

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КСУ

\_\_\_\_\_ П.В. Леонтєв

\_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА**

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
на тему «Моделювання режимів автоматизованої установки утилізації  
надлишкового тиску»

Керівник роботи

к.т.н., доцент

Г.В. Кулінченко

Здобувач

студент гр. СУ.мз-13с

В.О. Журба

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КСУ

\_\_\_\_\_ П.В. Леонт'єв

\_\_\_\_\_ 2022 р.

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу магістра здобувачу вищої освіти

Журбі В'ячеславу Олеговичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Моделювання режимів автоматизованої установки утилізації надлишкового тиску» затверджена наказом ректора СумДУ № 1079-VI від 14 листопада 2022 р.

2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 15 лютого 2023 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: наукова література, огляд галузі, наукові публікації, науково-технічні звіти, дисертації та автореферати за тематикою роботи, звіт з переддипломної практики,

4. Зміст кваліфікаційної роботи (питання, що підлягають розробленню):  
Вступ, Опис процесу утилізації енергії надлишкового тиску, Функціональні задачі керування, Побудова моделі експериментальної установки та оцінка її адекватності, Математичний опис об'єкту керування, Уточнення математичної моделі, Перевірка створеної моделі, Синтез регулятора швидкості обертання турбіни, Постановка задачі синтезу регулятора, Синтез регулятора швидкості

обертання турбіни, Експериментальна перевірка регулятора, Експериментальний стенд, Розробка SCADA-системи

5. Перелік графічних матеріалів: робота містить 23 рисунки, функціональну схему автоматизації, схеми установки, графіки (залежності певних параметрів) експериментального та математичного моделювання, фотографії загального вигляду установок та стендів.

#### 6. Календарний план виконання роботи

Номер етапу	Зміст етапу виконання роботи	Термін виконання
1	Розглянути завдання утилізації енергії стиснутого газу, визначити функціональні задачі керування	30.11.2022
2	Вивчити методи побудови математичних моделей складних об'єктів керування, побудувати математичну модель	20.12.2022
3	Провести оцінку адекватності математичної моделі, порівняти результати з натурним експериментом	15.01.2023
4	Провести синтез регулятора об'єкту керування, перевірити роботу регулятора на експериментальній установці	31.01.2023
5	Оцінити можливості впровадження роботи, підготувати текст магістерської роботи та супровідні документи	10.02.2023

7. Дата видачі завдання: 15 листопада 2022 р.

Керівник проекту:

к.т.н., доцент

Георгій КУЛІНЧЕНКО

Здобувач:

студент групи СУ.мз-13с

к.ф.-м.н., доцент

В'ячеслав ЖУРБА

## РЕФЕРАТ

Журба В'ячеслав Олегович. Моделювання режимів автоматизованої установки утилізації надлишкового тиску. Кваліфікаційна робота магістра. Сумський державний університет. Суми, 2023 р.

Кваліфікаційна робота містить 64 сторінки, 23 рисунки, 29 формул, 35 посилань на джерела інформації.

Розроблена програма і методика проведення випробувань дослідного зразка турбогенератора. Розроблено методику синтезу регулятора швидкості обертання валу турбіни та обробки даних випробувань вихрового турбогенератора. Розроблена модель підігрівача потоку газу. Досліджено канал керування температурою потоку газу, що надходить до турбіни турбодетандера.

Результати роботи можна використовувати в різних галузях промисловості і суспільства, а також при підготовці здобувачів вищої освіти з автоматизації.

Ключові слова: вихрова розширювальна турбомашина, турбогенератор, привод засувки, релейний регулятор, турбодетандер, синтез регулятора нелінійного об'єкту, адаптивне керування, SCADA-система.

Viacheslav Zhurba. Simulation of the modes of the automated excess pressure utilization plant. Master's qualification work. Sumy State University. Sumy, 2023

The work contains 64 pages, 23 figures, 29 formulas, 35 links to sources.

A program and methodology for testing a prototype turbogenerator was developed. The method of synthesizing the speed controller of the turbine shaft and processing the test data of the vortex turbine generator has been developed. A model of a gas flow heater has been developed. The temperature control channel of the gas flow entering the turboexpander turbine was investigated.

The results of the work can be used in various branches of industry and society, as well as in the training of students of higher education in automation.

Key words: vortex expander turbomachine, turbogenerator, valve actuator, relay regulator, turboexpander, synthesis of nonlinear object regulator, adaptive control, SCADA system.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
1 ЗАВДАННЯ УТИЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГІЇ НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ .....	10
1.1 Опис процесу утилізації енергії надлишкового тиску .....	10
1.2 Обґрунтування необхідності підігріву газу в процесі утилізації .....	13
1.3 Функціональні задачі керування .....	15
2 ПОБУДОВА МОДЕЛІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ТА ОЦІНКА ЇЇ АДЕКВАТНОСТІ .....	21
2.1 Математичний опис об'єкту керування.....	22
2.2 Уточнення математичної моделі .....	29
2.3 Перевірка створеної моделі.....	33
2.4 Математична модель підігрівача .....	34
3 СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ТУРБІНИ.....	39
3.1 Постановка задачі синтезу регулятора.....	39
3.2 Синтез регулятора швидкості обертання турбіни .....	44
3.3 Експериментальна перевірка регулятора.....	47
3.4 Синтез регулятора підігріву газу .....	52
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ТА РОЗРОБКА SCADA-СИСТЕМИ .....	55
4.1 Інформаційно-вимірювальна система стенду .....	57
ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	61

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АСУ – автоматизована система управління  
ГРП – газорозподільний пункт  
ГРС – газорозподільна станція  
ККД – коефіцієнт корисної дії  
МРЕ – мала розподілена енергетика  
ОК – об'єкт керування  
РР – релейний регулятор  
ТГА – турбогенераторний агрегат  
ТДА – турбодетандерний агрегат  
ТЕН – термоелектричний нагрівач  
УТДА – утилізаційний турбодетандерний агрегат  
ФСА – функціональна схема автоматизації  
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

## ВСТУП

Нині з відомих причин Україна перебуває на межі енергетичної кризи, тому вирішення проблем енергозбереження, децентралізації енергопостачання, енергетичної автономності критично важливих об'єктів на цей час є дуже **актуальним**. У системах видобутку, транспорту, розподілу та переробки природного газу велика кількість потенційної енергії втрачається на дросельних пристроях. Світовий досвід показує, що цю енергію не тільки можливо, а й необхідно утилізувати шляхом перетворення в інші види енергії. Альтернативою клапанним дроселюючим системам зниження тиску газу є турбодетандерні агрегати (ТДА). Вони забезпечують одночасно з основною функцією (зниження та регулювання тиску газу при його адіабатному розширенні в турбіні) отримання механічної роботи, придатної для подальшого використання.

Енергозабезпечення в Україні у тому числі здійснюється за допомогою централізованих енергетичних систем через великі теплові електростанції з потужними паровими турбінами, енергія від яких розподіляється по складній системі мереж, що має певні переваги, так як при будівництві великих станцій знижується вартість кіловата встановленої потужності. Доля втрат в таких мережах іноді досягає значень до 35 %. Зростає собівартість і тарифи на вироблену енергію.

Вихід з ситуації, що виникла, полягає у розвитку малої розподіленої енергетики (МРЕ): системи, яка складається з великої кількості, переважно малих, джерел енергії, які знаходяться безпосередньо у споживача або неподалік із ним. Така система забезпечує доповнення і резервування централізованих систем. При цьому споживач, який володіє власним джерелом енергії, по-перше, отримує її по собівартості, яка в рази нижче тарифів; по-друге, збільшує надійність енергопостачання; по-третє, може отримувати додаткові вигоди від продажу електроенергії в централізовану мережу; в четвертих, знижує пікове навантаження [1].

Рішення проблеми розвитку МРЕ потребує наявності енергетичних комплексів малої і надмалої одиничної потужності, які можна встановлювати на

окремих об'єктах енергоспоживання, аж до індивідуального або автономного застосування. Слід відмітити, що розширення децентралізації енергопостачання шляхом створення автономних систем генерації енергії **потребує рішення основної проблеми** – наявності в них автоматизованої системи управління (АСУ), яка забезпечує:

- автоматичну підтримку заданих параметрів системи;
- максимально можливий коефіцієнт корисної дії (ККД);
- веде статистичну інформацію;
- дозволяє дистанційно керувати системою;
- запобігає виникненню аварійних ситуацій тощо.

Широке впровадження турбоустановок для автономного енергозабезпечення вимагає широких всебічних теоретичних і експериментальних досліджень і випробувань модельних і натурних розширювальних турбомашин та турбогенераторів у цілому [1], тому **мета досліджень** полягає у створенні автоматизованої експериментальної установки, яка буде прототипом реальної системи генерації електроенергії; дослідження моделі турбогенераторного агрегату (ТГА); оцінка можливостей керування параметрами ТГА на базі мікропроцесорних засобів автоматизації; розробленні методики синтезу регуляторів за необхідними параметрами системи.

Можна сказати, що **завданнями дослідження є:**

- розроблення комплексу методик та програм проведення експериментальних досліджень (випробувань) та обробки результатів, які дозволяють отримувати реальні характеристики об'єктів керування та інших складових елементів в цілому;
- побудова математичної моделі експериментальної установки та оцінка її адекватності шляхом співставлення отриманих теоретичних та експериментальних даних;
- синтез та побудова регулятора для оптимізації вихідних параметрів установки;
- оцінка та аналіз різних методів керування параметрами установки.

Отримані результати повинні підтвердити необхідність використання АСУ при впровадженні у серійне виробництво ТГА на базі розширювальних



турбомашин (утилізаційних турбогенераторів), які використовують енергію стиснутого газу.

Таким чином можна стверджувати, що **об'єктом дослідження** є процеси функціонування дослідного зразку турбогенератора на основі вихрової розширювальної машини. **Предметом дослідження** є система автоматизації експериментальної детандер генераторної установки.

**Наукова новизна** полягає в створенні автоматизованої системи керування, яка побудована на базі мікропроцесорної системи та дозволяє керувати процесом генерації електричної енергії за допомогою розширювальних турбомашин.

**Практична цінність** отриманих результатів буде полягати у:

- отриманні методик розрахунку та синтезу регуляторів систем ТГА та систем подібного роду;
- збільшенні ресурсу експлуатації наявних агрегатів при використанні розробленої АСУ;
- створенні дослідного зразка турбогенеруючого агрегату;
- створенні експериментальної установки, яка може бути використана у навчальному процесі.

# 1 ЗАВДАННЯ УТИЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГІЇ НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ

На даний час велика кількість потенційної енергії тиску газу та пари безповоротно губиться на редукторах і регуляторах тиску на газорозподільних станціях (ГРС) та газорозподільних пунктах (ГРП) у газовій промисловості, в різних технологічних процесах у хімічній та інших галузях промисловості, у комунально-побутовому господарстві тощо.

Попередній аналіз енергоспоживання великих хімічних підприємств показує, що за рахунок утилізації потенційної енергії пари може бути згенеровано (тобто зекономлено) 10-20% електроенергії від величини, що споживається цими підприємствами.

Ще у 2000 роках в США був розроблений стратегічний план розвитку малих локальних енергоустановок [2]. Зазначається, що «у США фахівці-енергетики, громадські та спеціалізовані групи визнали зростаючу роль малопотужних, чистих і більше ефективних енергогенеруючих систем у забезпеченні потреб світової спільноти в енергії»; «малі модульні системи почали перевершувати за ефективністю та екологічними характеристиками стаціонарні електростанції». Мова йдеться про малі енергоустановки потужністю від 25 кВт до 1000 кВт. Передбачається підняти ККД енергоустановок на базі газових турбін потужністю від 25 кВт до 1000 кВт з існуючого рівня 25-30 % до 40-50 %, забезпечити міжремонтний ресурс 11000 год, термін служби 45000 год і отримати їх питому вартість нижче 500 \$/кВт.

## **1.1 Опис процесу утилізації енергії надлишкового тиску**

Враховуючи перспективність створення малих локальних енергоустановок, з одного боку, та фізичну можливість спаду тисків не на органі, що дроселює, а на турбіні, з іншого боку, можна створювати енергогенеруючі турбогенераторні установки (агрегати). При цьому основні проблеми полягають як в конструкції самої турбіни, так і в системі регулювання тиску на виході з турбіни. Разом з цим

для зниження кількості обертів турбіни необхідно застосовувати редуктор, що ускладнює конструкцію та здорожує експлуатацію установки в цілому, знижує ККД, а також збільшує габарити установки.

Більше перспективним є створення ТГА на базі вихрових турбін [2]. Основними перевагами вихрової турбіни, в порівнянні з осьовими або відцентровими, є:

- простота конструкції, технологічність та низька собівартість виготовлення;
- порівняна низькообертовість, тобто при інших рівних умовах оптимальна частота обертання вихрової турбіни значно менше оптимальної частоти обертання класичної турбіни, тому при використанні вихрової турбіни часто можливе виконання агрегату без редуктора обертів валу, що різко здешевлює машину, підвищує її надійність, скорочує витрати на обслуговування та дозволяє приєднати електрогенератор напряму до валу турбіни.

Переваги вихрових турбін дозволяють отримати турбопривод або турбогенератор максимально простий і надійний, з терміном окупності 1-2 роки. Серед різновидів вихрові турбін [3-7] перспективними для побудови турбогенераторів є турбіни із зовнішнім периферійним та периферійно-бічними каналами.(рис. 1.1).

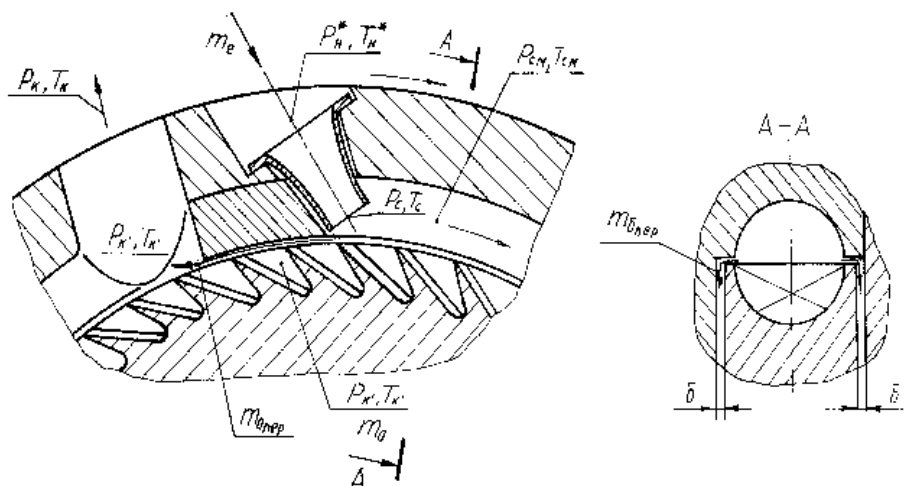


Рисунок 1.1 – Схема робочої частини вихрової турбомашини [2]

У вихровій турбіні стиснутий газ надходить у проточну частину через сопло. Робочий об'єм машини утворений каналом корпусу та міжлопатковими каналами робочого колеса, що обертається в корпусі з малими радіальними та

торцевими зазорами та представляє собою канал для руху газу. Щоб ефективно використовувати енергію робочого газу, що знаходиться в каналі, потрібно організувати подовжньо-вихровий рух уздовж всієї проточної частини турбомашини. У цьому випадку частинки газу в проточній частині турбіни рухаються спіралеподібними траєкторіями від входу до виходу машини, багаторазово взаємодіючи з лопатками робочого колеса і поступово віддаючи йому енергію, в результаті чого на лопатках з'являються сили, що приводять колесо турбомашини в рух. З проточної частини газ відводиться через вихідний отвір [2].

На кафедрі технічної теплофізики СумДУ створений стенд (рис. 1.2), який дозволяє проводити випробування дослідних зразків турбогенераторів на основі різних розширювальних машин та різних типів генераторів не великої потужності (до 15 кВт).



Рисунок 1.2 – Турбогенератор на базі вихрової розширювальної машини [8]

ТГА на базі вихрових турбін можуть застосовуватися замість або паралельно з редукторами та регуляторами тиску на ГРС та ГРП у газовій промисловості, в різних технологічних лініях на хімічних підприємствах, в комунальному господарстві тощо.

## 1.2 Обґрунтування необхідності підігріву газу в процесі утилізації

Узагальнення завдань керування процесами генерації електроенергії показує, що на якість параметрів електроенергії впливає не тільки стабільність швидкості обертання турбогенеруючого агрегату. Суттєвим чинником впливу на ефективність процесів перерозподілу потоків газу, що супроводжуються зниженням тиску, є температура потоку та пов'язані з нею газозфізичні параметри потоку, що використовуються у якості робочого тіла. Природними є заходи, які сприяли стабілізації параметрів потоку газу в умовах дії збурень по температурі потоку та його витрат.

Досить прийнятним у практичному використанні став процес підігріву газу, який дозволяє значно зменшити випадання гідратів та вологи у вузлі зниження тиску газу (турбіна ТГА), а також покращити умови обертання турбіни. Це важливо і з огляду на те, що газові турбіни працюють не тільки на ГРП та ГРС, але й на різних рухомих об'єктах.

Спроби узагальнення підходу до керування підігрівом газу, що надходить до турбіни, не завжди видаються вдалимими, оскільки ці об'єкти керування відрізняються як конструктивно-технологічними параметрами, так і різними параметрами газових потоків. Тому при вирішенні питань побудови схеми підігріву газом головним питанням є методи підігріву. Виходячи із принципів організації теплового контакту носія тепла з потоком нагріву, формуються критерії подальшого удосконалення засобів керування процесом.

Крім завдань підвищення ефективності процесів обігріву, актуальним завданням для нашого часу залишається покращення екологічного стану навколо промислових об'єктів. Тому основні тенденції організації процесу обігріву газу базуються на використанні проміжних носіїв теплової енергії.

Конкуруючий напрям побудови схем обігріву – розвиток засобів автоматизованого керування, що забезпечують ефективне керування енергопотокami, визначає актуальність завдань досліджень сьогодення.

Характер дії збурень параметрів керованого потоку газу, ускладнює використання класичних підходів до побудови ПІД-регуляторів, тим більше, для опису досліджуваного об'єкта керування використовуються нелінійні функції.

Необхідність реалізації мікропроцесорних засобів керування згаданими установками обумовлює заходи по дослідженню моделей регуляторів, які б забезпечували необхідну якість перехідних процесів регулятора. Узагальнення результатів дослідження моделей регуляторів дають можливість практичного впровадження мікропроцесорних регуляторів у суміжних галузях промисловості.

Розглядаючи підходи до побудови підігрівачів потоку газу, можна констатувати, що вони в основному використовуються на газорозподільчих станціях в утилізаційних турбодетандерних агрегатах (УТДА) [9]. В залежності від місця використання, при підігріві газу використовуються спеціальні підігрівачі з проміжним носієм тепла – водою або парою. На ГРС або ГРП нагрівання зазвичай здійснюється від зовнішніх теплових джерел. У будь якому варіанті розгляду процесу підігріву потоку газу встає питання ефективності керування цим процесом. Найбільш поширеним у газотранспортній галузі в наш час є підігрівач паливного та пускового газу ПТПГ-30, в якому використовується проміжний теплоносій з непрямым нагріванням. Ігнорування специфічних умов експлуатації при використанні серійних підігрівачів такого типу, призводить до того, що теплова потужність більшості підігрівачів перевищує реальні потреби ГРС. Тому підігрівачі працюють недовантаженими, зменшуючи ККД установок ГРС.

До суттєвих недоліків підігрівачів такого типу можна також віднести певні витрати паливного газу на підігрівач («власні технологічні потреби»), зношення обладнання, викиди в атмосферу, складність в експлуатації паливного обладнання.

Заходи по підвищенню ефективності редукування природного газу на ГРС спрямовані на пошук альтернативних джерел тепла, що використовують енергію вітру, сонця та ін. Проте, залежність цих джерел від природно-кліматичних умов передбачає розробку комбінованих пристроїв, що значно підвищує кошторис проектів, зменшуючи ефективність установок.

Іншим напрямком досліджень процесів підігріву є безвогневі методи підігріву, наприклад, термоакустичного редуктора, який працює з використанням резонансного ефекту Гартмана-Шпренгера [10]. Експерименти, що здійснювалися з генератором Гартмана довели, що витрати на реконструкцію обладнання значно перебільшують здобутки, які отримують від цього пристрою.

Вихровий ефект Ранка-Хілша, що створює умови розділення теплових потоків, також використовується для підігріву потоку газу. Результати досліджень, що реалізовані в газорозподільчій мережі Італії, показують обмеженість практичного впровадження такого обладнання, оскільки воно ефективне в обмеженому діапазоні навколишніх температур та при високих значеннях перепаду тисків [11].

Враховуючи те, що у переважній кількості УТДА використовується для генерації електроенергії, тобто турбодетандери використовуються в якості механічного приводу електрогенераторів, здається логічним будувати підігрівачі газу на базі джерел теплової енергії, яка отримана безпосередньо з генераторів ТГА. Використання безвогневого підігрівача дає змогу скоротити витрати газу «на власні потреби» та покращити екологічні параметри установки.

До таких підігрівачів можна віднести підігрівач, в якому в якості проміжного теплоносія використовується мастило, що підігрівається термоелектричними нагрівачами. Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання має позитивний досвід із впровадження таких нагрівачів у республіці Казахстан (УОГ, м. Бозой), Узбекистан (УКПГ, м. Шаркий Бердак, м. Мінгбулак). Таким чином, дослідження моделі регулятора температури підігріву газу доцільно вести, орієнтуючись на підігрівач із мастильним носієм тепла, де виключені витрати газу «на власні потреби» та виключені викиди результатів спалюваного газу в навколишнє середовище.

### **1.3 Функціональні задачі керування**

Виходячи з актуальності впровадження енергозберігаючих технологій, ставиться завдання використання енергії стиснутого газу, що втрачається при

зниженні тиску в пунктах редукування. Ці завдання енергозбереження досить успішно вирішуються за допомогою установок утилізації енергії надлишкового тиску газу – турбогенераторних агрегатів, які перетворюють енергію стиснутого газу в електричну енергію [12].

Слід враховувати, що на показники якості згенерованої електроенергії безпосередньо впливає швидкість обертання валу турбіни, тому створення автоматизованих систем підтримки обертів турбіни ТГА є невід’ємною складовою при створенні агрегатів такого типу. Найбільш ефективним способом використання електроенергії, що виробляється є підключення до мережі споживання технічних засобів автоматизації ГРС, освітлення, насосів примусової циркуляції води у системі опалення та електрообігріву приміщень тощо.

Пріоритетом досліджень ТГА є енергетична ефективність використовуваних установок утилізації. Аналізуючи параметри, що визначають ефективність, можна констатувати, що основними факторами зниження ефективності утилізації є зміна режимів роботи системи газопостачання, а також нестабільність тиску в живильному магістральному газопроводі.

При зміні витрати газу в газопроводі відповідно його тиску, а також режимів функціонування ТГА параметри утилізації не відповідають оптимальним. Коливання потужності, що споживається навантаженням, також зменшують ефективність утилізації надлишкової енергії, особливо при низьких значеннях витрат газу та високих тисках газу на вході ТГА.

Таким чином подальші дослідження представляються у розробці засобів автоматизації, які підвищують ефективність утилізації надлишкової енергії газу шляхом вибору оптимальних режимів роботи конкретного агрегату в цілому. Це можливо завдяки використанню мікропроцесорних систем та давачів фізичних параметрів, які встановлені на генеруючих агрегатах та дозволяють отримувати в реальному часі інформацію про стан роботи системи.

Разом з цим завданнями є розробка математичної моделі ТГА з урахуванням особливостей процесу утилізації енергії та режимів роботи агрегату. Наявність такої моделі є основою для створення високоякісного регулятора.



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. Традиційно підходи до синтезу регуляторів ґрунтуються на лінеаризації моделей, що дозволяє використовувати при синтезі відпрацьовані методи та алгоритми. Проте, на етапі впровадження регулятора на об'єкті витрачаються певні ресурси, з допомогою яких оцінюються похибки та стійкість регулювання або здійснюються налаштування регулятора в окремих робочих точках діапазону функціонування.

Оскільки конструкцію реального ТГА не доцільно змінювати без попередніх наукових досліджень поведінки такої системи, то необхідним є створення експериментальної установки, яка б дозволила провести дослідження параметрів та виробити рекомендації та методики синтезу регуляторів параметрів моделі ТГА.

В створеній експериментальній установці, джерелом тиску є компресор повітря здатний забезпечувати необхідний тиск на вході турбіни, далі це стиснуте повітря подається через засувку шток якої, механічно з'єднаний з кроковим двигуном, що у свою чергу створює керований мікропроцесором вузол регулювання тиску на вході турбіни. Для визначення поточного стану установки використовуються різні види давачів. Так давачі тиску, приєднані до цифрових або аналогових входів контролера дозволяють в реальному часі слідкувати за тиском повітря на вході та виході турбіни. Давач витрати повітря та давач обертів турбіни дають змогу визначити поточну робочу точку та дозволяють сформувати керуючий вплив на кроковий двигун засувки. Разом з цим, за допомогою аналого-цифрового перетворювача мікропроцесорної системи, є можливість вимірювати напругу на клеммах електрогенератора і струм який протікає у навантаженні **P**.

Для визначення функціональних задач керування, на початковому етапі розробимо функціональну схему автоматизації (ФСА) та визначимо основні контури регулювання. Враховуючи опис процесу утилізації енергії стиснутого газу наведений вище, створена ФСА (рис. 1.3) установки утилізації надлишкового тиску.

Побудована за такою ФСА експериментальна установка дозволяє виконати всі завдання для даної магістерської роботи, а також у подальшому може бути використана для наукових досліджень в галузі автоматизації турбін подібного типу та дозволяє проводити навчальний процес студентів на більш високому рівні. Серед безлічі задач керування дана ФСА та експериментальна установка дозволяє досліджувати та вивчати такі задачі:

- підтримка постійних обертів турбіни;
- підтримка постійного струму навантаження;
- калібрування та отримання характеристик давачів тиску, витрат, температури;
- керування кроковим двигуном;
- вимірювання ККД турбін різного конструктивного виконання;
- створення SCADA-систем різного ступеня складності;
- практично орієнтованого навчання студентів тощо.

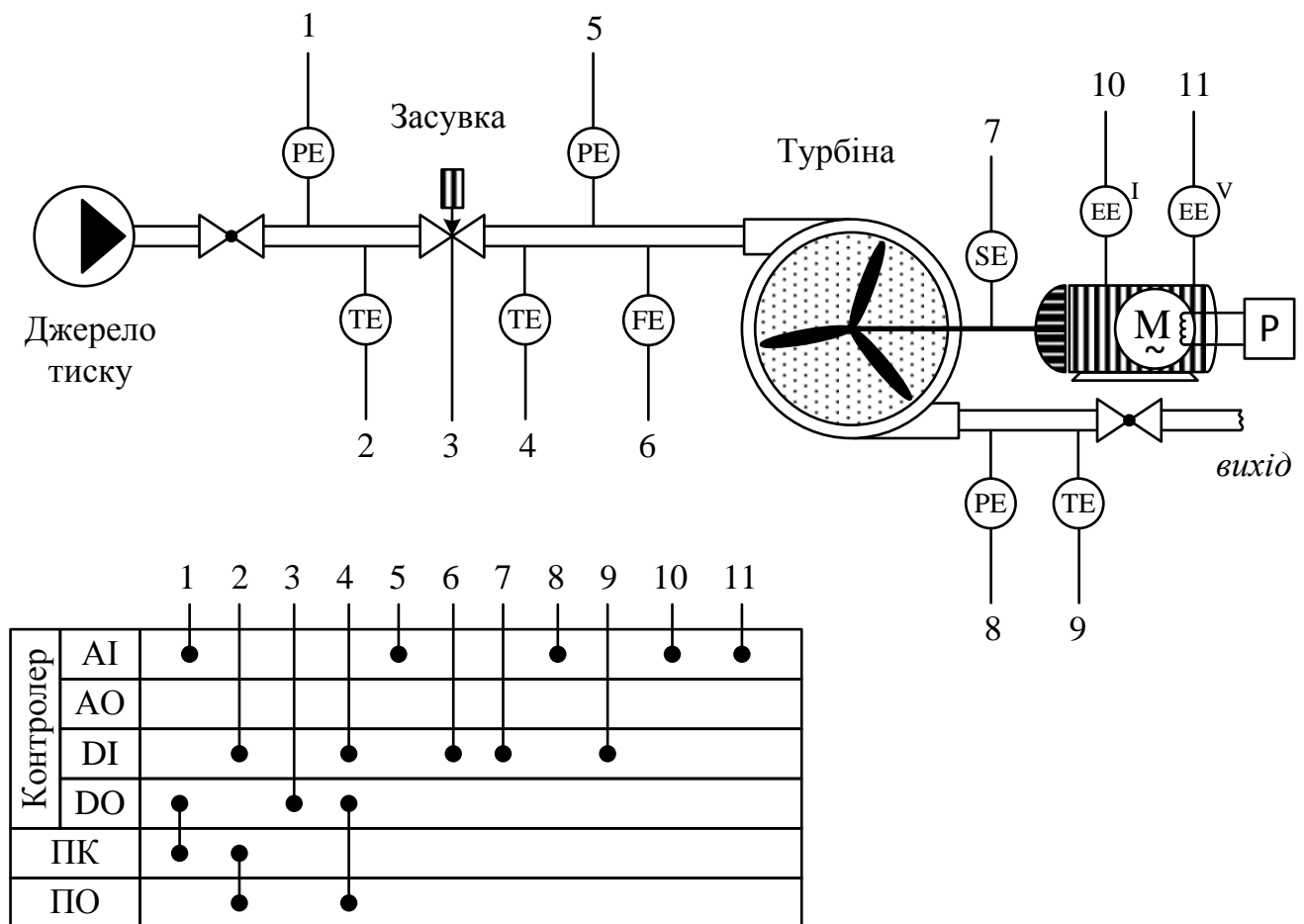


Рисунок 1.3 – Функціональна схема автоматизації установки утилізації надлишкового тиску

Для подальших досліджень і моделювання роботи ТГА спочатку зупинимось на контурі регулювання швидкості обертання турбіни.

Контур регулювання швидкості спрощено показано на рис. 1.4. Слід звернути увагу, що крім регулятора швидкості ( $W_{pu}(p)$ ), об'єкту керування ( $W_T(p)$ ), давача швидкості (ДШ) та зовнішніх збурень ( $M_G$ ) які гальмують турбіну є нелінійний блок затримки ( $M_{zt}$ ) який передбачає інерційну поведінку експериментальної уставки в силу фізичних причин (наприклад, довжина трубопроводу).

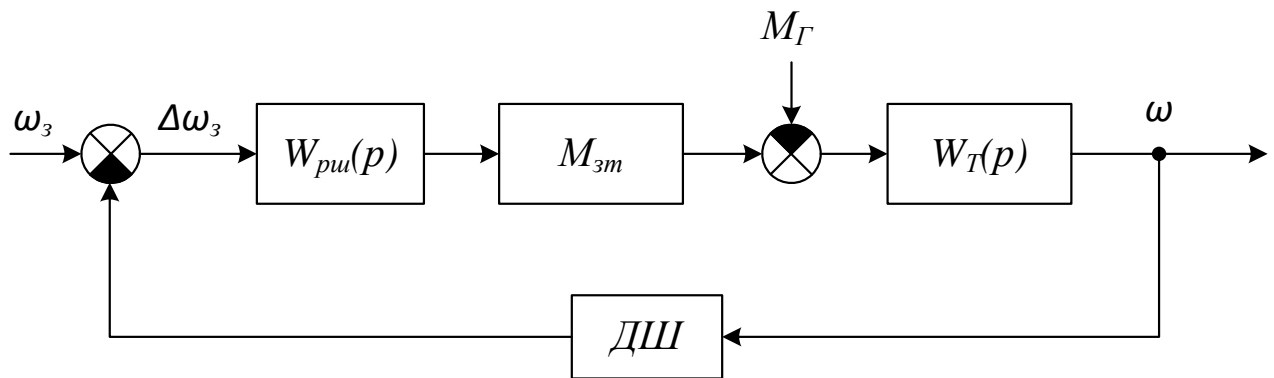


Рисунок 1.4 – Контур регулювання швидкості обертання валу турбіни

Під час роботи ТГА необхідно вести постійний контроль вихідних параметрів (величина напруги та струму) генератора установки та у разі виникнення збурень (зміни навантаження генератора або зміни тиску у системі) формувати керуючий сигнал для крокового двигуна засувки. При чому закономірності за якими буде відбуватись керування повинні враховувати нелінійні процеси, які відбуваються в таких системах.

Разом з цим виникає необхідність розробки моделі регулятора температури підігріву газу обумовлена перспективою використання таких регуляторів в установках, що використовуються в технологіях розподілу газу або інших подібних, оскільки потреба підігріву потоку газу виникає за для уникнення утворень гідратів на стінках газопроводів або при потребі охолодити робочу пару до заданої температури.

За для підвищення енергетичної ефективності роботи ТГА, що надходить до дросельного пристрою необхідно, окрім керування потоком газу, вирішити наступні задачі:

- оцінити вплив збурень параметрів потоку на стабільність утримання заданої температури;
- проаналізувати ефективність вибраного каналу керування;
- виконати структурно-параметричний синтез регулятора температури підігріву потоку газу.

## 2 ПОБУДОВА МОДЕЛІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ТА ОЦІНКА ЇЇ АДЕКВАТНОСТІ

Дослідженню конструктивно-технологічних параметрів ТГА та режимів їх функціонування присвячено достатню кількість публікацій і тільки деякі з них розглядаються аспекти можливостей управління згаданим об'єктом, які забезпечують максимальну ефективність функціонування агрегату утилізації.

Найпростіша схема утилізаційної установки наведена на рис. 2.1 а. В ній використовується турбіна з'єднана з електрогенератором, а в якості органу керування обертами турбіни – засувка, яка у подальшому буде виступати частиною об'єкту керування.

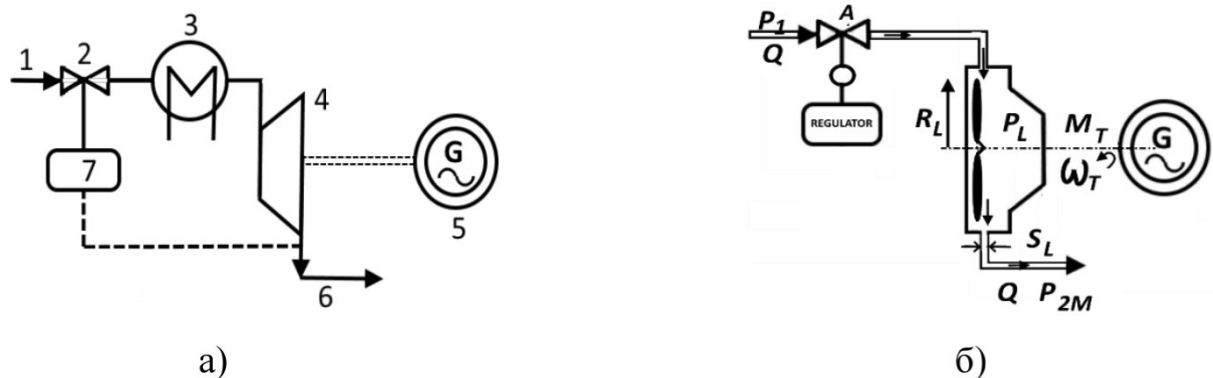


Рисунок 2.1 – Умовна схема турбогенераторного агрегату з підігрівом робочого газу (а) та без підігріву (б)

Стабільність роботи ТГА забезпечується засувкою **2**, за допомогою якої встановлюється необхідний тиск потоку газу, що надходить з газопроводу високого тиску **1**. В установці ТГА, в результаті розширення газу після засувки і в детандері **4**, відбувається істотне зниження температури потоку газу. Тому для підвищення ефективності роботи ТГА газ обігрівается при проходженні через підігрівачі **3**. Після турбіни **4**, в якій кінетична енергія потоку частково перетворюється на механічну енергію обертання валу генератора **5**, газ надходить в газопровід низького тиску **6**. Необхідна швидкість обертання

турбіни досягається зміною тиску за допомогою регулятора 7, який впливає на засувку 2 (за допомогою електроприводу на валу засувки) змінюючи площу поперечного перерізу каналу подачі газу.

## 2.1 Математичний опис об'єкту керування

Якщо відкласти розв'язання задачі підвищення ефективності ТГА за рахунок підігріву потоку газу та розглядати тільки модель турбодетандерної установки, то схему ТГА можна зобразити у вигляді, наведеному на рис. 2.1 б. На основі аналізу процесу утилізації надлишкового тиску потоку газу досліджуваній об'єкт керування (ОК) можна подати у вигляді схеми, показаної на рис. 2.2.

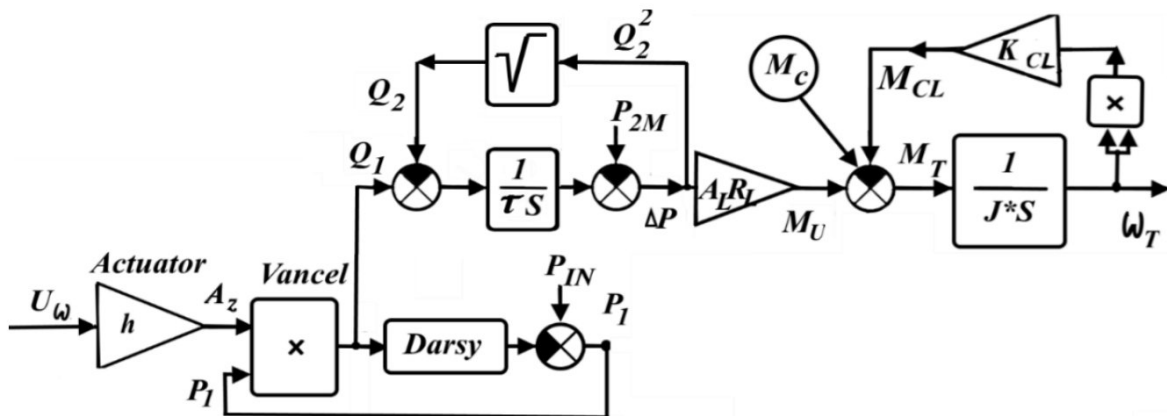


Рисунок 2.2 – Схема моделі об'єкту керування

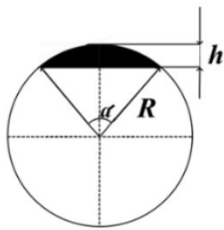
У цій схемі блок **Actuator** моделює функціонування приводу регульованого дроселя, блок **Vancel** відображає зміну параметрів потоку газу, а блок **Darcy** – втрати тиску при поширенні потоку газу по трубопроводу.

На електропривод керованої засувки (дроселя) подається керуючий сигнал  $U_\omega$  під дією якого змінюється положення її штока  $h$  і переріз засувки  $A_z$ . В результаті регулювання перерізу засувки змінюється тиск перед засувкою  $P_1$  і витрата потоку  $Q_1$  газу, що дроселюється.

Основним параметром, що визначає динаміку зміни перерізу дроселя  $A_z$  є час переміщення запірного елемента з одного крайнього положення до іншого.

Відповідно, для моделювання приводу засувки використовується ланка інтегратора з обмеженнями, які відповідають крайнім положенням засувки штока. Крім того, у прийнятій моделі приводу засувки враховується коефіцієнт передачі редуктора та його люфт, що має вплив на динаміку та точність позиціонування приводу засувки.

Особливістю опису функціональної залежності площі перерізу дроселя  $A_Z$  є її нелінійна залежність від кута повороту валу двигуна (ходу штока засувки). Залежність площі перерізу  $A_Z$  дроселя радіусом  $R$  від ходу штока  $h$  ілюструється рис. 2.3 і наступними функціями:



$$\begin{aligned} A_Z(\alpha) &= 0,5R^2(\alpha - \sin \alpha) \\ \alpha &= \arccos(1 - h/R) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Рисунок 2.3 – Зміна площі перерізу залежно від ходу штока  $h$

Якщо за наведеними формулами розрахувати чисельні значення нелінійної функції  $A(h)$ , то прийнятний рівень точності апроксимації цієї функції досягається при використанні поліному третього порядку [13].

Залежно від співвідношення вхідного  $P_1$  та вихідного  $P_2$  тисків трубопроводу режим течії газу може бути критичним та докритичним. Показник критичності  $Y_{кр}$  виражається формулою

$$Y_{кр} = \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,546, \quad (2.2)$$

де  $k$  – показник адіабати (для газу  $k = 1,3$  для повітря  $k = 1,4$ ), який визначає межі використання формули Сен-Венана-Ванцеля [14].

Для  $Y \leq Y_{кр}$  рівняння Сен-Венана-Ванцеля для витрати потоку газу  $Q$  має вигляд:

$$Q_{op} = \varepsilon \times A_Z \times P_1 \sqrt{\frac{k}{RT_1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, \quad (2.3)$$

де  $\varepsilon$  – коефіцієнт витрати перерізу дроселя;  $A_Z$  – площа перерізу дроселя;  $T_1$  – температура газу в трубопроводі, що підводить газ;  $R$  – універсальна газова постійна.

Втрати тиску  $P_{PI}$  у трубопроводі внаслідок тертя оцінюються за формулою Дарсі-Вейсбаха (блок «*Darcy*»):

$$P_{PI} = \frac{\lambda * L * Q^2}{2d * \rho * A_{PI}^2}, \quad (2.4)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт гідродинамічних втрат при терті газу;  $L$  – довжина трубопроводу;  $d$  – діаметр трубопроводу;  $A_{PI}$  – площа перерізу трубопроводу.

Витрата газу  $Q_2$  на виході турбіни, в якій спостерігається докритична течія, визначається перепадом тиску  $P$  між входом і виходом турбіни. Нехтуючи втратами тиску в трубопроводі, що з'єднує джерело тиску і турбіну, можна вважати, що тиск на виході турбіни дорівнює тиску на вході в газопровід низького тиску  $P_{2M}$ :

$$Q_2^2 = A_T \times (P_2 - P_{2M}), \quad (2.5)$$

де  $P_2$  – тиск на вході в турбіну.

У свою чергу, динаміка зміни тиску в турбіні залежить від постійного часу  $\tau_T$  встановлення рівноваги між вхідним та вихідним потоком газу:

$$\tau_T \frac{dP}{dt} = Q_{dr} - Q_2 \quad (2.6)$$

Опис процесу формування моменту обертання турбіни  $M_T$  ґрунтується на теоремі зміни моменту кількості руху потоку газу відносно осі обертання [15].



При цьому враховується процес взаємодії потоку газу з елементами турбіни та перепад тиску на детандері:

$$M_T = M_U + M_{\Delta P} - M_{CL} - M_C \quad (2.7)$$

де  $M_U$  – момент, обумовлений взаємодією потоку газу з лопатями турбіни;  $M_{\Delta P}$  – момент, який визначається перепадом тиску  $\Delta P$  на детандері;  $M_{CL}$  – момент, що залежить від аеродинамічного опору середовища при обертанні ротора;  $M_C$  – момент опору обертанню.

При цьому:

$$M_U + M_{\Delta P} = (Q \cdot V + \Delta P \cdot A_L) \cdot R_L, \quad (2.8)$$

де  $V$  – лінійна швидкість обертання лопатей турбіни;  $A_L$  – переріз течії потоку газу;  $R_L$  – радіус лопатей турбіни.

Момент, що залежить від аеродинамічного опору середовища дорівнює:

$$M_{CL} = K_{CL} \cdot \omega_T^2, \quad (2.9)$$

де  $\omega_T$  – кутова швидкість обертання турбіни;  $K_{CL}$  – коефіцієнт аеродинамічного опору, який залежить від щільності навколишнього середовища, зовнішнього діаметра ротора, форми, кількості та взаємного розташування плечей ротора, частоти обертання валу турбіни.

Складнощі аналітичного опису залежності коефіцієнта аеродинамічного опору призводять до необхідності експериментальної оцінки його значень. Ці оцінки проводяться за умов функціонування експериментальних стендових установок [16].

Кутова швидкість обертання турбіни  $T_k$  свою чергу визначається після інтегрування рівняння:

$$J_T d\omega/dt = M_U + M_{\Delta P} - M_{CL} - M_C, \quad (2.10)$$

де  $J_T$  – момент обертання турбіни.

Як зазначалося раніше, при зміні перерізу  $A_Z$  регульованого дроселя змінюються не тільки тиск потоку газу, але його температура. Зміна температури описується формулою Джоуля-Томсона [14]:

$$T_2 = T_1 - \mu \cdot \Delta P, \quad (2.11)$$

де  $T_1, T_2$  – температура на вході та виході установки відповідно;  $\Delta P$  – перепад тиску на дросельній засувці;  $\mu$  – коефіцієнт Джоуля-Томсона.

У промислових установках утилізації перепад тиску і температури настільки значний, що підвищення ефективності роботи установки доводиться використовувати спеціальні підігрівачі (рис. 2.1 а, позиція 3), які збільшують температуру потоку на 50-60°C.

В експериментальній установці утилізації надлишкового тиску газу, яка створюється для оцінки адекватності математичної моделі, перепад тисків набагато менший, а зміна температури потоку при дроселюванні не перевищує 10°C. Тому похибки моделювання параметрів потоку за формулою (2.3), де фігурує температура потоку, не перевищують одиниць відсотків. Це дозволяє на даному етапі досліджень вважати температуру потоку постійною і дещо спростити математичну модель детандера установки утилізації. У подальшому необхідно створити модель підігрівача/охолоджувача та поєднати ці дослідження в єдину математичну модель.

З аналізу формул (2.3) – (2.10), що представляє модель детандера установки утилізації надлишкового тиску газу, видно, що модель описується нелінійними функціями. Тому в список завдань, розв'язуваних при розробці моделі в формі простору станів, включається етап лінеаризації її опису.

Цей опис будується у заданій робочій точці, якій відповідає набір змінних станів, значень входів та виходів моделі:

$$\begin{aligned}
\delta x(t) &= x(t) - x_0 \\
\delta u(t) &= u(t) - u_0 \\
\delta y(t) &= y(t) - y_0
\end{aligned}
\tag{2.12}$$

де  $x(t)$  – змінна стану об'єкта,  $u(t)$  – вхідні сигнали,  $y(t)$  – вихідні сигнали.

Тоді вихід моделі в обраній робочій точці в момент часу  $t_0$  буде виражатись рівнянням  $y(t_0) = g(x_0, u_0, t_0) = y_0$ .

Набору згаданих змінних  $\delta x(t)$ ,  $\delta u(t)$  і  $\delta y(t)$  відповідає лінеаризована система рівнянь у просторі станів:

$$\begin{aligned}
\delta x'(t) &= A \cdot \delta x(t) + B \cdot \delta u(t) \\
\delta y(t) &= C \cdot \delta x(t) + D \cdot \delta u(t) ,
\end{aligned}
\tag{2.13}$$

де  $A, B, C, D$  – матриці з постійними коефіцієнтами, які є якобіанами системи, що оцінюються в робочій точці.

$$\begin{aligned}
A &= \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{t_0, x_0, u_0} & B &= \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{t_0, x_0, u_0} \\
C &= \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_{t_0, x_0, u_0} & D &= \left. \frac{\partial g}{\partial u} \right|_{t_0, x_0, u_0}
\end{aligned}
\tag{2.14}$$

Точність лінеаризації, що використовується, залежить від віддаленості оцінюваної змінної від обраної робочої точки.

Вибраній робочій точці об'єкта відповідає передатна функція лінеаризованої моделі, яка визначається співвідношенням перетворень Лапласа від вихідної до вхідної змінної:

$$W_0(s) = \frac{\delta Y(s)}{\delta U(s)}
\tag{2.15}$$

Процес лінеаризації складного об'єкта призводить до громіздких виразів і безлічі граничних умов, в яких обумовлюється застосування апроксимуючих

виразів. Це пов'язано з тим, що різні блоки моделі мають різні типи нелінійності. Тому виправданим підходом до лінеаризації об'єкта є комбінація лінеаризованих блоків, що утворюють загальну схему моделі. При цьому лінеаризація передбачає визначення значень вхідних величин та стану для кожного блоку з робочої точки, що дозволяє формувати якобіан для цих значень для кожного блоку. У той же час для деяких блоків, що моделюються, отримати аналітичну лінеаризацію важко. Це відбувається у таких випадках:

- нелінійності не мають певного якобіана;
- якобіани дискретних блоків, що відображають діаграми станів, а також підсистеми, що перемикаються, при лінеаризації прагнуть досягти нуля.
- користувацькі блоки *S-Function* та блоки *MATLAB Function*, не мають аналітичних якобіанів.

У цих випадках лінеаризація блоків виконується на основі оцінки змін вхідних даних, станів блоку та реакції на ці збурення у відповідній робочій точці.

Структурні перетворення, які здійснюються при лінеаризації динамічної моделі в пакеті моделювання динамічних систем Simulink, в деяких випадках призводять до утворення «алгебраїчної петлі». У нашому випадку такий контур утворюється при розрахунку значень витрати потоку газу  $Q$  за співвідношенням (2.3) і (2.5).

Спроби розв'язування алгебраїчної петлі шляхом зменшення розміру кроку або включення в структурну схему блоку *Memory* системи Simulink не дає позитивного результату. Більш ефективно рішення задачі досягається при поділі моделі на підсистеми та використанням заздалегідь розрахованих таблиць лінеаризації *Lookup Table*.

Основні труднощі при розробці математичної моделі детандера пов'язані з недостатнім обсягом вихідних та експериментальних даних, що враховують конструктивно-технологічні параметри установки утилізації. Зокрема, складності опису функціональних залежностей коефіцієнта аеродинамічного опору турбіни (детандера) від багатьох конструктивних параметрів призводять до необхідності створення спеціальних засобів автоматизації під час проведення досліджень експериментальної установки.

## 2.2 Уточнення математичної моделі

Для перевірки математичної моделі була розроблена схема моделювання у середовищі MATLAB, яка представлена на рис. 2.4. Відповідно до цієї схеми моделювання, керування швидкістю обертання турбіни здійснюється в результаті зміни ходу  $h$  штоку засувки, яка регулює подачу робочого газу в камеру самої турбіни.

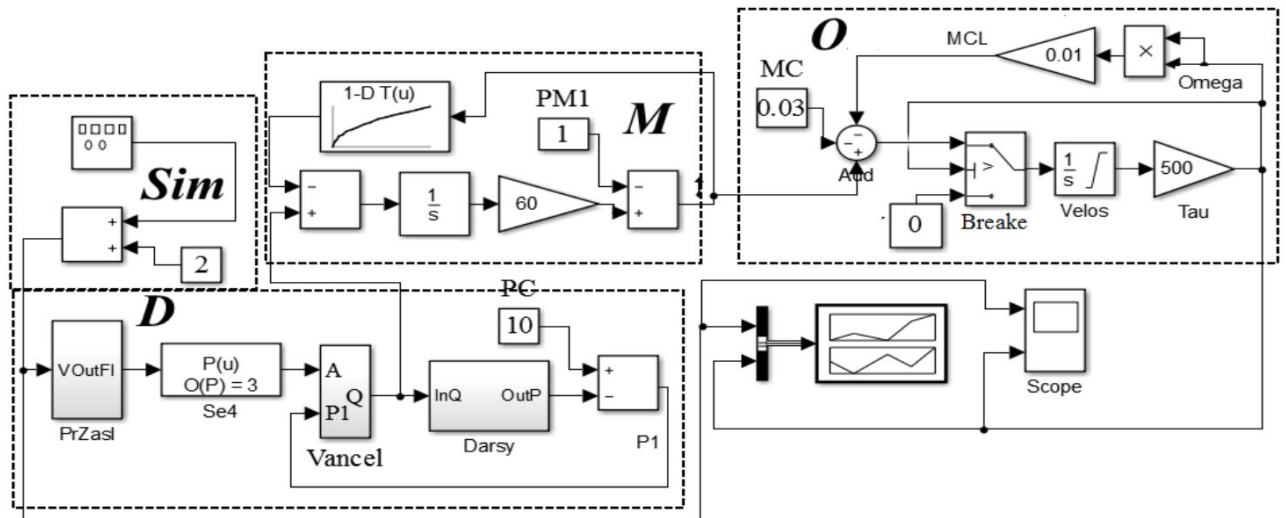
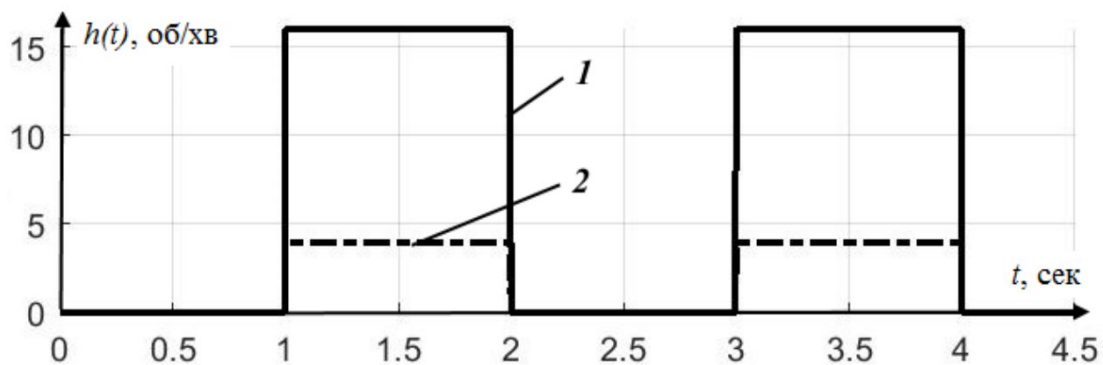


Рисунок 2.4 – Схема моделі установки ТГА у середовищі MATLAB

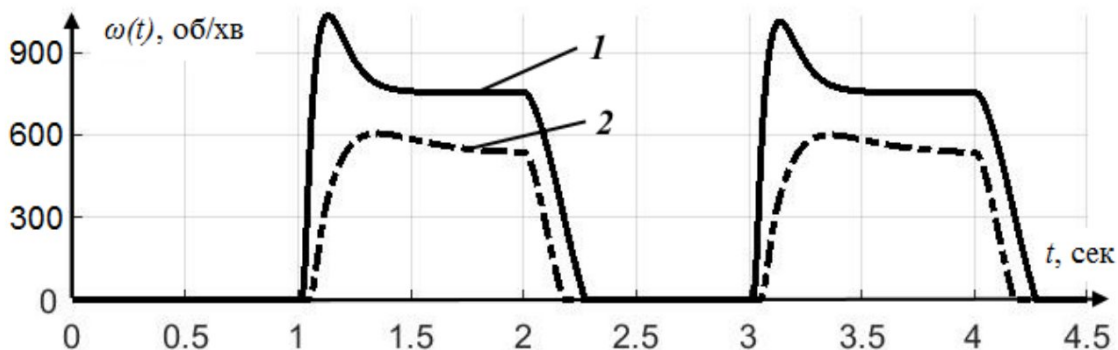
Схема моделі має три умовні блоки. Блок **D** моделює керування потоком газу за рахунок зміни положення заслінки дроселя (співвідношення (2.3)). Блок **M** відображає динаміку зміни параметрів потоку (2.5), (2.6) і моменту турбіни, що обертається, а блок **O** формує значення швидкості обертання турбіни за співвідношеннями (2.9), (2.10). Використання нелінійного елемента *Breake* в останньому блоці фіксує процес зупинки турбіни  $Q = 0$ .

У схемі моделі передбачено симулятор зміни положення заслінки *Sim*, за допомогою якого здійснюється керування швидкістю обертання турбіни.

Функціонування моделі ілюструється осцилограмами зміни положення засувки  $h$  і відповідних змін значення швидкості обертання турбіни, які наведені на рис. 2.5.



а)



б)

Рисунок 2.5 – 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 має різний характер на початку роботи турбіни (розгін турбіни), що підтверджує нелінійність об'єкта, що досліджується в роботі.

Далі, при побудові моделі, вирішується завдання лінеаризації об'єкта за допомогою програми MATLAB «*Linear Analysis Points*», оскільки проведення заходів щодо ідентифікації об'єкта керування передбачає отримання його передавальної функції, а в силу нелінійної залежності швидкості обертання від керуючих впливів, процедури лінеаризації зводяться до оцінки якобіанів (2.14) робочих точок обраного діапазону значень.

Згаданий додаток має графічний інтерфейс користувача (рис. 2.6), що дозволяє оцінити параметри станів моделі, які відповідають обраній робочій точці (op\_trim). В результаті процедур лінеаризації можна отримати частотну

характеристику нелінійної моделі, яка використовується для перевірки якості побудованої моделі.

Ідентифікація системи параметричними моделями складає основі функцій «*System Identification*», що дозволяє сформувати набір передавальних функцій об'єкту, що досліджується та які відповідають обраним робочим точкам всього діапазону переміщень засувки.

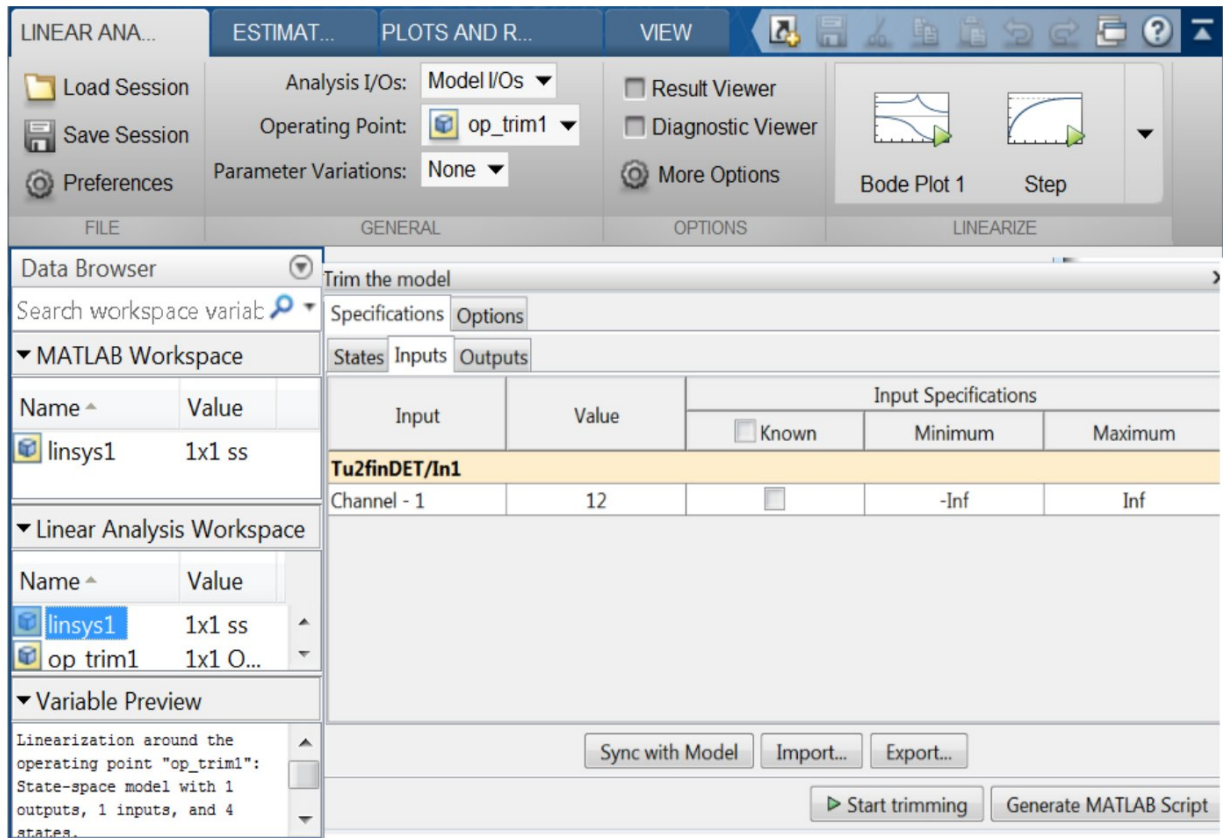


Рисунок 2.6 – Вигляд графічного інтерфейсу користувача.

Тим не менш, здійснення процесу наскрізної лінеаризації в моделі, що розглядається, викликає певні складності, що викликаються сингулярністю обчислень якобіанів робочих точок об'єкта, що моделюється. Ці складності пов'язані з тим, що деякі блоки *MATLAB Function* не мають аналітичних якобіанів. Подолання таких труднощів ґрунтується на отриманні передавальних функцій окремих блоків з подальшим їх поєднанням згідно зі схемою моделювання (рис. 2.2).

Перший крок полягає у отриманні передавальної функції каналу «хід штока – момент турбіни», входом якого є вхід блоку  $D$ , а виходом – вихід блоку  $M$ .

Користувальницький інтерфейс MATLAB «*Linear Analysis Points*» дозволяє отримати сімейство операторних рівнянь третього порядку:

$$W_{Mi}(s) = \frac{b_1s + b_{0i}}{s^3 + a_{2i}s^2 + a_{1i}s + a_{0i}}, \quad (2.16)$$

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

Сімейство характеристик, що відповідає сімейству передавальних функцій (2.16), показано на рис. 2.7 у вигляді діаграм Бode.

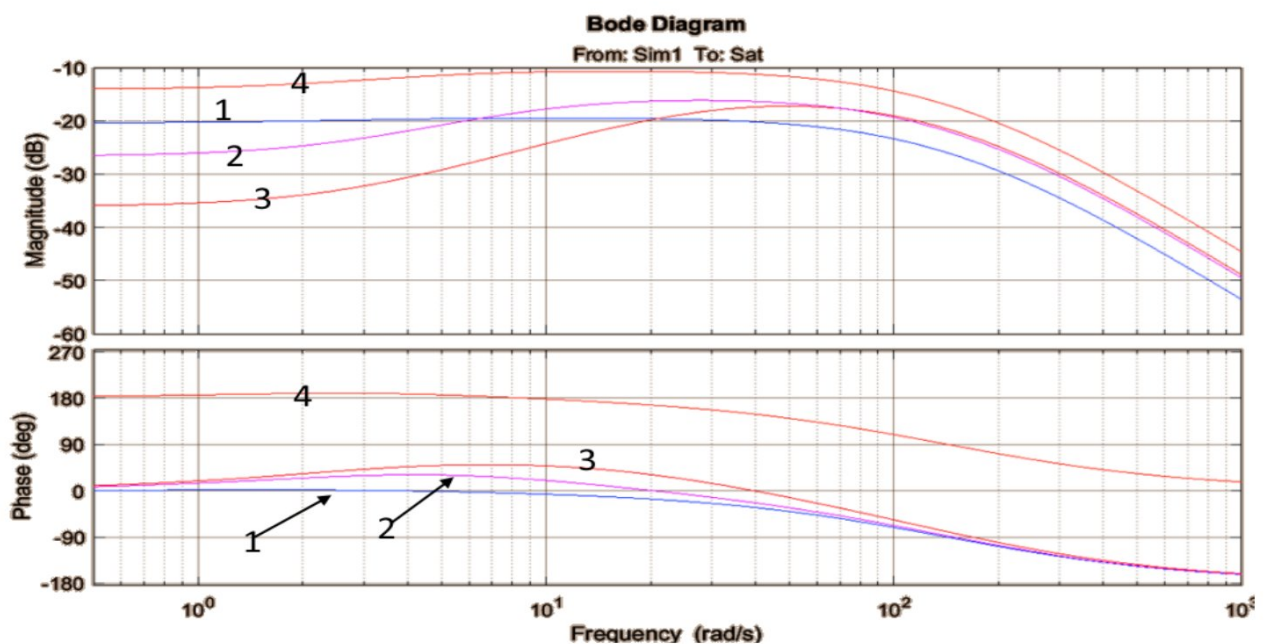


Рисунок 2.7 – Діаграми Бode для різних положень дросельної засувки:

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

В результаті використання аналогічної процедури отримуємо сімейство передатних функцій для блоку  $O$ . Їм відповідає аперіодична ланка першого порядку з різними коефіцієнтами передачі і постійними часу:



$$W_{O_i}(s) = \frac{b_{0i}}{a_{1i}s + a_{0i}} \quad (2.17)$$

Результуюча передатна функція об'єкта управління має вигляд:

$$W_{DTi}(s) = W_{Mi}(s) \cdot M_{O_i}(s) \quad (2.18)$$

Отриманий аналітичний опис моделі установки утилізації, яка є нелінійним об'єктом управління, може використовуватися при побудові регулятора процесу надмірного утилізації тиску газу. При необхідності опис (2.18) може бути представлений у просторі станів (2.13).

Специфікою моделі досліджуваного ОК є відмінність типів і динаміки процесів, які забезпечують утилізацію енергії надлишкового тиску газу. Необхідність враховувати відмінність динаміки аеродинамічних (турбіна, трубопровід) та електромеханічних (привід засувки, електрогенератор) процесів обумовлена прагненням забезпечити стійкість моделі та регулятора, що використовується для керування установкою. Зазначена необхідність виникає через те, що процес утилізації супроводжується різними за характером зовнішніми збуреннями, як по вхідному потоку газу так і з боку навантаження.

### 2.3 Оцінка адекватності моделі

Для оцінки співвідношень між постійними часу блоків об'єкта та його моделі на експериментальній установці, зібраній за схемою рис. 2.1 знято перехідні характеристики каналу «хід штока - швидкість обертання турбіни».

За умовами експерименту вхідний тиск установки (на вході засувки) становив 4 бар. Сімейство перехідних характеристик згаданого каналу (рис. 2.8) отримано шляхом зміни поперечного перерізу дросельної засувки на вході в детандер (турбіну). Значення перерізу дроселя відповідали певним значенням ходу штока дроселя, а тривалість відкриття клапана вибиралася довільно.

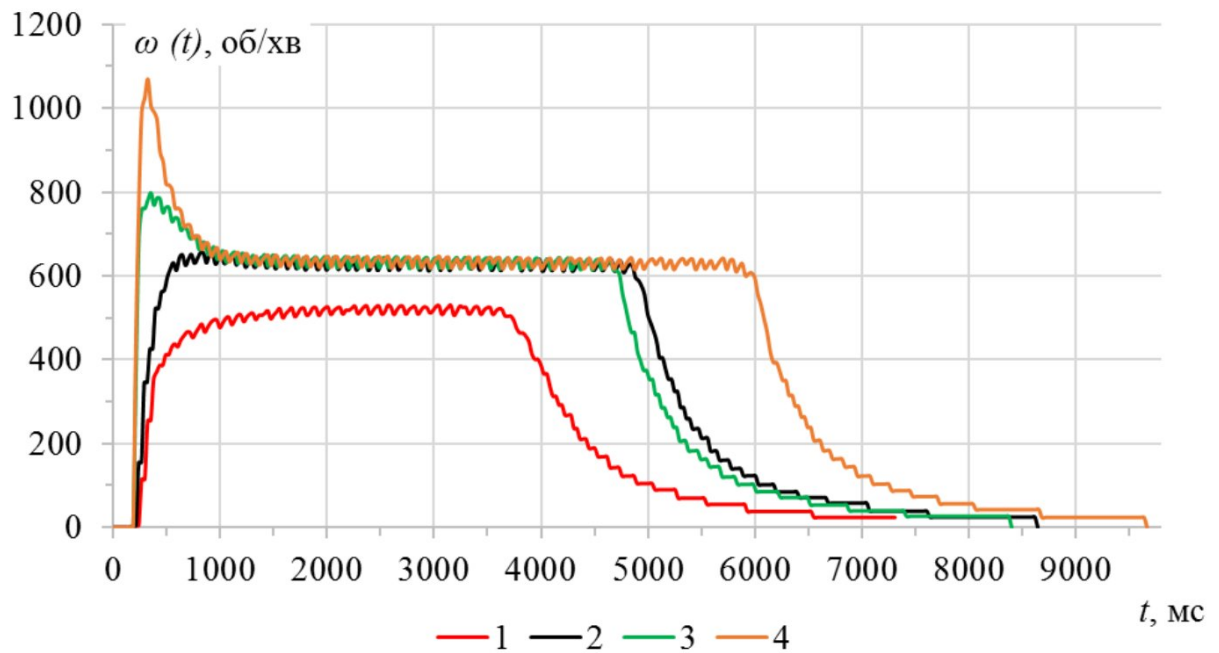


Рисунок 2.8 – Сімейство перехідних характеристик «хід штока - швидкість обертання турбіни» для різних положень дросельної засувки

На рис. 2.8 крива 1 відповідає значенню 25% від перерізу повного відкриття засувки; крива 2 – 50% перерізу; крива 3 – 75%; крива 4 – повне відкриття дросельної засувки.

Порівняння отриманих характеристик (рис. 2.8) з аналогічними характеристиками (рис. 2.5 б) отриманими в результаті моделювання, дозволяє стверджувати, що розроблена математична модель достовірно відображає роботу експериментальної установки утилізації тиску газу.

Варіанти вдосконалення розробленої моделі визначаються можливостями автоматизації описаних вище процедур, особливо у разі використання цієї моделі при побудові (синтезі) регулятора системи автоматизованого керування обертами турбіни.

## 2.4 Математична модель підігрівача

Відповідно до [17] та прийнятої структури регулятора температури газового потоку, у схемі задіяні мастильний нагрівач на базі термоелектричний нагрівач **4** (ТЕН) мастила **3**, яке через стінки змійовика **2** передає теплову енергію потоку

газу. Регулювання температурою потоку здійснюється регулятором **5** відповідно до заданого значення температури  $T_{зад}$  та плинної температури потоку  $T_2$ , яка утворилася в результаті нагрівання вхідного потоку з температурою  $T_1$ . Збурення значень температури потоку утворюються внаслідок регулювання витрат потоку дроселем **7** шляхом впливу на дросельну засувку регулятора витрат **8**. Регулювання витрат потоку пов'язано із забезпеченням необхідного моменту та швидкості обертання турбіни ДГА.

Структурна схема підігрівача потоку газу представлена на рис. 2.9.

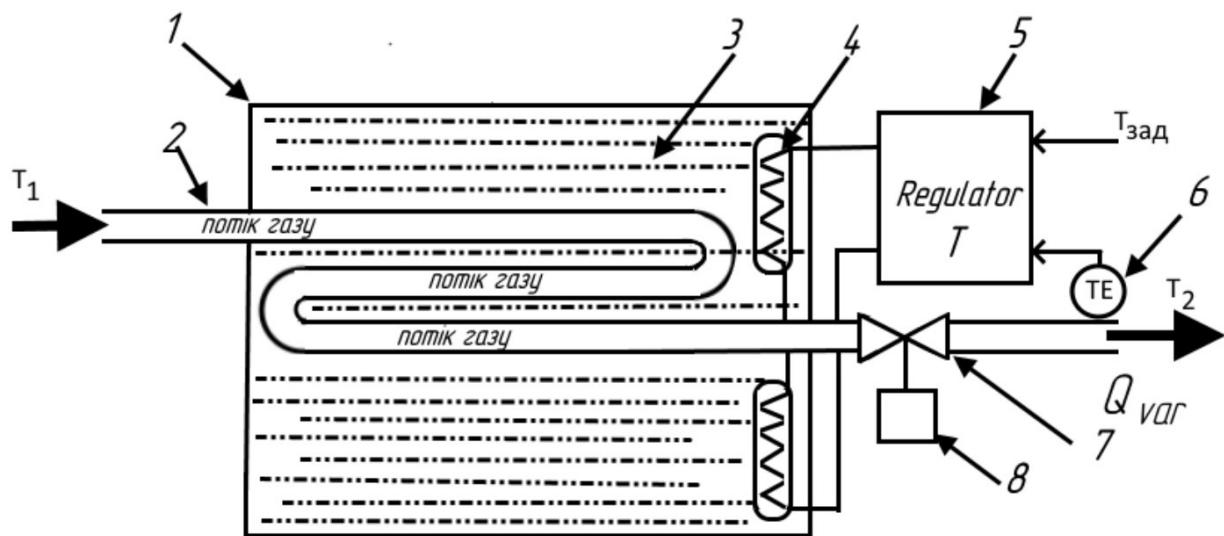


Рисунок 2.9 – Структурна схема підігрівача

На рис. 2.9: 1 – корпус підігрівача; 2 – змійовик; 3 – мастило; 4 – термоелектричний нагрівач; 5 – регулятор температури; 6 – давач температури; 7 – дросель потоку газу; 8 – засувка з кроковим двигуном.

Для отримання математичної моделі мастильного підігрівача складемо рівняння балансу теплових енергій. При цьому вважаємо, що енергія, що акумулюється в просторі підігрівача  $E_A$  визначається різницею енергій, які надходять до нього та залишають його:

$$E_A = E_E + E_{In} - E_{Out} \quad (2.19)$$

де  $E_E$  – енергія, що передається в підігрівач від ТЕНа;

$E_{In}$  – енергія, що надходить в підігрівач з потоком газу;

$E_{Out}$  – енергія, яку випромінює підігрівач у навколишнє середовище.

При цьому:

$$\begin{aligned} E_E &= U^2/R \\ E_{Out} &= g \cdot A \cdot (T_{Out} - T_c) \\ E_{In} &= Q \cdot Cr(T_{In} - T_{Out}) = -Q \cdot Cr \cdot (T_{Out} - T_{In}) \end{aligned} \quad (2.20)$$

де  $U$  – напруга, що підводиться до ТЕНа;  $R$  – опір ТЕНа;  $g$  – коефіцієнт конвекції;  $A$  – площа поверхні підігрівача;  $T_{Out}$  – температура потоку газу, що надходить у дроселюючий пристрій;  $T_c$  – температура навколишнього середовища;  $T_{In}$  – температура потоку газу, що надходить у підігрівач;  $Q$  – швидкість потоку газу;  $Cr$  – питома теплоємність газу.

Записані рівняння відображують обмін енергіями внаслідок зміни температури потоку на вході та виході підігрівача, а втрати енергії відбуваються внаслідок природної конвекції у навколишній простір з температурою  $T_c$ .

При такому описі підігрівач, він же теплообмінник, представляється як об'єкт із зосередженими параметрами, оскільки для отримання необхідної температури на виході обігрівача потреби в інформації щодо розподілу теплового поля у його просторі немає. При цьому вважаємо, що сталі часу теплових процесів набагато більше ніж тривалість керуючих впливів. Крім того вважаємо, що сталі часу теплових процесів набагато більше ніж тривалість керуючих впливів.

Якщо прийняти, що середня температура потоку  $T_{Out}$ , що витікає із підігрівача, наближена до температури мастила у просторі підігрівача, то це дає змогу записати рівняння теплового балансу у вигляді диференційного рівняння:

$$m_m \cdot C_m \frac{dT_{OUT}}{dt} = \frac{U^2}{R} - Q \cdot C_r \cdot (T_{OUT} - T_{IN}) - g \cdot A \cdot (T_{OUT} - T_c) \quad (2.21)$$

де  $C_m$ ,  $m_m$  – питома теплоємність та маса мастила у підігрівачу.

Використовуючи позначення:  $T_t = C_m \cdot m_m$ ;  $k_C = g \cdot A$  та рівняння (2.21), в середовищі *MATLAB Simulink* будується математична модель досліджуваного обігрівача, схема якої зображена на рис. 2.10

Як видно із рівнянь і отриманої моделі, ОК описується аперіодичною ланкою першого порядку. Затримка сигналу по каналу вимірювання температури, яка характерна для датчиків температури суттєво на динаміку об'єкта керування не впливає.

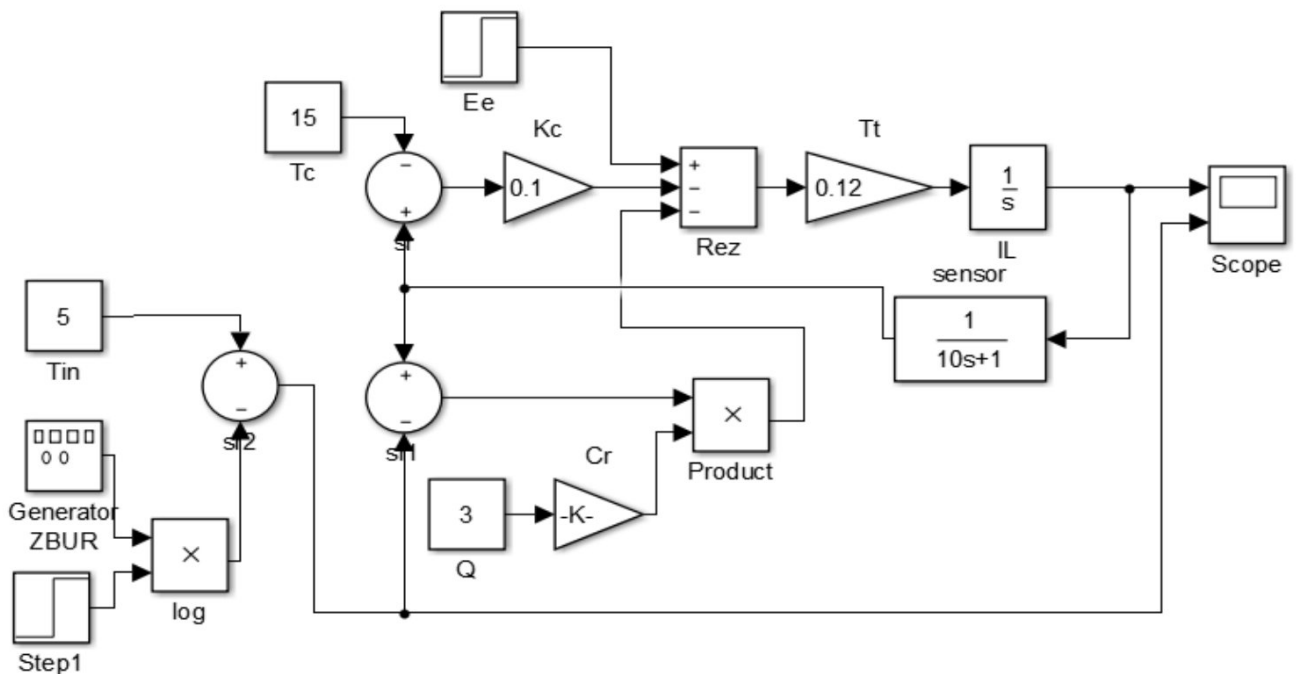


Рисунок 2.10 – Схема моделі підігрівача

Перший крок побудови моделі полягає в отриманні перехідної характеристики ОК, що дозволяє скорегувати коефіцієнти моделі на основі експериментальних даних. Практична оцінка параметрів моделі здійснювалася шляхом виміру часу, який необхідний для нагрівання робочого тіла нагрівача до певної температури [18]. Як і очікувалося, характер кривої відповідає аперіодичному процесу, а стала часу нагрівача залежить від маси мастила  $m_m$ , яке завантажено у підігрівач, тобто від необхідного значення енергії теплового потоку. Слід зауважити, що зазвичай передатні функції теплообмінників

представляються аперіодичними ланками другого порядку. Причина відмінності опису класичного теплообмінника і термopідігрівача пояснюється мінімальними кінематичними зрушеннями потоку гріючого агента. Крім того, сам нагрівач представляється об'єктом із зосередженими параметрами.

## 3 СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ТУРБІНИ

Складнощі досліджень об'єкту, що розглядається, обумовлені різним характером взаємодії аеродинамічних та електромеханічних процесів, зокрема електрогенератора, що під'єднаний до турбодетандера.

На теперішньому етапі головне завдання досліджень полягає в оцінці рівня стабілізації швидкості обертання валу турбодетандера в умовах дії аеродинамічних та механічних збурень.

### 3.1 Постановка задачі синтезу регулятора

Як було сказано вище, обертання турбіни детандера визначається рівняннями (2.3) – (2.10), а системі рівнянь відповідає схема моделювання турбіни детандера, що зображена на рис. 2.2.

Базуючись на попередніх дослідженнях моделі установки утилізації надлишкового тиску газу [19], можна констатувати, що наш об'єкт керування, має нелінійний характер зв'язку, як по шляху «вхід-вихід» так і по каналам збурень, які виникають в процесі експлуатації такої системи. Останні обставини не дають змоги безпосередньо скористатись математичним апаратом простору станів

$$\frac{dX}{dt} = f(X, U) , \quad (3.1)$$

де  $X$  – вектор станів моделі;  $U$  – скаляр керуючих впливів;  $f(X, U)$  – вектор-функція, що характеризує процеси в об'єкті керування.

Оскільки методологія використання простору станів відпрацьована для лінійних систем, то першочерговим завданням розробки регулятора є лінеаризація досліджуваного об'єкту керування.

Якщо система рівняння (3.1) лінеаризується з прийнятною похибкою, то отриманий простір станів ОК може слугувати базою для відображення вектор станів моделі  $X(t)$  в певні моменти часу.

Припустимо, що нам відоме початкове значення вектору  $X$  в момент часу  $t_0$ , тобто  $X(t_0)$ , а його кінцевий стан в момент  $t_1$  –  $X(t_1)$ . Будемо вважати, що за допомогою керуючого впливу  $U(t)$  у нас є можливість перевести вектор  $X$  із початкового стану  $X(t_0)$  в кінцевий  $X(t_1)$ . Тоді до регулятора станів, що виробляє керування  $U(t)$ , ставиться вимога мінімізації часу  $(t_1 - t_0)$  при максимальних витратах потоку газу  $Q$ .

Таким чином узагальнений критерій керування має вигляд:

$$\min_T \max_Q = \{ \Phi(P_{IN}, P_{2M}, A_Z, M_U) \}, \quad (3.2)$$

де  $T$  – час перехідного процесу.

Максимізація витрат газу необхідна для створення певного запасу по моменту обертання турбіни  $M_U$  у випадку наявності збурень вхідного та вихідного потоків газу. При цьому на складові вектору станів накладаються обмеження, що обумовлені технічними можливостями установки утилізації та міркуваннями фізичного сенсу.

Наприклад, момент обертання турбіни  $M_U$  повинен бути не менше моменту супротиву обертання  $M_C$ . До того ж тиск потоку, його витрати та швидкість обертання турбіни не можуть набувати від'ємних значень:

$$\begin{aligned} 0 &\leq \omega_T \leq \omega_{Tmax}; \\ M_C &\leq M_U \leq M_{Umax}; \\ P_{2M} &\leq P_2 \leq P_{IN} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Додаткове обмеження виникає із умов функціонування приводу засувки, оскільки в якості електроприводу використовуються механізми постійної



швидкості переміщення штоку  $h$ , тобто  $h_{min} \leq h \leq h_{max}$ , де  $h_{min}$  та  $h_{max}$  – мінімально і максимально можливі швидкості наростання рушійного зусилля.

Слід також враховувати, що діапазон лінійності кожної робочої точка лінеаризованої моделі [19] обмежений певним значенням, яке визначається конструктивними параметрами ОК.

Коливання швидкості обертання, що викликані зміною навантаження турбогенераторів та комутаціями в мережі споживання обумовлюють відповідні зміни режими функціонування ТГА. Характер коливань є визначальним фактором при формуванні підходу щодо розробки потрібного регулятора, оскільки в процесі синтезу завжди вирішується питання вибору між складністю реалізації регулятора та якістю регулювання.

Враховуючи нелінійний характер зв'язку параметрів досліджуваного ОК, пошук методів синтезу регулятора здійснюється у класі адаптивних регуляторів. Модифікації таких регуляторів дозволяють підвищити якість регулювання шляхом використання динамічного коректора, каскадних систем або внутрішньої моделі [20].

В загальному вигляді методика синтезу оптимальних систем достатньо опрацьована, але у випадку, коли ставиться вимога мінімізації часу регулювання, коректне вирішення можливо лише для моделі, що відображується рівняннями низького порядку. Для практичного впровадження алгоритмів адаптації моделей високого порядку слід використовувати редуковані передатні функції ОК [21], оскільки із підвищенням складності керування зменшується якість регулювання.

Основними труднощами синтезу регулятора нелінійного ОК є різноманітність видів нелінійностей. Тому до теперішнього часу спостерігається ситуація, коли у кожному конкретному випадку випробовується декілька методів вирішення задачі. Відповідно, здійснюється оцінка переваг та недоліків використаного методу [22]. В залежності від характеру задачі оптимізації, обираються методи їх вирішення, які передбачають наявність апріорної інформації про об'єкт керування та умови роботи системи в цілому. Це дає можливість для синтезу оптимальної або квазіоптимальної системи із потрібними показниками якості регулювання.

Відповідно до розмаїття типів турбін використовуються різні підходи до синтезу регуляторів параметрів цих турбін. Найбільш дослідженими, в силу їх широкого застосування, є парові турбіни. Розвинений апарат математичного моделювання дозволяє синтезувати і досліджувати генетичні та фаззіалгоритми керування паровою турбіною на базі лінійної моделі [23]. Вирішення задач комплексного керування паровою турбіною на базі нелінійної моделі з допомогою багатокритеріального параметричного синтезу показує, що найбільш ефективними є ПД-регулятор та нечіткий ПІ-регулятор [24]. Комбінація таких регуляторів забезпечує зменшення часу перехідних процесів з мінімальним відхиленням частоти обертання турбіни.

Стрімкий прогрес альтернативної енергетики обумовлює розвиток засобів керування вітряних турбін, які за аеродинамічними властивостями подібні до турбін детандерів. Відповідно, при побудові засобів керування вітряних турбін використовують від простих ПД-регуляторів, до більш складних з оптимізацією по інтегралу квадратичного відхилення [25].

Для досягнення високого запасу стабільності при керуванні генерацією з вітряною турбіною застосовується демпфування, яке до того ж, дозволяє згладжувати частотні характеристики керованої системи [26]. З ускладненням завдань керування взаємодією генеруючих вітряних турбін із мережами споживання електроенергії розробляються метаевристичні [27], а також генетичні алгоритми [28]. У певних випадках виправданим є підхід з використанням інтелектуальних методів оптимізації, наприклад, нечітких ПІ-регуляторів. Використання таких регуляторів при керуванні вітряними турбінами в умовах зміни швидкості вітру та навантажень має більший ефект, ніж звичайний ПІ-регулятор [29]. Звичайним недоліком нечітких ПІ-регуляторів є процес формування його експертної бази знань, який значно погіршує продуктивність цього регулятора.

Інший підхід до побудови регулятора вітряної турбіни передбачає використання передатної функції ПД-регулятора дробового порядку (fractional order proportional-integral-derivative або FOPID) [30]. При цьому передатна функція контролера має вигляд:

$$W(s, \alpha, \beta) = K_P + \frac{K_I}{s^\alpha} + K_D s^\beta, \quad (3.4)$$

де  $\alpha$  і  $\beta$  є операторами дробового порядку, які мають значення в діапазоні  $(0 \dots 1)$ ;  $K_P$ ,  $K_I$  і  $K_D$  – пропорційний, інтегральний та диференціальний коефіцієнти FOPID-регулятора.

Таким чином, до трьох параметрів ПІД-регулятора ( $K_P$ ,  $K_I$  і  $K_D$ ) додається ще два параметри, які оптимізуються за допомогою відповідних алгоритмів. Для практичної реалізації алгоритму FOPID-регулятора необхідно вирішити питання наближення (апроксимації) функції ірраціонального FOPID-регулятора (3.4) раціональними поліномами з цілочисельними ступенями [31]. Така апроксимація інтегральної частини регулятора  $W_I(s)$  здійснюється з допомогою раціональної функції перетворення:

$$W_I(s) = \frac{1}{s^\alpha} \approx K_I \frac{\prod_0^{N-1} \left(1 + \frac{s}{z_j}\right)}{\prod_0^{N-1} \left(1 + \frac{s}{p_j}\right)}, \quad (3.5)$$

де  $z_j, p_j$  – нулі та полюси еквівалентної передавальної функції цілого порядку.

Із (3.5) видно, що перехід до цілочисельних поліномів значно ускладнює структуру регулятора, відповідно, і швидкодію обчислень керуючих впливів. Зважаючи на альтернативні методи апроксимації передатної дробової функції регулятора, наприклад, гаммафункціями Ейлера, можна констатувати, що практична реалізація FOPID-регулятора можлива лише з використанням потужних обчислювальних засобів. Прагнення до практичної реалізації такого регулятора обумовлює оцінку здобутків, що отримані в результаті використання FOPID-регулятора та апаратно-програмних витрат, що пов'язані з його реалізацією. Така оцінка стимулює заходи по спрощенню структури регулятора

на основі порівняння результатів якості регулювання. Такий підхід є більш оправданим, оскільки більшість досліджень, що проведені з регуляторами в середовищі MATLAB, досі не дійшли до практичного використання в промислових контролерах.

Прагнення до спрощення структури регулятора зумовлює розробку лінеаризованих регуляторів першого порядку, які дозволяють адаптуватися до різних швидкостей обертання, тобто збурень моменту обертання. Адаптація здійснюється шляхом пошуку потрібного елемента таблиці налаштувань або використанням контролера зворотного гнучкого зв'язку. Наявність адекватної лінеаризації ОК [32] дає змогу використовувати інструменти лінійної теорії управління, зокрема апарат простору станів.

Рішення про доцільність використання FOPID-регулятора у лінеаризованій моделі приймається в результаті оцінки параметрів регулятора. Тому для процесу оцінки вибираються необхідні засоби, що забезпечують перевірку відповідно до сформованих критеріїв. Досить ефективним засобом оцінки може слугувати *Control System Toolbox* MATLAB.

Таким чином можна стверджувати, що неформальні вимоги до керування полягають у мінімізації впливу нелінійностей ОК в умовах дії збурень параметрів потоку газу та навантажень на електрогенератор.

Завдання керування визначається як налаштування параметрів регулятора в реальному масштабі часу відповідно до критерію (3.2) в умовах дії збурень параметрів газового потоку.

### **3.2 Синтез регулятора швидкості обертання турбіни**

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

Наявність лінеаризованої моделі досліджуваного ОК [19], що представлена сімейством передатних функцій (діаграм Боде), 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.

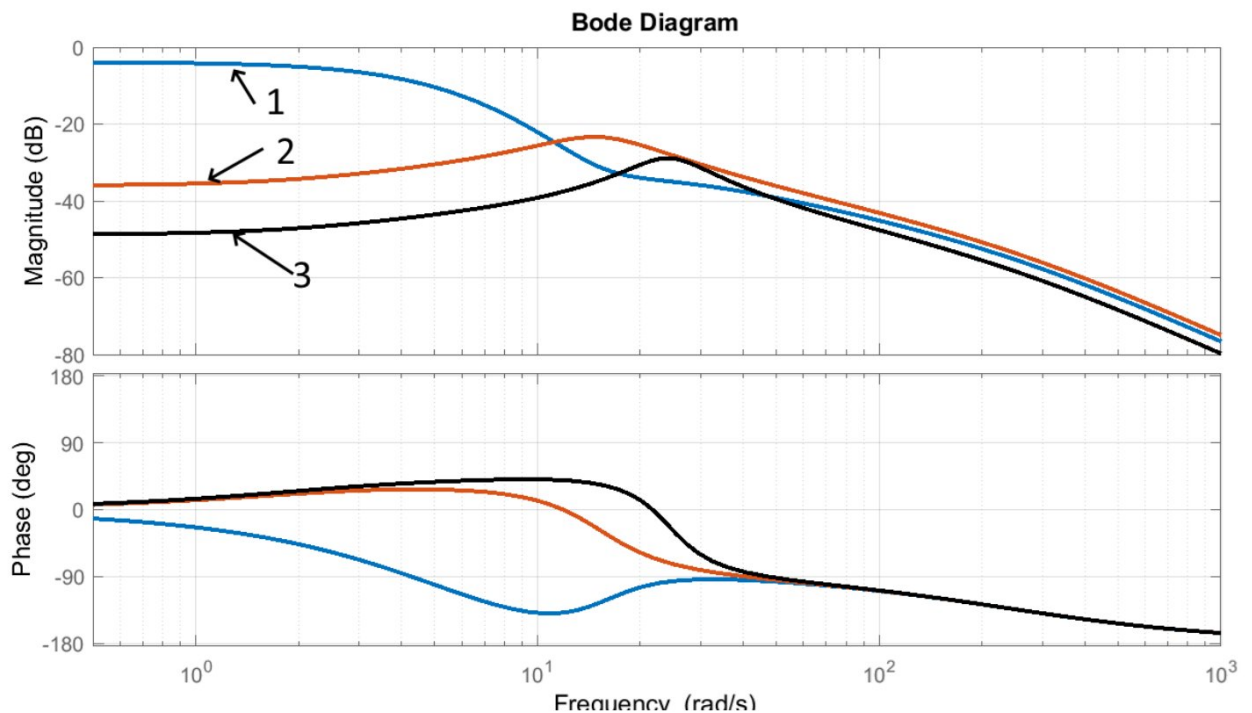


Рисунок 3.1 – Діаграми Бодє для різних положень  $h$  дросельної засувки:  
крива 1 –  $h=4$ ; крива 2 –  $h=10$ ; крива 3 –  $h=16$

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

$$G_i(s) = W_{Mi}(s) \cdot W_{Ti}(s), \quad (3.6)$$

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 передатної функції «вхід-вихід» необхідно для відображення збурень по моменту супротиву обертання турбіни  $M_C$  (рис. 2.2). Ці збурення виникають внаслідок змін 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  $W_K(s)$ :

$$W_{Ki}(s) = \frac{C_i(s)G_i(s)}{1 + C_i(s)G_i(s)} \quad (3.7)$$

Для реалізації можливостей автоматизації налаштувань коректора  $C$  з використанням засобів інструментарію *SISO Design Tool* [33], необхідно формалізувати критерії керування (3.2) ОК та обмеження налаштувань (3.3).

Найбільш поширені методи, що дозволяють отримати потрібну стійкість та швидкодію перехідних процесів у промислових об'єктах, спираються на оцінку перехідної та частотної характеристик. При цьому із перехідної характеристики отримуються прямі показники якості регулювання (перерегулювання, час регулювання), а в якості показника стійкості використовується запас стійкості по фазі. В якості показника швидкості перехідних процесів ОК (відображується на перехідній характеристиці) використовується частота зрізу частотної характеристики ОК. Корегувальні дії по налаштуванню параметрів регулятора відображуються на частотній характеристиці досліджуваного об'єкту керування (діаграмі Боде) шляхом графічних побудов.

Вирішення завдання мінімізації значення критерія регулювання типу (3.2)) дає змогу розрахувати коефіцієнти налаштувань компенсатора, які забезпечують потрібні параметри регулювання. Враховуючи порядок передатної функції моделі нашого об'єкту керування (3.6), доцільність зменшення порядку цієї функції не викликає сумнівів. До того ж, зменшення порядку передатної функції дозволяє підвищити завадостійкість та робастність системи керування.

Завдяки опції *Graphical Tuning* на діаграмі Бодє відображуються результати додавання коригуючих ланок до структури коректора  $C_i(s)$ . Параметри коректора визначаються розташуванням нулів та полюсів на діаграмі Бодє (розімкнений контур). Результати налаштувань аналізуються в опції *Analysis Plot* по перехідній функції замкненого контуру системи. Передатна функція коректора  $C_i(s)$ , формується після аналізу параметрів перехідної функції (астатизм, перерегулювання, швидкодія). Інструментарій *SISO Design Tool* дозволяє отримати коефіцієнти відповідного ПД-регулятора лише у випадку, якщо передатна функція коректора  $C_i(s)$  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.

Таким чином, у подальшому алгоритм синтезу та налаштування регулятора можна класифікувати як адаптивний. Він полягає у виборі  $R_i$ -го регулятора із загальної кількості  $n$  регуляторів, кожний із яких відповідає  $i$ -й робочій точці (діапазону регулювання) в залежності від навантаження електрогенератора ТГА.

### 3.3 Експериментальна перевірка регулятора

Додаткові труднощі налаштувань обумовлені нелінійністю параметрів ОК, навіть у вибраній робочій точці моделі, оскільки блоки досліджуваної моделі об'єкту керування мають різний характер нелінійності.

Альтернативним варіантом регулювання швидкості стає релейний регулятор (РР) [34]. Для побудови такого РР приймається структура 3-х позиційного РР, функціональна залежність від похибки керування  $X$  якого має вигляд:

$$\begin{aligned}
 &U_{max}, X > \varepsilon \\
 &F(X) = U_z, -\varepsilon < X < \varepsilon \\
 & -U_{max}, X < -\varepsilon
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

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

Параметричний синтез РР зазвичай виконується з допомогою фазової площини, де з'ясовується рівень стійкості моделі ОК при ступінчатих керуючих впливах. Оскільки параметричний синтез РР нашого ОК є предметом інших досліджень, то наступні експерименти по дослідженню регулятора проводилися у напрямку відпрацювань збурень процесу обертання турбіни. При цьому вважається, що будь які стійкі та нестійкі коливання ідентифікуються на осцилограмах процесу регулювання швидкості обертання.

Верифікація результатів налаштування параметрів РР швидкості здійснюється по перехідній функції регулювання швидкості обертання. На першому етапі перевірка відпрацювання збурень процесу обертання турбіни здійснюється в моделі *MATLAB Simulink*, схема якої будується відповідно до схеми рис. 2.2. Для цього до складу моделі експериментальної установки ТГА, крім моделі ОК та РР вмикають симулятор збурень, який являє собою генератор сигналів різної форми. Налаштування параметрів РР здійснюється за критерієм рівня згасання збурень та точністю утримання заданої швидкості обертання.

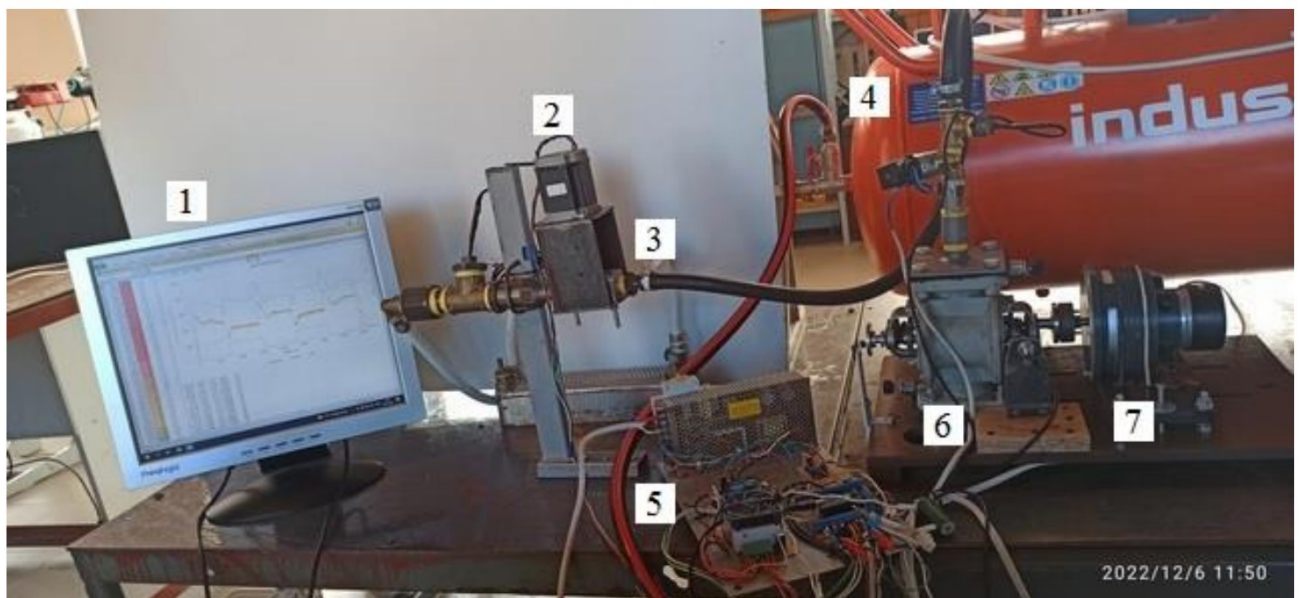


Рисунок 3.2 – Вигляд експериментальної установки

Наступний етап експериментів здійснювався на створеній експериментальній установці, загальний вигляд якої показано на рис. 3.2. Оберти турбіни **6** залежать від положення засувки **3**, яка позиціонується кроковим двигуном **2**. Результати



регулювання потоку стисненого повітря, що надходить із джерела тиску **4**, та керується регулятором **5**, відображуються на моніторі процесу **1**. Збурення моменту, від якого залежить швидкість обертання, імітуються шляхом зміни навантаження генератора **7** та схеми регулювання навантаженням, яка разом з регулятором побудована на базі мікропроцесору сімейства AVR.

Зміна навантаження (чергування циклів «гальмування – обертання») здійснювалася шляхом зміни електричного навантаження генератора, що з'єднаний з валом турбіни. Стрибки навантаження відповідають реальним умовам споживання електричної енергії, що видається з генератора у мережу споживання.

Основною метою досліджень на експериментальній установці є отримання експериментальних даних щодо динаміки реального ОК та точності позиціонування регульованої засувки. Ці дані необхідні для побудови регулятора для виконавчого механізму, який забезпечить постійну швидкість з огляду на те, що в якості пристрою електроприводу засувки використовується кроковий двигун. До того ж, результати натурного моделювання повинні підтвердити справедливість припущень, що зроблені при побудові математичної моделі та синтезу регулятора.

Як зазначалося, синтезувати ПД-регулятор із бажаними параметрами для нашого ОК складно, то в досліджуваній математичній моделі ОК застосовано трьохпозиційний РР (3.8). Результат налаштувань РР отримані за допомогою *MATLAB Simulink* наведено на рис.3.3.

Для оцінки ефективності РР та справедливості прийнятих припущень при моделюванні системи, в експериментальній установці ТГА рис. 3.2 за допомогою мікропроцесорної системи реалізовано РР швидкості обертання турбіни.

Результат регулювання швидкості ілюструється осцилограмами, які отримані на моніторі процесу (рис. 3.2) та у вигляді файлу даних. Осцилограми зміни швидкості обертання при зміні електромеханічних навантажень (електричних навантажень генератора) приведені на рис. 3.4.

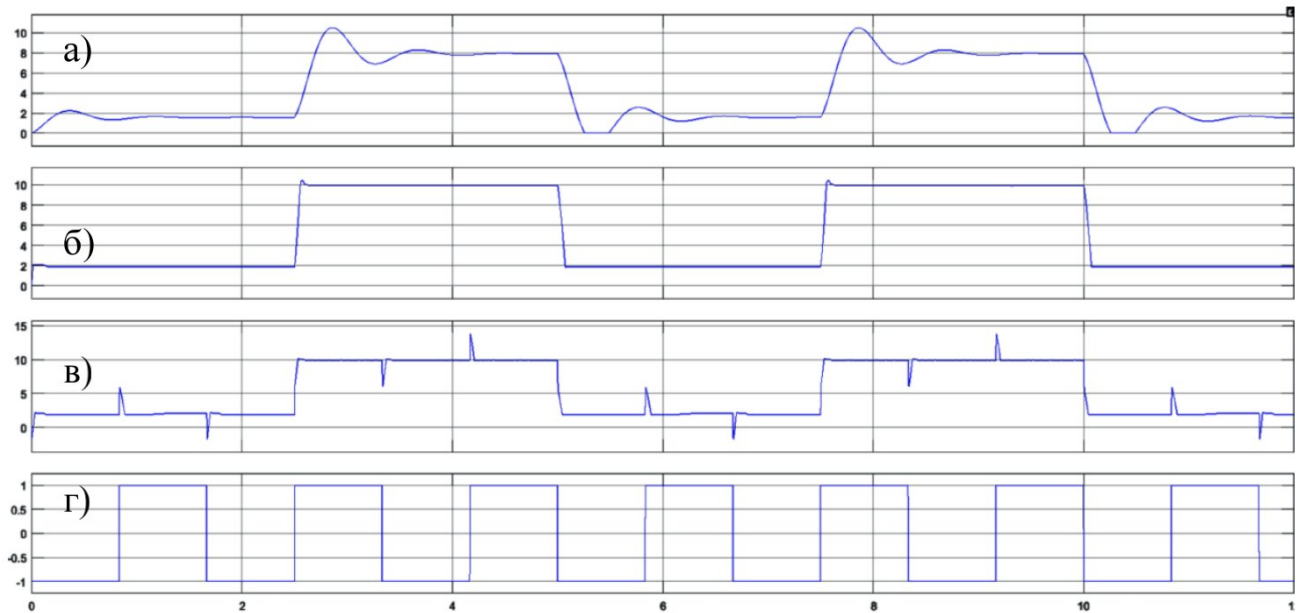


Рисунок 3.3 – Зміни швидкості обертання при навантаженнях:

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

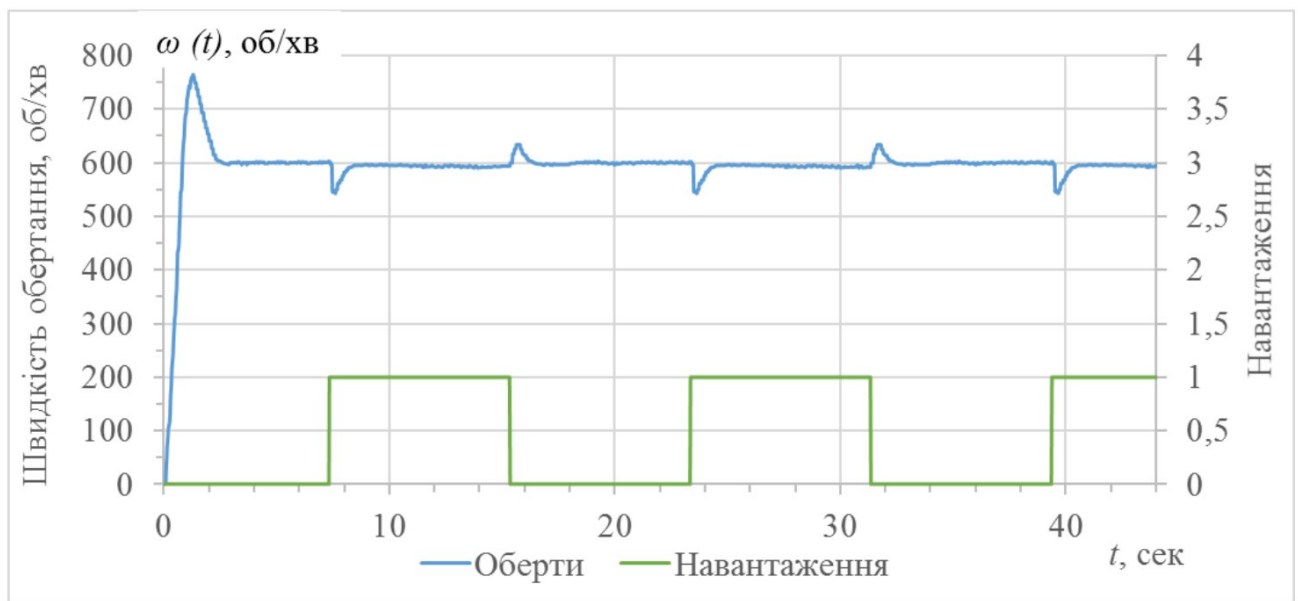


Рисунок 3.4 – Зміни швидкості обертання турбіни та стан навантаження турбіни

Із наведених рисунків видно, що отримані результати за допомогою математичного та натурального моделювання збігаються. Отже можна стверджувати, що запропонована методика синтезу регуляторів для засувок турбін є дієвою та дозволяє отримати параметри регулятора, який у подальшому

можна застосовувати на реальних системах генерації електроенергії, які побудовані з використанням турбін.

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. Тому при виборі підходів до розробки регулятора враховується місце, яке займає конструкція турбіни. З одного боку напрацьовані моделі, які відображують специфіку функціонування вітрових турбін, з іншого боку можна побачити успіхи впровадження моделей для керування паровими та гідротурбінами. Відповідно, турбіни утилізаційних установок по динамічним характеристикам займають проміжне положення, яке підтверджується значенням швидкостей обертання та величиною корисного механічного навантаження.

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

Виходячи із завдань практичної реалізації регулятора на мікропроцесорних засобах, підтверджено доцільність редукування передатної функції моделі в процесі ідентифікації ОК. З огляду на перспективу використання регуляторів швидкості обертання турбіни утилізаційних установок в промислових умовах, необхідність забезпечення простих налаштувань і надійності функціонування в умовах дії збурень не викликає сумнівів. 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 теперішнього часу РР зазвичай застосовувалися для ОК, в яких керуючі впливи на параметри процесу відпрацьовуються відповідно до його сталої часу. В результаті досліджень на експериментальній установці показано, що використання позиційних РР, побудованих на мікропроцесорних засобах та сучасних комутаційних пристроях дозволяє забезпечити динаміку регулювання на рівні класичного ПД-регулятора. Ці параметри стабілізації досягнуті завдяки

використанню досить точного датчика швидкості обертання турбіни та мікропроцесорних засобів керування кроковим двигуном, що є приводом дросельної засувки.

Методи дослідження моделі малопотужної турбіни можна використати для побудови регуляторів інших турбін такого типу або турбін малих гідроелектростанцій.

Вагомим результатом цих досліджень є факт стабілізації швидкості обертання турбіни в умовах дії збурень. Підвищення стабільності обертання турбіни з використанням запропонованого РР дозволить послабити жорсткість вимог до регулятора параметрів системи «турбіна – електрогенератор». Важливість цього здобутку полягає у можливості компенсації збурень, що надходять із мережи споживання та носять випадковий характер.

### **3.4 Синтез регулятора підігріву газу**

В моделі, що зображена на рис. 2.9, присутній симулятор збурень (ZBUR), який вмикається у час закінчення перехідного процесу (100 с) після вмикання термоелектричного нагрівача. Дослідження моделі підігрівача газу передбачає оцінку ступеня впливу збурень параметрів об'єкту на вихідну температуру потоку, що надходить на дроселювання. Збурюючими впливами на температуру  $T_{Out}$  є зміни витрат потоку  $Q$  та вхідна температура потоку  $T_{In}$  підігрівача (рис. 2.9).

На рис. 3.5 показані зміни вихідного сигналу в результаті дії зазначених збурень.

Із приведених осцилограм видно, що при однакових відносних змінах параметрів впливу, чутливість до збурень каналу «витрати потоку - вихідна температура» більша, ніж каналу « $T_{In} - T_{Out}$ ».

Звертаючись до структури регулятора каналу керування «електротермонагрівач - температура», що стабілізує температуру підігрівача, основним питанням є метод регулювання. Цей метод визначається виконавчим

механізмом, який керує тепловим потоком, а також сталими часу ОК, які визначаються на етапі ідентифікації його параметрів.

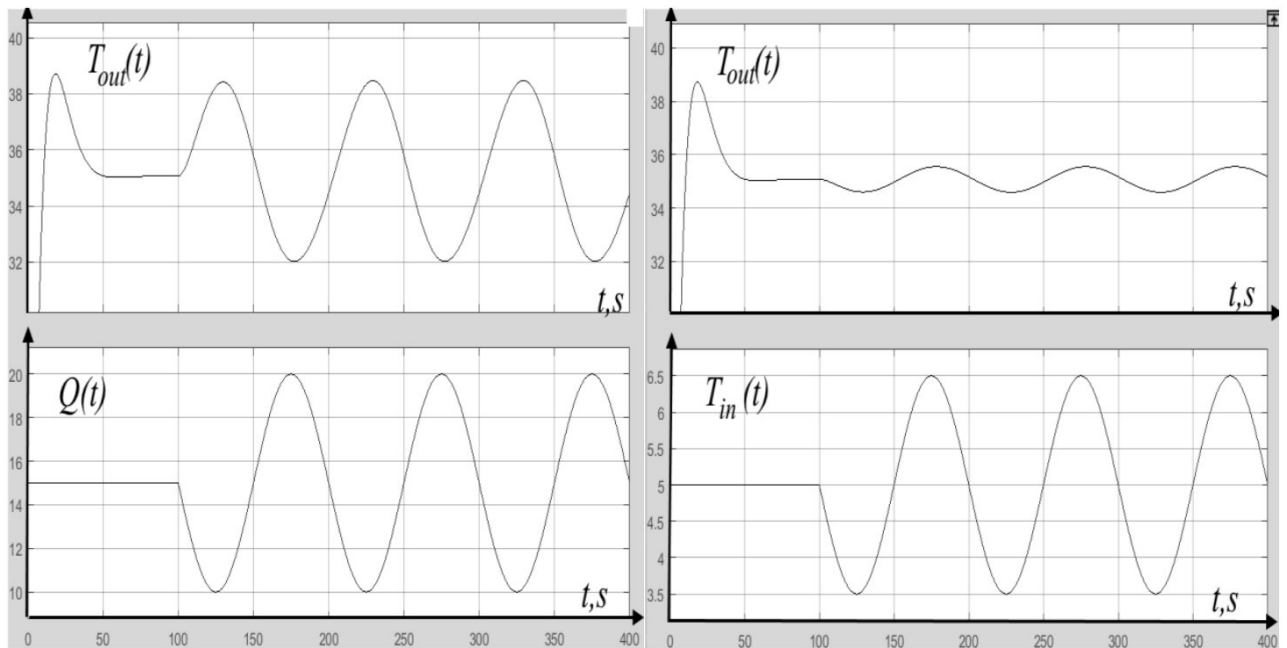
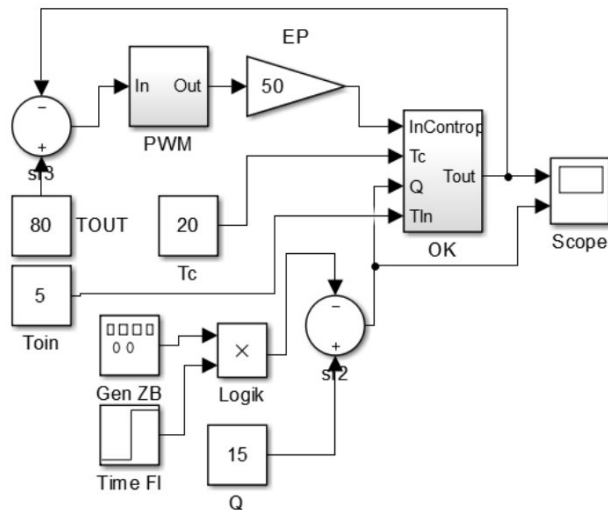


Рисунок 3.5 – Осцилограми результатів дії збурень на температуру потоку

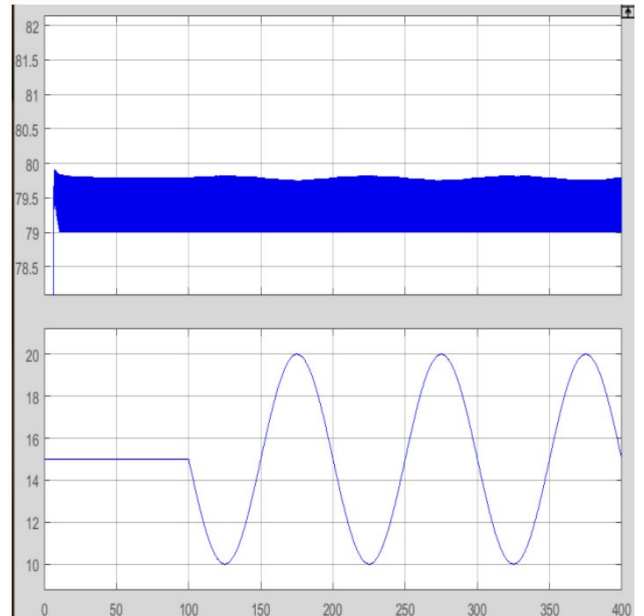
З огляду на значення сталих часу нашого ОК, цілком прийнятним було б використання ПД-регулятора (використання інтегральної складової в реальному регуляторі не має сенсу, оскільки сам ОК є інтегратором з великим значенням інтегрування). Проте, керуючись міркуваннями енергозбереження, досить перспективним здається застосування ШІМ-контролера (контролера з широтно імпульсною модуляцією) в комбінації з ПД-регулятором [35].

Додавання значень пропорційної складової дає змогу зменшити амплітуду автоколивань, як видно із результатів моделювання схеми ШІМ регулятора (рис. 3.6 а) та осцилограми вихідного сигналу (рис. 3.6 б).

Такий регулятор досить просто реалізується на будь-якому сучасному мікроконтролері з використанням програми на мові FBD (наприклад, з використанням програмовано-логічного контролера S7-400 фірми Siemens).



а)



б)

Рисунок 3.6 – Схема моделювання процесу ШІМ регулятора (а)  
та осцилограма вихідного сигналу(б)

Слід також зазначити, що побудова моделі та синтез регулятора підігрівача, який по опису є нелінійним об'єктом, не передбачає кроків по лінеаризації моделі. Такий підхід зумовлений тим, що на етапі впровадження загальної мікропроцесорної системи керування процесом утилізації надлишкового тиску передбачається використання ШІМ-регулятора температури. Цей регулятор передбачається підпорядкувати зовнішньому контуру керування витратами потоку газу, що надходить на дроселювання або безпосередньо на турбіну ТГА.

## 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ТА РОЗРОБКА SCADA-СИСТЕМИ

Впровадження напрацювань магістерської роботи планується робити на стенді для дослідження розширюваних турбомашин описаному в [8]. Стенд ТГА призначений для перетворення потенційної енергії стиснутого газу спочатку в механічну енергію на валу за допомогою вихрової або струминно-реактивної розширювальної турбомашини, а потім механічної енергії в електроенергію за допомогою електрогенератора. Принципова схема та фото стенду представлені на рис. 4.1 відповідно.

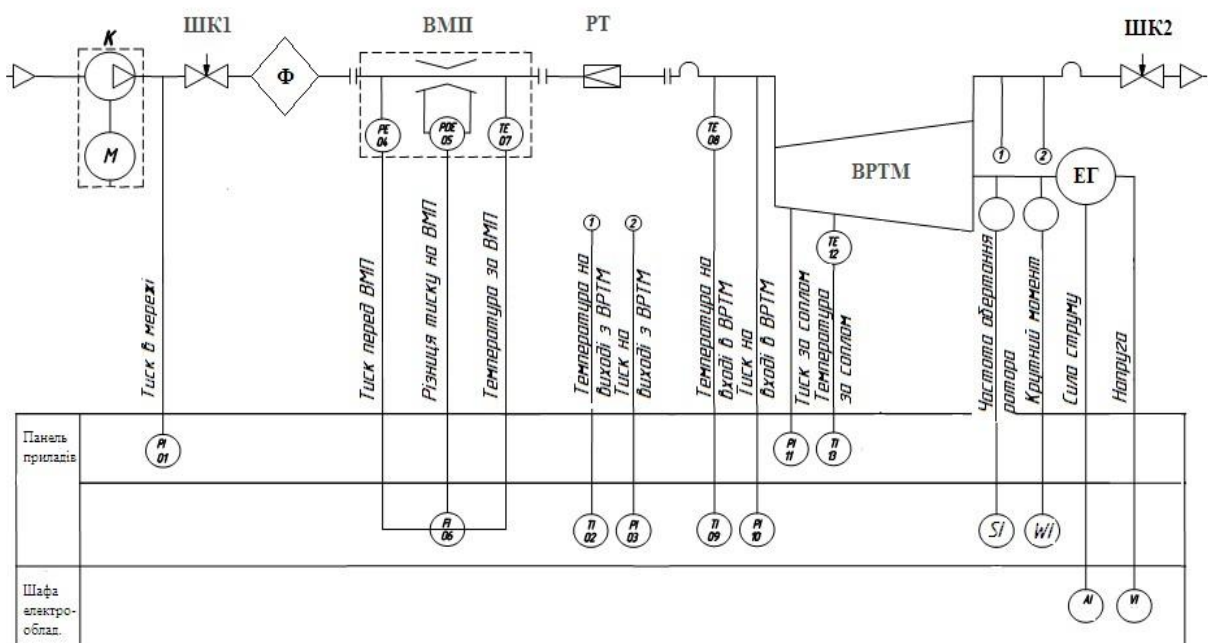


Рисунок 4.1 – Схема та загальне фото стенду ТГА [8]

На рис. 4.1: К – компресор; ШК1, ШК2 – шарові крани; Ф – фільтр; ВМП – витратомір; РТ – регулятор тиску; ВРТМ – вихрова розширювальна турбомашина; ЕГ – електрогенератор; Р – манометри; Т – термометри; СИ – блок тахометра.

В цьому у стенді реалізовані різні схеми підключення навантажень, одна з них це ТГА з використанням в ньому синхронним генератором рис. 4.2

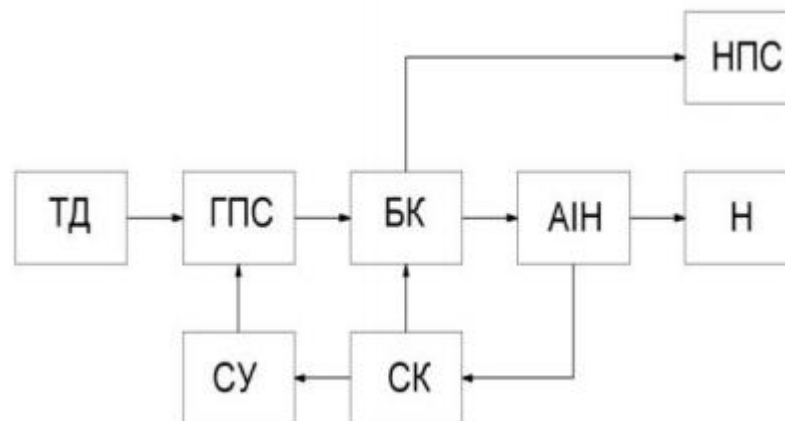


Рисунок 4.2 – Функціональна схема електричного навантаження турбогенератора з синхронним генератором [8]

На рис. 4.2: ТД – турбодетандер (вихрова турбомашина); ГПС – синхронний генератор (генератор постійного струму); БК – блок керування генератором; СУ та СК – системи керування напругою та вихідними параметрами ТГА; АІН – автономний інвертор напруги; Н та НПС – навантаження змінного та постійного струмів.

За допомогою синхронного генератора механічна енергія обертання перетворюється в електричну енергію, а потім в постійний струм. За допомогою блока керування і системи контролю вихідної напруги синхронного генератора, а також системи керування вихідними параметрами турбогенератора на виході генератора можна отримати струм необхідних параметрів, який у свою чергу подається на автономний інвертор, що перетворює згенеровану енергію в змінну напругу необхідного значення частоти і форми [8].



У порівнянні зі схемою з використанням асинхронного двигуна, для роботи її в генераторному режимі, відсутня необхідність мати блок самозбудження, що забезпечує самозбудження асинхронного двигуна при відсутності додаткових джерел електроживлення, а також дає стійкий режим роботи генератора в широких діапазонах обертів турбіни. Використання автономного інвертора дозволяє підтримувати задану (необхідну) вихідну напругу та потужність при фіксованій частоті змінного струму різних типів та моделей генераторів.

#### 4.1 Інформаційно-вимірювальна система стенду

Для отримання інформації про параметри стенду на базі вихрової розширювальної турбомашини, її перетворення і обробки пропонується замінити наявну інформаційно-вимірювальну систему на SCADA-систему (рис. 4.3).

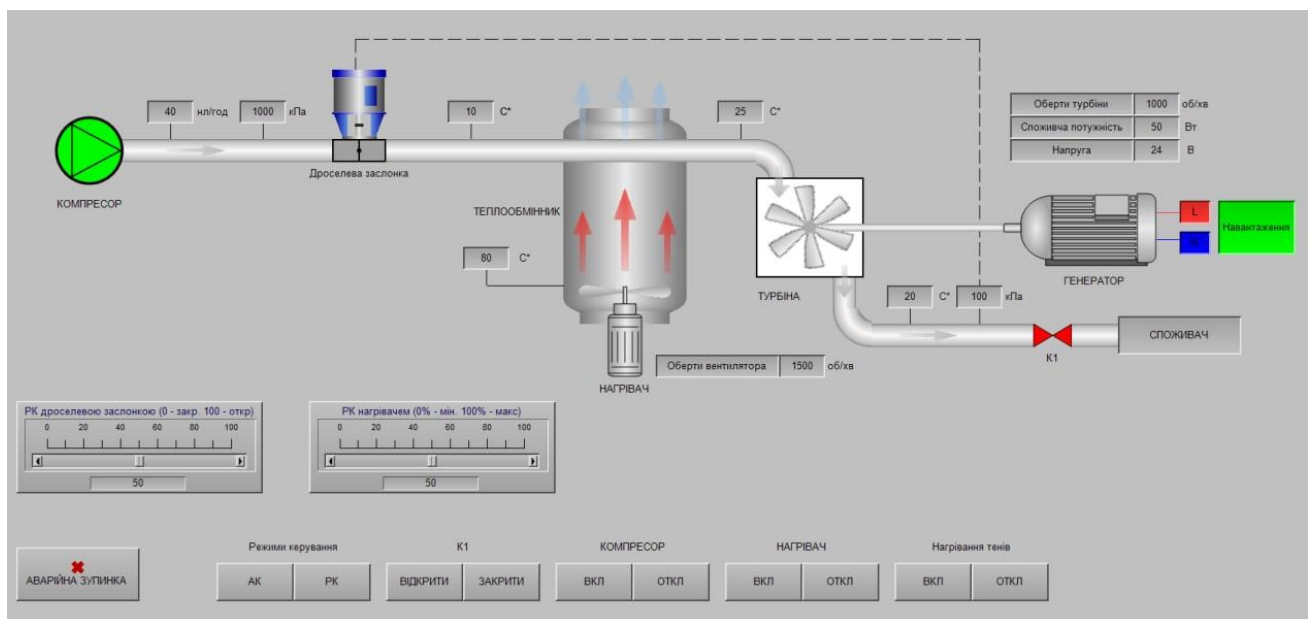


Рисунок 4.3 – Інтерфейс SCADA-системи

Передбачається, що запропонована система буде виконувати такі функції:

– забезпечувати контроль стану обладнання (для візуального контролю стану обладнання розроблена мнемосхема, яка в реальному часі реєструє та відображає поточні параметри елементів стенду під час роботи);

- здійснювати запис параметрів, що надходять від датчиків та вести обробку даних вимірювань за допомогою різноманітного програмного забезпечення;
- забезпечувати дистанційне керування певними вузлами стенду;
- представляти результати вимірювань в табличному і графічному вигляді.

## ВИСНОВКИ

В результаті аналізу процесів утилізації надлишкового тиску газу отримано математичний опис об'єкту керування. Показано, що математична модель описується диференціальними рівняннями нелінійного типу.

Набув подальшого розвитку підхід до лінеаризації опису об'єкта керування шляхом побудови сімейства передатних функцій для робочих точок діапазону регулювання. Вперше для побудови регулятора швидкості обертання турбін запропоновано критерій «мінімальної коливальності параметру, при зміні його заданого значення». Відмінність параметрів передавальних функцій для різних робочих точок робочого діапазону обумовлює необхідність адаптації параметрів регулятора при зміні навантаження та дії збурень.

Виходячи із завдань практичної реалізації регулятора на мікропроцесорних засобах, підтверджено доцільність редукування передатної функції моделі в процесі ідентифікації об'єкту керування. В результаті досліджень на експериментальній на установці показано, що використання релейного регулятора дозволяє забезпечити регулювання обертів турбіни при зміні навантажень. Параметри стабілізації досягнуті завдяки використанню мікропроцесорних засобів керування кроковим двигуном привода дросельної засувки. Вагомим результатом досліджень є факт стабілізації швидкості обертання турбіни та мінімізація впливу збурень на процес обертання турбіни. Показано, що при коливаннях моменту опору турбіні в межах 25%, коливання швидкості обертання не перевищують 5% від заданого значення.

Створена експериментальна установка для оцінки адекватності моделі системи керування, яка дозволила сформулювати конкретні вимоги до засобів автоматизації керованої турбіни. Вдосконалення технічних засобів установки, параметри якої оцінюються в умовах дії збурень дали змогу налагодити програмні та апаратні засоби системи керування.

Відповідно до поставленої мети, яка передбачає подальше підвищення ефективності функціонування УТДА, розроблена модель підігрівача потоку газу.

Показана доцільність впровадження таких регуляторів не тільки в схемах з використанням ТГА, а й на ГРС та ГРП, де задіяні технологічні операції підігріву потоків газу.

Досліджено канал керування температурою потоку газу, що надходить до турбіни турбодетандера. Оцінена ступінь впливу збурюючих факторів (витати газу) на температуру потоку. Для керування нелінійним об'єктом, яким є підігрівач потоку газу, вибрано ШІМ-регулятор, що реалізується на мікропроцесорних засобах, що наявні на ринку.

Проведені дослідження дозволили розробити для турбодетандерних агрегатів методику проведення експериментальних досліджень (випробувань) та обробки результатів. Разом з цим створена автоматизована експериментальна установка утилізації надлишкового тиску, яка може бути використана при підготовці здобувачів вищої освіти за спеціальністю 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка.

Результати роботи буде впроваджено на існуючому стенді для дослідження розширювальних турбомашин малої потужності та агрегатів на їх основі, а також будуть використані при підготовці запитів на отримання фінансування та при виконання госпдоговірних тем. За результатами досліджень опублікована 1 стаття та підготовано тексти ще 2-х наукових статей.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Розроблення енергозберігаючого турбогенератора для утилізації енергії стиснутих газів : Виготовлення дослідного зразка турбогенератора та складання експериментального стенду для проведення його випробувань. Розроблення методики і програми проведення випробувань дослідного зразка турбогенератора / кер. С.М. Ванєєв. – Суми: СумДУ. – 2018. – 64 с.
2. Использование вихревых турбин в целях энергосбережения / С.М. Ванєєв, В.С. Марцинковский, И.В. Овсейко та інші // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2005. – №1(73). – С. 102-108.
3. Ванєєв С.М. Розробка та дослідження вихрового пневмоприводу із зовнішнім периферійним каналом та сопловим апаратом : Дис. канд. техн. наук. – М., 1986.
4. Ванєєв С.М. Дослідження вихровий пневматичної турбіни для приводу кульового крана// Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування. – 1999. – Вип. 35. – С. 71-75.
5. Ванєєв С.М. Структура втрат енергії та ККД у вихровій пневматичної турбіні // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування. – 2000. – Вип. 38, Т.2 – С. 22-28.
6. Ванєєв С.М. Розрахунок ККД вихрового робітника процесу пневматичної турбінної сходинки із зовнішнім периферійним каналом // Вісник Національного технічного університету : Збірник наук. праць. – 2001. – Вип. 129, ч.2. С. 315-324.
7. Ванєєв С.М. Вплив відсікача на втрати енергії у вихровий розширювальній ступеня // Вісник Сумського державного університету. Серія технічних наук. – 2000. – № 19. – С. 22-27.
8. Стенд для дослідження розширювальних турбомашин малої потужності та агрегатів на їх основі / Ванєєв С.М., Мірошніченко Д.В., **Журба В.О.**, Знаменщиков Я.В. та інші // Refrigeration Engineering and Technology – 2019. – №55(1). – С. 15-21.

- 
9. Ярошенко В. М. Енергетичний аналіз процесів енергозбереження в газотранспортній системі / Холодильна техніка та технологія. – 58 (1). – 2022. – С. 40–49.
10. 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.
11. 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.
12. 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..
13. Kulinchenko H., Leontiev P., Drozdenko O. Development of extreme regulator of separation moisture from the gas stream // ScienceRise. – 2021. – № 2(73). – С. 3–10.
14. Kulinchenko 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
15. Vanyeyev S.M., Radchenko M.I., Meleychuk S.S., Vaga 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. Vanyeyev S.M., Bereznyi O.S. Results of no-load mode and starting mode experimental researches of jet-reactive turbine // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Гірничо-електромеханічна. – 2011 – Вип. 22(195). – С. 32-41.
17. Горбійчук М.І., Когутяк М.І, Гарасимів В.М. Математична модель підігрівника з проміжним теплоносієм // Методи та прилади контролю якості. – 2021. – № 2(47). – С. 83–95.

- 
18. 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.
19. Kulinchenko H., Panych A., Leontiev P., **Zhurba V.** Simulation of the excess expander gas pressure utilization plant // *ScienceRise*. – 2022. – № 3(80). – С. 3–13.
20. Ковриго Ю.М. Питання моделювання роботи виконавчих механізмів і регулюючих органів в системі керування котлоагрегатом / Ю.М. Ковриго, Р.П Саков // *Вісник Приазовського державного технічного університету*. – 2015. – Вип. 31. – С. 80–86
21. 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
22. Bernal M. Analysis and Synthesis of Nonlinear Control Systems / M. Bernal, A. Sala, Z. Lendek, Th. M. Guerra // *Springer Cham*. –2022. – 345 с.
23. Северин В. П. Параметрический синтез нечеткого регулятора для системы управления паровой турбиной с применением генетического алгоритма / В.П. Северин, К.Б. Федянина // *Вісник НТУ «ХПІ»*: Харків. – 2011. – № 29. – С. 33–39.
24. Северин В.П. Многокритериальный параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления паровой турбиной АЭС / В.П. Северин, К.Б. Годлевская // *Вісник НТУ «ХПІ»*: Харків. – 2012. – № 32. – С. 117–126.
25. Jalali M. Frequency regulation and AGC in isolated systems with DFIG-based wind turbines/ M. Jalali, K. Bhattacharya // *In Proceedings of the IEEE Power & Energy Society General Meeting: Vancouver, BC, Canada*. – 21–25 Jul 2013. – С. 1–5.
26. Ibraheem. Study on dynamic participation of wind turbines in automatic generation control of power systems / Ibraheem, K.R. Niazi, G. Sharma // *Electric Power Components and Systems*. – 2015. – 43. – С. 44–55.

- 
27. Abo-Elyousr F.K. Load frequency controller design for two-area interconnected power system with DFIG-based wind turbine via ant colony algorithm / F.K. Abo-Elyousr // In Proceedings of the Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON): Cairo, Egypt. – 2016. – C. 1–8.
28. Pappachen A. Genetic algorithm based PID controller for a two-area deregulated power system along with DFIG units / A. Pappachen, A.P. Fathima // In Proceedings IEEE Sponsored International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication systems (ICIIECS): Coimbatore, India. – 2015. – C. 1–6.
29. Kumar A. Impact study of DFIG based wind power penetration on LFC of a multi-area power system / A. Kumar, Sathans // In Proceedings of the Annual IEEE India Conference (INDICON): New Delhi, India. – 2015. – C. 1–6.
30. 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. – C. 1–23.
31. Marushchak Y. Approximation of fractional order differential-integral controllers by integer order transfer functions / Y. Marushchak, B. Kopchak // Computational problems of electrical engineering. – 2014. – № 1(4). – C. 29-32.
32. 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). – C. 2116–2129.
33. Bilfeld N.V. PID Controller design with control system toolbox of MATLAB // Technical sciences. – 2015. – № 3–4 (37–38). – C. 11–20.
34. 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.
35. Design and Implementation of Micro Temperature Control System Based on PWM / Yajie Zhu et al. // IOP. – 2019. – Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – C. 677