезпечує зниження експлуатаційних витрат і паливної потреби порівняно з аналогічними рішеннями.

Установка Siemens SGT-100 застосовується переважно в галузях, де потрібна безперебійна та ефективна робота в умовах тривалої безперервної експлуатації. Конструктивно двигун включає кілька функціональних вузлів, з'єднаних послідовно. Основними з них є: двоступеневий компресор, що складається з чотирнадцяти ступенів, проміжний корпус, камера згоряння кільцевого типу, багатоступенева турбіна, а також система відведення відпрацьованих газів. Компресор містить два ротори, які створюють ступені низького та високого тиску і приводяться в обертання за рахунок енергії, що виробляється турбіною. Усі ротори, включаючи ротор вільної турбіни, з'єднані між собою за допомогою газодинамічного зв'язку та функціонують на різних частотах обертання.

Завдяки оптимізації аеродинамічних процесів у тракті двигуна досягається значне зниження витрати палива за збереження високої питомої потужності. Для забезпечення надійності на етапі пуску двигун оснащений системою діагностичних датчиків, що контролюють вібраційні характеристики, параметри температури, тиск мастила, а також наявність металевих включень у мастильній рідині. Ці дані дають змогу своєчасно виявляти потенційні несправності та вживати коригувальних заходів до виникнення аварійної ситуації.

Розглянемо ключові компоненти двигуна детальніше.

Компресор осьового типу складається з двох послідовно розташованих секцій: низького та високого тиску. Секція низького тиску виконана з шістьма ступенями та включає нерухомі напрямні апарати і рухомі робочі лопатки, змонтовані на барабанно-дисковому роторі. Вхідний напрямний апарат із

регульованим кутом повороту дає змогу адаптувати параметри повітряного потоку до конкретних умов експлуатації, підвищуючи ефективність на різних режимах.

Секція високого тиску включає вісім ступенів і відрізняється підвищеною механічною міцністю, що дає змогу їй надійно функціонувати за значних теплових і механічних навантажень. Вона з'єднана з турбіною високого тиску, утворюючи єдиний високонавантажений модуль.

Проміжний корпус двигуна виконує сполучну функцію між двома секціями компресора і одночасно слугує основою для розміщення приводів, що приводяться в рух валом ротора високого тиску.

Камера згоряння кільцевого виконання складається із зовнішнього корпусу, жарової труби та системи подачі паливної суміші. У процесі згоряння паливоповітряної суміші утворюються гази високої температури і тиску, які надходять на вхід турбіни. Турбіна перетворює теплову енергію газів у механічне обертання, яке використовується як для роботи компресора, так і для приводу зовнішніх агрегатів. Конструкція турбіни включає один ступінь низького тиску, один ступінь високого тиску, а також два ступені вільної турбіни, яка використовується для передавання механічної енергії на виконавчі механізми, наприклад, на газоперекачувальне обладнання. Крутний момент передається через ведучий вал.

Як основний енергоносіє для двигуна застосовується природний газ, який належить до числа відносно екологічно чистих видів палива. Він характеризується низьким рівнем викидів діоксиду вуглецю та інших шкідливих сполук. За альтернативного використання попутного нафтового газу можливе підвищення вмісту сірчистих компонентів у продуктах згоряння, що негативно впливає на екологічні показники та потребує додаткового очищення палива, роблячи таке рішення менш економічно доцільним.

Система випуску відпрацьованих газів призначена для ефективного відведення продуктів згоряння в атмосферу, завершуючи технологічний цикл функціонування установки.

Висновок до розділу 1

У першому розділі магістерської роботи було виконано аналіз газотурбінного двигуна як об'єкта автоматизації. У підрозділі 1.1 розглянуто конструктивні особливості та принцип роботи газотурбінного двигуна, проаналізовано основні етапи перетворення енергії палива в механічну роботу, а також визначено ключові параметри, що впливають на ефективність та стабільність його функціонування. Показано, що газотурбінний двигун є складним динамічним об'єктом з багатьма взаємопов'язаними параметрами та нелінійними характеристиками.

У підрозділах 1.2 та 1.3 досліджено основні сфери застосування газотурбінних двигунів, зокрема в енергетиці, авіації, промисловості та транспорті. Проаналізовано переваги та обмеження використання газотурбінних установок у різних галузях, а також обґрунтовано доцільність їх широкого впровадження завдяки високій питомій потужності, компактності та можливості роботи в різних режимах навантаження.

На основі проведеного аналізу встановлено, що ефективна та безпечна експлуатація газотурбінних двигунів неможлива без застосування сучасних систем автоматичного керування, які забезпечують стабілізацію основних параметрів, оптимізацію витрати палива та захист обладнання від аварійних режимів. Отримані у першому розділі результати є теоретичною основою для подальшої розробки структурної та функціональної схем системи автоматизації газотурбінного двигуна, що розглядається в наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

1.2. Визначення контрольних точок

Для реалізації автоматизованої системи керування газотурбінним двигуном Siemens серії SGT-100 необхідно виконати такі функціональні завдання:

- забезпечення дистанційного керування технологічним процесом;
- впровадження систем технічного моніторингу параметрів, що підлягають контролю;
- організація збору, зберігання та обробки вимірювальної інформації;
- інтеграція засобів автоматичного реагування на аварійні та передаварійні режими.

У результаті аналізу газотурбінного двигуна були визначені такі точки контролю:

- частота обертання ротора компресора високого тиску, яку необхідно підтримувати в межах 15000 ± 500 об/хв;
- частота обертання силової (вільної) турбіни, яку необхідно підтримувати в діапазоні 8500 ± 100 об/хв;
- максимальна температура газів за турбіною, яка під час запуску двигуна не повинна перевищувати $+650$ °С, а для номінальної роботи двигуна підтримується в діапазоні від $+700$ до $+750$ °С;
- витрата палива, при зменшенні витрати природного газу зменшується частота обертання всіх роторів двигуна і, відповідно, зменшується віддавана потужність;
- рівень вібрації не повинен перевищувати 65 мм/с і має знаходитися в діапазоні 50 ± 5 мм/с;
- температура масла на вході в двигун не повинна перевищувати $+45$ °С;
- температура в камері згоряння не більше 850 °С.

Також для стабільної роботи двигуна в номінальному режимі температура зовнішнього повітря повинна знаходитися в діапазоні $+18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, а барометричний тиск має дорівнювати 760 мм рт. ст.

Точки керування двигуном наведені нижче:

- положення клапана подачі палива в камеру згоряння;
- положення клапана подачі повітря в компресор.

Для підвищення рівня безпеки та забезпечення захисту обладнання передбачено перелік аварійних критеріїв, при спрацюванні яких система ініціює автоматичне відключення установки:

- при підвищенні рівня вібрації в двигуні ≥ 65 мм/с;
- температура газів за вільною турбіною більше $750\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- температура в камері згоряння більше $850\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- частота обертання ротора вільної турбіни перевищує 9500 об/хв;
- частота обертання ротора високого тиску перевищує 15500 об/хв;
- частота обертання ротора низького тиску перевищує 11000 об/хв.

2.2. Визначення структури автоматизованої системи керування технологічним процесом

Автоматизована система керування газотурбінною установкою повинна відповідати ряду технічних і функціональних вимог, що забезпечують надійну, безпечну та високоефективну експлуатацію обладнання в різних режимах.

Забезпечення високої точності регулювання.

Одним із ключових завдань системи керування є підтримання заданих параметрів роботи двигуна з високою точністю. До таких параметрів належать: частота обертання ротора компресора високого тиску, частота обертання вільної турбіни, температурні режими, тиск, витрата палива та об'єм повітряного потоку. Стабільне підтримання цих параметрів дозволяє досягти оптимальної продуктивності та ефективності всієї установки.

Надійність і відмовостійкість системи.

Система керування повинна мати високий рівень надійності, включаючи стійкість до відмов і аварійних впливів. Це передбачає наявність вбудованих захисних алгоритмів і функцій, що запобігають виникненню критичних ситуацій, таких як перегрів, перевищення допустимих навантажень та інші потенційно небезпечні відхилення. Таким чином забезпечується не лише цілісність обладнання, а й безпека обслуговчого персоналу.

Зручність та інтуїтивність інтерфейсу.

Інтерфейс взаємодії з оператором повинен бути наочним, ергономічним і адаптованим для швидкого сприйняття інформації. Він має надавати повну й актуальну інформацію про поточний стан двигуна, а також забезпечувати можливість швидкого введення керуючих команд. Це необхідно для оперативного реагування на змінні умови роботи та своєчасного втручання в технологічний процес.

Структура автоматизованої системи керування.

У даному проєкті була реалізована централізована багаторівнева структура автоматизації, до якої входять такі функціональні рівні:

Нижній (польовий) рівень.

На цьому рівні здійснюється безпосередня взаємодія з об'єктом керування. Сюди входять датчики, що вимірюють фізичні параметри (такі як температура газу, тиск, витрата, вібрація, частота обертання роторів), та виконавчі пристрої, які реалізують регульовальний вплив. Усі первинні сигнали від датчиків стандартизовані у вигляді аналогових сигналів (наприклад, 4–20 мА), придатних для передавання на наступний рівень обробки. Виконавчі механізми включають клапани подачі палива і повітря, насосні агрегати та інші виконавчі елементи, відповідальні за реалізацію керуючих впливів.

Середній рівень.

На цьому рівні функціонує програмований логічний контролер (ПЛК), який обробляє сигнали, що надходять з нижнього рівня, і формує керуючі впливи відповідно до закладених алгоритмів. Контролер виконує функції автоматичного регулювання, забезпечуючи реалізацію логіки керування в реальному часі.

Важливим елементом архітектури є можливість перемикання між автоматичним та операторським режимами керування, що дозволяє підвищити гнучкість і адаптивність усієї системи.

Верхній рівень.

Завершальною ланкою структури є людино-машинний інтерфейс (НМІ), який забезпечує візуалізацію поточних параметрів роботи двигуна та надає оператору доступ до функцій керування. Через інтерфейс здійснюється запуск і зупинка установки, налаштування режимів, задання параметрів і контроль стану обладнання. Програмне забезпечення НМІ надає оператору повну картину функціонування системи в режимі реального часу, що дозволяє оперативно приймати обґрунтовані рішення [5].

Функціональний поділ рівнів керування представлено на рисунку 2.1, де відображено схему взаємодії всіх компонентів системи автоматизації газотурбінного двигуна Siemens SGT-100.



Рис. 2.1. Рівні САР газотурбінним двигуном

Висновок до розділу 2

У другому розділі виконано аналіз основних етапів побудови автоматизованої системи керування технологічним процесом. Зокрема, визначено контрольні точки, які є ключовими елементами для забезпечення надійного контролю та регулювання параметрів технологічного процесу. Їх правильний вибір дає змогу своєчасно отримувати достовірну інформацію про стан об'єкта керування та підвищувати ефективність прийняття керуючих рішень.

Також у розділі обґрунтовано структуру автоматизованої системи керування технологічним процесом, визначено взаємозв'язок між її основними функціональними рівнями та елементами. Запропонована структура забезпечує узгоджену роботу засобів вимірювання, обробки інформації та виконавчих механізмів, що в цілому сприяє підвищенню точності, надійності та стабільності керування технологічним процесом.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГАЗОТУРБІННИМ ДВИГУНОМ

3.1. Побудова функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації являє собою графічну або табличну форму відображення структури автоматизованої системи керування, у якій показані ключові елементи обладнання, логіка їх взаємодії та маршрути передавання керуючих і вимірювальних сигналів. Така схема слугує основою під час проектування систем керування технологічними процесами та дозволяє візуалізувати структуру й логіку функціонування всієї системи.

У її межах відображаються всі елементи автоматизації: вимірювальні перетворювачі, виконавчі механізми, логічні контролери, засоби візуалізації, а також канали зв'язку між ними. Це забезпечує наочне уявлення конфігурації системи, дозволяє визначити необхідні технічні засоби та сформулювати алгоритми їх взаємодії.

У контексті керування газотурбінною установкою функціональна схема відображає ключові етапи перетворення енергії від подачі повітря і палива до вироблення електричної потужності з фіксацією контрольних точок за параметрами тиску, температури, частоти обертання та витрати.

Процес роботи установки починається з надходження атмосферного повітря в компресор низького тиску (КНТ) через вхідний регулювальний клапан (позиція 1). Параметр витрати повітряного потоку контролюється вимірювачем FT 3–1. Після проходження КНТ повітря надходить у компресор високого тиску (КВТ), де здійснюється додаткове стиснення. Контроль температури повітря на відповідних ділянках здійснюється із застосуванням термопар ТЕ 5–1 і ТЕ 6–1, а моніторинг частоти обертання роторів — за допомогою тахометричних датчиків ST 11–1 і ST 12–1.

Далі стиснене повітря надходить у камеру згоряння [6]. Паралельно через клапан 2 у неї подається паливо — природний газ, витрата якого відстежується датчиком FT 4–1. У камері згоряння відбувається змішування газу з повітрям і займання паливно-повітряної суміші. За фіксацію тиску відповідає датчик PT 9–1, а температура контролюється термопарою TE 7–1. У разі перевищення заданих температурних меж здійснюється автоматична корекція подачі палива, що запобігає перегріву та аварійним режимам роботи.

Утворені в процесі згоряння газу надходять на вільну (силову) турбіну, де їх енергія перетворюється на обертальний рух. Контроль робочих параметрів турбіни забезпечується вимірювачами тиску PT 10–1, температури TE 8–1 і частоти обертання ST 13–1.

Після цього відпрацьовані газу спрямовуються у вихлопний тракт, а механічна енергія обертання передається на електрогенератор. Потужність, що виробляється в процесі, вимірюється за допомогою пристрою JG 14–1.

Функціональна схема автоматизації, яка відображає всі вищезазначені процеси та взаємозв'язки компонентів системи, наведена в Додатку А.

3.2. Вибір обладнання

3.2.1. Підбір витратоміра

Вимірювання витрати палива є ключовим елементом автоматизованої системи керування газотурбінною установкою Siemens SGT-100. Точна подача палива забезпечує ефективне горіння, знижує енергетичні втрати та мінімізує викиди.

У межах проектування було проведено оцінку різних промислових витратомірів. Основними критеріями вибору стали: діапазон робочих температур і тисків, метрологічні характеристики, інтерфейс передавання даних та ступінь захисту. За результатами порівняльного аналізу обрано два масові коріюлісові

витратоміри – Siemens SITRANS FC MASS 2100 DI 1.5 та Endress+Hauser Proline Promass Q 100. Їхні параметри наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Порівняння витратомірів

Параметр	Siemens SITRANS FC MASS 2100 DI 1.5	Endress+Hauser Proline Promass Q 100
Діаметр умовного проходу, мм	1.5...15	2...150
Робочий тиск середовища, МПа	До 10	До 10
Температура вимірюваного середовища, °С	від -50 до +180	від -50 до +205
Температура навколишнього середовища, °С	від -40 до +60	від -40 до +65
Похибка, %	±0.1	±0.05
Вихідний сигнал	4–20 мА; HART; Modbus RTU; Profibus	4–20 мА; HART; Modbus; EtherNet/IP
Ступінь захисту	IP67	IP66/IP67

Для інтеграції в систему керування двигуна моделі SGT-100, що має номінальну потужність 5,85 МВт і працює за підвищених значень тиску та температури в газовому тракті, як основний було обрано витратомір Promass Q 100 виробництва компанії Endress+Hauser, зображений на рисунку 3.1. Пристрій забезпечує високу точність вимірювань навіть за нестабільних режимів подачі палива та має розширений температурно-тисковий робочий діапазон, що є критично важливим для надійної експлуатації у складі енергокомплексу.

Додатковою перевагою обраного витратоміра є підтримка сучасних цифрових протоколів передавання даних, зокрема EtherNet/IP та HART, що спрощує його інтеграцію в діючі SCADA-системи та підвищує гнучкість

налаштування й діагностики. Конструктивне виконання приладу – без використання рухомих елементів – забезпечує високу надійність і мінімальну потребу в технічному обслуговуванні, що особливо важливо для об'єктів із безперервним режимом роботи, таких як газотурбінні установки.



Рис. 3.1. Масовий витратомір Endress+Hauser Promass Q 100

3.2.2. Підбір датчика тиску

Безперервний контроль тиску в газотурбінних установках є необхідною умовою для забезпечення стабільної та безпечної роботи обладнання. У процесі функціонування газотурбінного двигуна Siemens SGT-100 у різних ділянках контуру формуються зони з високим тиском. Підтримання цих параметрів у межах допустимих значень потребує застосування спеціалізованих вимірювальних приладів, здатних працювати в умовах інтенсивних термічних і механічних навантажень. Основними технічними вимогами, що висувуються до датчиків тиску для таких умов, є висока температурна стійкість, точність реєстрації змінних значень, стійкість до вібрації, а також надійність функціонування в довгостроковій

перспективі. Крім того, важливу роль відіграє сумісність з існуючими архітектурами автоматизованих систем керування.

У межах розроблення проєкту було розглянуто два прилади, що відповідають заявленим умовам експлуатації: п'єзоелектричний датчик Kistler 6021B та універсальний промисловий датчик ETL-GTS-312. Обидва пристрої розраховані на роботу в діапазонах тиску й температур, характерних для середовища всередині двигуна SGT-100. Параметри датчиків тиску наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Порівняння датчиків тиску

Параметр	Kistler 6021B	ETL-GTS-312
Діапазон вимірювання тиску, МПа	До 20 (динамічні вимірювання)	До 20
Діапазон температури вимірюваного середовища, °C	Від -55 до +700 (короткочасно до +1000)	До +500
Температура навколишнього середовища, °C	Від -55 до +200	Від -40 до +85
Похибка, %	±0.1	±0.05
Вихідний сигнал	4–20 мА; HART; Modbus RTU; Profibus	4–20 мА; HART; Modbus; EtherNet/IP
Ступінь захисту	IP67	IP66/IP67

Як основні критерії відбору використовувалися:

- придатність експлуатації за температури до +700 °C і вище;
- стійкість до вібраційних впливів;
- висока чутливість і точність вимірювань під час аналізу динамічного тиску;
- можливість прямої інтеграції в існуючу автоматизовану систему.

На рисунку 3.2 наведено рекомендований до встановлення у вимірювальному контурі газотурбінного двигуна датчик Kistler 6021B, що пройшов попередню інженерну оцінку.

Вибір на користь Kistler 6021B зумовлений його здатністю функціонувати в екстремально термічно навантаженому середовищі – температура експлуатації досягає $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$, з допустимими короткочасними сплесками до $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Окрім цього, датчик забезпечує високу точність вимірювання швидкозмінного тиску, що є критично важливим для оцінювання процесів усередині камери згоряння та інших динамічно активних вузлів двигуна. Також відзначається його стійкість до вібраційних навантажень, що особливо актуально для обертових систем.

Як резервне рішення розглядався ETL-GTS-312 – прилад, що демонструє добрі характеристики під час експлуатації в менш термонапружених зонах системи. Попри обмежений температурний діапазон порівняно з Kistler 6021B, цей датчик може ефективно використовуватися в місцях зі зниженою термічною навантаженою або в контурі додаткового контролю.



Рис. 3.2. датчик тиску Kistler 6021B

3.2.3. Підбір датчика температури

Моніторинг температури є ключовим процесом, необхідним для забезпечення ефективної та безпечної роботи газотурбінного двигуна Siemens SGT-100. Підвищення температури в таких компонентах, як камера згоряння, може

сприяти збільшенню вихідної потужності. Однак перевищення допустимих температурних значень в інших вузлах установки може спричинити відмову обладнання або призвести до аварійної ситуації. У зв'язку з цим моніторинг температурних параметрів відіграє критичну роль у системі промислової безпеки, даючи змогу своєчасно виявляти відхилення та запобігати потенційним загрозам.

Для вимірювання температури в критичних точках двигуна було обрано промисловий датчик Siemens SITRANS TS500 з термопарою типу К (хромель–алюмель), зображений на рисунку 3.3. Пристрій забезпечує високу точність вимірювань у широкому температурному діапазоні та має стійкість до впливу вібрацій і агресивного середовища, характерного для газотурбінних установок.



Рис. 3.3. датчик Siemens SITRANS TS500 з термопарою типу К

Принцип роботи термопары ґрунтується на виникненні термоелектрорушійної сили (ЕРС) за різниці температур між гарячим і холодним спаями двох провідників із різнорідних металів. Значення ЕРС прямо пропорційне різниці температур, що дає змогу з високою точністю визначати температурні параметри об'єкта контролю.

Технічні характеристики датчика SITRANS TS500 з термопарою типу К наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Технічні характеристики датчика SITRANS TS500

Параметр	Значення
Тип термопари	К (Хромель Алюмель)
Діапазон вимірюваних температур, °С	від –40 до +1200
Умовний тиск, МПа	до 10
Діапазон температури середовища, °С	від –50 до +85
Похибка вимірювання, %	±0,25
Ступінь захисту оболонки	IP67
Вихідний сигнал	4–20 мА; HART

3.2.4. Підбір тахометра

Для ефективної роботи системи автоматизації газотурбінного двигуна Siemens SGT-100 важливим є використання тахометрів, що дають змогу точно вимірювати такі параметри:

- частоту обертання ротора компресора низького тиску;
- частоту обертання ротора компресора високого тиску;
- частоту обертання вільної турбіни;
- частоту обертання турбін низького та високого тиску.

У своїй основі тахометр складається з двох основних елементів: сенсора, що здійснює реєстрацію вимірюваних значень, та відображального пристрою, призначеного для візуалізації отриманих даних. Для забезпечення контролю вищезазначених параметрів було обрано тахометр моделі Fluke 930 (рисунок 3.4), укомплектований оптичним датчиком OSS200 (рисунок 3.5). Ця система дає змогу виконувати безконтактне вимірювання частоти обертання на невеликій відстані від об'єкта контролю. Параметри тахометра та оптичного сенсора наведено в таблиці 3.4.

Параметри тахометра Fluke 930 та оптичного датчика

Параметр	Значення
Віддалення від об'єкта, см	До 100 (за використання оптичного сенсора)
Робоча температура, °C	Від -20 до +120
Діапазон вимірювання, об/хв	Від 10 до 30000
Точність вимірювань, %	±0.02 % значення
Метод визначення	За відбивними мітками
Вихідний сигнал	4–20 мА, цифровий вихід (TTL/RS-232)



Рис. 3.4. Тахометр Fluke 930



Рис. 3.5. Оптичний датчик

3.2.5. Вибір програмованого логічного контролера

Для створення автоматизованої системи керування газотурбінним двигуном Siemens SGT-100 необхідно використання високопродуктивного та надійного програмованого логічного контролера (ПЛК), здатного ефективно обробляти велику кількість дискретних і аналогових сигналів, підтримувати актуальні протоколи промислового зв'язку та забезпечувати стабільну роботу в умовах реального виробничого циклу.

У процесі вибору апаратної платформи було проведено порівняльний аналіз між ПЛК серії Siemens SIMATIC S7-300 та більш сучасною серією SIMATIC S7-1500. Версія контролера S7-1500 представлена на рисунку 3.6. За підсумками аналізу пріоритет було надано моделі S7-1500. Таке рішення обґрунтоване тим, що даний контролер має значно вищу обчислювальну потужність, широкий набір функцій та можливість інтеграції з цифровими технологіями нового покоління. Порівняння характеристик наведено в таблиці 3.5.

Серед його ключових переваг – розширені можливості обробки інформації, візуалізації технологічних процесів, мережевої взаємодії, а також підтримка сучасних протоколів обміну даними, таких як PROFINET з часовою синхронізацією за технологією IRT та Modbus RTU.

Вибір контролера SIMATIC S7-1500 для реалізації цього проекту пояснюється його високим рівнем надійності, універсальністю та відповідністю вимогам сучасних завдань автоматизації складних технологічних об'єктів, зокрема систем керування газотурбінними установками нового покоління.

Таблиця 3.5

Технічні характеристики контролерів Siemens

Параметр	SIMATIC S7-300	SIMATIC S7-1500
Робоча температура, °C	від -40 до +70	від 0 до +60
Підтримувані протоколи	PROFINET IO, PROFIBUS DP, AS- Interface	PROFINET IO IRT, PROFIBUS DP, Modbus RTU

Інтерфейси	Ethernet, RS232, RS485, USB	Ethernet, RS232, RS422, RS485, USB
Кількість дискретних входів/виходів	24/6	32/16
Кількість аналогових входів/виходів	4/2	8/4
Час виконання операції	0,1 мкс	0,3 мкс

Додатковим аргументом на користь вибору контролера SIMATIC S7-1500 є його здатність до інтеграції з сучасними засобами візуалізації, можливості віддаленого моніторингу та діагностики, а також підтримка масштабованої архітектури системи. Завдяки таким характеристикам дана модель ПЛК є найбільш придатним варіантом для реалізації автоматизованої системи керування на технологічно складному об'єкті — газотурбінній установці Siemens SGT-100.



Рис. 3.6. Siemens SIMATIC S7-1500

3.2.6. Вибір клапанів

Для надійного та точного керування подачею палива в газотурбінний двигун Siemens SGT-100 необхідне використання регулювального клапана, здатного працювати в умовах підвищеного тиску та температури, а також такого, що має високу пропускну здатність. З урахуванням висунутих технічних характеристик і вимог щодо сумісності з конкретною моделлю газотурбінної установки оптимальним рішенням став вибір паливного регулювального клапана Woodward 8400D (рисунок 3.7). Цей тип клапанів розроблений спеціально для експлуатації у складі енергетичних газотурбінних установок і відповідає їх експлуатаційним стандартам.

Пристрій забезпечує високу швидкість відгуку на керувальні сигнали, демонструє стійкість до агресивних зовнішніх умов і оснащений кроковим електроприводом, що забезпечує точне дозування потоку палива. Технічні характеристики клапана Woodward 8400D наведені в таблиці 3.6.

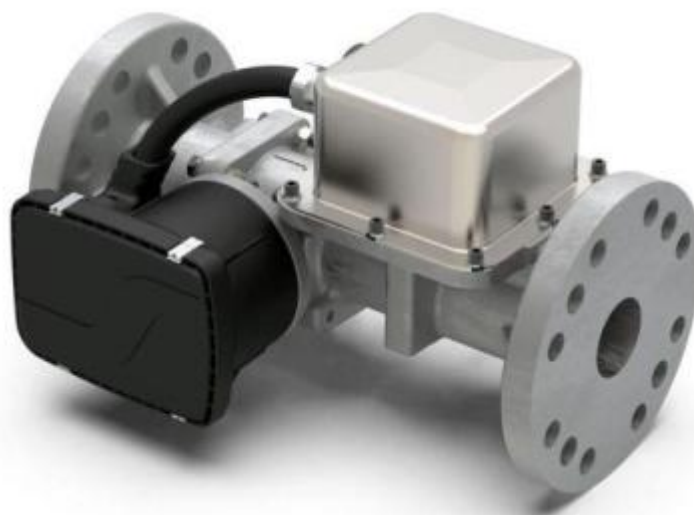


Рис. 3.7. Паливний регулювальний клапан Woodward 8400D

Параметри клапана Woodward 8400D

Параметр	Значення
Матеріал корпусу	Нержавіюча сталь
Робоча температура, °С	від -40 до +125
Робочий тиск, МПа	до 4,5
Час відгуку, с	менше 0,25
Температура навколишнього середовища, °С	від -40 до +85
Привід	Кроковий електропривод
Вхідний/вихідний сигнал	4–20 мА/HART
Коефіцієнт витрати	Kv=65; Cv=75

Для подачі повітря в компресорну частину газотурбінного двигуна Siemens SGT-100 необхідне використання електромагнітного клапана, що забезпечує стабільне та точне керування повітряним потоком. У результаті аналізу промислових рішень перевагу було надано соленоїдному клапану ASCO серії 551 виробництва Emerson (рисунок 3.8). Дане обладнання широко застосовується в пневматичних системах автоматизації завдяки високій швидкості спрацьовування, стійкості до різких температурних коливань і надійності при тривалій експлуатації в умовах роботи газотурбінних установок. Основні технічні параметри клапана ASCO 551 наведені в таблиці 3.7.



Рис. 3.8. Клапан ASCO 551

Таблиця 3.7

Параметри клапана ASCO 551

Параметр	Значення
Принцип роботи	Прямої дії
Виконання	Нормально закритий
Матеріал корпусу	Алюмінієвий сплав
Робоча температура, °С	від -40 до +80
Температура навколишнього середовища, °С	від -40 до +60
Пропускна здатність, м ³ /год	38
Споживана потужність, Вт	22
Час спрацьовування, мс	Відкриття: 20–25; закриття: 30
Вхідний/вихідний сигнал	24 V DC / 4–20 mA
Мембрана	EPDM
Номінальний діаметр, мм	50

Висновок до розділу 3

У третьому розділі виконано розроблення функціональної схеми автоматизації системи керування газотурбінним двигуном, що відображає взаємодію основних елементів системи та логіку їх роботи. Побудована схема забезпечує комплексний контроль і регулювання ключових параметрів роботи двигуна, що є необхідною умовою його стабільної, безпечної та ефективної експлуатації.

У процесі роботи здійснено обґрунтований вибір основного обладнання автоматизованої системи керування. Зокрема, підібрано витратомір, датчики тиску та температури, тахометр, програмований логічний контролер і виконавчі клапани з урахуванням вимог до точності вимірювань, надійності та сумісності з умовами роботи газотурбінного двигуна. Запропоновані технічні рішення забезпечують можливість реалізації заданих алгоритмів керування та створюють основу для подальшого впровадження і налаштування системи автоматизації.

РОЗДІЛ 4

СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

4.1. Постановка задачі для синтезу контуру керування

Відповідно до технічного завдання дипломної роботи необхідно синтезувати контури керування:

- контур регулювання температури в камері згоряння газотурбінного двигуна на основі комбінованого принципу керування на рисунку 4.1;
- контур програмного керування температурою в камері згоряння на рисунку 4.2.

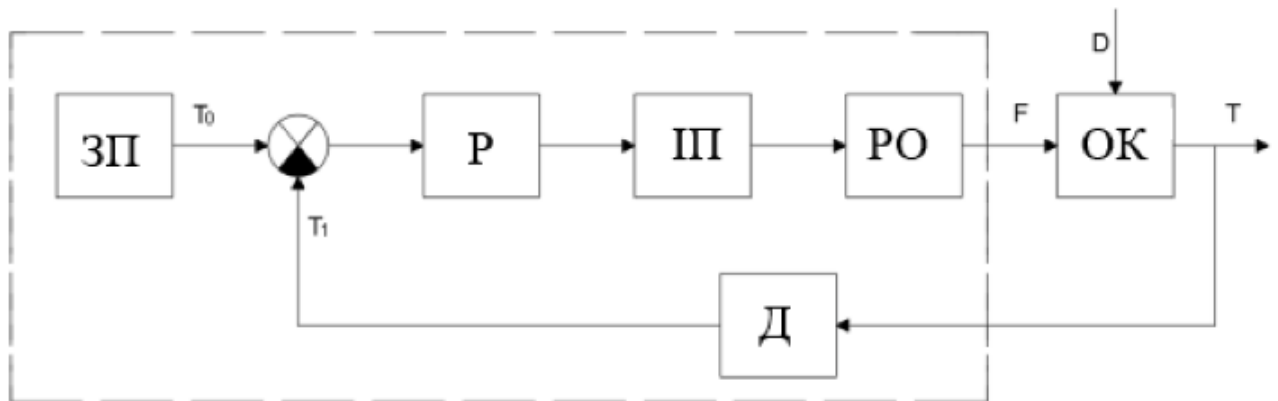


Рис. 4.1. Функціональна схема контуру регулювання температури в камері згоряння



Рис. 4.2. Функціональна схема контуру програмного керування температурою в камері згоряння

де F – витрата газу;

T – температура в камері згоряння;

T_0 – задана температура;

D – зовнішнє збурення.

На основі розроблених контурів керування сформульовано такі завдання:

Задача №1. Для забезпечення необхідних показників якості, виходячи з математичної моделі замкненої системи регулювання, необхідно виконати синтез типового регулятора.

Задача №2. Відповідно до функціональної схеми необхідно розробити систему програмного керування температурою в камері згоряння.

4.2. Побудова передатної функції

Контроль витрати палива в камері згоряння було виділено як ключовий елемент у системі керування газотурбінним двигуном. Витрата палива безпосередньо впливає на температуру газів: при збільшенні витрати палива інтенсивність горіння зростає, що призводить до підвищення температури в камері. У результаті підвищена температура сприяє зростанню загальної потужності двигуна завдяки більш ефективному розширенню газів у турбіні. Однак існує температурна межа, перевищення якої викликає зниження ефективності через зростання термічних напружень.

Для моделювання передатної функції була застосована дросельна характеристика. У цьому випадку вхідним параметром виступає витрата палива, а вихідним – температура газів у камері згоряння. Вихідні дані для цих параметрів наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Вихідні значення

№	Витрата палива F, кг/год	Температура газів, К
1	1193	822
2	1234	835
3	1296	842
4	1325	851
5	1377	868

Продовження таблиці 4.1

№	Витрата палива F, кг/год	Температура газів, К
6	1429	871
7	1470	892
8	1527	902
9	1597	912
10	1633	935

Для побудови передатної функції контуру керування планується використати спеціалізований інструмент, що є складовою програмного забезпечення MATLAB, а саме System Identification Toolbox [9]. MATLAB широко застосовується в інженерних і наукових дослідженнях, а також у навчальній сфері, забезпечуючи розв'язання різноманітних задач у галузі математичного аналізу, моделювання та проектування. System Identification Toolbox надає можливість автоматично створювати математичну модель системи на основі заданих вхідних і вихідних даних, наведених у таблиці 4.1. Інтерфейс основного вікна цього інструмента наведено на рисунку 4.3.

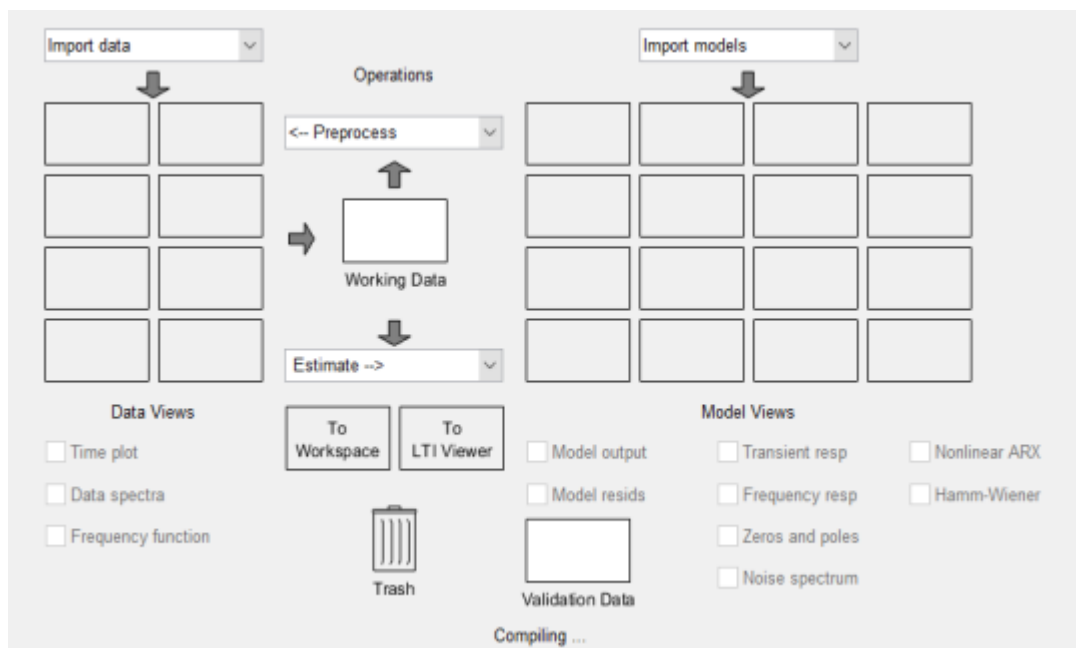


Рис. 4.3. Вікно System Identification Toolbox

Після завантаження вхідних і вихідних даних розпочинається процес моделювання, який зображено на рисунку 4.4.

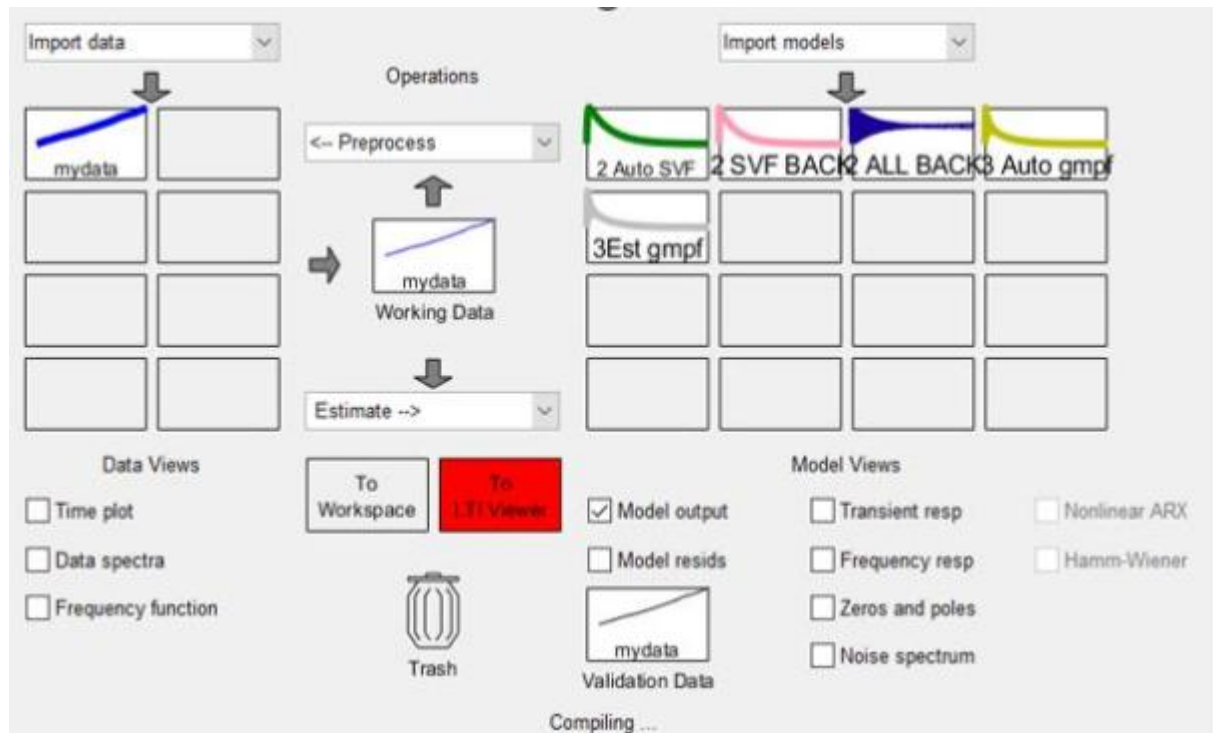


Рис. 4.4. Моделювання в System Identification Toolbox

Ключовим параметром, що визначає відповідність математичної моделі реальній системі, є показник адекватності. У процесі підбору моделей для подальшого синтезу була обрана передатна функція з оцінкою адекватності, що дорівнює 97,21 %. Порівняння різних передатних функцій, а також підсумковий результат наведені на рисунках 4.5, 4.6.

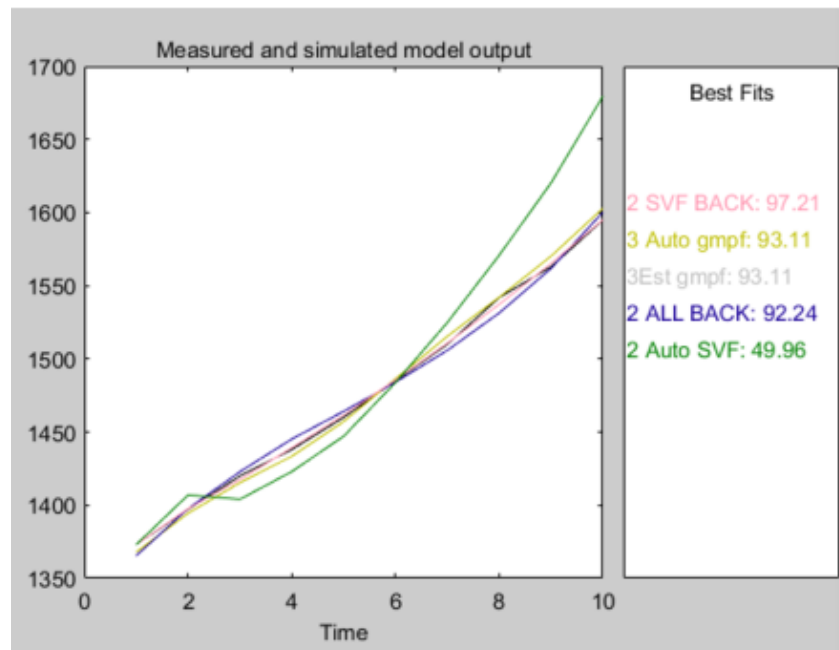


Рис. 4.5. Результати порівняння оцінок адекватності в System Identification Toolbox

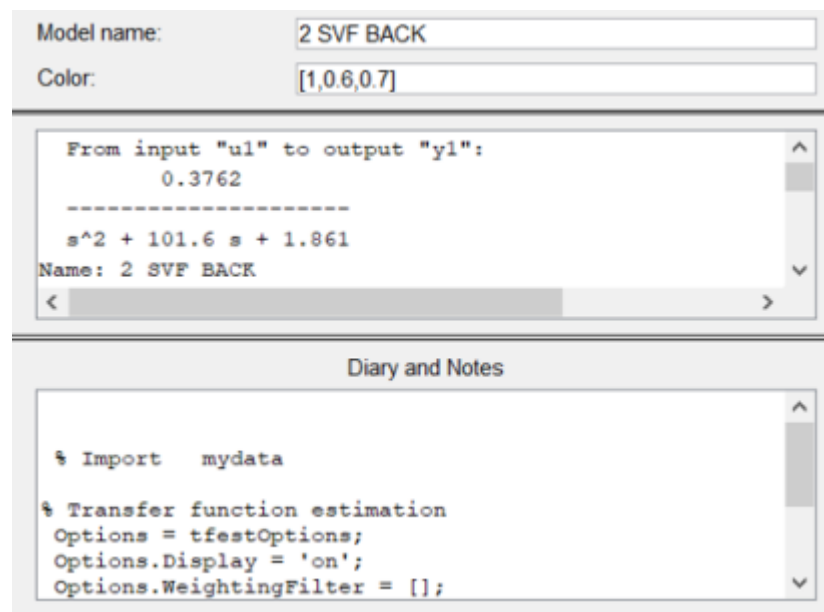


Рис. 4.6. Обрана передатна функція

4.3. Аналіз динамічних властивостей системи

Виходячи з результатів оцінок адекватності та результатів, наведених на рисунку 4.6, передатна функція розімкненої системи має такий вигляд (4.1):

$$G(s) = \frac{0.3762}{s^2 + 101.6s + 1.861}. \quad (4.1)$$

Передатна функція системи автоматичного регулювання подачі палива газотурбінного двигуна описує взаємозв'язок між вхідним сигналом, що представляє витрату палива, та вихідним сигналом, який характеризує температуру газового потоку. Дана функція є основою для подальшого дослідження характеристик системи керування.

Для перетворення передатної функції замкненої системи використовується формула зворотного зв'язку, подана у виразі (4.2):

$$T(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} \quad (4.2)$$

За допомогою формул (4.1) та (4.2) обчислюємо передатну функцію замкненої системи:

$$T(s) = \frac{\frac{0.3762}{s^2+101.6s+1.861}}{1+\frac{0.3762}{s^2+101.6s+1.861}} = \frac{0.3762}{s^2+101.6s+2.2372} \quad (4.3)$$

Перед проведенням моделювання системи в MATLAB необхідно попередньо переконатися в її стійкості, застосувавши перший метод Ляпунова. Алгоритм перевірки стійкості наведено нижче.

Алгоритм перевірки стійкості

Крок 1. Складається характеристичне рівняння на основі передатної функції розімкненої системи. Характеристичне рівняння, позначене формулою (4.3), має вигляд:

$$s^2 + 101.6s + 1.861 = 0, n = 2 \quad (4.3)$$

Крок 2. Визначаємо корені характеристичного рівняння. Оскільки рівняння другого порядку, його корені обчислюються за формулою дискримінанта, як зазначено у формулі (4.4):

$$D = b^2 - 4ac = 101.6^2 - 4 \times 1 \times 1.861 = 10315.116 > 0 \quad (4.4)$$

$$s_1 = \frac{-101.6 - \sqrt{10315.116}}{2} = -102$$

$$s_2 = \frac{-101.6 + \sqrt{10315.116}}{2} = -0.0183$$

Крок 3. Після знаходження коренів характеристичного рівняння їх відображають на комплексній площині. Для виконання цієї задачі використовується програмне забезпечення MATLAB. Результати візуалізації коренів наведені на рисунку 4.7.

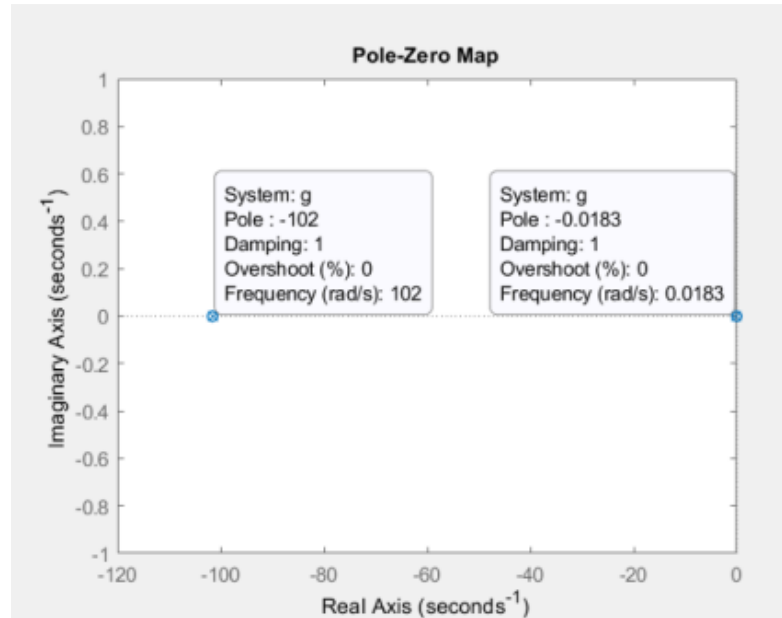


Рис. 4.7. Положення коренів характеристичного рівняння в комплексній області

Також проведемо аналіз замкненої системи на стійкість першим методом Ляпунова [8].

Алгоритм перевірки стійкості

Крок 1. Сформуємо характеристичне рівняння на основі передатної функції замкненої системи. Характеристичне рівняння, позначене формулою (4.5), має такий вигляд:

$$s^2 + 101.6s + 2.2372 = 0, n = 2 \quad (4.5)$$

Крок 2. Визначаємо корені характеристичного рівняння. Оскільки рівняння другого порядку, обчислюємо корені з використанням формули дискримінанта (4.6)

$$D = b^2 - 4ac = 101.6^2 - 4 \times 1 \times 2.2372 = 10313.6112 > 0 \quad (4.6)$$

$$s_1 = \frac{-101.6 - \sqrt{10313.6112}}{2} = -101.578$$

$$s_2 = \frac{-101.6 + \sqrt{10313.6112}}{2} = -0.022$$

Крок 3. Після знаходження коренів зобразимо їх на комплексній площині. Для побудови графіка використаємо MATLAB. Графік результатів наведено на рисунку 19.

Висновок: згідно з першим методом Ляпунова як замкнена, так і розімкнена системи автоматичного регулювання (САУ) є стійкими. Це зумовлено тим, що їхні полюси представлені від'ємними дійсними значеннями та розташовані в лівій півплощині на комплексній площині.

Для подальшого дослідження характеристик системи керування буде застосована прикладна програма Simulink. Цей інструмент, що входить до складу MATLAB, являє собою графічне середовище для моделювання, симуляції та аналізу поведінки динамічних систем.

Структурна схема системи керування газотурбінного двигуна наведена на рисунку 4.8:

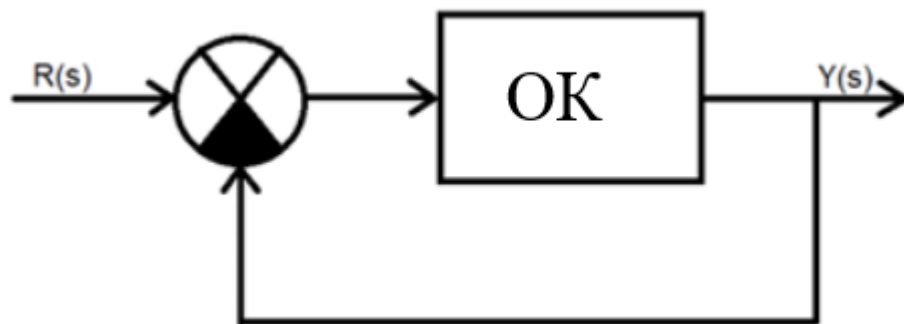


Рис. 4.8. Структурна схема САУ

де $R(s)$ – задавальний вплив;

$Y(s)$ – вихідна координата.

Виконаємо моделювання замкненої системи автоматичного регулювання газотурбінного двигуна, наведеної на рисунку 4.9, та проведемо запуск для отримання перехідних характеристик.

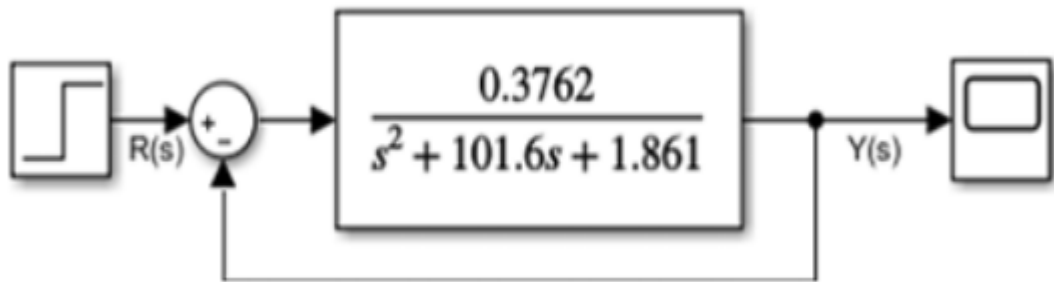


Рис. 4.9. Структурна схема замкненої САР

На основі отриманої перехідної характеристики можливо визначити прямі показники якості. Результати моделювання замкненої системи автоматичного регулювання наведені на рисунку 4.10.

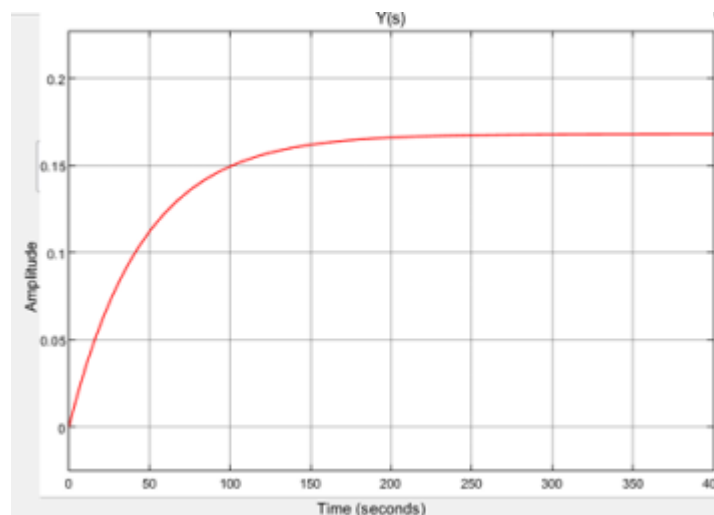


Рис. 4.10. Перехідна характеристика структурної схеми системи автоматичного регулювання

На підставі аналізу перехідного процесу можна зробити попередні висновки, що система характеризується монотонною та неколивальною поведінкою, однак не досягає заданого значення (уставки). Також відзначається уповільнена реакція системи на вхідний вплив, що пояснюється збільшеними значеннями часу наростання та часу регулювання.

Для більш точної оцінки параметрів якості системи пропонується використати інструмент MATLAB Linear System Analyzer Toolbox, який дозволяє провести аналіз необхідності включення типового регулятора в систему. На

рисунку 4.11 наведено перехідний процес замкненої системи, отриманий із використанням зазначеного інструмента MATLAB.

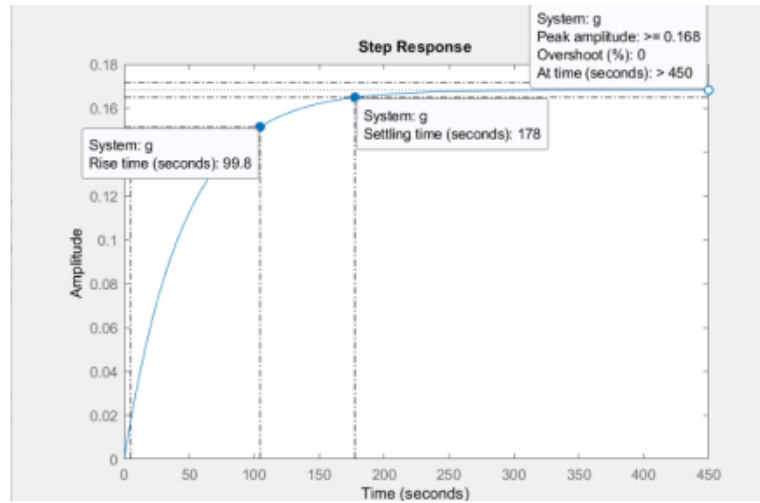


Рис. 4.11. Перехідна характеристика замкненої системи з визначеними прямими оцінками якості

Виконаємо розрахунок прямих оцінок якості на основі отриманого перехідного процесу замкненої системи.

Час регулювання – це показник, який характеризує часовий інтервал, за який вихідна величина системи входить у встановлений діапазон допуску, не виходячи за межі заданої похибки. Він відображає динамічну властивість системи – її здатність до швидкої стабілізації після впливу. Час установаження було визначено на основі аналізу перехідного процесу і становить: $T_{set} = 178c$

Перерегулювання являє собою кількісну характеристику, що відображає величину перевищення вихідної змінної відносно уставки в перехідній фазі до моменту досягнення усталеного режиму. Іншими словами, цей параметр показує, на скільки відсотків вихідний сигнал перевищує усталене значення перед початком стабілізації процесу.

Відсоток перерегулювання обчислюється за виразом (4.7):

$$P_{ov} = \frac{Y_{(max-Y_{ss})}}{Y_{ss}} \times 100\%$$

де Y_{max} – максимальне значення, досягнуте вихідним сигналом;

Y_{ss} – усталене значення.

Оскільки перехідний процес досліджуваної системи протікає без коливань і є монотонним, значення відсотка перерегулювання дорівнює нулю.

Показник кількості коливань відображає число коливальних циклів, які здійснює вихідний сигнал до моменту встановлення усталеного стану. Через монотонний характер перехідного процесу наявність коливань відсутня, відповідно, цей показник також дорівнює нулю.

На основі розглянутих вище критеріїв якості можна обґрунтовано зробити висновок про відсутність у системі як коливальних процесів, так і власної частоти коливань, що підтверджує її аперіодичну природу.

Усталена похибка визначається як різниця між заданим (цільовим) значенням і досягнутим вихідним значенням. Розрахунок цього показника здійснюється згідно з виразом (4.8):

$$e_{ss} = Y_{ss} - Y, e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \quad (4.8)$$

Простіше кажучи, усталена похибка являє собою відхилення вихідної змінної від її необхідного (усталеного) значення. З аналітичної точки зору цю похибку можна визначити з використанням такого алгоритму розрахунку.

Крок 1. Визначається передатна функція замкненої системи при впливі одиничного ступінчастого сигналу. Для цього використовується вираз (4.9):

$$T(s) = \frac{E^R(s)}{R(s)} = \frac{1}{1+G(s)} = \frac{s^2+101.6s+1.861}{s^2+101.6s+2.2372} \quad (4.9)$$

Крок 2. Обчислюється динамічна складова похибки на основі формули (4.10):

$$E(s) = T(s) \times R(s) = \frac{s^2+101.6s+1.861}{s^2+101.6s+2.2372} \times \frac{1}{s} \quad (4.10)$$

Крок 3. На заключному етапі визначається статична похибка, використовуючи вираз (4.11):

$$e_{ss}(s) = \lim_{t \rightarrow \infty} E(t) = \lim_{t \rightarrow 0} [s \times E(s)] \quad (4.14)$$

Підставляючи числові значення у формулу (4.11), отримуємо конкретне значення статичної похибки:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \left[s \times \frac{s^2+101.6s+1.861}{s^2+101.6s+2.2372} \times \frac{1}{s} \right] = 0.8318 \quad (4.15)$$

Графічне представлення розбіжності між заданою уставкою та фактичним вихідним сигналом наведено на рисунку 4.12. На основі візуального аналізу можна зробити висновок, що усталена похибка становить: ($e_{ss} = 0.8313$).

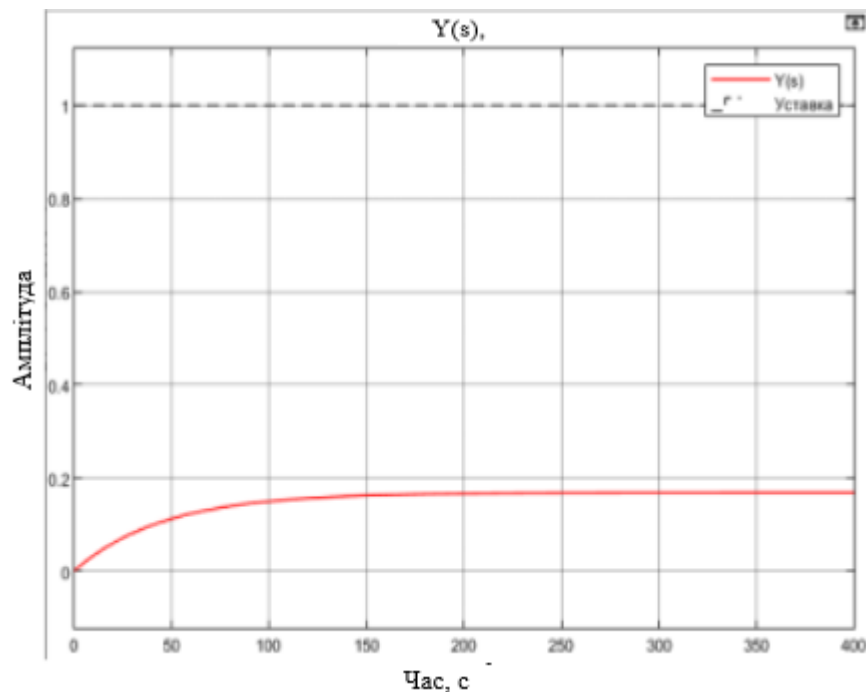


Рис. 4.12. Різниця вихідного сигналу від уставки

Час досягнення першого максимуму характеризує інтервал, за який вихідний сигнал досягає свого найбільшого значення (пікового відгуку) в ході перехідного процесу до початку стабілізації. У випадку розглядуваної системи цей показник дорівнює нулю, що зумовлено відсутністю коливальної складової у відгуку.

Час наростання визначає швидкість реакції системи на вхідний вплив і, відповідно, є критерієм її швидкодії. По суті, він відображає, наскільки швидко вихід досягає встановленого діапазону значень. На основі аналізу перехідної характеристики час наростання становить: $T_R = 99.8\text{с}$.

Декремент затухання використовується для оцінювання зменшення амплітуди коливань при послідовних циклах перехідного процесу. Він показує, у скільки разів зменшується амплітуда чергового коливання порівняно з попереднім. Однак з огляду на те, що відгук системи не містить коливань, цей параметр до аналізу не застосовується.

Таким чином, усі основні прямі показники якості системи були розглянуті. Їхні значення зведені в таблицю 4.2, у якій наведено прямі оцінки динамічних характеристик системи автоматичного регулювання (САР) газотурбінного двигуна.

Таблиця 4.2

Прямі оцінки якості САР

№	Оцінки якості	Значення
1	Час регулювання (T_{set})	178с
2	Перерегулювання (P_{ov})	0%
3	Кількість коливань (M)	0
4	Коливальність (μ)	0%
5	Частота коливань (w_{osc})	0
6	Усталена похибка (e_{ss})	0,8318
7	Час досягнення першого максимуму (T_p)	0с
8	Час наростання (T_R)	99,8с
9	Декремент затухання (λ)	0

На підставі знайдених коренів характеристичного рівняння замкненої системи можна виконати так звану кореневу оцінку показників якості регулювання.

Раніше були отримані власні значення замкненої системи: $s_1 = -101,5780$; $s_2 = -0,022$. Із цих значень найбільший вплив на динаміку відгуку має корінь із меншим за модулем від'ємним дійсним значенням, оскільки саме він визначає найбільш повільно згасаючу ланку. У даному випадку таким коренем є s_2 , який у подальшому аналізі позначається як σ_{\min} .

На його основі виконується розрахунок часу регулювання системи, який визначається за формулою (4.12):

$$T_{set} = \frac{4}{|\sigma_{\min}|} = \frac{4}{-0.022} = 181.81с \quad (4.12)$$

Показник перерегулювання безпосередньо пов'язаний із коефіцієнтом демпфування системи. У тих випадках, коли корені характеристичного рівняння є комплексними, цей коефіцієнт відображає ступінь коливальності перехідного процесу. Однак у розглянутому випадку всі власні значення системи є від'ємними

та дійсними, що вказує на відсутність коливальних складових. Отже, можна зробити висновок, що перерегулювання відсутнє, тобто його значення наближене до нуля.

Ще одним важливим параметром, що дає змогу оцінити динаміку системи, є ступінь стійкості, яка характеризує швидкодію системи та визначається за формулою (4.13)

$$\eta = |\sigma_{\min}| = 0.022 \quad (4.13)$$

Коливальність за коренями визначається як відношення уявної частини кореня до його дійсної частини. У даному випадку, оскільки всі знайдені власні значення є дійсними, виконати числову оцінку коливальності неможливо. Водночас на підставі аналізу перехідного процесу встановлено, що система демонструє монотонний відгук, що підтверджує відсутність коливальних складових у її динаміці.

За результатами проведеного аналізу можна стверджувати, що система має монотонну поведінку, що автоматично виключає будь-які прояви коливальності. Однак при цьому фіксуються уповільнені динамічні характеристики, зокрема високі значення часу наростання та часу регулювання. Також розрахований ступінь стійкості вказує на низьку швидкість реакції системи на зовнішні впливи, що обґрунтовує необхідність упровадження регулятора в структуру керування. Ключовим фактором на користь застосування регулятора є значне значення усталеної похибки, яке дорівнює 0,8318, що свідчить про недостатню точність функціонування системи.

4.4. Синтез типового регулятора

Для налаштування параметрів PID-регулятора буде застосовано емпіричний метод Циглера–Нікольса, заснований на характеристиках перехідного процесу розімкненої системи. Керувальна дія в ідеальній структурі PID-регулятора визначається формулою (4.14)

$$U_{(t)} = K_p \left(E(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4.14)$$

де:

$e(t)$ – похибка регулювання;

K_p – коефіцієнт пропорційної складової;

K_i – коефіцієнт інтегральної складової;

K_d – коефіцієнт диференційної складової.

Застосування методу Циглера–Нікольса потребує попереднього визначення ключових параметрів моделі об'єкта керування: коефіцієнта передачі, часу запізнення та сталої часу. Ці параметри розраховуються на підставі аналізу перехідної характеристики, отриманої у відповідь на одиничний вплив, шляхом проведення дотичної в точці перегину.

Коефіцієнт передачі (k) характеризує усталене значення вихідного сигналу при постійному входньому впливі та визначається як горизонтальне значення перехідної характеристики на великих інтервалах часу.

Час запізнення (L) являє собою інтервал часу від моменту подачі входнього впливу до початку реакції системи та визначається як абсциса точки перетину дотичної з віссю часу. Стала часу (T) дорівнює різниці між моментом, у який дотична досягає значення (k), і часом запізнення.

На підставі аналізу перехідної характеристики (рисунок 4.13) були визначені такі значення: $k = 0,1682$; $L = 4$ с; $T = 46$ с.

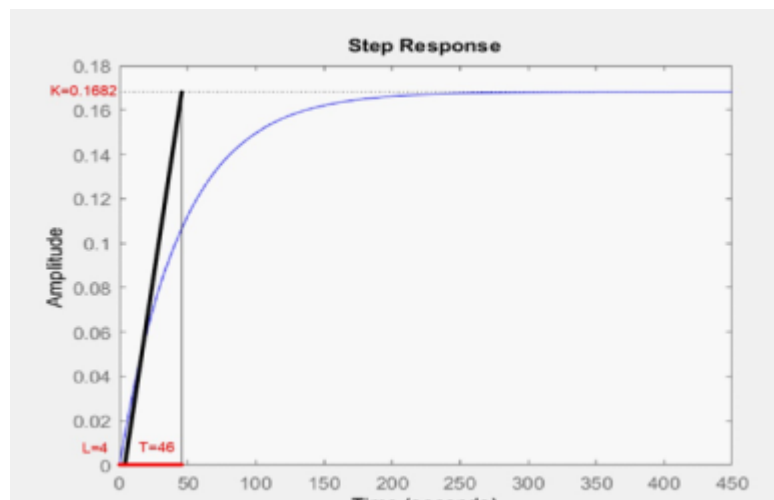


Рис. 4.13. Визначення характеристик об'єкта керування методом дотичної

4.5. Метод Циглера–Нікольса (ZN1)

Метод Циглера–Нікольса (ZN1) передбачає два підходи до налаштування коефіцієнтів PID-регулятора – на основі аналізу розімкненого та замкненого контуру системи [7].

Метод розімкненого контуру реалізується таким чином:

Крок 1. Виконується ідентифікація відгуку системи на одиничний ступінчастий вплив. На вхід подається ступінчастий сигнал з метою аналізу перехідної характеристики.

Крок 2. Будується дотична до точки перегину відгуку, на підставі якої визначаються ключові параметри: час запізнення, стала часу та коефіцієнт передачі.

Крок 3. Виконується розрахунок параметрів PID-регулятора з використанням емпіричних формул.

Метод замкненого контуру включає такі етапи:

Крок 1. У контур керування вводиться пропорційний регулятор. Його коефіцієнт поступово збільшується до моменту, коли система починає стійко коливатися з постійною амплітудою. Це необхідно для визначення критичного підсилення та періоду стійких коливань.

Крок 2. На основі отриманих критичних параметрів розраховуються коефіцієнти PID-регулятора.

Оскільки необхідні параметри вже були визначені для методу з розімкненим зв'язком, у даній роботі застосовується саме метод відкритого контуру.

Схема моделювання системи з упровадженням у неї PID-регулятором наведена на рисунку 4.14.

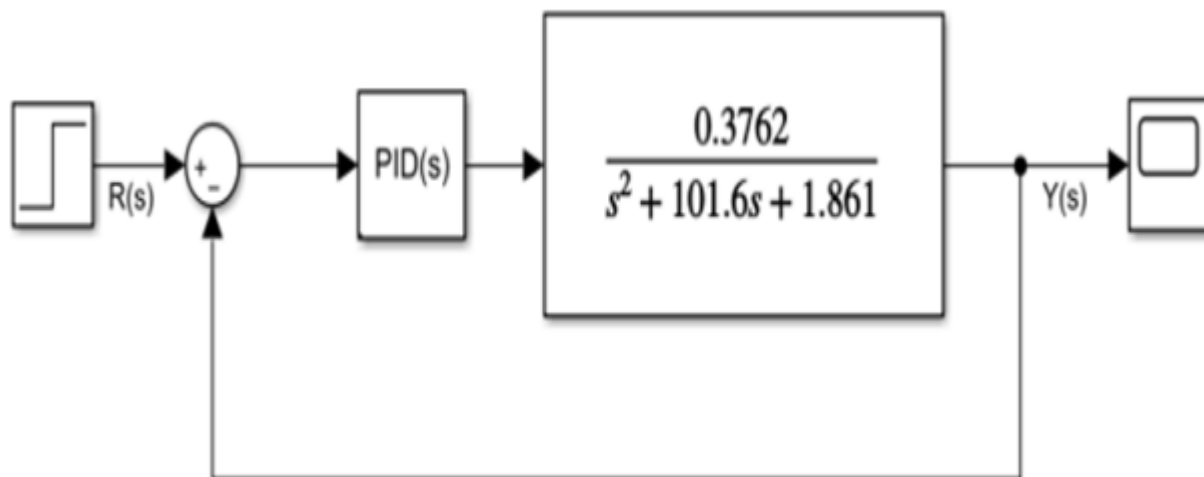


Рис. 4.14. Структурна модель системи автоматичного керування з PID-регулятором

Виконаємо розрахунок параметрів PID-регулятора з використанням емпіричних співвідношень, що відповідають методу Циглера–Нікольса (ZN1), та подамо результати в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Розрахунок параметрів PID-регулятора за методом ZN1

Тип регулятора	K_p	$T_I = 1/I$	K_d
P	$\frac{T}{KL} = 68.37$	–	–
PI	$0.9 \times \frac{T}{KL}$ $= 61.53$	$T_I = \frac{L}{0.3} = 13.33$ $K_I = \frac{1}{T_I} = 0.075$	–
PID	$1.25 \times \frac{T}{KL}$ $= 82.04$	$T_I = 2, L = 8$ $K_I = \frac{1}{T_I} = 0.125$	$0.5L = 2$

Відповідно до раніше розрахованих коефіцієнтів виконується підстановка значень у структуру PID-регулятора для отримання перехідних характеристик системи. Результати моделювання перехідних процесів наведені на рисунку 4.15.

Аналізуючи представлені графіки, можна зробити висновок, що на подальших етапах буде використано саме PID-регулятор, оскільки він демонструє найменший час наростання та мінімальне усталене відхилення порівняно з іншими типами регуляторів. Виходячи з визначених параметрів, вираз закону керування PID-регулятора, отриманого за методом Циглера–Нікольса, записується у такому вигляді:

$$U(t) = 82.04 \left(e(t) + 0.125 \int_0^t e(t) dt + 2 \frac{de(t)}{dt} \right)$$

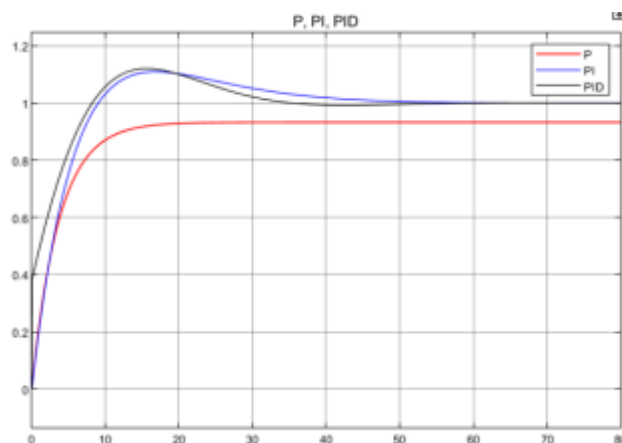


Рис. 4.15. Графіки переходних процесів для P-, PI- та PID-регуляторів за методом Циглера–Нікольса

Під час аналізу переходних характеристик можна відзначити наявність диференційної складової у відгуку системи з PID-регулятором. Аналогічна тенденція спостерігається і при реалізації інших методів налаштування, де D-компонента також проявляється в динаміці процесу.

З метою усунення впливу цієї складової було виконано параметричну корекцію налаштувань регулятора, що полягала в обнуленні коефіцієнта K_d . Таким чином, у подальшому аналізі, включно з усіма наступними методами, до розрахунку приймається модифікований регулятор, у якому D-ланка виключена шляхом відповідної корекції параметрів.

Перехідний процес системи з PID-регулятором після налаштування параметрів наведено на рисунках 4.16 та 4.17 відповідно.

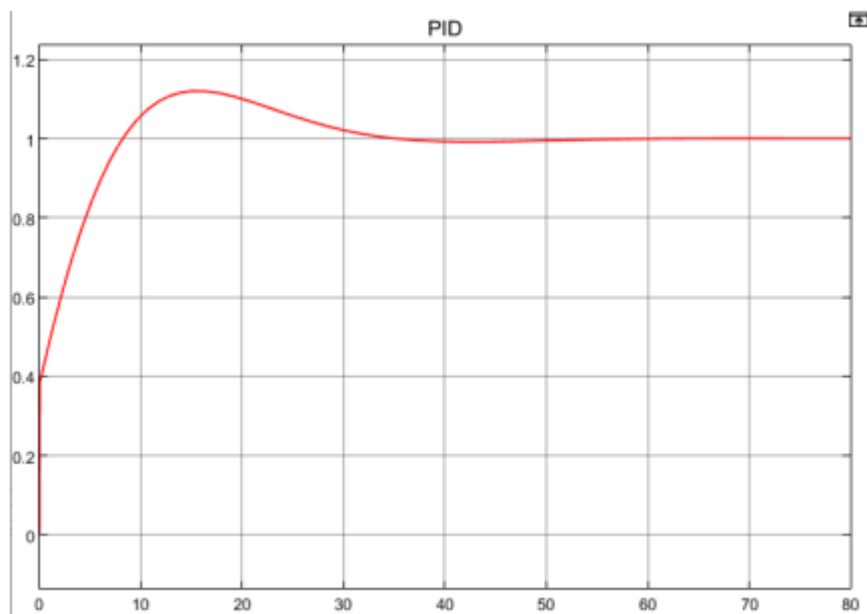


Рис. 4.16. Перехідний процес PID-регулятора з D-складовою ZN1

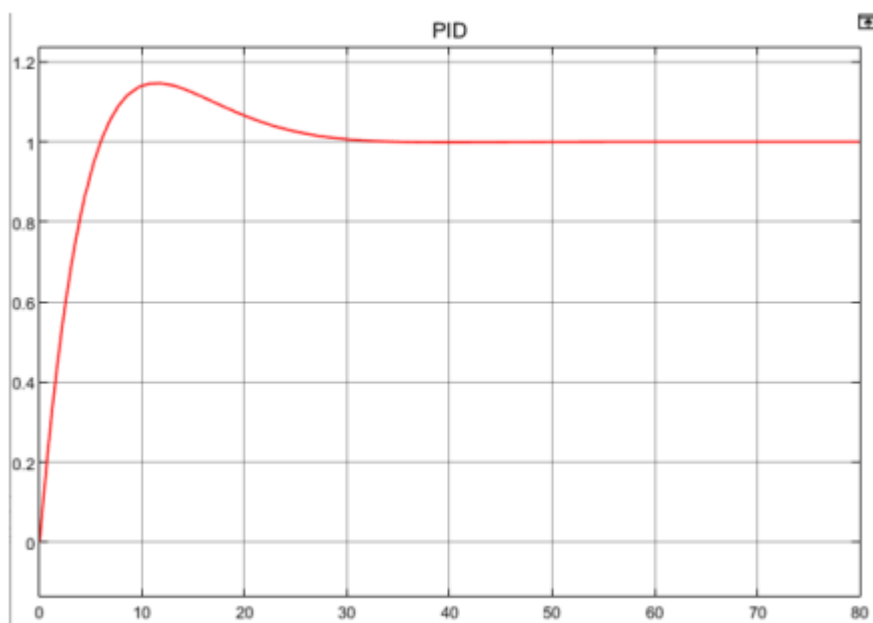


Рис. 4.17. Перехідний процес PID-регулятора ZN1

Виконаємо визначення положення полюсів замкненої системи з метою розрахунку запасу стійкості та отримання кореневої оцінки часу регулювання. Згідно з даними, наведеними на рисунку 4.18, значення ступеня стійкості системи, налаштованої за методом Циглера–Нікольса, становить 0,161. Час регулювання розраховується за формулою (12):

$$T_{set} = \frac{4}{|\sigma_{min}|} = \frac{4}{-0.161} = 24c$$

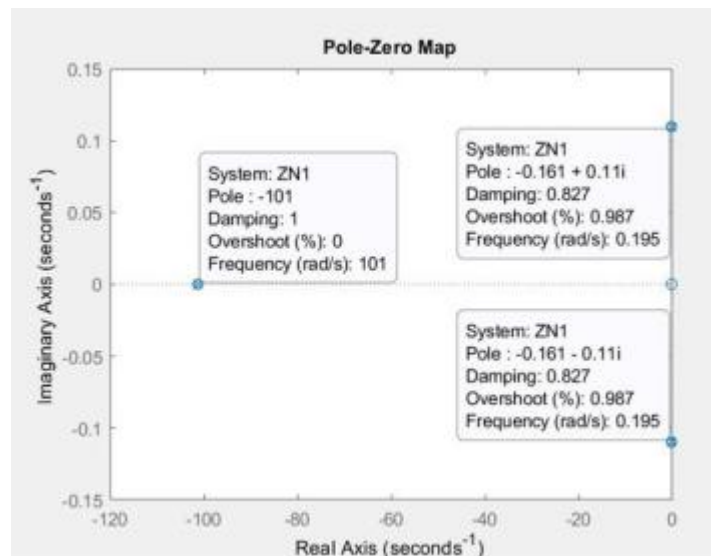


Рис. 4.18. Полюси системи за методом Циглера–Нікольса

Додатково на підставі графічних даних, наведених на рисунку 4.19, були визначені амплітудний та фазовий запаси стійкості системи.

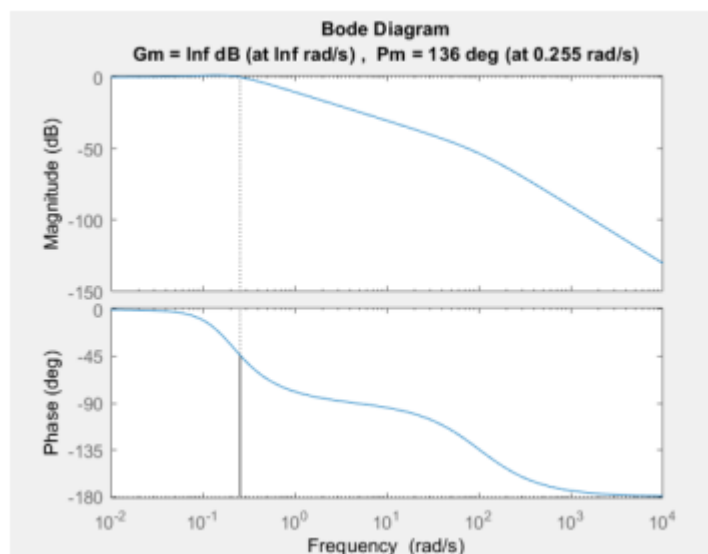


Рис. 4.19. Запаси стійкості за амплітудою та фазою за методом Циглера–Нікольса

Аналізуючи наведені на рисунку дані, можна встановити, що фазовий запас стійкості становить 136° , тоді як амплітудний запас прямує до нескінченності, що вказує на високий рівень стійкості системи. На підставі проведеного аналізу робиться висновок про прийнятність застосування методу Циглера–Нікольса для

налаштування даної системи. Отримана система демонструє стійку поведінку, а також зменшення часу регулювання. При цьому спостерігається перерегулювання величиною 14,7%, що перебуває в допустимих межах.

На підставі розрахованих прямих і непрямих показників якості перехідного процесу можна зробити висновок про ефективність застосування методу Циглера–Нікольса для налаштування PID-регулятора в даній системі. Аналіз таблиць 4.4 та 4.5 показує, що застосування PID-регулятора дало змогу істотно скоротити час встановлення сигналу (з 178 до 26 секунд), а також повністю усунути усталену похибку, що свідчить про високу точність системи.

Таблиця 4.4

**Прямі оцінки якості системи без регулятора та з PID-регулятором,
налаштованим за методом ZN1**

№	Прямі оцінки якості	Система без регулятора	Метод ZN1
Основні			
1	Час регулювання T_{set}	178с	26с
2	Перерегулювання P_{ov}	0%	14,7%
3	Кількість коливань M	0	0
4	Коливальність μ	0%	–
5	Частота коливань w_{osc}	0	–
6	Усталена похибка e_{ss}	0,8318	0
Додаткові			
7	Час досягнення першого максимуму T_p	0 с	11,83с
8	Час наростання T_R	99,8с	4,42с
9	Декремент затухання λ	–	–

Таблиця 4.5

**Непрямі оцінки якості системи без регулятора та з PID-регулятором,
налаштованим за методом ZN1**

№	Непрямі оцінки якості	Система без регулятора	Метод ZN1
1	Запас стійкості за амплітудою	∞	∞
2	Запас стійкості за фазою	∞	136°
3	Ступінь стійкості	0,022	0,161

Незважаючи на виникнення перерегулювання величиною 14,7%, даний показник залишається в межах допустимих значень і не чинить критичного впливу на стійкість і динаміку системи. Крім того, система демонструє прийнятні значення фазового запасу стійкості (136°) і ступеня стійкості (0,161), що підтверджує її стійку поведінку при зовнішніх впливах.

Таким чином, метод Циглера–Ніколса дозволяє забезпечити баланс між точністю, швидкодією та стійкістю системи керування, що робить його раціональним вибором.

Висновок до розділу 4

У четвертому розділі виконано синтез системи автоматичного регулювання газотурбінного двигуна з урахуванням вимог до стійкості, швидкодії та точності керування. На початковому етапі сформульовано задачу синтезу контуру керування, визначено керований параметр, збурення та критерії якості перехідного процесу, що дозволило обґрунтувати подальші етапи розрахунків.

Побудовано передатну функцію об'єкта керування та проведено аналіз динамічних властивостей системи, на основі якого оцінено її стійкість і характер перехідних процесів. Для покращення динамічних показників здійснено синтез типового регулятора. Налаштування параметрів регулятора виконано за методом Циглера–Нікольса, що забезпечило досягнення заданих показників якості регулювання. Отримані результати підтверджують ефективність обраного підходу

та можливість його практичного застосування в системі автоматизованого керування газотурбінним двигуном.

РОЗДІЛ 5

СТВОРЕННЯ ПРОГРАМИ КЕРУВАННЯ

5.1. Розроблення алгоритму для програми керування

Алгоритм призначений для реалізації керування температурним режимом газів у камері згоряння. Його функціонування ґрунтується на встановленні залежності між температурою та витратою поданого газу. Як виконавчий елемент регулювання застосовується клапан подачі газу. Структурна схема роботи алгоритму наведена на рисунку 5.1.

Алгоритм починається з ініціалізації процесу, після чого відбувається відкриття повітряного клапана. Далі повітря подається в компресор, де здійснюється процес його стискання до необхідних параметрів. Після завершення стискання запускається таймер тривалістю 5 секунд, що забезпечує стабілізацію режиму перед подальшими етапами роботи.

Після закінчення заданого часу стиснене повітря подається в камеру згоряння. На наступному етапі відкривається газовий клапан, і розпочинається подача палива до камери згоряння. Витрата газу регулюється автоматично відповідно до поточного температурного режиму.

Подальша робота алгоритму базується на контролі температури. Якщо температура є меншою за 500 °С, система продовжує регулювання витрати газу для досягнення оптимального режиму роботи. У разі перевищення температури понад 800 °С система переходить у режим обмеження або корекції подачі палива з метою запобігання перегріву та забезпечення безпечної експлуатації газотурбінного двигуна. Якщо температура знаходиться в допустимому діапазоні, процес завершується.

Таким чином, наведений алгоритм забезпечує послідовний запуск газотурбінного двигуна, контроль основних технологічних параметрів і автоматичне регулювання подачі палива залежно від температурного стану установки, що підвищує надійність та безпеку її роботи.

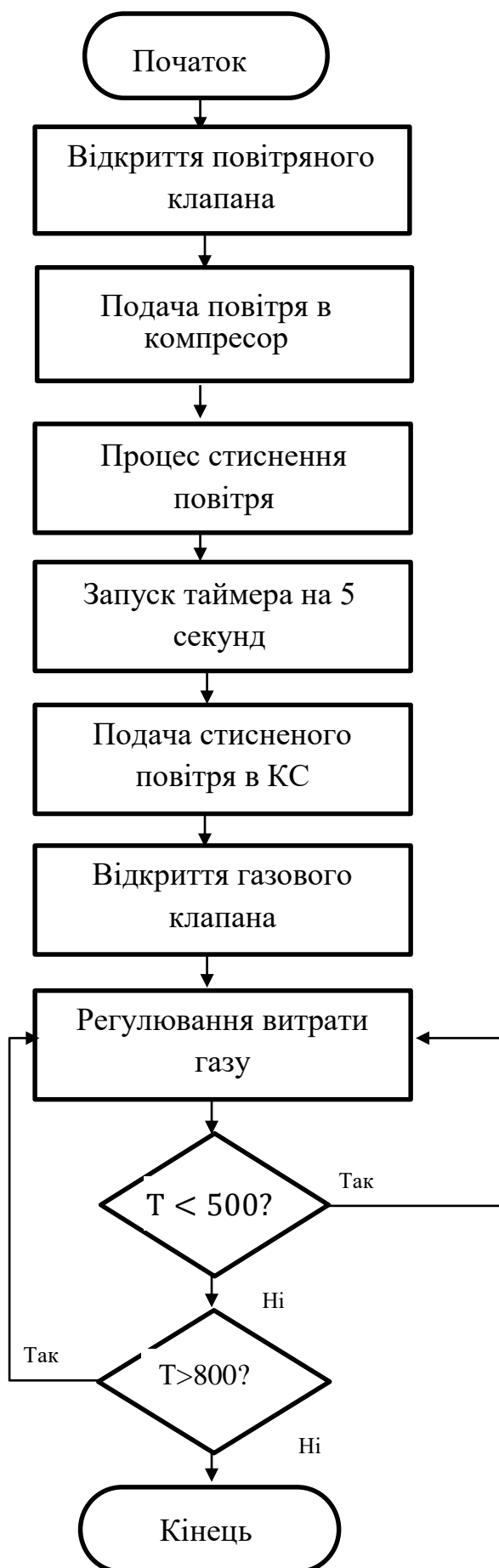


Рис. 5.1. Блок-схема алгоритму керування температурним режимом газів у камері згоряння

5.2. Розроблення програми керування витратою палива в газотурбінному двигуні в TIA Portal

Для реалізації алгоритму температурного контуру в камері згоряння в середовищі TIA Portal необхідно сформувавши відповідну апаратну конфігурацію контролера. Як основний пристрій використовується контролер Siemens (рисунк 5.2) CPU 1515–2 PN, до якого підключаються модулі вхідних і вихідних сигналів аналогового та дискретного типу. Електроживлення контролера забезпечується через блок живлення PS з номінальною потужністю 25 Вт.



Рис. 5.2. Конфігурація контролера Siemens

Далі наведено опис функціонування розробленої програми.

Під час натискання кнопки «Старт» здійснюється запуск газотурбінного двигуна, при цьому формується сигнал на відкриття повітряного клапана та вмикання компресора. У результаті повітря починає надходити до компресора, де протягом 5 секунд відбувається процес стиснення.

Після завершення зазначеного часового інтервалу стиснене повітря спрямовується до камери згоряння. Після подачі повітря до камери згоряння відбувається відкриття регульовального газового клапана, що ініціює процес займання робочої суміші.

Дані з витратоміра обробляються за допомогою блоку масштабування (Scale) для визначення поточної витрати газу. Коливання витрати безпосередньо впливають на температуру в камері згоряння. Датчик температури передає сигнал у діапазоні 4–20 мА, що дає змогу визначити фактичне значення температури в камері.

На основі цих даних здійснюється регулювання витрати газу шляхом керування положенням регулювального клапана відповідно до заданої логіки.

Алгоритм реалізований у середовищі TIA Portal у межах основного організаційного блока OB1. Логічна структура програми та ключові етапи роботи наведені на рисунках 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 і 5.8.

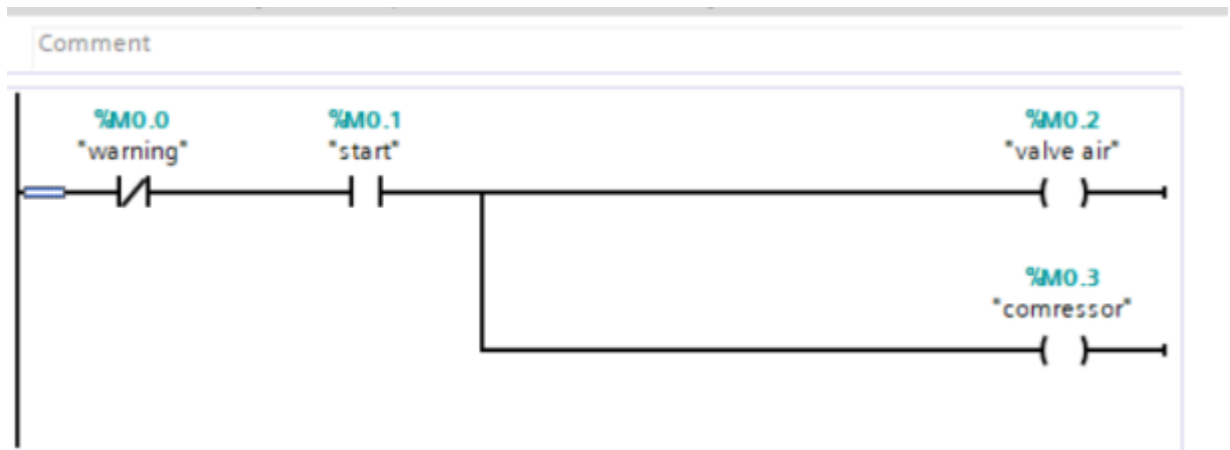


Рис. 5.3. Процес запуску газотурбінного двигуна, відкриття клапана подачі повітря

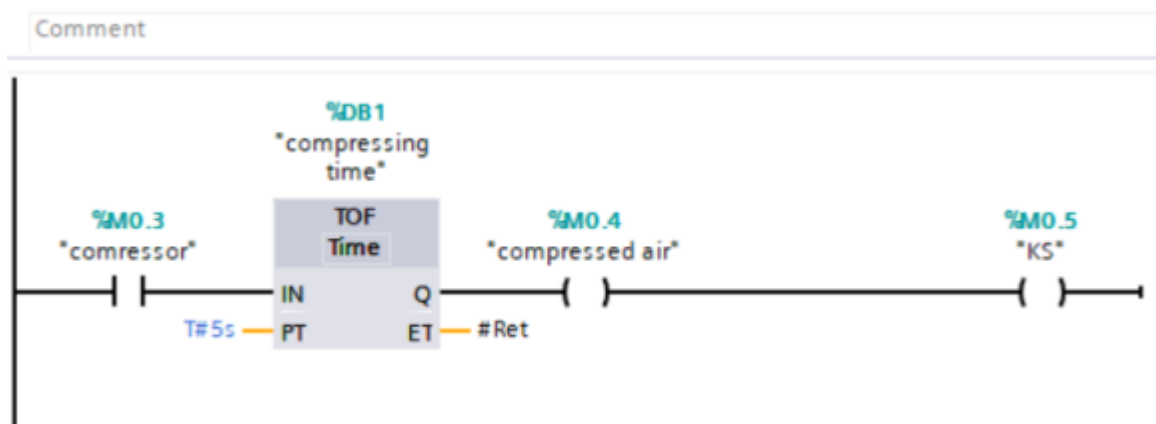


Рис. 5.4. Стиснення повітря та процес подачі повітря в КС

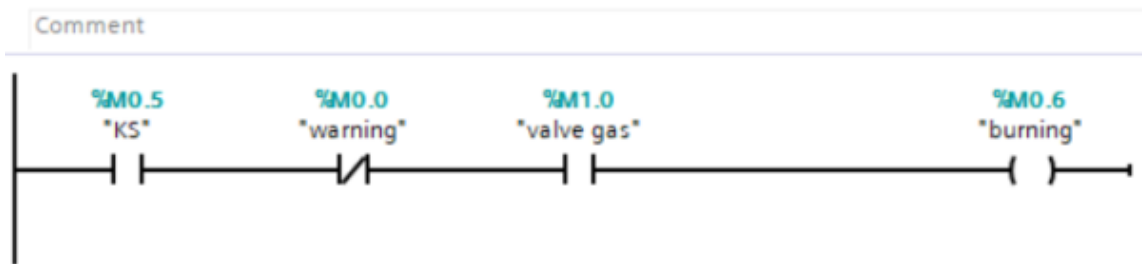


Рис. 5.5. Процес згоряння

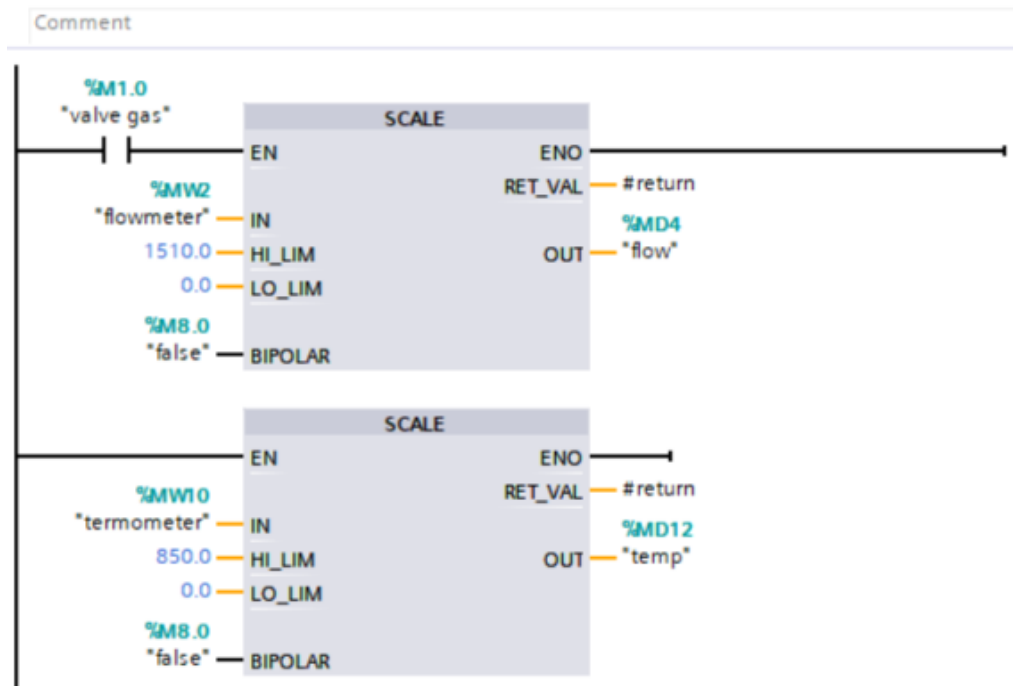


Рис. 5.6. Масштабування аналогових сигналів витратоміра та термометра



Рис. 5.7. Логіка функціонування системи аварійної зупинки та індикації холостого режиму

5.3. Розроблення візуалізації роботи газотурбінної установки з використанням панелі оператора НМІ

У програмному середовищі ТІА Portal була розроблена візуалізація роботи газотурбінної установки з використанням панелі оператора НМІ (рисунок 5.9). Інтерфейс реалізовано на основі раніше складеної функціонально-структурної схеми, що забезпечило логічний і послідовний взаємозв'язок між елементами керування та візуального відображення процесів.

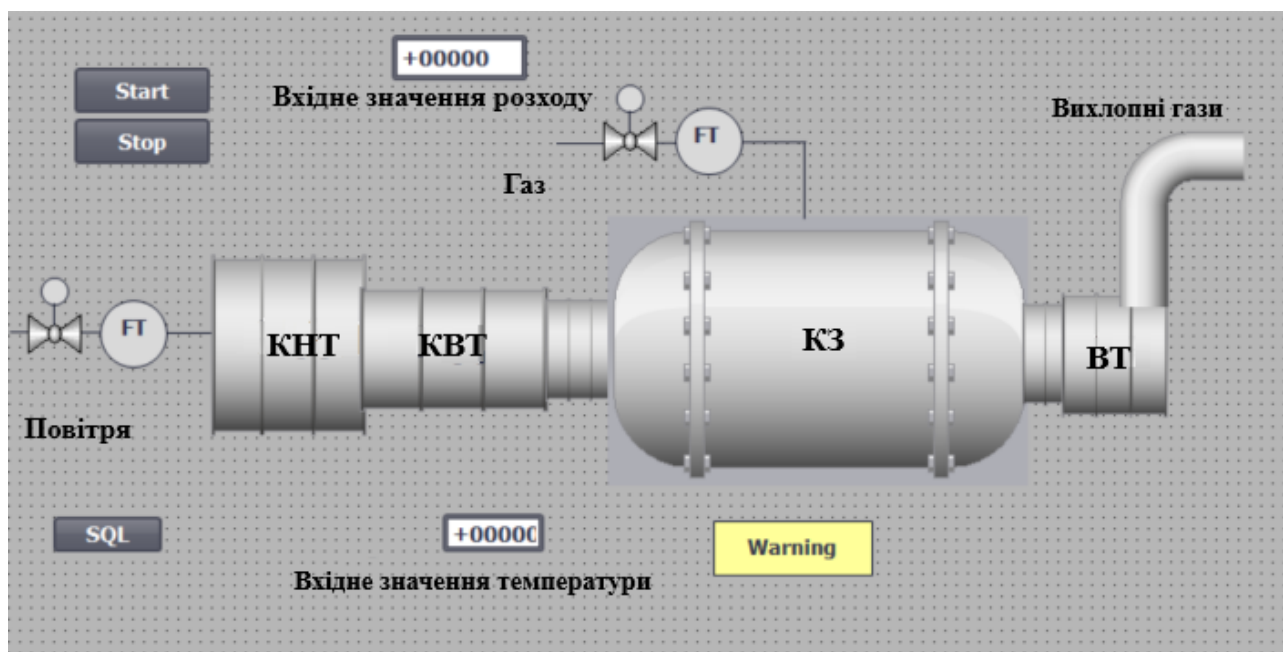


Рис. 5.9. Візуалізація роботи газотурбінної установки

На екрані представлені всі ключові вузли установки: компресор низького тиску (КНТ), компресор високого тиску (КВТ), камера згоряння (КЗ) і вільна турбіна (ВТ). Потoki повітря та газу проходять через установлені витратоміри, значення яких візуалізуються в цифровому вигляді. Температура, що вимірюється в камері згоряння, надходить із датчика, який формує аналоговий сигнал у діапазоні 4–20 мА, і також відображається на панелі НМІ.

Запуск установки здійснюється за допомогою кнопки Start, після натискання якої активуються всі виконавчі механізми: відкриваються клапани подачі повітря та газу, запускається компресор, після чого відбувається подача стисненого повітря в камеру згоряння. У разі штатної роботи двигуна відображається зелений

прямокутний індикатор, що підтверджує нормальний стан системи. У разі виникнення аварійної ситуації зона «Warning» підсвічується червоним кольором, сигналізуючи оператору про необхідність втручання.

Для завершення роботи передбачена кнопка Stop, яка реалізує штатну або аварійну зупинку установки.

Таким чином, інтерфейс панелі оператора, створений відповідно до функціонально-структурної схеми, забезпечує наочну візуалізацію технологічного процесу, зручність керування, оперативну індикацію поточних параметрів і своєчасне оповіщення про відхилення.

Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі здійснено створення програми керування газотурбінним двигуном, що забезпечує реалізацію розроблених алгоритмів автоматичного регулювання. На першому етапі було розроблено алгоритм роботи системи керування, який визначає послідовність дій, умови переходу між режимами та реакцію системи на зміну технологічних параметрів і аварійні ситуації.

На основі розробленого алгоритму створено програму керування витратою палива газотурбінного двигуна в середовищі TIA Portal. Програма забезпечує стабільну роботу двигуна, підтримання заданих параметрів та взаємодію з датчиками й виконавчими механізмами. Також розроблено систему візуалізації роботи газотурбінної установки з використанням панелі оператора MI, що дає змогу оператору здійснювати моніторинг поточного стану, контролювати основні параметри та оперативно втручатися в процес керування. Реалізовані програмні та візуалізаційні рішення підвищують зручність експлуатації, надійність і безпеку роботи газотурбінної установки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи було досліджено та розроблено автоматизовану систему керування газотурбінним двигуном з урахуванням сучасних вимог до надійності, ефективності та безпеки експлуатації. У процесі аналізу технологічної частини розглянуто конструкцію, принцип роботи та сфери застосування газотурбінних двигунів, що дозволило обґрунтувати доцільність використання автоматизованих систем керування для даного типу об'єктів.

Було визначено контрольні точки та розроблено структуру автоматизованої системи керування технологічним процесом, що забезпечує комплексний контроль і регулювання основних параметрів роботи двигуна. На основі цього створено функціональну схему автоматизації та здійснено обґрунтований вибір вимірювального, керуючого й виконавчого обладнання, сумісного з умовами експлуатації газотурбінної установки.

У роботі виконано синтез системи автоматичного регулювання, побудовано математичну модель об'єкта керування та проаналізовано його динамічні властивості. За допомогою типового регулятора, налаштованого методом Циглера–Нікольса, досягнуто необхідних показників якості регулювання. Також розроблено програму керування в середовищі TIA Portal і систему візуалізації на панелі оператора, що забезпечує зручний моніторинг та оперативне керування роботою газотурбінного двигуна.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих технічних і програмних рішень та можливість їх практичного застосування. Розроблена система автоматизованого керування сприяє підвищенню стабільності роботи газотурбінного двигуна, зниженню впливу людського фактору та покращенню загальної надійності й економічності установки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кулик М.С., Гвоздецький І.І., Ясиніцький Е.П.. підручник «Системи автоматичного керування газотурбінних двигунів і газотурбінних установок». Київ, НАУ, 2017-364 с.
2. Момот В.Ю. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів. Навчальний посібник. Вінниця: ВДТУ, 1998. 129 с.
3. Берман Р. Я. Сучасні цехові системи автоматизації газокompресорної станції/Р. Я. Берман, Р. Л. Вишнепольський, С. В. Кабан, В. С. Тимофєєв//Світ комп'ютерної автоматизації. – 2017. – № 3. – С. 93-96.
4. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. К.: Либідь, 1997. 544 с.
5. Єлісеєв В. В. Комплекс МСКУ М на об'єктах газової промисловості/В. В. Єлісеєв, В. А. Ларгін, Г. Ю. Пивоваров, В. І. Ященко//Промислові АСУ та контролери. – 2019. – № 9. – С. 63-65. 4. Захаров Н. А. Система управління мнемощитом компресорної станції/Н. А. Захаров//Промислові АСУ та контролером. – 2019. – № 10. С. 23-26.
6. Івченко В. Д. Побудова відмовостійких систем автоматичного управління газотурбінними двигунами/В. Д. Івченко, А. І. Самарін//Прилади і системи управління. – 2018. – № 11. – С. 66-68.
7. Надшвидкий контролер Siemens SIMATIC S7-1500. Режим доступу: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/systemy-avtomatyzatsiyi/systemy-promyslovoyi-avtomatyzatsiyi-simatic/plc-kontrolery-simatic/simatic-s7-1500.html>.
8. Ніконенко, І. С. Агрегатно-цеховий комплекс управління газокompресорних цехом/І. С. Ніконенко, М.А. Балавін, В.Л. Швабський//Прилади і системи управління. – 2018. – № 10. – С. 15-19.
9. Сєдих З. С. Експлуатація ГПС з газотурбінними приводами/З. С. Сєдих К.: Надра 2020. – 201 с.

10. Продовіков С. Н. Досвід автоматизації складних промислових об'єктів на прикладі газокompресорних станцій/С. М. Продовіков, А. А. Макаров, В. А. Бунін, А. Л. Черніков//Сучасні технології автоматизації. – 2017. – № 2. – С. 66-68.
- 13.Ревзін Б. С. Газотурбінні установки з нагнітачами для транспорту газу / Б.С. Ревзін, І.Д. Ларіонов. – К.: Надра, 1983. – 200 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

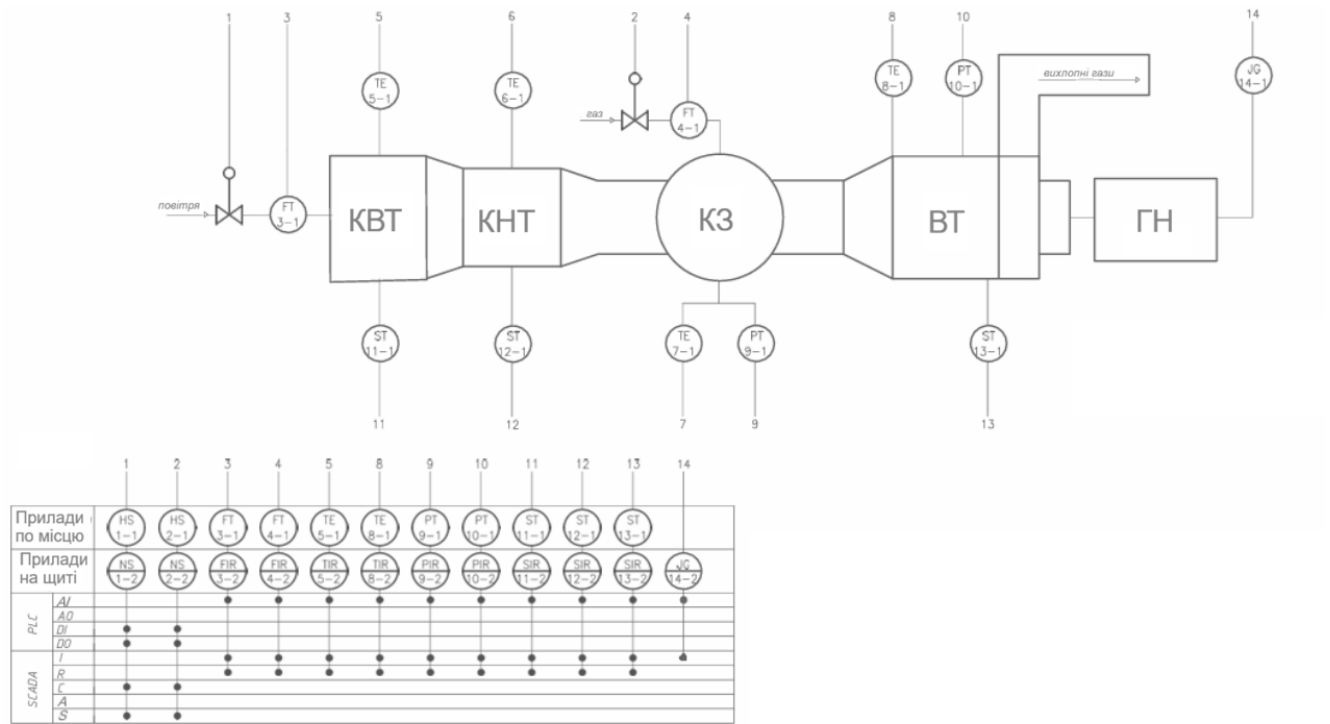


Рисунок 1 – Функціональна схема автоматизації