

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри КСУ

_____ Петро ЛЕОНТЬЄВ

_____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності

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

освітньо-професійної програми

«Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»

на тему: «Енергоефективна система керування прототипом турбодетандерної

установки потужністю до 50 кВт»

Здобувача групи СУ.м-31

Бугаєц Павло Ігорович

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

Павло БУГАЄЦ

_____ (підпис)

Керівник Завідувач кафедри КСУ, Петро ЛЕОНТЬЄВ

(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

_____ (підпис)

Консультант _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

_____ (підпис)

Суми – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КСУ

_____ Петро ЛЕОНТЬЄВ
_____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра здобувачу вищої освіти

Бугаєц Павло Ігорович

(Прізвище, ім'я, по-батькові повністю)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Енергоефективна система керування прототипом турбодетандерної установки потужністю до 50 кВт»
затверджена наказом ректора СумДУ № № 1090 - VI від " 24 " жовтня 2024 р.
2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 30 листопада 2024 р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
звіт з переддипломної практики, наукові публікації, перелік літературних джерел.
4. Зміст кваліфікаційної роботи (питання, що підлягають розробленню):
принцип роботи та протікання технологічного процесу, опис контурів керування ТДА, мат. модель ОК, синтез регуляторів.
5. Перелік графічних матеріалів:
23 рисунка.

6. Календарний план виконання роботи

Номер етапу	Зміст етапу виконання роботи	Термін виконання
1	Аналіз завдання. Огляд літератури.	22.10.2024 – 27.10.2024
2	Описати принцип роботи та протікання технологічного процесу.	28.10.2024 – 03.11.2024
3	Описати окремі канали та контури керування.	04.11.2024 – 10.11.2024
4	Розробити модель системи керування	11.11.2024 – 17.11.2024
5	Синтез регуляторів	18.11.2024 – 24.11.2024
6	Оформлення дипломного проекту та супровідної документації.	25.11.2024 – 30.11.2024

7. Дата видачі завдання " 22 " жовтня 2024 р.

Керівник проекту:

Завідувач кафедри КСУ
(науковий ступінь, вчене звання, посада)

_____ (підпис)

Петро ЛЕОНТЬЄВ
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Здобувач:

студент гр. СУ.м-31
(шифр групи)

_____ (підпис)

Павло БУГАЄЦ
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Бугаєц Павло Ігорович. Енергоефективна система керування прототипом турбодетандерної установки потужністю до 50 кВт. Дипломна робота. Сумський державний університет; магістратура. Суми, 2024 р.

Робота містить: 54 сторінок, 23 рисунків. При виконанні роботи було використано 16 літературних джерел.

У першому розділі розглядаються принципи утилізації надлишкового тиску природного газу, аналіз існуючих систем та задачі керування. У другому розділі викладено математичну модель системи керування, її уточнення та перевірку на адекватність за допомогою експериментального стенду, присвячено час вибору типу генератора. Проведено аналіз варіантів використання синхронного генератора (СГ) та синхронного генератора з постійними магнітами (СГПМ) у системі. У третьому розділі розповідається про синтез регулятора базуючись на математичних моделях та перевірці обраного регулятора на експериментальному стенді. Четвертий розділ показує, розроблену SCADA-систему та спосіб зв'язку з нею.

Завдяки створеному регулятору було досягнуто зменшення коливань обертів турбіни та підвищено рівень стабілізації роботи агрегату.

Ключові слова: турбогенератор, турбодетандер, енергоефективність, регулятор, SCADA-система, стабільність генерації.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТУРБОДЕТАНДЕРНИХ СИСТЕМ	10
1.1 Загальна характеристика турбодетандерних систем	10
1.2 Огляд існуючих систем	12
1.3 Розгляд енергоефективності турбодетандерних систем	14
1.4 Задачі керування системою.....	17
2 ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОТОТИПА ТУРБОДЕТАНДЕРНОЇ СИСТЕМИ	21
2.1 Математичний опис.....	22
2.2 Уточнення математичної моделі	24
2.3 Оцінка адекватності моделі	27
2.4 Оцінка параметрів електричної генерації установки утилізації тиску газу	28
3 СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ТУРБІНИ	37
3.1 Постановка задачі синтезу регулятора	37
3.2 Синтез регулятора швидкості обертання турбіни	38
3.3 Експериментальна перевірка регулятора	40
3.4 Проблеми при синтезі регулятора	45
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ТА РОЗРОБКА SCADA-СИСТЕМИ	47
4.1 Інформаційно-вимірювальна система стенду	48
4.2 Зв'язок зі SCADA-системою.....	50
ВИСНОВКИ	51

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

МК – Мікроконтролер

ТГА – турбогенераторний агрегат

АСУ – автоматизована система управління

ГРП – газорозподільний пункт

ГРС – газорозподільна станція

СГ – синхронний генератор

СГПМ – синхронний генератор з постійними магнітами

ОК – об'єкт керування

РР – релейний регулятор

ТДА – турбодетандерний агрегат

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

Газова промисловість є однією з ключових галузей енергетичного комплексу, яка задовольняє значну частину енергетичних потреб країни. Утилізація надлишкового тиску в процесах транспортування та розподілу природного газу є важливим завданням для підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів. Традиційні системи, що використовують дросельні пристрої, спричиняють втрати енергії, яка могла б бути спрямована на корисну роботу [1].

Сучасні технології дозволяють ефективно використовувати енергію надлишкового тиску шляхом її перетворення на електроенергію за допомогою турбогенераторних агрегатів (ТГА). Основний принцип роботи таких систем полягає у тому, що природний газ, проходячи через турбіну, виконує механічну роботу, яка забезпечує одночасне зниження тиску та генерацію електричної енергії.

Для забезпечення максимальної енергоефективності подібних систем необхідно правильно обрати критерій регулювання, який дозволяє підтримувати стабільний рівень генерації електроенергії. Одним із таких критеріїв є швидкість реакції на зміну навантаження системи. Для компенсації навантаження, що уповільнює обертання турбіни автоматизована система управління (АСУ) збільшує ступінь відкриття дросельної засувки, підтримуючи стабільну генерацію електроенергії.

Вибір і реалізація такого критерію є важливим етапом у розробці системи управління, оскільки він забезпечує:

- стабільність виробництва електроенергії;
- адаптацію до змін навантаження в реальному часі;
- зменшення втрат енергії;
- оптимізацію роботи системи при різних режимах.

Подібний підхід до управління не лише підвищує ефективність утилізації енергії надлишкового тиску, але й сприяє розвитку малої розподіленої енергетики (МРЕ), яка здатна забезпечити локальні потреби в електроенергії з високою надійністю та низькими витратами. Розробка таких систем є актуальною для країн з централізованими енергетичними мережами, що характеризуються високими втратами енергії.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТУРБОДЕТАНДЕРНИХ СИСТЕМ

1.1 Загальна характеристика турбодетандерних систем

Щодня по всьому світу через трубопроводи транспортуються величезні обсяги природного газу від місць видобутку до споживачів. Компресори високої потужності, здебільшого оснащені газотурбінними двигунами, застосовуються для стиснення газу з метою його транспортування. Подібне обладнання використовується на численних компресорних станціях уздовж газопроводу, щоб компенсувати втрати тиску, спричинені тертям, і забезпечувати необхідний рівень тиску на всій довжині газопроводу.

У процесі транспортування газу через магістральні трубопроводи необхідно знижувати його тиск перед подачею до споживачів. Традиційно це робиться за допомогою дросельних пристроїв, які не дозволяють утилізувати енергію потоку. Турбодетандери вирішують це завдання, забезпечуючи ефективне зниження тиску газу з одночасним отриманням механічної енергії.

Турбодетандер — це енергетична установка, яка перетворює енергію надлишкового тиску та температури газу на механічну енергію обертання турбіни.

Основною складовою турбодетандера є турбіна, в якій відбувається адіабатне розширення газу. Цей процес супроводжується виконанням механічної роботи, зниженням температури та тиску газу, що забезпечує корисне використання потенційної енергії потоку.

Механічна енергія, що виникає при роботі турбіни, використовується для приводу генератора. Цей генератор виробляє електроенергію, яка може використовуватися локально або подаватися в електромережу. Наприклад, такі системи широко застосовуються на газорозподільчих станціях (ГРС), забезпечуючи додаткову електроенергію для технологічних потреб, що є важливим елементом систем малої розподіленої енергетики (МРЕ), дозволяючи створювати автономні генератори

електроенергії для віддалених об'єктів, де централізоване енергопостачання є складним або економічно недоцільним.

Турбодетандерні системи класифікуються за кількома основними критеріями, що дозволяє визначити їх сферу застосування, потужність і рівень автоматизації.

Перший критерій – це тип застосування. Турбодетандери можуть використовуватися для газопроводів або автономної генерації електроенергії.

- У системах газопостачання вони слугують для зниження тиску природного газу на магістральних газопроводах чи газорозподільних станціях (ГРС).
- У випадках автономної генерації електроенергії турбодетандери використовуються для живлення віддалених промислових об'єктів або транспортних вузлів, де є доступ до природного газу, але відсутнє централізоване електропостачання. Це можуть бути бурові платформи чи малі населені пункти.

Другий критерій класифікації – потужність, яка визначає масштаби застосування турбодетандерної системи.

- Системи малої потужності (до 50 кВт)
- Турбодетандери середньої потужності (50–500 кВт)
- Системи великої потужності (понад 500 кВт)

Третій критерій – рівень автоматизації.

- Турбодетандери з ручним керуванням є найпростішими у конструкції, але вимагають постійної участі оператора для запуску, регулювання параметрів та зупинки системи. Це створює ризик помилок через людський фактор і обмежує ефективність таких установок.
- Напівавтоматичні системи дозволяють часткову автоматизацію, як-от регулювання потоку чи аварійне вимкнення, але все одно потребують періодичного втручання оператора.

1.2 Огляд існуючих систем

Враховуючи тематику даної роботи, є необхідність розглянути існуючі системи.

Cryostar Mini-Turboexpander ECO-50 (рис. 1.1) — це енергетична установка, призначена для перетворення надлишкового тиску газу на електроенергію. Вона є компактним рішенням для об'єктів із помірними витратами газу, що потребують підвищення енергоефективності. Ця установка розроблена для заміни традиційного дроселювання газу, яке не використовує потенційну енергію тиску.

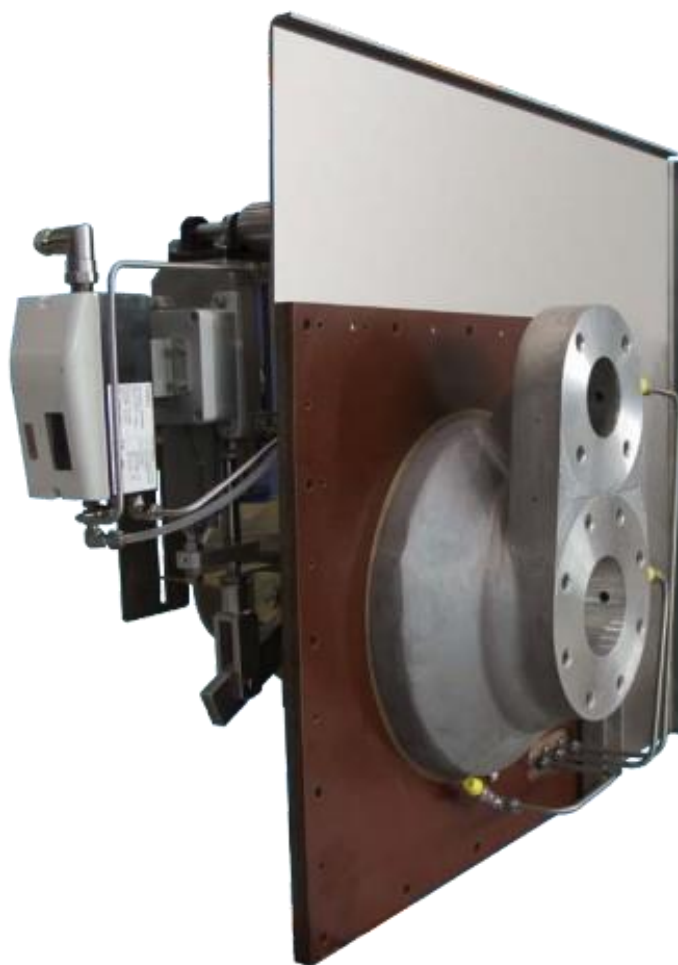


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд установки ECO-50

Установка працює за принципом розширення газу в турбодетандерному модулі. Газ із високим тиском проходить через теплообмінники, де підігрівається для уникнення проблем із замерзанням. Потім він потрапляє в турбодетандер, де

відбувається перетворення енергії тиску в механічну енергію. Ця енергія приводить у дію електрогенератор, який виробляє електроенергію. Газ із зниженим тиском і температурою на виході може використовуватися для подальших процесів або подаватися до споживачів.

Установка забезпечує до 50 кВт електроенергії за умови роботи з газом при тиску до 16 бар на вході та 6–8 бар на виході. Вона підтримує роботу з природним газом і іншими технічними газами, має широкий температурний діапазон і передбачає автоматизоване управління для стабільності роботи. Завдяки модульній конструкції, її легко інтегрувати в існуючі системи без значних модифікацій.

Cryostar ECO-50 є ідеальним рішенням для малих і середніх об'єктів, таких як газорозподільні станції або промислові підприємства. Використання цієї установки дозволяє знизити витрати на енергоспоживання, підвищити ефективність газотранспортної системи та зменшити вплив на навколишнє середовище.

Принцип роботи установки можна уявити наступним чином (рис. 1.3): газ із високим тиском спочатку підігрівається в теплообмінниках, потім потрапляє в турбогенераторний модуль, де розширюється до зниженого тиску. Енергія, що звільняється під час розширення, використовується для обертання електрогенератора. У результаті отримується стабільна електроенергія для внутрішніх потреб об'єкта або для постачання в електромережу.

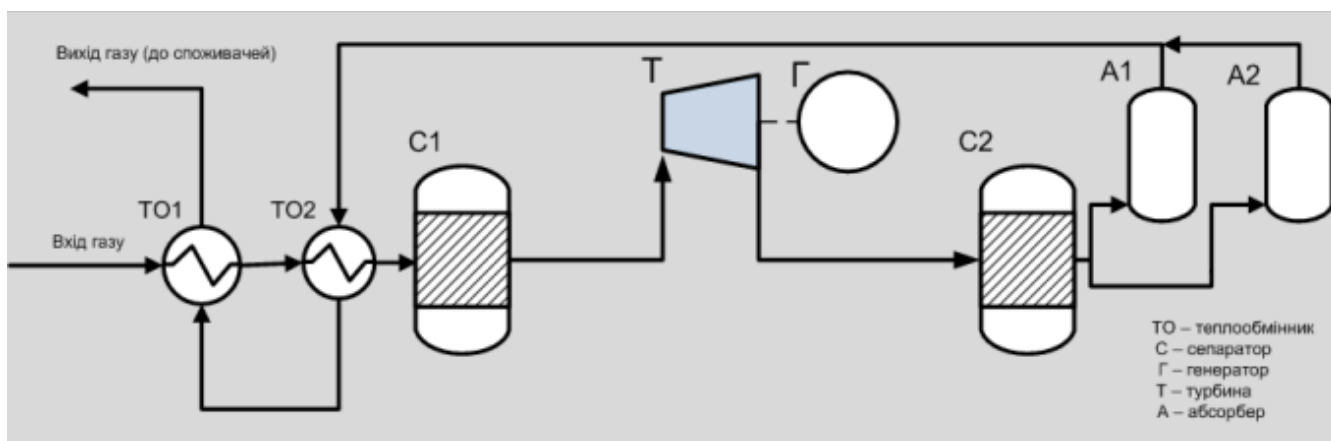


Рисунок 1.2 – Принципова схема установки

Ця установка демонструє приклад сучасного енергетичного рішення, яке оптимізує використання наявних ресурсів і забезпечує економічну вигоду для підприємств, що працюють із природним газом.

1.3 Розгляд енергоефективності турбодетандерних систем

1.3.1 Поняття енергоефективності в турбодетандерах

Енергоефективність турбодетандерів значною мірою залежить від здатності системи підтримувати стабільність обертів турбіни, що є основоположним фактором для надійного та ефективного вироблення електроенергії, для забезпечення цього турбіна повинна працювати зі сталою швидкістю обертання, адже від цього залежить частота та напруга виробленого струму.

Стабільність обертів турбіни також впливає на механічний стан системи. Рівномірна робота зменшує знос механічних компонентів, таких як лопатки, підшипники та вал, а також знижує ймовірність аварійних ситуацій. Окрім цього, стабільність забезпечує оптимальне використання енергії газу, зменшуючи втрати, що можуть виникати через нерівномірність роботи.

Процес вироблення електроенергії в турбодетандерах базується на перетворенні потенційної енергії тиску газу на механічну енергію обертання, яка потім перетворюється на електричну енергію. Ефективність цього процесу залежить від низьких теплових та механічних втрат, правильного підбору робочих параметрів турбіни та генератора, а також від якості системи керування. Нестабільні оберти турбіни можуть призводити до коливань напруги та частоти електричного струму, знижуючи якість і корисність виробленої енергії.

Для досягнення максимальної енергоефективності сучасні турбодетандери оснащуються інтелектуальними системами керування, які забезпечують адаптацію до змінних умов роботи. Це дозволяє підтримувати оптимальну швидкість обертання та зменшувати втрати. Окрім того, інтеграція систем із високоефективними генераторами дозволяє збільшити ККД вироблення

електроенергії, а використання якісних матеріалів і вдосконаленої конструкції турбіни сприяє зниженню механічних втрат.

1.3.2 Фактори, що впливають на енергоефективність

Конструкція турбіни

Конструктивні характеристики турбіни мають вирішальне значення для ефективного перетворення енергії газу. Турбіна повинна забезпечувати максимально ефективно захоплення кінетичної енергетичного потоку газу з мінімальними втратами. Основні аспекти конструкції, що впливають на енергоефективність:

Зносостійкість. Лопатки турбіни, які піддаються постійному впливу газового потоку, повинні бути виготовлені з матеріалів, стійких до зношування та корозії. Це забезпечує тривалу роботу системи без зниження її ефективності.

Аеродинаміка лопаток. Правильна форма лопаток мінімізує турбулентність і втрати енергії, що дозволяє збільшити коефіцієнт корисної дії (ККД).

Стабільність потоку газу

Стабільність параметрів потоку газу, таких як тиск і температура, є фактором для досягнення високої енергоефективності. Нестабільний потік може спричинити нерівномірність роботи турбіни, що впливає на вироблення електроенергії.

Тиск. Високий і стабільний тиск газу на вході забезпечує більший обсяг доступної енергії для перетворення. Коливання тиску може привести до зниження обертів турбіни і, відповідно, до втрати енергії.

Температура. Газ із низькою температурою може спричинити замерзання деталей турбіни, що знижує її ефективність або навіть навіть аварійну зупинку. Нагрівання газу перед подачею до турбіни дозволяє уникнути цих проблем.

Забезпечення стабільності параметрів потоку є необхідною умовою для рівномірної та ефективно роботи турбіни і генератора.

Налаштування системи управління

Система управління турбодетандером виконує ключову роль у досягненні енергоефективності. Вона відповідає системі моніторингу та регулювання параметрів, забезпечуючи її адаптацію до змінених умов. Основні аспекти:

Адаптація до змінних умов. Сучасні системи управління вибирають інтелектуальні алгоритми (наприклад, ПД-регулятори або системи на основі штучного інтелекту), які дозволяють оперативно реагувати на зміни тиску, температури чи обсягів газу.

Оптимізація обертів турбіни. Регулювання швидкості обертання турбіни забезпечує стабільність роботи генератора, що критично важливо для підтримки сталої частоти та напруги електроенергії.

Енергоефективний режим роботи. Автоматизація дозволяє вибирати оптимальні режими роботи для мінімізації теплових і механічних витрат.

1.3.3 Підтримування обертів турбіни як інструмент досягнення енергоефективності системи

Наш обраний критерій енергоефективності — це **вироблення електроенергії**, яке залежить від здатності системи ефективно перетворювати енергію надлишкового тиску газу на електричну енергію. У цьому контексті підтримування стабільних обертів турбіни є основним інструментом для досягнення енергоефективності.

З огляду на спеціальність, за якою я навчаюся, було обрано налаштування системи управління як ключовий шлях для підвищення ефективності вироблення електроенергії. Система управління виконує критичну функцію в забезпеченні стабільності роботи турбіни, регулюючи її оберти відповідно до змінних умов потоку газу та навантаження на генератор. Цей підхід дозволяє мінімізувати втрати енергії та підтримувати генерацію електроенергії на оптимальному рівні.

Стабільність генерації електроенергії

Підтримання стабільних обертів турбіни забезпечує рівномірну генерацію електроенергії. Це досягається завдяки тому, що оберти турбіни безпосередньо

впливають на потужність генератора та стабільність частоти електричного струму. При зміні навантаження або параметрів потоку система управління має регулювати ступінь відкриття дросельної засувки, компенсуючи втрати та забезпечуючи сталу швидкість обертання турбіни. Такий підхід дозволяє уникнути коливань параметрів генерації, що є важливим для забезпечення якості електроенергії.

Оптимальне регулювання потоку газу

Для досягнення максимальної ефективності вироблення електроенергії важливо правильно налаштувати потік газу через турбіну. Алгоритми керування повинні забезпечувати автоматичне збільшення відкриття дросельної засувки при зменшенні обертів турбіни та її закриття при їхньому зростанні. Плавне регулювання потоку мінімізує втрати потужності та знижує зношення механічних компонентів системи.

Динамічність реакції системи

Оперативна реакція системи управління на зміни в умовах роботи є важливим фактором для підтримання стабільності обертів турбіни. Враховуючи інерційність турбіни, система повинна реагувати на зміну навантаження чи параметрів потоку газу без надмірних переналаштувань, які можуть призвести до коливань обертів. Інтелектуальні алгоритми керування дозволяють адаптувати систему до зовнішніх змін і забезпечити безперервну та стабільну генерацію електроенергії.

1.4 Задачі керування системою

За розробленою в бакалаврській роботі функціональною схемою автоматизації (ФСА)[1] (див. Додаток А) визначимо контури регулювання та задачі керування .

- Стабілізація напруги на виході генератора;
- Підтримання стабільних обертів турбіни;
- Створення SCADA-системи для відображення і контролю процесів в системі.

На рис. 1.3 зображений контур регулювання швидкості. Який складається з регулятора швидкості ($W_{pш}(p)$), нелінійний блок затримки ($M_{зт}$), що імітує інерційну поведінку експериментальної установки (пов'язаних з довжиною трубопроводу і т.д.), об'єкту керування ($W_T(p)$), давача швидкості (ДШ). Зовнішні збурення для гальмування турбіни позначені, як M_T [1].

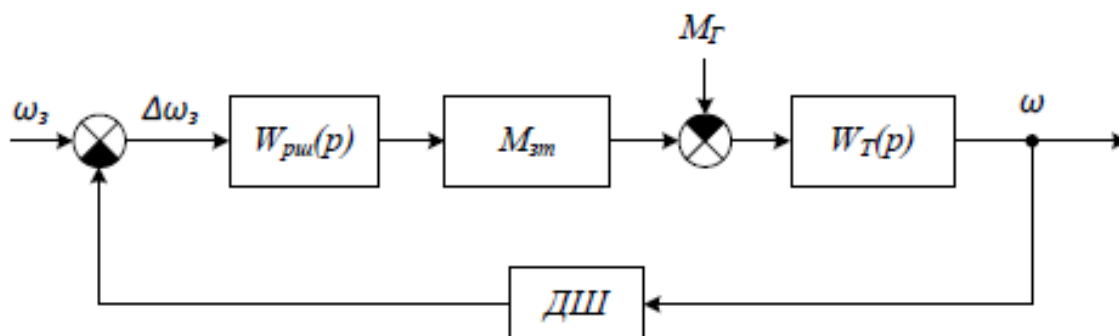


Рисунок 1.3 – Контур регулювання швидкості обертання валу турбіни

Для підвищення якості регулювання додаємо другий контур регулювання за струмом (рис. 1.4). Що відобразиться на схемі у вигляді додаткових блоків: давача струму (ДС) та регулятора струму ($W_{рс}(p)$).

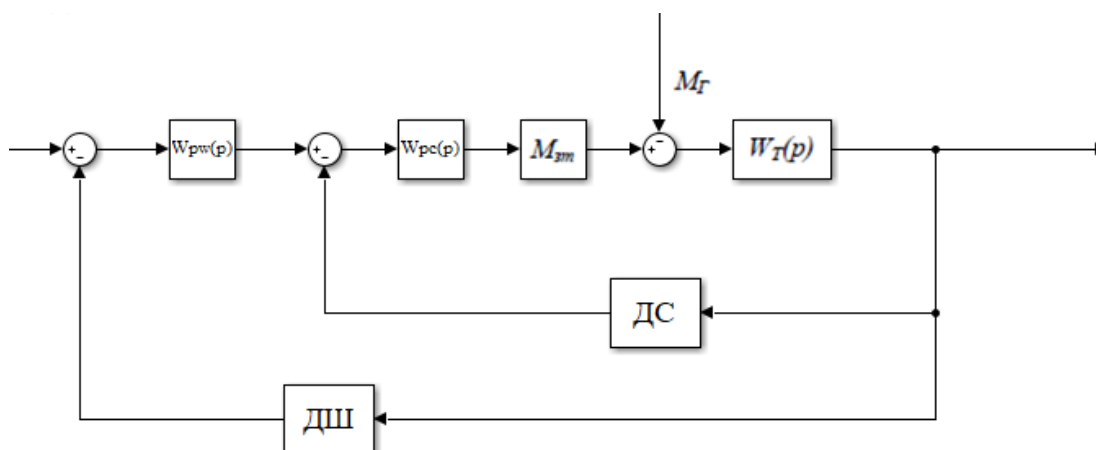


Рисунок 1.4 – Двоконтурна система регулювання швидкості обертання валу турбіни та струму навантаження.

Основні напрямки досліджень з підвищення енергоефективності електростанцій альтернативної енергетики представлені окремими аспектами певних типів електростанцій. Ці аспекти починаються як галузі знань, які формують відомі методи. Це стосується генераторів, турбін і систем управління. Однак більш перспективним є системний підхід до комплексного аналізу об'єкта управління з урахуванням взаємодії складових усього процесу. При розгляді детандер-генераторних установок (ДГУ), які використовують для утилізації надлишкового тиску в газорозподільній мережі, враховуються характеристики вихрової турбіни, що використовуються в якості детандера. Враховано тенденції в будівництві генеруючих установок альтернативної енергетики та проаналізовано варіанти впровадження різних типів генераторів. Фактори вибору типу генератора не обмежуються габаритними та вартісними показниками. Забезпечення якісних характеристик генерації електроенергії є загальним фактором забезпечення ефективності виробництва електроенергії. Засоби управління генеруючою установкою після розробки залежать від підходу та технічних засобів, що використовують.

Наша основна задача – стабілізування напруги на виході генератора, чого ми досягаємо за допомогою дросельної засувки.

Зміна положення дросельної засувки безпосередньо впливає на момент турбіни M_t , та відповідно і на швидкість обертання валу генератора $\omega(t)$. Стабілізація обертів турбіни дозволяє підтримувати сталий момент обертання та зменшувати вплив стрибків навантаження.

І виходить, що ми маємо дві речі що впливають на вихідну напругу генератора: швидкість обертання ротора $\omega(t)$ та магнітне поле ротора. Якщо ми збережемо в якості параметрів керування лише швидкість обертання валу, за допомогою дросельної засувки, то отримаємо ситуацію що стабілізація буде можливою, але буде мати певні обмеження. При великих стрибках навантаження одного керування обертами може бути недостатньо для повної

стабілізації.

Тому доцільним буде зробити окремий контур керування струмом збудження.

2 ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОТОТИПА ТУРБОДЕТАНДЕРНОЇ СИСТЕМИ

Дослідження, присвячені конструктивно-технологічним параметрам турбодетандерних агрегатів (ТГА) та особливостям їх роботи, представлені у значній кількості публікацій. Однак лише частина з них охоплює питання управління цими об'єктами, спрямованого на досягнення максимальної ефективності їх функціонування.

Одна з базових схем утилізаційної установки, показана на рисунку 2.1 а, використовує турбіну, безпосередньо з'єднану з електрогенератором. Регулювання обертів турбіни забезпечується за допомогою дросельної засувки, яка є ключовим елементом системи керування і буде розглядатися як важлива складова моделі об'єкта управління.

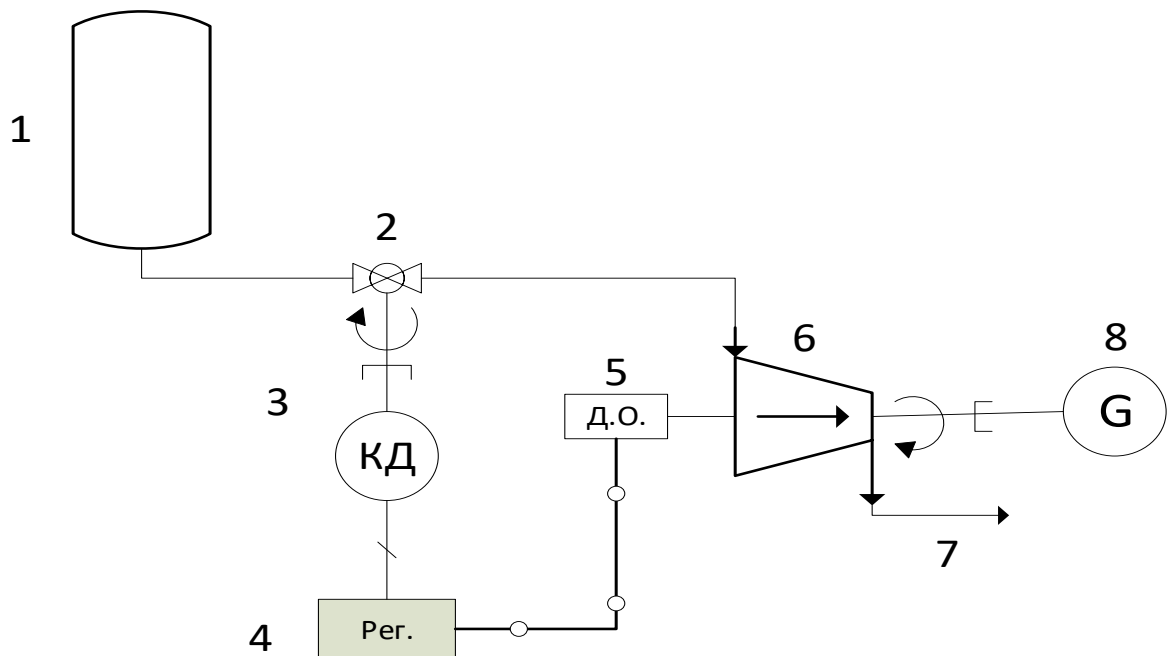


Рисунок 2.1 – Умовна схема турбогенераторного агрегату

Повітря, що надходить з газопроводу 1, проходить через засувку 2, котра має механічне з'єднання штоку з кроковим двигуном (КД) 3, що керується контролером 4. Для регулювання тиску на вході в турбіну 6, ми використовуємо датчик швидкості 5, в якості зворотного зв'язку для керування положенням дросельної засувки. Наявність аналого-цифрового перетворювача (АЦП) в нашому контролері дає нам змогу вимірювати поточне навантаження нашого генератора 8 [1].

2.1 Математичний опис

Відклавши керування струмом збудження для стабілізації вихідної напруги, ми можемо представити наш об'єкт керування (ОК) на рис. 2.2.

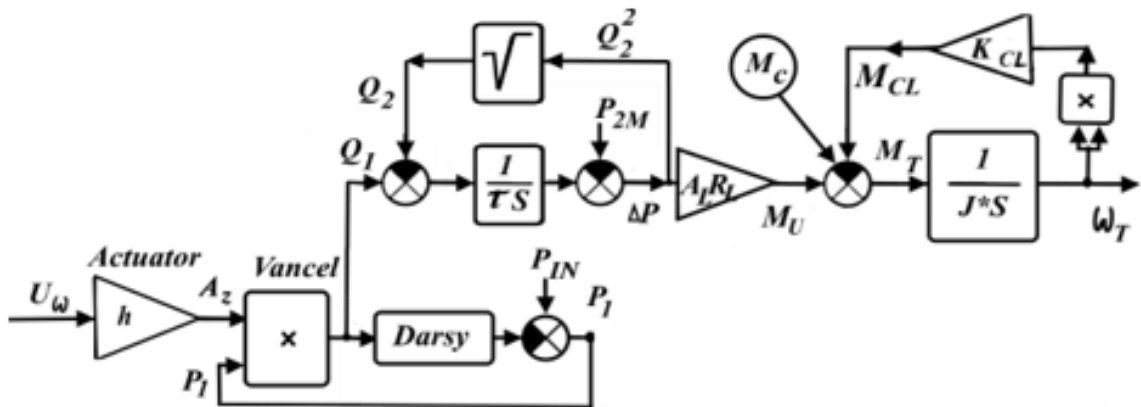


Рисунок 2.2 – Схема моделі об'єкту керування

Схема складається з:

- Блоку **імітації заслонки**, що складається з вхідного керуючого сигналу U_ω , блоку **Actuator** та отриманого перерізу засувки A_z .
- Блоку **опису поведінки повітря під тиском в трубопроводі** перед турбіною, що складається з блоків **Vancel**, що відображає реакцію витрат потоку Q_1 в залежності від перерізу засувки A_z , та тиску перед засувкою та блоку **Darcy**, що описує витрати тиску при поширенні потоку газу по трубопроводу.

- Блоку, що описує інерційність заповнення газу в турбіні та момент який вона передає на лопаті турбіни. Зворотній зв'язок за співвідношенням Q_1 та Q_2 потрібен для відповідності реакції моделі, на нульову різницю витрат між вхідною та вихідною. Постійна часу τ_T – впливає на динаміку зміни тиску в турбіні.
- Блоку, що описує інерційність турбіни, реакцію турбіни момент опору навантаження M_C , моменту, що залежить від впливу газу на лопаті турбіни M_U та моменту, що залежить від аеродинамічного опору, що виникає при обертанні турбіни. На виході з цього блоку ми отримуємо кутову швидкість обертання турбіни ω_T .

Під впливом керуючого сигналу $U\omega$ відбувається зміна положення штока h , що призводить до зміни перерізу засувки A_z . В результаті цього змінюється тиск перед засувкою P_1 та витрата газового потоку Q_1

Особливості моделі:

- Динаміку зміни площі дроселя A_z визначає час, необхідний для переміщення запірного елемента від однієї крайньої точки діапазону до іншої.
- Для моделювання приводу засувки застосовується інтегруюча ланка з обмеженнями, що відповідають діапазону переміщення штока.
- У моделі також враховуються параметри, які впливають на точність і динаміку роботи приводу: коефіцієнт передачі редуктора, люфт редуктора.

Таким чином, ця модель дозволяє враховувати основні фізичні процеси, що відбуваються під час зміни перерізу засувки та регулювання потоку газу [1].

Для розробленої математичної моделі коефіцієнти підбиралися експериментальним шляхом враховуючи досліди, які були проведені на стенді, що був розглянутий в бакалаврській роботі[1].

2.2 Уточнення математичної моделі

На рисунку 2.3 представлено схему, розроблену в середовищі MATLAB за нашою математичною моделлю

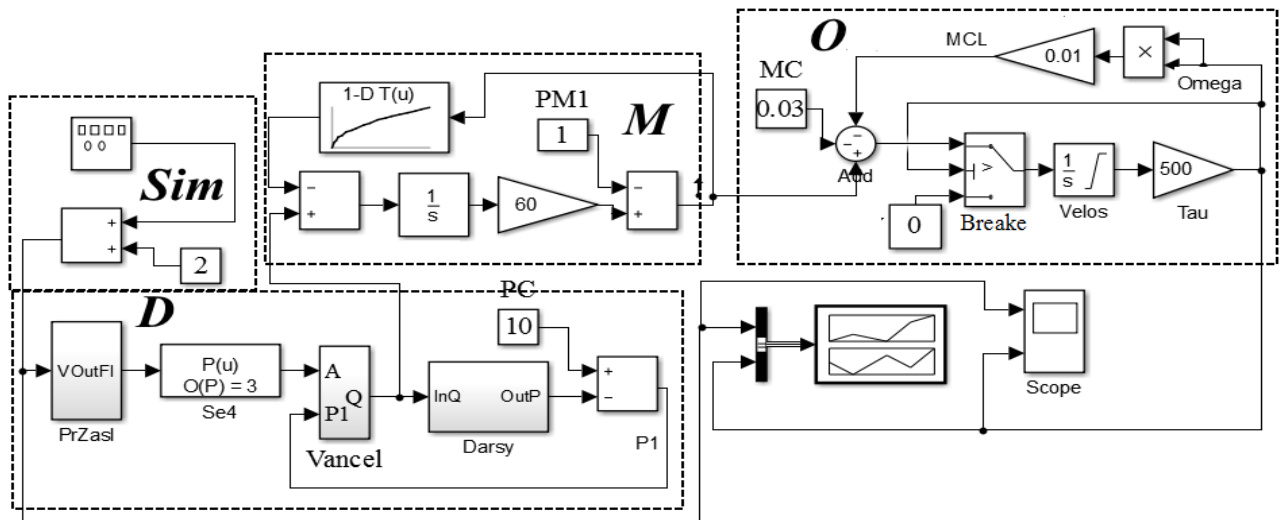


Рисунок 2.3 – Схема моделі установки ТГА у середовищі MATLAB

Розроблену схему ми також можемо розбити на чотири частини, короткий опис яких ви можете побачити на слайді.

- Блок *Sim*, імітує змінну положення засувки в залежності від вхідного сигналу, та збурення газу перед засувкою.
- Блок *M* відображає вплив газу на лопаті турбіни
- Блок *D* імітує поведінку газу в усій системі перед та після турбіни, де враховуються також аеродинамічні збурення.
- Блок *O* відображає значення швидкості турбіни в залежності від впливу газу на неї.

Особливістю моделі досліджуваного об'єкта керування є відмінність процесів, що виконуються під час утилізації енергії надлишкового тиску газу.

Для забезпечення стійкості моделі та регулятора, що використовується для керування установкою, необхідно враховувати, що в системі є різні за характером аеродинамічні та електромеханічні процеси, і в тому числі різні за характером зовнішні збурення.

Функціонування моделі ілюструється осцилограмами зміни положення засувки h і відповідних змін значення швидкості обертання турбіни, які наведені на рис. 2.4.

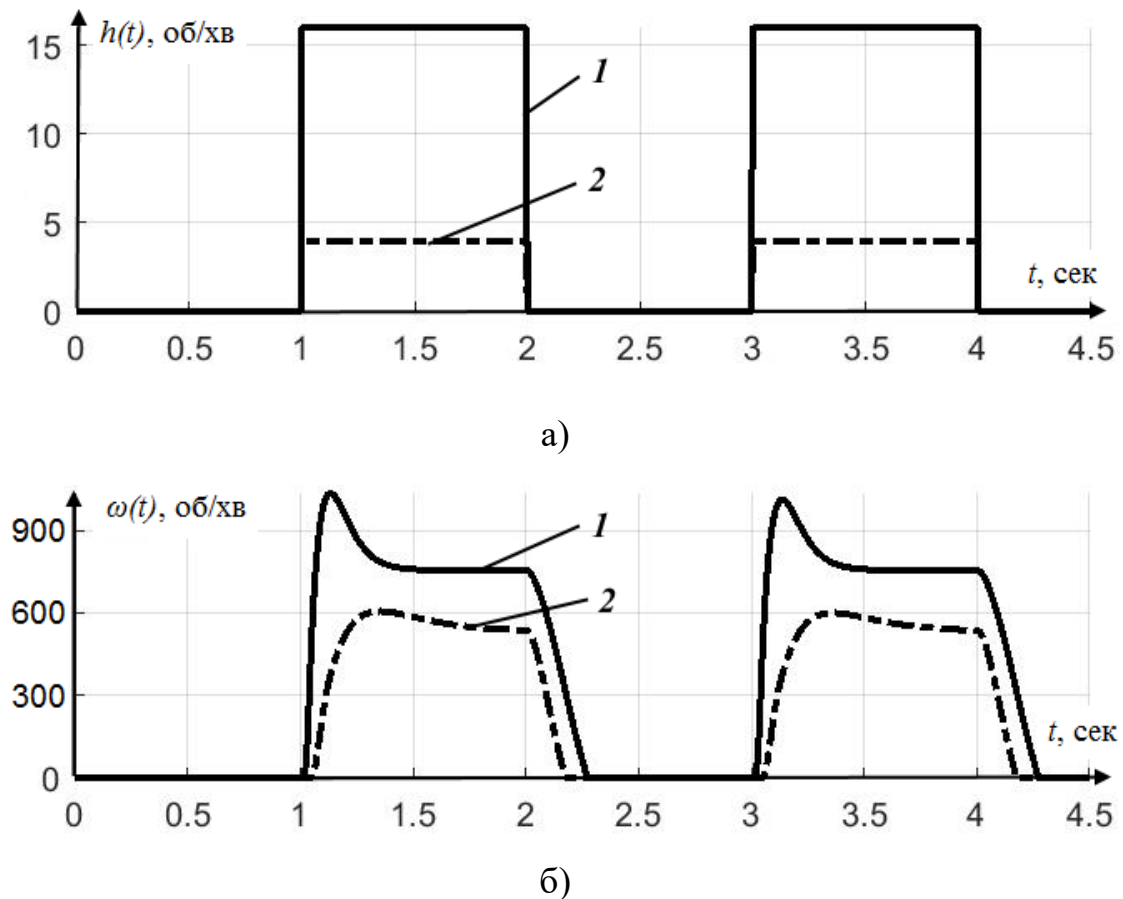


Рисунок 2.4 – Осцилограми зміни положення засувки (а) та зміни швидкості обертання турбіни (б): 1 – $h_{max} = 16$; 2 – $h_{max} = 4$.

З наведених осцилограм видно, що при різних значеннях перерізу дросельної засувки динаміка зміни швидкості на початковому етапі роботи турбіни (під час її розгону) має різний характер, що підтверджує нелінійність досліджуваного об'єкта.

Далі, при побудові моделі, постає завдання лінеаризації об'єкта за допомогою інструменту «**Linear Analysis Points**» у середовищі MATLAB. Оскільки ідентифікація об'єкта керування вимагає отримання його передавальної функції, а швидкість обертання має нелінійну залежність від керуючих впливів, процедура

лінеаризації зводиться до оцінки якобіанів у робочих точках вибраного діапазону значень.

Використовуючи «*Linear Analysis Points*» отримаємо рівняння:

$$W_{Mi}(s) = \frac{b_{1i}s + b_{0i}}{s^3 + a_{2i}s^2 + a_{1i}s + a_{0i}}, \quad (2.1)$$

де i – номер робочої точки; a_i, b_i – коефіцієнти поліномів.

На рис. 2.5 відображені характеристики аналогічні у вигляді діаграм Бode.

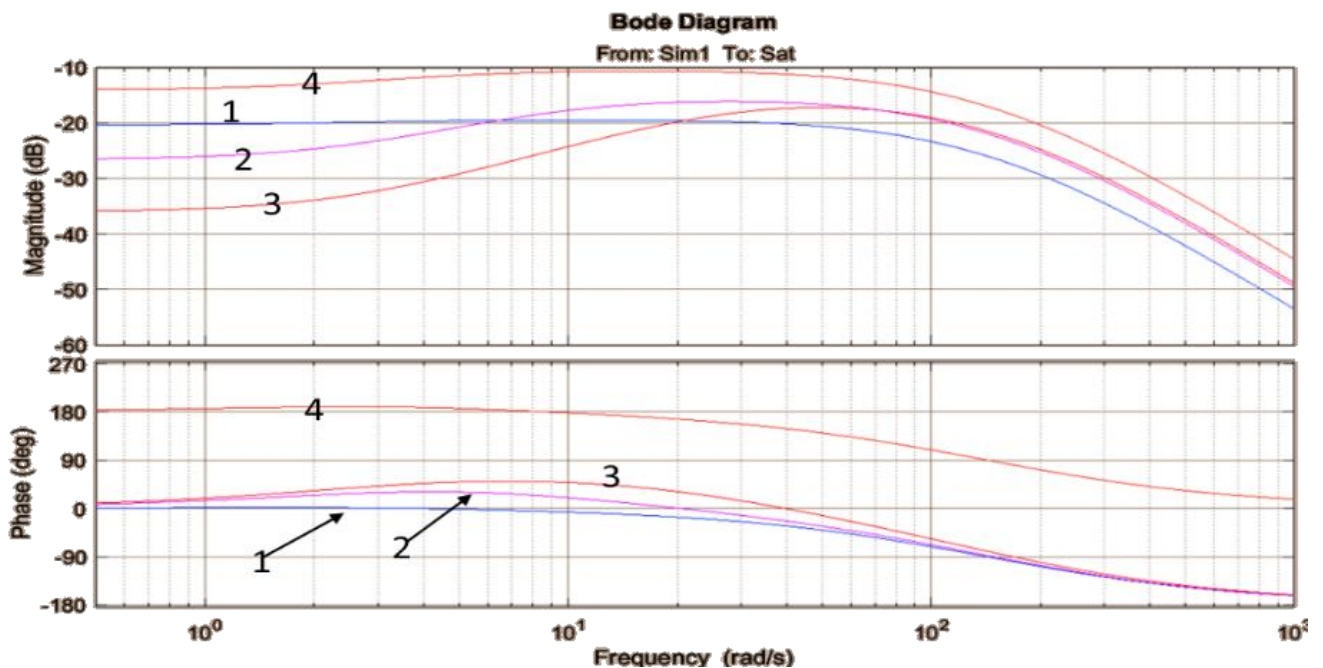


Рисунок 2.5 – Діаграми Бode при різних положеннях засувки:

$$1 - h = 2; 2 - h = 6; 3 - h = 10; 4 - h = 16$$

Зробивши аналогічні дії отримаємо сімейство передатних функцій для блоку **O** (2.2).

$$W_{Oi}(s) = \frac{b_{oi}}{a_{1i}s + a_{0i}} \quad (2.2)$$

Результуюча передатна функція об'єкта управління має вигляд (2.3):

$$WDTi(s) = WMi(s) \cdot MOi(s) \quad (2.3)$$

2.3 Оцінка адекватності моделі

Було зібрано експериментальну установку, що була розглянута в бакалаврській роботі, для зняття перехідного процесу «хід турбіни - частота обертання турбіни» та оцінки достовірності моделі. На рисунку 2.6 показано сімейство перехідних процесів потоку, отриманих для різних перерізів клапана на вході в турбіну. Тиск на вході в клапан під час експерименту становив 4 бар. Час відкриття клапана був вибраний вільно.

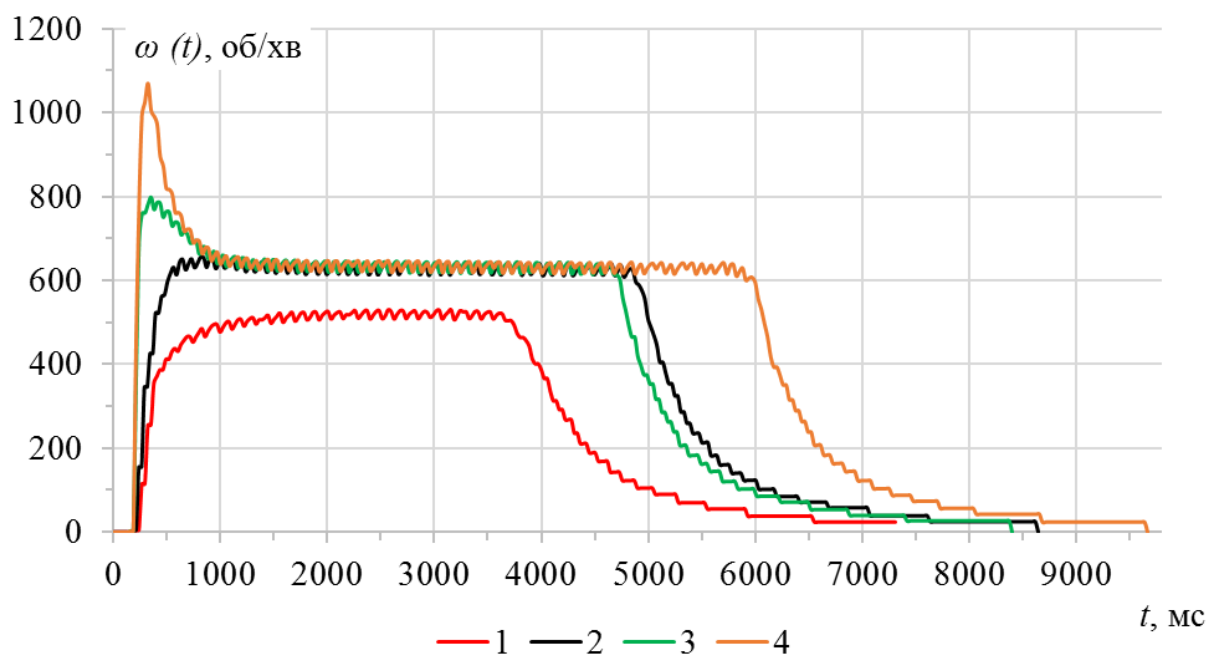


Рисунок 2.6 – Сімейство перехідних характеристик «хід штока - швидкість обертання турбіни» для різних положень дросельної засувки

На рис. 2.6 крива 1 відповідає 25% площі перерізу при повному відкритті клапана, крива 2-50% площі перерізу, крива 3-75% площі перерізу і крива 4-значенню при повному відкритті дросельної заслінки.

Порівнюючи отримані характеристики (рис. 2.6) з аналогічними характеристиками, отриманими в результаті моделювання (рис. 2.4 б), можна стверджувати, що розроблена математична модель достовірно відображає поведінку експериментальної установки відновлення тиску газу. Можливість вдосконалення розробленої моделі визначається можливістю автоматизації вищезгаданої процедури, особливо при використанні цієї моделі для побудови (синтезу) регулятора, який автоматично регулює частоту обертання турбіни.

2.4 Оцінка параметрів електричної генерації установки утилізації тиску газу

Не сумніваюся, що вибір типу генератора в ДГА є ключовим фактором для забезпечення її ефективної роботи. Це пояснюється тим, що, крім основної функції, генератор виконує завдання стабілізації та регулювання параметрів, які впливають на якість виробленої електроенергії.

- **Синхронний генератор на постійних магнітах (СПМ)** знаходить найбільше застосування у відновлюваній енергетиці [5], що обумовлено його простою конструкцією, високим коефіцієнтом корисної дії (ККД) і прийнятними експлуатаційними характеристиками.
- **Асинхронний генератор (АГ)** також характеризується надійністю роботи, простою конструкцією і, особливо, низькою вартістю. Однак ці переваги частково нівелюються через складність забезпечення стабільної вихідної напруги та необхідність компенсації реактивної потужності, яка потрібна для збудження АГ.

У моделюванні генерації ДГА використовується модель вихрової турбіни, яка слугує джерелом механічної енергії. На схемі, поданій на рисунку 2.6, турбіна зображена як блок, вихідний параметр якого визначається моментом турбіни (M_t), а вхідний — перепадом тиску (ΔP), що впливає на її лопаті.[5]

Важливою частиною моделі (рис. 2.7) є блок підсумовування, що показує взаємодію трьох моментів: моменту обертання турбіни, реакції генератора та аеродинамічного опору). В результаті чого отримуємо швидкість обертання агрегату.

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_t - M_G - M_A \quad (2.4)$$

де:

- J — сумарний момент інерції агрегату;
- ω — швидкість обертання агрегату;
- M_t — момент турбіни;
- M_g — момент реакції генератора на електричне навантаження;
- M_a — аеродинамічний момент опору

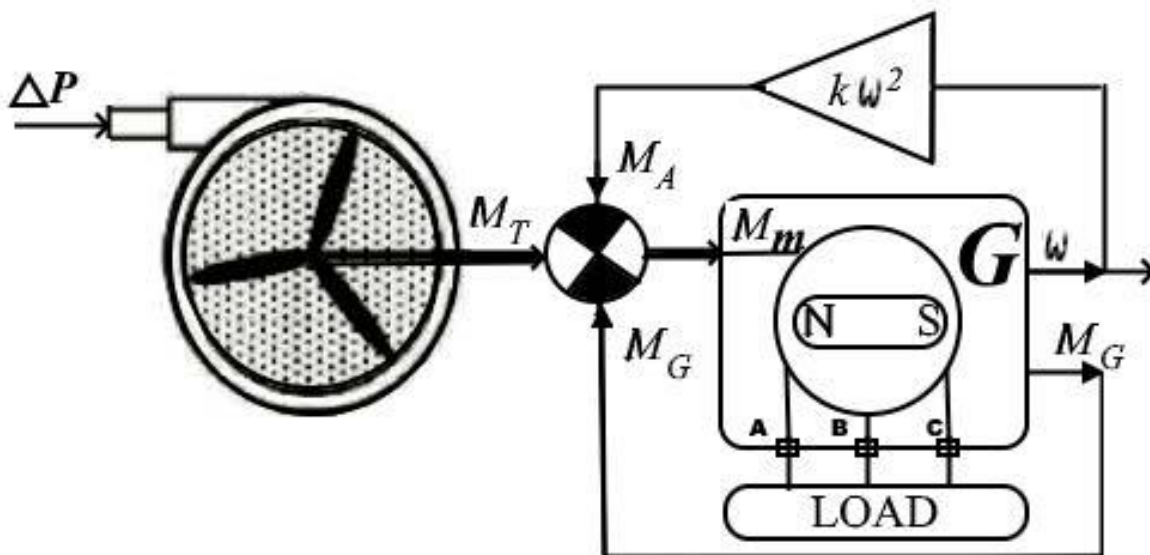


Рисунок 2.7 – Схема моделі ДГА

Ми хочемо отримати дані про вплив електричного навантаження LOAD на процес функціонування генератора G. Це допоре синтезувати регулятор ДГА, для

забезпечення зменшення коливань споживаної енергії. Ці коливання пов'язані зі змінами електричного моменту M_g , які впливають не тільки на параметри генеруючої напруги, але й на режим роботи всієї ДГА. Враховуючи можливість стабілізації моменту турбіни за допомогою регулятора [5], можна припустити, що задіяна ВТ є стабільним джерелом моменту M_t . Таке припущення дозволяє суттєво спростити схему моделі, яку можна зобразити на рис. 2.8. Як видно зі схеми на рис. 2.8, до складу моделі входить СГПМ, до якого підключено симетричне активне навантаження. моделювання СГПМ Підхід ґрунтується на рівняннях динаміки, що описують функціонування СГПМ в координатах.

$$d, q \cdot \frac{di_d}{dt} = \frac{E_N}{x_d} [U_d - r_s i_d + n x_q i_q] \quad (2.5)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{\omega_N}{x_q} [U_q - r_s i_q - (x_d i_d + \Psi_M) n] \quad (2.6)$$

$$M_e = \Psi_M i_q + (x_d - x_q) i_d i_q \quad (2.7)$$

$$\frac{dn}{dt} = [M_e + M_m - F n] \quad (2.8)$$

d-q координати – це система координат, яка використовується для спрощення математичного опису та аналізу електричних машин, зокрема синхронних генераторів і двигунів. Вона дозволяє перейти від трифазної системи напруг і струмів до двох ортогональних осей: d (пряма вісь) та q (квадратурна вісь), які обертаються синхронно з магнітним полем ротора.

Перехід до d-q координат здійснюється за допомогою перетворень Кларка і Парка, що дозволяє значно спростити рівняння, оскільки змінні в d-q координатах стають постійними в усталеному режимі.

Струми генератора i_d та i_q :

- i_d – струм уздовж прямої осі **d**, що відповідає **збуджувальному потоку** ротора.

- i_q – струм уздовж квадратурної осі q , що генерує **електромагнітний момент**.

Напруги генератора U_d та U_q :

- U_d та U_q – компоненти напруги у системі d-q координат, які визначають роботу обмоток статора генератора.

Магнітний потік ротора ψ_M :

- Це постійний магнітний потік, створений магнітами на роторі або струмом збудження у випадку синхронного генератора з обмоткою збудження.

Реактивності статорних обмоток x_d та x_q :

- x_d – реактивність уздовж осі d .
- x_q – реактивність уздовж осі q .

Кутові швидкості:

- ω_N – кутова швидкість обертання електричного поля (синхронна швидкість).
- n – кутова швидкість обертання турбіни.

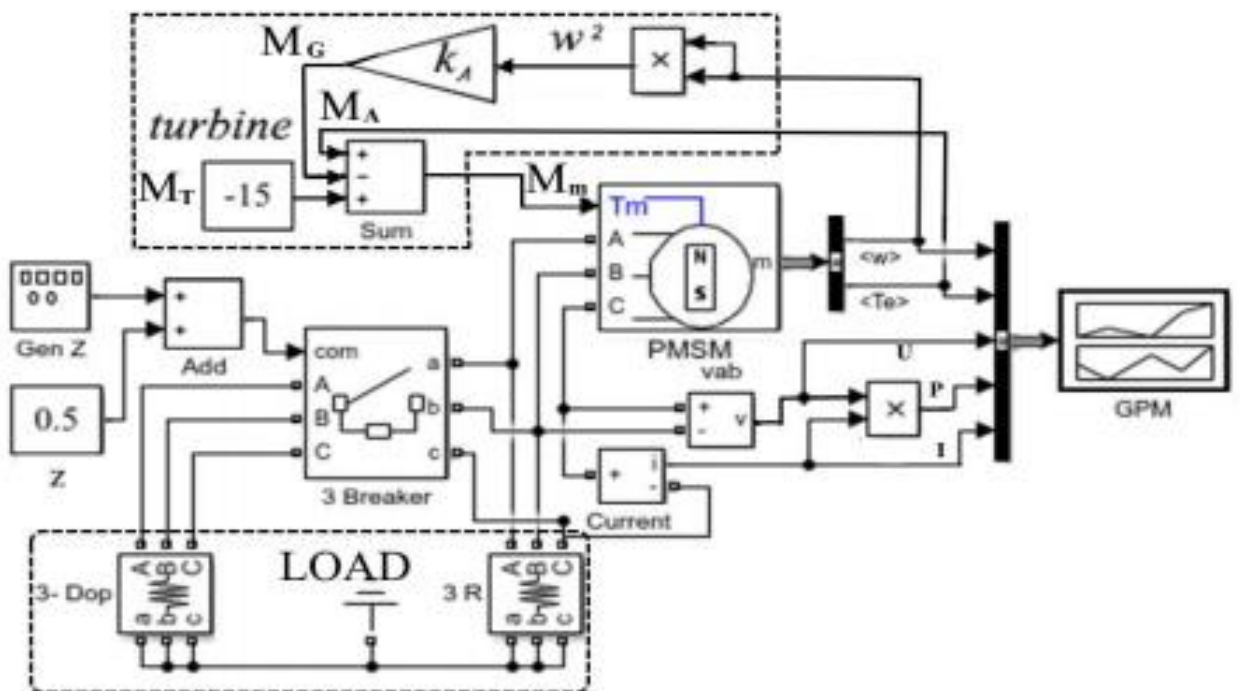


Рисунок 2.8 – Модель ДГА при використанні СГПМ

Імітація збурень навантаження в СГПМ здійснюється шляхом перемикання додаткових резисторів за допомогою генератора комутаційних сигналів GenZ. Оскільки найскладнішим випробуванням системи генерації електроенергії є знеструмлення електричного навантаження, при моделюванні досліджуваних ДГА імітуються швидкі зміни режиму роботи. На рис. 2.9 наведено осцилограми сигналів, що характеризують зміну режиму навантаження ДГА з використанням СГПМ.

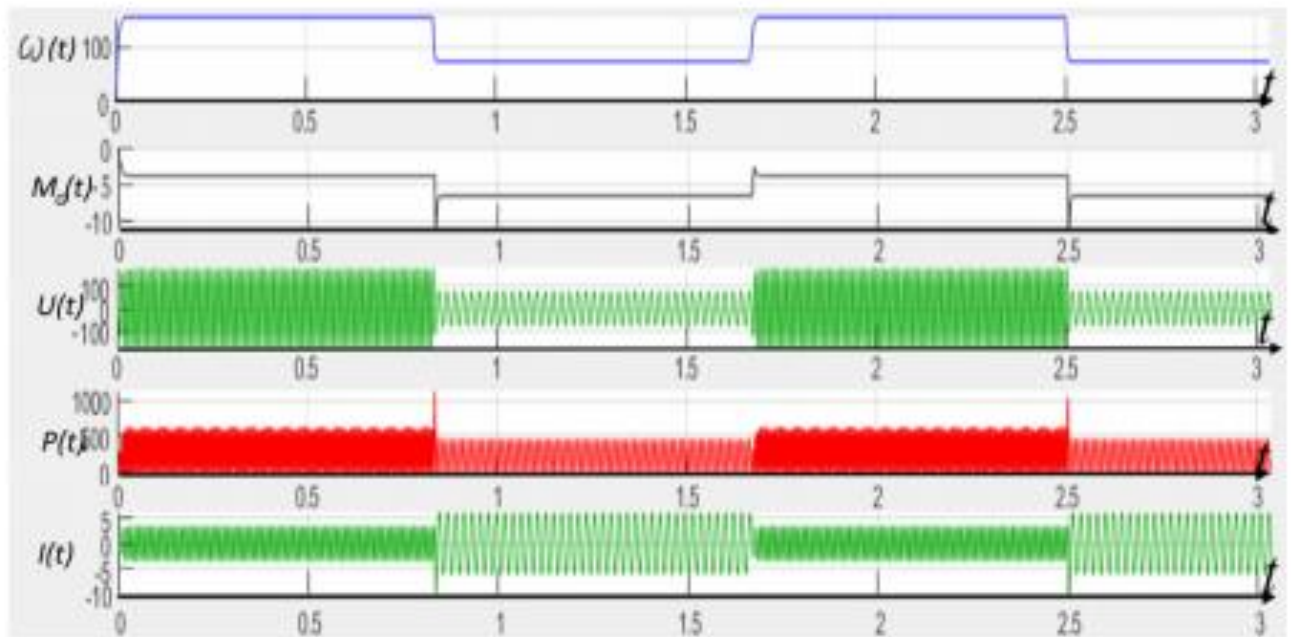


Рисунок 2.9 – Осцилограми сигналів, що характеризують зміни режимів ДГА:

$\omega(t)$ – швидкість обертання валу ДГА; $M_g(t)$ – момент СГПМ; $U(t)$ – фазна напруга; $P(t)$ – потужність згенерованої енергії; $I(t)$ – струм фази

Швидкість обертання ротора $\omega(t)$:

- Показує **швидкість обертання валу генератора** у відповідь на стрибкоподібні зміни навантаження.
- При підключенні навантаження видно **зменшення швидкості обертання** ротора через збільшення електромагнітного моменту генератора.
- Після зняття навантаження швидкість обертання повертається до початкового значення.

Момент $M_g(t)$

- Показує зміни **електромагнітного моменту генератора**.
- При зростанні навантаження момент генератора різко **збільшується** для компенсації потужності.
- Це викликає динамічну реакцію системи, що проявляється у коливаннях.

Фазна напруга $U(t)$

- При підключенні навантаження напруга має тенденцію до **падіння**.
- Коливання напруги є результатом відсутності активного регулювання магнітного поля ротора у СГПМ.
- У СГ з обмоткою збудження напруга стабілізується швидше завдяки можливості регулювати струм збудження.

Потужність $P(t)$

- Потужність різко **збільшується** при підключенні навантаження.
- Коливання потужності вказують на відсутність стабілізації у СГПМ, на відміну від СГ з регульованим збудженням.

Струм статора $I(t)$

- При підключенні навантаження струм різко **зростає**.
- Коливання струму є більш помітними у СГПМ через відсутність контролю над магнітним полем.

На основі проведеного аналізу роботи детандер-генераторного агрегату (ДГА) з використанням синхронного генератора на постійних магнітах (СГПМ) можна виділити ключові проблеми, що виникають при зміні режимів навантаження. Стрибкоподібні зміни навантаження призводять до зменшення швидкості обертання ротора і збільшення електромагнітного моменту, що викликає значні коливання фазної напруги, генерованої потужності та струму статора. Відсутність

можливості активного регулювання магнітного поля ротора у СГПМ обмежує здатність до стабілізації вихідних параметрів генерації, що негативно позначається на якості виробленої електроенергії.

Для вирішення цих проблем та підвищення стабільності роботи ДГА доцільно використовувати **синхронний генератор (СГ) з обмоткою збудження**. На відміну від СГПМ, СГ дозволяє здійснювати активне регулювання струму в обмотці збудження, що відкриває можливість оперативно стабілізувати фазну напругу при стрибках навантаження, зменшувати коливання електромагнітного моменту та струму статора, а також забезпечувати швидке відновлення швидкості обертання ротора. Вплив електричного навантаження на ДГА можна ефективно проаналізувати шляхом побудови математичної моделі СГ. Така модель враховуватиме взаємодію механічних та електричних параметрів системи, а також дозволить описати динаміку струмів і напруг у **d - q координатах**.

Додатково, математична модель СГ створить основу для синтезу регулятора, який дозволить мінімізувати коливання напруги, струму та потужності, а також забезпечить стабільну роботу ДГА в умовах змінного навантаження. Таким чином, використання СГ з можливістю регулювання збудження забезпечить як точне керування обертами турбіни через дросельну засувку, так і додаткову стабілізацію вихідної напруги на генераторі.

Специфіка моделювання СГ з бібліотеки MATLAB визначає керування цим режимом за вхідною величиною P/ω , яка розглядається як співвідношення між вхідною потужністю P , моментом M і швидкістю обертання ω ДГА.

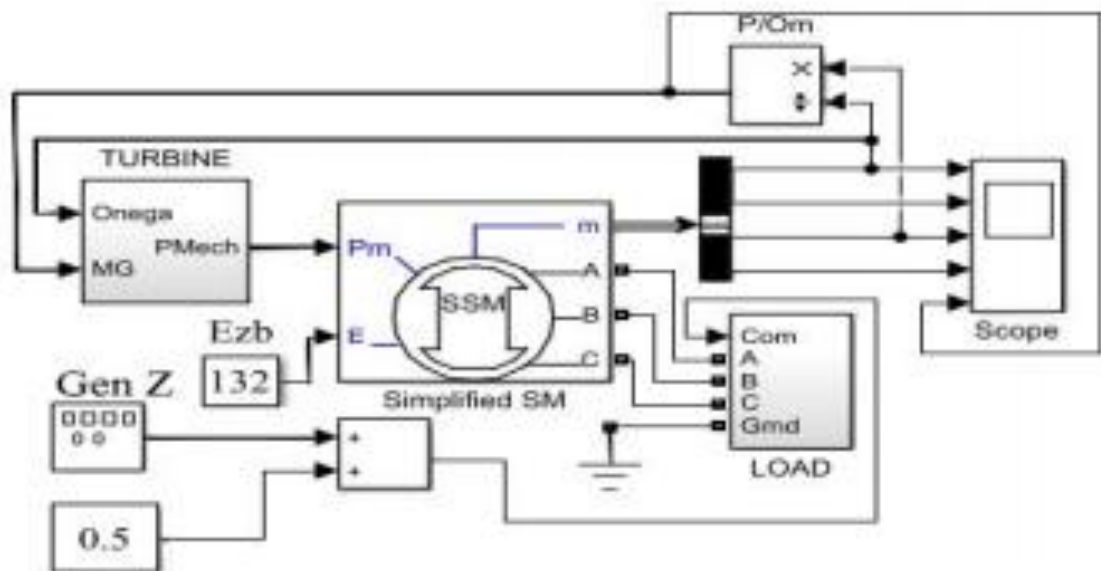


Рисунок 2.10 – Модель ДГА при використанні СГ

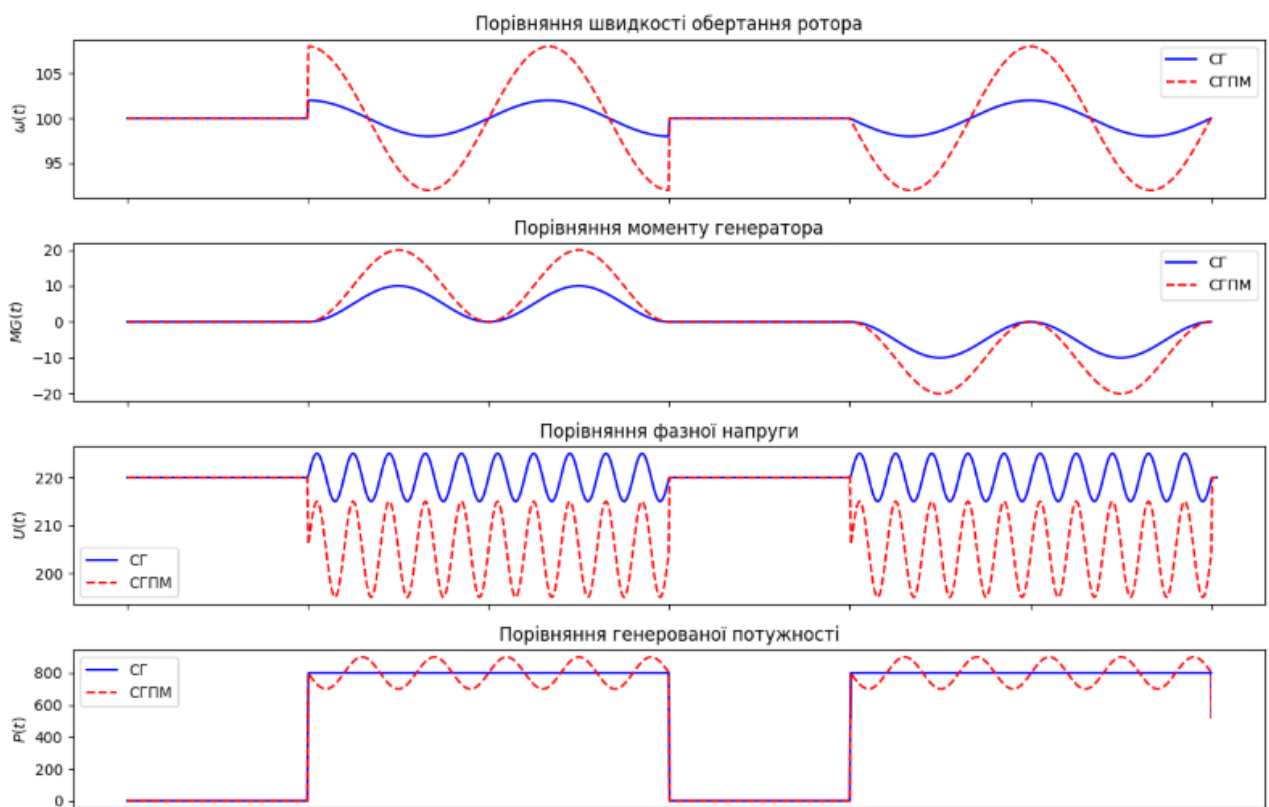


Рисунок 2.11 – Порівняння основних параметрів при використанні в якості генератора СГ та СГПМ

Використання синхронного генератора з обмоткою збудження має сенс, оскільки воно дозволяє реалізувати двоконтурне керування, де керування обертами турбіни через дросельну засувку відповідає за стабілізацію механічних

параметрів, а керування струмом збудження забезпечує точну стабілізацію електричних параметрів, зокрема вихідної напруги генератора.

При стрибкоподібних змінах навантаження стабілізація лише обертами турбіни може не встигати компенсувати коливання, оскільки динаміка механічного регулювання є повільнішою. У таких випадках синхронний генератор дозволяє швидко змінювати струм у обмотці збудження, компенсуючи падіння або зростання вихідної напруги й тим самим підвищуючи якість електроенергії.

Це забезпечує мінімізацію коливань напруги, зменшення гармонік і поліпшення загальної стабільності роботи системи. Завдяки можливості активного регулювання напруги два контури керування – механічний, через турбіну, та електричний, через збудження – працюють узгоджено, що дозволяє оптимізувати роботу детандер-генераторного агрегату при різних режимах навантаження.

3 СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ТУРБІНИ

Як зазначалося вище, досліджуваний ОК характеризується різними аеродинамічними та електромеханічними процесами і збуреннями, присутніми при використанні надлишкового тиску газу. Основним завданням на даний час є оцінка стабільності швидкості обертання при аеродинамічних і механічних збуреннях.

3.1 Постановка задачі синтезу регулятора

Слід звернути увагу на характер коливань, отриманих при електромеханічних збуреннях. Це пов'язано з тим, що від цього залежить вибір між складністю реалізації регулятора та якістю керування. Оскільки контур керування є нелінійним, то метод проектування регулятора полягає у виборі серед адаптивних регуляторів. Можна сказати, що неформальні нормативні вимоги включають мінімізацію нелінійних ефектів ОК за наявності збурень параметрів повітряного потоку та навантаження генератора. Задача керування визначається як коригування параметрів регулятора в реальному часі при збуреннях параметрів газового потоку; для синтезу ПД-регуляторів широко використовується метод кореневих діаграм або діаграм Боде, який є частиною інструментарію MATLAB Simulink і в середовищі MATLAB Simulink є автоматизованим. середовищі, є автоматизованим. Наявність лінеаризованої моделі [2] досліджуваного регулятора, представленої рядом передавальних функцій (діаграм Боде), дозволяє встановити відповідний набір логарифмічних амплітудно-частотних характеристик об'єктів, керованих замкненим зворотним зв'язком. На рис. 3.1 наведено модель обертання турбіни детандера з Діаграма Боде показує, як вона змінюється в залежності від положення дросельної заслінки h .

3.2 Синтез регулятора швидкості обертання турбіни

Для синтезу ПД-регулятора широко застосовується метод кореневого годографа або діаграми Бодє, які входять до складу інструментарію *MATLAB Simulink* та автоматизовані в рамках цього середовища.

Наявність лінеаризованої моделі досліджуваного ОК [Error! Bookmark not defined.], що представлена сімейством передатних функцій (діаграм Бодє), дає змогу побудувати відповідне сімейство логарифмічних амплітудо-частотних характеристик об'єкту керування із замкненим зворотнім зв'язком. На рис. 3.1 показано як змінюється діаграма Бодє моделі обертання турбіни детандера в залежності від положення штоку h дросельної засувки.

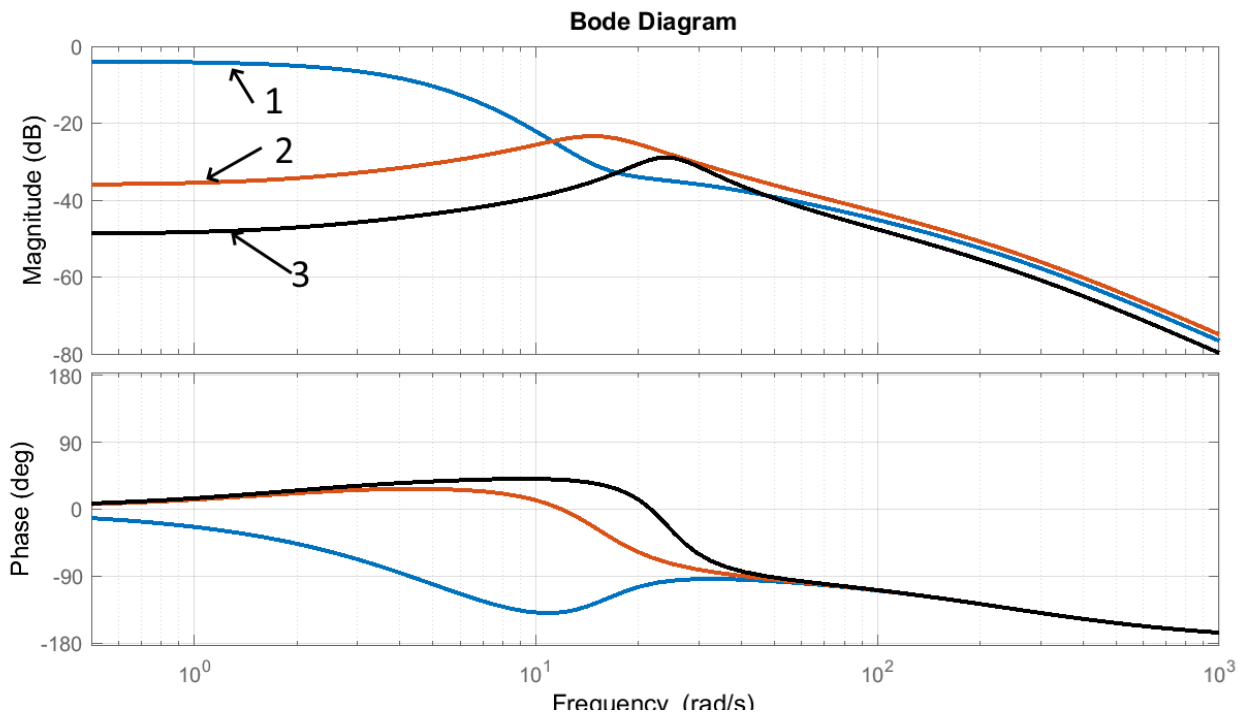


Рисунок 3.1 – Діаграми Бодє для різних положень h дросельної засувки:

крива 1 – $h= 4$; крива 2 – $h= 10$; крива 3 – $h=16$

Згадане сімейство передатних функцій будується відповідно до сімейства операторних функцій $G(s)$ об'єкту керування «вхід-вихід» по керуючому впливу:

$$G_i(s) = W_{Mi}(s) \cdot W_{Ti}(s), \quad (3.1)$$

де $W_{Mi}(s) = \frac{b_{1i} + b_{0i}}{s^4 + a_{3i}s^3 + a_{2i}s^2 + a_{1i}s + a_{0i}}$ – передатна функція «витрати потоку-момент»; $W_{Ti}(s) = \frac{b_{0i}}{a_{1i}s + a_{0i}}$ – передатна функція «момент-швидкість обертання»; i – номер робочої точки; a_i, b_i – коефіцієнти поліномів передатної функції.

Таке представлення передаточної функції вхід-вихід необхідне для відображення збурень моменту турбіни M_s . Такі збурення викликані змінами електричного навантаження генератора ТГА. Швидкість обертання турбіни регулюється компенсатором, який є регулятором, що характеризується передатною функцією $C(s)$. При включенні компенсатора в контур регулювання швидкості обертання з одним зворотним зв'язком отримують загальну передавальну функцію $W_k(s)$:

$$W_{Ki}(s) = \frac{C_i(s)G_i(s)}{1 + C_i(s)G_i(s)} \quad (3.2)$$

Найпоширенішими методами досягнення стабільності та швидкості перехідного процесу, необхідних у промислових установках, є оцінка перехідних і частотних характеристик. При цьому з перехідних характеристик можна отримати пряму вказівку на якість керування або використовувати запас фазової стійкості як індикатор стабільності. Частота зрізу АЧХ також є індикатором швидкості перехідного процесу регулювання. Метод модифікації для налаштування параметрів регулятора відображається в графічній структурі на діаграмі Боде досліджуваного об'єкта керування [1]. Передавальна функція компенсатора $C(s)$ формується після аналізу параметрів астатизму, перерегулювання та швидкодії; за допомогою інструменту проектування SISO відповідні коефіцієнти ПІД-регулятора можна отримати лише за умови

раціональності передавальної функції компенсатора $S_i(s)$. Якщо в результаті синтезу отримано складну структуру компенсаторів $S_i(s)$, то реалізація компенсаторів, і навіть таких ПД-регуляторів, в мікропроцесорній апаратурі може бути проблематичною.

3.3 Експериментальна перевірка регулятора

Складність побудови ПД-регулятора

Синтез ПД-регулятора для нелінійного об'єкта керування, такого як турбогенераторний агрегат (ТГА), пов'язаний із низкою труднощів:

1. Нелінійність об'єкта керування

Динаміка турбіни включає нелінійні залежності між тиском, витратою газу та швидкістю обертання. При великих змінах вхідних параметрів, ПД-регулятор потребує додаткової адаптації для роботи у широкому діапазоні режимів.

2. Інерційність процесів

В системі утилізації надлишкового тиску газу спостерігається значна інерційність у зміні параметрів: моменту турбіни, температури потоку та часу спрацьовування засувки. Це ускладнює налаштування коефіцієнтів ПД-регулятора, оскільки потрібно враховувати часові затримки в системі.

3. Коливання та нестійкість

При використанні ПД-регулятора в нелінійних об'єктах можливі автоколивання та нестійкість, особливо в умовах впливу збурень, таких як зміна витрати газу або навантаження на генератор.

4. Труднощі лінеаризації моделі

Процес лінеаризації нелінійної моделі ТГА в робочих точках потребує значних обчислювальних ресурсів. У реальних умовах неможливо досягти точної відповідності лінеаризованої моделі поведінці реального об'єкта.

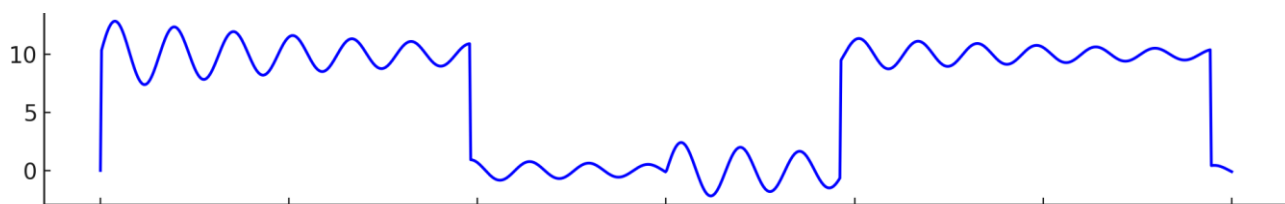


Рисунок 3.2 – Зміни швидкості обертання при навантаженнях з використанням PID регулятора

Альтернативним варіантом регулювання швидкості стає релейний регулятор (РР) [1]. Для побудови такого РР приймається структура 3-х позиційного РР, функціональна залежність від похибки керування ε якого має вигляд:

$$\begin{aligned}
 &U_{\max}, X > \varepsilon \\
 &F(X) = Uz, -\varepsilon < X < \varepsilon \\
 &-\!U_{\max}, X < -\varepsilon
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

де U_{\max} – значення керуючого сигналу; ε – припустима похибка регулювання.

Його простіше реалізувати для нелінійних систем і забезпечує достатню ефективність у таких випадках:

1. Простота реалізації

Релейний регулятор не потребує точного налаштування параметрів для кожного режиму роботи системи. Він працює на основі двохпозиційного принципу – перемикаючи керуючий вплив у крайні стани.

2. Стійкість до нелінійностей

РР стійкий до впливу нелінійних характеристик об'єкта. Коливання або збурення параметрів потоку газу менш впливають на точність керування.

3. Ефективне відпрацювання збурень

Параметричний синтез РР виконується після аналізу стійкості моделі при ступінчастих впливах. Для налаштування регулятора достатньо використовувати осцилограми процесу регулювання швидкості.

4. Експериментальна перевірка

Спрощений підхід до налаштування РР полягає у спостереженні перехідних процесів на експериментальній установці та аналізі осцилограм регульованих параметрів.

Процес налаштування РР

Параметричний синтез релейного регулятора здійснюється у кілька етапів:

1. Попередній аналіз стійкості моделі

Виконується тестування об'єкта при ступінчастих впливах для визначення динамічної реакції системи.

2. Експериментальне налаштування

Перевірка роботи релейного регулятора на моделі у **MATLAB Simulink**, де імітуються збурення різної форми. Аналізується точність утримання заданої швидкості обертання.

3. Налаштування на стенді

Регулятор перевіряється на реальній експериментальній установці для уточнення параметрів керування та підтвердження адекватності моделі.

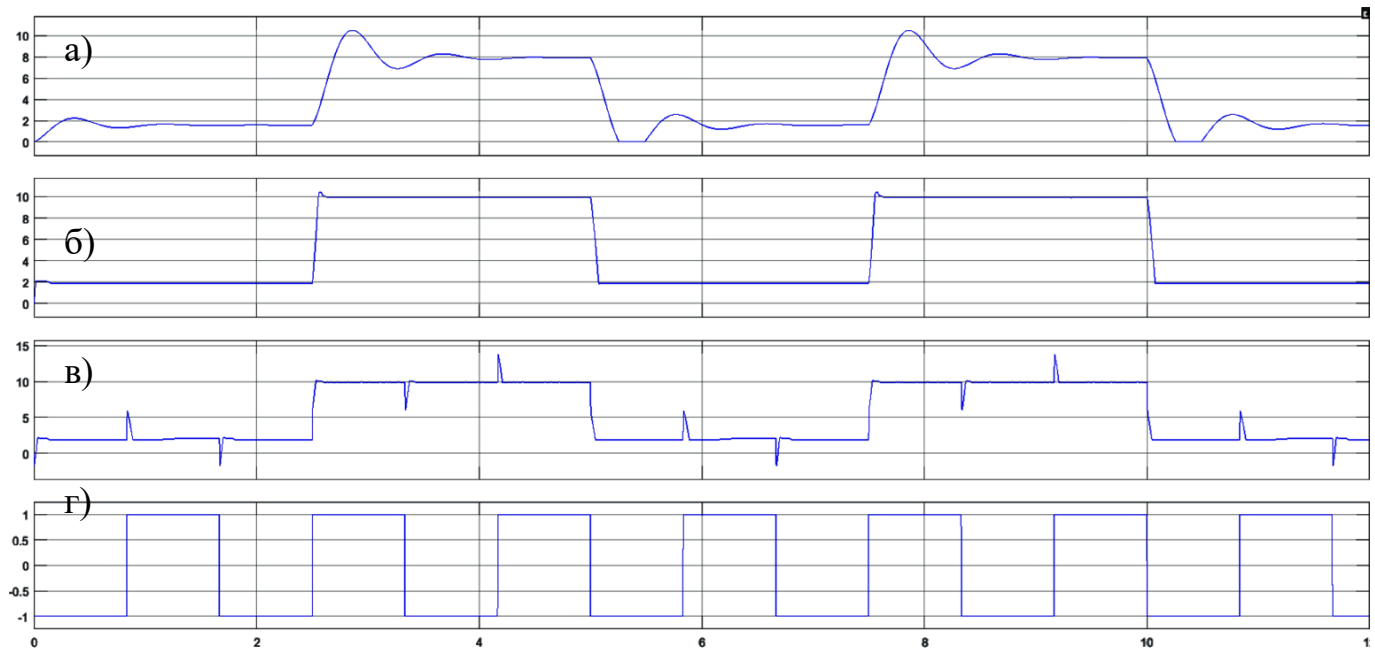


Рисунок 3.3 – Зміни швидкості обертання при навантаженнях:

- а) РР відсутній; б) РР працює; в) відпрацювання зміни навантаження;
 г) стан навантаження (1 – присутнє, 0 – відсутнє)

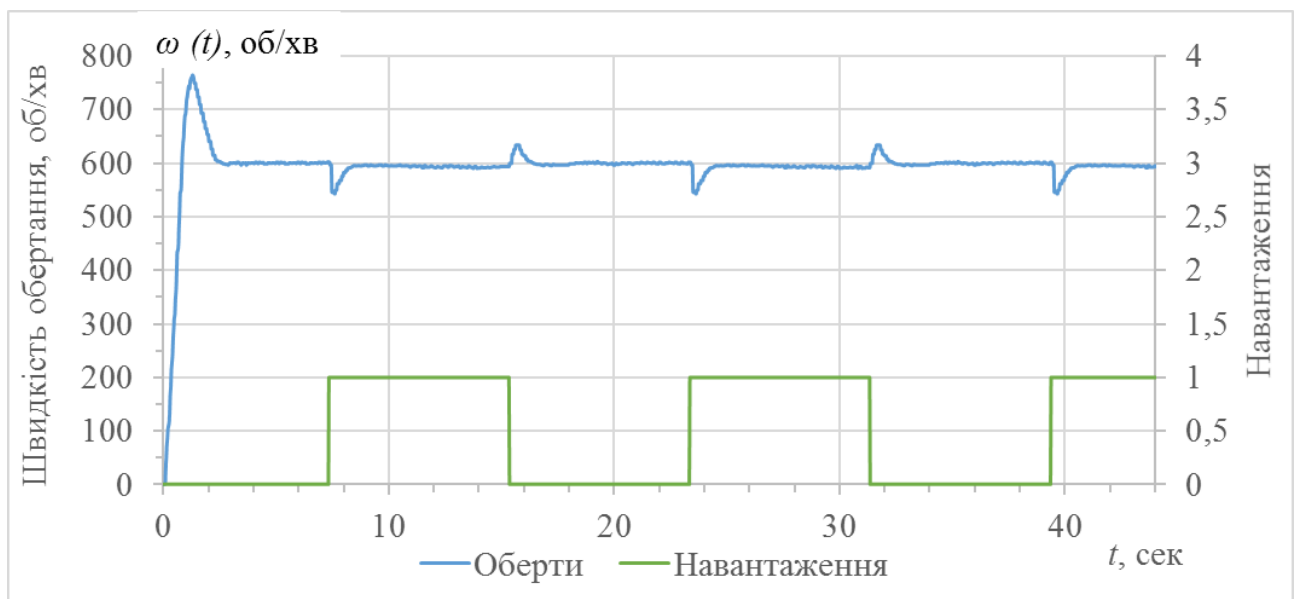


Рисунок 3.4 – Зміни швидкості обертання турбіни та стан навантаження турбіни

З рис. 3.3 та 3.4 видно, що результати математичного та експериментального моделювання збігаються. Це свідчить про те, що методика, використана для синтезу регулятора для турбінної засувки, є ефективною і може дати параметри

регулятора для використання в інших турбінних енергосистемах. Таким чином, основною метою дослідження є оцінка можливості керування параметрами ТГА на основі мікропроцесорних засобів автоматизації та розробка методики синтезу регуляторів відповідно до необхідних параметрів системи. У будь-якому випадку, модельне представлення цих турбін пов'язане з нелінійними рівняннями, а їх актуальність визначає метод структурного та параметричного синтезу регуляторів ОК.

З огляду на практичну реалізацію регуляторів на мікропроцесорних системах, ефективним виявилось зменшення передавальної функції. Необхідно пам'ятати, що використання регуляторів швидкості обертання вимагає простого налаштування та надійної роботи під впливом збурень. При цьому враховується, що пропонований РР повинен не тільки забезпечувати можливість налаштування на конкретні параметри утилізаційної установки, але й забезпечувати стабілізацію режиму при збуреннях параметрів газового потоку. До теперішнього часу використовувалися регулятори, в яких керуючий вплив на параметри здійснюється за постійною часу. Експериментальні дослідження показали, що використання регуляторів положення на базі мікропроцесорів і сучасних комутаційних пристроїв може забезпечити динаміку регулювання на рівні звичайних ПД-регуляторів. Для досягнення таких параметрів стабілізації використовується точний датчик частоти обертання турбіни і мікропроцесорний контролер крокового двигуна для керування дросельною заслінкою, що є дуже важливим (підпункт 3.4).

Методи, використані для дослідження моделі турбіни малої потужності, можуть бути застосовані для створення контролерів для інших турбін цього типу і для турбін малих ГЕС. Важливим результатом є забезпечення стабільності обертання турбіни при збуреннях. Це дає можливість компенсувати непередбачувані збурення, що виникають від споживачів мережі, і знижує жорсткість вимог до параметрів контролера турбогенераторної системи. В результаті проведених досліджень запропоновано регулятор положення на основі мікропроцесорних

засобів та сучасних комутаційних пристроїв, який забезпечує стабілізацію швидкості обертання турбіни під впливом збурень.

3.4 Проблеми при синтезі регулятора

При налаштуванні контролера виникла проблема, що система не могла досягти задовільних перехідних характеристик через високий рівень перерегулювання та великий час перехідного процесу в залежності від параметрів контролера, через низьку частоту збору даних з датчика зворотного зв'язку. Тому для вирішення цієї проблеми були випробувані наступні типи датчиків частоти обертання валу турбодетандера: аналогові датчики; хороші характеристики, але низька точність через велику кількість внутрішніх перетворень; індуктивні датчики, націлені на коло в одну мітку за оберт, датчики з'єднані з валом ДГА гнучкою муфтою. Під час дослідження були отримані характеристики:

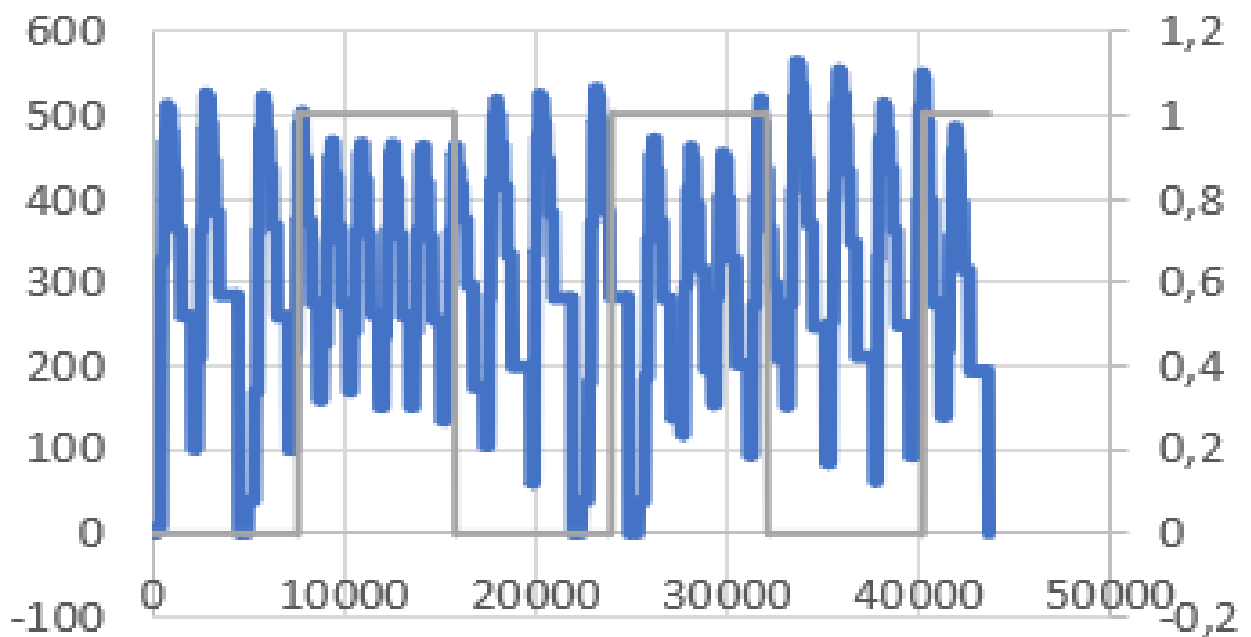


Рисунок 3.5 – Хар. при використанні індуктивного давача з однією міткою на оберт

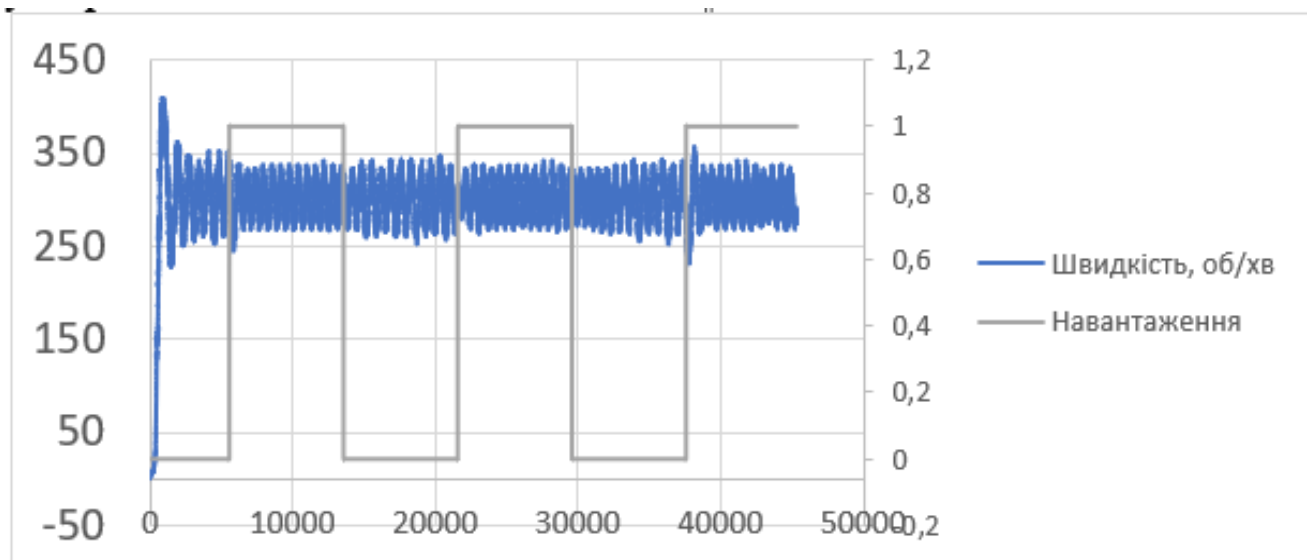


Рисунок 3.6 – Хар. при використанні енкодера з кількістю в 600 міток на оберт

Ці дані були використані для розрахунку частоти оновлення інформації при різних обертах: при 300 об/хв вал, дані оновлювались кожні 200 мс. Для зменшення часу, необхідного для отримання нових даних, було вирішено збільшити кількість міток на оберт. Для цього обрали енкодер з **600 мітками на оберт**, що дозволило досягти часу оновлення даних **333 мкс**. Це вирішило проблему затримки в отриманні актуальних даних.

На графіку рис. 3.5 показані характеристики при використанні індуктивного датчика з однією міткою, а на рис. 3.6 — при використанні енкодера. Як видно, збільшення швидкості вимірювання завдяки використанню більш точного датчика дозволяє зменшити перерегулювання, навіть за однакових налаштувань контролера.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ТА РОЗРОБКА SCADA-СИСТЕМИ

SCADA-система відіграє ключову роль у підвищенні енергоефективності промислових процесів завдяки оптимізації управління й автоматизації. Вона дозволяє в реальному часі контролювати й регулювати параметри об'єкта керування, такі як стабільність обертів турбіни та положення дросельної засувки, що мінімізує енергетичні втрати й підвищує загальний коефіцієнт корисної дії системи. Постійний моніторинг витрат газу, тиску та температури забезпечує оптимальний розподіл потоків, дозволяючи підтримувати енергоефективний режим роботи відповідно до поточного навантаження.

Вбудовані функції раннього виявлення несправностей та автоматичної аварійної зупинки дають змогу запобігати простоям та аварійним ситуаціям, які можуть призводити до значних втрат енергії. Окрім цього, SCADA-система накопичує історичні дані про роботу системи, що дозволяє провести детальний енергетичний аудит, проаналізувати режими роботи та виявити неефективності для подальшої оптимізації.

Інтеграція SCADA з іншими системами автоматизації, зокрема регуляторами й інтелектуальними алгоритмами управління, дозволяє адаптувати систему до зміни умов роботи, таких як навантаження чи витрати газу. Завдяки підтримці двоконтурного керування SCADA здатна стабілізувати швидкість обертання турбіни шляхом регулювання засувки та контролювати вихідну напругу генератора через керування струмом збудження.

Автоматизація процесів у SCADA-системі зменшує вплив людського фактора, що мінімізує ризики неефективного управління та перевитрат енергії. Таким чином, SCADA не лише покращує надійність і стабільність роботи системи, а й забезпечує суттєву економію ресурсів та підвищення енергоефективності в цілому.

4.1 Інформаційно-вимірвальна система стенду

SCADA-система вирішує низку ключових задач для нашої системи:

Моніторинг критичних параметрів:

- Показники тиску на вході та виході ТДА (давачі тиску 1 та 2).
- Швидкість обертання турбіни (контроль стабільності обертів).
- Температура газового потоку для запобігання замерзанню.
- Споживана потужність та напруга на виході генератора.

Стабілізація роботи системи:

- Через SCADA-систему можливо інтегрувати регулятори (релейний або ПІД) для підтримання стабільних обертів турбіни та забезпечення надійного вироблення електроенергії.
- Контроль положення дросельної засувки для оптимального регулювання потоку газу.

Ефективне керування:

- Автоматизація роботи дросельної засувки для мінімізації втрат енергії та підвищення ККД системи.
- Візуалізація усіх процесів на мнемосхемі, що надає оператору наочну картину роботи системи.

Запобігання аваріям:

- Функція аварійної зупинки дозволяє миттєво зупинити систему при перевищенні критичних значень параметрів.
- Тривожні сигнали сповіщають оператора про можливі відхилення або збої у роботі.

Враховуючи всі переваги описані вище було розроблена SCADA-система, мнемосхема котрої зображена на рис. 4.1.

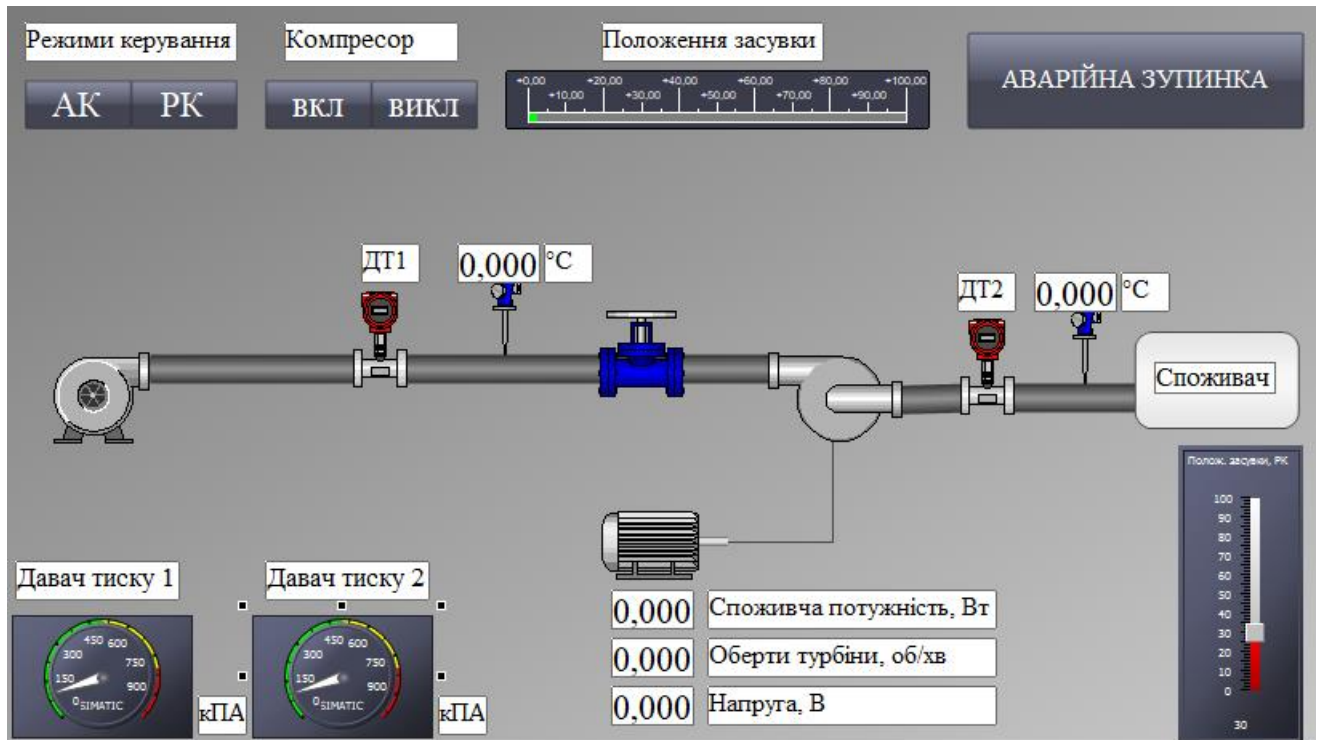


Рисунок 4.1 – Інтерфейс SCADA-системи

Основні компоненти розробленої системи включають:

Датчики:

- **Давачі температури:** датчики температури, що відображають значення температури газу до і після турбіни (0.000°C).
- **Давачі тиску:** два вимірювачі тиску показують стан вхідного і вихідного тиску газу.

Механічні елементи:

- Засувка для керування потоком газу.
- Турбіна й електрогенератор для утилізації надлишкового тиску газу.

Інформаційний блок:

- Показники потужності, обертів турбіни та напруги.

Інтерфейс користувача:

- Кнопки режимів керування (АК/РК).
- Аварійна зупинка та індикатор положення засувки.

4.2 Зв'язок зі SCADA-системою

У нашому випадку для реалізації обміну даними використовується SCADA-система **WinCC** від Siemens. Вона забезпечує передачу інформації без необхідності застосування OPC-сервера, завдяки прямій роботі через протокол передачі даних **MODBUS/RTU**. Підключення здійснюється за допомогою модуля **RS-485** та конвертера **RS-485/USB**, як це показано на рисунку 4.2.

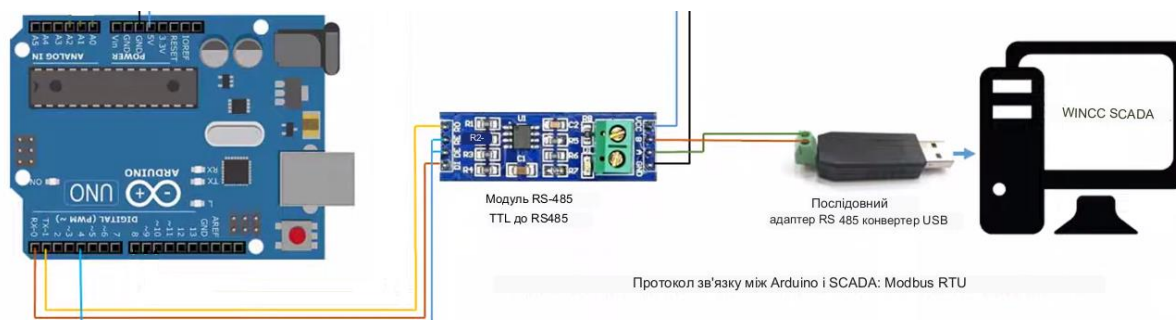


Рисунок 4.2 – Зв'язок контролера та SCADA-системи

Особливості зв'язку

Для передачі даних використовується **двопровідний напівдуплексний інтерфейс**, що дозволяє здійснювати обмін інформацією між пристроями. Протокол **MODBUS/RTU** побудований за принципом "ведучий-відомий". Це означає, що в кожен момент часу лише один пристрій може виконувати роль ведучого (майстра), тоді як решта пристроїв у системі виступають у ролі ведених (слейвів).

Ведучий пристрій (майстер) є ініціатором обміну даними: він надсилає запити, на які відповідають лише ведені пристрої. Система дозволяє підключати до 247 відомих пристроїв до однієї шини, що забезпечує гнучкість у побудові розподілених систем керування.

Такий підхід дозволяє ефективно організувати зв'язок між контролерами та SCADA-системою, мінімізуючи залежність від додаткових серверів та спрощуючи конфігурацію комунікаційної інфраструктури.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи було розроблено енергоефективну систему керування турбодетандерною установкою потужністю до 50 кВт. Було здійснено аналіз технологічного процесу та визначено основні задачі керування, серед яких стабілізація обертів турбіни та напруги на виході генератора. На основі отриманих результатів побудовано математичну модель об'єкта керування, що дозволяє точно описати його динамічні характеристики.

Особлива увага приділена порівнянню релейного та ПД-регуляторів, що дозволило визначити переваги релейного регулятора у системах із нелінійними характеристиками та високою інерційністю. Проведене дослідження показало, що релейний регулятор забезпечує стабільність обертів турбіни при мінімізації коливань та збурень.

Для покращення ефективності керування розроблено SCADA-систему, що дозволяє здійснювати моніторинг та контроль усіх процесів на мнемосхемі. Вона забезпечує наочне відображення стану системи, оперативне реагування на зміни технологічних параметрів, а також оптимізує роботу турбодетандерної установки для підвищення енергоефективності.

Розроблені алгоритми керування та створена система автоматизації продемонстрували свою ефективність як на математичній моделі, так і під час експериментальних досліджень. Отримані результати можуть бути впроваджені для підвищення енергоефективності в промислових системах та слугуватимуть основою для подальших досліджень у цій галузі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бугаєц П. І. Автоматизована система керування прототипом турбодетандерної установки : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 174 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / наук. кер. П. В. Леонтьєв Суми : Сумський державний університет, 2023. 68 с.
2. Kulinchenko H., Panych A., Leontiev P., Zhurba V. Simulation of the excess expander gas pressure utilization plant // ScienceRise. – 2022. – № 3(80). – С. 3- 13.
3. Kulinchenko H., Leontiev P., Drozdenko O. Development of extreme regulator of separation moisture from the gas stream // ScienceRise. – 2021. – № 2(73). – С. 3–10.
4. Журба В. О. Моделювання режимів автоматизованої установки утилізації надлишкового тиску : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра : спец. 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / наук. кер. Г. В. Кулінченко. Суми : Сумський державний університет, 2023. 64 с.
5. Оцінка параметрів електричної генерації установки утилізації тиску газу / Кулінченко Г.В., Панич А.О., Бугаєц П.І., Давиденко І.Л., Левковський О.В. // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2024. – С. 169-177.
6. Danieli P., Masi M., Lazzaretto A., Carraro G. Volpato G.A. / Smart energy recovery system to avoid preheating in gas grid pressure reduction stations // Energies. – 2022. – № 15. – 371 с.
7. Bond B.N. A piecewise-linear moment-matching approach to parameterized model order reduction for highly nonlinear systems / B.N. Bond, L. Daniel // IEEE Trans. Computer-Aided Design. – 2007. – № 26(12). – С. 2116–2129.
8. Bilfeld N.V. PID Controller design with control system toolbox of MATLAB // Technical sciences. – 2015. – № 3–4 (37–38). – С. 11–20.
9. Design and Implementation of Micro Temperature Control System Based on PWM / Yajie Zhu et al. // IOP. – 2019. – Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – С. 677
10. Kuczyński Sz., Łaciak M., Olijnyk A., Szurlej A., Włodek T. / Techno-Economic Assessment of Turboexpander Application at Natural Gas Regulation Stations // Energies. – 2019. – № 12. – 755 с.

11. Bilfeld N.V. PID Controller design with control system toolbox of MATLAB // Technical sciences. – 2015. – № 3–4 (37–38). – С. 11–20.
12. Oshnoei A. On the contribution of wind farms in automatic generation control: Review and new control approach / A. Oshnoei, R. Khezri,, S.M. Muyeen, F. Blaabjerg // Applied sciences.– 2018.– № 8, 1848. – С. 1–23.
13. Bernal M. Analysis and Synthesis of Nonlinear Control Systems / M. Bernal, A. Sala, Z. Lendek, Th. M. Guerra // Springer Cham. –2022. – 345 с.
14. Schipachev, A.M., Dmitrieva, A.S. Application of the resonant energy separation effect at natural gas reduction points in order to improve the energy efficiency of the gas distribution system // Journal of Mining Institute. – 2021. – 248(2). – С. 253–259.
15. Vanyeyev S.M., Radchenko M.I., Meleychuk S.S., Baga V.M., Rodymchenko T.S. Modelling the energy characteristics of a jet-reactive turbine // Авіаційно- космічна техніка і технологія. – 2020. – № 1(161). – С. 22–27
16. Defendi R.O., Paraíso P.R., Jorge L.M.M. Modeling, simulation, and validation of an electric heater model operating in the transient regime // Engevista. – 2021. – Vol. 17, №. 3. – С. 421-432.