

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеню вищої освіти-магістр
за освітньо-професійною програмою

«Кіберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті»

зі спеціальності

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

тема роботи:

«Автоматизація процесу холодного дуття в доменному виробництві»

Виконав ст. гр. АКТР-24-1м	_____	<u>Куроп`ятник І. П.</u>
Керівник	_____	<u>Тиханський М.П.</u>
Нормоконтроль	_____	<u>Маринич І.А.</u>
Завідувач кафедри	_____	<u>Рубан С.А.</u>

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Магістр

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри: к.т.н. Рубан С.А.

«15» липня 2025 р.

ЗАВДАННЯ на кваліфікаційну роботу магістра

студентові групи АКІТР-24-1м Куроп'ятнику Івану Петровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизація процесу холодного дуття в доменному виробництві»

затверджено наказом по університету № 258с від 13.05.2025 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 01.12.2025 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка, презентація у Microsoft PowerPoint в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-3 доц. Тиханський М.П.

Нормоконтроль доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	14.05.25
2	<i>Розділ 1</i>	20.05.25
3	<i>Розділ 2</i>	18.08.25
4	<i>Розділ 3</i>	19.09.25
5	<i>Висновки</i>	15.10.25
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	20.11.25
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	28.11.25
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	01.12.25

6. Дата видачі завдання: 13.05.2025р.

Керівник _____ /Тиханський М.П. /

7. Запевнення: Я, Куроп`ятник Іван Петрович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету з метою запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти ознайомлена. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Здобувач _____ / Куроп`ятник Іван Петрович /

АНОТАЦІЯ

Куруп'ятник І.П. Автоматизація процесу холодного дуття в доменному виробництві : кваліфікаційна робота магістра : 174 – Автоматизація, комп'ютерно – інтегровані технології та робототехніка. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2025. 85 с.

Об'єктом дослідження є автоматизована система керування виробництвом і транспортуванням холодного дуття.

Предметом дослідження є процеси генерування та транспортування холодного дуття в доменному виробництві

Метою даної роботи є підвищення енергоефективності доменного виробництва шляхом виявлення нових закономірностей і взаємозв'язків процесів утворення та транспортування холодного дуття, а також розроблення рішень щодо його автоматизованого керування.

В роботі вирішені наступні завдання: система забезпечує стабільний дуттьовий режим під час нормальної роботи доменної печі; зменшило вплив газодинамічних затримок, спричинених великою протяжністю газотранспортної системи, на роботу системи підготовки холодного дуття; уточнено математичну модель фізичних процесів, що відбуваються під час виробництва холодного дуття, врахувавши динамічні властивості обладнання газотранспортної мережі; розроблено автоматизовану систему керування виробництвом холодного дуття та його транспортуванням до доменної печі, яка забезпечить зменшення скидання надлишкового стисненого кисневмісного повітря через повітророзвантажувальний клапан; проведено математичне моделювання для підтвердження достовірності розробки автоматизованої системи керування.

Ключові слова:

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, ГАЗОТРАНСПОРТНА МЕРЕЖА, ГАЗОТУРБІННА УСТАНОВКА, СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, ДУТТЯ, ПОВІТРОНАГРІВАЧ.

ANNOTATION

Kuropiatnyk I.P. Automation of the cold blast process in blast furnace production: master's thesis: 174 – Automation, computer-integrated technologies and robotics. Kryvyi Rih. Kryvyi Rih National University, 2025. 85 p.

The object of the study is an automated control system for the production and transportation of cold blast.

The subject of the study is the processes of generating and transporting cold blast in blast furnace production

The purpose of this work is to increase the energy efficiency of blast furnace production by identifying new patterns and relationships in the processes of forming and transporting cold blast, as well as developing solutions for its automated control.

The following tasks were solved in the work: the system provides a stable blast mode during normal operation of the blast furnace; the influence of gas-dynamic delays caused by the long length of the gas transportation system on the operation of the cold blast preparation system was reduced; The mathematical model of physical processes occurring during the production of cold blast has been refined, taking into account the dynamic properties of the gas transportation network equipment; an automated control system for the production of cold blast and its transportation to the blast furnace has been developed, which will ensure a reduction in the discharge of excess compressed oxygen-containing air through the air discharge valve; mathematical modeling has been carried out to confirm the reliability of the development of the automated control system.

Keywords:

AUTOMATIC SYSTEM, GAS TRANSPORTATION NETWORK, GAS TURBINE INSTALLATION, REGULATOR SYNTHESIS, TECHNOLOGICAL PROCESS, BLOW, AIR HEATER.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ	11
1.1 Технологічний процес вироблення холодного дуття та елементи доменного виробництва.....	11
1.2 Управління технологічним процесом підготовки холодного дуття....	18
1.3 Аналіз існуючих систем керування технологічним процесом.....	19
1.4 Шляхи підвищення ефективності системи керування процесом підготовки холодного дуття	22
1.5 Постановка задачі дослідження	27
Висновки до розділу	28
РОЗДІЛ 2. ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА СИНТЕЗ І МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ.....	29
2.1 Елементи системи вироблення дуття та їх взаємодія.....	29
2.2 Математичний опис повітродувки	30
2.3 Математичний опис тракту дуття	33
2.4 Алгоритмічний синтез регулятора швидкості обертання турбіни.....	40
2.5 Структурна реалізація алгоритму керування швидкістю турбіни.....	49
2.6 Уточнення математичного опису дуттєвої машини.....	51
2.7 Лінеаризація нелінійних об'єктів газотранспортної мережі.....	54
2.8 Синтез регулятора витрати повітря на виході газотранспортної мережі.....	55
2.9 Синтез регулятора тиску на виході газотранспортної мережі.....	56
Висновки до розділу	58

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ	60
3.1 Структура системи управління виробленням холодного дуття	60
3.2 Дослідження системи "ЕМП – Парова турбіна"	61
3.3 Перевірка адекватності математичної моделі ГТУ	63
3.4 Моделювання системи управління витратою дуття	65
3.5 Дослідження роботи регулятора тиску дуття на виході ГТУ	68
3.6 Управління витратою дуття на виході повітрянагрівачів	75
Висновки до розділу	80
ВИСНОВКИ	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	82

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АПК – антипомпажний клапан;

АСК – автоматизована система керування;

АСКП – автоматизована система керування підприємством;

АСК ТП – автоматизована система керування технологічним процесом;

ВМ – виконавчий механізм;

ГДХ – газодинамічні характеристики;

ГТМ – газотранспортна мережа;

ГТУ – газотурбінна установка;

ОК – об'єкт керування;

ПІД-регулятор – пропорційний інтегральний та диференціальний регулятор;

ПЛК – програмований логічний контролер;

ПН – повітрянагрівач;

САР – система автоматичного регулювання;

САК – система автоматизованого керування;

ТЗА – технічні засоби автоматизації;

ТК – технологічний комплекс;

ТП – технологічний процес;

ВСТУП

Інтенсивність роботи доменної печі визначається кількістю поданого дуття. Вона є критерієм максимально допустимої швидкості спуску шихти та мінімального часу її перебування у печі за умов раціональної витрати коксу. Якщо під час роботи печі при тиску дуття, що значно перевищує нормативний, спостерігаються збої або нестійкий хід, це свідчить про недостатнє сприйняття печі дуттям і потребує зменшення його подачі.

У сучасній доменній металургії України керування подачею холодного дуття фактично не здійснюється. Для зменшення або тимчасового припинення подачі дуття без зміни режиму роботи повітродувної машини на повітропроводі холодного дуття, поблизу блоку повітронагрівачів, встановлено повітророзвантажувальний клапан. Через нього, за командою оператора доменної печі, в атмосферу скидається до 30% стислого повітря, збагаченого киснем. Його виробництво потребує значних витрат електричної та теплової енергії.

Суттєвого зменшення втрат кисневмісного стисненого повітря можна досягти шляхом цілеспрямованого регулювання продуктивності турбоповітродувки. Тому дослідження закономірностей енергообмінних процесів під час виробництва та транспортування холодного дуття й розроблення на цій основі алгоритмів управління процесами стискання, регулювання витрати та переміщення збагаченого киснем повітря газотранспортною системою для подачі його в доменну піч є актуальною науково-прикладною задачею.

Об’єкт дослідження – автоматизована система керування виробництвом і транспортуванням холодного дуття.

Предмет дослідження – процеси генерування та транспортування холодного дуття в доменному виробництві.

Метою роботи є підвищення енергоефективності доменного виробництва шляхом виявлення нових закономірностей і взаємозв'язків процесів утворення та транспортування холодного дуття, а також розроблення рішень щодо його автоматизованого керування.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Технологічний процес вироблення холодного дуття та елементи доменного виробництва

На сьогоднішній день у металургійній галузі найпоширенішим технологічним способом отримання сплаву заліза з вуглецем – чавуну є доменне виробництво. У його основу покладено технологічний процес доменної плавки. Доменна плавка здійснюється в доменних цехах, які діляться на 3 основні виробничі ділянки: доменну піч, рудний двір, систему підготовки дуття (рис. 1.1).

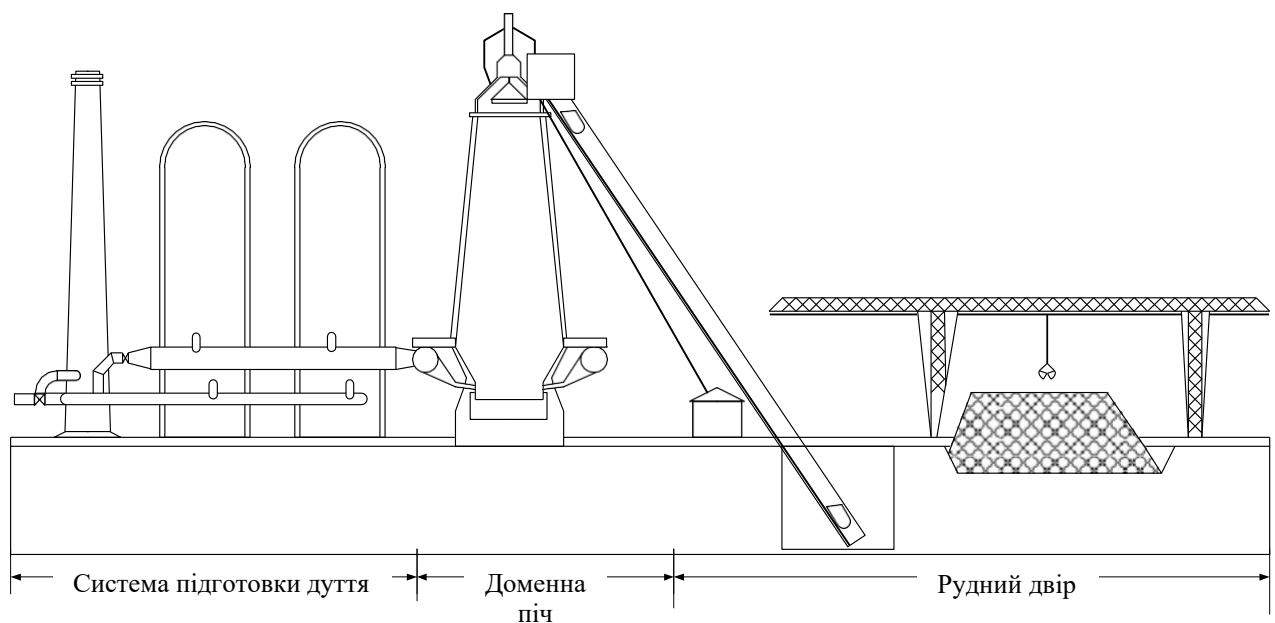


Рисунок 1.1 - Ділянки доменного цеху

Експлуатація доменних печей передбачає: організацію технологічних режимів при виплавці заданої марки чавуну; обслуговування доменної печі;

ліквідацію розладів перебігу печі; ліквідацію аварійних ситуацій; зупинку печей для виконання ремонтів; задувку печей після зупинок.

Усі технологічні операції регламентуються відповідними технологічними інструкціями, які враховують як загальні принципи, і конкретні особливості доменних цехів.

Таким чином, доменна піч із комплексом основного та допоміжного обладнання є складною технологічною системою.

Організація робіт у доменному цеху розглядається в рамках складної керованої технологічної системи. Всі процеси схильні до обурювальних впливів. Інформація може містити стохастичну складову або бути спотвореною.

Забезпечення технології виробництва у цеху здійснюється наступними системами:

- приймання та складування матеріалів, що складається з рудного двору, обладнання для розвантаження матеріалів, усереднення, гуркотіння та дозування шихти;
- транспортування та завантаження матеріалів на колошник доменної печі, яка служить для формування стовпа шихтових матеріалів, що має задані властивості;
- підготовки та подачі комбінованого дуття, що складається з повітродувки, повітронагрівачів, трубопроводів та фурменних приладів;
- переробки продуктів плавки, що складається з пристроїв для відкриття та закриття чавунної та шлакової льоток, жолобів, парку ковшів для прибирання продуктів плавки, установок грануляції шлаку та розливання чавуну;
- відведення колошникового газу, що складається з комплексу пилогазоочищення та дросельної групи.

Оптимальна робота кожної з цих систем забезпечує вирішення головного технологічного завдання, а саме виплавки чавуну заданого складу за заданої продуктивності доменної печі та мінімальної витрати енергії. Технологія виплавки чавуну визначається сировинними умовами, конструктивними особливостями доменної печі та допоміжного обладнання.

Численні засоби технічного контролю за ходом доменної плавки, застосування різних моделей доменного процесу та експертних систем, що створюються для спостереження за ходом печі та запобігання всіляким відхиленням його від встановленого режиму, не виключають ролі людського характеру.

Людський фактор: кваліфікації спеціалістів, які ведуть плавку, їх уміння правильно та своєчасно коригувати перебіг доменної печі та попереджати можливі його розлади та аварії. Це головна умова збереження стабільного режиму печі, основним показником якого є рівний хід.

Рівний хід - це нормальна робота доменної печі, яка встановлюється після задувки і закінчення періоду роздувки, протягом якого в технологічний режим поступово вводяться всі технологічні параметри печі. Рівний хід печі, характеризується:

- 1) плавним, стійким сходом шихти з різною та постійною швидкістю в різних зонах горизонтального перерізу шахти печі;
- 2) стабільним розподілом матеріалів і газів, що відповідає максимально можливому використанню їх фізичної та хімічної енергії з мінімальними для даних умов плавки витратою коксу та винесенням колошникового пилу;
- 3) стійким тепловим станом, що забезпечує одержання продуктів плавки заданого складу з найвищими техніко-економічними показниками;
- 4) постійними параметрами дутьового режиму, тобто. кількістю, тиском та температурою гарячого дуття;
- 5) наявністю стійкого гарнісажу, що забезпечує сталість робочого профілю печі та його збереження в процесі експлуатації.

Обов'язковими умовами забезпечення стійкого рівного ходу доменної печі є сталість шихтових матеріалів, виконання всіх виробничих операцій за строго регламентованим графіком, безперебійна робота обладнання та дотримання оптимальних параметрів технологічного процесу.

Для виконання вимог та умов технологічного процесу використовують комплекс технічних засобів, що забезпечує кілька методів регулювання технологічного процесу доменної плавки.

1) Регулювання «зверху» - управління розподілом матеріалів на колошнику шляхом зміни режиму завантаження - рівня засипу, системи завантаження та величини подачі.

2) Регулювання «знизу» - зміна режиму горна доменної печі шляхом коригування кількості, тиску, температури та складу комбінованого дуття, його вологості, підвищеного тиску на колошнику, діаметру та висову фурм, величини загального перепаду статичного тиску газу в шахті.

3) Зміна якісного складу шихти, її гранулометричного складу та співвідношення окремих компонентів.

Усі методи за винятком управління «знизу» виявляють свій вплив на перебіг доменної плавки через деякий час.

Найбільш оперативним із усіх прийомів є регулювання «згори», оскільки воно покликане підтримувати постійним режим печі знизу і має змінюватися лише в особливих випадках. Найчастіше необхідність регулювання «згори» виникає у зв'язку з відхиленням газового потоку від нормального.

Управління доменною плавкою «знизу» є найбільш швидкодіючим порівняно з іншими способами і включає регулювання кількості дуття, що подається в піч, його компонентного і пропорційного складу. Кількість дуття визначає інтенсивність ходу печі, яка є критерієм максимально допустимої швидкості сходу подач та мінімального часу переробки шихти в печі, сумісних з оптимальною витратою коксу [1].

Часті зміни дутьового режиму небажані, тому що при цьому змінюються об'єм окисних зон і розподіл температур за висотою та перерізом печі з порушенням встановленого газового потоку та теплового режиму. Тому зміна кількості дуття має запобігати своєчасному регулюванню ходу доменної печі «згори». Вдаються до регулювання «знизу» лише у виняткових випадках.

Процес отримання холодного дуття є базовим для всіх технологічних процесів, які беруть участь в управлінні доменною плавкою «знизу».

Холодне дуття - це повітря, збагачене киснем, що подається на вхід до домінної печі. Одержання дуття – енергоємний процес, пов'язаний з великими витратами енергоресурсів, більша частина яких витрачається на підготовку його складових. Вироблення холодного дуття відбувається поетапно. На різних етапах присутні різноманітні агрегати, що виконують функції очищення та транспортування газу [1].

Склад, тиск, температуру, витрату та технологію одержання холодного дуття задає технологічний процес доменної плавки [2].

Технології отримання дуття на кожному окремому доменному виробництві відрізняються черговістю етапів, серед них можна виділити загальні: очищення, збагачення, стиснення та транспортування.

Технологічний процес отримання дуття можна спрощено зобразити як функціональної схеми, представленої рис. 1.2.

Формування складу дуття починається з системи очищення атмосферного повітря, до складу якої входить система фільтрів, що видаляють із повітря частки пилу та інші забруднення, що погіршують роботу агрегатів на наступних етапах.

Збагачення дуття здійснюється шляхом змішування його з киснем, одержаним в результаті кріогенної ректифікації повітря. Залежно від технології, що застосовується, змішування відбувається перед процесом стиснення або після нього.

Далі дуття надходить на вхід повітродувки, в якій відбувається підвищення тиску, що забезпечує транспортування дуття до повітрянагрівачів. Приводом повітродувки в більшості випадків є конденсаційна парова турбіна малої потужності. Пара в турбіну потрапляє з ємності парозбірника через пристрій подачі пари (ППП). Перегріта пара подається в парозбірник із багатопаливного котлоагрегату ТЕЦ.

Оскільки пара агрегатів «турбіна-повітродувка» формують пароповітряну станцію, яка забезпечує подачу дуття на кілька доменних печей, з метою зменшення теплових втрат парові турбіни розміщують поблизу котлоагрегатів.

Дуття доставляється до повітронагрівачів за допомогою газотранспортної мережі (ГТМ). Протяжність ГТМ вар'юється від десятків до сотень метрів. На шляху її проходження встановлені різні пристрої, за допомогою яких здійснюється розподіл дуття по повітронагрівачам та регулювання витрати дуття.

На виході повітродувки встановлено антипомпажний клапан (АПК), який виконує функції захисту агрегату при пуску та виникненні явища помпажу. Установка АПК продиктована правилами безпечної та безаварійної експлуатації повітродувки. При роботі АПК дуття стравлюється в атмосферу або байпасується.

На вході системи розподілу дуття по повітронагрівачам встановлений повітряно-розвантажувальний клапан (ПРК), за допомогою якого здійснюється регулювання витрати дуття, що подається в доменну піч. Під час роботи ПРК, частина холодного дуття викидається в атмосферу.

Підвищення температури дуття відбувається у повітронагрівачах, які працюють у наступних режимах: нагрівання, відсікання, дуття. Для нагрівання решіток повітронагрівача він переводиться в режим роботи на нагрівання, під час якого відбувається спалювання очищеного доменного газу. Зміна режиму роботи повітронагрівача може здійснюватися автоматично або вручну.

Нагріте дуття надходить у фурми доменної печі через кільцевий повітряпровід.

Нормальне та безпечне протікання всіх технологічних процесів підготовки дуття забезпечується наявністю локальних систем керування та регулювання.

1.2 Управління технологічним процесом підготовки холодного дуття

До об'єктів управління технологічної лінії вироблення холодної дуття можна віднести всі агрегати, що знаходяться на ділянці ГТМ, починаючи від очищення повітря та закінчуючи трубопроводом холодного дуття перед повітрянагрівачами. Багато з цих агрегатів є допоміжними ланками інших технологічних процесів або розташовуються на інших виробничих ділянках металургійного підприємства, що ускладнює їхню заміну чи ремонт. Найбільш значущим для процесу транспортування дуття є робота пароповітряної станції, де розташовані повітродувки.

У ролі повітродувки найчастіше використовують відцентровий компресор із приводом від парової турбіни або електродвигуна. Швидкість обертання компресора стабілізують за допомогою системи регулювання парової турбіни з гідравлічним приводом. Під час подачі дуття швидкість компресора підтримують на заданому значенні у допустимих межах.

Управління всім технологічним процесом підготовки холодної пульпи здійснюється за допомогою роботи людино-машинної системи керування.

Технолог доменного виробництва визначає графік зміни параметрів дуття. Він залежить від тривалості та інтенсивності протікання етапів технологічного процесу доменної плавки – нормальної роботи печі, завантаження шихти, вивантаження металу, заповнення та перемикання повітрянагрівачів.

Найбільш вимогливим до параметрів дуття є етап нормальної роботи, при якому необхідно забезпечити сталість дутьового режиму, який характеризується кількістю, температурою, вологістю і тиском дуття, витратою кисню, природного газу та інших складових комбінованого дуття, що забезпечують заданий нагрівання і рівність ходу печі в встановленому технологічному режимі плавки та стабільних його параметрах. Також важливими показниками є стабільність загального та приватних перепадів тисків за висотою печі, плавність опускання шихти [1].

Найбільш періодичним та короткочасним порівняно з рештою етапів роботи технологічної лінії підготовки дуття є етап заповнення та перемикання повітрянагрівачів. Під час нього відбувається зміна структури ГТМ за рахунок включення в роботу ще одного повітрянагрівача. На цьому етапі роботи відбувається різка зміна параметрів дуття на вході повітрянагрівачів та доменної печі [1].

Керування подачею дуття на вході до повітрянагрівачів здійснює майстер доменної печі шляхом регулювання положення ПРК (відкриття або закриття). При такому способі надлишкове дуття відводиться в атмосферу. За інформацією Дніпровського металургійного комбінату (м. Дніпродзержинськ), у 2005 році щомісячні втрати дуття через ПРК доменних печей коливалися в межах від 20,3% до 27,5%.

1.3 Аналіз існуючих систем керування технологічним процесом

Виділимо основні недоліки у роботі систем регулювання та управління, задіяних у технологічному процесі вироблення холодного дуття. При спільній роботі повітродувки та повітрянагрівачів не враховується довжина ГТМ холодного дуття, яка вносить у роботу системи транспортні затримки газодинамічного характеру, що суттєво впливають на роботу систем керування.

Енерговитратним є регулювання витрати дуття на вході повітрянагрівачів шляхом скидання надлишків дуття в атмосферу, разом з якими в атмосферу випускається кисень, виробництво якого витрачається в середньому 30-50% від загального споживання електричної енергії підприємством.

Більшість металургійних підприємств України з доменним виробництвом було споруджено наприкінці першої та на початку другої половини ХХ століття. Деякі з них пройшли модернізацію або повну реконструкцію технологічних процесів, проте значна частина обладнання, що забезпечує виробництво холодного дуття, залишилася без змін. Вони або відпрацювали свій ресурс, або

за своїм принципом події морально застаріли в порівнянні з сучасним розвитком технічних засобів. Агрегати, що діють, найчастіше працюють із застарілими, як і вони, системами управління. Це стосується і пароповітряних станцій вироблення холодного дуття.

Оскільки майже всі агрегати станції постійно знаходяться в роботі або в гарячому резерві, то при плановому ремонті агрегатів відбувається заміна складових, що найбільше зазнали зносу, таких як вал турбіни або компресора, підшипникових пар, але системи регулювання агрегатів залишаються незмінними і лише піддаються коригуванню та підстроюванню при пусконаладжувальних.

Системи регулювання парових турбін, випущених 30-40 років тому, у переважній більшості виконані на гідравлічних та механічних приводах. Практично всі вони за нинішнього розвитку техніки морально застаріли і по два, а то й по три рази відпрацювали свій ресурс. Наявність люфтів, неконтрольованих протікання гідравліки, зносу основних виконавчих компонентів не дають можливості забезпечити високоточне керування швидкістю обертання турбіни.

При роботі існуючої системи стабілізації витрати дуття не враховується зміна структури ГТМ, що призводить до різкого збільшення витрати дуття на вході в систему повітрянагрівачів та зниження витрати дуття на вході доменної печі, що негативно позначається на нормальному перебігу доменної плавки.

Огляд літературних джерел, у яких наведено математичні моделі парових турбін, показує:

- у статтях [2,3] наведено математичну модель парової турбіни, в якій як вхідну змінну прийнято масову витрату енергоносія, а вихідний - потужність на валу.

- у літературних джерелах [4,5] модель турбіни представляється як нейронної мережі у складі SCADA системи управління;

- у публікації [6] входом моделі є тиск, витрата та температура пари, а виходом потужність на валу. Подана модель взаємопов'язана з термодинамічних

і технологічних процесів роботи котлоагрегату, що не дозволяє використовувати її без розгляду останніх;

- у джерелі [7] наводиться опис динаміки турбіни як приводу генератора суднової енергетичної установки у вигляді ментально-вербальної схеми, яка за своєю структурою представляє багатовимірну модель і в ній немає можливості виділити зв'язок вхід-вихід;

- у статтях [8-10] наведено опис динаміки багатоступінчастої трициліндрової парової турбіни високого тиску, що використовується при побудові моделей для вивчення роботи енергетичних систем. Математичне опис динаміки одного циліндра зводиться до передатної функції 1-го порядку, входом якої є необхідна потужність, а виходом - потужність, що отримується, що є неприпустимим спрощенням опису динаміки такого складного об'єкта управління.

З цих літературних джерел випливає, що представлені в них моделі парових турбін не можуть бути застосовані для побудови системи управління підготовкою та транспортуванням холодного дуття внаслідок того, що вони не встановлюють однозначний зв'язок між кількістю пари, що подається в турбіну, і швидкістю обертання її валу, не враховують залежність сумарного пропускного перерізу клапанів пристрою подачі пара паспортні дані турбіни.

У переважній більшості випадків [11-15] для керування паровими турбінами використовуються класичні П, ПІ, ПІД регулятори, які мають відомі недоліки: високою чутливістю до маєтків параметрів об'єкта управління, обмеженим коефіцієнтом посилення в результаті чого системи з П регуляторами володіють великим статичним падінням швидкості, а з ПІ - великим динаміком. Крім того, системи з такими регуляторами мають обмежену швидкодію.

Виходячи з наведених вище недоліків існуючих локальних систем регулювання та людино-машинної системи управління, можна зробити висновок про необхідність проведення заходів, спрямованих на оптимізацію таких систем регулювання за критерієм мінімізації викидів в атмосферу дуття, збагаченого

киснем, підвищення кількості автоматизованих функцій з урахуванням впливу людського процесу на процеси.

1.4 Шляхи підвищення ефективності системи керування процесом підготовки холодного дуття

Модернізація існуючої автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУТП) може здійснюватися на прикладному та програмному рівнях. На прикладному рівні змінюється комплекс технічних засобів, що здійснюють функції безпосереднього впливу на технологічний процес, інакше кажучи, проводиться зміна вимірювальних, реєструючих та виконавчих пристроїв. На програмному рівні відбувається розробка та впровадження нових алгоритмів і законів управління вже існуючими або новоствореними пристроями прикладного рівня.

Серед основних переваг заходів, спрямованих на поліпшення роботи АСУТП, слід виділити;

- поліпшення показників якості продукції, що випускається,
- скорочення тимчасових та ресурсних витрат,
- зміну технології виробництва,
- нарощування виробництва,
- агрегування виробничих ділянок.

Більшість переваг має позитивний економічний ефект. Величина одержуваного економічного ефекту часто залежить від витрат, які понесе підприємство під час проведення модернізації. Щоб скоротити витрати, модернізації піддають лише програмний рівень.

Зміни на програмному рівні модернізації АСУТП мають прагнути встановленої мети без зниження показників технологічного процесу. Такі зміни нерідко торкаються і прикладного рівня.

Модернізація на програмному рівні передбачає такі дії:

- внесення змін до алгоритмів роботи АСУ,
- запровадження нових законів управління,
- програмну інтеграцію до АСУ верхнього рівня.

Кожна з цих дій спрямована на вирішення задачі оптимізації роботи АСУ або вирішення варіаційного завдання.

Сучасна технічна література, а також відкриті електронні інформаційні джерела мають у своєму розпорядженні напрацювання вирішення таких завдань у галузі теорії автоматичного управління та регулювання. Рішення передбачає пошук екстремумів функціоналів або пошук оптимального управління системи, що забезпечує досягнення екстремального значення заданого функціоналу якості.

Складність забезпечення заданих динамічних властивостей синтезованої системи автоматичного управління та підтримки їх в умовах дії різних впливів, що обурюють, зміни параметрів керованого об'єкта, наявності нелінійностей і, як правило, при неповній апріорній інформації про об'єкт управління та умовах його функціонування призвела до того, що в сучасній теорії автоматичного керування та регулювання складів склалося багато спрямованих проблем.

Починаючи з 50-х років XX століття, як один із напрямків технічної кібернетики досить стрімко розвивається теорія самонастроюваних систем, що використовує принцип адаптації.

Використання принципу адаптації дає змогу штучно створити ефект пристосування автоматичних систем до змінних умов. Це досягається завдяки тому, що частину функцій, пов'язаних з отриманням, обробкою та аналізом неповної інформації про керований об'єкт, система виконує самостійно в процесі експлуатації за допомогою адаптивного регулятора. Такий підхід дозволяє зменшити вплив невизначеностей на якість управління та частково компенсувати брак апріорних відомостей про процес ще на етапі проектування.

Прийнято виділяти три типи адаптивних систем:

- непрямі – здійснюють ідентифікацію об'єкта шляхом аналізу доступних параметрів на основі його моделі;

- прямі – використовують безпосередньо налаштовану модель регулятора;
- квазіпрямі – передбачають роботу з прогнозуючою моделлю, що відрізняється від моделі самого об'єкта.

Однак впровадження таких систем має обмеження, оскільки воно потребує складної технічної реалізації, швидкодіючих контурів самоналаштування та достатньо повільної зміни характеристик керованого об'єкта чи його точного аналітичного опису. Водночас принцип адаптації не усуває вплив координатних збурень на властивості замкнених систем.

Інші підходи до створення систем зі зниженою чутливістю до зовнішніх збурень розроблялися в межах теорії інваріантності. В її основу покладено принцип комбінованого керування, при якому вплив здійснюється не лише за відхиленням, але й відповідно до зовнішніх задаючих та збурювальних сигналів. При цьому введення додаткових зв'язків не змінює характеристичного полінома системи. Оскільки пряме вимірювання збурень у реальних умовах є проблематичним, велике значення мають методи їх непрямої оцінки на основі поточної інформації. Такий підхід приводить до побудови структур регуляторів, які містять внутрішні моделі збурювальних впливів. Це, у свою чергу, вимагає або задання точного рівняння збурення (диференціального чи різницевого), або розв'язання задачі його ідентифікації за доступними даними.

Подальший розвиток ідей інваріантності пов'язаний із застосуванням методів простору станів, алгебраїчних та диференціально-геометричних підходів, що дало змогу перейти до синтезу багатовимірних інваріантних систем. Водночас їх практичне впровадження ускладнене необхідністю розв'язання низки допоміжних нетривіальних задач.

Спроби використання теорії чутливості для створення високоточних систем керування з низькою чутливістю до параметричних збурень також не дали очікуваного результату. Це пов'язано з надмірним ускладненням алгоритмів та обмеженими можливостями їх практичної реалізації. До того ж, застосування методів цієї теорії не забезпечує властивості інваріантності щодо зовнішніх збурень.

Проблематика побудови замкнених систем керування з наперед визначеними прямими показниками якості знайшла відображення в теорії модального управління [16]. Під модальним управлінням зазвичай розуміють метод синтезу регуляторів, який дозволяє розташовувати полюси замкненої системи на комплексній площині у потрібних позиціях та, відповідно, формувати складові перехідного процесу із заданою швидкістю зміни.

У практиці як бажаний розподіл коренів характеристичного рівняння замкненої системи часто використовують такі схеми: розподіл Бесселя (функція Томсона), розподіл Чебишева (з нерівномірністю передачі 0,5 дБ), Баттерворта та біноміальний (Ньютона).

Необхідні прямі показники якості керування можуть задаватися у вигляді еталонного руху або еталонної системи. Це відповідає процедурі синтезу систем керування за заданими перехідними процесами регульованих змінних, а також методам подання керуючих функцій у вигляді часових поліномів [15]. При цьому вибір еталонної системи є довільним, але повинен враховувати реальні можливості об'єкта керування щодо відтворення еталонного руху з урахуванням його параметрів та існуючих обмежень на керуючий сигнал і окремі змінні стану.

Велике поширення під час проектування систем управління набув принципу комбінованого управління. Однак, застосування такого підходу вимагає визначення знакозмінного впливу, що обурює, що змінюється за випадковим законом. Це значно ускладнює процес проектування та технічної реалізації системи управління.

Необхідно відзначити підвищений інтерес до аналізу та синтезу нелінійних систем управління. Огляд деяких доступних для вільного перегляду періодичних видань IFAC та IEEE показує, що останнім часом значно підвищилася кількість суто теоретичних і прикладних публікацій, присвячених нелінійним системам. Насамперед слід відзначити роботи з шматково-безперервних функцій Ляпунова [17]. Ідеї дослідження систем, що містяться в цих роботах, з перемикається структурою можуть бути розширені на деяку область систем управління, що містять істотні нелінійності, однак автори не розглядають можливості отримання

апериодичних перехідних процесів і не торкаються питання технічної реалізації запропонованої ними методики. Наступний не менш цікавий напрямок ґрунтується на застосуванні функціональних рядів Вольтерра [18-21]. Застосування цих рядів дозволяє представити нелінійні системи у вигляді послідовно-паралельного з'єднання лінійних і нелінійних частин і призводить до багатовимірних передатних функцій, на підставі яких здійснюється синтез впливу, що управляє. Цьому методу властива трудомісткість виведення формул ядер та наочного уявлення у графічній формі узагальнених частотних характеристик.

Дуже загальною є ідея *feedback linearization* [20], згідно з якою для будь-якої нелінійної системи може бути знайдено такий простір стану, в якому вона буде лінійною. Тобто, для синтезу керуючого впливу необхідно перейти в новий координатний базис, визначити відомими методами управління, яке потім переноситься у вихідний фазовий простір. Наскільки загальних рекомендацій або методик визначення необхідного простору стану і формул переходу з одного базису в інший не відомо. Крім того, постає питання про можливість технічної реалізації управління, отриманого після таких перетворень.

Відомі й інші методи [21,22], застосування яких, проте не дозволяє вирішити завдання забезпечення високої швидкодії та точності відтворення заданих траєкторій руху об'єкта управління при низькій чутливості до різних факторів, що дестабілізують.

Комплексне вирішення задачі забезпечення високої динамічної та статичної точності при низькій чутливості до параметричних та координатних збурень може бути знайдено у класі систем, стійких при необмеженому збільшенні коефіцієнта посилення.

1.5 Постановка задачі дослідження

Аналіз технології доменного процесу та виробництва холодного дуття, існуючих способів регулювання його подачі та технічного стану обладнання дуттьового тракту показав таке:

1. У доменному виробництві застосовується енергетично неефективний спосіб регулювання подачі дуття в повітронагрівачі — шляхом створення завідомо надлишкового об'єму стисненого повітря, збагаченого киснем, та подальшим скиданням його частини в атмосферу. Це призводить до нераціонального використання ресурсоемного продукту, виробництво якого потребує значних витрат електроенергії.

2. Ігнорування значної протяжності газотранспортної системи дуттьового тракту та циклічних змін його конфігурації призводить до погіршення основних показників виробництва холодного дуття та його подачі у доменну піч, що може спричинити порушення нормального ходу плавки.

3. Наявні математичні моделі, що описують динаміку парових конденсаційних турбін і ключових елементів тракту холодного дуття, не дозволяють однозначно встановити залежності між: кількістю пари, що подається у парозбірник турбіни, та швидкістю обертання її вала і зміною витрати та тиску дуття на вході та виході газотранспортної системи.

Метою роботи є підвищення енергоефективності доменного виробництва шляхом виявлення нових закономірностей і взаємозв'язків процесів утворення та транспортування холодного дуття, а також розроблення рішень щодо його автоматизованого керування.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Забезпечити стабільний дуттьовий режим під час нормальної роботи доменної печі.

2. Зменшити вплив газодинамічних затримок, спричинених великою протяжністю газотранспортної системи, на роботу системи підготовки холодного дуття.

3. Уточнити математичну модель фізичних процесів, що відбуваються під час виробництва холодного дуття, врахувавши динамічні властивості обладнання газотранспортної мережі.

4. Розробити автоматизовану систему керування виробництвом холодного дуття та його транспортуванням до доменної печі, яка забезпечить зменшення скидання надлишкового стисненого кисневмісного повітря через повітророзвантажувальний клапан.

5. Провести математичне моделювання для підтвердження достовірності розробки автоматизованої системи керування.

Висновки до розділу

1. У доменному виробництві застосовується енергетично неефективний спосіб регулювання подачі дуття в повітронагрівачі — шляхом створення завідомо надлишкового об'єму стисненого повітря, збагаченого киснем, та подальшим скиданням його частини в атмосферу. Це призводить до нераціонального використання ресурсоемного продукту, виробництво якого потребує значних витрат електроенергії.

2. Ігнорування значної протяжності газотранспортної системи дуттьового тракту та циклічних змін його конфігурації призводить до погіршення основних показників виробництва холодного дуття та його подачі у доменну піч, що може спричинити порушення нормального ходу плавки.

3. Наявні математичні моделі, що описують динаміку парових конденсаційних турбін і ключових елементів тракту холодного дуття, не дозволяють однозначно встановити залежності між: кількістю пари, що подається у парозбірник турбіни, та швидкістю обертання її вала і зміною витрати та тиску дуття на вході та виході газотранспортної системи.

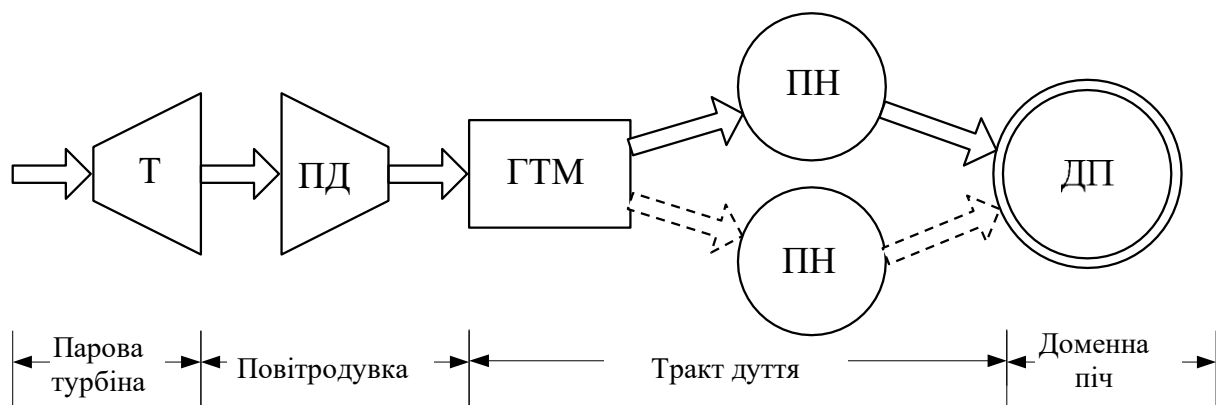
РОЗДІЛ 2

ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА СИНТЕЗ І СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

2.1 Елементи системи вироблення дуття та їх взаємодія

Процес вироблення дуття проходить у кілька етапів. Основними з них є підвищення тиску, транспортування, підігрів. Процес транспортування дуття забезпечується повітродувкою, робота якої пов'язана з етапом підвищення тиску.

Весь технологічний процес вироблення дуття можна представити у вигляді функціональної схеми:



Т – парова турбіна, *ПД* – повітродувка, *ГТМ* – газотранспортна мережа, *ПН* – повітронагрівач *ДП* – доменна піч

Рисунок 2.1 - Спрощена функціональна схема процесу вироблення дуття в доменному виробництві

У металургійній галузі України як приводи повітродувок, як правило, застосовують парові конденсаційні турбіни малої потужності.

Для транспортування дуття до повітронагрівачів використовують трубопроводи, які формують газотранспортну мережу доменного цеху.

Протяжність таких мереж у деяких випадках є досить значною, що пояснюється розташуванням теплоелектроцентральної–пароповітряної станції (ТЕЦ-ППС) і доменного цеху.

Підігрів дуття здійснюється в повітронагрівачах (кауперах). Вони можуть працювати, як правило, в чотирьох технологічних режимах: дуття, нагрів, відсічення і взяття печі на тягу. Під час перемикань повітронагрівач перебуває одночасно в двох із них.

У доменній печі в результаті хімічних реакцій утворюється доменний газ, який створює внутрішній тиск у печі. Щоб процес доменного плавлення металу не порушувався, а також для запобігання вибухонебезпечним ситуаціям, необхідно підтримувати тиск доменного газу відповідно до технологічних вимог. Тому на виході з доменної печі на газопроводі доменного газу встановлюється регулювальний пристрій – клапан. Керування клапаном здійснюється за сигналом від регулятора надлишкового тиску газу на колошнику.

Технологія отримання дуття охоплює механічні, термодинамічні, транспортні, теплові та хімічні процеси. Описати математично однією системою рівнянь усі ці процеси неможливо через специфіку роботи кожного окремого агрегату, задіяного в процесі виробництва дуття. Тому отримуємо рівняння динаміки цих агрегатів, керуючись функціональною схемою, наведеною на рис. 2.1. З цією метою розглянемо кожен агрегат окремо..

2.2 Математичний опис повітродувки

Повітродувка за своєю конструкцією є відцентровим компресором. Процеси підвищення тиску та зміни потужності в повітродувці описуються сімейством кривих, які називаються газодинамічними характеристиками (ГДХ). Для кожної окремої повітродувки вони різні й можуть бути представлені в табличному або графічному вигляді. Завод-виробник при постачанні повітродувки надає документацію з газодинамічними характеристиками,

знятими під час випробувань. Протягом терміну експлуатації повітродувки підлягають ремонтам, після яких ГДХ змінюються. Тому точного математичного опису, що враховує всі зміни, не існує, і на практиці користуються характеристиками, отриманими експериментальним шляхом.

Для побудови систем керування повітродувкою використовують різні наближені математичні моделі, параметри яких визначаються формою газодинамічних характеристик. Для опису динамічних процесів зміни тиску та витрати повітря скористаємося математичним описом повітродувки рівняннями Мура-Грейтцера [29]

$$\begin{cases} \frac{d\Psi}{d\xi} = \frac{1}{4B^2 l_c} (\Phi - \Phi_t(\Psi)), \\ \frac{d\Phi}{d\xi} = \frac{1}{l_c} (\Psi_c(\Phi) - \Psi), \end{cases}$$

Ψ_c — ступінь стиснення газу в мережі, о.е.; Φ — відносна витрата газу через повітродувку, о.е.; U — швидкість газу на вході імелера, м/с; R — радіус імелера, м; t — поточний час, с; l_c — довжина трубопроводу і повітродувки, м; U_1 — швидкість газу на виході імелера, м/с; a_{01} — швидкість звуку, м/с; V_p — об'єм ємності після повітродувки, м³; A_L — площа поперечного перерізу трубопроводу, що з'єднує повітродувку з ємністю на виході, м²; $\Phi_t(\Psi)$ — ГДХ мережі в о.е.; $\Psi_c(\Phi)$ — ГДХ повітродувки в о.е. $\xi = Ut / R$ - відносний час, о.е. ;

$B = U_1 / 2a_{01} \cdot \sqrt{V_p / A_L l_c}$ - параметр моделі, запропонований Грейтцером.

Залежність $\Psi(\Phi)_c$ можна представити у вигляді:

$$\Psi_c(\Phi) = \Psi_{c0} + H \left[\left(1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\Phi}{W} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\Phi}{W} - 1 \right)^3 \right) \right],$$

де H , W , Ψ_{c0} — параметри, значення яких визначаються параметрами ГДХ повітродувки (рис. 2.2) [29].

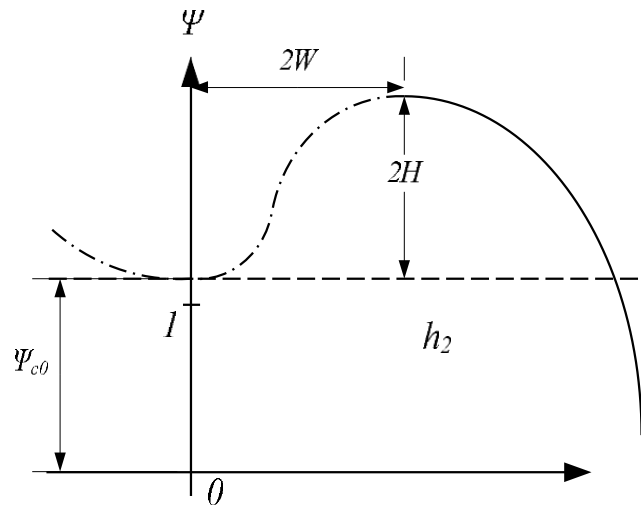


Рисунок 2.2 - Загальний вигляд типової ГДХ

ГДХ прямо або опосередковано залежить від швидкості обертання повітродувки. Припустимо, що параметри H , W , Ψ_{c0} математичної моделі, запропонованої Грейтцером, змінюються залежно від швидкості обертання за такими законами:

$$H = (k_H y_{00})^2, \quad W = k_W y_{00}, \quad \Psi_{c0} = 1 + k_O y_{00}^2$$

де $y_{00} = \omega / \omega_{\max}$ - відносна швидкість обертання повітродувки; k_H , k_W , k_O - коефіцієнти [30].

У другому рівнянні системи не збігаються розмірності фізичних величин лівої та правої частин. Тому для усунення виявленої невідповідності доповнимо праву частину рівняння операцією добування квадратного кореня:

$$\frac{d\Phi}{d\xi} = k_{pr} \sqrt{\Psi_c(\Phi) - \Psi},$$

де k_{pr} — коефіцієнт, що залежить від площі перерізу ділянки трубопроводу,

через який протікає газ, і його густини.

Запишемо систему рівнянь з урахуванням виразів

$$\begin{cases} \frac{d\Psi}{d\xi} = \frac{1}{4B^2 l_c} (\Phi - \Phi_t(\Psi)), \\ \frac{d\Phi}{d\xi} = k_{pr} \sqrt{\Psi_m(\Phi, y_{00}) - \Psi}, \end{cases}$$

де

$$\Psi_m(\Phi, y_{00}) = 1 + k_O y_{00}^2 + (k_H y_{00})^2 \left[1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\Phi}{(k_W y_{00})} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\Phi}{(k_W y_{00})} - 1 \right)^3 \right].$$

2.3 Математичний опис тракту дуття

Весь тракт дуття можна представити у вигляді спрощеної функціональної схеми (рис. 2.3). За технологією повітря, що надходить у повітродувку *ПД* з антипомпажним клапаном *АПК*, стискається і по трубопроводу газотранспортної мережі (*ГТМ*) рухається до повітронагрівачів *ПН* через шибири холодного дуття *Х*. Далі після нагріву воно потрапляє в доменну піч *ДП* через шибири *Г*. Дроселі *З* служать для заповнення повітронагрівачів і вирівнювання тиску в них. Перед повітронагрівачами встановлено повітророзвантажувальний клапан (*ПРК*).

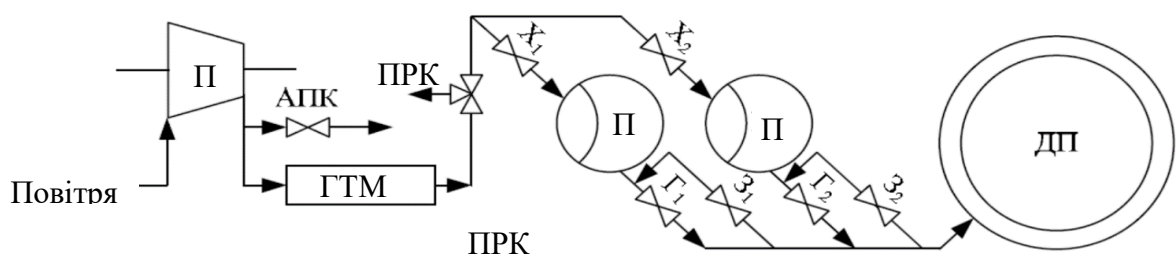
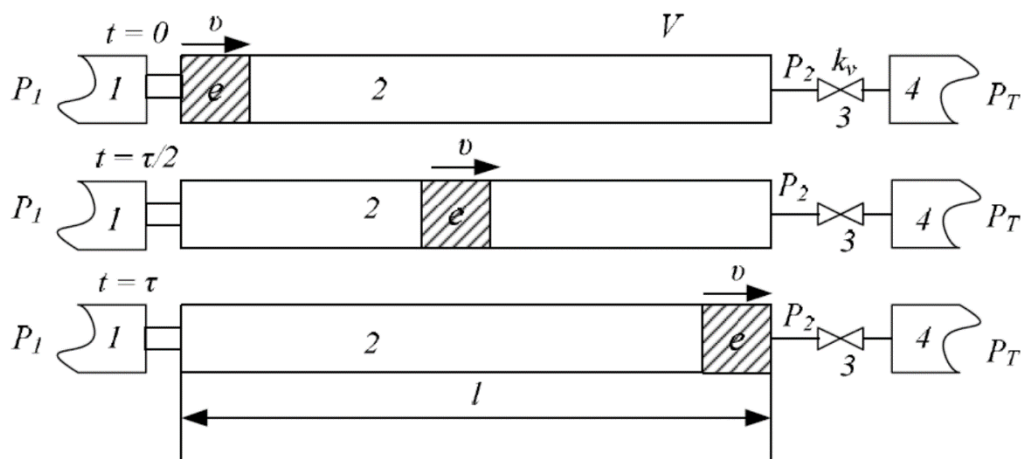


Рисунок 2.3 - Спрощена функціональна схема технологічного процесу вироблення дуття

Аналіз фізичних процесів у ГТМ показує, що всі її складові — трубопроводи, резервуари, запірна арматура та інші елементи — мають спільні характеристики. Опис процесів, що відбуваються в цих елементах, здійснюється рівняннями газодинаміки в частинних похідних. З певною точністю всі процеси, що відбуваються в газоповітряній суміші, описуються рівнянням неперервності, підпорядковуються законам збереження імпульсу, енергії та фазового стану речовини.

Математичний опис таких процесів передбачає наявність частинних похідних за кількома параметрами, що ускладнює його застосування для побудови та дослідження систем керування. Тому опишемо процеси в ГТМ, спираючись на загальні властивості системи в цілому, за умови, що всі процеси є ізотермічними.



1 — нерегульоване джерело тиску обмеженої потужності; 2 — магістраль; 3 — змінний опір трубопроводу; 4 — приймач

Рисунок 2.4 - Функціональна схема руху фронту газових сумішей у трубопроводі

Визначимо характеристики ГТМ, які суттєво впливають на характер динамічних процесів при транспортуванні газів. Одним із головних чинників, що визначають статичні та динамічні властивості трубопроводу, є його протяжність.

Розглянемо рух елементарного об'єму e газу в магістралі об'ємом V і довжиною l зі швидкістю v від нерегульованого джерела з тиском P_1 до

приймача з тиском P_T через дроселюючий пристрій 3 з пропускною здатністю kv (рис. 2.4).

Транспортування об'єму газу трубопроводами пов'язане з рухом переднього фронту, тому зміна витрати та тиску на кінцях магістралі не відбувається миттєво, а характеризується часом запізнення $\tau = l / v$, де l – довжина трубопроводу, м; v – швидкість звуку в газі, м/с. Трубопровід 2 як елемент динамічної системи може бути представлений ланкою чистого запізнення, оскільки рух переднього фронту пов'язаний із подоланням шляху l зі швидкістю v .

$$W(s) = e^{-\tau s} = \frac{P_2(s)}{P_1(s)} = \frac{Q_2(s)}{Q_1(s)}.$$

Тоді для витрати та тиску газу на виході трубопроводу без регульованого опору на вході справедливі такі залежності, представлені як функції часу:

$$W(s) = e^{-\tau s} = \frac{P_2(s)}{P_1(s)} = \frac{Q_2(s)}{Q_1(s)}.$$

де $Q_1(t)$, $Q_2(t)$ – тимчасові функції зміни витрат на кінцях трубопроводу; $P_1(t)$, $P_2(t)$ – тимчасові функції зміни тиску на кінцях трубопроводу.

Будь-який об'єкт газотранспортної системи характеризується ємністю, що визначає інтенсивність зростання тиску в ньому та впливає на динаміку системи. Якщо розглядати трубопровід як ємність із регульованим опором на виході, то справедливою є така залежність (без урахування характеристик газу): [25]

$$dP/dt = k_{PT1} * (Q_2 - Q_T)$$

де $k_{PT1} = 1/V$, $1/\text{м}^3$; Q_T – об'ємна витрата газу після регульованого опору, $\text{м}^3/\text{с}$.

Витрата газу на вході в магістраль визначається тисками на вході та виході

трубопроводу: [32]

$$Q_1 = k_{Q1} \sqrt{P_1 - P_2}$$

де k_{Q1} – визначається характеристиками трубопроводу.

Інерційність потоку газу, що переміщується від джерела 1 з витратою Q_1 до приймача 4 з витратою Q_2 , може бути описана залежністю: [23]:

$$\frac{dQ_2}{dt} T_1 + Q_2 = Q_1,$$

де T_1 – постійна часу потоку, с.

Використовуючи рівняння запізнення, ємності та витрати, можна побудувати структурну схему ГТМ відповідно до функціональної схеми на рис. 2.4.

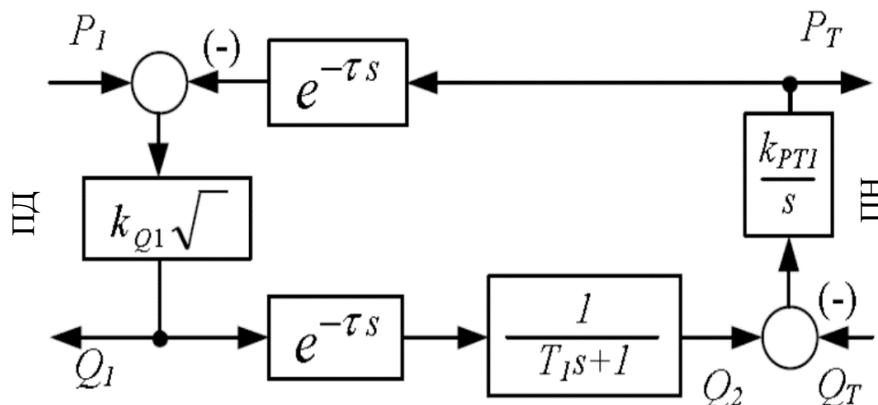
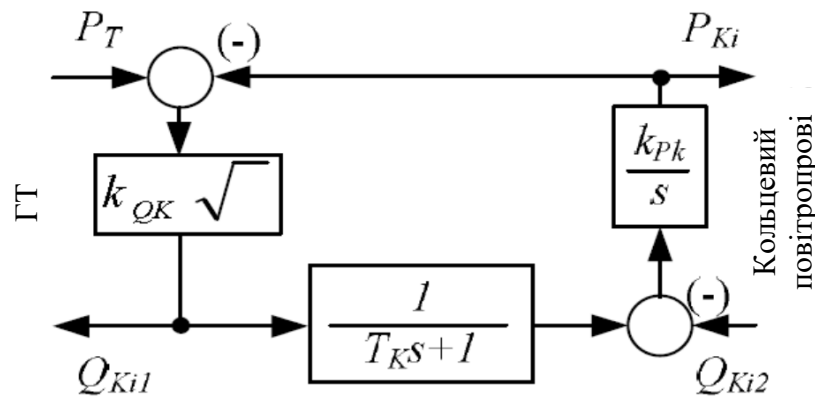


Рисунок 2.5 - Структурна схема ГТМ

Порівнюючи технологічні режими роботи та фізичні процеси в трубопроводі та повітрянагрівачах, можна дійти висновку, що структурна схема на рис. 2.5 без ланок запізнювання може бути використана для опису законів зміни тиску та витрати в концентрований ємності, якою є повітрянагрівач та доменна піч, за ізотермічних умов, що показано на рис.2.6.



Q_{Ki1} , Q_{Ki2} - витрати на вході та на виході i -го повітронагрівача; P_{Ki} - тиск у i -му повітронагрівачі; k_{QK} , k_{PK} , T_K - коефіцієнти та стала часу повітронагрівача відповідно

Рисунок 2.6 - Структурна схема повітронагрівача

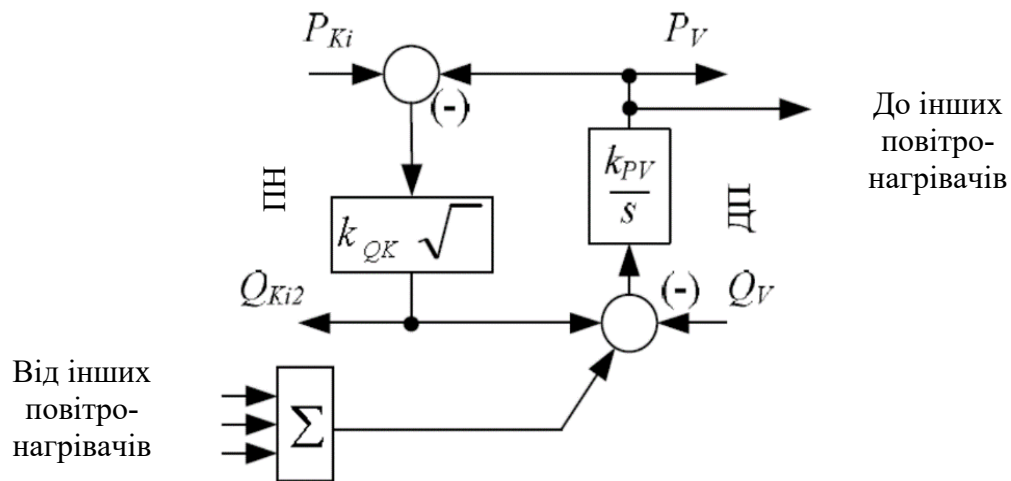
До трубопроводу може бути підключено кілька повітронагрівачів, тому сумарний витрата газо-повітряної суміші формується за наступним законом

$$Q_T = \sum_{i=1}^n Q_{Ki1}$$

де n - кількість повітронагрівачів, підключених до ГТМ.

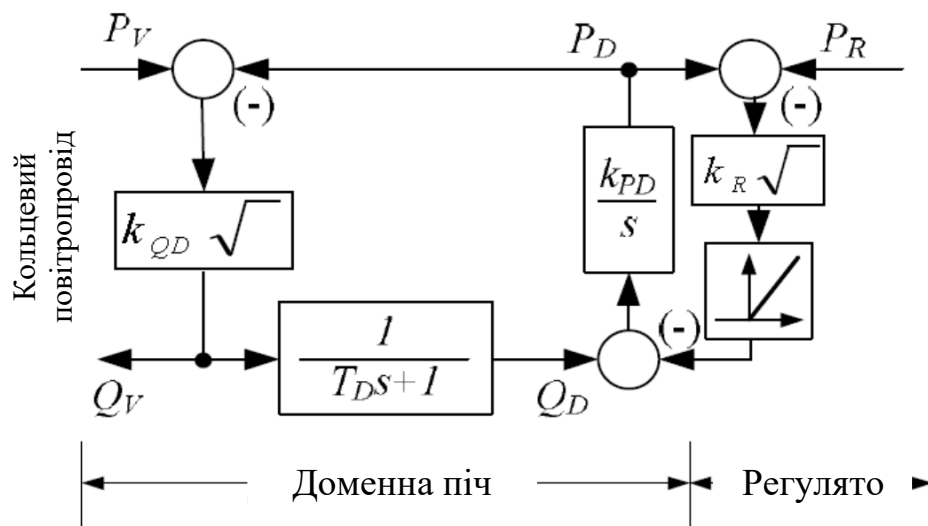
Динаміку зміни тиску та витрати дуття в кільцевому повітропроводі, тракті гарячого дуття, що з'єднує виходи кількох повітронагрівачів, за аналогією з ГТМ можна подати як на рис. 2.7, у якій відсутні ланки, що відображають інерційність потоку та його запізнювання.

Розгляд роботи та пристрою доменної печі на певному часовому інтервалі показує, що її можна подати як концентровану ємність постійного об'єму, у яку безперервно подається дуття. Регулятор, що стабілізує тиск колошникових газів, може бути реалізований як однополярний негативний зворотний зв'язок за перепадом тиску на вході та виході доменної печі з коефіцієнтом k_R [23].



P_V , Q_V – тиск та витрата на виході з кільцевого повітропроводу

Рисунок 2.7 - Структурна схема кільцевого повітропроводу гарячого дуття для одного повітронагрівача



P_D , Q_D - тиск та витрата газу всередині доменної печі; k_{QV} , k_{PD} , T_D - Коефіцієнти та стала часу доменної печі; P_R – тиск газу на колошнику

Рисунок 2.8 - Структурна схема доменної печі та регулятора тиску колошникових газів

Зміна структури тракту дуття відбувається в моменти переключення повітронагрівачів. Спільний режим роботи повітронагрівачів призводить до зниження опору ГТМ та до зміни значень тиску і витрати як на вході доменної

печі, так і на дуттєвій машині.

Послідовне з'єднання розглянутих динамічних елементів функціональної схеми 2.4 утворює спрощену структурну схему тракту дуття з двома повітрянагрівачами та доменною піччю. (рис. 2.9).

Адекватність розроблених математичних моделей елементів та споживачів дуття доведена у публікації [20].

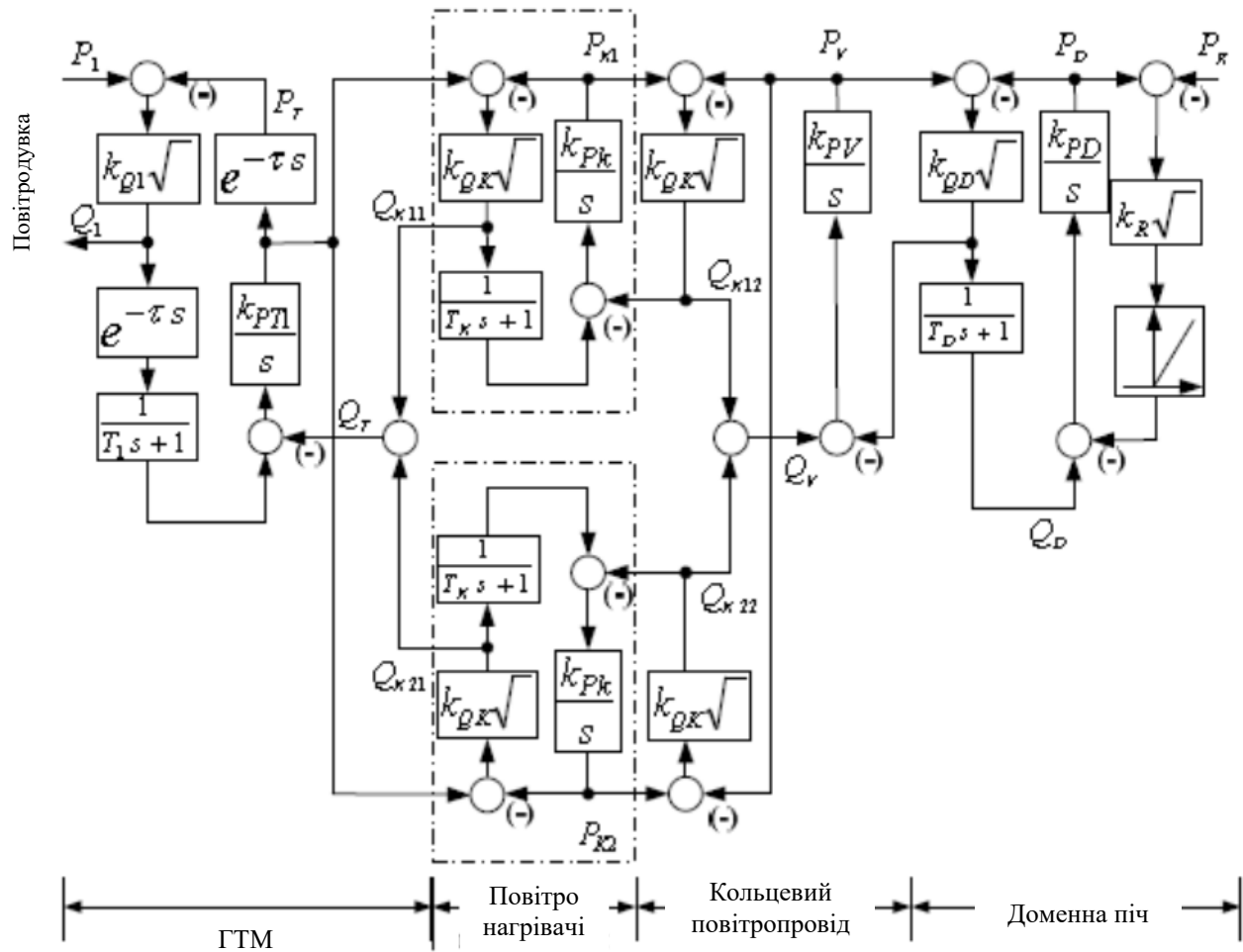


Рисунок 2.9- Структурна схема тракту дуття з двома повітрянагрівачами та доменною піччю

2.4 Алгоритмічний синтез регулятора швидкості обертання турбіни

Розглянемо більш детально систему рівнянь динаміки турбіни.

Запишемо її в операторній формі, прийнявши, що з достатньою точністю сумарна площа відкриття клапанів $So(L)$ змінюється лінійно залежно від зміни положення траверси. [35]:

$$\begin{cases} p\omega = \frac{1}{J_C} \left(zR_{CP}S_l\sqrt{(P_{np} - P_0)}\rho \times \right. \\ \quad \left. \times \left(\sqrt{\frac{2}{z}}\sqrt{k^*P_{np} - h_2} - R_{CP}\omega \right) - k_N\omega^2 - M_C \right), \\ pP_{np} = \frac{\sqrt{\rho}}{V_{np}C_g} \left(So(L)\sqrt{(P_H - P_{np})} - S_l\sqrt{(P_{np} - P_0)} \right), \end{cases}$$

де $p = d/dt$ - оператор диференціювання.

Значення функції $So(L)$ мають обмеження від 0 до So_{max} , які визначаються за формулою

$$So_{max} = \sum_{i=1}^n So_i$$

де n - кількість клапанів УПП, а значення So_i розраховується окремо для кожного клапана.

Прийнявши нульові початкові умови $P_{np}|_{t=0} = P_0$, $h_1|_{t=0} = h_2$ ($h_1 = k * P_{np}$) на підставі системи рівнянь структурну схему парової турбіни можна подати у вигляді, зображеному на рис. 2.10.

Наявність квадратних коренів у рівняннях системи ускладнює їх лінеаризацію та приведення до нормованого вигляду. Процедура лінеаризації статичними методами відносно заданої опорної траєкторії в околицях робочої точки змінює показник степеня в початковій системі рівнянь і не позбавляє її від нелінійних елементів. Тому відомі статичні методи лінеаризації не можуть бути

застосовані до системи рівнянь.

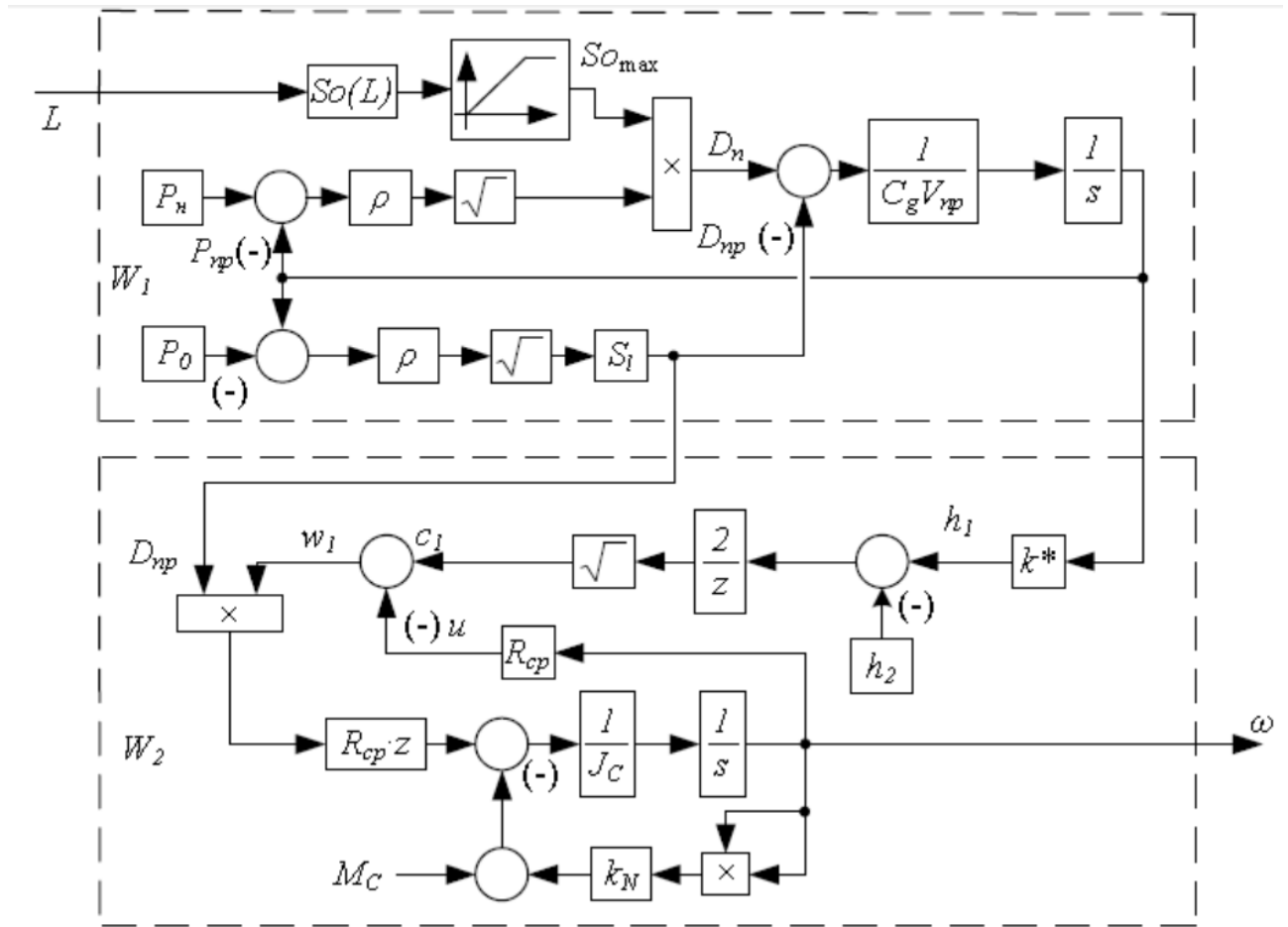


Рисунок 2.10 - Структурна схема парової турбіни

Розглянемо структурну схему парової турбіни (рис. 2.10) з точки зору «чорного ящика». Входом для нього буде положення планки з клапанами L , а виходом – швидкість обертання вала турбіни ω (рис. 2.11)

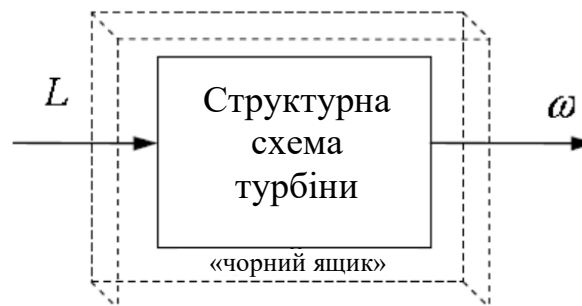


Рисунок 2.11 - Подання турбіни як «чорного ящика»

Досліджуємо реакцію «чорного ящика» на вхідний вплив у вигляді функції $a \times 1(t)$, де a – коефіцієнт, $a \in [0,1]$. Параметри структурної схеми розраховуються за номінальними та конструктивними даними реальної парової турбіни.

У результаті такого підходу шляхом математичного моделювання турбіни отримані графіки перехідних процесів $w(t)$. На підставі їхніх даних побудована поверхня (рис. 2.12) для різних значень коефіцієнта.

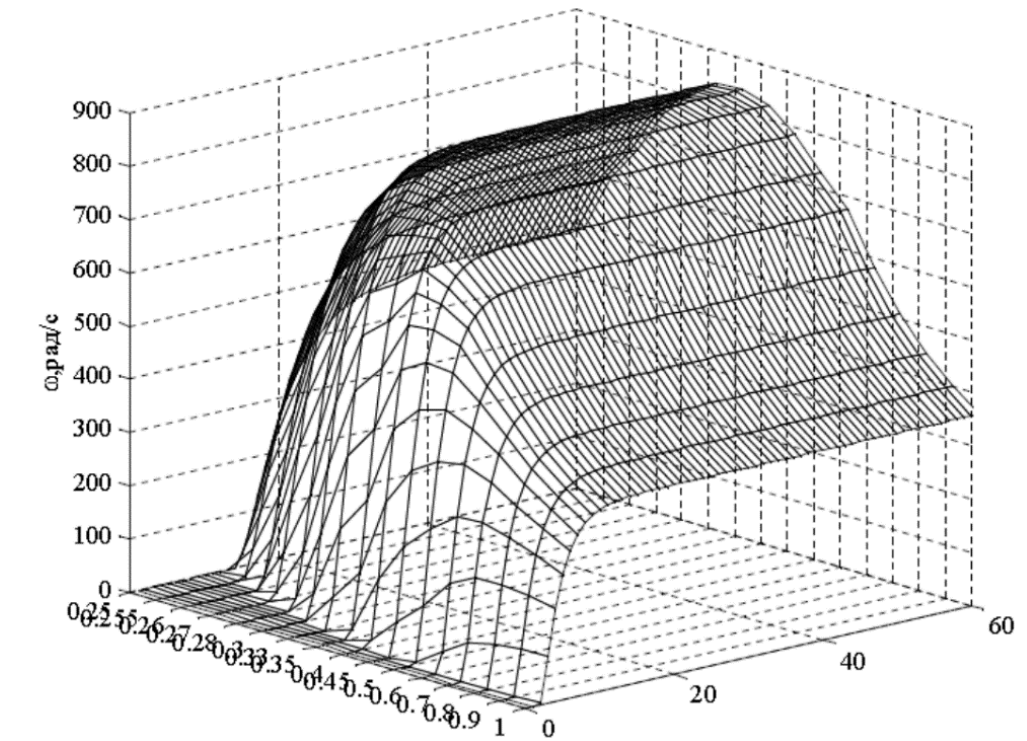


Рисунок 2.12 - Сімейство перехідних функцій турбіни при різних значеннях коефіцієнта a

За допомогою методів ідентифікації параметрів передатної функції за перехідною характеристикою [16] отримані наступні залежності між коефіцієнтами передатної функції та коефіцієнтом a , представлені на рис. 2.13.

Розглядаючи отримані графіки з точки зору технології регулювання швидкості турбіни, можна виділити діапазон значень коефіцієнта a , що відповідає найчастішому положенню планки з клапанами L .

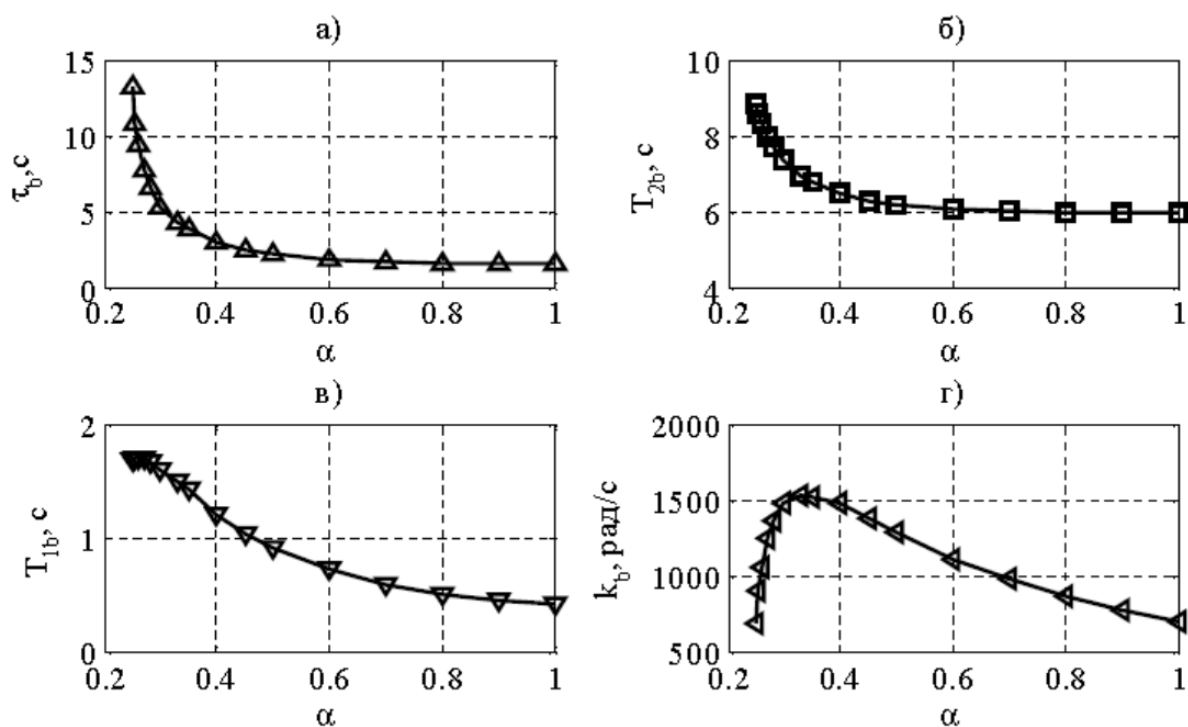


Рисунок 2.13 - Залежності коефіцієнтів передатної функції $G(p)$ при різних значеннях коефіцієнта a

Розглянемо закономірності зміни коефіцієнтів передатної функції, коли $0,5 \leq a \leq 1$ (рис. 2.14).

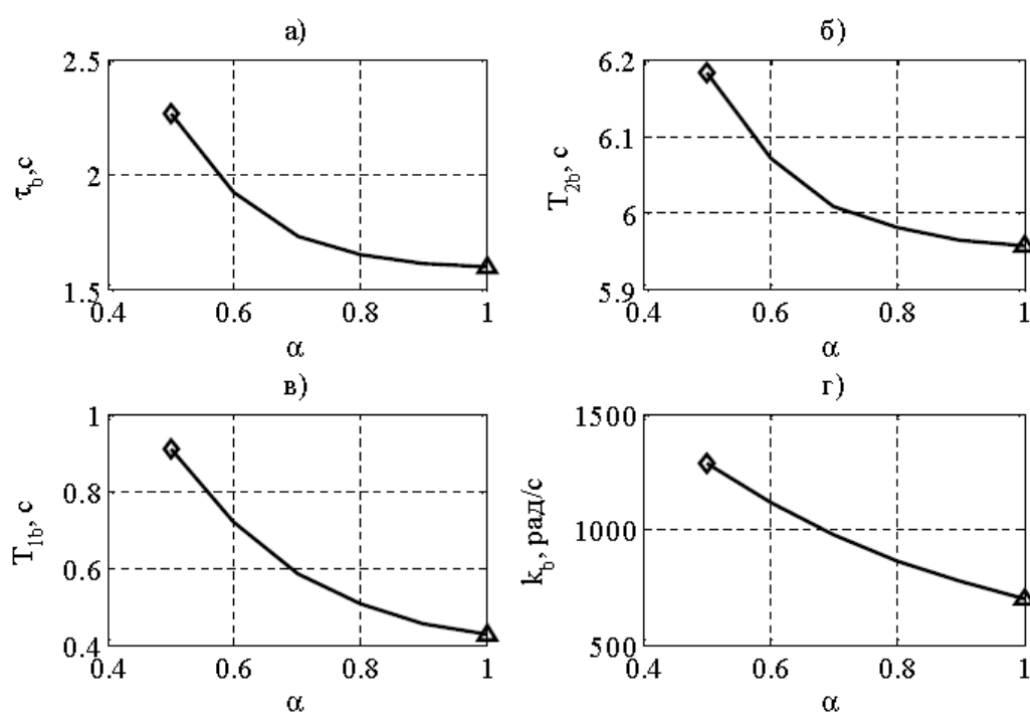


Рисунок 2.14 - Зміна параметрів передатної функції $G(p)$ при $0,5 \leq a \leq 1$

Аналіз значень крайніх точок залежностей (рис. 2.15) показав, що найбільший коефіцієнт підсилення ОУ буде в точці з маркером $\diamond$. Тому для забезпечення достатнього запасу стійкості замкнутої системи регулювання швидкості обертання турбіни за умов зміни її параметрів при синтезі законів керування прийняті функції $\tau_b(0.5) = \tau_b$, $k_b(0.5) = k_b$, $T_{1b}(0.5) = T_{1b}$, $T_{2b}(0.5) = T_{2b}$. Тоді передатну функцію можна подати у вигляді

$$G(s) = e^{-s\tau_b} \frac{k_b}{(T_{1b}s + 1)(T_{2b}s + 1)}.$$

З урахуванням рекомендацій та практики розробки регуляторів для ОУ з запізнюванням передатна функція повинна піддатися операції лінеаризації, в результаті якої вона набуде вигляду.

$$G(s) = Z(s) \times W(s) \times M(s) \times W_b(s)$$

де

$$Z(s) = \frac{1}{T''s + 1}, W(s) = \frac{1}{T's + 1}, M(s) = \frac{k_b}{T_{1b}s + 1}, W_b(s) = \frac{1}{T_{2b}s + 1},$$

де T' , T'' - сталі часу, с.

При синтезі регулятора швидкості обертання турбіни до складу ОУ входить турбіна з передатною функцією, оскільки час розгону та гальмування ЕМП незначний порівняно з часом переміщення планки з клапанами; замкнута релейна СУ ЕМП може бути подана структурною схемою, зображеною на рис. 2.15.

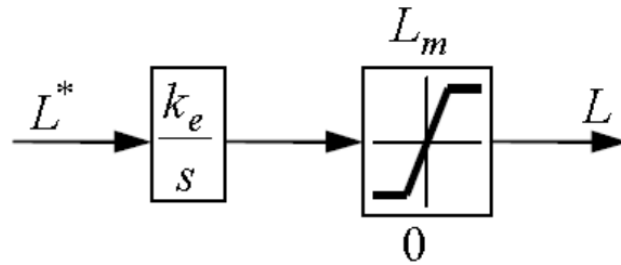


Рисунок 2.15 - Структурна схема спрощеної релейної СУ ЕМП

Наявність обмеження пояснюється конструктивними обмеженнями положення штока ЕМП. Коефіцієнт підсилення k_e визначається за формулою

$$k_e = \frac{L_m}{L_m^* \tau_e},$$

τ_e - час переміщення штока ЕМП з одного крайнього положення в інше, с.

Так як $L_m = L_m^*$, то $k_e = 1/\tau_e$. Передатна функція спрощеної релейної СУ ЕМП без урахування обмеження може бути подана у вигляді

$$G_e(p) = \frac{k_e}{s}$$

Тоді передатна функція парової турбіни з ЕМП може бути подана як

$$G_T(s) = G_e(s) \times Z(s) \times W(s) \times M(s) \times W_b(s)$$

Приведемо цю передатну функцію до вигляду, зручного для синтезу регулятора швидкості обертання турбіни

$$\begin{cases} p\omega = -\frac{1}{T_{2b}}\omega + \frac{1}{T_{2b}}M; \\ pM = -\frac{k_b}{T_{1b}}M + \frac{1}{T_{1b}}W; \\ pW = -\frac{1}{T''}W + \frac{1}{T''}Z; \\ pZ = -\frac{1}{T'}Z + \frac{1}{T'}L; \\ pL = k_e L^* \end{cases}$$

де M , W , Z – значення проміжних змінних на виходах динамічних ланок з передавальними функціями $M(s)$, $W(s)$, $Z(s)$ відповідно; ω – швидкість обертання парової турбіни, рад/с; k_b – коефіцієнт.

Перейдемо до відносних одиниць, для чого здійснимо заміну

$$\frac{\omega}{\omega_{max}} = x_1, \frac{M}{M_{max}} = x_2, \frac{W}{W_{max}} = x_3, \frac{Z}{Z_{max}} = x_4, \frac{L}{L_{max}} = x_5, \frac{L^*}{L_m^*} = u_{00},$$

$$\text{де } \omega_{max} = M_{max} = k_b W_{max} = k_b Z_{max} = k_b L_m = k_b k_e L_m^*$$

У відносних одиницях система набуде вигляду

$$\begin{cases} px_1 = c_{11}x_1 + c_{12}x_2 \\ px_2 = c_{22}x_1 + c_{23}x_3 \\ px_3 = c_{33}x_3 + c_{34}x_4 \\ px_4 = c_{44}x_4 + c_{45}x_5 \\ px_5 = m u_{00} \end{cases}$$

$$\text{де } c_{11} = -1/T_{2b}; c_{12} = 1/T_{2b}; c_{22} = -k_b/T_{1b}; c_{23} = 1/T_{1b}; c_{33} = -1/T''; c_{34} = 1/T''; k_b; c_{44} = -1/T'; c_{45} = 1/T'; m = k_e L_m^*/L_m$$

Виконаємо нормування системи рівнянь та запишемо її у координатах збуреного руху

$$\begin{cases} p\eta_1 = c_{11}\eta_1 + c_{12}\eta_2 \\ p\eta_2 = c_{22}\eta_1 + c_{23}\eta_3 \\ p\eta_3 = c_{33}\eta_3 + c_{34}\eta_4 \\ p\eta_4 = c_{44}\eta_4 + c_{45}\eta_5 \\ p\eta_5 = mU_{00} \end{cases}$$

де $U_{00} = u_{00} - u_{00}^*$, $h_i = x_i - x_i^*$.

Приведемо систему до форми Фробеніуса, поєднавши $\tilde{\eta}_1$ і η_1

$$\begin{cases} p\tilde{\eta}_1 = \tilde{\eta}_2 \\ p\tilde{\eta}_2 = \tilde{\eta}_3 \\ p\tilde{\eta}_3 = \tilde{\eta}_4 \\ p\tilde{\eta}_4 = \tilde{\eta}_5 \\ p\tilde{\eta}_5 = -A_1\tilde{\eta}_1 - A_2\tilde{\eta}_2 - A_3\tilde{\eta}_3 - A_4\tilde{\eta}_4 - A_5\tilde{\eta}_5 + mU_{00} \end{cases}$$

Знайдемо значення коефіцієнтів $A_1, \dots, A_5$, прирівнявши попередні системи

$$\begin{vmatrix} c_{11} - \lambda & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} - \lambda & c_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} - \lambda & c_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} - \lambda & c_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\lambda & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda & 1 \\ -A_1 & -A_2 & -A_3 & -A_4 & -A_5 - \lambda \end{vmatrix},$$

Звідки

$$A_{03} = -c_{11}c_{33} + c_{44}c_{11} + c_{11}c_{22} + c_{22}c_{33} + c_{44}c_{22} + c_{44}c_{33};$$

$$A_5 = -(c_{11} + c_{22} + c_{33} + c_{44});$$

$$A_4 = -(-c_{11}(c_{22} + c_{33} + c_{44}) - c_{44}(c_{33} + c_{22}) - c_{22}c_{33});$$

$$A_3 = -(c_{11}(c_{22}c_{33} + c_{33}c_{44} + c_{22}c_{44}) + c_{22}c_{33}c_{44});$$

$$A_2 = c_{11}c_{22}c_{33}c_{44}; A_1 = 0.$$

Знайдемо значення коефіцієнта M із рівності характеристичних визначників

$$\begin{vmatrix} 0 & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} - \lambda & c_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} - \lambda & c_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} - \lambda & c_{45} \\ m & 0 & 0 & 0 & -\lambda \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda & 1 \\ M & -A_2 & -A_3 & -A_4 & -A_5 - \lambda \end{vmatrix},$$

Звідки $M = mc_{12}c_{23}c_{34}c_{45}$, тобто

$$U_{00} = -\text{sign}\left[M\left(\tilde{v}_{15}\eta_1 + \tilde{v}_{25}p\eta_1 + \tilde{v}_{35}p^2\eta_1 + \tilde{v}_{45}p^3\eta_1 + \tilde{v}_{55}p^4\eta_1\right)\right]$$

робить функціонал мінімальним

$$\tilde{I}_{00} = \int_0^\infty 2\left|M\left(\tilde{v}_{15}\eta_1 + \tilde{v}_{25}p\eta_1 + \tilde{v}_{35}p^2\eta_1 + \tilde{v}_{45}p^3\eta_1 + \tilde{v}_{55}p^4\eta_1\right)\right|dt$$

по траєкторіях руху систем.

Коефіцієнти функції Ляпунова визначаються співвідношеннями

$$\tilde{v}_{15} = A_2, \tilde{v}_{25} = A_3, \tilde{v}_{35} = A_4, \tilde{v}_{45} = A_5, \tilde{v}_{55} = 1,$$

Підставивши значення, отримаємо

$$U_{00} = -\text{sign}[(A_2 + A_3p + A_4p^2 + A_5p^3 + p^4)\eta_1] \times \text{sign}[mc_{12}c_{23}c_{34}c_{45}]$$

або

$$U_{00} = -\text{sign}\left[\left(1 + \frac{A_3}{A_2}p + \frac{A_4}{A_2}p^2 + \frac{A_5}{A_2}p^3 + \frac{1}{A_2}p^4\right)\eta_1\right]$$

Використовуючи зворотну заміну змінних стану, отримаємо оптимальне керування, виражене через поточне та задане значення швидкості парової

$$L^* = L_m^* \text{sign} \left[\left(1 + \frac{A_3}{A_2} p + \frac{A_4}{A_2} p^2 + \frac{A_5}{A_2} p^3 + \frac{1}{A_2} p^4 \right) (\omega^* - \omega) \right]$$

Якщо в виразі здійснити заміну похідних їхніми значеннями відповідно до рівнянь, то можна отримати алгоритм оптимального керування, виражений через абсолютні значення змінних стану.

2.5 Структурна реалізація алгоритму керування швидкістю турбіни

У розглянутому ОК технічно неможливо провести вимірювання проміжних змінних стану об'єкта. Тому здійснимо побудову спостережувального пристрою (СП), за допомогою якого отримаємо старші похідні основної регульованої координати.

Оскільки ОК може бути подано як послідовне з'єднання аперіодичних ланок 1-го порядку з передатною функцією, таку ж структуру і оберемо для СП, представивши її у формі Фробеніуса. Система рівнянь СП має вигляд

$$\begin{cases} p\tilde{z}_1 = \tilde{z}_2 \\ p\tilde{z}_2 = \tilde{z}_3 \\ p\tilde{z}_3 = \tilde{z}_4 \\ p\tilde{\eta}_4 = -A_{01}\tilde{z}_1 - A_{02}\tilde{z}_2 - A_{03}\tilde{z}_3 - A_{04}\tilde{z}_4 + M_1 U_0 \end{cases}$$

де

$$A_{01} = c_{11}c_{22}c_{33}c_{44}; \quad A_{02} = -c_{11}c_{22}c_{33} - c_{44}c_{11}c_{22} - c_{44}c_{11}c_{33} - c_{44}c_{22}c_{33};$$

$$A_{03} = -c_{11}c_{33} + c_{44}c_{11} + c_{11}c_{22} + c_{22}c_{33} + c_{44}c_{22} + c_{44}c_{33}; \quad A_{04} = -c_{11} - c_{33} - c_{44} - c_{22};$$

$$c_{11} = -1 / T_{2b} ; c_{12} = 1 / T_{2b} ; c_{22} = -k_b / T_{1b} ; c_{23} = 1 / T_{1b} ;$$

$$c_{33} = -1 / T^n ; c_{34} = 1 / T^n k_b ; c_{44} = -1 / T' ; m_1 = 1, M_1 = m_1 c_{12} c_{23} c_{34}$$

Система рівнянь СП може бути подана наступною структурною схемою

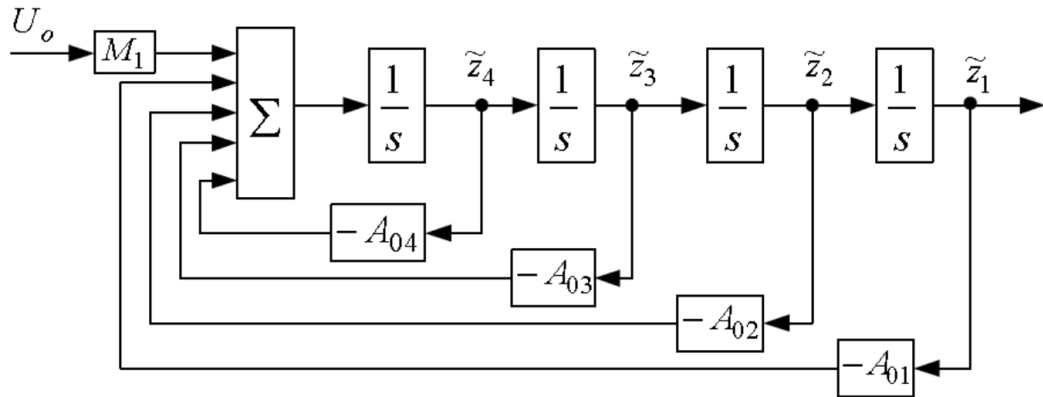


Рисунок 2.16 - Структурна схема СП у формі Фробеніуса

Введемо нові змінні

$$\tilde{x}_1 = \tilde{z}_1 - \eta_1, \tilde{x}_2 = \tilde{z}_2 - s\eta_1, \tilde{x}_3 = \tilde{z}_3 - s^2\eta_1, \tilde{x}_4 = \tilde{z}_4 - s^3\eta_1, U_{o2} = U_o - U_{00}$$

і перетворимо систему у формі Фробеніуса до вигляду

$$\begin{cases} p\tilde{x}_1 = \tilde{x}_2 \\ p\tilde{x}_2 = \tilde{x}_3 \\ p\tilde{x}_3 = \tilde{x}_4 \\ p\tilde{x}_4 = -A_{01}\tilde{x}_1 - A_{02}\tilde{x}_2 - A_{03}\tilde{x}_3 - A_{04}\tilde{x}_4 + M_1 U_{20} \end{cases}$$

Закон керування СП

$$U_{o2} = -\frac{\tilde{g}_1}{M_1} (\tilde{v}_{14}x_1 + \tilde{v}_{24}px_1 + \tilde{v}_{34}p^2x_2 + \tilde{v}_{44}p^3x_1)$$

мінімізує функціонал якості

$$I_{o2} = \int_0^T \left(8(\tilde{v}_{01}x_1^2) + \tilde{g}_1(\tilde{v}_{14}x_1 + \tilde{v}_{24}px_1 + \tilde{v}_{34}p^2x_2 + \tilde{v}_{44}p^3x_1)^2 + \frac{M_1^2}{\tilde{g}_1}U_{o2}^2 \right) dt$$

по траєкторіях руху системи.

Коефіцієнти закону керування будуть рівні

$$\tilde{v}_{44} = 1, \tilde{v}_{34} = A_4, \tilde{v}_{24} = A_3, \tilde{v}_{14} = A_2, \tilde{v}_{04} = A_1,$$

В результаті перетворень, а також повернення до старих змінних $\tilde{\eta}_1$ і $\tilde{z}_1$

$$U_o = U_{00} + \frac{\tilde{g}_1}{M_1} \left[(A_{02} + A_{03}p + A_{04}p^2 + p^3)(\eta_1 - \tilde{z}_1) \right]$$

Структурна реалізація СП та закону керування швидкістю турбіни представлена на рис. 2.17.

2.6 Уточнення математичного опису дуттєвої машини

Керування роботою дуттєвої машини здійснюється кількома способами, що утворюють розподілену систему управління, кожна підсистема якої відповідає за свій ділянку роботи. Одні захищають турбіну від механічних пошкоджень, інші забезпечують безаварійну та безвідмовну роботу дуттєвої машини, здійснюючи її захист зі сторони споживача.

Швидкодія таких систем часто перевищує механічну швидкодію приводу дуттєвої машини – парової турбіни.

Розглянемо детальніше систему рівнянь динаміки дуттєвої машини

$$\begin{cases} \frac{d\Psi}{d\xi} = \frac{1}{4B^2 l_c} (\Phi - \Phi_t(\Psi)), \\ \frac{d\Phi}{d\xi} = k_{pr} \sqrt{\Psi_m(\Phi, y_{00}) - \Psi}, \end{cases}$$

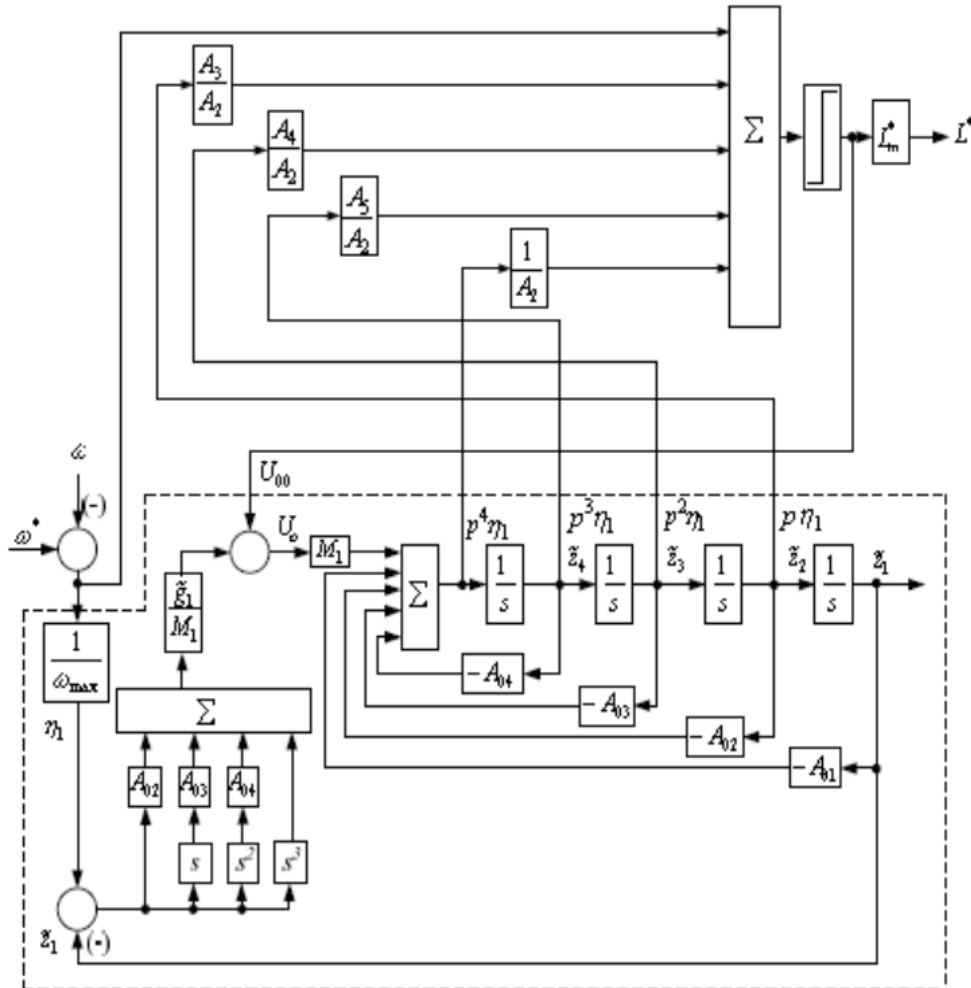


Рисунок 2.17- Структурна реалізація закону керування швидкістю турбіни зі СП

де

$$\Psi_m(\Phi, y_{00}) = \sqrt{1 + k_O y_{00}^2 + (k_H y_{00})^2 \left[1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\Phi}{(k_W y_{00})} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\Phi}{(k_W y_{00})} - 1 \right)^3 \right]}.$$

На практиці прийнято вважати, що для осьових компресорних машин зміна витрати через агрегат прямо пропорційна зміні швидкості обертання [16].

Методику розрахунку газодинамічних характеристик, а також результати математичного моделювання, наведені в [26], дозволяють припустити, що друге рівняння системи описує різку зміну витрати газу через дуттєву машину.

Для створення системи керування витратою на виході ГТМ скористаємося першим рівнянням системи, а, виходячи з вищесказаного, виконаємо заміну другого рівняння.

Перше рівняння системи у реальних одиницях матиме наступний вигляд $p_{P1}=k_3(Q_k-Q_1)$, де $k_3 = P_a/(4B^2l_c Q_{kmax})$, P_a – атмосферний тиск, Па; Q_k – витрата газу з компресора, м³/с; Q_{kmax} – максимальна витрата газу з компресора, м³/с; $Q_1 = \Phi_t \times Q_{kmax}$ – витрата газу з мережі, приведена до максимуму витрати газу з компресора, м³/с; $P_1 = P_a \Psi$ – тиск газу на виході з компресора, Па.

Виходячи з припущення, що витрата газу прямо пропорційна частоті обертання, запишемо таку залежність

$$Q_k = \Phi \cdot Q_{kmax} = \omega k \frac{Q_{kmax}}{\omega_{max}} = \omega \cdot k_{ck},$$

де k_{ck} - коефіцієнт, м³/рад.

Скориставшись виразами, а також структурними схемами, динаміку спільної роботи дуттєвої машини та ГТМ можна подати у вигляді структурної схеми, наведеної на рис. 2.18.

Для адекватності математичної моделі САУ регулювання швидкості парової турбіни до структурної схеми (рис. 2.18) доданий блок обмеження інтенсивності наростання швидкості обертання з коефіцієнтом α , що імітує інерційність системи «парова турбіна – дуттєва машина».

Об'єкт керування, поданий структурною схемою рис. 2.18, є суттєво нелінійним, тому для нього неможливо визначити структуру та параметри регулятора шляхом розв'язання задачі АКР. Для здійснення процедури синтезу регулятора витрати газу виконаємо лінеаризацію складових блоків структурної схеми.

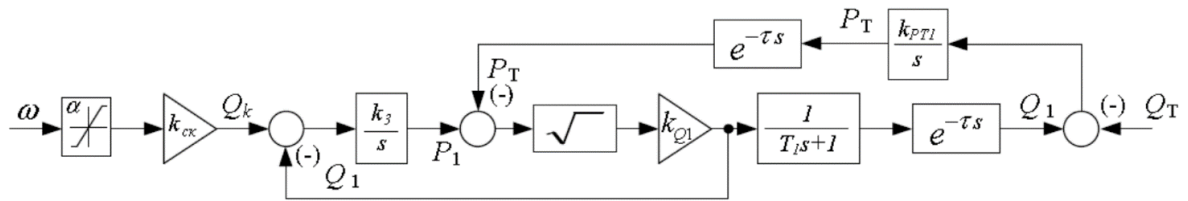


Рисунок 2.18 - Структурна схема ГТМ та дугтевої машини

2.7 Лінеаризація нелінійних об'єктів газотранспортної мережі

У математичному описі ГТМ присутні два види нелінійностей: ланка запізнювання та операція взяття кореня. З урахуванням рекомендацій, наведених у публікаціях, ланку запізнювання можна лінеаризувати такими функціями:

1. наближенням Паде другого порядку

$$e^{-\tau s} \approx \frac{\tau^2 s^2 - 6\tau s + 12}{\tau^2 s^2 + 6\tau s + 12};$$

2. аперіодичною ланкою 1-го порядку

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1}{T_\tau s + 1}, T_\tau = \tau/3 \div 4.$$

3. послідовним з'єднанням ланок 1-го порядку

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1}{(T_{\tau 1} s + 1)(T_{\tau 2} s + 1)}$$

Після лінеаризації ланок запізнювання аперіодичними ланками 1-го порядку структурна схема, подана на рис. 2.18, набуде вигляду, показаного на рис. 2.19.

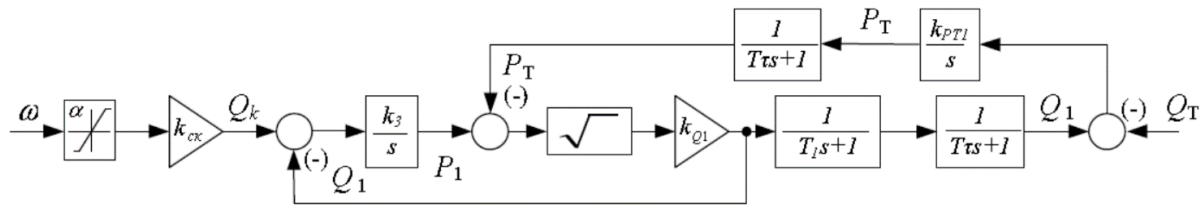


Рисунок 2.19 Структурна схема ГТМ і повітродувки після лінеаризації ланки запізнювання

Блок добування квадратного кореня не може бути лінеаризований в околі робочої точки розкладом у ряд Тейлора, оскільки перепад тисків $\Delta P = P_1 - P_T$ не є сталим. Тому для синтезу регулятора витрати повітря, що подається на повітрянагрівачі, будемо використовувати модифікований принцип симетрії.

2.8 Синтез регулятора витрати повітря на виході газотранспортної мережі

Застосувавши модифікований принцип симетрії до об'єкта керування (рис. 2.20) отримаємо замкнену систему автоматичного регулювання витрати повітря на виході з газотранспортної мережі (рис. 2.20).

Регулятор витрати повітря складається з інтегруючої ланки з коефіцієнтом підсилення g_Q та обмеженням вихідного сигналу на рівні максимального значення завдання на швидкість обертання турбіни ω_{max} і симетричної частини, передатна функція якої є оберненою до передатної функції ГТМ.

Додавання в схему інтегруючої ланки з обмеженням забезпечує усунення статичної похибки за задавальним впливом при обмеженому коефіцієнті підсилення. Таким чином, регулятор витрати повітря побудований у повній відповідності з модифікованим принципом симетрії [24].

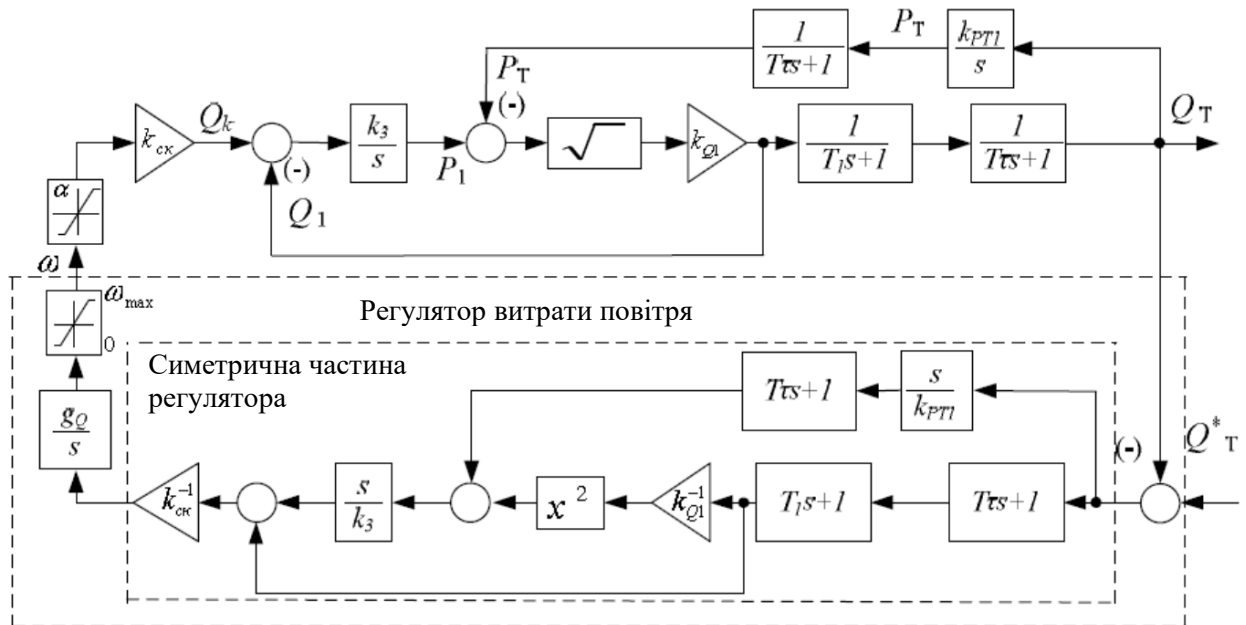


Рисунок 2.20- Структурна схема контуру регулювання витрати повітря на виході з ГТМ

2.9 Синтез регулятора тиску на виході газотранспортної мережі

Із структурної схеми випливає, що до ГТМ підключено кілька споживачів. Розглянемо режим роботи тракту дуття для випадку, коли до нього підключено лише один повітрянагрівач. Тоді зі схеми можна виключити блоки кільцевого повітропроводу. У результаті таких перетворень отримаємо спрощену структурну схему споживачів дуття, наведену на рис. 2.21.

Структурні схеми повітрянагрівача і доменної печі подібні між собою та відрізняються сталими часу. Отже, зміни витрати Q_T газу, що споживається з ГТМ, і витрати доменного Q_R газу на колошнику доменної печі підпорядковуються спільному закону. Наведемо параметри регулятора витрати газу на колошнику до витрати газу на вході в повітрянагрівач. Звідки $Q_T = Q_T' = Q_D = Q_D' = Q_R$.

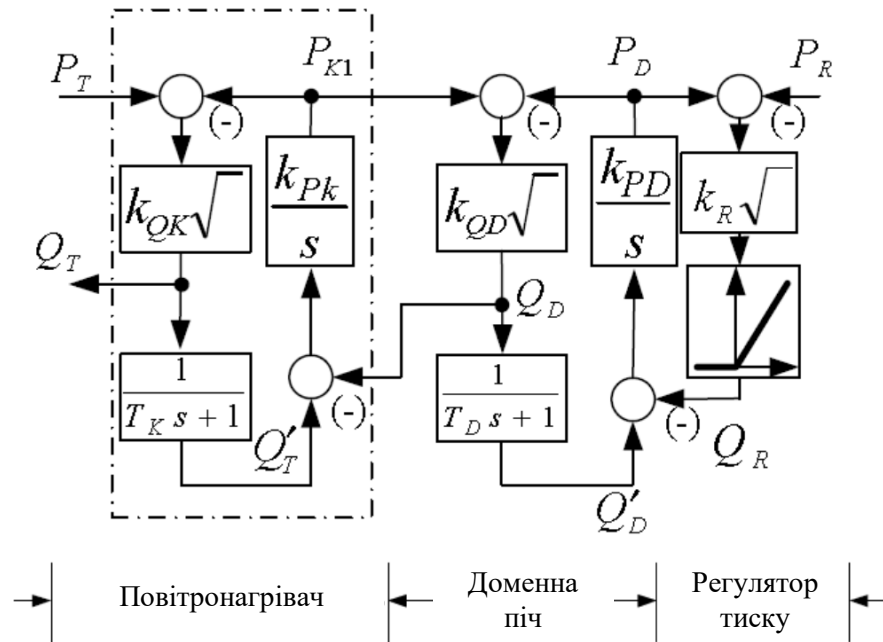


Рисунок 2.21- Спрощена структурна схема споживачів дуття

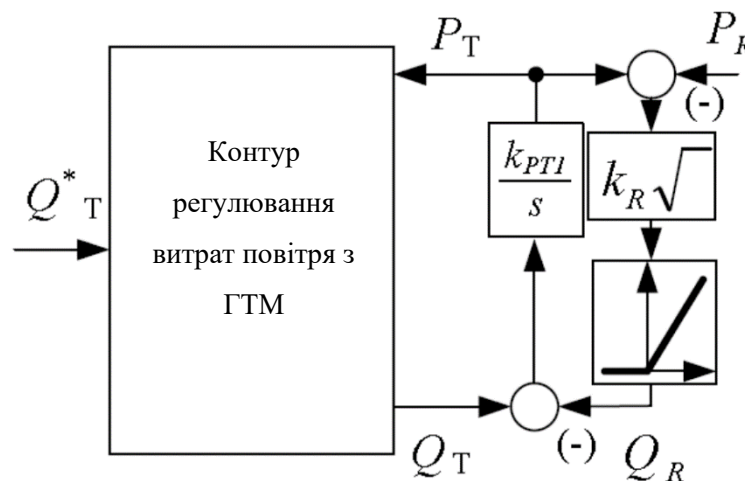


Рисунок 2.22- Спрощена структурна схема споживача дуття з ГТМ

На виході ГТМ у ролі споживача може виступати регулятор тиску на колошнику доменної печі. Враховуючи рівність, наведемо структурну схему, подану на рис. 2.21, у вигляді, представленому на рис. 2.22.

Для безаварійного протікання процесу транспортування газу в одному напрямку необхідне виконання умови $P_t - P_r > 0$

Оскільки $PR \approx \text{const}$, то витрата повітря з ГТМ Q_R завжди буде додатною,

а її величина буде пропорційна тиску P_T . При синтезі регулятора тиску допустимо знехтувати впливом негативного зворотного зв'язку по Q_R , вважаючи його зовнішнім збуренням, яке має бути компенсоване системою керування.

Структура регулятора тиску дуття на виході ГТМ визначена на основі модифікованого принципу симетрії, що відображено на рис. 2.23.

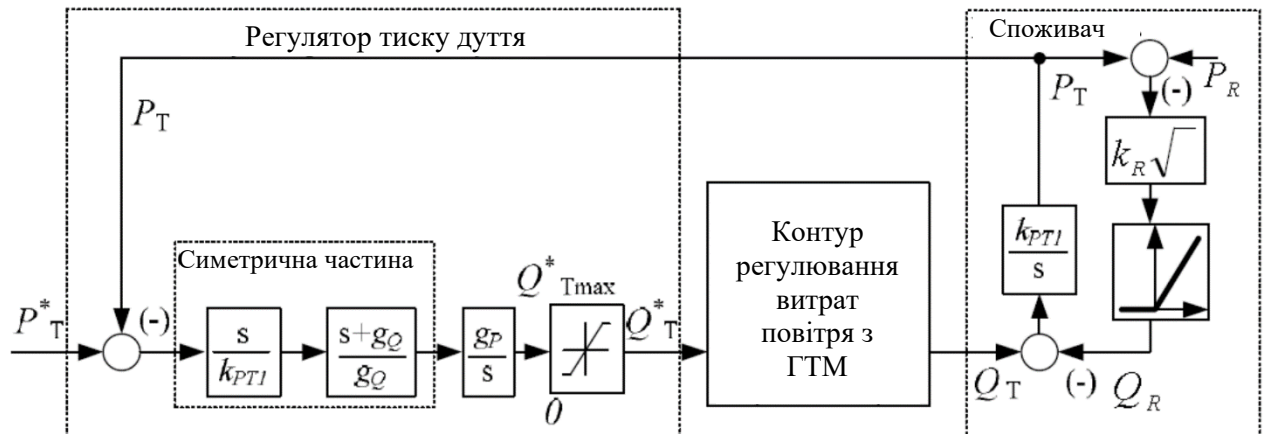


Рисунок 2.23- Структура СУ тиском дуття на виході ГТМ

Структурна схема регулятора тиску складається з симетричної частини — СЧ та блоків інтегрування з коефіцієнтом підсилення і обмеженням на керуючий сигнал регулятора витрати повітря. Оператор s чисельника СЧ і знаменника інтегральної ланки скорочуються, внаслідок чого регулятор тиску стає пропорційним з коефіцієнтом підсилення, рівним g_P / k_{PT1} .

Висновки до розділу

1. Процес вироблення дуття проходить у кілька етапів. Основними з них є підвищення тиску, транспортування, підігрів. Процес транспортування дуття забезпечується повітродувкою, робота якої пов'язана з етапом підвищення тиску.

2. Повітродувка за своєю конструкцією є відцентровим компресором. Процеси підвищення тиску та зміни потужності в повітродувці описуються сімейством кривих, які називаються газодинамічними характеристиками.

3. З певною точністю всі процеси, що відбуваються в газоповітряній суміші, описуються рівнянням неперервності, підпорядковуються законам збереження імпульсу, енергії та фазового стану речовини.

4. У математичному описі ГТМ присутні два види нелінійностей: ланка запізнювання та операція взяття кореня.

5. Застосовано модифікований принцип симетрії до об'єкта керування і отримано замкнену систему автоматичного регулювання витрати повітря на виході з газотранспортної мережі.

6. Структурна схема регулятора тиску складається з симетричної частини — СЧ та блоків інтегрування з коефіцієнтом підсилення і обмеженням на керуючий сигнал регулятора витрати повітря.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

3.1 Структура системи управління виробленням холодного дуття

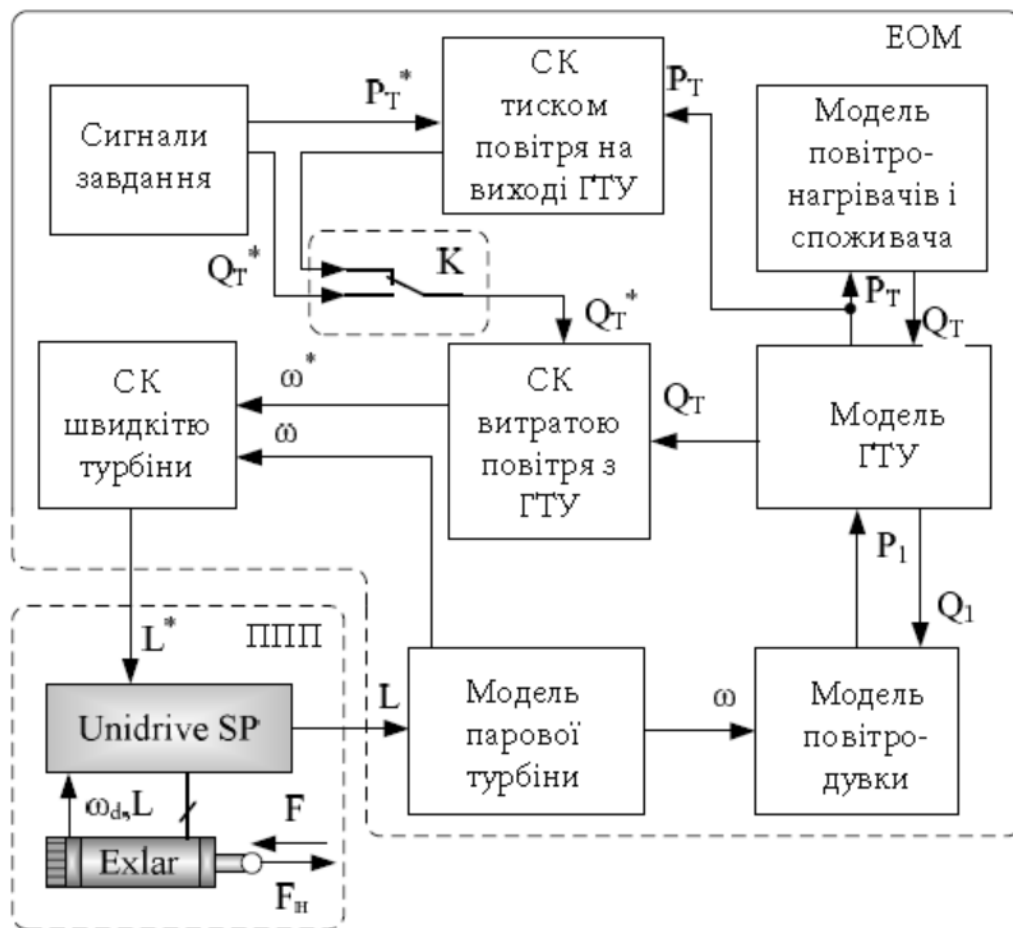


Рисунок 3.1 - Функціональна схема системи управління виробленням
холодного дуття

Запропонована система керування процесом виробництва холодного дуття є системою ієрархічного (підлеглого) типу, яка включає приблизно 5–6 контурів регулювання. Найнижчий рівень становить контур струму електричної машини приводу (ЕМП), за ним розташовані контури регулювання швидкості та положення ЕМП. Наступними є контур керування швидкістю обертання парової

турбіни та контур регулювання витрати на виході газотурбінної установки (ГТУ). Залежно від поточного технологічного режиму роботи системи вироблення холодного дуття, контур регулювання тиску на виході ГТУ може бути підключений або відключений від загальної системи керування.

3.2 Дослідження системи "ЕМП – Парова турбіна"

Проведено спільне дослідження законів управління положенням ЕМП ППП та закону управління швидкістю обертання парової конденсаційної турбіни. Дані математичного моделювання та ідентифікації параметрів передатної функції «чорної скриньки», отримані раніше, дозволяють розрахувати коефіцієнти синтезованого закону управління.

Отримана за таких умов СК має бути стійкою та якісно працювати при зміні постійних часу «чорної скриньки» відповідно до залежностей.

Для дослідження процесів, що відбуваються в реальній турбіні, приймемо такі початкові умови та припущення:

- турбіна вже розігнана до номінальної швидкості обертання;
- параметри пари на вході та виході агрегату залишаються постійними в аналізовані моменти часу;
- навантаженням на валу турбіни є повітрорудка, що має вентиляторний момент опору;
- у аналізованому експерименті додаткове навантаження на вал турбіни імітується як процес різкого навантаження та розвантаження генератора, зчленованого з валом турбіни, на величину 10% від номінального моменту парової турбіни;
- турбіна має у своєму складі локальні системи регулювання, які забезпечують безаварійну роботу агрегату та його протиаварійний захист.

В результаті проведення дослідження отримано графіки перехідних процесів зміни швидкості обертання парової турбіни при зміні сигналу завдання

та навантаження на валу (рис.3.2), а також перехідні процеси сервоприводу ППП, що входить до складу системи управління швидкістю обертання турбіни

На рисунку 3.2,а зображено сигнал завдання для СК швидкістю обертання парової турбіни ω^* та перехідні процеси швидкості парової турбіни ω .

Момент навантаження на валу турбіни задається за графіком, наведеним рисунку 3.2,б. Перехідні процеси зміни положення керуючого органу ППП L під час роботи СК швидкістю парової турбіни наведено рисунку 3.2,в.

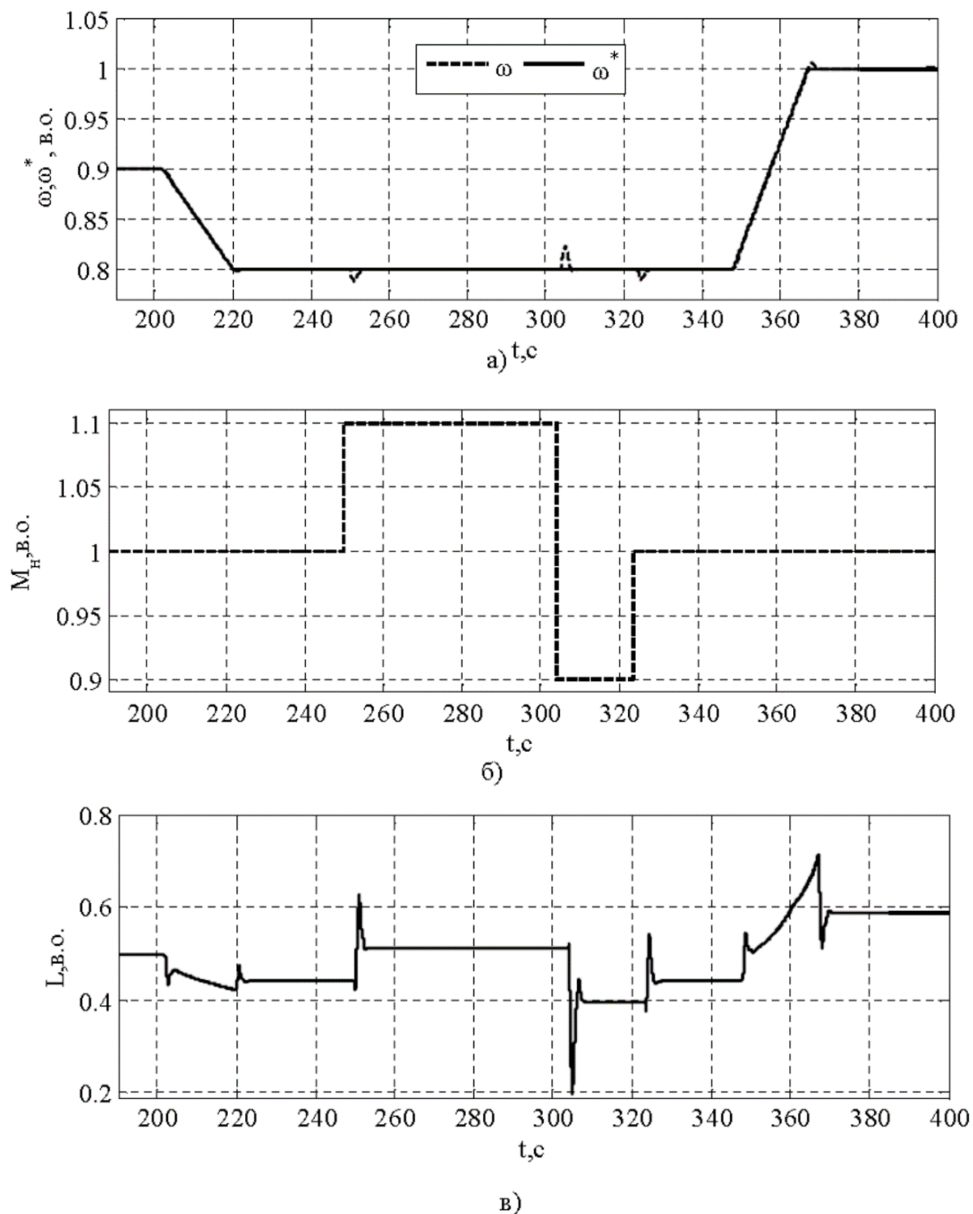


Рисунок 3.2 - Перехідні процеси роботи системи керування швидкістю турбіни

У проміжках часу з 205с до 220с відбувається зниження завдання на швидкість обертання турбіни з 90% до 80% ω , а з 345 по 370 з підвищення з 80%

його до 100% ω . На рисунку виразно видно, що відпрацювання завдання на швидкість обертання турбіни здійснюється з незначною динамічною помилкою.

У період з 250 до 305 с відбувається збільшення моменту опору на валу турбіни на 10% M_H , а далі з 305с до 325 зі зменшення опору навантаження на 20% M_H . Після 325 з $M_H = 100\%$. Різке збільшення навантаження на 10% M_H призводить до підвищення динамічної помилки, величина якої не перевищує 1% ω_H . СК швидкістю обертання парової турбіни компенсує динамічне падіння швидкості шляхом збільшення подачі пари в турбіну змінюючи положення ППП L. Час відновлення швидкості вбирається у 8с.

Зменшення навантаження на 20% M_H має зворотний ефект, швидкість ω збільшується на 2%. При цьому СК зменшує швидкість ω за рахунок зниження подачі пари в турбіну протягом 12с. Збільшення навантаження на 10% M_H в момент часу 325с формує на графіках ті ж перехідні процеси, що і в момент часу 250с. Аналізуючи отримані результати моделювання можна зробити наступні висновки:

- синтезований регулятор для ОК 4-го порядку може бути застосований до аналізованого нелінійного ОК, який описується структурними схемами та при об'єднанні складають ОК 6-го порядку;
- система керування, оснащена регулятором швидкості, належить до астатичного типу та характеризується перерегулюванням під дією збурень, яке не перевищує 3% у разі зміни навантаження на $\pm 10\%$ від номінального значення.

3.3 Перевірка адекватності математичної моделі ГТУ

Використані номінальні та конструктивні дані повітродувки та ГТУ, наведених у табл.3.1.

Для перевірки адекватності моделі газотурбінної установки (ГТУ) було проведено математичне моделювання її роботи відповідно до вимог чинного технологічного процесу подачі дуття до повітрянагрівачів підприємства. У

процесі моделювання до входу математичної моделі ГТУ підключили модель повітродувки, що працює в номінальному режимі з постійною швидкістю обертання. До виходу моделі ГТУ приєднали модель споживача, яка імітує процес підключення «нагрітого» повітронагрівача та відключення «остиглого». Результати моделювання наведено на рисунках 3.3-3.4.

Таблиця 3.1 - Параметри газотранспортної мережі та повітродувки

Найменування параметра	Позначення	
Протяжність ГТУ, м	l	700
Радіус кола трубопроводу, м	R	0,6
Продуктивність повітродувки (номінальна), м ³ /с	Q _н	54.17
Продуктивність повітродувки (технологічний процес), м ³ /с	Q ₁	40
Тиск на виході повітродувки (номінальний), ата	P _н	3,8
Тиск на виході повітродувки (технологічний процес), ата	P ₁	3,4
Тиск на виході з ГТУ (технологічний процес), ата	P ₂	3,3
Щільність дуття, кг/м ³	r	3,337
Коефіцієнт трубопроводу, (м ^{7/2}) /кг	k _{Q1}	0,3651

Аналіз результатів моделювання свідчить про відповідність характеру зміни витрати та тиску на виході й вході ГТУ, що підтверджує адекватність побудованої математичної моделі. Відхилення результатів моделювання від експериментальних значень становить трохи більше ніж 10%.

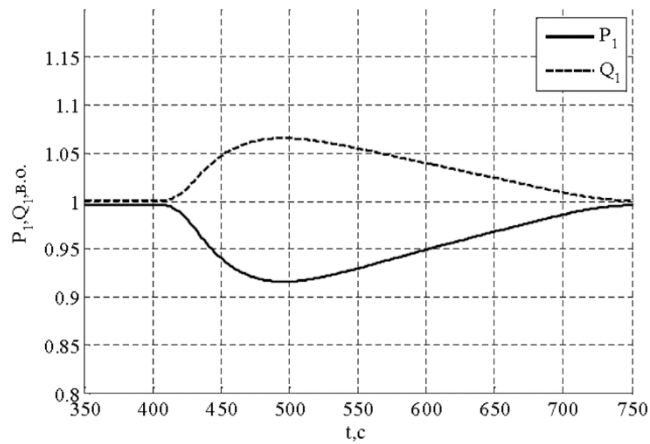


Рисунок 3.3 - Графіки переходних процесів тиску P_1 та витрати Q_1 повітря на вході до ГТУ, отримані за допомогою математичної моделі

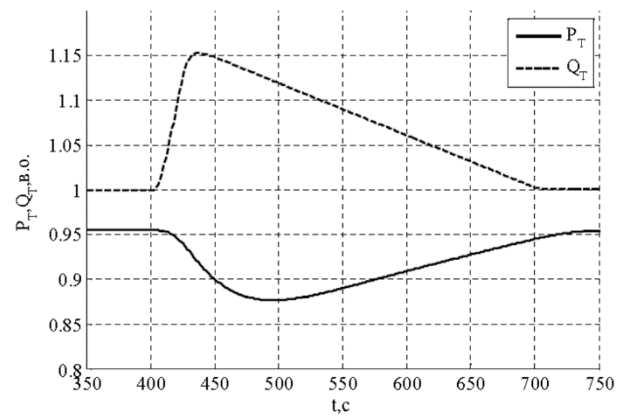


Рисунок 3.4 - Графіки переходних процесів тиску P_T і витрати Q_T повітря на виході ГТУ, отримані з математичної моделі

3.4 Моделювання системи управління витратою дуття

Доповнення моделі технологічного процесу блоками повітродувки та ГТУ змінює початкові умови моделювання. При дослідженні регулятора витрати дуття скориговано початкові умови моделювання:

- топологія ГТУ стала;
- навантаженням для системи управління витратою дуття служить відкриття АПК на 5% від величини номінальної витрати $Q_A = 0,05 Q_N$;
- момент навантаження на валу турбіни визначається виразом

$$M_{\text{нагр}} = \frac{P_1 Q_1}{\omega_T}$$

На графіку 3.5 а зображені сигнал завдання Q^*_T , що надходить на вхід СК витратою повітря з ГТУ, і перехідні процеси зміни витрати духу з ГТУ Q_T .

Графік впливу Q_A , що імітує витрату повітря через АПК повітродувки, наведено на рисунку 3.6. Величина Q_A збільшує і зменшує своє значення з 0 до $0,05 Q_H$ і з $0,05 Q_H$ до 0 відповідно інтервалі часу зі 190с по 210с.

Збільшення витрати повітря через АПК повітродувки на 5% призводить до зниження витрати повітря Q_T на виході з ГТУ на 5%.

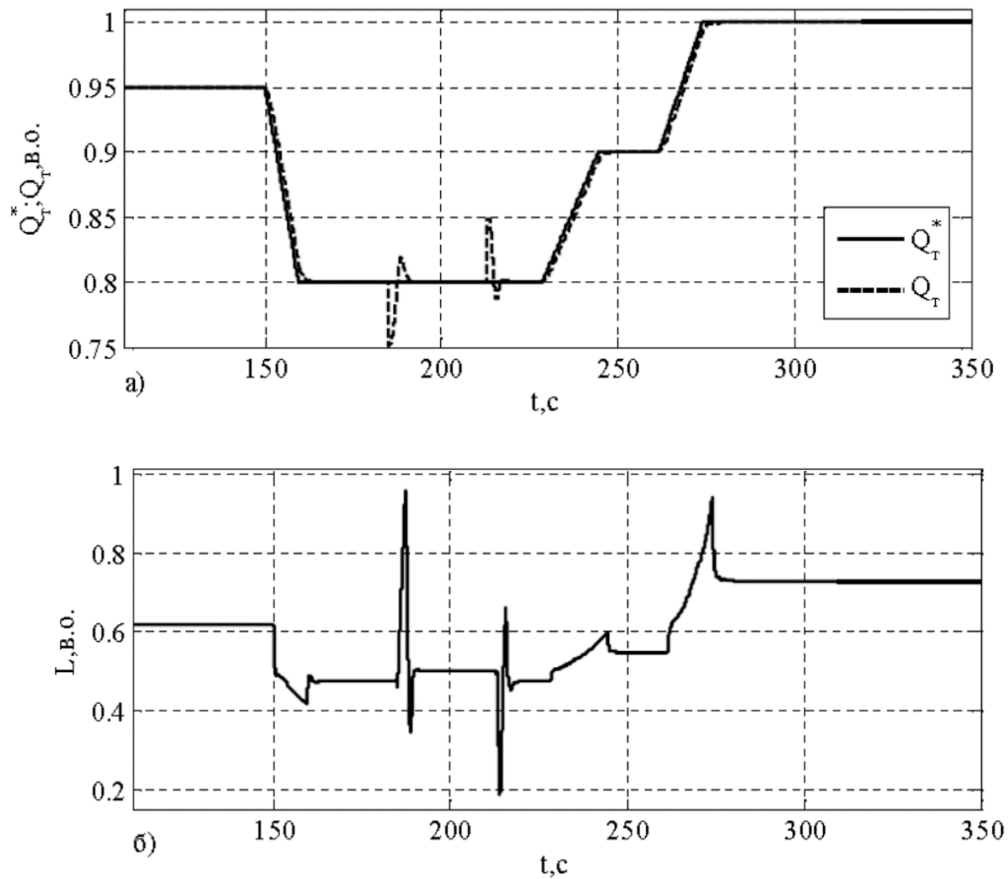


Рисунок 3.5 - Перехідні процеси зміни: а) витрати повітря на виході з ГТУ;
б) положення L ЕМП при роботі регулятора витрати

В результаті момент навантаження на валу турбіни $M_{нагр.}$ тимчасово знижується та підвищується на $1\% M_H$. СК витратою повітря з ГТУ компенсує зниження витрати Q_T шляхом збільшення швидкості w за рахунок збільшення величини кількості пари надходить в турбіну за допомогою ППП, про що свідчать перехідні процеси положення L ЕМП наведені на рисунку 3.5,б. Тривалість перехідних процесів за змін Q_A не перевищує 10с.

Припинення роботи АПК в момент часу 210с викликає зворотні дії СК витратою з ГТУ і перехідні процеси вимірюваних величин характеру та величині та тривалості.

Лінійне наростання сигналу завдання на інтервалі з 235с по 245с, а також з 265с по 275с Q^*_T з однаковими кутами нахилу і величинами збільшення на 10% Q_H (рис.3.5,а), забезпечується характерним по виду сигналом швидкості ω_T (рис.3.6). У той самий час перехідні процеси положення L ЕМП (рис. 3.5,б) мають відрізняються між собою зазначених часових інтервалах. Така відмінність між перехідними процесами пояснюється нелінійністю математичної моделі парової конденсаційної турбіни.

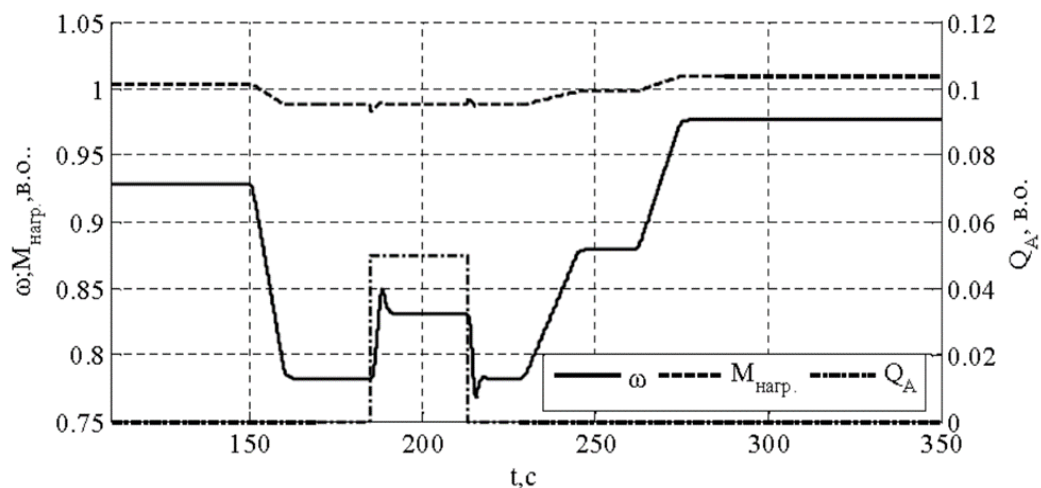


Рисунок 3.6 - Графіки перехідних процесів у паровій турбіні при навантаженні системи витратою дуття через АПК

Провівши аналіз перехідних процесів роботи регулятора витрати дуття можна зробити наступний висновок: система управління витратою повітря на виході ГТУ має невелику динамічну помилку при відпрацюванні сигналу завдання і є астатичною по відношенню до внутрішніх впливів, що обурюють, і може бути застосована для дослідження роботи регулятора тиску на вході повітрянагрівачів.

Для перевірки роботи регулятора тиску дуття ключ вводять в систему ще один зовнішній контур. Через війну контур управління витратою дуття стає підлеглим контуру управлінням тиском повітря на виході з ГТУ.

3.5 Дослідження роботи регулятора тиску дуття на виході ГТУ

Проведемо дослідження роботи регулятора тиску дуття на вході в повітрянагрівач. Для цього введемо в роботу блок, що реалізує математичну модель вироблення холодного дуття з регулятором витрати, регулятором тиску та споживачем.

Задамо нові початкові умови і скоригуємо вже існуючі. При моделюванні роботи регулятора тиску прийнято такі початкові умови та припущення:

- зовнішні обурення системи здійснюються двома способами:

1) збільшенням тиску на виході з ГТУ, що імітує «обвал» у процесі сходження шихти доменної печі;

2) збільшенням витрати на виході з ГТУ на 5% від номінального, що імітує процес заповнення нагрітого повітрянагрівача.

Графіки перехідних процесів роботи СК тиском на виході ГТУ представлені малюнки 3.7-3.8. На рисунку 3.7 наведено перехідні процеси зміни тиску на виході ГТУ P_T , в результаті відпрацювання впливу СК, що задає, СК тиском на виході ГТУ P^*_T , а також двох збурювальних впливів, які надають доменна піч та ГТУ. Перший вплив на СК імітує порушення ходу доменної плавки в результаті "обвалу" у сході шиті, що викликає збільшення тиску на вході ГТУ. Друге – зміна топології ГТУ, викликана підключенням нагрітого повітрянагрівача.

У момент часу 200 с відбувається «обвал» шихти, що викликає збільшення тиску на виході ГТУ на 1,5% від P_T , що встановився. Щоб зменшити тиск до заданого СК знижує витрату дуття на виході ГТУ Q_T на 21% (рис.3.7), зменшуючи швидкість турбіни ω на 22%, за допомогою зміни положення L ЕМП ППП (рис.3.8). Зниження швидкості викликає зменшення моменту навантаження на валу турбіни лише на 1-2%. Остаточні перехідні процеси, викликані цим обуренням, завершуються через 10-50 після початку.

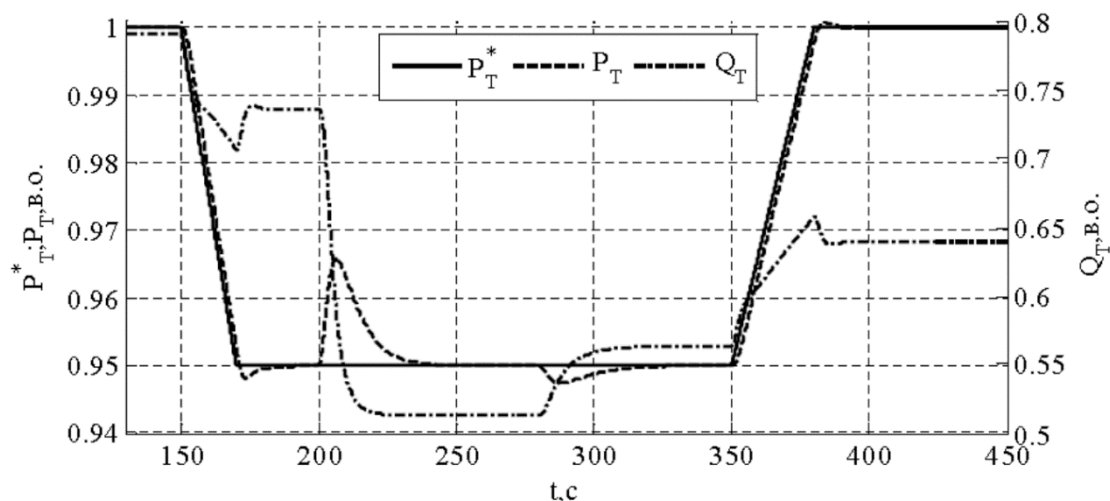


Рисунок 3.7 - Перехідні процеси зміни тиску та витрати дуття

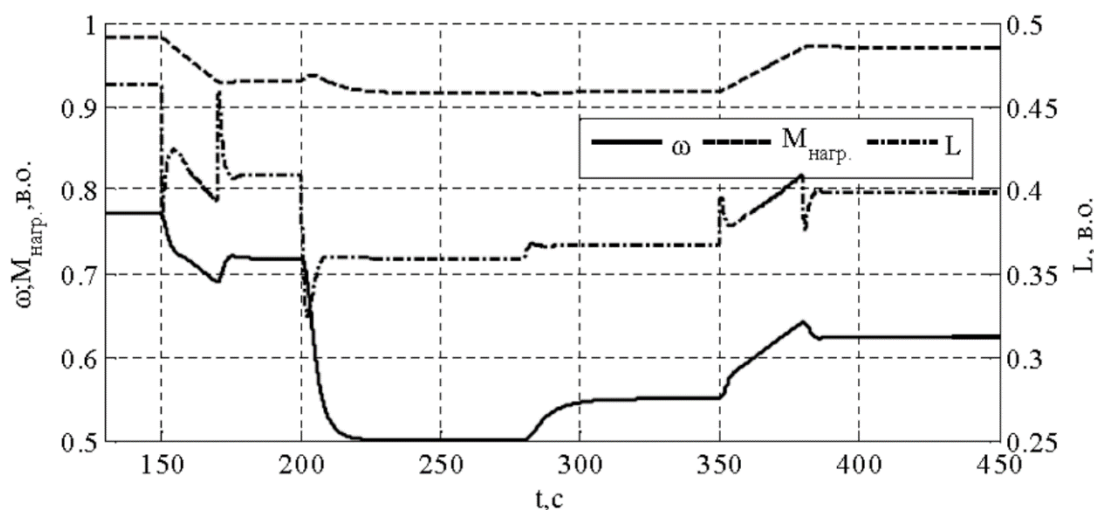


Рисунок 3.8 - Перехідні процеси швидкості обертання та моменту навантаження на валу турбіни та зміни положення L ЕМП під час роботи регулятора тиску

З 280с на СК тиском повітря діє друге обурення, що викликає збільшення на вході та зниження на виході ГТУ витрати повітря Q_T на 5%. Це призводи до зменшення тиску від встановленого на 0,5%. СК усуває зниження тиску рахунок збільшення витрати Q_T на 5% шляхом збільшення швидкості турбіни ω на 5%.

Положення L ЕМП ППП при цьому змінюватиметься на 2%. Тривалість перехідних процесів, викликаних цим обуренням, вибирається у 40с.

З графіків перехідних процесів випливає, що система керування тиском повітря астатична. Обвал доменної печі призводить до підвищення тиску на виході ГТУ. Щоб уникнути подальшого зростання система управління знижує, відповідно, витрату повітря і швидкість обертання повітрорудки.

Для повнішого вивчення роботи регулятора тиску дуття на виході ГТУ досліджуємо його вплив на основний технологічний процес, а саме, на підключення нагрітого повітронагрівача. Більш детально процес перемикання повітронагрівачів розглянемо на функціональній схемі, наведеній на рис. 3.9.

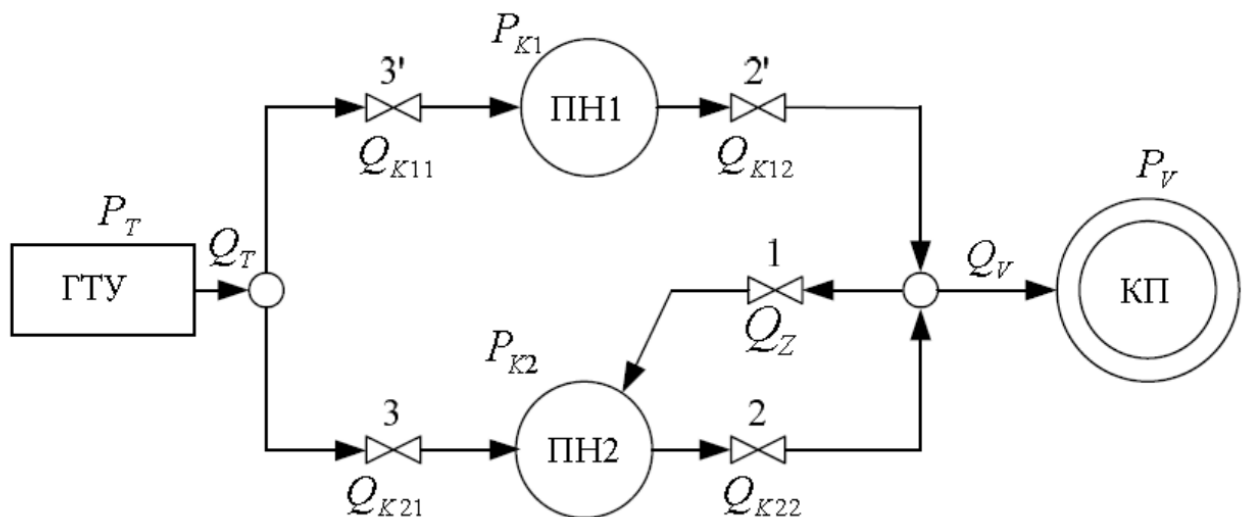


Рисунок 3.9 - Функціональна схема підключення нагрітого та відключення остиглого повітронагрівача

У даний момент часу повітронагрівач $ПН1$ охолонув і переводиться в режим нагрівання, а повітронагрівач $ПН2$ нагрітий і підключається до ГТУ. Вентилі $3'$, $2'$ знаходяться у відкритому стані, інші у закритому.

Процес підключення нагрітого повітронагрівача $ПН2$ відбувається так:

1) після досягнення номінального тиску P_T повітря на виході з ГТУ відбувається підключення другого повітронагрівача $ПН2$ до виходу першого повітронагрівача $ПН1$ шляхом відкриття вентиля 1 ;

2) далі відбувається заповнення повітрянагрівача *ПН2* гарячим дуттям до моменту, поки тиску P_{K2} і P_V не стануть рівними, після чого клапан 1 закривається;

3) відбувається відкриття клапана 2 та підключення повітрянагрівача *ПН2* до кільцевого повітропроводу *КП*;

4) після завершення процесу відкриття клапана 2 відкривається клапан 3 і обидва повітрянагрівачі починають працювати паралельно;

5) закриваються клапани 2', 3' і повітрянагрівач *ПН1* відключається від мережі.

Відповідно до функціональної схеми внесемо зміни до структурної схеми споживача. Замінімо її структурними схемами повітрянагрівачів, кільцевого повітропроводу та доменної печі. Отримана у своїй схемі представлена на рис.3.10.

Структурна схема доповнена контуром, який описує процес заповнення повітрянагрівача нагрітим повітрям, що відбирається з остигаючого повітрянагрівача. Цей зв'язок на структурній схемі відображає вираз

$$Q_z = k'_{QK} \sqrt{P_V - P_{K2}}, \quad k'_{QK} = 0,01 \cdot k_{QK}$$

У схему (рис.3.10) додано «умовні» клапани, 1, 2, 3, 2', 3' з функціональної схеми. З їх допомогою при моделюванні процесу підключення повітрянагрівачів виконується підключення/вимкнення відповідних сигналів.

При моделюванні прийнято такі припущення та початкові умови:

- збереження в силі початкових умов, заданих у попередньому підрозділі;
- робота системи управління тиском дуття починається після того, як усі вимірювані змінні стабілізовані;

- у початковий момент часу до ГТУ підключений один остигає повітрянагрівач (клапани 3' і 2' відкриті, 1,2,3 - закриті).

Перехідні процеси системи керування тиском дуття при перемиканні повітрянагрівачів наведено на рис.3.11-3.14.

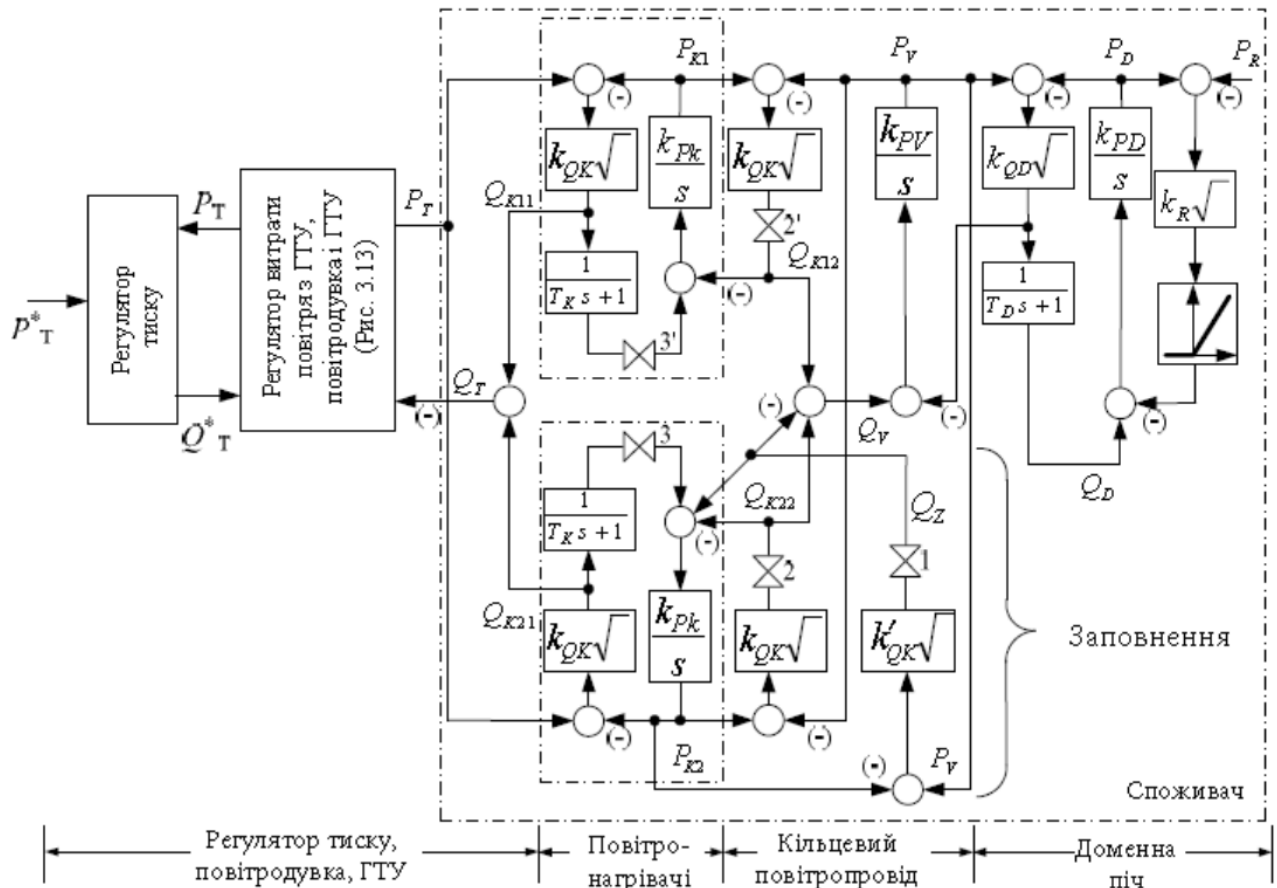
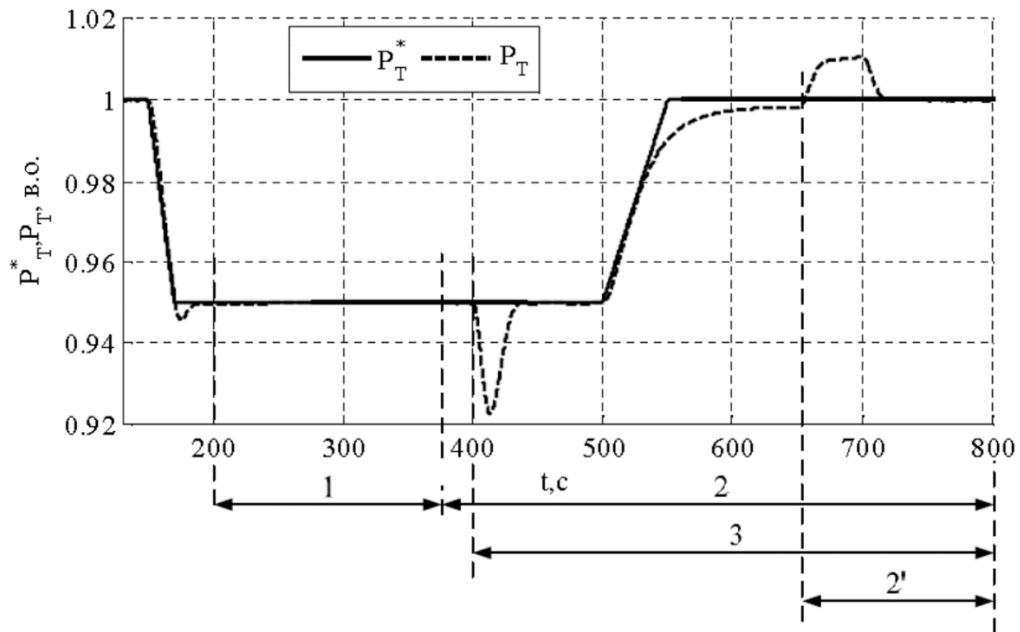


Рисунок 3.10 - Структурна схема контуру керування тиском дуття

На рисунку 3.11 зображено сигнал завдання для СК тиском P_T^* та перехідні процеси зміни тиску дуття на виході ГТУ P_T . Інтервали 1,2,3,2' вказують на періоди роботи відповідних вентилів.

На інтервалі 1 відбувається заповнення нагрітого повітрянагрівача з виходу остиглою, про що свідчить зниження витрати дуття з кільцевого повітропроводу Q_V не більше ніж на 4%. Цей процес триває доти, доки тиск у нагрітому повітрянагрівачі P_{K2} та кільцевому повітропроводі P_V не стануть рівними. Відкриття вентиля 2 практично не вносить збурень у схему, оскільки P_{K2} дорівнює P_V . Для повного підключення повітрянагрівача до ГТУ та введення його в роботу відкривається вентиль 3. Різниця тисків P_T і P_{K2} викликає різке збільшення витрати через повітрянагрівач Q_{K22} до 60%, а також збільшення витрати Q_T до 100% і, як наслідок, сумарної витрати Q_V до 119%.



1 – заповнення повітрянагрівача ПН2 через вентиль 1; 2 - підключення повітрянагрівача ПН2 до ГТУ; 3 – включення повітрянагрівачів ПН2 та ПН1 на паралельну роботу; 2' - відключення остиглого повітрянагрівача ПН1.

Рисунок 3.11 – Перехідні процеси зміни тиску на виході ГТУ

Цей процес триває до тих пір, поки витрати через перший Q_{K12} та другим Q_{K22} повітрянагрівачі, а також тиску в першому P_{K1} та другому P_{K2} повітрянагрівачі не стануть рівними. Усе це призводить до зменшення тиску P_T на 5%. СК тиском скомпенсує падіння тиску P_T збільшенням витрати на виході ГТУ Q_T яке забезпечується збільшенням швидкості обертання турбіни ω_T при зміні положення L штока ППП і зростанні моменту $M_{нагр}$.

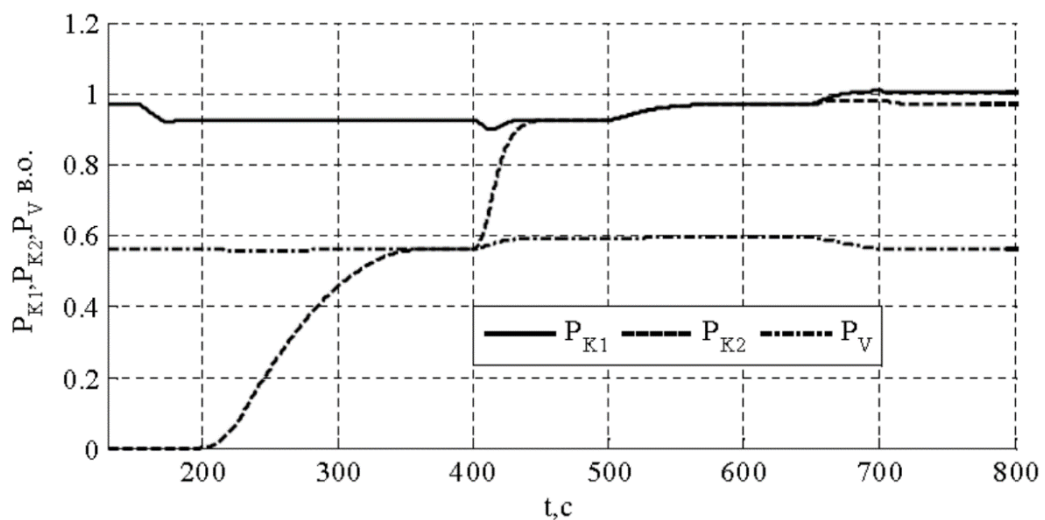


Рисунок 3.12 - Перехідні процеси зміни тиску P_{K1} , P_{K2} , P_V

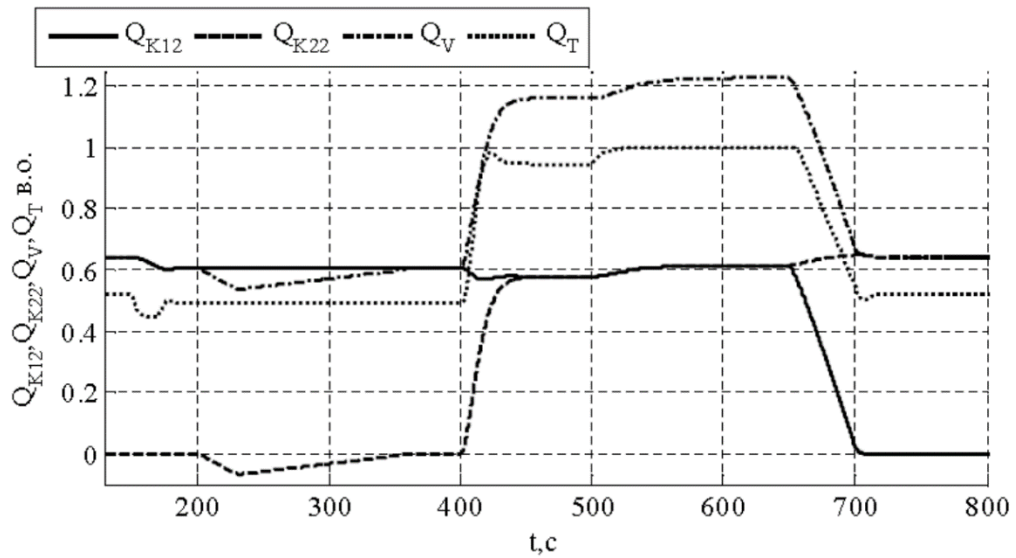


Рисунок 3.13 – Перехідні процеси зміни витрат Q_T , Q_{K12} , Q_{K22} , Q_V

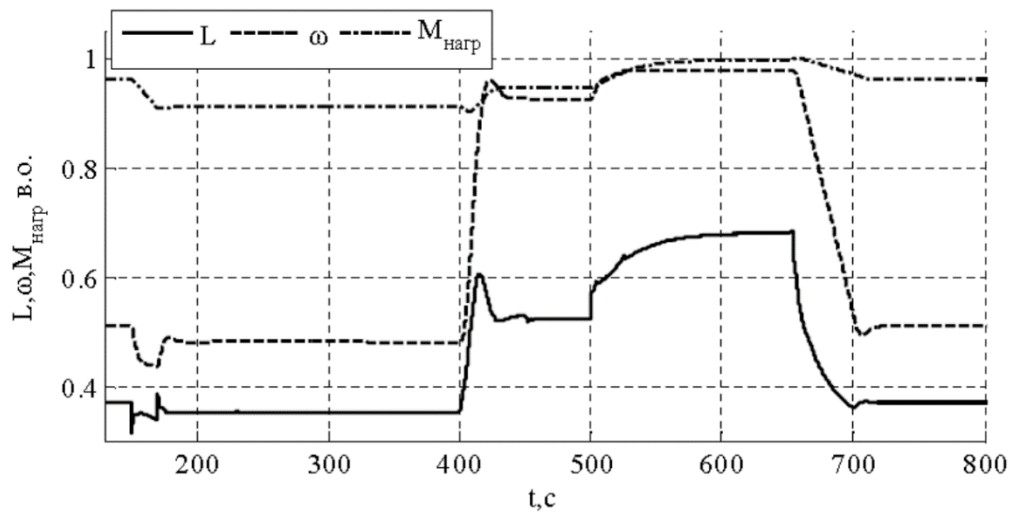


Рисунок 3.14 - Перехідні процеси зміни моменту навантаження, швидкості обертання парової турбіни та положення штока ППП

В інтервалі часу з 500с до 550с відбувається лінійне наростання сигналу завдання P^*_T з 95% до 100%. СК тиском реагує збільшенням витрати Q_T на 5%, швидкості ω до 100%, витрати Q_V до 122%, значення L до 68% і, як наслідок, момент навантаження $M_{нагр}$ зростає до 99%. Тиск P_{K1} і P_{K2} зростає на 1% (рис. 4.18), відповідні витрати Q_{K12} і Q_{K22} зростають на 2%.

На інтервалі 2' відключають остиглий повітрянагрівач, що призводить до збільшення опору та тиску на виході ГТУ P_T на 1% зниження витрати Q_{K12} до 0 і, як наслідок, падіння витрати Q_V до 61%. $СК$ тиском реагує зниженням витрати Q_T та швидкості w на 50%, при зміні значення L до 39%, та моменту навантаження $M_{нагр}$ до 96%.

У режимі стабілізації тиску дуття на виході ГТУ $СК$, після підключення нагрітого повітрянагрівача і в процесі роботи з двома повітрянагрівачами, компенсує падіння тиску P_T збільшуючи при цьому витрату дуття. Така поведінка $СК$ негативно впливає на характер зміни витрати гарячого дуття Q_V , що подається в піч, який відповідно до технологічного процесу повинен змінюватись незначно. Таким чином, регулятор стабілізації тиску на виході ГТУ позитивно впливає на роботу системи у режимі транспортування холодного дуття та негативно у режимі паралельної роботи повітрянагрівачів. Тому при переході в режим перемикавання повітрянагрівачів слід виводити з роботи регулятор тиску, задіявши ключ K , та передавати управління регулятору витрати повітря на виході ГТУ.

3.6 Управління витратою дуття на виході повітрянагрівачів

Наведені вище графіки перехідних процесів свідчать, що у моменти часу, коли відбувається заповнення повітрянагрівачів, спостерігається просадка витрати Q_V . Її можна зменшити, якщо збільшити час відкриття вентиля 3 і одночасно збільшити витрату на виході ГТУ до початку перемикавання повітрянагрівачів. Цього можна досягти коригування часу подачі сигналу завдання на регулятор витрати перед початком підключення повітрянагрівача.

Проведемо експеримент та досліджуємо запропонований спосіб. Для цього промодельуємо дані технологічні процеси в системі з регулятором витрати дуття. Забезпечити процес форсування витрати дуття на виході ГТУ у момент початку перемикавання повітрянагрівачів можна шляхом коригування сигналу завдання

витрати Q^*_T . З урахуванням постійних часу та змінних коефіцієнтів посилення турбіни, повітродувки та ГТУ для розглянутого споживача дуття та топології ГТУ форсування збільшення витрати можна забезпечити шляхом поділу сигналів початку перемикавання повітрянагрівачів. Для цього необхідно ввести в канал управління вентиля 1 тимчасову затримку, величина якої визначається тимчасовим інтервалом, необхідним збільшення витрати дуття на виході з ГТУ. Вплив тимчасової затримки на технологічний процес може бути знижений шляхом коригування сигналу початку перемикавання повітрянагрівачів.

Досліджуємо такий спосіб зниження просідання витрати дуття в кільцевому повітропроводі при підключенні нагрітого повітрянагрівача. Для цього здійснимо моделювання процесу, використовуючи структурну схему, наведену на рис.3.15.

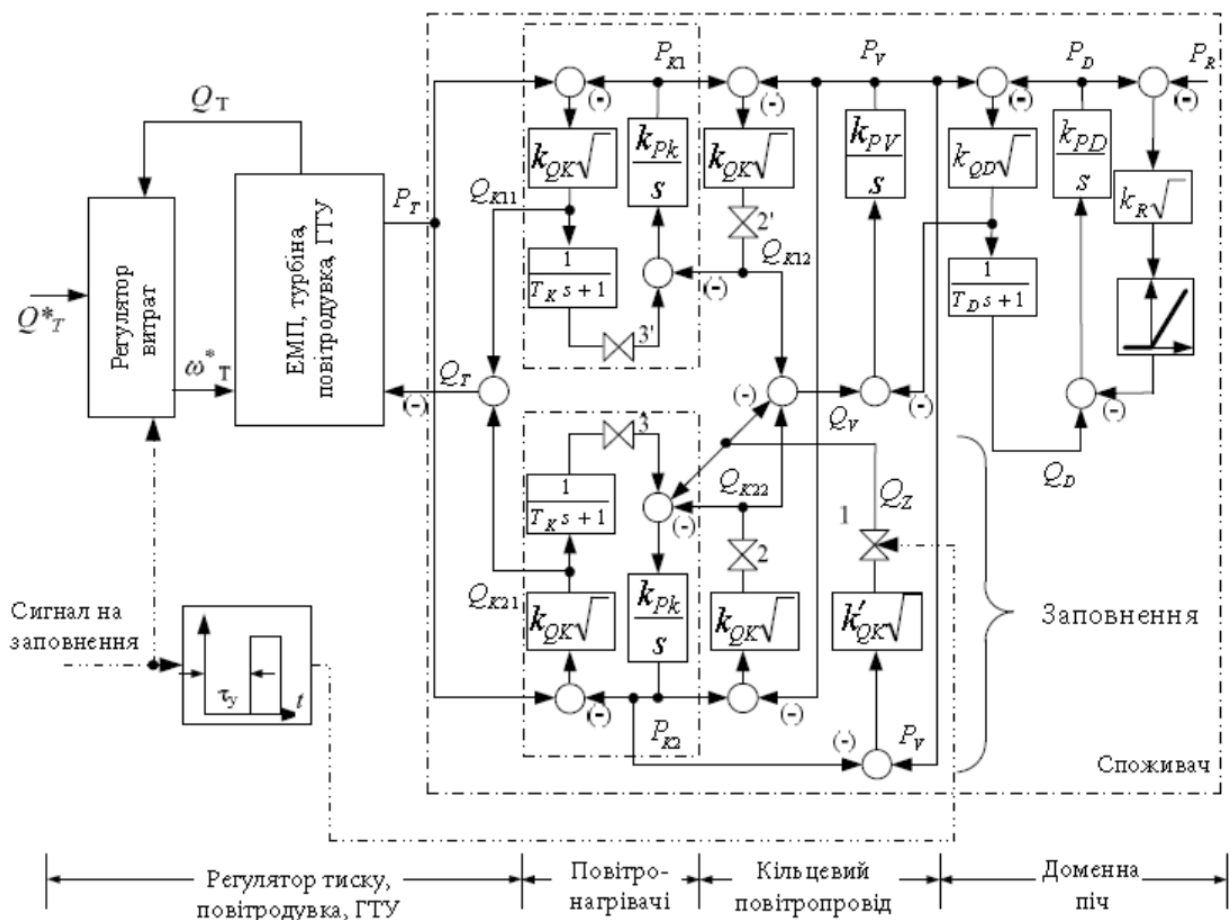


Рисунок 3.15 - Структурна схема контуру регулювання витрати та споживача для випадку форсування зміни витрати на виході ГТУ

Алгоритм комутації вентилів та початкові умови використовуються такі ж, як для випадку моделювання роботи регулятора тиску вихід ГТУ.

Сигнал на заповнення ініціює в регуляторі витрати тимчасове збільшення витрати до 105% від встановленого завдання Q_T^* та поступове його лінійне зниження протягом інтервалу часу, відведеного на заповнення нагрітого повітрянагрівача до рівня $100\% \cdot Q_T$.

Результати моделювання наведено на рис. 3.16-3.19.

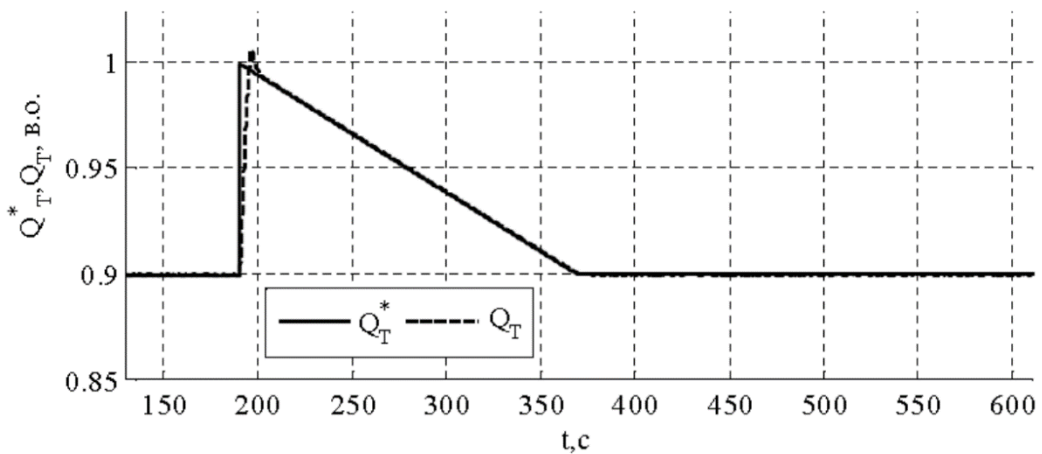


Рисунок 3.16 - Перехідні процеси зміни витрат на виході ГТУ

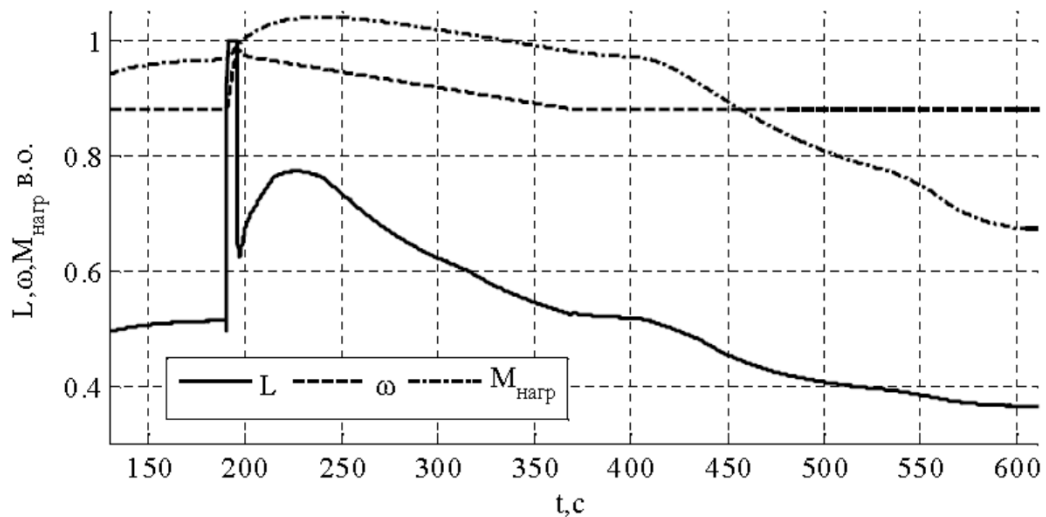


Рисунок 3.17 - Перехідні процеси в паровій турбіні та ЕМП

Дотримуючись алгоритму комутації вентилів та функціональної схеми після завершення процесу заповнення повітрянагрівача теплим дуттям через

вентиль 1 тиску в повітрянагрівачі P_{K2} і в кільцевому повітропроводі P_V зрівнюються. Під час відкриття вентиля 3 в результаті різниці тисків P_T і P_{K2} виникає витрата дуття, який збільшує загальну витрату Q_V в кільцевому повітропроводі, що негативно впливає на технологічний процес. Щоб уникнути різкого підвищення витрати Q_V вирівнюють тиск P_T і P_{K2} шляхом поступового відкриття вентиля 3. Тому збільшимо час відкриття вентиля 3 з 50 до 200 с.

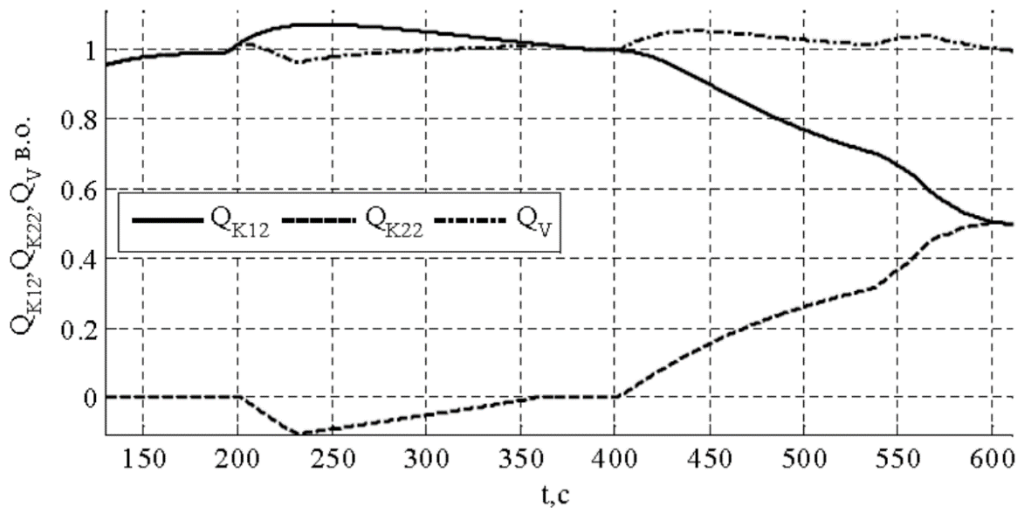


Рисунок 3.18 - Перехідні процеси зміни витрат Q_{K12} , Q_{K22} та V

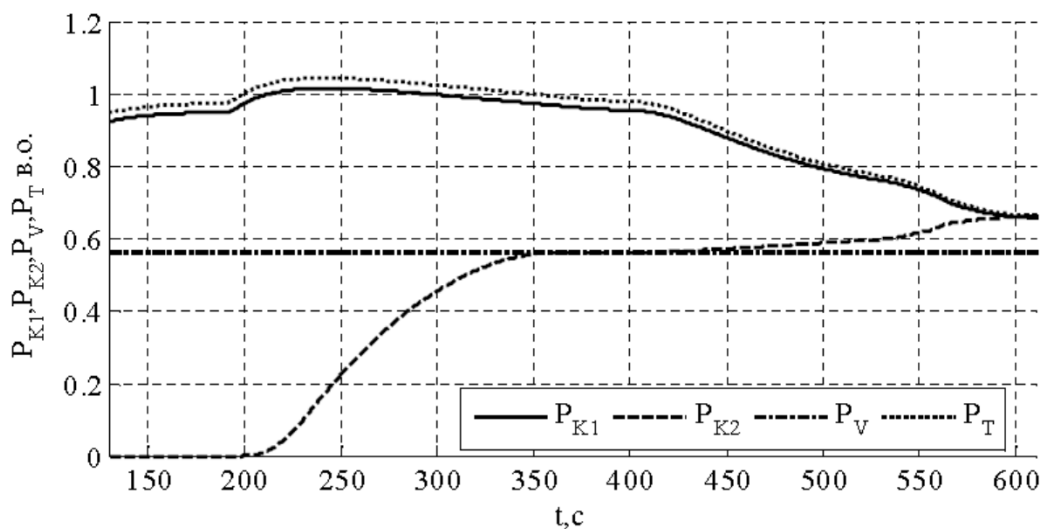


Рисунок 3.19 - Перехідні процеси зміни тиску P_{K1} , P_{K2} , P_T та V

На рисунку 3.16 зображено графік завдання для СК витратою Q^*_T та перехідні процеси витрати на виході ГТУ Q_T . На момент часу 190с сигнал Q^*_T різко збільшується на 10%, досягаючи номінального значення і лінійно спадає до 90% протягом 195 с. СК витратою реагує на завдання, що змінилося, різким стрибком положення L ЕМП ППП до 100%, що призводить до форсованого збільшення швидкості обертання турбіни ω до 98%, а момент навантаження на валу турбіни M_H при цьому зростає до 110% (рис.3.17). Як результат витрати в повітронагрівачі Q_{K12} та кільцевому повітропроводі Q_V збільшуються на 3% (рис.3.18). Тиск дуття на виході P_T ГТУ і в кільцевому повітропроводі P_V , а також у повітронагрівачах змінилися не більше ніж 1%.

З моменту часу 200с протягом 180 с на ОК діє обурення, яке створюється процесом заповнення нагрітого повітронагрівача з боку остиглого. Цю дію реагують витрата Q_V , зменшуючись на 6%, і витрата Q_{K22} , збільшуючись на 10% (рис.3.18). Витрата повітря Q_V визначається сумою витрат Q_{K12} і Q_{K22} .

Витрата Q_{K22} викликає збільшення тиску P_{K2} до P_V (рис. 3.19). У цьому СК витратою досі відпрацьовує збільшене завдання Q^*_T . Тиск на виході ГТУ P_T і в кільцевому повітропроводі P_V збільшуються не більше ніж на 10% і еквівалентно змінюються на всьому інтервалі дії обурення. У проміжку часу з 385 до 400 с відбувається підключення нагрітого повітронагрівача до ГТУ. Це ніяк не позначається на перехідних графіках процесів, оскільки тиск P_{K2} і P_V рівні.

Після завершення заповнення та підключення повітронагрівача в момент часу 400 з ОК піддається наступному обуренню, яке створюється відкриття вентилів на вході нагрітого повітронагрівача. В результаті цього витрата Q_V збільшується на 10%, витрата Q_{K22} зростає, а витрата Q_{K21} знижується доти, доки не зрівняються між собою.

Після 700с «холодний» повітронагрівач відключають від ГТУ. Провівши аналіз перехідних процесів, можна зробити такі висновки:

— регулятор витрати дуття досить точно відпрацьовує скоригований задає вплив;

- характер перехідних процесів зміни витрат Q_T та Q_V при відкритті вентилів 3 задовольняють вимогам технологічного процесу;
- момент навантаження парової турбіни не виходить за допустимі обмеження;
- витрата в кільцевому повітропроводі в момент початку заповнення нагрітого повітронагрівача збільшується не більше ніж на 1,5%, а надалі відбувається «просідання» не більше, ніж на 3%.

Висновки до розділу

1. Розроблена математична модель технологічного процесу може бути використана для подальшого дослідження способів управління виробленням дуття, перевірки запропонованих технологічних рішень щодо управління подачею дуття.
2. Використання релейних законів управління, синтезованих у результаті розв'язання задачі аналітичного конструювання регуляторів, дозволило отримати достатній запас стійкості замкнутої системи управління об'єктом із змінним коефіцієнтом посилення.
3. Введення попереджувального сигналу завдання швидкість турбіни з часом попередження, рівним постійної часу запізнення ГТУ щодо моменту відкриття вентилів, дозволяє усунути вплив транспортного запізнення на процес стабілізації витрати дуття при підключенні нагрітого повітронагрівача.
4. Регулювання швидкості обертання парової турбіни дає можливість побудови комбінованих та інтегрованих систем керування витратою та тиском дуття.
5. Запропонована система може бути технічно реалізована та впроваджена у виробництво. Її застосування дозволить мінімізувати вплив людського фактора на систему за рахунок інтегрування запропонованої АСУ в АСУ ТП верхнього рівня, повна відмова від повітряно-розвантажувального клапана.

ВИСНОВКИ

1. У математичному описі ГТМ присутні два види нелінійностей: ланка запізнювання та операція взяття кореня.
2. Застосовано модифікований принцип симетрії до об'єкта керування і отримано замкнену систему автоматичного регулювання витрати повітря на виході з газотранспортної мережі.
3. Структурна схема регулятора тиску складається з симетричної частини — СЧ та блоків інтегрування з коефіцієнтом підсилення і обмеженням на керуючий сигнал регулятора витрати повітря.
4. Розроблена математична модель технологічного процесу може бути використана для подальшого дослідження способів управління виробленням дуття, перевірки запропонованих технологічних рішень щодо управління подачею дуття.
5. Використання релейних законів управління, синтезованих у результаті розв'язання задачі аналітичного конструювання регуляторів, дозволило отримати достатній запас стійкості замкнутої системи управління об'єктом із змінним коефіцієнтом посилення.
6. Введення попереджувального сигналу завдання швидкості турбіни з часом попередження, рівним постійної часу запізнення ГТУ щодо моменту відкриття вентилів, дозволяє усунути вплив транспортного запізнення на процес стабілізації витрати дуття при підключенні нагрітого повітрянагрівача.
7. Регулювання швидкості обертання парової турбіни дає можливість побудови комбінованих та інтегрованих систем керування витратою та тиском дуття.
8. Запропонована система може бути технічно реалізована та впроваджена у виробництво. Її застосування дозволить мінімізувати вплив людського фактора на систему за рахунок інтегрування запропонованої АСУ в АСУ ТП верхнього рівня, повна відмова від повітряно-розвантажувального клапана.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Черв'яков В.Д., Крупник О.О. Об'єктний аналіз технологічно системи нагнітання в доменному виробництві. *Східно-європейський журнал передових технологій*. 2007. № 4/1 (28). С.59–64.
2. Identification of model parameters of steam turbine and governor / M. Azubalis, V. Azubalis, A. Jonaitis, R. Ponelis // *Oil Shale*. 2009. Vol. 26, Issue 3S. pp. 254-268. ISSN 1736-7492.
3. Mircea Dulau Mathematical modelling and simulation of the behaviour of the steam turbine / Mircea Dulau, Dorin Bica. // *The 7 th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, Procedia Technology* 2014. №12. pp. 723–729
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313007408>
4. Paulina Sobanska Neural modeling of steam turbines. // *Proceedings of the International Multiconference on Computer Science and Information Technology*. 2006. pp. 197–205. ISSN 1896- 7094.
5. Steam Turbine - SysCAD Documentation. URL: http://help.syscad.net/index.php/Steam_Turbine
6. Ali Chaibakhsh, Ali Ghaffari Steam turbine model. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2008. №16 pp. 1145–1162.
7. TECHNICAL REPORT PES-TR1 Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies. – © IEEE 2013 The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc. – IEEE Power & Energy Society, 2013.
8. A new non-linear model of steam turbine unit for dynamic analysis of power system / Pan Jiang, Lin Gao ; Yiping Dai // *Power System Technology (POWERCON)*, 2010 International Conference on. 2010. pp. 1-6. ISBN: 978-1-4244-5938-4.
9. Jan Lunze Simulation and Robust Control of Power Plants. Institute of Automation and Computer Control. URL: http://www.atp.ruhr-uni-bochum.de/research/upload/finished/Projekt_Dastych1.pdf
10. H. Nademi, F. Tahami Robust Controller Design for Governing Steam

Turbine Power Generators. Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. International Conference on. 2009. ISBN: 978-4-88686-067-5

11. Kyri Baker, Tian Seng Leong Model Predictive Control of a Steam Turbine.18-879M Special Topics in Systems and Controls. URL: http://www.andrew.cmu.edu/user/kabaker/MPC_report.pdf

12. Modelling of Primary Frequency Control and Effect Analyses of Governing System Parameters on the Grid Frequency/ Zhixin Sun // Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University. 2013. URL: <http://www.geos.ed.ac.uk/ccs/Meetings/Zhixin.pdf>

13. Dynamic Models Package „Standard-1“. GMB Dynamic Models for PSS® Software Product Suite. 2010. 62 p. URL: <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-centroamericana-jose-simeon-canlas/sistemas/dynamic-models-package-gmb-software-product-suite-rev-13/138904894>

14. Автоматизовані електромеханічні системи з модальними регуляторами та спостерігачами стану / Л.В.Акімов, А.Верма, О.Ю.Глебов та ін. *Збірник наукових статей*. Харків : ХГПУ, 2007. 90 с.

15. S.Prajna, A Papachristodoulou Analysis of switched and hybrid systems—beyond piecewise quadratic methods, Proceedings of ACC 2003,pp 1-6.

16. Volterra V. Theory of Functionals and Integral and Integro-Differential Equations. Dover Publications. New York, 2009.

17. Chen C.F., Chiu R.F. New theorems of association of variables in multiple di- mensional Laplace Transform. INT. J.SYSTEM CSI., 2003, vol. 4, no. 4, p. 647664.

18. F.Blanchini, A.Megretski Robust State Feedback Control of LTV Systems. Nonlinear Is Better Than Linear. URL: http://www.mit.edu/people/ameg/bl_fin.pdf

19. Гайдук А.Р. Поліноміальний синтез нелінійних систем керування Автоматика та телемеханіка. 2003. № 10. С. 144-148

20. Капалін В.І., Данг Ван Уї Синтез нелінійних систем управління з використанням мінімаксних апроксимацій нелінійностей та методу кореневого годографа. Проблеми інформатики та моделювання: матеріал Міжнар. наук.-

техн. конф. Харків, 2001. 16 с. ISBN 966-601-016-6.

21. Волянський Р.С., Садовий О.В. Підвищення порядку астатизму релейних систем оптимального керування нелінійними об'єктами. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ*. Кременчук : КДПУ, 2002. Вип.1(12), С.82–84

22. Садовий О.В., Сухінін Б.В., Сохіна Ю.В. Релейні системи оптимального керування електроприводами. Дніпродзержинськ : ДГТУ. 2011. 377с. ISBN 978-966-175- 050-9

23. Centrifugal compressor surge, modeling and identification for control / by Jan van Helvoirt. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven Proefschrift , 2007. 218 p. ISBN 978-90-386-1095-5.

24. Тищенко Н.Т., Садовий О.В. Формування траєкторії гальмування електроприводу відцентрового компресора. Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика» / Дніпродзержинськ : ДГТУ, 2007. С.280-282.

25. Process dynamics and control: modeling for control and prediction / Brian Roffel, Ben Betlem. : John Wiley & Sons,Ltd, 2006. 562 с.

26. Modeling and control of surge and rotating stall in compressors / Jan Tommy Gravdahl. Departament of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology: Trondheim, Norway, 1998. 152 p.

27. Крупник О.О., Садовий О.В., Тищенко Н.Т. Закономірності зміни параметрів дуття у технологічному процесі доменного виробництва. Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки) Дніпродзержинськ : ДГТУ, 2011. С.92-97.

28. Садовий О.В., Крупник О.О. Електромеханічна система регулювання швидкості парової турбіни МОНМС України Одеський національний політехнічний університет Науково-технічний журнал “Електротехнічні та комп'ютерні системи”, Київ “Техніка”,2011. С.198-199.

29. Process Modelling Identification, and Control-/ Ján Mikleš, Miroslav Fikar

. Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. 497 p. ISBN 978-3-540-71969-4.

30. Маринич І.А., Тронь В.В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2022. 50 с.

31. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

32. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

33. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація).

34. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація).