

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
_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня бакалавр

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійної програми
«Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»
на тему: «Автоматизована система керування прототипом турбодетандерної
установки»

Здобувача групи СУ-91

Бугаєц Павло Ігорович

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

(підпис)

Павло БУГАЄЦ

Керівник: завідувач кафедри КСУ, к. т. н. Петро ЛЕОНТЬЄВ.

(підпис)

Ном.поз	Формат	Позначення	Найменування	Кількість аркушів	№ екз.	Примітки
			<u>Документація застосована</u>			
1	A4		Завдання кафедри	2		
			<u>Новорозроблена</u>			
2	A4	ТЗ	Технічне завдання	4		
3			Анотація	2		
4	A4	СУ-91 6.151.01 ПЗ	Пояснювальна записка	54		
			<u>Документація конструкторська</u>			
			<u>Новорозроблена</u>			
5	A3	СУ-91 6.151.01 А2	Функціональна схема автоматизації	1		
6	A3	СУ-91 6.151.01 Е3	Електрична принципова схема стенду	1		
7	A3	СУ-91 6.151.01 Е3	Електрична принципова схема плати розширення	1		

					СУ-91.6.151.01.ДП-¹			1
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Павло БУГАЄЦ			Автоматизована система керування прототипом турбодетандерної установки (Відомість проекту)	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Петро ЛЕОНТЬЄВ						
Реценз.		В'ячеслав ЖУРБА				СумДУ, СУ-91		
Н. Контр.								
Затверд.								

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КСУ

_____ Петро ЛЕОНТЬЄВ
_____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра здобувачу вищої освіти
Бугайцю Павлу Ігоровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: Автоматизована система керування прототипом турбодетандерної установки.
затверджена наказом ректора СумДУ № 0263 VI від "14" березня 2023р.
2. Термін здачі студентом закінченої роботи " 01 " червня 2023 р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: _звіт з переддипломної практики, наукові публікації, статті, технічна документація та перелік літературних джерел з матеріалом про подібні системи.
4. Зміст кваліфікаційної роботи (питання, що підлягають розробленню): аналіз існуючих подібних систем керування, загальний опис системи, розробка структурної схеми системи, постановка задач, які потребують вирішення, опис контурів керування, розробка функціональної схеми автоматизації, підбір технічних засобів автоматизації, розробка програмного забезпечення, впровадження та налаштування регулятора, створення електричної принципової схеми, створення системи керування.
5. Перелік графічних матеріалів: 33 рисунка, 5 таблиць, 3 додатка.
6. Календарний план виконання роботи:

№ етапу	Зміст етапу проектування	Термін виконання
1	Ознайомлення із завданням. Аналіз існуючих подібних систем	21.02.2023 – 01.03.2023
2	Розробка технічного завдання. Визначення основних елементів системи та побудова структурної схеми.	02.03.2023- 16.04.2023
3	Розробка функціональної схеми	16.04.2023- 19.04.2023
4	Вибір засобів автоматизації	20.04.2023- 25.04.2023

5	Розробка та проектування електричної схеми з'єднань та плати керування.	25.04.2023-05.05.2023
6	Технічне оформлення проекту	06.05.2023-28.05.2023

7. Дата видачі завдання " 19 " лютого 2023 р.

Керівник проекту:

к.т.н., завідувач кафедри КСУ.
(науковий ступінь, вчене звання, посада)

(підпис)

Петро Леонтєв
(ім'я та прізвище)

Здобувач:

студент гр. СУ-91
(шифр групи)

(підпис)

Павло Бугаєц
(ім'я та прізвище)

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

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на проектування автоматизованої системи керування прототипом
турбодетандерної установки

Розробник:
студент групи СУ-91

Павло БУГАЄЦ

Погоджено:
Зав. каф. КСУ
К. т. н.

Петро ЛЕОНТЬЄВ

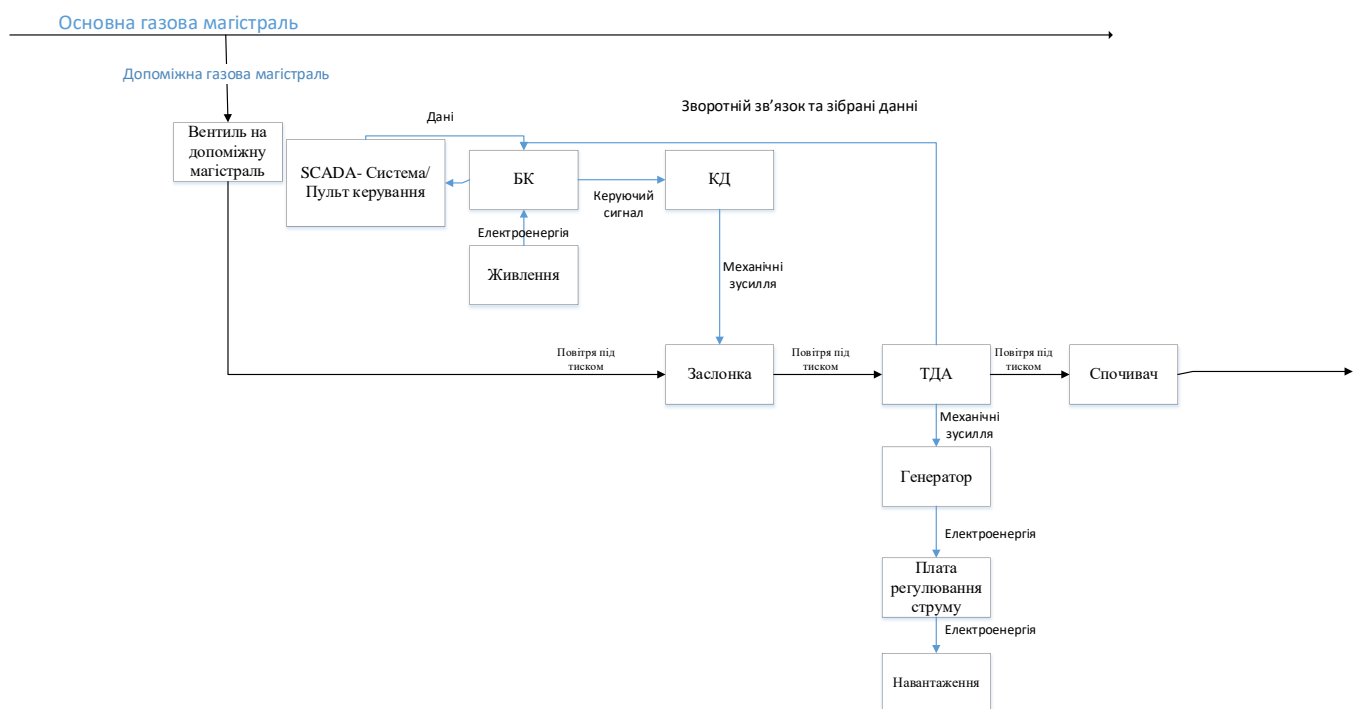
1. Назва і галузь застосування: Автоматизована система керування прототипом турбодетандерної установки в газовій та енергетичній промисловості.

2. Підстави для проектування: Наказ ректора Сумського державного університету № 0263 VI від “14” березня 2023р.

3. Загальний опис об'єкта автоматизації: Турбодетандерний агрегат з'єднаний із генератором, ця система призначена для вироблення електроенергії, рівень напруги якої визначається швидкістю обертів турбіни. Система турбодетандерного агрегату повинна працювати в автоматичному режимі і підтримувати задану швидкість, та в ручному для налаштування системи. Регулювання швидкості здійснюється за допомоги заслонки, якою керую кроковий двигун.

4. Основні частини системи та структурна схема:

Структурна схема системи:



Електромеханічне збурення здійснюється шляхом зміни електричного навантаження генератора, що з'єднаний з валом турбіни, для імітації реальних умов споживання.

5. Опис блоків системи керування :

Повітря під тиском надходить з газової магістралі або компресора, який можна використати для експериментальної установки. Повітря проходить через

засувку шток якої, механічно з'єднаний з кроковим двигуном, який керується мікропроцесором, що відповідає за регулювання тиску на вході турбіни. Давач обертів дає інформацію про швидкість та буде слугувати зворотнім зв'язком при керуванні кроковим двигуном. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) мікропроцесорної системи дасть змогу вимірювати різницю потенціалів на виході електрогенератора або значення струму у навантаженні.

6. Опис алгоритмів та режимів роботи системи:

Автоматичний режим: Блок керування отримує за зворотнім зв'язком сигнал від давача струму, після чого в залежності від значення уставки та вхідного сигналу давача, відповідно до формули, формує керуючі імпульси на драйвер, до якого під'єднаний до кроковий двигун, що керуючи засувкою регулює витрати, тим самим швидкість обертання турбіни.

Ручний режим: Керуючий сигнал формується в залежності від включених тумблерів, які перемикає оператор, обираючи швидкість і напрямок руху двигуна. Цей режим необхідний для налаштування системи.

7. Умови експлуатації системи керування:

Експлуатація турбодетандерного агрегату допускається лише з відрегульованою системою протиаварійного захисту.

- Відключення мотор-генератора турбодетандера від електроживлення повинне проводитися тільки при закритих відсічному клапані та запірній арматурі на трубопроводі подачі газу в турбодетандер.
- При раптовому зникненні напруги на мотор-генераторі турбодетандера, що працює, подача газу в турбодетандер повинна бути негайно припинена.
- Для забезпечення нормальної роботи, система керування установки повинна бути встановлена в закритих приміщеннях
- Навколишнє середовище має бути не вибухонебезпечним, не містити пилу в концентраціях, що порушують роботу електрообладнання, а також не містити агресивних парів і газів, що руйнують метал і ізоляцію.

– Ступінь захисту складових частин обладнання автоматизації від дії навколишнього середовища не нижче IP56 (захист від пилу/ захист від води або морських хвиль) .

8. Склад технічних засобів системи:

а) Давачі: струму, тиску, температури, швидкості(енкодер);

б) Живлення: блок живлення 36В;

в) мікроконтролер Arduino Nano ;

г)Перетворювачі: DC-DC перетворювач (24В-5В), AC-DC перетворювач(220В), автотрансформатор;

д) Узгоджуючий пристрій: драйвер для крокового двигуна;

е) Виконавчі механізми: кроковий двигун;

є) Відображення інформації та контроль процесу: SCADA-система;

9. Стадії та етапи проектування:

№ етапу	Зміст етапу проектування	Термін виконання
1	Ознайомлення із завданням. Аналіз існуючих подібних систем	24.02.2023 – 01.03.2023
2	Розробка технічного завдання. Визначення основних елементів системи та побудова структурної схеми.	02.03.2023- 16.04.2023
3	Розробка функціональної схеми	16.04.2023- 19.04.2023
4	Вибір засобів автоматизації	20.04.2023- 25.04.2023
5	Розробка та принципової схеми та плати керування.	25.04.2023- 05.05.2023

6	Технічне оформлення проекту	06.05.2023- 28.05.2023
---	-----------------------------	---------------------------

10. Додатки:

Додаток А. Конструкторська документація:

- СУ-91 6.151.01.А2 Функціональна схема автоматизації установки утилізації надлишкового тиску.
- СУ-91 6.151.01.Е3 Принципова схема експериментального стенду на базі турбодетандерного агрегату.
- СУ-91 6.151.01.Е3 Принципова схема плати розширення мікроконтролера.

Додаток Б. Зовнішній вигляд плати розширення мікропроцесора.

Додаток В. Уривки коду мікроконтролеру.

АНОТАЦІЯ

Тема роботи: Автоматизована система керування прототипом турбодетандерної установки.

Автор: Бугаєц Павло Ігорович; Сумський державний університет; 4 курс; Суми.

Керівник: Леонтєв Петро Володимирович; доцент; кандидат технічних наук; завідувач кафедри КСУ.

Робота містить вступ, чотири розділи та висновки в основному тексті, загальним обсягом 65 сторінок, 33 рисунків, 21 джерел інформації.

В першому розділі розглядаються процес утилізації надлишкового тиску природного газу, особливості досліджуваного об'єкта керування, другий розділ присвячено підбору засобів автоматизації для розроблених стендів, третій розділ присвячено побудові математичної моделі об'єкту та перевірки її на адекватність за допомогою експериментального стенду, в четвертому розділі розповідається про процес реалізації системи керування: створення регулятора для даної системи, перевірці його на експериментальній установці, розробка SCADA-системи, реалізація зв'язку з нею та розроблені експериментальні установки.

Був проаналізований процес утилізації надлишкового тиску природного газу. Розроблений проект турбогенераторного агрегату для утилізації надлишкового тиску. Особливістю цієї системи є її нелінійність, що впливає на вибір давачів та регулятора.

Аналіз процесів утилізації надлишкового тиску газу дозволив побачити неоднаковість параметрів передаточних функцій в залежності від робочої точки, що вимагало адаптації параметрів регулятора в залежності від навантаження та впливу збурень.

Була написана програма для мікроконтролера, зібрані данні показали доречність використання автоматизованої системи управління (АСУ) в турбогенераторних агрегатах (ТГА).

За допомогою створеного регулятора були мінімізовані впливи збурень на оберти турбіни. Було досягнуто стабільності уставки по швидкості $\pm 7\%$, при коливаннях навантажень турбіни в межах 25%.

Ключові слова: турбогенератор, привод засувки, релейний регулятор, турбодетандер, синтез регулятора, нелінійний об'єкт, адаптивне керування.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КСУ

_____ Петро ЛЕОНТЬЄВ

_____ 2023 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

на тему:

«Автоматизована система керування прототипом турбодетандерної установки»

Керівник проекту:

Зав. каф. КСУ

К. т. н.

Петро Леонт'єв

Здобувач:

Студент групи СУ-91

Павло Бугаєц

Суми – 2023

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ І УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	3
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ПРОЦЕС УТИЛІЗАЦІЇ НАДЛИШКОВОГО ГАЗУ	6
1.1 Огляд існуючих систем утилізації надлишкового тиску газу	6
1.2 Задачі керування системою утилізації надлишкового тиску газу	8
РОЗДІЛ 2. ОПИС АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ.....	11
2.1 Блок живлення та перетворювачі	11
2.2 Виконавчі пристрої.....	14
2.3 Вибір узгоджувачів пристроїв	16
2.4 Вибір давачів.....	17
2.5 Вибір мікроконтролера.....	23
РОЗДІЛ 3. ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ.....	25
3.1 Математичний опис об'єкту керування системи утилізації надлишкового тиску газу	26
3.2 Уточнення математичної моделі	27
3.3 Оцінка адекватності моделі.....	30
РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	31
4.1 Задачі регулятора та його синтез	31
4.2 Експериментальна перевірка регулятора	33
4.3 Інформаційно-вимірювальна система стенду	37
4.4 Підключення до SCADA-системи	38
4.5 Стенд ТГА на базі ТДА	41
4.6 Стенд ТГА на базі двох двигунів постійного струму	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46

					СУ-91 6.151.01. ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Бугаєц П.І.</i>			Пояснювальна записка	<i>Літ.</i>	<i>Аркш.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перев.</i>		<i>Леонтьев П.В.</i>					3	49
<i>Реценз.</i>		<i>Журба В.О.</i>				СумДУ СУ-91		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Утверд.</i>								

СКОРОЧЕННЯ І УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

АСУ – автоматизована система управління

ГРС – газорозподільна станція

МРЕ – мала розподілена енергетика

ОК – об'єкт керування

РР – релейний регулятор

ТГА – турбогенераторний агрегат

ТДА – турбодетандерний агрегат

ФСА – функціональна схема автоматизації

ККД – коефіцієнт корисної дії

ВСТУП

Газова промисловість відіграє важливу роль в енергетичній сфері та економіці країни, тому вона потребує збільшення ефективності утилізації надлишкового тиску. В наш час у системи транспортування, розподілення та редукції тиску природного газу, які побудовані на дросельних пристроях, призводить до непродуктивних втрат енергії газу [1]. Розглядаючи проекти інших країн зрозуміло, що подібну енергію треба утилізувати перетворюючи в інший вид енергії. Ефективною заміною систем на дроселюючих пристроях є системи, які базуються на турбогенераторних агрегатах (ТГА), що будуть основним вузлом системи. В подібних системах природній газ в турбіні буде виконувати механічну роботу, що з одного боку забезпечить зниження і регулювання тиску газу, з іншого боку створить механічну енергію, яку можна використовувати для вироблення електричної енергії під'єднавши до валу турбіни електрогенератор.

Така система дає можливість для розвитку малої розподіленої енергетики (МРЕ), вона зможе забезпечити енергетичні потреби користувачів в місці свого знаходження, що є поштовхом для розвитку децентралізованої мережі електропостачання.

Подібна енергетика дозволить:

- зменшити витрати на будівництво та експлуатацію централізованої мережі;
- забезпечити енергетичну незалежність від централізованої мережі, що допоможе у випадку аварій;
- збільшити надійність енергопостачання;
- отримувати енергію за собівартістю.

Електроенергія вироблена таким шляхом буде використовуватися на місці вироблення, залишкова енергія буде передаватися в загальну мережу або зберігатися в акумуляторах.

Це є актуальним для країн з централізованими енергетичними системами, котрі мають великий відсоток втрат, що відображає доцільність обраної теми.

Варто розуміти, що поширення та встановлення подібних систем на окремих об'єктах потребує наявності в них автоматизованої системи управління (АСУ), що дозволить:

- збирати та відображати інформацію;
- дистанційно керувати системою;
- автоматично підтримувати задані параметри системи;
- максимально збільшити коефіцієнт корисної дії (ККД);
- уникати аварійних ситуацій.

Використанні методи досліджень ґрунтуються на методах математичного моделювання за допомогою середовища MatLab, експериментальне моделювання.

Наукова цінність полягає в створенні АСУ на базі мікроконтролера, що буде керувати процесом генерації електроенергії у турбогенераторних агрегатах (ТГА), а також створенні методики синтезу регуляторів турбодетандерних агрегатів (ТДА).

Прикладна цінність полягає у:

- створенні регулятора для систем на базі ТДА;
- зменшенні кількості аварійних ситуацій при використанні розробленої АСУ;
- створенні прототипу ТДА, для навчальних цілей.

РОЗДІЛ 1. ПРОЦЕС УТИЛІЗАЦІЇ НАДЛИШКОВОГО ГАЗУ

Беручи до уваги перспективу малої розподіленої енергетики та можливість зниження тиску не на дроселюючих системах, можна стверджувати, що турбогенераторні агрегати можна застосовувати, як альтернативу редукторам та регуляторам тиску або з ними у сукупності на газорозподільних станціях (ГРС), підприємствах або комунальних лініях [2].

Використання енергії стиснутого газу, що втрачається при зниженні тиску пунктах редукування, є важливим завданням для енергозберігаючих технологій. Для досягнення цієї мети, використовують установки утилізації енергії надлишкового тиску газу, які перетворюють її на електричну енергію на базі турбогенераторних агрегатів. Ефективним способом використання вироблюваної детандер-генераторним агрегатом електроенергії, є підключення її до мережі ГРС, освітлення, живлення системи контролю процесу та обігріву приміщень. Однак, для забезпечення високої якості електроенергії, необхідно створити автоматизовані системи підтримки обертів турбіни ТГА, оскільки швидкість турбіни безпосередньо впливає на якість електроенергії. Дослідження ТГА мають на меті покращення енергетичної ефективності установок утилізації. Основними факторами, що знижують ефективність, є зміна режимів роботи системи газопостачання та нестабільність тиску в живильному магістральному газопроводі[3].

1.1 Огляд існуючих систем утилізації надлишкового тиску газу

Для огляду існуючих систем можна звернути увагу на підприємство ГС «Солоха» ГПУ «Полтавагазвидобування» де впровадили енергетичну установку УДЕУ-2500-У2, потужністю 2500 кВт (рис. 1.1), що призначена для отримання холоду і вироблення електроенергії. Введена в експлуатацію 12.2006 р. Підставою для створення стало не використання енергії стислого газу при дроселюванні в існуючих системах[4].



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд установки УДЕУ-2500-У2

Як пишуть розробники: Підвищення технічного рівня промислових установок є важливим чинником для ефективної підготовки природного газу на родовищах. Використання автоматизованих установок комплексної підготовки газу з турбодетандерними агрегатами (ТДА) є одним зі способів досягнення цього підвищеного технічного рівня. Установки комплексної підготовки газу, які використовують ТДА для охолодження газу, здатні здійснювати низькотемпературну сепарацію без потреби в енергії зовнішніх джерел. Цей енергоефективний технологічний процес відрізняється від альтернативних методів, які включають дроселювання[4].

На рисунку 1.2 приведена принципова схема установки УДЕУ-2500, в якій газ надходить на охолодження в два теплообмінники ТО1 і ТО2, після чого поступає в турбогенераторний блок ТГ. З охолодженого газу до помірно низьких температур (-30°C), завдяки застосуванню в схемі низькотемпературної абсорбції в колонах А1 і А2, витягується 80-90 тис. тон зрідженого вуглеводневого газу на рік та одночасно виробляється електроенергія[4].

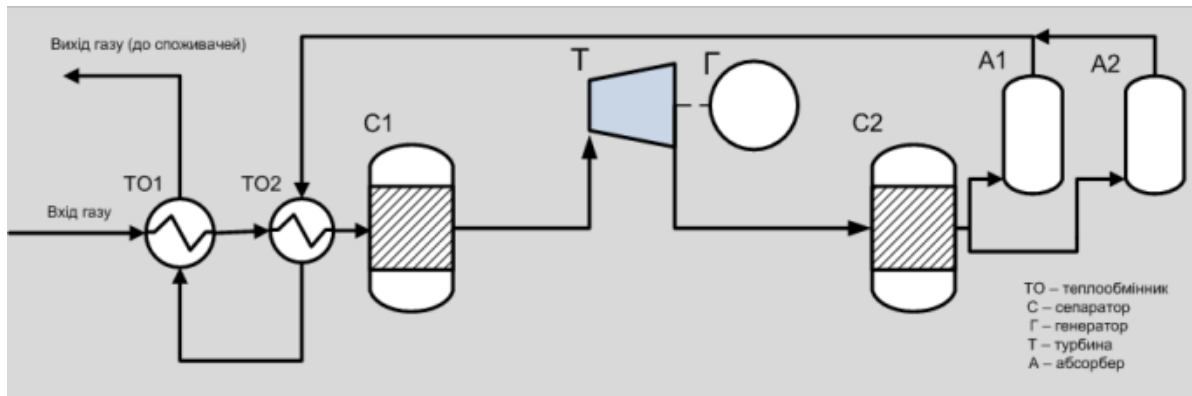


Рисунок 1.2 - Принципова схема установки

1.2 Задачі керування системою утилізації надлишкового тиску газу

Автоматизована система для підтримки обертів турбіни ТГА допомагає забезпечити якість електроенергії, що генерується. Однак, зміна витрати газу або потужності споживання може призвести до похибки утилізації енергії. Для розв'язання цієї проблеми розробляються засоби автоматизації, на базі мікропроцесорних систем та датчиків фізичних параметрів для встановлення оптимального режиму роботи та підвищення ефективності утилізації надлишкової енергії. Для цього необхідно розробити математичну модель ТГА з урахуванням особливостей процесу утилізації енергії та режимів роботи. Ця модель дозволить створити коректний регулятор для системи.

«Турбіна ТГА є нелінійним об'єктом керування, а опис таких об'єктів керування складається із нелінійних рівнянь, які є базовими для розробки регуляторів параметрів установки в цілому.»[3]. Створення експериментальної установки дозволить провести дослідження параметрів реальної системи та отримати необхідну інформацію для створення регулятора. Також ці данні допоможуть перевірити адекватність математичної моделі, та при необхідності скорегувати її параметри, що також допоможе при створенні регулятора. Експериментальний стенд допоможе встановити діапазон параметрів, в якому система функціонує стабільно, та покаже недоліки конструкції, які можна виправити при створенні нової системи.

На початку для формулювання задачі керування треба розробити функціональну схему автоматизації (ФСА), після чого визначити контури регулювання.

Розберемося які задачі керування ми отримали побудувавши ФСА (див. Додаток А):

- Підтримування уставки обертів турбіни за допомогою крокового двигуна;
- Підтримування уставки струму навантаження;
- Отримання параметри установки та процесу за допомогою давачів тиску, температури та витрат;
- Створення SCADA-системи для відображення і контролю процесів в системі.

Контур регулювання швидкості спрощено показано на рис. 1.3. Слід звернути увагу, що крім регулятора швидкості ($W_{рш}(p)$), об'єкту керування ($WT(p)$), давача швидкості ($ДШ$) та зовнішніх збурень (M_T) які гальмують турбіну є нелінійний блок затримки ($M_{зт}$) який передбачає інерційну поведінку експериментальної уставки в силу фізичних причин (наприклад, довжина трубопроводу)[1].

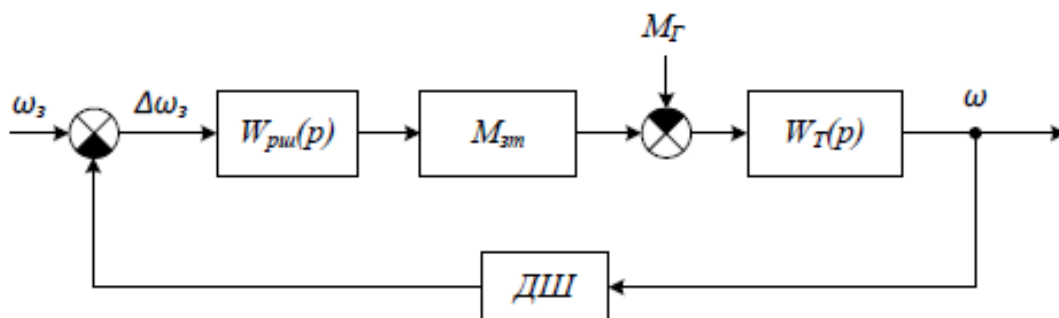


Рисунок 1.3 – Контур регулювання швидкості обертання валу турбіни

Двоконтурна система регулювання за швидкістю та струмом спрощено показано на рис. 1.4. Окрім старих складових додався внутрішній контур за струмом, що складається з блоку давача струму ($ДС$) та регулятора струму ($W_{рс}(p)$).

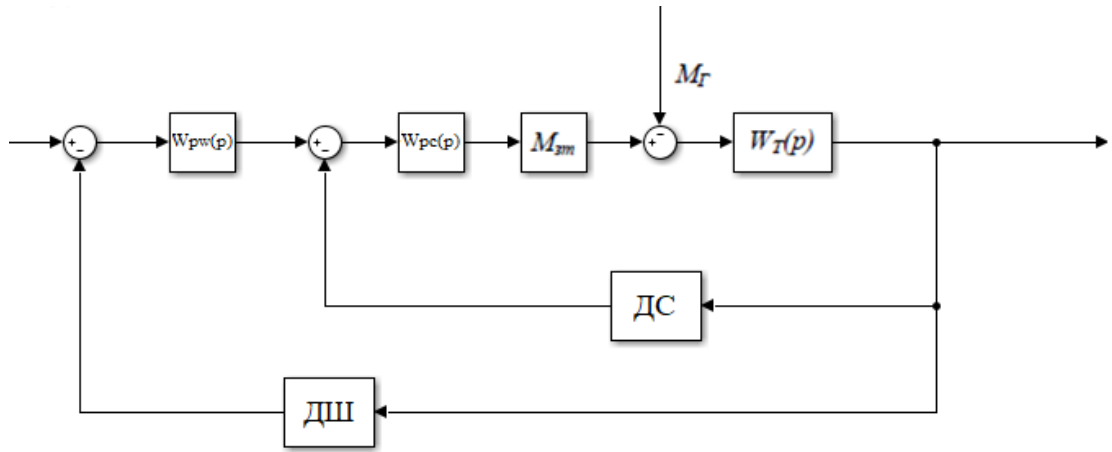


Рисунок 1.4 – Двоконтурна система регулювання швидкості обертання валу турбіни та струму навантаження.

Під час роботи ТГА треба слідкувати за значеннями напруги та струму генератора та уразі потреб відпрацьовувати збурення формуючи керуючий вплив на кроковий двигун в залежності від величини збурення(зміни навантаження генератора або зміни тиску у системі). Варто пам'ятати при керуванні, що процеси в подібних системах зазвичай мають нелінійний характер. Для покращення ефективності роботи ТГА треба також проаналізувати ефективність вибраного контуру керування.

РОЗДІЛ 2. ОПИС АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ

Вибір апаратної складової базується на технічному завданні, враховуючі необхідний діапазон вимірювання та точність значень давачів, необхідне живлення системи та вимог до виконавчих пристроїв.

2.1 Блок живлення та перетворювачі

При виборі апаратної частини треба розпочинати з пристроїв живлення, які зможуть задовільнити потреби системи. Вибір блоків живлення є надзвичайно важливим етапом при проектуванні систем автоматизації. Блоки живлення забезпечують електроенергією всі електронні пристрої в системі, включаючи контролери, датчики, виконавчі пристрої та інші компоненти.

Загальна складова обох стендів:

Блок живлення

Універсальний блок живлення S-360-36 є джерелом живлення з напругою 36 В та максимальним струмом 10 А. Він має розміри та характеристики, що відповідають стандартним вимогам для багатьох застосувань у системах автоматизації та електроніці.



Рисунок 2.1 - блок живлення S-360-36

Основні характеристики:

Блок живлення S-360-36 забезпечує стабільну напругу 36 В. Це рівень напруги, який може бути використаний для живлення різних електронних пристроїв та компонентів у системах автоматизації. Максимальний вихідний струм, який може постачати блок живлення, становить 10 А. Це означає, що він може надати достатньо потужності для живлення вимогливих пристроїв та виконавчих пристроїв, що використовуються в системі автоматизації.

Блок живлення є універсальним, що означає, що він може працювати з різними вхідними напругами (АС) від 110 В до 220 В. Це забезпечує його сумісність з різними електричними системами та стандартами, що використовуються у різних країнах. Блок живлення зазвичай має вбудовані захисні функції, такі як захист від короткого замикання, перевантаження, перенапруги та перегріву. Ці функції забезпечують безпеку пристроїв, які живляться від цього блоку живлення, і запобігають можливим пошкодженням.

DC-DC перетворювач

Модуль XL4015 DC-DC є понижуючим перетворювачем (також відомим як регулятор напруги або DC-DC знижувач) і використовується для зниження напруги. Цей модуль широко використовується в електроніці та різних проектах, де необхідно живити електронні пристрої з різними напругами.

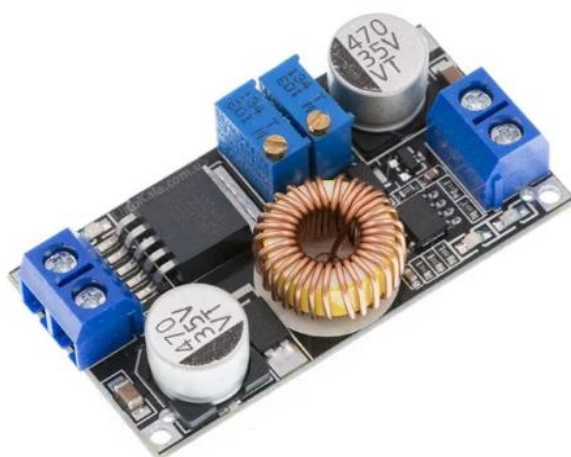


Рисунок 2.2 - Модуль XL4015 DC-DC

Основні характеристики:

Модуль XL4015 DC-DC зазвичай має широкий діапазон вхідних напруг, наприклад, від 4,5 В до 35 В. Вихідна напруга модуля може бути налаштована в діапазоні від 1,25 В до 32 В. Має можливість регулювати вихідну напругу за допомогою потенціометра, що дозволяє підлаштовувати її до потрібного значення. XL4015 DC-DC зазвичай має обмеження на максимальний вихідний струм, 5А. Має високу ефективність перетворення енергії. Зазвичай його ефективність становить близько 90% і більше. Це допомагає знизити втрати енергії та підтримувати стабільну роботу пристроїв, живлених цим модулем.

Додаткові складі для другого стенду:

АС-DC перетворювач

АС-DC перетворювач саморобний пристрій, його функцією в системі є створювати постійну напругу зі змінної яка надходить з виходу автотрансформатора.

Складається перетворювач з діодного моста, ємнісного згладжуючого фільтра на виході та запобіжника.

Основні характеристики:

Максимальна вхідна напруга 600В, максимальна вихідна напруга 400В, максимальний струм 2А.

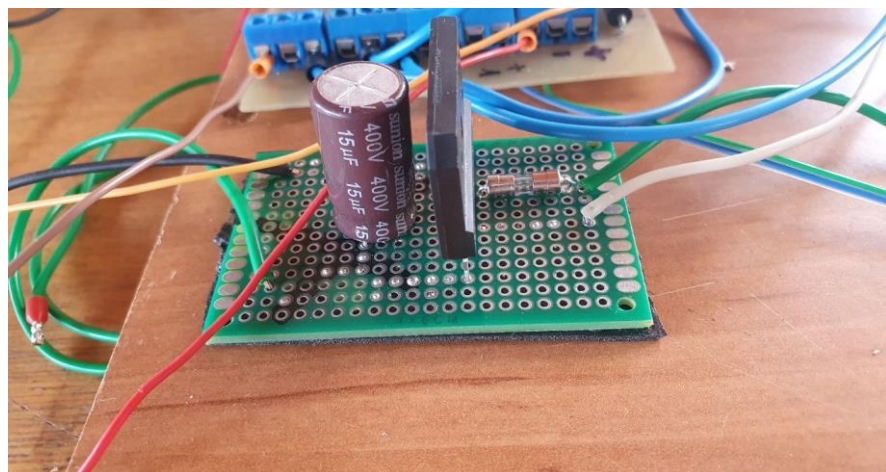


Рисунок 2.3 – АС-DC перетворювач

Автотрансформатор.

Автотрансформатор АОСН-2-220-82, має вхідну напругу в діапазоні від 0-220В, має три пар контактів з яких одна є вхідними. Максимальна вихідна напруга автотрансформатора складає 250В, номінальний струм складає 2А. Але як було вище сказано вибір ЛАТра обумовлено тим що він керується кроковим двигуном, що додає нашій системі інерційність. Конструктивне розміщення крокового двигуна над автотрансформатором було реалізовано за допомоги жорсткої несучої конструкції з 3D модель якої зображено на малюнку.

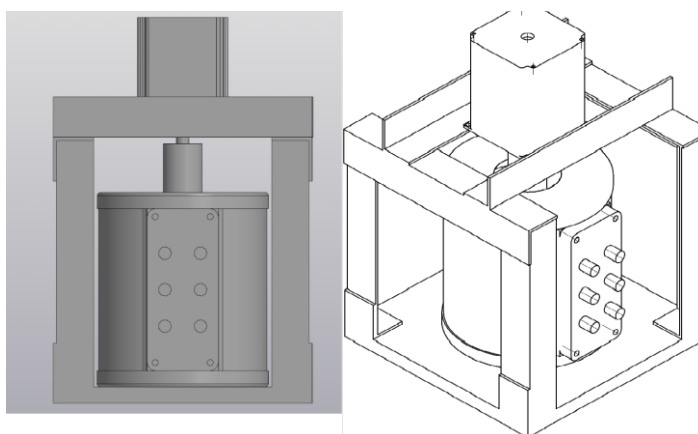


Рисунок 2.4 – 3D-модель несучої конструкції

2.2 Виконавчі пристрої

Кроковий двигун

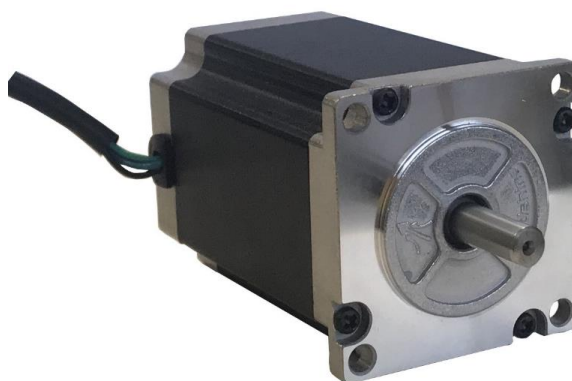


Рисунок 2.5 - Кроковий двигун NEMA23

Кроковий двигун NEMA23 є одним з популярних типів крокових двигунів і має наступні характеристики:

Кількість кроків на оберт: Кроковий двигун NEMA23 зазвичай має кількість кроків на повний оберт в діапазоні від 200 до 800 кроків(при діленні кроку 4). Це означає, що для здійснення повного обороту вісі двигуна потрібно виконати від 200 до 800 кроків.

Крутний момент: двигун має різні рівні крутного моменту. Зазвичай вони забезпечують крутний момент в діапазоні 0/8-1. NEMA23 працює при різних напругах живлення, зазвичай в діапазоні від 12 до 48 вольт. Вибір напруги залежить від конкретних потреб і вимог системи, а також від характеристик контролера, який керує двигуном.

Кроковий кут: Один крок NEMA23 складає 1.8 градуса в стандартному режимі, та 0.45 градуса на крок в режимі ділення кроку.

Двигун постійного струму:

П-31 електродвигун постійного струму колекторний призначений для роботи в електроприводах постійного струму різних механізмів з живленням як від напівпровідникових перетворювачів, так і від генераторів. Технічні характеристики П-31: Максимальна потужність – не більше 3 кВт. Частота обертання – не більше 3000 об/хв.



Рисунок 2.6 – ДПС П-31

Основні параметри двигуна П-31 представлені у таблиці 2.1:

Таблиця 2.1-Характеристики ДПС П-31

Напруга	Потужність	Струм	Частота обертання
50 В	0,45 кВт	13 А	450 об/мин
110 В	0,55 кВт	7,4 А	750 об/мин
	0,75 кВт	9,6 А	1000 об/мин
	1,4 кВт	16,6 А	1500 об/мин
	3 кВт	33,2А	3000 об/мин
220 В	0,55 кВт	3,6 А	750 об/мин
	0,75 кВт	4,61 А	1000 об/мин

2.3 Вибір узгоджувачих пристроїв

Драйвер VL-TB6600 забезпечує ефективно і точно керування кроковими двигунами. Він приймає сигнали керування з контролера або мікроконтролера і генерує відповідні сигнали для крокового двигуна. Рисунок з призначенням контактів приведено нижче.



Рисунок 2.7 – Драйвер крокового двигуна

Драйвер може працювати з двигунами з напругою живлення в діапазоні від 9 до 40 вольт, забезпечує двохфазний вихідний сигнал для крокових двигунів і підтримує різні режими керування, такі як повний крок, напівкрок і мікрокрок. Він має вбудовані захисні функції, такі як захист від перевантаження, захист від короткого замикання і захист від перегріву, що забезпечує надійну роботу і тривалу експлуатацію.

Один з важливих параметрів драйвера VL-TB6600 - це його максимальний вихідний струм, який може досягати значення до 4 або 5 ампер. Це робить його сумісним з більшістю типових крокових двигунів. Драйвер також має регульований потенціометр для налаштування максимального струму, що дозволяє адаптувати його до потреб конкретного двигуна.

VL-TB6600 має роз'єми для підключення живлення, сигналів керування та підключення крокового двигуна. Він також має LED-індикатори для відображення стану живлення і сигналів керування.

2.4 Вибір давачів

Давач тиску

На рисунку 2.8 представлений обраний давач тиску:



Рисунок 2.8 – Давач тиску MBS 1700 DANFOSS

Перетворювачі тиску MBS 1700 складаються з первинного перетворювача та електронного пристрою. Середовище під тиском подається в камеру первинного перетворювача і деформує його мембрану, що призводить до зміни електричного опору розташованих на ній напівпровідникових тензорезисторів, включених в ланцюг дільника напруги, в результаті чого первинний перетворювач видає сигнал напруги. Електронний пристрій перетворює електричний сигнал на уніфікований струмовий вихідний сигнал.

Основні параметри давача представлені у таблиці 2.2:

Таблиця 2.2 – Параметри давача тиску MBS 1700 DANFOSS

Робоче середовище	Повітря, газу, рідини (в т.ч. олії).
Тип вимірюваного тиску	відносне
Діапазони вимірювань, бар	0 – 6
Діапазон допустимих температур робочого середовища, °C	від -40 до 85
Межа основної наведеної похибки, що допускається	$\leq \pm 0,5$; 1 діапазону вимірів
Додаткова похибка на зміну температури навколишнього повітря поза діапазоном компенсованих температур	$\pm 0,2\%$ діапазону вимірювань/ 10°C
Час реакції, мс	< 4

Вихідний сигнал	4 - 20 мА (стандартно)
Напруга живлення $U_{жив}$, В	9 - 32

Для отримання інформації з датчика ми застосуємо навантажувальний резистор 250 Ом, через який і буде проходити вихідний струм датчика, так звана струмова петля. Отримане падіння напруги на резисторі і буде сигналом отриманим мікроконтролером та його інтегрованим АЦП. При проходженні через резистор 4 мА падіння на ньому буде дорівнювати 1 В, при 20 мА падіння буде дорівнювати 5В.

Датчик температури

На рисунку 2.9 представлений обраний датчик температури



Рисунок 2.9 – Датчик температури DS18B20

Основні параметри датчика представлені у таблиці 2.3:

Таблиця 2.3 - Основні параметри датчика температури

Напруга живлення	3.0-5.5 В
Діапазон температур	-55°C-+125°C
Точність показань температури	0.5 °C
Крок свідчень	0.0625 °C

Інтерфейс	1-Wire
Споживаний струм	1 мА

Цифровий код, що зчитується з приладу, є прямим безпосереднім кодом вимірюючого значення температури і не потребує додаткових перетворень. Програмована користувачем роздільна здатність вбудованого АЦП може бути змінена в діапазоні від 9 до 12 розрядів вихідного коду. Максимальний час повного 12-розрядного перетворення ~750 мс (при роздільній здатності 12 розрядів). Для підключення потрібен резистор 4.7 кОм.

Давач струму:

Вимірювання і контроль струму, що протікає в обмотці збудження, є дуже важливими для отримання правдивих динамічних характеристик.

Вимоги до давача:

- Вимірювання струму до 500мА при напрузі 0-310В
- Точність вимірювання 5%
- Модульність давача
- Вимірювання АС, DC

Один з найпростіших методів вимірювання струму - використання резистора з малим опором, - шунт навантаженням і загальним проводом, падіння напруги на якому пропорційно струму, що протікає. Попри те що, що це метод дуже простий у реалізації, точність вимірів залишає бажати кращого, т.к. опір шунта залежить від температури, яка не є постійною. Крім того, такий метод не дозволяє організувати гальванічну розв'язку між навантаженням та вимірювачем струму, що дуже важливо у додатках, де навантаження живиться високою напругою. Давач струму ACS712 заснований на ефекті Холла, суть якого в наступному: якщо провідник зі струмом поміщений в магнітне поле, на його краях виникає ЕРС, спрямована перпендикулярно до напрямку струму та напрямку магнітного поля.

Давач струму ACS712 (рис. 2.10) складається з давач Холла та мідного провідника. Протікає через мідний провідник струм створює магнітне поле, яке сприймається елементом Холла. Магнітне поле лінійно залежить від сили струму.

ACS712 датчик побудований на ефекті Холла і має лінійну залежність вимірюваного струму та вихідної сигнальної напруги. Рівень вихідної напруги сенсора пропорційно залежить від струму, що вимірюється. Діапазон виміру від -5 А до 5 А. Чутливість – 185 мВ/А. За відсутності струму вихідна напруга дорівнюватиме половині напруги живлення. Давач ACS712 живиться від $+5$ В і має вихід напруги. При струмі рівному нулю напруга на виході для ACS712 дорівнює $2,5$ В і відхиляється або ближче до нуля або ближче до напруги живлення - залежить від напрямку протікання струму. ACS712 забезпечує економне та прецизійне рішення для вимірювання АС та DC струму. Корпус пристрою забезпечує зручну реалізацію користувача. Пристрій складається з лінійного прецизійного давача струму на базі ефекту Холла з мідним провідником на нижній частині. Прикладається до мідного провідника струм створює магнітне поле, яке вловлюється давачем, яке перетворюється в пропорційну напругу. Точність пристрою оптимізована за рахунок безпосередньої близькості магнітного сигналу до датчика. Напруга забезпечується BiCMOS Hall мікросхемою з низьким зміщенням та заводськими налаштуваннями точності.



Рисунок 2.10 - Давач струму ACS712

Як заявлено виробником рівень завад не перевищує 40 мА(якщо конвертувати в струм), але при практичному використанні давача рівень завад був в діапазоні $100-200$ мА. Такий рівень завад не дає змоги коректно вимірювати струму який проходить через обмотку збудження з поставленою точністю.

Для підвищення завадостійкості, було замінено заводський ємнісний фільтр 1 нФ на фільтр ємністю 1 мкФ, це дало результат рівень завад знизився до 80 мА.

Проаналізувавши характер завад, було з'ясовано що їх створював розташований поруч автотрансформатор. Так як віддаляти датчик струму від системи, та збільшувати довжину провідників не є доцільно, було застосовано цифровий фільтр реалізований на базі мікроконтролера.

Схема підключення датчика представлена на рис. 2.11:

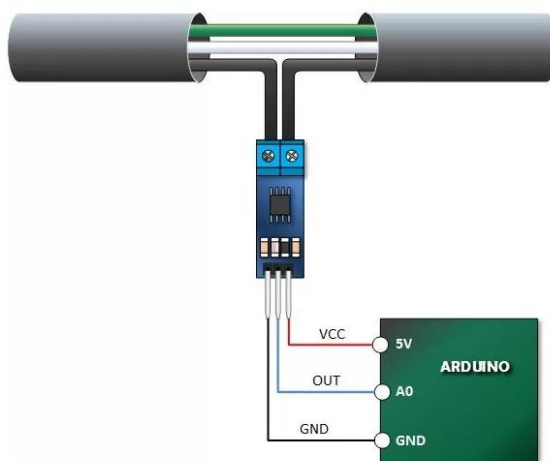


Рисунок 2.11- Типове підключення датчика

Датчик швидкості:

На рисунку 2.12 представлений обраний датчик швидкості:



Рисунок 2.12 - Оптичний поворотний енкадер LPD3806-600BM

Основні параметри датчика представлені у таблиці 2.4:

Таблиця 2.4 - Основні параметри датчика швидкості

Кількість імпульсів на оберт	600 імпульсів/оберт
Робоча напруга	DC5-24V
Максимальна механічна швидкість	5000 об/хв

Це електромеханічний пристрій, призначений для перетворення кутового положення валу або осі в електричні сигнали. Інкрементний енкодер при обертанні формує імпульси, число яких пропорційне куту повороту. Підрахунок числа цих імпульсів дає величину угла повороту валу енкодера щодо його початкового положення. Цей тип енкодерів не формує вихідних імпульсів, коли його вал перебуває у спокої.

2.5 Вибір мікроконтролера

Мікроконтролер Arduino Nano вважається одним з найкращих виборів для створення експериментального стенду з різних причин. Нижче наведено деякі з найвагоміших переваг Arduino Nano в контексті створення експериментального стенду:

Компактний розмір і зручність: Arduino Nano має невеликі розміри, що дозволяє легко і зручно вбудовувати його в експериментальні стенди. Завдяки своєму компактному дизайну, він може бути легко встановлений у маленьких макетах, прототипах або стендах з обмеженим простором.

Велика спільнота та підтримка: Arduino Nano є однією з найпопулярніших моделей мікроконтролерів у спільноті Arduino.

Це означає, що ви отримаєте велику кількість документації, прикладів коду, бібліотек і підтримки від спільноти. Якщо у вас виникають питання або проблеми, ви зможете знайти відповіді і підтримку в онлайн-форумах та ресурсах, що присвячені Arduino.

Легкість використання: Arduino Nano має простий інтерфейс, інтуїтивно зрозумілий код та просту схему підключення.

Для програмування мікроконтролера можна використовувати Arduino IDE, інтегроване середовище розробки, яке має дружній інтерфейс і забезпечує легкість написання, завантаження та відлагодження коду.

Основні параметри мікроконтролера представлені у таблиці (2.5):

Таблиця 2.5 – Основні параметри обраного мікроконтролера

Параметр	Значення
Напруга живлення	5 В
Робочий струм	40 мА
Вихідні струмові межі	20 мА (на кожен пін)
Цифрові входи/виходи	14
Аналогові входи	8
Пам'ять EEPROM	1 кБ
Частота тактування	16 МГц

РОЗДІЛ 3. ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

На рис 3.1 наведена проста схема утилізаційної установки опис дії якого написаний в розділі 1:

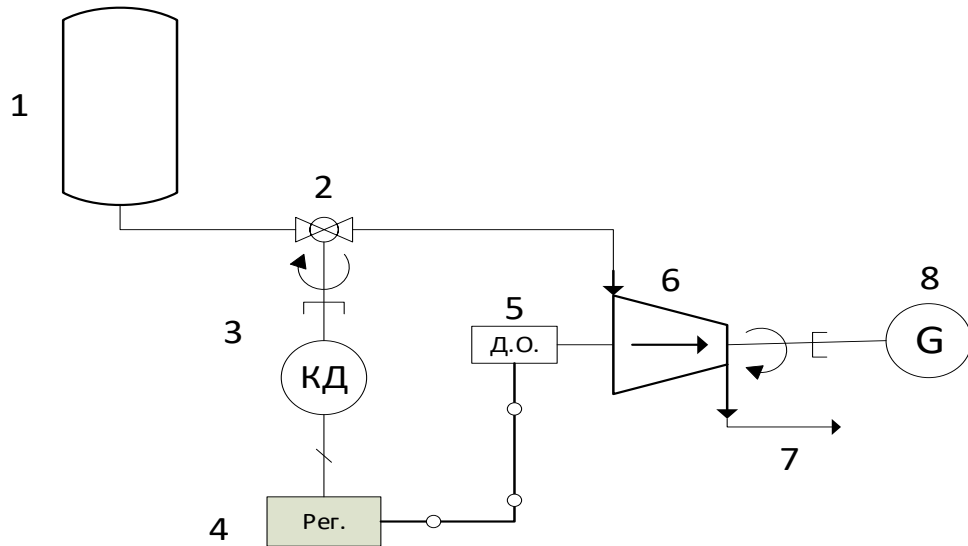


Рисунок 3.1 – Умовна схема турбогенераторного агрегату

Повітря під тиском надходить з газової магістралі або компресора **1**, який можна використати для експериментальної установки. Повітря проходить через засувку **2** шток якої, механічно з'єднаний з кроковим двигуном **3**, який керується мікропроцесором **4**, що відповідає за регулювання тиску на вході турбіни **6**. Давач обертів **5** дає інформацію про швидкість та буде слугувати зворотнім зв'язком при керуванні кроковим двигуном. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) мікропроцесорної системи дасть змогу вимірювати різницю потенціалів на виході електрогенератора **8** або значення струму у навантаженні.

Для отримання більшої інформації про процес роботи установки будуть використанні давачі тиску, витрат, що під'єднані до аналогових входів мікропроцесорної системи.

3.1 Математичний опис об'єкту керування системи утилізації надлишкового тиску газу

Проаналізувавши процес утилізації надлишкового тиску, можна представити об'єкт керування (ОК) у вигляді схеми (рис. 3.2):

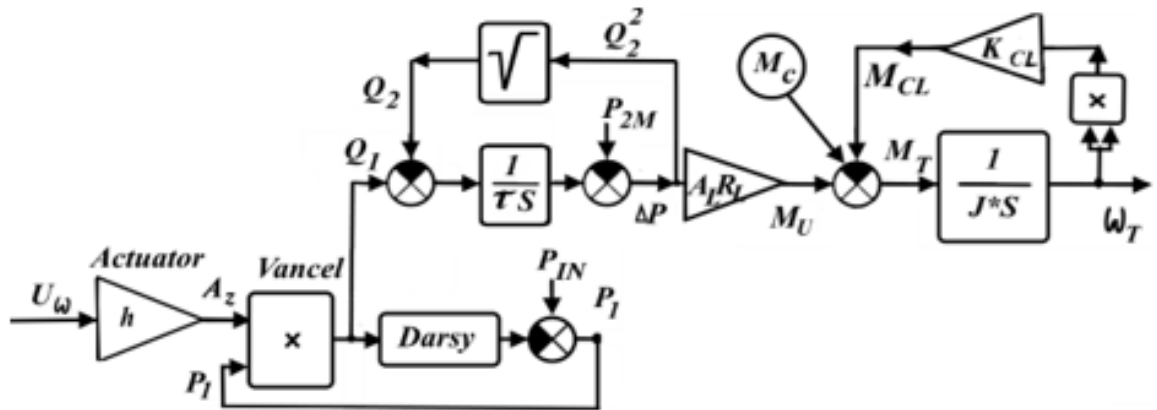


Рисунок 3.1 – Схема моделі об'єкту керування

Схема складається з:

- Блоку **Actuator**, що промодельює привод регульованого дроселя;
- Блоку **Vancel**, що промодельює зміну параметрів потоку газу;
- Блоку **Darsy**, що промодельює втрати тиску при поширенні потоку газу по трубопроводу.

Під дією керуючого сигналу U_ω на засувку буде змінюватися положення штока h і переріз засувки A_z . Під час зміни перерізу буде змінюватися тиск перед засувкою P_1 і витрата потоку Q_1 газу [3].

Параметром, що визначає динаміку зміни перерізу дроселя A_z є час переміщення запірною елемента від крайніх точок свого діапазону. Щоб промодельювати привод засувки використовується ланка інтегратора з обмеженнями, аналогічними діапазону штоку. В цій моделі засувки також враховується коефіцієнт передачі редуктора та його люфт, котрі впливають на динаміку та точність позиціонування приводу засувки [3].

3.2 Уточнення математичної моделі

На рис. 3.3 показана схема створена у середовищі MATLAB для перевірки математичної моделі. За допомогою зміни ходу штоку h в системі можна регулювати об'єм газу, що надходить в турбіни, тим самим і її швидкість обертання.

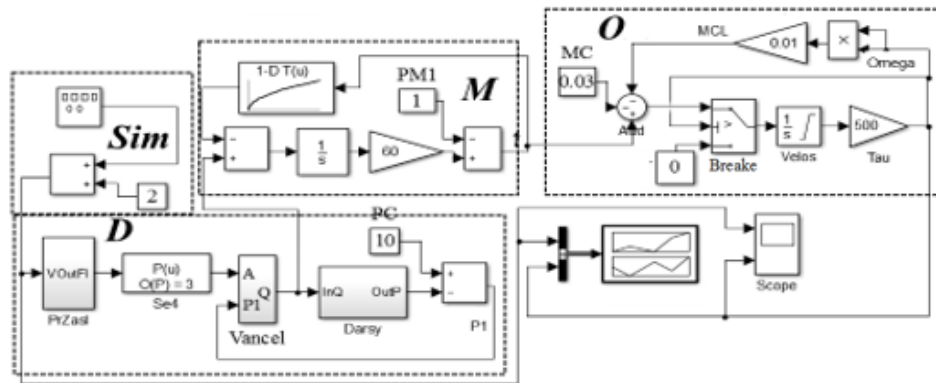


Рисунок 3.3 – Схема моделі установки ТГА у середовищі MATLAB

Модель складається з:

- Блок **D**, котрий моделює зміну положення засувки для керування потоком газу;
- Блок **M**, що відображає динаміку зміни параметрів потоку і моменту турбіни;
- Блок **O**, котрий відображає значення швидкості обертання турбіни за співвідношеннями;
- Блоку **Sim**, за допомогою проводиться керування швидкістю обертання.

Нелінійний елемент *Breake* в блоці **O** потрібен для фіксації зупинки турбіни $Q = 0$ [1].

Осцилограми на рис. 3.4 відображає залежність швидкості обертання від початкового положення засувки h .

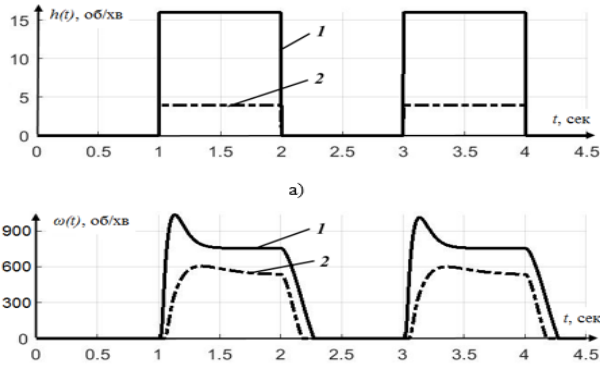


Рисунок 3.4 – Осцилограми залежності положення засувки (а) та зміни швидкості обертання турбіни (б): 1 – $h_{max} = 16$; 2 – $h_{max} = 4$.

Нелінійність об'єкта підтверджується осцилограмами з котрих видно, що при різних початкових значеннях перерізу засувки залежить динаміка зміни швидкості на початку роботи.

Для вирішення завдання лінеаризації об'єкта можна вирішити скориставшись програмою MATLAB «*Linear Analysis Points*».

На початку отримаємо передавальну функцію (3.1): залежності ходу штока та моменту турбіни, де вхід блоку **D** буде слугувати входом, а вихід блоку **M** – виходом [3].

За допомогою MATLAB «*Linear Analysis Points*» отримаємо рівняння третього порядку:

$$W_{Mi}(s) = \frac{b_{1i}s + b_{0i}}{s^3 + a_{2i}s^2 + a_{1i}s + a_{0i}}, \quad (3.1)$$

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

На рис. 3.5 відображено сімейство характеристик аналогічні сімейству передавальних функцій (3.1), у вигляді діаграм Боде.

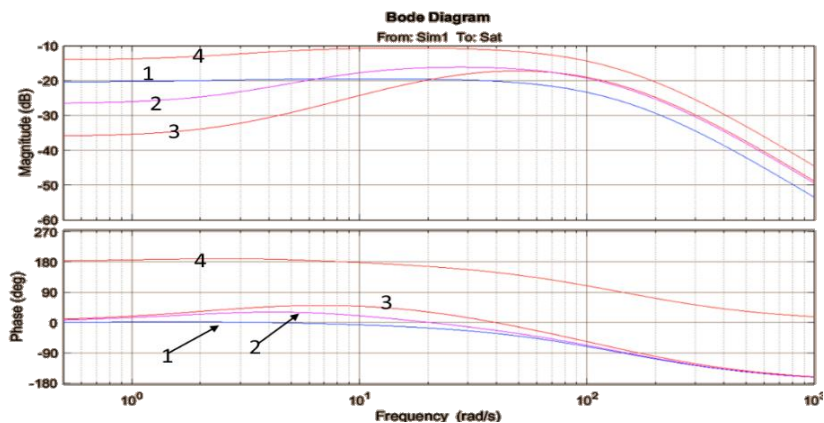


Рисунок 3.5 – Діаграми Бode при різних положеннях засувки:

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

Зробивши аналогічні дії отримаємо сімейство передатних функцій для блоку **O** (3.2). Котрим відповідає аперіодична ланка першого порядку з різними коефіцієнтами передачі і постійними часу:

$$W_{Oi}(s) = \frac{b_{0i}}{a_{1i}s + a_{0i}} \quad (3.2)$$

Результуюча передатна функція об'єкта управління має вигляд (3.3):

$$W_{DTi}(s) = W_{Mi}(s) \cdot M_{Oi}(s) \quad (3.3)$$

Аналітичний опис моделі може бути використано для створення регулятора. Особливістю досліджуваного ОК є різні по характеру процеси та збурення які присутні при утилізації тиску надлишкового газу. Такі, як аеродинамічні процеси із збурення потоків газу, та електромеханічні із збуреннями з боку навантаження [3].

3.3 Оцінка адекватності моделі

За схемою на [рис. 4.9](#) зібрана експериментальна установка для оцінки адекватності моделі, шляхом зняття перехідних характеристик каналу «хід штока - швидкість обертання турбіни».

На [рис. 3.6](#) відображено сімейство перехідних характеристик каналу, отримане при зміні поперечного перерізу засувки на вході в турбіну. Вхідний тиск на вході засувки під час проведення дослідів становив 4 бар. Тривалість відкриття клапана вибиралася довільно.

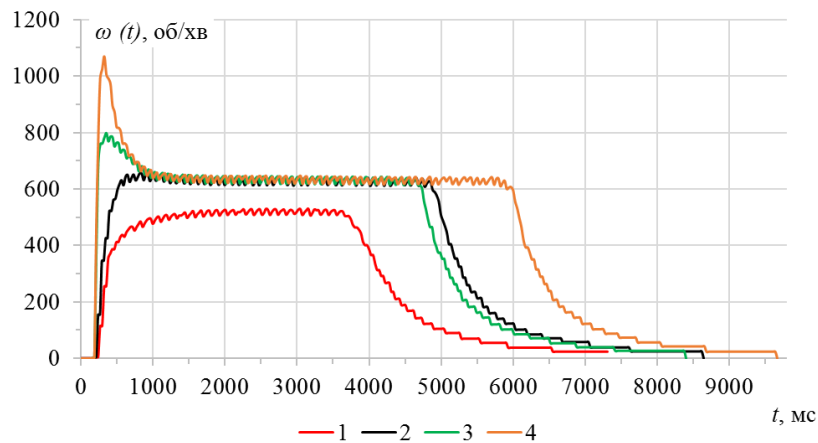


Рисунок 3.6 – Сімейство перехідних характеристик «хід штока - швидкість обертання турбіни» при різних положеннях дросельної засувки

На [рис. 3.6](#) крива 1 відповідає значенню 25% від перерізу повного відкриття засувки; крива 2 – 50% перерізу; крива 3 – 75%; крива 4 – повне відкриття дросельної засувки.

Порівнявши характеристики отримані експериментальним шляхом ([рис. 3.6](#)) з характеристики отримані під час моделювання ([рис. 3.4](#)) можна стверджувати достовірність математичної моделі.

РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Як було згадано раніше особливістю досліджуваного ОК є різні по характеру аеродинамічні та електромеханічні процеси та збурення які присутні при утилізації тиску надлишкового газу.

В даний момент головним завданням є оцінити стабілізацію швидкості обертання при аеродинамічних та механічних збуреннях.

4.1 Задачі регулятора та його синтез

Треба звернути увагу на характер коливань отриманих при електромеханічних збуреннях, оскільки від цього буде залежати вибір між складністю реалізації регулятора та якістю регулювання.

Через нелінійність ОК підбір методу створення регулятора буде відбуватися серед адаптивних регуляторів.

Можна сказати, що неофіційні нормативні вимоги включають мінімізацію нелінійних ефектів ОС за наявності збурень параметрів повітряного потоку та навантажень генератора. Задача керування визначається як коригування параметрів регулятора в реальному масштабі часу за умови порушення параметрів потоку газу.

Для синтезу ПІД-регуляторів широко використовуються методи кореневих діаграм або діаграм Боде, які є частиною інструментарію MATLAB Simulink і автоматизовані в цьому середовищі. Наявність лінеаризованої моделі досліджуваного ОК [2], представленої рядом передавальних функцій (діаграми Боде), дає змогу встановити відповідний ряд логарифмічних амплітудно-частотних характеристик керованого об'єкта із замкнутим зворотним зв'язком. на рис. 3.1 показано, як змінюється графік Боде моделі обертання турбіни детандера в залежності від положення штока дроселя h .

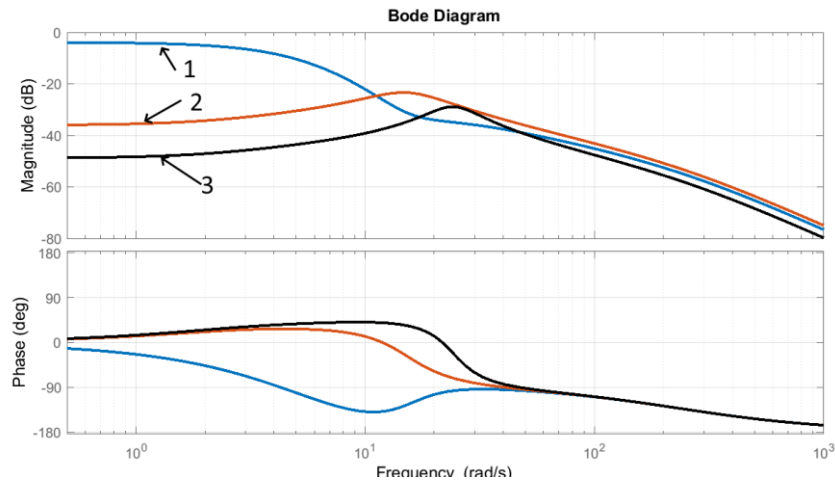


Рисунок 4.1 – Діаграми Боді для різних положень h дросельної засувки:
крива 1 – $h=4$; крива 2 – $h=10$; крива 3 – $h=16$

Згадане сімейство передатних функцій будується відповідно до сімейства операторних функцій $G(s)$ (4.1) об'єкту керування «вхід-вихід» по керуючому впливу, що знаходиться з $W_{Mi}(s)$ (4.2) передатної функції «витрати потоку-момент» та $W_{Ti}(s)$ (4.3) передатної функції «момент-швидкість обертання»

$$G_i(s) = W_{Mi}(s) \cdot W_{Ti}(s), \quad (4.1)$$

$$W_{Mi}(s) = \frac{b_{1i} + b_{0i}}{s^4 + a_{3i}s^3 + a_{2i}s^2 + a_{1i}s + a_{0i}} \quad (4.2)$$

$$W_{Ti}(s) = \frac{b_{0i}}{a_{1i}s + a_{0i}} \quad (4.3)$$

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

Подання цієї передатної функції «вхід-вихід» необхідне для того, щоб показати збурення в моменти опору обертання турбіни (рис. 3.2). Ці порушення викликані зміною електричного навантаження генератора ТГА.

Регулювання швидкості турбіни здійснюється з допомогою компенсатора – регулятора, який характеризується передатною функцією $C_i(s)$. При включенні

компенсатора в контур керування швидкістю обертання із одиничним зворотнім зв'язком отримуємо загальну передатну функцію $W_K(s)$ (4.4):

$$W_{Ki}(s) = \frac{C_i(s)G_i(s)}{1+C_i(s)G_i(s)} \quad (4.4)$$

Можна використати *SISO Design Tool* для автоматизації налаштування коректора C .

Найпоширенішим методом досягнення необхідної стабільності та швидкості перехідних процесів на промислових об'єктах є оцінка перехідних і частотних характеристик. У той же час ми отримуємо прямий показник якості керування з перехідних характеристик і використовуємо запас стійкості по фазі як показник стійкості. Показником швидкості перехідного процесу ОК є частота зрізу частотної характеристики. Методи модифікації для налаштування параметрів регулятора відображаються у графічній структурі на діаграмі Бode досліджуваного об'єкта керування[1].

Передаточна функція компенсатора $C(s)$ формується після аналізу параметрів астатизму, перерегулювання та швидкодії. За допомогою *SISO Design Tool* можна отримати коефіцієнти відповідного ПД-регулятора тільки в тому випадку, якщо передатна функція компенсатора $S_i(s)$ є раціональною. У інших випадках налаштувань, коли в результаті синтезу сформована складна структура коректора $C_i(s)$, реалізувати коректор, а тим більше такий ПД-регулятор, на мікропроцесорних засобах проблематично.

4.2 Експериментальна перевірка регулятора

Альтернативним варіантом регулювання швидкості стає релейний регулятор (РР) [5]. Для побудови такого РР приймається структура 3-х позиційного РР (4.5), функціональна залежність від похибки керування ϵ якого має вигляд:

$$U_{\max}, X > \varepsilon$$

$$F(X) = Uz, -\varepsilon < X < \varepsilon \quad (4.5)$$

$$-U_{\max}, X < -\varepsilon$$

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

Параметричний синтез РР зазвичай виконується після з'ясування рівня стійкості моделі ОК при ступінчатих керуючих впливах. Наступні експерименти по налаштуванню регулятора для налаштування відпрацювань збурень процесу обертання турбіни. Також передбачається, що всі стійкі та нестійкі коливання визначаються на осцилограмі процесу регулювання швидкості.

Перевірка результатів здійснювалася по перехідній функції регулювання швидкості обертання.

Верифікація результатів налаштування параметрів РР швидкості здійснюється по перехідній функції регулювання швидкості обертання. Спочатку для перевірки якості регулятора використовувалася модель в MATLAB Simulink (рис. 3.3), до якої додали генератор сигналів різної форми для імітації збурень. Під час вибору параметрів спиралися на рівень згасання збурень та точність утримання уставки по швидкості обертання.

Після чого другим етапом налаштування, є налаштування на експериментальній установці (рис 4.9) опис дії якого написаний в розділі 4.

Основною метою досліджень на експериментальній установці є отримання експериментальних даних щодо динаміки реального ОК та підтвердження припущень, що виникли при роботі з математичною моделлю та побудові регулятора.

При виборі регулятора для математичної моделі записалися на трьохпозиційному РР (4.5), через зазначену раніше складність синтезу ПД-регулятора для нашого ОК.

Результат моделювання в *MATLAB Simulink* при використанні РР відображений на рис. 4.2. Також для оцінки ефективності РР в експериментальній

установці ТГА (рис. 4.9) також реалізовано РР швидкості за допомогою мікропроцесорної системи (Додатку Б), яка потім візуалізує значення (рис. 4.3) на моніторі процесу (рис. 4.9) та у вигляді таблиці даних.

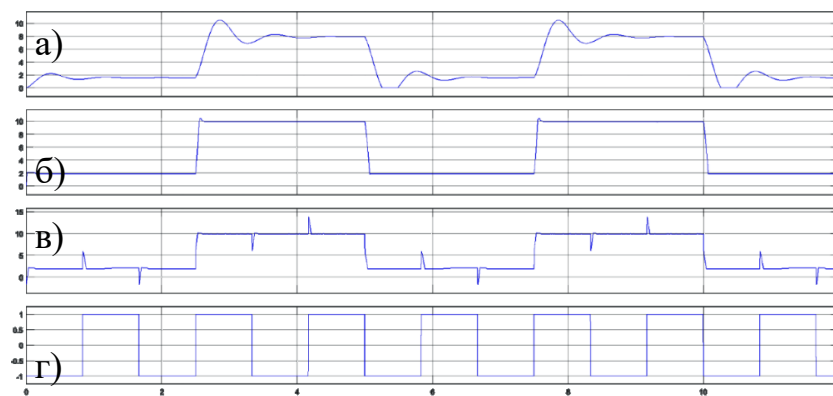


Рисунок 4.2 – Зміни швидкості обертання при навантаженнях:

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

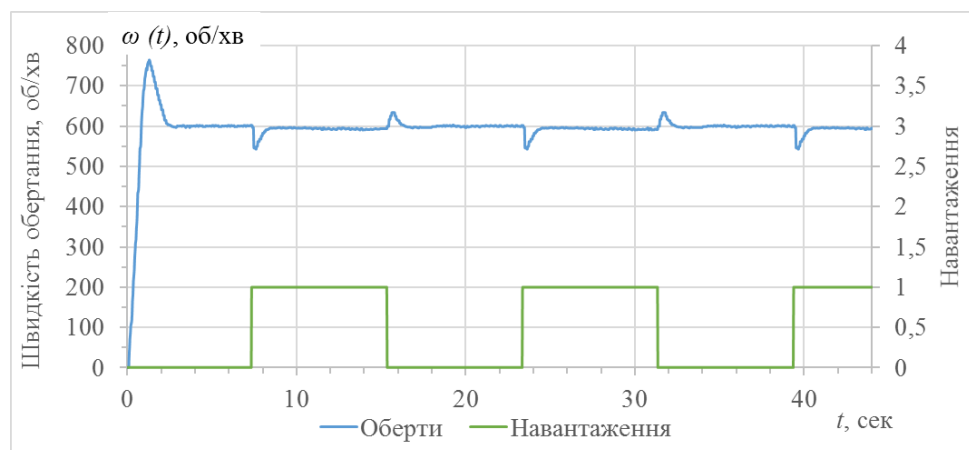


Рисунок 4.3 – Зміни швидкості обертання турбіни та стан навантаження турбіни

З рис. 4.2 та рис. 4.3 видно результати математичного та експериментального моделювання збігаються. З цього слідує використана методика синтезу регуляторів для засувки турбін є дієвою та дозволяє отримати параметри регулятора, для використання у інших системах генерації електроенергії, на базі турбіни.

Узагальнюючи результати досліджень, слід зауважити, що головною метою цієї роботи є оцінка можливостей керування параметрами ТГА на базі мікропроцесорних засобів автоматизації та розроблення методики синтезу регуляторів за необхідними параметрами системи.

У будь якому разі модельне представлення згаданих турбін пов'язано з нелінійними рівняннями, зв'язок з якими визначає методи структурно-параметричного синтезу регуляторів ОК.

Враховуючи завдання практичної реалізації регулятора на мікропроцесорній системі, доведено доцільність редукування передатної функції. Треба пам'ятати, що для використання регулятора швидкості обертання, потрібно забезпечити просте налаштування та надійне функціонування при впливі збурень.

При цьому приймається до уваги, що запропонований РР повинен забезпечувати не тільки можливість налаштувань під параметри конкретної установки утилізації але й передбачає стабілізацію режимів при збуреннях параметрів газового потоку. До цього часу РР використовувалися для ОК, в яких керуючі впливи на параметри відпрацьовувалися в залежності від сталої часу.

Результати експериментальних досліджень показали, що використання позиційних регуляторів, які побудовані на мікропроцесорах та сучасних комутаційних пристроях, може забезпечити динаміку регулювання на рівні традиційних ПД-регуляторів. Для досягнення цих параметрів стабілізації використовують точний датчик швидкості обертання турбіни та мікропроцесорні засоби керування кроковим двигуном, який є приводом дросельної засувки. Методи дослідження моделі малопотужної турбіни можна застосувати для побудови регуляторів для інших турбін такого типу або турбін малих гідроелектростанцій. Важливим результатом є забезпечення стабільності обертання турбіни в умовах збурень. Це дає можливість компенсувати непередбачувані збурення, що виникають від споживачів мережі, та знизити жорсткість вимог до параметрів регулятора системи "турбіна-електрогенератор", що особливо важливо для компенсації випадкових збурень, що надходять із мережі споживання.

В результаті цих досліджень було встановлено, що використання запропонованого регулятора позиції, побудованого на мікропроцесорних засобах та сучасних комутаційних пристроях, забезпечує стабілізацію швидкості обертання турбіни при дії збурень.

4.3 Інформаційно-вимірювальна система стану

Для покращення збору і візуалізації можна замінити плинний метод збору інформації на SCADA-систему (рис. 4.4).

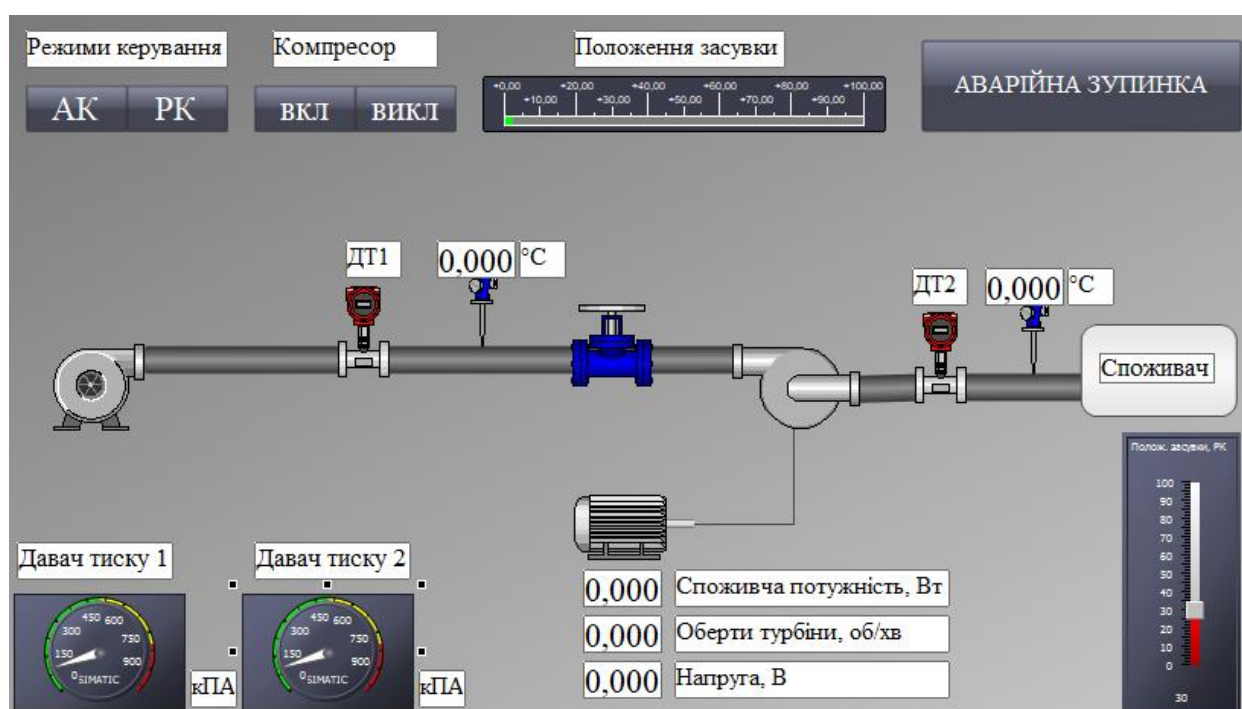


Рисунок 4.4 – Інтерфейс SCADA-системи

Обрана система зможе виконувати:

- Запис, обробку і зберігання даних, отриманих від мікропроцесорної системи, в табличному вигляді;
- Дистанційне керування в ручному режимі або задання уставки для автоматичного режиму;
- Візуалізація процесів, що проходять в системі.

4.4 Підключення до SCADA-системи

Сучасні SCADA - системи не обмежують вибір апаратури нижнього рівня (контролерів), через наявність драйверів або різноманіття пристроїв вводу/виводу.

Для під'єднання пристроїв введення/виводу до SCADA - системи в даний час використовуються такі механізми:

- 1) динамічний обмін даними (DDE);
- 2) власні протоколи фірм-виробників SCADA - систем;
- 3) OPC - сервер.

Протокол DDE.

Протокол DDE застосовувався в перших людино - машинних інтерфейсах для обміну даних між системою та пристроями типу ПЛК. Для подолання недоліків DDE, розробники пропонували свої власні рішення (протоколи), але подібні рішення призводять до низки проблем:

- 1) для кожної SCADA - системи пишеться свій драйвер для обміну даними з контролером;
- 2) Два контролера не зможуть мати доступ до системи, оскільки кожен з них підтримує обмін даними лише зі своєю системою.

OPC – сервер.

Основна мета стандарту OPC (OLE for Process Control) полягає у створенні доступу до даних з будь-якого пристрою. OPC дозволяє забезпечити клієнтів даними з будь-якого промислового контролера. При поширенні OPC - стандарту у розробників з'явиться можливість створювати системи контролю не спираючись на необхідність підбору контролерів для зв'язку нижнього рівня системи з верхнім рівнем.

Застосування програмного забезпечення, що відповідає специфікації OPC, забезпечує незалежність споживачів від наявності або відсутності драйверів або протоколів, що дозволяє вибирати обладнання та програмне забезпечення, яке найбільше відповідає реальним потребам.

При використанні OPC-сервера він за допомогою вбудованого драйвера отримує дані з нижнього рівня, аналізує їх, встановлює ознаку якості та мітку часу, і передає дані за інтерфейсом OPC клієнту. OPC-клієнтом є SCADA система.

Стандарт обміну даними OPC виходить з схеми Клієнт-Сервер. Це дозволяє підключати багато клієнтів до одного серверу. І навпаки — цей стандарт дозволяє використовувати одним клієнтом кілька OPC — серверів (рис. 4.5).

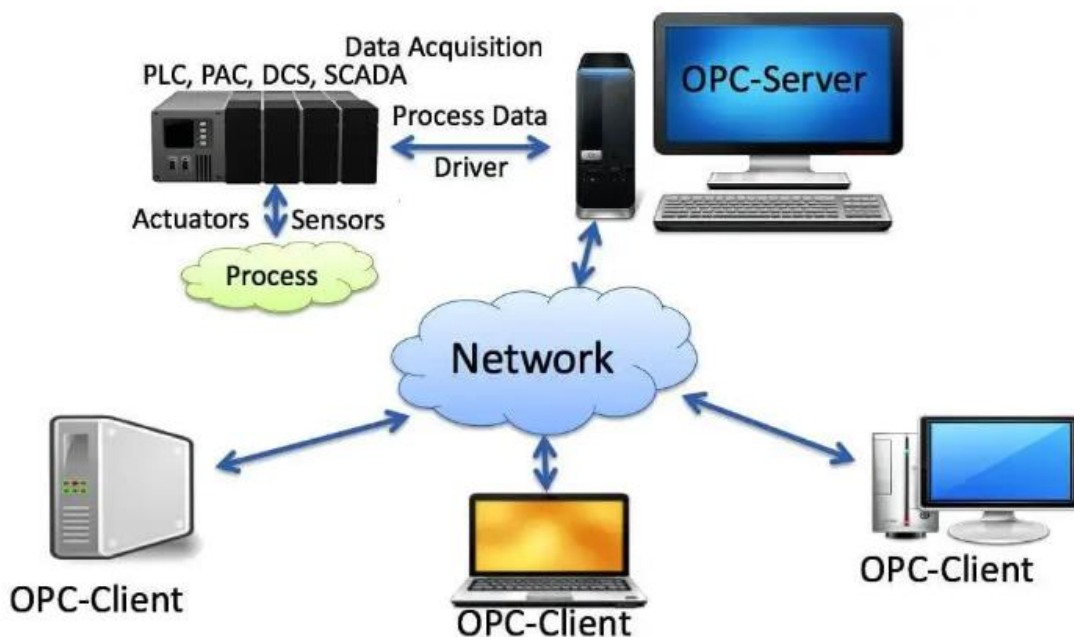


Рисунок 4.5 – Обмін даними OPC – серверу та клієнтів

ПРОТОКОЛ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ MODBUS/RTU

В нашому випадку ми використовуємо SCADA-систему WinCC від Siemens, що дозволяє нам робити обмін даними без використання OPC-сервера, а на пряму використовуючи протокол передачі даних MODBUS/RTU, використовуючи модуль RS-485 та конвертер RS-485/USB (рис. 4.6).

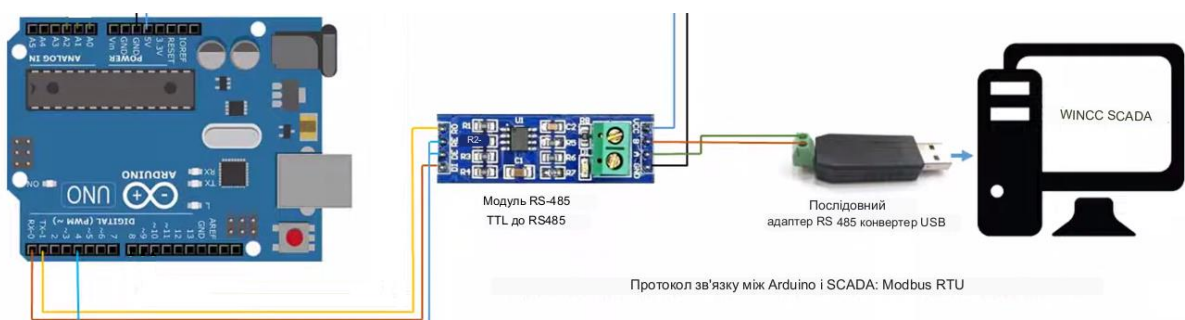


Рисунок 4.6 – Зв’язок контролера та SCADA-системи

Для передачі даних використовується двопровідний (напівдуплексний) інтерфейс. Протокол ModBus є протоколом типу “провідний-відомий”, тобто. в один і той же час до шини підключено може бути тільки один провідний пристрій (майстер) та один або декілька (до 247) ведених пристроїв (слейви). Передача даних завжди ініціюється провідним пристроєм. Відомі пристрої можуть відповідати тільки на запити ведучого.

Провідний пристрій одночасно може ініціювати запити до конкретного веденого пристрої (unicast mode) або всім провідним пристроям (broadcast mode – широкомовний запит). Ведені пристрої мережі не відповідають на широкомовні запити, а лише приймають їх.

Протокол ModBus передбачає використання адресу ведених пристроїв в діапазоні 1-247. Кожен пристрій у мережі повинен мати унікальну адресу.

Формат даних протоколу ModBus/RTU представлений на рис. 4.7.

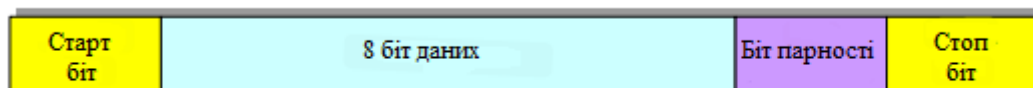


Рисунок 4.7 – Формат передачі даних

Посилання кожного байта починається зі старт-біта, після якого слідує 8 біт даних, біт парності (even) та стоп біт. Таким чином, одна посилка даних складається із 11 біт.

Для узгодження зі сторонніми виробами, можлива робота без біта парності, при цьому повинні використовуватись два стоп-біти.

Обмін даними протоколу проводиться пакетами (даних). Структура пакету наведено рис. 4.8.

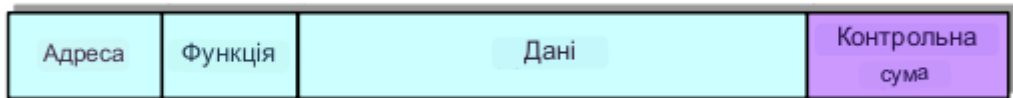


Рисунок 4.8 – Складові пакету для обміну.

Пакет починається з посилки адресу пристрою, до якого надсилається запит (або адреса пристрою, що формує відповідь). Діапазон можливих значень адрес: 0–247. Адреса 0 (нульовий) є широкосмуговим та призначений для передачі інформації всім пристроям в мережі. Запит із нульовою адресою пристрою не передбачає відповіді.

Після передачі адреси слід байт функції, що визначає функціональну належність запиту (відповіді). Діапазон можливих значень: 0-255. Після передачі Опції слід надсилати дані. Передача даних здійснюється побайтно. Кількість переданих байт – 0...252. Після передачі даних слід два байти контрольної суми, призначених для перевірки достовірності інформації, що приймається.

4.5 Стенд ТГА на базі ТДА

Стенд імітації роботи ТГА, повинен максимально імітувати умови роботи реальної системи, забезпечувати змінне навантаження(гальмування турбіни), інерційну поведінку системи в силу фізичних причин. Головною особливістю стенда є те що він повинен імітувати системи різної потужності та навантаження.

Експериментальний стенд на базі ТДА представлений на [рис 4.9](#):

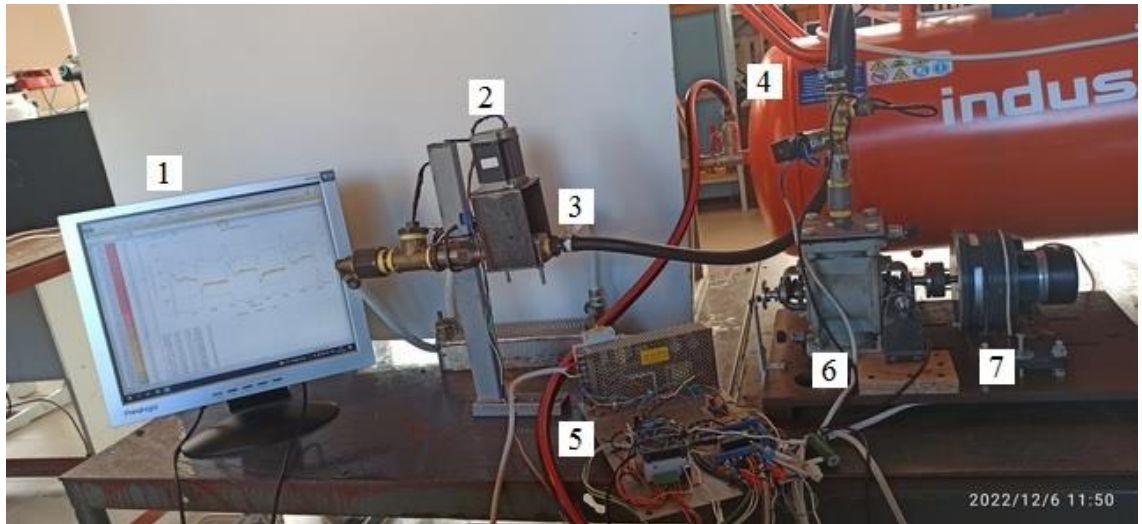


Рисунок 4.9 – Вигляд експериментальної установки

де 1 – монітор з відображенням процесу; 2 – кроковий двигун; 3 – засувка; 4 – компресор, в якості джерела тиску; 5 – регулятор; 6 – турбіна; 7 – генератор.

Повітря під тиском надходить з газової магістралі або компресора 4, який можна використати для експериментальної установки. Повітря проходить через засувку 3 шток якої, механічно з'єднаний з кроковим двигуном 2, який керується мікропроцесором 5, що відповідає за регулювання тиску на вході турбіни 6. Давач обертів дає інформацію про швидкість та буде слугувати зворотнім зв'язком при керуванні кроковим двигуном. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) мікропроцесорної системи дасть змогу вимірювати різницю потенціалів на виході електрогенератора 7 або значення струму у навантаженні.

Регулятор 5 побудований на базі мікропроцесору сімейства AVR, вбудованого в створену плату (див. Додаток Б).

Електромеханічне збурення здійснюється шляхом зміни електричного навантаження генератора, що з'єднаний з валом турбіни, для імітації реальних умов споживання.

Всі основні блоки структурної схеми аналізованої установки представлені на рис. 4.10:

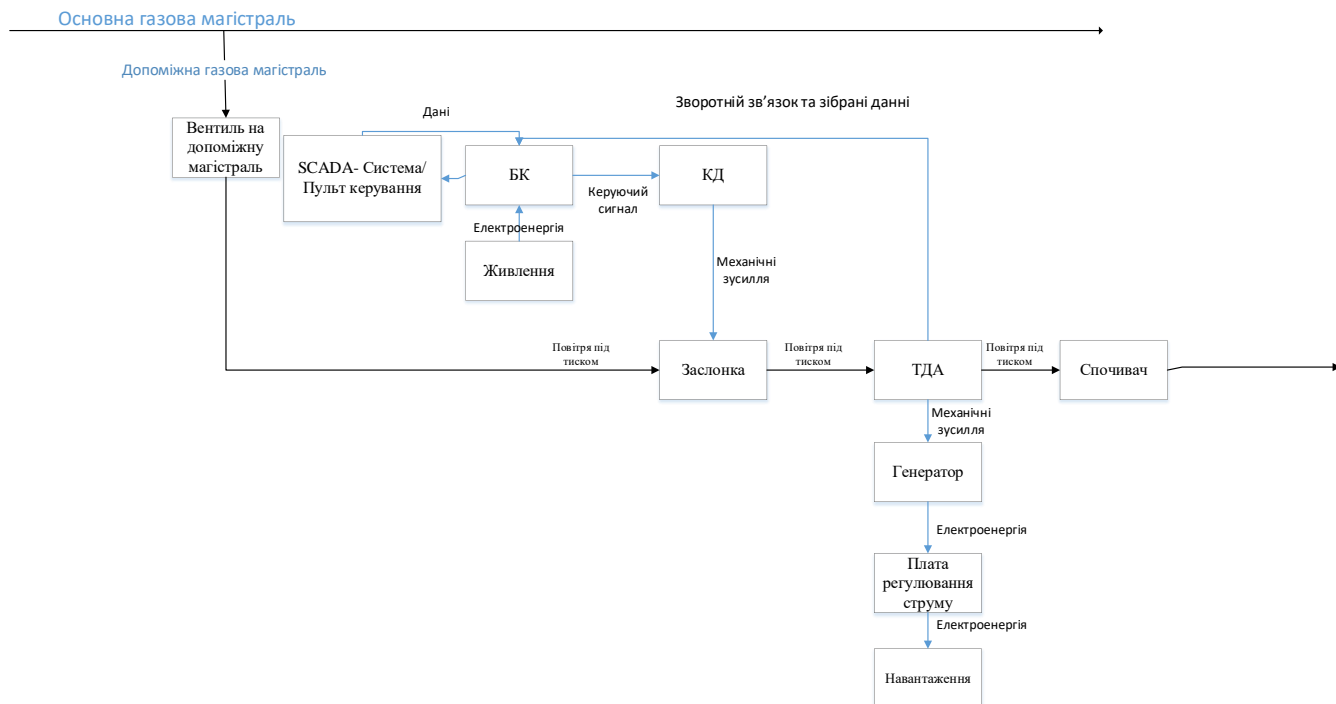


Рисунок 4.10 – Структурна схема установки утилізації надлишкового тиску

4.6 Стенд ТГА на базі двох двигунів постійного струму

Для виконання всіх поставлених завдань було вирішено імітувати ланку газ-турбіна-генератор у вигляді двох двигунів постійного струму, один з яких працює в генераторному режимі. Мотор який працює в режимі двигуна виконує корисну роботу імітуючи обертальний рух турбіну яку розкручує газ. Регулювання обертів двигуна реалізоване за допомогою наступних апаратних рішень: МК утворює керуючий сигнал на кроковий двигун, вал якого закріплений на обертальних механізмі автотрансформатора, таким чином при обертанні крокового двигуна змінюється вихідна напруга з автотрансформатора де 700 кроків двигуна повний оберт. На вихід автотрансформатора підключено АС-DC перетворювач, який на виході забезпечує рівень напруги від 0 – 350В, це і є напруга обмотки збудження. Особливість цього рішення керуванням напругою двигуна, є те що реалізація на основі будь яких напівпровідникових пристроїв не дає змогу імітувати інерційність системи, на відміну від ланки кроковий двигун-автотрансформатор. В свою чергу другий двигун в режимі генератора імітує механічне навантаження на турбіну, механічне навантаження залежить від того яке електричне навантаження

підключене до генератора, отже система з двох двигунів постійного струму забезпечить нам імітацію:

- Електричного навантаження (споживач електроенергії)
- Механічного навантаження турбіни
- Зміни потужності системи
- Інерційності системи

Структурна схема розглянутого експериментального стенду наведена на рис. 4.11:

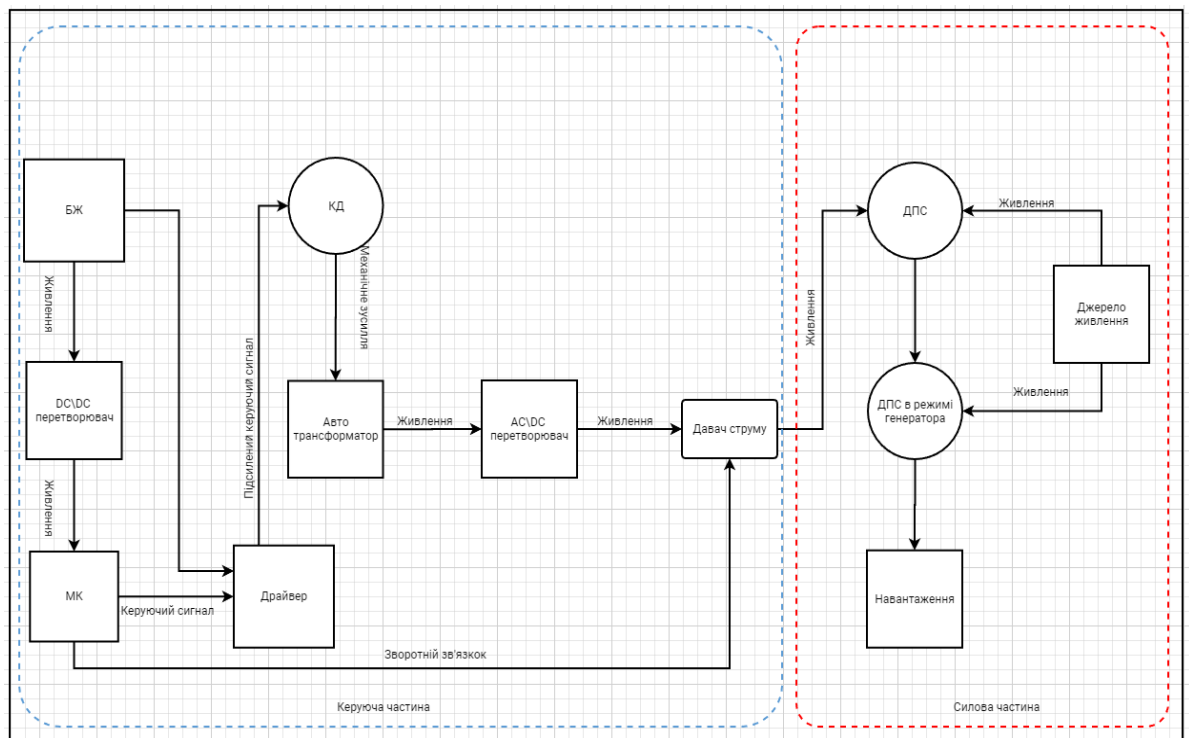


Рисунок 4.11 – Структурна схема експериментальної установки

Структурна схема розділена на дві частини, перша силова частина та друга керуюча частина тобто логіка, де БЖ – блок живлення, МК- мікроконтролер, Драйвер – узгоджуючий та підсилюючий пристрій керування кроковим двигуном.

ВИСНОВКИ

Був проаналізований процес утилізації надлишкового тиску природного газу. Розроблений проект турбогенераторного агрегату для утилізації надлишкового тиску. Особливістю цієї системи є її нелінійність, що впливає на вибір давачів та регулятора.

Аналіз процесів утилізації надлишкового тиску газу дозволив побачити неоднаковість параметрів передаточних функцій в залежності від робочої точки, що вимагає адаптації параметрів регулятора в залежності від навантаження та впливу збурень.

Була створена експериментальна установка, котра допомогла встановити вимоги до засобів автоматизації, та перевірити математичну модель на адекватність.

Експериментальні дослідження довели спроможність релейного регулятора підтримувати задані оберти турбіни при дії збурень, використовуючи кроковий двигун встановлений на дросельній засувці. За допомогою мікропроцесорного регулятора були мінімізовані впливи збурень на оберти турбіни. Було досягнуто стабільності уставки по швидкості $\pm 7\%$, при коливаннях моменту опору турбіни в межах 25% .

Була написана програма для мікроконтролера та створена методика тестування експериментальної версії регулятора обертів турбогенератора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kulinchenko H., Panych A., Leontiev P., Zhurba V. Simulation of the excess expander gas pressure utilization plant // ScienceRise. – 2022. – № 3(80). – С. 3- 13.
2. 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.
3. 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.
4. ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХОДІВ З РЕСУРСО- ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ДОЧІРНІЙ КОМПАНІЇ «УКРГАЗВИДОБУВАННЯ» НАЦІОНАЛЬНОЇ АКЦІОНЕРНОЇ КОМПАНІЇ «НАФТОГАЗ УКРАЇНИ / ФОРМА ПРОЕКТНО-ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ПРОЕКТУ СПІЛЬНОГО ВПРОВАДЖЕННЯ - Версія 01 // 20 березня 2012 року – С 135.
5. Шеремет О.І. Теоретичні аспекти синтезу релейних регуляторів для електроприводів постійного струму / О.І. Шеремет, О.О. Ткаченко // Науковий вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2017. – № 3 (24Е). – С. 97-102.
6. Ванєєв С.М., Мірошніченко Д.В., Журба В.О., Знаменщиков Я.В. та інші /Стенд для дослідження розширювальних турбомашин малої потужності та агрегатів на їх основі // Refrigeration Engineering and Technology – 2019. – №55(1). – С. 15-21.
7. Зімчук І.В. Синтез цифрових регуляторів пониженого порядку для замкнених систем управління неперервними об'єктами / І.В. Зімчук // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2017. – № 4. – С. 187–192
8. 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.

9. Bilfeld N.V. PID Controller design with control system toolbox of MATLAB // Technical sciences. – 2015. – № 3–4 (37–38). – С. 11–20.
10. Design and Implementation of Micro Temperature Control System Based on PWM / Yajie Zhu et al. // IOP. – 2019. – Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – С. 677
11. 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.
12. Kulichenko H., Leontiev P., Drozdenko O. Development of extreme regulator of separation moisture from the gas stream // ScienceRise. – 2021. – № 2(73). – С. 3–10.
13. Kulichenko H., Leontiev P. Modelling a throttling device during separation of moisture from gas flow // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – № 4(7-82). – С. 23–29
14. Design and Implementation of Micro Temperature Control System Based on PWM / Yajie Zhu et al. // IOP. – 2019. – Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – С. 677
15. Bilfeld N.V. PID Controller design with control system toolbox of MATLAB // Technical sciences. – 2015. – № 3–4 (37–38). – С. 11–20.
16. 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.
17. Bernal M. Analysis and Synthesis of Nonlinear Control Systems / M. Bernal, A. Sala, Z. Lendek, Th. M. Guerra // Springer Cham. – 2022. – 345 с.
18. Ярошенко В. М. Енергетичний аналіз процесів енергозбереження в газотранспортній системі / Холодильна техніка та технологія. – 58 (1). – 2022. – С. 40–49.
19. 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.

20. 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
21. 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.