

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Розроблення ПІ-регуляторів для забезпечення заданих властивостей
частотних характеристик рівня живильної води в корпусі
парогенератора ПГВ-1000а
(тема)

Виконав:
здобувач 2 року навчання,
групи КІТПВм-24-1
Кірілл ТВЕРДОХЛІБ
(власне ім'я прізвище)

Спеціальність 174 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерно-
інтегровані технологічні процеси і
виробництва
(повна назва освітньої програми)

Керівник професор Юрій РОМАШОВ
(посада, власне ім'я прізвище)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ
(власне ім'я прізвище)

2025 р.

Я, Твердохліб Кірілл Борисович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію та підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«20» грудня 2025р.

Кірілл ТВЕРДОХЛІБ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)

«___» _____ 2025р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ *Твердохлібу Кіріллу Борисовичу*
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Розроблення ПІ-регуляторів для забезпечення заданих властивостей частотних характеристик рівня живильної води в корпусі парогенератора ПГВ-1000а*

затверджена наказом по університету від "10" листопада 2025р. № 1029 Ст.

2. Термін подання студентом роботи "24" грудня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи 3.1 Парогенератор ПГВ-1000а;

3.2 Регульована величина – рівень живильної води в корпусі парогенератора;

3.3 Регулятор загального призначення ПІ;

3.4 Лінеаризована модель каналу регулювання рівня живильної води;

3.5 Графічне середовище для моделювання – MATLAB/Simulink.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Вступ;

4.2 Аналіз процесу регулювання рівня живильної води в корпусі парогенератора ПГВ-1000а;

4.3 Теоретичні основи синтезу ПІ-регуляторів за частотними характеристиками;

4.4 Імітаційне моделювання системи автоматичного регулювання рівня живильної води;

4.5 Забезпечення безпечних умов праці;

4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 22 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз процесу регулювання рівня живильної води в корпусі парогенератора ПГВ-1000а</i>	01.09 – 15.09.25	<i>виконано</i>
2	<i>Теоретичні основи синтезу ПІ-регуляторів за частотними характеристиками</i>	16.09 – 30.09.25	<i>виконано</i>
3	<i>Імітаційне моделювання системи автоматичного регулювання рівня живильної води</i>	01.11 – 21.11.25	<i>виконано</i>
4	<i>Забезпечення безпечних умов праці</i>	22.11 – 07.12.25	<i>виконано</i>
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	08.12 – 13.12.25	<i>виконано</i>
6	<i>Подання роботи на перевірку Інтернет-системою StrikePlagiarism</i>	14.12 – 16.12.25	<i>виконано</i>
7	<i>Подання роботи на рецензію</i>	17.12 – 19.12.25	<i>виконано</i>
8	<i>Подання роботи на підпис зав. кафедри</i>	20.12 – 23.12.25	<i>виконано</i>
9	<i>Подання кваліфікаційної роботи в ЕК</i>	24.12.25	<i>виконано</i>

Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Кірілл ТВЕРДОХЛІБ

Керівник роботи _____
(підпис)

професор Юрій РОМАШОВ
(посада, власне ім'я прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 80 с., 4 табл., 19 рис., 2 дод., 23 джерел.

ПАРОГЕНЕРАТОР, РІВЕНЬ ЖИВИЛЬНОЇ ВОДИ, ПІ-РЕГУЛЯТОР,
СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ, ЧАСТОТНІ
ХАРАКТЕРИСТИКИ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, СИНТЕЗ, МЕТОД.

Мета роботи – підвищення якості та надійності автоматичного регулювання рівня живильної води в корпусі парогенератора ПГВ-1000а шляхом розроблення ПІ-регулятора з використанням частотних методів синтезу.

Об'єкт дослідження – процес автоматичного регулювання рівня живильної води в корпусі парогенератора ПГВ-1000а.

Предмет дослідження – методи та засоби синтезу ПІ-регуляторів систем автоматичного регулювання рівнем живильної води парогенератора ПГВ-1000а з урахуванням вимог до частотних характеристик замкненої системи.

Кваліфікаційна робота присвячена розробленню системи автоматичного регулювання рівня живильної води в корпусі парогенератора ПГВ-1000а з використанням ПІ-регулятора, налаштованого за частотними характеристиками. У роботі проаналізовано парогенератор як об'єкт керування, побудовано лінеаризовану математичну модель та сформульовано вимоги до системи автоматичного регулювання. На основі частотних методів синтезу забезпечено формування заданих АЧХ та ФЧХ замкненої системи. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні та модернізації систем автоматичного керування енергетичного обладнання.

Отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», зокрема до пункту 9.4 «Розвиток високотехнологічного машинобудування».

ABSTRACT

Explanatory note: 80 pp., 4 tab., 19 fig., 2 appendices, 23 sources.

STEAM GENERATOR, FEED WATER LEVEL, PI CONTROLLER, AUTOMATIC CONTROL SYSTEM, FREQUENCY CHARACTERISTICS, MATHEMATICAL MODEL, SYNTHESIS, METHOD.

The purpose of the work is to improve the quality and reliability of automatic control of the feed water level in the PGV-1000a steam generator body by developing a PI controller using frequency synthesis methods.

The object of the study is the process of automatic regulation of the feed water level in the PGV-1000a steam generator body.

The subject of the study is the methods and means of synthesis of PI controllers for automatic control systems of the feed water level of the PGV-1000a steam generator, taking into account the requirements for the frequency characteristics of a closed system.

The thesis is devoted to the development of a system for automatic regulation of the feed water level in the PGV-1000a steam generator body using a PI controller tuned to frequency characteristics. The work analyzes the steam generator as a control object, constructs a linearized mathematical model, and formulates requirements for the automatic control system. Based on frequency synthesis methods, the formation of the specified frequency response and phase response of the closed system is ensured. The results obtained can be used in the design and modernization of automatic control systems for power equipment.

The results of the work can be attributed to Sustainable Development Goal 9 “Industry, Innovation and Infrastructure,” in particular to paragraph 9.4 “Development of high-tech engineering”.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	9
Вступ	6
1 Аналіз процесу регулювання рівня живильної води в корпусі парогенератора ПГВ-1000а	13
1.1 Загальна характеристика парогенератора ПГВ-1000а як об'єкта автоматичного керування	13
1.2 Технологічний процес формування рівня живильної води	16
1.3 Аналіз каналу регулювання рівня живильної води	19
1.4 Динамічні властивості каналу регулювання рівня живильної води	21
1.5 Математичне моделювання каналу регулювання рівня живильної води	23
1.6 Лінеаризована модель каналу регулювання рівня живильної води	26
1.7 Постановка задачі автоматичного регулювання рівня живильної води ..	29
1.8 Висновки до першого розділу	31
2 Теоретичні основи синтезу ПІ-регуляторів за частотними характеристиками	34
2.1 Структура ПІ-регулятора та особливості його застосування	34
2.2 Частотні характеристики об'єкта керування рівнем живильної води	36
2.3 Вплив ПІ-регулятора на частотні характеристики системи автоматичного регулювання	39
2.4 Формування заданих частотних характеристик замкненої системи автоматичного регулювання	43
2.5 Аналіз стійкості системи автоматичного регулювання	46
2.6 Формування заданих частотних характеристик замкненої системи	44
2.7 Висновки до другого розділу	52

3 Імітаційне моделювання системи автоматичного регулювання рівня живильної води	54
3.1 Мета та загальна постановка імітаційного моделювання	54
3.2 Побудова структурної Simulink-моделі об'єкта керування	57
3.3 Реалізація ПІ-регулятора в Simulink та налаштування параметрів	60
3.4 Експериментальні дослідження імітаційного моделювання	64
3.5 Аналіз результатів імітаційного моделювання та оцінювання показників якості	67
3.6 Висновки до третього розділу	70
4 Забезпечення безпечних умов праці	71
4.1 Аналіз умов праці в лабораторії	71
4.2 Промислова безпека в лабораторії	71
4.3 Виробнича санітарія і гігієна праці	72
4.4 Пожежна безпека лабораторії	74
Висновки	76
Перелік джерел посилання	78
Додаток А Публікація за темою досліджень	81

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЕС – атомна електрична станція;

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

ВВЕР – водо-водяний енергетичний реактор;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

ЛАЧХ – логарифмічна амплітудно-частотна характеристика;

ЛФЧХ – логарифмічна фазо-частотна характеристика;

ЛЧХ – логарифмічна частотна характеристика;

П – пропорційний;

ПІ – пропорційно-інтегральний;

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференційний;

ПГВ – парогенератор водо-водяного енергетичного реактора;

ПК – персональний комп'ютер;

РЖВ – рівень живильної води;

САР – система автоматичного регулювання;

ФЧХ – фазо-частотна характеристика.

ВСТУП

Сучасні енергетичні системи, зокрема АЕС, характеризуються підвищеними вимогами до надійності, безпеки та ефективності функціонування технологічного обладнання. Одним із ключових елементів енергоблоків з реакторами типу ВВЕР-1000 є парогенератор, який забезпечує передавання теплової енергії від першого до другого контуру та формування пари необхідних параметрів для роботи турбінного обладнання. Стабільність і безпечність роботи парогенератора значною мірою залежать від якості автоматичного регулювання його основних технологічних параметрів.

Особливе місце серед таких параметрів займає рівень живильної води в корпусі парогенератора. Порушення заданого рівня може призводити до погіршення умов теплообміну, винесення вологи разом із парою, оголення теплообмінних труб, а в граничних випадках – до виникнення аварійних ситуацій. Тому задача автоматичного регулювання рівня живильної води є однією з найвідповідальніших у системі керування енергоблоком атомної електростанції.

Процес регулювання рівня живильної води в парогенераторі ПГВ-1000а характеризується складною динамікою, значною інерційністю, наявністю транспортних і теплових запізень, а також суттєвим впливом збурень, основним з яких є зміна витрати пари. Додаткові труднощі створюють нелінійні теплогідролічні ефекти, зокрема ефекти набухання та усадки рівня, що зумовлюють неоднозначну реакцію рівня на керуючі впливи у перехідних режимах.

У практиці автоматизації енергетичних установок широкого застосування набули ПІ-регулятори, які поєднують у собі відносну простоту реалізації, надійність та здатність забезпечувати нульову статичну похибку регулювання. Разом з тим, ефективність роботи ПІ-регулятора значною мірою залежить від правильності вибору його параметрів, особливо в умовах інерційних об'єктів із

запізненням. Некоректне налаштування регулятора може призводити до коливального характеру перехідних процесів, зниження запасів стійкості та погіршення якості регулювання.

Одним із найбільш ефективних підходів до налаштування регуляторів для таких об'єктів є використання частотних методів синтезу. Частотний підхід дозволяє цілеспрямовано формувати бажані АЧХ та ФЧХ замкненої системи, забезпечувати задані запаси стійкості та підвищувати робастність системи автоматичного керування до змін параметрів об'єкта і дії збурень.

У зв'язку з цим актуальною є задача підвищення якості та надійності автоматичного регулювання рівня живильної води в корпусі парогенератора ПГВ-1000а, розв'язання цієї задачі дозволяє забезпечити стабільну роботу парогенератора в широкому діапазоні режимів експлуатації та сприяє підвищенню загального рівня безпеки енергоблоку.

Мета роботи – підвищення якості та надійності автоматичного регулювання рівня живильної води в корпусі парогенератора ПГВ-1000а шляхом розроблення ПІ-регулятора з використанням частотних методів синтезу.

Об'єкт дослідження – процес автоматичного регулювання рівня живильної води в корпусі парогенератора ПГВ-1000а.

Предмет дослідження – методи та засоби синтезу ПІ-регуляторів систем автоматичного керування рівнем живильної води парогенератора ПГВ-1000а з урахуванням вимог до частотних характеристик замкненої системи.

Наукова новизна роботи полягає у запропонованому підході синтезу ПІ-регулятора рівня живильної води парогенератора ПГВ-1000А на основі формування заданих частотних характеристик замкненої системи, що забезпечує підвищення стійкості та робастності автоматичного регулювання. Удосконалено лінеаризовану модель каналу рівня з урахуванням інерційності та запізнєння, що дозволяє коректно застосовувати частотні методи аналізу й синтезу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз парогенератора як об'єкта керування;
- побудувати лінеаризовану математичну модель каналу регулювання рівня;
- сформулювати вимоги до системи автоматичного керування;
- виконати синтез ПІ-регулятора за частотними характеристиками з подальшою оцінкою якості регулювання;
- розробити заходи і розрахунки для забезпечення безпечних умов праці.

Робота виконується згідно з [1-3], як складова наукових досліджень, які проводяться на кафедрі КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки, результати досліджень опубліковані у [4].

1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ЖИВИЛЬНОЇ ВОДИ В КОРПУСІ ПАРОГЕНЕРАТОРА ПГВ-1000а

Як свідчать офіційні данні, на сучасних діючих АЕС експлуатується 6 типів реакторних установок. Переважна більшість (68 % загальносвітової кількості ядерних реакторів усіх типів) АЕС оснащена ядерними реакторами на теплових нейтронах з водою під тиском в якості теплоносія, що передбачає безпосередню генерацію пари окремо від ядерного реактору – в парогенераторах [5]. Така схема передбачає наявність першого контуру циркуляції радіоактивного теплоносія та другого контуру циркуляції нерадіоактивної живильної води та робочого тіла – пари, що утворюється із цієї живильної води за рахунок теплоти теплоносія першого контуру та потім внаслідок конденсації через втрату теплоти при здійсненні корисної роботи в турбіні знову перетворюється на живильну воду. Таким устаткуванням, що спроектоване саме за такою двоконтурною схемою, оснащені усі 4 діючих АЕС України та у подальшому передбачається введення в експлуатацію саме такого устаткування. З урахуванням зазначених обставин далі розглядатимемо виключно устаткування АЕС, що спроектовано саме за такою двоконтурною схемою.

1.1 Загальна характеристика парогенератора ПГВ-1000а як об'єкта автоматичного керування

Парогенератор ПГВ-1000А (рис 1.1) є одним з основних технологічних елементів енергоблоків атомних електростанцій з реакторною установкою типу ВВЕР-1000 і виконує функцію передавання теплової енергії від теплоносія першого контуру до води другого контуру з утворенням насиченої пари, що подається на турбіну. Надійність та безпека експлуатації парогенератора істотно впливають на загальну ефективність роботи енергоблоку, а також на

дотримання вимог ядерної та радіаційної безпеки.

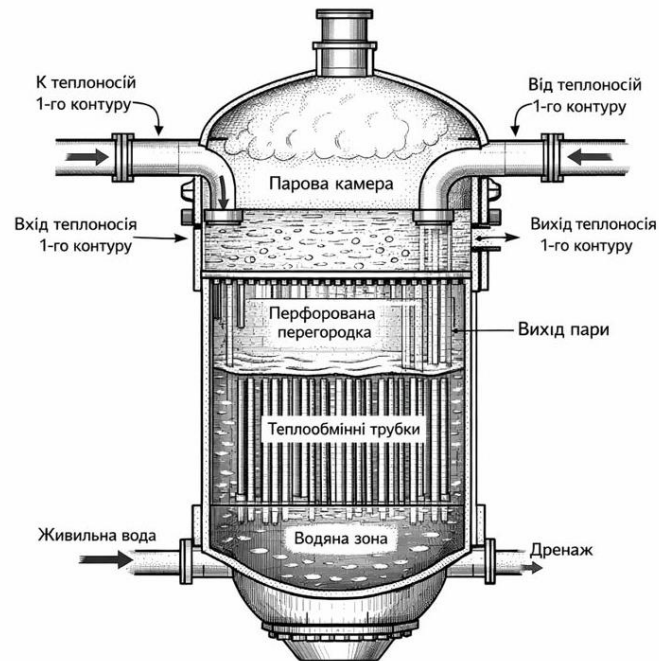


Рисунок 1.1 – Конструктивна схема парогенератора ПГВ-1000А

З точки зору теорії автоматичного керування парогенератор ПГВ-1000А належить до класу складних інерційних об'єктів з розподіленими параметрами, що функціонують в умовах значних теплогідравлічних навантажень та впливу численних збурювальних факторів. Основними технологічними параметрами, що підлягають автоматичному регулюванню, є РЖВ, тиск пари, температура теплоносія та витрата пари. Серед зазначених параметрів рівень живильної води в корпусі парогенератора є одним із найбільш критичних.

Конструктивно парогенератор ПГВ-1000а являє собою вертикальний теплообмінний апарат з природною циркуляцією, що складається з корпусу, теплообмінного пучка труб, парової камери, водяної зони, перфорованих перегородок та системи сепарації пари. У верхній частині корпусу формується парова камера, де відбувається відокремлення пари від парової суміші, тоді як у нижній частині знаходиться водяна зона, в якій підтримується заданий рівень живильної води.

З позицій автоматичного керування РЖВ виконує роль інтегрального

показника балансу маси в корпусі парогенератора. Його підтримання в допустимих межах є необхідною умовою:

- забезпечення стабільного теплового режиму теплообмінних поверхонь;
- запобігання оголенню трубок теплообмінника;
- виключення переносу краплинної вологи разом із паром;
- дотримання нормальних умов роботи турбінного обладнання.

Відхилення РЖВ як у бік зниження, так і у бік підвищення можуть призводити до серйозних технологічних порушень. Зниження рівня небезпечно перегрівом теплообмінних труб, тоді як надмірне підвищення рівня спричиняє винесення вологи в паропровід та зниження якості пари. Саме тому до САР РЖВ висувуються підвищені вимоги щодо точності, швидкодії та стійкості.

Як об'єкт автоматичного керування парогенератор ПГВ-1000А характеризується рядом специфічних властивостей. По-перше, процес формування РЖВ є високоінерційним, що обумовлено значним об'ємом води в корпусі парогенератора. По-друге, в системі присутнє транспортне запізнення, пов'язане з часом проходження живильної води через гідравлічні тракти та теплообмінні зони. По-третє, динаміка рівня істотно залежить від режиму роботи енергоблоку та є нестационарною.

Особливою складністю для автоматичного керування є так званий ефект набухання та усадки рівня, який виникає при швидких змінах навантаження. При різкому зростанні витрати пари спостерігається миттєве підвищення рівня за рахунок зменшення щільності пароводяної суміші, тоді як при зниженні навантаження відбувається зворотний ефект. Ці явища ускладнюють безпосередній зв'язок між витратою живильної води та фактичним рівнем, що потребує застосування спеціальних методів регулювання.

З математичної точки зору канал регулювання РЖВ може бути віднесений до об'єктів з інтегрувальними властивостями, що означає накопичення відхилень при відсутності коригувального впливу. Саме ця властивість зумовлює неможливість забезпечення нульової статичної похибки при використанні лише пропорційних регуляторів та обґрунтовує доцільність

застосування регуляторів з інтегральною складовою.

Таким чином, парогенератор ПГВ-1000А як об'єкт автоматичного керування РЖВ є складною динамічною системою з інерційністю, запізненням, нелінійністю та значним впливом збурень. Це вимагає використання сучасних методів синтезу систем керування, зокрема частотних методів налаштування ПІ-регуляторів, що дозволяють забезпечити задані показники якості та стійкості регулювання в широкому діапазоні режимів роботи.

1.2 Технологічний процес формування рівня живильної води

Формування рівня живильної води в корпусі парогенератора ПГВ-1000А є результатом взаємодії складних теплогідравлічних процесів, що відбуваються в другому контурі енергоблоку атомної електростанції. Основою цього процесу є баланс маси між підведеною живильною водою, утвореною парою та водою, що знаходиться у внутрішньому об'ємі парогенератора (рис. 1.2).

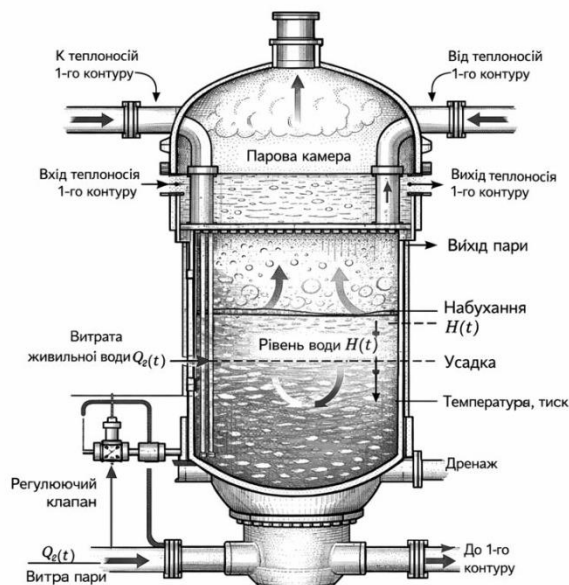


Рисунок 1.2 – Формування рівня живильної води в корпусі парогенератора

РЖВ в парогенераторі формується внаслідок складної взаємодії таких процесів:

- подача живильної води;
- випаровування води під дією тепла;
- відбір пари;
- конденсація та циркуляція.

У сталому режимі роботи РЖВ підтримується на заданому значенні завдяки рівності витрати живильної води та витрати пари з урахуванням внутрішніх перерозподілів фаз. При цьому будь-яке порушення цього балансу, зумовлене зміною навантаження енергоблоку або зовнішніми збуреннями, призводить до відхилення рівня та потребує коригувального впливу з боку САР.

Живильна вода надходить у парогенератор через систему трубопроводів та регулюючий клапан, який є основним виконавчим органом системи керування. Витрата живильної води визначається положенням клапана та перепадом тиску, а також залежить від гідравлічних характеристик тракту подачі. Після надходження у корпус парогенератора вода змішується з наявною водяною масою, нагрівається теплоносієм першого контуру та частково переходить у парову фазу.

Одночасно з подачею живильної води відбувається безперервний відбір пари з верхньої частини парогенератора. Витрата пари визначається навантаженням турбіни та є одним з основних збурювальних факторів для системи регулювання рівня. Зміна витрати пари безпосередньо впливає на тиск у паровій камері та інтенсивність випаровування, що, у свою чергу, змінює розподіл фаз усередині корпусу.

Важливою особливістю технологічного процесу є те, що рівень живильної води не є простою функцією різниці витрат води та пари. На формування рівня істотно впливають зміни фізичних властивостей пароводяної суміші, зокрема її густини та об'ємної концентрації пари. Це зумовлює наявність так званих ефектів набухання (swell) та усадки (shrink) рівня.

Ефект набухання рівня проявляється при різкому збільшенні витрати пари або зниженні тиску в паровій камері. У цьому випадку відбувається

інтенсивне утворення пари в об'ємі водяної зони, що призводить до зменшення середньої густини пароводяної суміші. Внаслідок цього об'єм суміші збільшується, а покази вимірювального рівня різко зростають, незважаючи на те, що реальна маса води в корпусі практично не змінюється. Така поведінка рівня є характерною для перехідних режимів і може вводити в оману САР.

Протилежним за характером є ефект усадки рівня, який виникає при зменшенні витрати пари або підвищенні тиску в парогенераторі. У цьому випадку інтенсивність випаровування знижується, парова фаза частково конденсується, густина пароводяної суміші зростає, а рівень води зменшується. Як і у випадку набухання, ці зміни відбуваються значно швидше, ніж реальні зміни маси води, що обумовлює складну динаміку об'єкта.

Наявність ефектів набухання та усадки призводить до того, що реакція рівня на керуючий вплив або збурення має неоднозначний та коливальний характер. На початковому етапі перехідного процесу рівень може змінюватися у напрямку, протилежному очікуваному, що ускладнює роботу регулятора та підвищує ризик перерегулювання.

З позицій автоматичного керування ефекти набухання та усадки призводять до:

- зменшення фазового запасу стійкості системи;
- підвищення чутливості до шумів вимірювання;
- ускладнення вибору параметрів регулятора;
- необхідності обмеження швидкості зміни керуючого сигналу.

Крім того, технологічний процес формування рівня характеризується значною інерційністю, що зумовлено великим об'ємом води в корпусі парогенератора. Навіть за відсутності ефектів набухання та усадки реальні зміни маси води відбуваються повільно, що призводить до великих сталих часу об'єкта. У поєднанні з транспортними запізненнями це формує складний об'єкт керування з інтегровальними властивостями.

Таким чином, технологічний процес формування РЖВ в парогенераторі ПГВ-1000а є багатофакторним та нелінійним. Наявність ефектів набухання та

усадки рівня істотно ускладнює задачу автоматичного регулювання та потребує застосування регуляторів, здатних забезпечувати нульову статичну похибку, достатні запаси стійкості та прийнятну швидкодію. Це створює передумови для використання ПІ-регуляторів, налаштованих за частотними характеристиками, що детально розглядається у наступних розділах роботи.

1.3 Аналіз каналу регулювання рівня живильної води

Канал регулювання рівня живильної води в парогенераторі ПГВ-1000А є сукупністю технічних та функціональних елементів, які забезпечують вимірювання, обробку та коригування відхилень рівня від заданого значення. З позицій систем автоматичного керування даний канал розглядається як замкнена система зі зворотним зв'язком, що функціонує в умовах значних збурень та параметричної невизначеності.

До складу каналу регулювання рівня входять:

- первинний вимірювальний перетворювач рівня;
- пристрій формування сигналу похибки;
- регулятор рівня;
- виконавчий механізм (регулюючий клапан живильної води);
- гідравлічний тракт подачі води;
- парогенератор як об'єкт керування.

Структурна схема каналу регулювання РЖВ наведена на рисунку 1.3.

Вимірювальний сигнал рівня порівнюється із заданим значенням, у результаті чого формується сигнал похибки $\varepsilon(t)$. Цей сигнал надходить на вхід регулятора, який формує керуючий вплив у вигляді команди на зміну витрати живильної води.

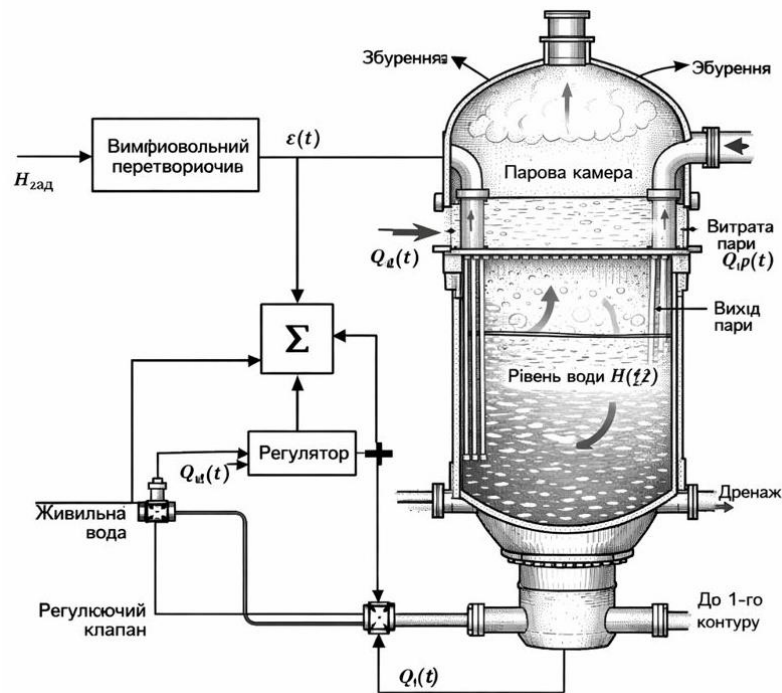


Рисунок 1.3 – Структурна схема каналу регулювання РЖВ ПГВ-1000А

Основним керуючим впливом є витрата живильної води $Q_v(t)$ основним збурювальним впливом – витрата пари $Q_p(t)$. Саме зміна витрати пари визначає більшу частину динамічних відхилень рівня, особливо при змінних навантаженнях енергоблоку.

Особливістю каналу регулювання є те, що збурення діють безпосередньо на об'єкт керування, мінаючи регулятор. Це істотно знижує ефективність компенсації збурень і потребує забезпечення достатнього запасу стійкості замкненої системи. Крім того, вимірювальний канал рівня схильний до шумів та похибок, пов'язаних із гідростатичними та температурними ефектами.

Таким чином, канал регулювання РЖВ ПГВ-1000а є складною багатофакторною системою, що вимагає застосування регуляторів із високими робастними властивостями та здатністю забезпечувати стабільну роботу при зміні параметрів об'єкта.

1.4 Динамічні властивості каналу регулювання рівня живильної води

Динамічні властивості каналу регулювання РЖВ в корпусі парогенератора ПГВ-1000а визначаються сукупністю теплогідравлічних процесів, конструктивних особливостей обладнання та характеристик вимірювально-керуючих пристроїв. Аналіз цих властивостей є необхідною умовою для коректного вибору структури та параметрів регулятора, а також для забезпечення стійкої роботи САР в широкому діапазоні режимів експлуатації.

Однією з основних динамічних ознак каналу регулювання рівня є значна інерційність. Вона зумовлена великим об'ємом води, що знаходиться в корпусі парогенератора, а також значною теплоємністю елементів теплообмінного пучка. Будь-яка зміна витрати живильної води призводить не до миттєвої, а до поступової зміни рівня, що характеризується великими сталими часу. У реальних умовах експлуатації час виходу рівня на нове усталене значення може становити десятки секунд або навіть декілька хвилин.

Крім інерційності, канал регулювання рівня характеризується наявністю транспортного та динамічного запізнення. Транспортне запізнення пов'язане з часом проходження живильної води від регулюючого клапана до водяної зони парогенератора, а також із затримкою, що виникає у вимірювальному каналі рівня. Динамічне запізнення обумовлене тепловими процесами та необхідністю перерозподілу фаз усередині пароводяної суміші. Сумарне запізнення призводить до зменшення фазового запасу стійкості замкненої системи та підвищує ризик коливального режиму.

Важливою особливістю динаміки рівня є інтегрувальний характер об'єкта керування. Зміна витрати живильної води викликає накопичення маси води в корпусі парогенератора, що призводить до монотонного зростання або зменшення рівня за відсутності компенсуючого впливу. Така властивість означає, що об'єкт не має власної стабілізуючої здатності щодо рівня, і без відповідного регулятора рівень не може бути стабілізований у заданій точці.

Додатковим ускладнюючим фактором є коливальний характер перехідних процесів, який виникає внаслідок одночасної дії інерційності, запізнення та ефектів набухання і усадки рівня. Як показано на рисунку 1.4, реакція рівня на зміну витрати живильної води має складну форму: після початкового запізнення спостерігається різка зміна рівня з можливим перерегулюванням та затухаючими коливаннями. Така поведінка є типовою для об'єктів з малим фазовим запасом та підвищеною чутливістю до збурень.

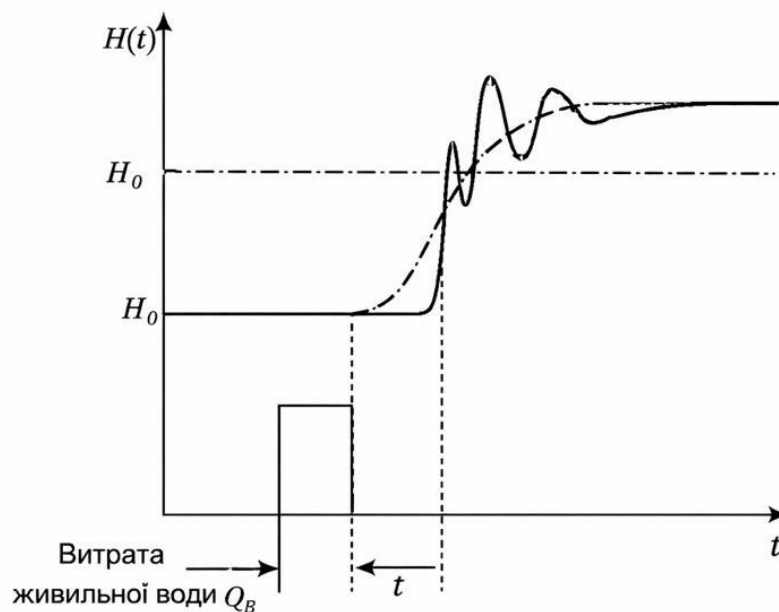


Рисунок 1.4 – Типова реакція рівня на зміну витрати живильної води

Особливо небезпечним з точки зору стійкості є початковий етап перехідного процесу, коли швидкі зміни фазового стану пароводяної суміші призводять до псевдомиттєвих змін рівня. У цей момент регулятор може сформувати надмірний керуючий вплив, що згодом призведе до значного перерегулювання. Саме тому до динамічних властивостей регулятора висуваються вимоги щодо обмеження швидкості зміни керуючого сигналу та забезпечення достатнього запасу фазової стійкості.

З позицій частотного аналізу динамічні властивості каналу регулювання РЖВ можуть бути охарактеризовані наявністю:

- інтегрувальної ланки;
- інерційної ланки першого порядку;
- чистого запізнення.

Таке поєднання динамічних ланок формує спадну АЧХ з крутим нахилом у області низьких частот та значним фазовим зсувом у робочому діапазоні частот. Це істотно ускладнює забезпечення необхідних запасів стійкості при підвищенні швидкодії системи.

Слід також зазначити, що динамічні властивості каналу регулювання рівня є параметрично залежними від режиму роботи енергоблоку. Зі зміною навантаження змінюються витрати пари та живильної води, тиск у паровій камері та інтенсивність теплообміну, що призводить до зміни коефіцієнтів підсилення та сталих часу об'єкта. Таким чином, канал регулювання рівня слід розглядати як нестационарний об'єкт, що додатково підвищує вимоги до робастності системи керування.

Отже, динамічні властивості каналу регулювання РЖВ парогенератора ПГВ-1000а характеризуються значною інерційністю, наявністю запізнення, інтегрувальними властивостями та коливальним характером перехідних процесів. Це обумовлює доцільність використання ПІ-регуляторів, налаштованих за частотними характеристиками, які дозволяють цілеспрямовано формувати динамічну поведінку замкненої системи та забезпечувати необхідні запаси стійкості.

1.5 Математичне моделювання каналу регулювання рівня живильної води

Математичне моделювання каналу регулювання РЖВ є необхідним етапом аналізу та синтезу САР парогенератором ПГВ-1000а. Адекватна математична модель дозволяє дослідити динамічні властивості об'єкта, оцінити вплив керуючих і збурювальних факторів, а також обґрунтувати вибір типу та параметрів регулятора.

В основу побудови математичної моделі покладено рівняння балансу

маси води в корпусі парогенератора. У загальному вигляді воно може бути записане як різниця між витратою живильної води та витратою пари з урахуванням внутрішніх фазових перетворень. У диференціальній формі це рівняння має вигляд:

$$\frac{dM_B(t)}{dt} = Q_B(t) - Q_P(t), \quad (1.1)$$

де $M_B(t)$ – маса води в корпусі парогенератора;

$Q_B(t)$ – витрата живильної води;

$Q_P(t)$ – витрата пари.

Оскільки РЖВ є функцією маси води та геометричних параметрів корпусу, то для малих відхилень від робочої точки можна вважати, що між масою води та рівнем існує лінійна залежність. Це дозволяє перейти від рівняння для маси до рівняння для рівня води:

$$\frac{dH(t)}{dt} = K_m [Q_B(t) - Q_P(t)], \quad (1.2)$$

де $H(t)$ – рівень живильної води;

K_m – коефіцієнт пропорційності, що враховує геометрію та густину середовища.

Для практичного використання модель підлягає лінеаризації в околі номінального режиму роботи парогенератора. Лінеаризація дозволяє перейти від нелінійної залежності між витратами та рівнем до лінійної моделі, придатної для частотного аналізу та синтезу регуляторів. У результаті лінеаризації отримується система лінійних диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами.

Урахування теплової інерції та гідравлічних властивостей тракту подачі живильної води приводить до появи інерційної ланки першого порядку у математичній моделі. Крім того, транспортні затримки в системі зумовлюють

наявність чистого запізнення, яке істотно впливає на фазові характеристики об'єкта. З урахуванням зазначених факторів передатна функція каналу регулювання рівня у операторній формі може бути записана як:

$$W_o(s) = \frac{K}{Ts(1+T_1s)} e^{-\tau s}, \quad (1.3)$$

де K – коефіцієнт підсилення об'єкта;

T – інтегровальна стала часу, що характеризує накопичення маси води;

T_1 – стала часу інерційної ланки;

τ – час запізнення.

Наведена передатна функція свідчить про те, що канал регулювання РЖВ має інтегровальний характер, тобто за відсутності коригувального впливу відхилення рівня з часом зростають. Це є принциповою особливістю об'єкта та визначає необхідність застосування регуляторів з інтегральною складовою.

Спрощена структурна схема математичної моделі каналу регулювання рівня наведена на рис. 1.5. На схемі показано послідовне з'єднання інтегровальної, інерційної ланок та блоку запізнення, що адекватно відображає основні динамічні властивості об'єкта в області малих відхилень.

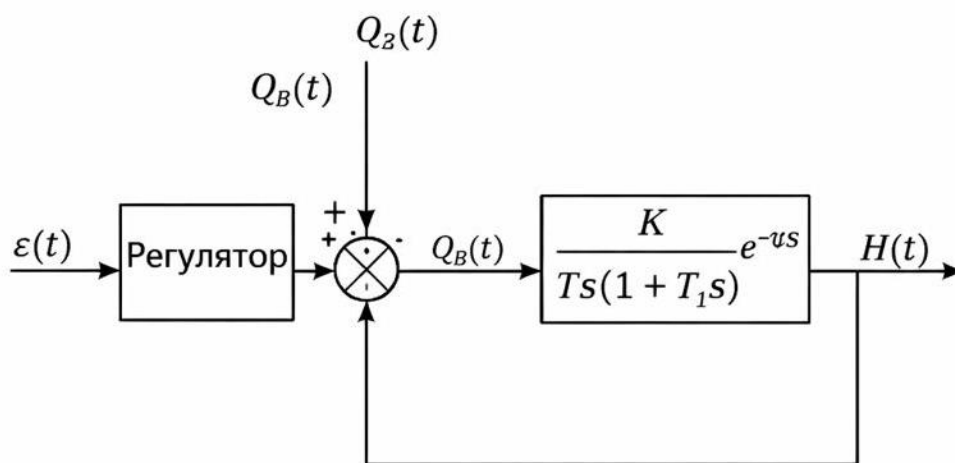


Рисунок 1.5 – Спрощена динамічна модель каналу рівня

Слід зазначити, що отримана модель є узагальненою та не враховує ряду нелінійних ефектів, зокрема зміну густини пароводяної суміші та ефекти набухання й усадки рівня. Однак у рамках задачі синтезу регулятора за частотними характеристиками така модель є достатньо точною та широко використовується в інженерній практиці.

Крім того, параметри моделі K , T , T_1 та τ можуть змінюватися залежно від режиму роботи енергоблоку. Це означає, що модель каналу регулювання РЖВ є параметрично нестационарною, що підвищує вимоги до робастності САР. У подальших розділах ці особливості враховуються шляхом формування заданих частотних характеристик замкненої системи.

Отже, побудована математична модель каналу регулювання РЖВ парогенератора ПГВ-1000а створює основу для подальшого частотного аналізу та синтезу ПІ-регулятора, що дозволяє забезпечити необхідні показники якості та стійкості САР.

1.6 Лінеаризована модель каналу регулювання рівня живильної води

Для застосування частотних методів аналізу та синтезу систем автоматичного керування необхідно привести математичний опис об'єкта до лінійної форми, справедливої в околі вибраної робочої точки. Лінеаризація дозволяє перейти від складного нелінійного опису теплогидравлічних процесів у парогенераторі ПГВ-1000а до моделі, придатної для побудови ЛАЧХ та ЛФЧХ.

Лінеаризація каналу регулювання РЖВ виконується поблизу номінального режиму роботи енергоблоку, при якому забезпечується сталий баланс між витратою живильної води та витратою пари. У цьому режимі всі змінні розглядаються у вигляді малих відхилень від номінальних значень, що дозволяє знехтувати нелінійними складовими вищих порядків.

У результаті лінеаризації математична модель каналу регулювання РЖВ може бути подана у вигляді послідовного з'єднання типових динамічних ланок,

а саме:

- інтегрувальної ланки, що відображає накопичення маси води в корпусі парогенератора;
- інерційної ланки першого порядку, яка враховує теплову та гідравлічну інерцію;
- ланки чистого запізнення, що описує транспортні та вимірювальні затримки.

Лінеаризована структурна схема каналу регулювання РЖВ наведена на рисунку 1.6. Така форма подання є зручною для подальшого частотного аналізу, оскільки дозволяє безпосередньо визначати вплив кожної ланки на амплітудні та фазові характеристики системи.

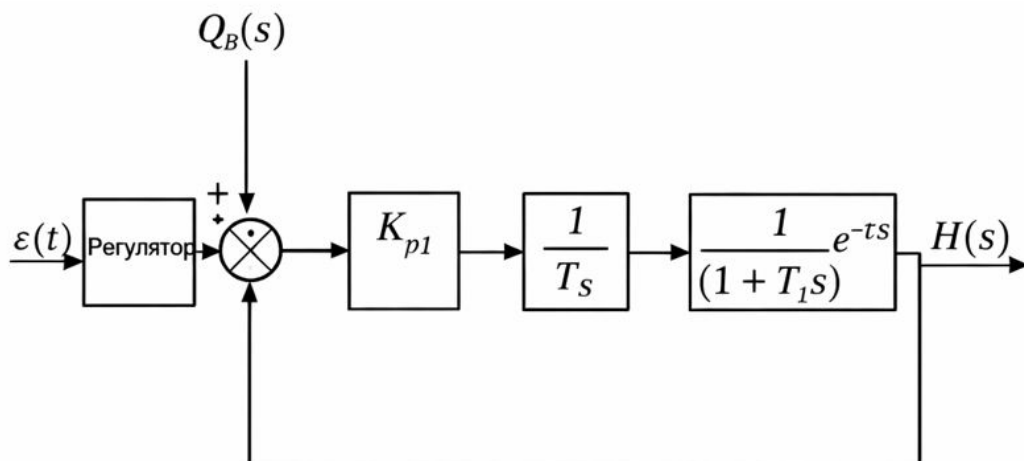


Рисунок 1.6 – Лінеаризована структурна схема каналу регулювання

Отримана лінеаризована модель підтверджує, що канал регулювання рівня має інтегрувальний характер, тобто у відкритому контурі є нестійким. Це означає, що за відсутності регулятора навіть незначні збурення або похибки вимірювання призводять до необмеженого зростання відхилення рівня. Таким чином, застосування системи автоматичного керування є не просто бажаним, а обов'язковим з точки зору безпечної експлуатації парогенератора.

Наявність інерційної ланки та запізнення істотно впливає на фазові властивості об'єкта. Зі збільшенням частоти керуючого сигналу фазовий зсув

зростає, що призводить до зменшення запасу фазової стійкості. Це обмежує можливість підвищення швидкодії системи та потребує компромісу між швидкістю реакції та стійкістю.

На рисунку 1.7 зображено вплив збурень на РЖВ в парогенераторі ПГВ-1000а.



Рисунок 1.7 – Вплив збурень на РЖВ

З урахуванням динамічних властивостей лінеаризованої моделі формуються основні вимоги до САР РЖВ в парогенераторі ПГВ-1000а. До таких вимог належать:

- нульова статична похибка регулювання рівня при сталих збуреннях, що є критично важливим для забезпечення стабільного теплового режиму;
- достатній запас фазової стійкості, як правило не менше 45° , що гарантує аперіодичний або слабкоколивальний характер перехідних процесів;
- обмежене перерегулювання, яке не повинно перевищувати допустимі технологічні межі;
- прийнятна швидкодія системи без виникнення автоколивань;
- робастність до змін параметрів об'єкта, пов'язаних зі зміною

навантаження енергоблоку та умов теплообміну;

– стійкість до збурень, зокрема до різких змін витрати пари.

Особливу увагу при формуванні вимог слід приділяти забезпеченню робастності системи. Оскільки параметри лінеаризованої моделі можуть змінюватися в процесі експлуатації, регулятор повинен забезпечувати стабільну роботу системи не лише в номінальному режимі, але й у широкому діапазоні робочих умов.

Аналіз лінеаризованої моделі також показує, що використання лише пропорційного регулятора не дозволяє виконати всі зазначені вимоги. Пропорційний закон керування не забезпечує усунення статичної похибки та є чутливим до параметричних змін об'єкта. У зв'язку з цим доцільним є застосування ПІ-регулятора, який поєднує в собі пропорційну та інтегральну складові та дозволяє компенсувати інтегровальні властивості об'єкта.

Таким чином, лінеаризована модель каналу регулювання РЖВ парогенератора ПГВ-1000А є базою для подальшого частотного аналізу та синтезу ПІ-регулятора. Вона дозволяє сформулювати чіткі вимоги до якості та стійкості САР, які будуть використані у наступному розділі при побудові ЛЧХ та виборі параметрів регулятора.

1.7 Постановка задачі автоматичного регулювання рівня живильної води

На основі проведеного в попередніх підрозділах аналізу конструктивних, технологічних та динамічних особливостей парогенератора ПГВ-1000А формується задача автоматичного регулювання рівня живильної води. Ця задача є однією з ключових у системі автоматичного керування енергоблоком атомної електростанції, оскільки безпосередньо впливає на безпеку, надійність та економічність його експлуатації.

Як було встановлено, парогенератор ПГВ-1000А як об'єкт керування рівнем характеризується значною інерційністю, наявністю транспортних і динамічних запізень, інтегровальними властивостями та суттєвим впливом

збурень, зокрема змін витрати пари. Крім того, на поведінку рівня істотно впливають нелінійні ефекти набухання та усадки, що ускладнюють процес керування в перехідних режимах.

Основною метою САР РЖВ є підтримання рівня в заданих технологічних межах за будь-яких допустимих змін навантаження енергоблоку та дії зовнішніх і внутрішніх збурень. При цьому система керування повинна забезпечувати не лише точність регулювання, але й необхідні динамічні показники, що гарантують стійку та безпечну роботу парогенератора.

З формальної точки зору задача автоматичного регулювання РЖВ полягає у формуванні такого керуючого впливу $Q_v(t)$, який забезпечує мінімізацію відхилення рівня $H(t)$ від заданого значення $H_{зад}$ при наявності збурювальних впливів $Q_n(t)$. Для цього в системі формується сигнал похибки:

$$\varepsilon(t) = H_{зад}(t) - H(t), \quad (1.4)$$

який використовується регулятором для вироблення керуючого сигналу.

З урахуванням інтегровального характеру об'єкта та необхідності усунення статичної похибки регулювання, доцільним є застосування ПІ-регулятора. Пропорційна складова забезпечує необхідну швидкодію системи, тоді як інтегральна складова дозволяє компенсувати накопичення похибки та забезпечити точне відпрацювання заданого рівня у сталому режимі.

Разом з тим, застосування ПІ-регулятора в системі з істотним запізненням та інерційністю вимагає обґрунтованого вибору його параметрів. Невдале налаштування може призвести до коливального режиму, значного перерегулювання або навіть втрати стійкості системи. У зв'язку з цим задача синтезу регулятора повинна вирішуватися з урахуванням частотних властивостей об'єкта керування.

Таким чином, задача автоматичного регулювання РЖВ в парогенераторі ПГВ-1000А формулюється як задача синтезу ПІ-регулятора, параметри якого

забезпечують задані властивості ЛАЧХ та ЛФЧХ замкненої системи. Зокрема, САР повинна задовольняти таким основним вимогам:

- відсутність статичної похибки регулювання рівня;
- запас фазової стійкості не менше 45° ;
- обмежене перерегулювання в перехідних процесах;
- аперіодичний або слабкоколивальний характер перехідних процесів;
- достатня швидкодія без виникнення автоколивань;
- робастність до змін параметрів об'єкта та дії збурень.

Для забезпечення зазначених вимог у роботі пропонується використовувати частотний метод синтезу ПІ-регулятора, який дозволяє цілеспрямовано формувати бажану поведінку системи в частотній області. Застосування цього підходу дає можливість забезпечити компроміс між швидкодією та стійкістю системи, а також підвищити її робастність у широкому діапазоні режимів роботи.

Таким чином, у результаті проведеного аналізу сформульовано чітку постановку задачі дослідження, яка полягає у розробленні ПІ-регулятора РЖВ парогенератора ПГВ-1000а з використанням частотних методів синтезу для забезпечення заданих показників якості та стійкості САР.

1.8 Висновки до першого розділу

У першому розділі роботи проведено комплексний аналіз парогенератора ПГВ-1000а як об'єкта автоматичного керування РЖВ. Розглянуто конструктивні та технологічні особливості парогенератора, що визначають характер формування рівня та впливають на умови функціонування САР.

Показано, що РЖВ є одним із найбільш критичних технологічних параметрів парогенератора, від стабільності якого безпосередньо залежать безпека та ефективність роботи енергоблоку атомної електростанції. Встановлено, що процес регулювання рівня відбувається в умовах значних збурень, основним з яких є зміна витрати пари, а також за наявності нелінійних

теплогідравлічних ефектів.

У розділі детально проаналізовано технологічний процес формування РЖВ та показано сутність ефектів набухання і усадки рівня, які зумовлюють складну динамічну поведінку об'єкта у перехідних режимах. Зазначені ефекти призводять до неоднозначної реакції рівня на керуючі впливи та збурення, що ускладнює задачу автоматичного керування та підвищує вимоги до параметрів регулятора.

Проведений аналіз каналу регулювання рівня дозволив встановити його структуру, визначити основні керуючі та збурювальні впливи, а також оцінити роль вимірювального та виконавчого каналів у формуванні динамічних властивостей системи. Показано, що збурення діють безпосередньо на об'єкт керування, минаючи регулятор, що знижує ефективність компенсації та потребує забезпечення достатніх запасів стійкості замкненої системи.

У результаті аналізу динамічних властивостей встановлено, що канал регулювання рівня характеризується значною інерційністю, наявністю транспортних і динамічних запізнень, інтегровальними властивостями та коливальним характером перехідних процесів. Це зумовлює зменшення фазового запасу стійкості та обмежує можливість підвищення швидкодії САР.

Побудовано спрощену математичну модель каналу регулювання РЖВ у лінеаризованому вигляді, яка адекватно відображає основні динамічні властивості об'єкта в області малих відхилень. Показано, що отримана модель має інтегровальний характер і включає інерційну ланку та ланку чистого запізнення, що створює передумови для застосування частотних методів аналізу та синтезу регуляторів.

На основі лінеаризованої моделі сформульовано основні вимоги до САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000а, зокрема щодо відсутності статичної похибки, забезпечення достатніх запасів фазової стійкості, обмеження перерегулювання, робастності до параметричних змін та стійкості до збурень. Обґрунтовано доцільність застосування ПІ-регулятора як базового елемента системи керування.

Таким чином, у першому розділі створено теоретичну та методичну основу для подальшого дослідження, яка полягає у синтезі ПІ-регулятора РЖВ з використанням частотних методів. Отримані результати є вихідними даними для другого розділу, в якому розглядаються теоретичні основи частотного аналізу та синтезу ПІ-регуляторів і виконується формування заданих частотних характеристик замкненої САР.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИНТЕЗУ ПІ-РЕГУЛЯТОРІВ ЗА ЧАСТОТНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

2.1 Структура ПІ-регулятора та особливості його застосування

У САР технологічних параметрів енергетичного обладнання широкого застосування набули регулятори з пропорційно-інтегральним законом керування. ПІ-регулятор поєднує в собі відносну простоту реалізації, високу надійність та здатність забезпечувати нульову статичну похибку регулювання, що є особливо важливим для інерційних об'єктів з інтегровальними властивостями, до яких належить парогенератор ПГВ-1000а.

Загальна структура ПІ-регулятора передбачає формування керуючого сигналу на основі поточного значення похибки регулювання та її інтегралу за часом. Сигнал похибки визначається як різниця між заданим і фактичним значеннями регульованої величини, тобто РЖВ:

$$\varepsilon(t) = H_{\text{зад}}(t) - H(t). \quad (2.1)$$

У часовій області закон керування ПІ-регулятора може бути поданий у вигляді:

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau, \quad (2.2)$$

де $u(t)$ – керуючий сигнал, що подається на виконавчий механізм;

K_p – коефіцієнт пропорційної складової;

K_i – коефіцієнт інтегральної складової.

У операторній формі передатна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$W_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right), \quad (2.3)$$

де $T_i = \frac{K_p}{K_i}$ – інтегральна стала часу регулятора.

Аналіз передатної функції ПІ-регулятора показує, що його структура включає дві основні складові. Пропорційна складова забезпечує швидку реакцію системи на зміну похибки, формуючи керуючий сигнал, пропорційний миттєвому значенню відхилення рівня. Інтегральна складова виконує функцію накопичення похибки за часом і забезпечує усунення статичної похибки регулювання, що є принципово важливим для об'єктів з інтегровальними властивостями.

З позицій частотного аналізу ПІ-регулятор вносить суттєві зміни у форму ЛАЧХ та ЛФЧХ замкненої системи. Наявність інтегральної складової призводить до збільшення підсилення в області низьких частот, що сприяє зменшенню впливу сталих збурень. Водночас у діапазоні середніх частот ПІ-регулятор формує додатковий фазовий зсув, який необхідно враховувати при забезпеченні достатнього запасу фазової стійкості.

Для об'єктів типу парогенератора ПГВ-1000а, які характеризуються значною інерційністю та запізненням, правильний вибір параметрів K_p та T_i має вирішальне значення. Надмірне збільшення коефіцієнта K_p може призвести до коливального характеру перехідних процесів, тоді як занадто мала інтегральна стала часу T_i викликає ефект «перенасичення» інтегратора та погіршення динамічної якості регулювання.

З точки зору структурної реалізації ПІ-регулятор може бути представлений у вигляді паралельного або послідовного з'єднання пропорційної та інтегральної ланок. У практиці промислової автоматизації найчастіше використовується паралельна структура, яка забезпечує зручність налаштування та реалізації в цифрових і аналогових регуляторах. Структурна схема ПІ-регулятора включає суматор, пропорційну ланку, інтегратор та

підсумовування їх виходів для формування керуючого сигналу.

Особливістю застосування ПІ-регулятора в САР РЖВ є необхідність урахування обмежень на керуючий сигнал, пов'язаних із фізичними можливостями виконавчого механізму. У реальних умовах регулюючий клапан живильної води має обмежений діапазон переміщення та швидкості, що може призводити до насичення регулятора. У таких випадках інтегральна складова може накопичувати похибку, що негативно впливає на динаміку системи після виходу з режиму насичення.

Для уникнення зазначених негативних явищ у сучасних системах керування застосовуються методи обмеження інтегрування, однак у межах даної роботи основна увага зосереджується на частотному синтезі параметрів ПІ-регулятора в області нормальних режимів експлуатації.

Таким чином, структура ПІ-регулятора є оптимальним компромісом між простотою реалізації та здатністю забезпечувати високі показники якості регулювання для інерційних об'єктів із запізненням. Саме ці властивості обумовлюють доцільність використання ПІ-регулятора для САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000а та створюють основу для подальшого частотного аналізу і синтезу, що розглядається в наступних підрозділах.

2.2 Частотні характеристики об'єкта керування рівнем живильної води

Для реалізації частотного синтезу САР РЖВ необхідно детально дослідити частотні властивості об'єкта керування. Частотний аналіз дозволяє оцінити динамічну поведінку об'єкта в широкому діапазоні частот, визначити вплив окремих динамічних ланок на амплітудні та фазові характеристики, а також сформулювати вимоги до регулятора з точки зору стійкості та швидкодії.

Як було показано у першому розділі, лінеаризована модель каналу регулювання РЖВ парогенератора ПГВ-1000а в операторній формі описується передатною функцією (1.3).

Наявність інтегрувальної ланки, інерційної ланки першого порядку та

чистого запізнення визначає специфічний характер частотних характеристик об'єкта керування. Зокрема, об'єкт характеризується високим підсиленням у низькочастотній області та значним фазовим зсувом у робочому діапазоні частот.

АЧХ об'єкта визначається модулем комплексної передатної функції при підстановці $s = j\omega$:

$$|W_o(j\omega)| = \frac{K}{T\omega\sqrt{1+(T_1\omega)^2}}. \quad (2.4)$$

Аналіз цього виразу показує, що при малих значеннях частоти ω модуль передатної функції зростає обернено пропорційно частоті, що є наслідком інтегрувальних властивостей об'єкта. Це означає, що об'єкт має високу чутливість до низькочастотних збурень, зокрема сталих і повільно змінних впливів.

У середньочастотній області вплив інерційної ланки першого порядку призводить до додаткового зменшення амплітуди сигналу зі зростанням частоти. У логарифмічному масштабі це проявляється у вигляді спадання ЛАЧХ зі схилом, що досягає -40 дБ/дек у відповідному діапазоні частот (рис. 2.1).

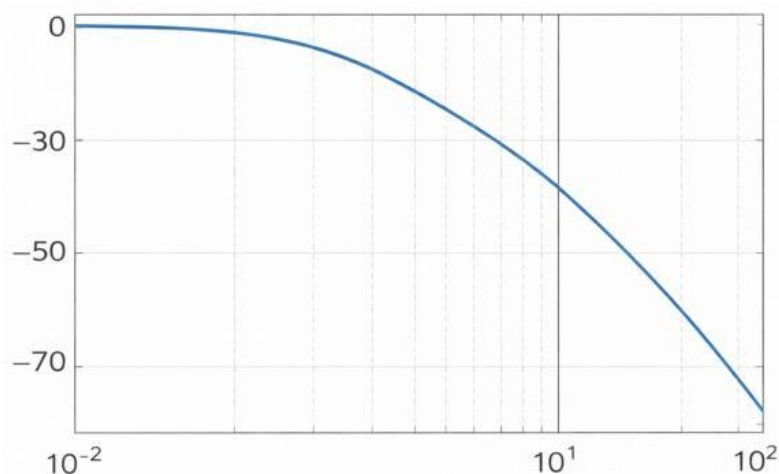


Рисунок 2.1 – ЛАЧХ об'єкта керування

Така форма АЧХ є характерною для інерційних об'єктів з інтегровальними властивостями.

ФЧХ об'єкта визначається аргументом комплексної передатної функції:

$$\varphi(\omega) = -90^\circ - \arctan(T_1\omega) - \omega\tau. \quad (2.5)$$

З наведеного виразу видно, що вже в області низьких частот фазовий зсув становить близько -90° , що обумовлено інтегровальною ланкою. Інерційна ланка першого порядку додає ще до -90° фазового зсуву при зростанні частоти, а наявність запізнення призводить до лінійного зменшення фази зі збільшенням частоти. У сукупності це може призводити до досягнення критичного фазового зсуву -180° уже при відносно низьких частотах (рис. 2.2).

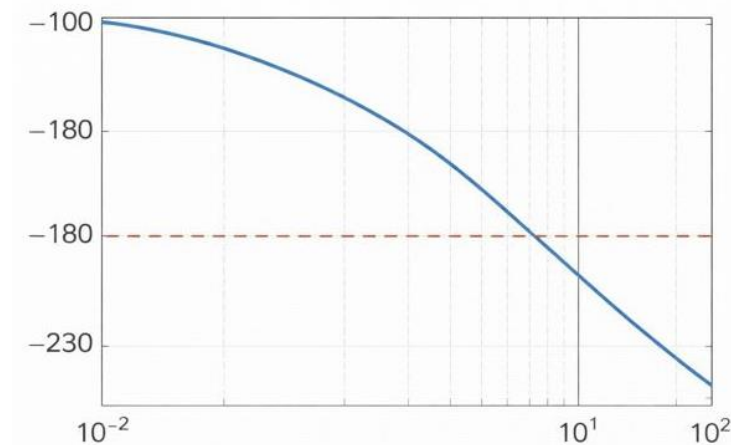


Рисунок 2.2 – ЛФЧХ об'єкта керування

Таким чином, ФЧХ об'єкта керування РЖВ має несприятливий характер з точки зору забезпечення стійкості замкненої системи. Значний фазовий зсув обмежує допустиме підсилення в системі та ускладнює підвищення її швидкодії без втрати стійкості.

Додатковий негативний вплив на частотні характеристики здійснює ланка чистого запізнення. Запізнення практично не змінює форму АЧХ, однак істотно погіршує фазові властивості об'єкта, зменшуючи запас фазової стійкості. Це

особливо критично для систем регулювання рівня, де потрібна достатня робастність до змін параметрів об'єкта та дії збурень.

Аналіз частотних характеристик об'єкта керування дозволяє зробити висновок, що у відкритому контурі система є нестійкою та не може забезпечити необхідні показники якості регулювання. Високе підсилення в області низьких частот, значний фазовий зсув і наявність запізнення створюють передумови для коливального режиму або втрати стійкості при спробі підвищення швидкодії.

Отримані результати частотного аналізу є вихідними даними для подальшого синтезу ПІ-регулятора. Зокрема, вони дозволяють обґрунтовано вибрати частоту зрізу замкненої системи, визначити допустимий рівень підсилення та сформувані вимоги до фазового запасу стійкості. Саме на основі цих характеристик у наступних підрозділах буде виконано формування заданих логарифмічних частотних характеристик САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000а.

2.3 Вплив ПІ-регулятора на частотні характеристики системи автоматичного регулювання

Введення ПІ-регулятора в контур керування істотно змінює частотні властивості системи автоматичного регулювання рівня живильної води парогенератора ПГВ-1000а. На відміну від об'єкта у відкритому контурі, який характеризується несприятливими АЧХ та ФЧХ, правильно налаштований ПІ-регулятор дозволяє цілеспрямовано формувати частотну поведінку системи з урахуванням вимог до стійкості, швидкодії та робастності.

Передатна функція ПІ-регулятора в операторній формі має вигляд (2.3). З урахуванням ПІ-регулятора передатна функція відкритого контуру системи набуває вигляду:

$$W_{ol}(s) = W_{PI}(s) \cdot W_o(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \frac{K}{Ts(1+T_1 s)} e^{-\tau s}. \quad (2.6)$$

Аналіз цієї передатної функції показує, що ІІ-регулятор вносить у систему додаткову нульову ланку, яка суттєво впливає на форму ЛЧХ.

2.3.1 Вплив ІІ-регулятора на амплітудно-частотну характеристику

Інтегральна складова ІІ-регулятора призводить до підвищення підсилення в області низьких частот, що забезпечує ефективне придушення сталих і повільно змінних збурень. Це особливо важливо для систем регулювання рівня, де основними збуреннями є повільні зміни витрати пари.

Нуль, що вводиться ІІ-регулятором при частоті $\omega_i = 1/T_i$, змінює нахил ЛАЧХ. У частотному діапазоні нижче ω_i ІІ-регулятор поводить себе подібно до інтегратора, тоді як у діапазоні вище цієї частоти його вплив наближається до пропорційної ланки. Це дозволяє зменшити крутизну спадання ЛАЧХ та сформувати більш сприятливу форму характеристики поблизу частоти зрізу (рис. 2.3).

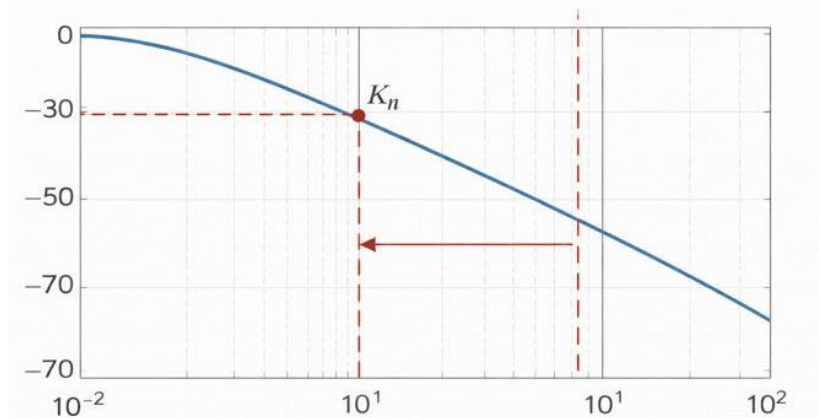


Рисунок 2.3 – ЛАЧХ відкритої системи з ІІ-регулятором

Таким чином, ІІ-регулятор виконує роль коректора амплітудної характеристики, що дозволяє:

- задати бажану частоту зрізу;
- обмежити підсилення у високочастотній області;
- забезпечити компроміс між швидкодією та стійкістю.

2.3.2 Вплив ПІ-регулятора на фазо-частотну характеристику

ПІ-регулятор також істотно впливає на фазові властивості системи. Інтегральна складова вносить додатковий фазовий зсув -90° у області низьких частот, однак наявність нуля частково компенсує цей негативний вплив у середньочастотному діапазоні.

Поблизу частоти ω_i ПІ-регулятор забезпечує додатний фазовий приріст у порівнянні з чисто інтегрувальною ланкою, що сприяє збільшенню запасу фазової стійкості системи (рис. 2.4). Це є принципово важливим для об'єктів із запізненням, до яких належить парогенератор ПГВ-1000а.

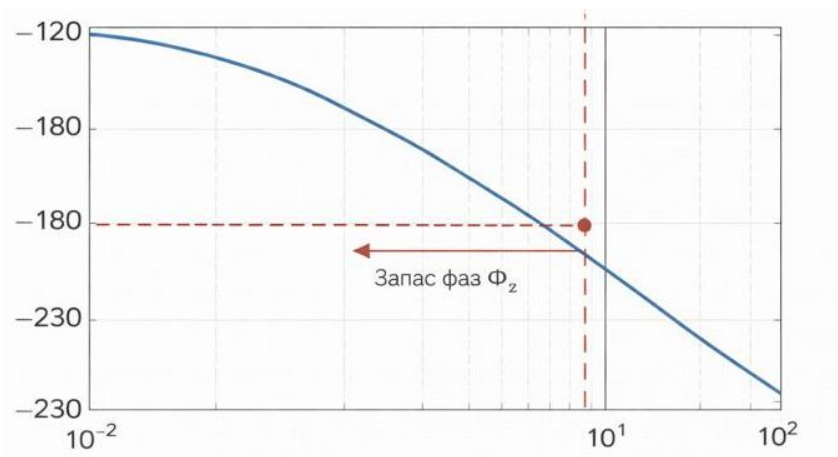


Рисунок 2.4 – ЛФЧХ відкритої системи з ПІ-регулятором

Правильний вибір інтегральної сталої часу T_i дозволяє змістити нуль ПІ-регулятора в область, де він найбільш ефективно компенсує фазові втрати, спричинені інерційною ланкою та запізненням об'єкта.

2.3.3 Формування частотних характеристик відкритої та замкненої системи

У результаті дії ПІ-регулятора частотні характеристики відкритої системи набувають форми, придатної для забезпечення необхідних запасів стійкості. Частота зрізу визначається умовою:

$$|W_{ol}(j\omega_c)| = 1, \quad (2.7)$$

де W_{ol} – передатна функція відкритого контуру системи з ПІ-регулятором.

Запас фазової стійкості при цьому визначається фазовим зсувом при частоті ω_c :

$$\varphi_{\text{зап}} = 180^\circ + \arg W_{ol}(j\omega_c). \quad (2.8)$$

Зі збільшенням коефіцієнта K_p частота зрізу зростає, що підвищує швидкодію системи, однак водночас зменшує запас фазової стійкості. Інтегральна стала часу T_i визначає розташування нуля ПІ-регулятора та впливає на форму ЛАЧХ і ЛФЧХ у зоні частоти зрізу.

Таким чином, параметри K_p та T_i є взаємопов'язаними і повинні вибиратися з урахуванням частотних властивостей об'єкта керування.

2.3.4 Порівняння з пропорційним регулятором

На відміну від ПІ-регулятора, ПІІ-регулятор забезпечує не лише підвищення підсилення, але й формування сприятливої форми частотних характеристик. ПІ-регулятор не усуває статичну похибку та не дозволяє ефективно компенсувати фазові втрати об'єкта, що призводить до обмежених можливостей підвищення якості регулювання.

Застосування ПІІ-регулятора дозволяє одночасно:

- усунути статичну похибку;
- підвищити запас фазової стійкості;
- забезпечити прийнятну швидкодію;
- підвищити робастність системи до збурень і змін параметрів об'єкта.

Таким чином, вплив ПІІ-регулятора на частотні характеристики САР РЖВ є визначальним фактором у досягненні заданих показників якості. Це обґрунтовує доцільність використання частотних методів синтезу

ПІ-регулятора, які дозволяють цілеспрямовано формувати поведінку системи в частотній області.

2.4 Формування заданих частотних характеристик замкненої системи автоматичного регулювання

Формування заданих частотних характеристик є ключовим етапом синтезу САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000а. Метою цього етапу є вибір таких параметрів ПІ-регулятора, які забезпечують необхідні показники якості регулювання, стійкості та робастності замкненої системи в умовах дії збурень і параметричної невизначеності об'єкта керування.

З урахуванням результатів аналізу частотних характеристик об'єкта та впливу ПІ-регулятора на частотні властивості системи, формування заданих характеристик доцільно здійснювати в логарифмічній частотній області з використанням методу Бодє. Такий підхід дозволяє наочно оцінити вплив параметрів регулятора на АЧХ та ФЧХ і забезпечити задані запаси стійкості.

2.4.1 Вибір показників якості та частотних критеріїв

До основних показників якості замкненої САР РЖВ належать:

- відсутність статичної похибки;
- обмежене перерегулювання;
- аперіодичний або слабкоколивальний характер перехідних процесів;
- достатня швидкодія;
- робастність до змін параметрів об'єкта.

У частотній області ці вимоги формулюються через:

- задану частоту зрізу ω_c ;
- запас фазової стійкості $\varphi_{\text{зап}}$;
- обмеження підсилення у високочастотному діапазоні.

Для САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000а доцільно приймати запас

фазової стійкості не менше 45° , що забезпечує прийнятний компроміс між швидкодією та стійкістю системи.

2.4.2 Формування бажаної логарифмічної амплітудно-частотної характеристики

Бажана ЛАЧХ відкритої системи повинна мати спадний характер із нахилом, близьким до -20 дБ/дек у зоні частоти зрізу (рис. 3.5). Така форма характеристики забезпечує аперіодичний або слабкоколивальний характер перехідних процесів у замкненій системі.

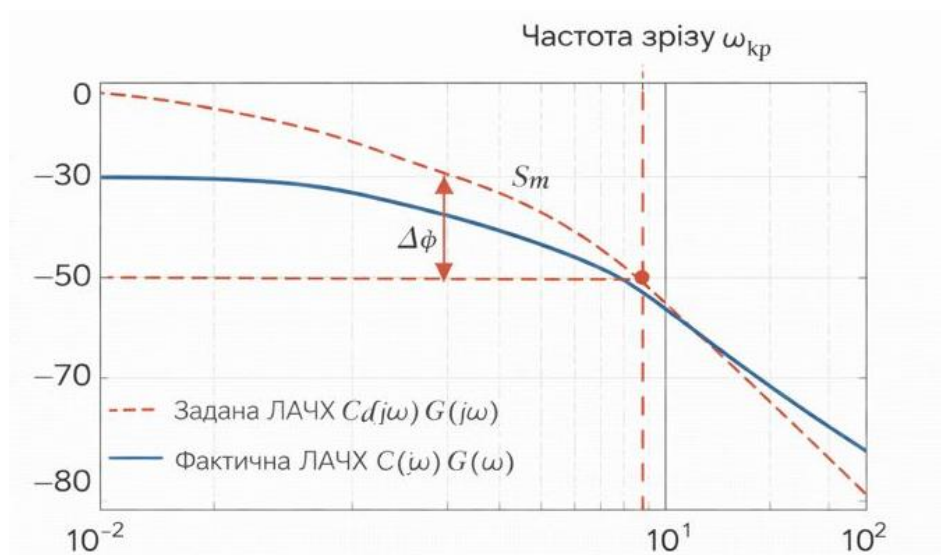


Рисунок 2.5 – Формування заданої ЛАЧХ відкритої системи

Частота зрізу ω_c визначається з умови (2.7). Збільшення частоти зрізу призводить до підвищення швидкодії системи, однак супроводжується зменшенням запасу фазової стійкості. Тому вибір ω_c повинен здійснюватися з урахуванням фазових властивостей об'єкта та допустимих значень фазового зсуву.

2.4.3 Вибір інтегральної сталої часу ІІІ-регулятора

Інтегральна стала часу T_i визначає положення нуля ІІІ-регулятора та суттєво впливає на форму частотних характеристик системи.

Для інерційних об'єктів з інтегровальними властивостями доцільно вибирати T_i таким чином, щоб нуль ПІ-регулятора компенсував інерційну ланку об'єкта $T_i \approx T_1$. Такий вибір забезпечує зменшення фазового зсуву в зоні частоти зрізу та сприяє збільшенню запасу фазової стійкості.

У практиці синтезу допускається коригування T_i у межах $0,5T_1 \leq T_i \leq 2T_1$ для досягнення оптимальних показників якості.

2.4.4 Визначення коефіцієнта підсилення ПІ-регулятора

Після вибору інтегральної сталої часу T_i коефіцієнт підсилення K_p визначається з умови досягнення одиничного підсилення відкритого контуру при частоті зрізу:

$$K_p = \frac{1}{\left| \left(1 + \frac{1}{j\omega_c T_i} \right) W_o(j\omega_c) \right|}. \quad (2.6)$$

Збільшення коефіцієнта K_p призводить до зростання швидкодії системи, однак надмірне підсилення може викликати коливальний характер перехідних процесів та зменшення запасів стійкості. Тому остаточне значення K_p вибирається з урахуванням компромісу між швидкістю та стійкістю.

2.4.5 Оцінювання частотних характеристик замкненої системи

Після визначення параметрів ПІ-регулятора виконується побудова ЛАЧХ та ЛФЧХ відкритої системи і визначення запасів стійкості (рис. 2.6). Замкнена система вважається такою, що задовольняє вимогам, якщо:

- запас фазової стійкості перевищує задане мінімальне значення;
- частота зрізу відповідає вимогам до швидкодії;
- форма ЛАЧХ не призводить до надмірного підсилення шумів у високочастотній області.

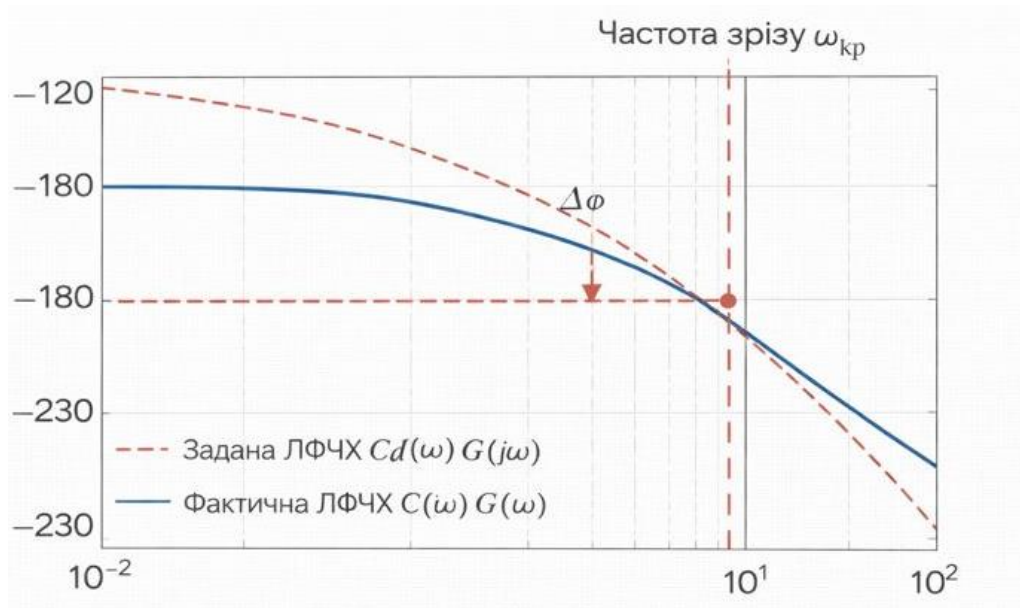


Рисунок 2.6 – Визначення запасу фазової стійкості

Отримані частотні характеристики є основою для подальшого аналізу перехідних процесів у часовій області, який виконується у наступному розділі за допомогою імітаційного моделювання.

Отже, формування заданих частотних характеристик замкненої САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000а зводиться до послідовного вибору частоти зрізу, інтегральної сталої часу та коефіцієнта підсилення ПІ-регулятора. Застосування частотного підходу дозволяє забезпечити задані показники якості та стійкості системи й створює основу для практичної реалізації регулятора та його подальшого дослідження.

2.5 Аналіз стійкості системи автоматичного регулювання

Забезпечення стійкості САР РЖВ є однією з основних вимог до систем керування парогенераторами атомних електростанцій. Втрата стійкості або поява автоколивань у контурі регулювання РЖВ може призводити до значних відхилень технологічних параметрів і створювати загрозу безпечній експлуатації енергоблоку. У зв'язку з цим після синтезу ПІ-регулятора за частотними характеристиками необхідно виконати детальний аналіз стійкості

системи з використанням частотних критеріїв.

Частотні методи аналізу стійкості є зручними та наочними для інерційних об'єктів із запізненням, до яких належить парогенератор ПГВ-1000А. Вони дозволяють оцінити поведінку системи в широкому діапазоні частот і визначити запас стійкості замкненої системи без необхідності безпосереднього розв'язування характеристичного рівняння.

Одним із найбільш загальних і строгих частотних критеріїв є критерій Найквіста, який дозволяє визначити стійкість замкненої системи на основі аналізу частотної характеристики відкритого контуру. Згідно з цим критерієм, стійкість замкненої системи визначається характером обходу комплексною частотною характеристикою відкритої системи критичної точки з координатами $(-1; 0)$ у комплексній площині.

Для відкритого контуру САР РЖВ з ПІ-регулятором передатна функція має вигляд (2.6). Застосування критерію Найквіста до даної системи дозволяє зробити висновок про її стійкість за умови, що частотна характеристика відкритого контуру не охоплює критичну точку або охоплює її відповідно до кількості нестійких полюсів відкритої системи.

Оскільки лінеаризована модель об'єкта керування має інтегрувальні властивості, відкритий контур системи є нестійким. Проте при коректному виборі параметрів ПІ-регулятора обходи кривої Найквіста забезпечують стійкість замкненої системи. Аналіз кривої Найквіста дозволяє також якісно оцінити запас стійкості та близькість системи до межі втрати стійкості.

У практиці інженерного аналізу частіше використовується оцінювання стійкості за допомогою запасів стійкості за амплітудою та фазою, які визначаються на основі ЛЧХ відкритої системи.

Запас фазової стійкості (2.8) визначається як різниця між фактичним фазовим зсувом відкритого контуру при частоті зрізу та критичним значенням -180° . Цей показник характеризує допустиме зменшення фазового зсуву, за якого система ще залишатиметься стійкою. Для САР РЖВ парогенератора

ПГВ-1000а доцільно забезпечувати запас фазової стійкості не менше 45° , що гарантує аперіодичний або слабкоколивальний характер перехідних процесів.

Запас стійкості за амплітудою визначається як відношення підсилення, при якому фаза відкритого контуру досягає значення -180° , до фактичного підсилення системи. У логарифмічному масштабі цей запас зазвичай виражається в децибелах. Достатній запас за амплітудою забезпечує робастність системи до зміни коефіцієнтів підсилення та неточностей моделі.

Введення ПІ-регулятора в контур керування істотно змінює запаси стійкості системи. Пропорційна складова визначає положення частоти зрізу та впливає на швидкодію системи, тоді як інтегральна складова формує поведінку системи в області низьких частот і впливає на фазові характеристики (рис. 2.7).

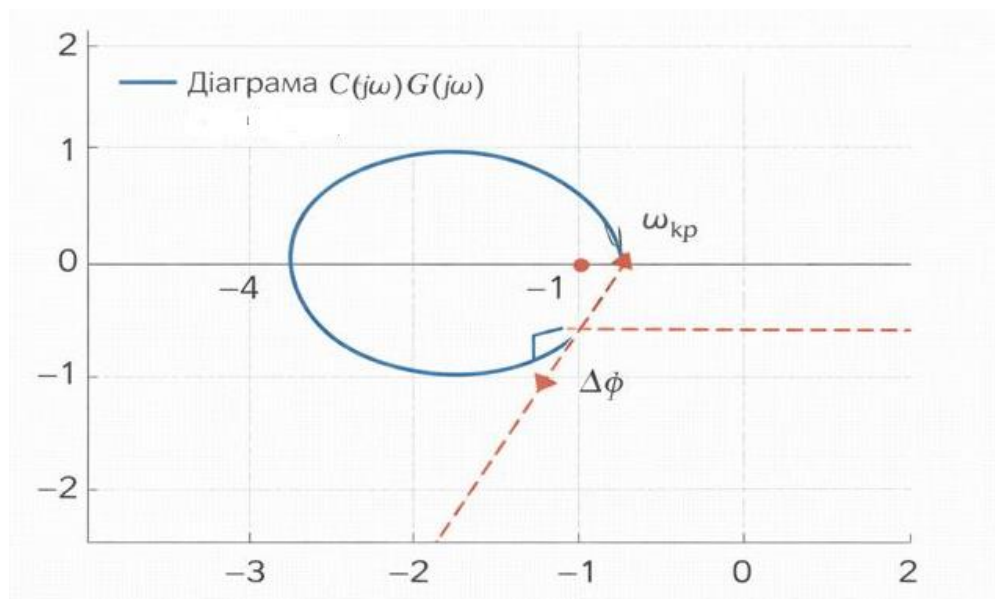


Рисунок 2.7 – Частотний критерій стійкості Найквіста

Правильний вибір інтегральної сталої часу T_i дозволяє частково компенсувати фазові втрати, спричинені інерційною ланкою об'єкта, що призводить до збільшення запасу фазової стійкості. Водночас надмірне збільшення коефіцієнта підсилення K_p може зменшити запаси стійкості та викликати коливальний характер перехідних процесів.

Таким чином, аналіз запасів стійкості дозволяє визначити допустимі межі зміни параметрів ПІ-регулятора та забезпечити стабільну роботу системи в широкому діапазоні режимів експлуатації.

Особливістю систем регулювання РЖВ парогенератора ПГВ-1000а є параметрична невизначеність об'єкта, зумовлена зміною режимів роботи енергоблоку, витрати пари та умов теплообміну. У таких умовах САР повинна зберігати стійкість і прийнятні показники якості при зміні параметрів моделі.

Запаси стійкості, визначені за частотними характеристиками, є кількісною мірою робастності системи. Достатній запас фазової та амплітудної стійкості забезпечує нечутливість системи до помилок ідентифікації моделі та змін параметрів об'єкта в реальних умовах експлуатації.

Проведений аналіз стійкості САР РЖВ за частотними критеріями показує, що правильно синтезований ПІ-регулятор забезпечує необхідні запаси фазової та амплітудної стійкості, а також робастність системи до дії збурень і параметричної невизначеності. Це створює передумови для стабільної та безпечної роботи парогенератора ПГВ-1000а в широкому діапазоні режимів експлуатації. Отримані результати частотного аналізу стійкості є підставою для переходу до імітаційного моделювання САР РЖВ в часовій області.

2.6 Порівняльний частотний аналіз системи автоматичного регулювання

Порівняльний частотний аналіз САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000а є важливим етапом оцінювання ефективності застосування ПІ-регулятора. Такий аналіз дозволяє наочно продемонструвати зміни частотних властивостей системи (рис. 2.8), які відбуваються в результаті введення регулятора, а також обґрунтувати доцільність вибраного методу синтезу з точки зору забезпечення стійкості, швидкодії та робастності.

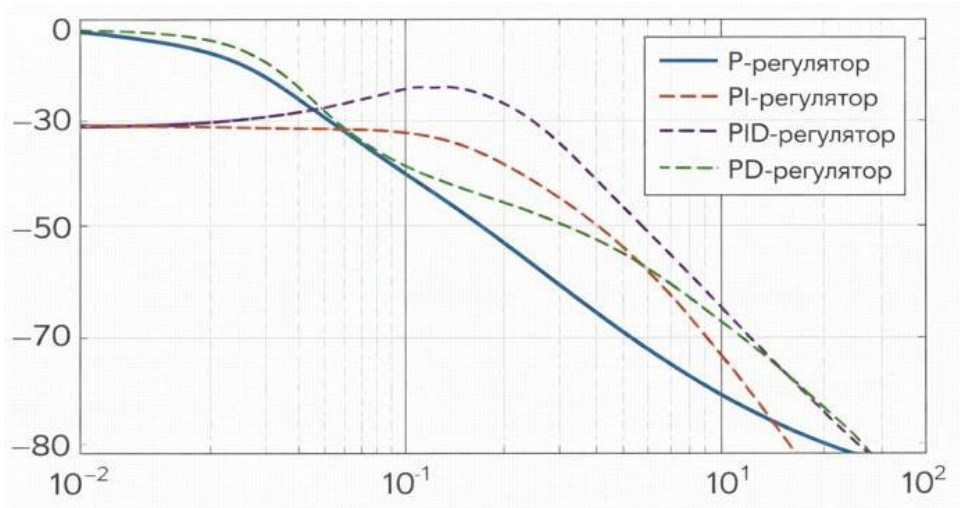


Рисунок 2.8 – Порівняння ЛАЧХ для різних типів регуляторів

2.6.1 Частотні характеристики системи без регулятора

Система без регулятора фактично відповідає відкритому контуру керування, де рівень живильної води змінюється лише під впливом технологічних процесів та збурень. Частотні характеристики такої системи визначаються виключно динамічними властивостями об'єкта керування, який, як було показано у підрозділі 2.2, має інтегрувальний характер, інерційність та запізнення.

АЧХ системи без регулятора характеризується високим підсиленням у низькочастотній області, що зумовлює значну чутливість до сталих і повільно змінних збурень. У ФЧХ спостерігається значний фазовий зсув, який швидко досягає критичного значення -180° . Унаслідок цього система без регулятора є нестійкою в замкненому контурі та не може забезпечити допустимі показники якості регулювання.

2.6.2 Частотні характеристики системи з пропорційним регулятором

Для повноти порівняльного аналізу доцільно також розглянути систему з пропорційним регулятором. Введення пропорційної ланки призводить до зміни рівня підсилення у всьому частотному діапазоні, однак не змінює принципової форми АЧХ та ФЧХ об'єкта.

Зі збільшенням коефіцієнта підсилення пропорційного регулятора частота зрізу зростає, що підвищує швидкодію системи. Водночас фазовий зсув у зоні частоти зрізу залишається значним, що призводить до зменшення запасу фазової стійкості. Крім того, пропорційний регулятор не забезпечує усунення статичної похибки, що є критичним недоліком для систем регулювання рівня.

2.6.3 Частотні характеристики системи з ПІ-регулятором

Введення ПІ-регулятора істотно змінює частотні властивості САР РЖВ. Інтегральна складова забезпечує високий рівень підсилення в області низьких частот, що дозволяє ефективно компенсувати сталі збурення та усунути статичну похибку регулювання. Нуль, який вводиться ПІ-регулятором, змінює нахил ЛАЧХ та сприяє формуванню більш сприятливої форми частотної характеристики поблизу частоти зрізу.

ФЧХ системи з ПІ-регулятором також зазнає суттєвих змін. Правильний вибір інтегральної сталої часу T_i дозволяє частково компенсувати фазові втрати, спричинені інерційною ланкою об'єкта, та збільшити запас фазової стійкості. Це забезпечує аперіодичний або слабкоколивальний характер перехідних процесів у замкненій системі.

2.6.4 Порівняння запасів стійкості та робастності

Порівняльний аналіз запасів стійкості показує, що система без регулятора не має достатніх запасів фазової та амплітудної стійкості і є непридатною для практичного використання. Система з пропорційним регулятором має обмежені запаси стійкості та є чутливою до змін параметрів об'єкта.

Натомість система з ПІ-регулятором забезпечує необхідні запаси фазової та амплітудної стійкості, що підвищує її робастність до параметричної невизначеності та дії збурень. Це є особливо важливим для САР РЖВ парогенератора, які функціонують в умовах змінних режимів роботи енергоблоку.

Результати порівняльного частотного аналізу дозволяють зробити

висновок, що застосування ПІ-регулятора є найбільш доцільним для САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000а. ПІ-регулятор забезпечує усунення статичної похибки, формування сприятливих частотних характеристик, достатні запаси стійкості та підвищену робастність системи.

Порівняльний частотний аналіз підтверджує ефективність запропонованого підходу до синтезу ПІ-регулятора та обґрунтовує перехід до наступного етапу дослідження – імітаційного моделювання САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000а в часовій області.

2.7 Висновки до другого розділу

У другому розділі магістерської роботи розглянуто теоретичні основи частотного синтезу ПІ-регулятора для САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000А. Основну увагу зосереджено на аналізі частотних властивостей об'єкта керування, впливі структури ПІ-регулятора на частотні характеристики системи та формуванні заданих показників якості замкненої системи.

Проаналізовано структуру та передатну функцію ПІ-регулятора, показано роль пропорційної та інтегральної складових у формуванні керуючого сигналу. Встановлено, що ПІ-регулятор є доцільним вибором для САР РЖВ з інтегровальними властивостями, оскільки забезпечує нульову статичну похибку та дозволяє формувати сприятливі частотні характеристики замкненої системи.

У результаті аналізу частотних характеристик об'єкта керування РЖВ встановлено, що він має несприятливі АЧХ та ФЧХ властивості, зумовлені інерційністю, інтегровальним характером та наявністю запізнення. Показано, що без використання регулятора система є нестійкою і не може забезпечити допустимі показники якості регулювання.

Досліджено вплив ПІ-регулятора на частотні характеристики САР РЖВ. Показано, що введення ПІ-регулятора дозволяє цілеспрямовано змінювати форму логарифмічних АЧХ та ФЧХ, забезпечувати необхідну частоту зрізу та підвищувати запас фазової стійкості системи. Встановлено, що правильний

вибір параметрів ПІ-регулятора є вирішальним фактором у досягненні заданих показників якості.

У розділі сформульовано підхід до формування заданих частотних характеристик замкненої системи на основі методу Боде. Обґрунтовано вибір частоти зрізу, інтегральної сталої часу та коефіцієнта підсилення ПІ-регулятора з урахуванням компромісу між швидкодією та стійкістю системи. Показано, що застосування частотного синтезу дозволяє забезпечити достатні запаси фазової та амплітудної стійкості.

Проведено аналіз стійкості системи за частотними критеріями, зокрема за критерієм Найквіста та за запасами стійкості. Встановлено, що синтезований ПІ-регулятор забезпечує робастність системи автоматичного регулювання рівня до дії збурень і параметричної невизначеності об'єкта керування.

Виконано порівняльний частотний аналіз системи без регулятора, з пропорційним регулятором та з ПІ-регулятором. Результати аналізу підтвердили, що саме ПІ-регулятор забезпечує найкраще поєднання точності регулювання, стійкості та швидкодії, а також дозволяє ефективно компенсувати негативний вплив збурень.

Таким чином, у другому розділі сформовано теоретичну основу для практичної реалізації САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000а. Отримані результати є вихідними даними для третього розділу, в якому виконується імітаційне моделювання синтезованої системи в середовищі MATLAB/Simulink та досліджуються перехідні процеси в часовій області.

3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ЖИВИЛЬНОЇ ВОДИ

3.1 Мета та загальна постановка імітаційного моделювання

Імітаційне моделювання є важливим етапом дослідження САР, який дозволяє перевірити працездатність синтезованих алгоритмів керування в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації. На відміну від суто аналітичного аналізу, імітаційне моделювання дає змогу дослідити поведінку системи в часовій області, оцінити динамічні показники якості регулювання та виявити можливі недоліки, які не завжди очевидні з аналізу частотних характеристик.

Метою імітаційного моделювання у даній роботі є перевірка ефективності синтезованого ПІ-регулятора РЖВ парогенератора ПГВ-1000а та підтвердження результатів частотного аналізу, виконаного у другому розділі. Імітаційне моделювання дозволяє комплексно оцінити якість автоматичного регулювання РЖВ при різних режимах роботи системи, зокрема при зміні завдання та дії збурень.

Основними завданнями імітаційного моделювання є:

- перевірка стійкості замкненої системи автоматичного регулювання рівня в часовій області;
- дослідження перехідних процесів при ступінчастій зміні заданого рівня живильної води;
- оцінювання реакції системи на збурювальні впливи, зокрема на зміну витрати пари;
- порівняння динамічних характеристик системи без регулятора та з ПІ-регулятором;
- підтвердження відповідності отриманих результатів вимогам до якості регулювання, сформульованим у першому розділі.

Як середовище для імітаційного моделювання в роботі використовується програмний комплекс MATLAB/Simulink, який є стандартним інструментом для дослідження САР. Simulink дозволяє реалізувати математичну модель об'єкта керування у вигляді структурної схеми з типових динамічних ланок, а також легко змінювати параметри регулятора та умови експериментів.

Загальна структура імітаційної моделі САР РЖВ представлена на рис. 3.1. Модель включає блок формування заданого значення рівня, суматор для обчислення похибки регулювання, ПІ-регулятор, модель об'єкта керування (парогенератора ПГВ-1000а), а також канал зворотного зв'язку та канал дії збурень.

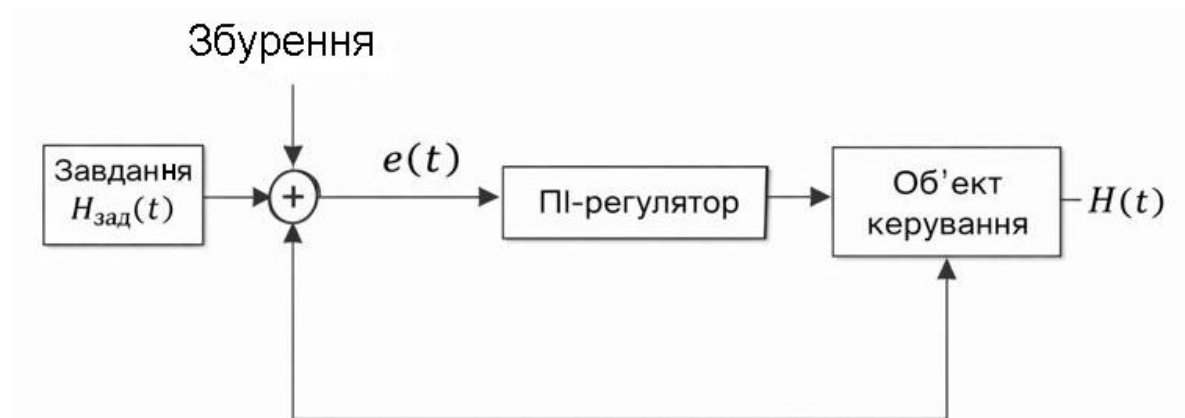


Рисунок 3.1 – Концептуальна схема Simulink-моделі САР РЖВ

Заданий рівень $H_{\text{зад}}(t)$ формується у вигляді ступінчастого сигналу, що дозволяє дослідити перехідні процеси системи. Сигнал похибки визначається як різниця між заданим та фактичним рівнями і подається на вхід ПІ-регулятора. Регулятор формує керуючий сигнал $u(t)$, який відповідає зміні витрати живильної води або положення регулюючого клапана.

Модель об'єкта керування реалізує лінеаризовану динаміку каналу регулювання рівня, отриману у першому розділі, з урахуванням інтегровальних властивостей, інерційності та запізнення. Окремо передбачено введення збурювального впливу, що моделює зміну витрати пари, яка є основним

збуренням у реальних умовах експлуатації парогенератора.

Для оцінювання результатів моделювання в системі використовуються блоки спостереження (Scope), які дозволяють аналізувати часові залежності рівня $H(t)$ та керуючого сигналу $u(t)$. На основі цих графіків оцінюються такі показники якості, як час встановлення, величина перерегулювання, наявність або відсутність статичної похибки, а також характер перехідних процесів.

Одним із ключових експериментів імітаційного моделювання є дослідження реакції системи на зміну заданого рівня. Типовий перехідний процес при ступінчастій зміні завдання наведено на рис. 3.2. Порівняння перехідних процесів для системи без регулятора та з ПІ-регулятором дозволяє наочно продемонструвати ефективність застосування синтезованого регулятора.

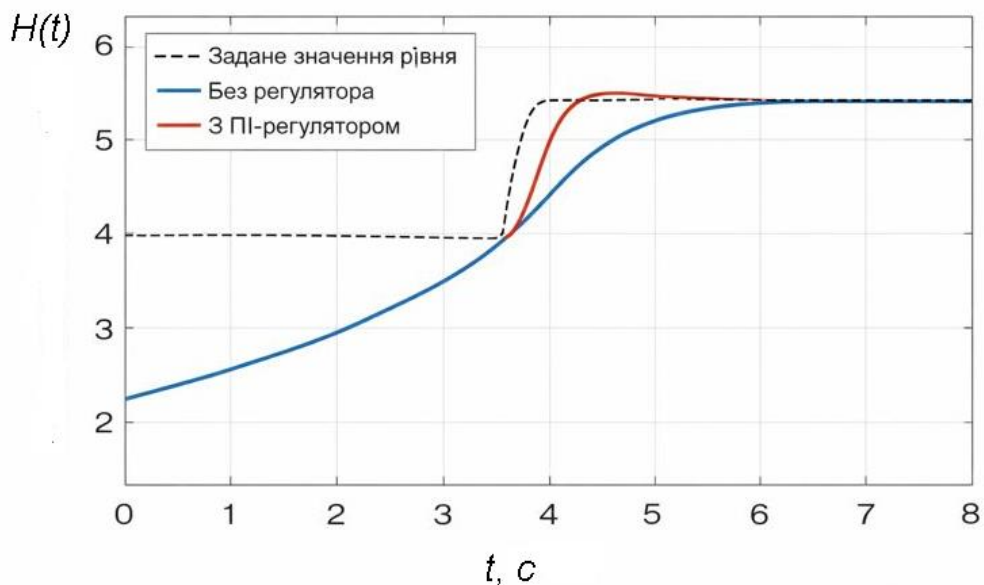


Рисунок 3.2 – Перехідний процес при ступінчастій зміні завдання

Крім того, важливим аспектом є дослідження реакції системи на збурювальні впливи. Для цього у модель вводиться ступінчаста зміна витрати пари, а аналізується динаміка відновлення рівня живильної води. Типова реакція системи на збурення наведена на рисунку 3.3.

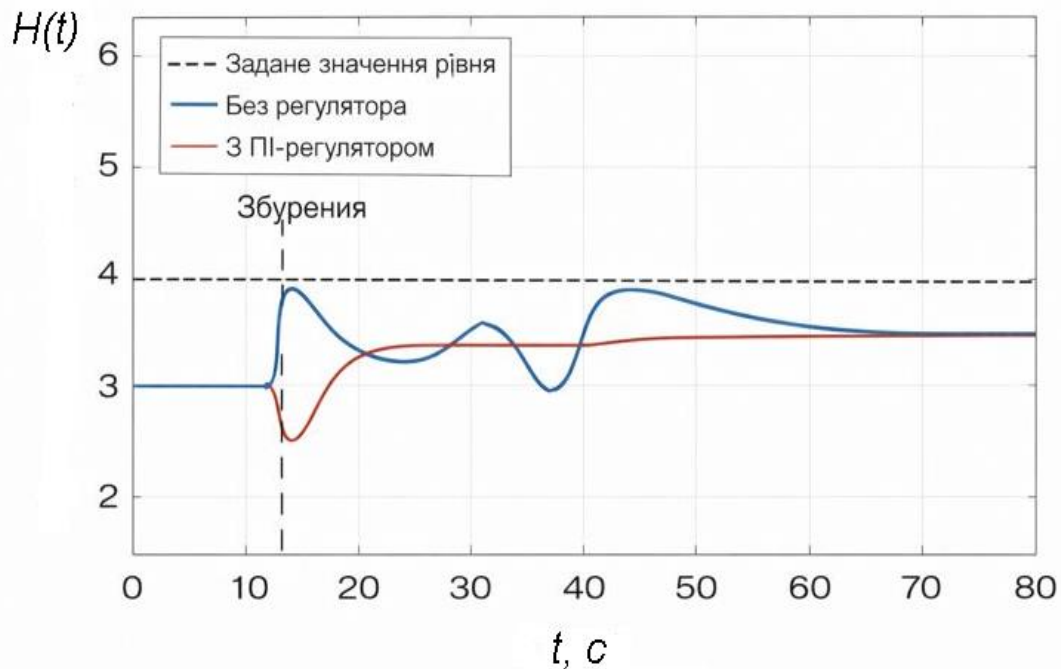


Рисунок 3.3 – Реакція САР РЖВ на збурення

Загальна постановка імітаційного моделювання передбачає комплексне дослідження поведінки САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000а в часовій області. Результати моделювання використовуються для підтвердження правильності вибору структури та параметрів ПІ-регулятора, а також для оцінювання відповідності системи вимогам до якості, стійкості та робастності, сформульованим у попередніх розділах роботи.

3.2 Побудова структурної Simulink-моделі об'єкта керування

Побудова структурної Simulink-моделі об'єкта керування є ключовим етапом імітаційного моделювання САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000а. Метою цього етапу є створення адекватної динамічної моделі, яка відтворює основні властивості реального об'єкта керування та дозволяє коректно дослідити вплив ПІ-регулятора на поведінку системи в часовій області.

Як було показано у першому розділі, канал регулювання РЖВ після лінеаризації може бути поданий у вигляді інерційного об'єкта з інтегрувальними властивостями та чистим запізненням. Така структура добре

піддається реалізації в середовищі MATLAB/Simulink шляхом каскадного з'єднання стандартних динамічних блоків.

Структурна Simulink-модель об'єкта керування формується як послідовне з'єднання таких основних елементів:

- коефіцієнта підсилення, що враховує статичні властивості об'єкта;
- інтегрувальної ланки, яка відображає накопичувальний характер рівня;
- інерційної ланки першого порядку, що описує теплогідравлічну інерційність процесу;
- ланки чистого запізнення, яка моделює транспортні та теплові затримки.

Загальна структурна схема об'єкта керування в складі САР (рис. 3.1), де об'єкт представлено у вигляді окремого блоку з передатною функцією $G(s)$.

У Simulink кожна з перелічених ланок реалізується окремим стандартним блоком:

- Gain – для задання коефіцієнта підсилення K ;
- Integrator (1/s) – для реалізації інтегрувальних властивостей рівня;
- Transfer Fcn – для інерційної ланки першого порядку;
- Transport Delay – для моделювання чистого запізнення.

Такий підхід забезпечує наочність моделі та спрощує подальше коригування параметрів при дослідженні різних режимів роботи.

Інтегрувальна ланка відіграє ключову роль у моделі, оскільки саме вона відображає фізичну сутність процесу формування РЖВ. Зміна витрати живильної води або витрати пари призводить до накопичення або зменшення маси води в корпусі парогенератора, що і описується інтегруванням різниці витрат.

Інерційна ланка першого порядку моделює теплогідравлічні процеси, пов'язані з теплообміном і розподілом фаз у пароводяній суміші. Наявність цієї ланки зумовлює плавний характер перехідних процесів і обмежує швидкодію системи.

Комбінація інтегровальної та інерційної ланок дозволяє отримати динаміку, характерну для реального парогенератора, що підтверджується формою перехідних процесів (рис. 3.2).

Чисте запізнення в моделі реалізується блоком Transport Delay, який дозволяє врахувати часову затримку між зміною керуючого сигналу та реакцією рівня. Запізнення істотно впливає на стійкість системи та форму перехідних процесів, що було детально проаналізовано у другому розділі.

Для дослідження впливу збурень у модель вводиться додатковий вхід, через який задається збурювальний сигнал, що моделює зміну витрати пари. Збурення підсумовується з керуючим впливом перед інтегровальною ланкою, що відповідає фізичній природі процесу.

Аналіз реакції системи на збурення (рис. 3.3) дозволяє оцінити здатність САР компенсувати зовнішні впливи та відновлювати заданий рівень.

Для перевірки адекватності побудованої Simulink-моделі об'єкта керування виконано аналіз її реакції на типові тестові впливи. Зокрема, досліджено:

- реакцію рівня на ступінчасту зміну керуючого сигналу;
- вплив збурення при відсутності регулятора;
- порівняння динаміки моделі з очікуваними властивостями, отриманими з частотного аналізу.

Порівняння перехідних процесів для системи без регулятора та з ПІ-регулятором (рис. 3.2) підтверджує, що модель коректно відтворює інтегровальний характер об'єкта та його інерційність. Крім того, частотні характеристики відкритої системи, узгоджуються з аналітичними результатами, отриманими у другому розділі.

У даному підрозділі запропонована модель є зручною для подальшого дослідження впливу параметрів ПІ-регулятора, аналізу перехідних процесів і оцінювання робастності САР.

3.3 Реалізація ПІ-регулятора в Simulink та налаштування параметрів

Реалізація ПІ-регулятора в середовищі MATLAB/Simulink є важливим етапом імітаційного моделювання САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000а. На цьому етапі здійснюється практичне впровадження регулятора, параметри якого були синтезовані за частотними характеристиками у другому розділі, а також виконується їх уточнення з урахуванням динаміки системи в часовій області.

У Simulink ПІ-регулятор може бути реалізований двома основними способами: за допомогою стандартного блоку PID Controller з вибором режиму PI та структурною реалізацією у вигляді паралельного з'єднання пропорційної та інтегральної ланок.

У даній роботі використано другий підхід, оскільки він дозволяє наочно відобразити структуру ПІ-регулятора та чітко простежити вплив кожної складової на формування керуючого сигналу. Пропорційна частина реалізується блоком Gain з коефіцієнтом K_p , а інтегральна – блоком Integrator, перед яким встановлюється коефіцієнт $1/T_i$. Виходи обох ланок підсумовуються за допомогою блоку Sum, формуючи керуючий сигнал $u(t)$.

В структурній схемі ПІ-регулятора у складі Simulink-моделі (рис. 3.1), регулятор розташований між суматором похибки та моделлю об'єкта керування.

Сигнал похибки регулювання формується як різниця між заданим рівнем живильної води $H_{зад}(t)$ та фактичним рівнем $H(t)$. Отриманий сигнал подається на вхід ПІ-регулятора, який відповідно до закону керування формує керуючий вплив (2.2).

У Simulink цей процес відтворюється безпосередньо структурою блоків, що дозволяє наочно контролювати динаміку кожної складової керуючого сигналу.

Початкові значення при налаштуванні параметрів ПІ-регулятора K_p та T_i приймаються на основі результатів частотного синтезу, отриманих у другому розділі. Зокрема:

- коефіцієнт K_p визначається з умови досягнення одиничного підсилення відкритої системи на заданій частоті зрізу;
- інтегральна стала часу T_i обирається близькою до сталої часу інерційної ланки об'єкта керування.

Після задання початкових параметрів виконується серія модельних експериментів з метою уточнення налаштувань у часовій області. При цьому аналізуються:

- форма перехідного процесу;
- величина перерегулювання;
- час встановлення;
- наявність або відсутність статичної похибки.

З графіка перехідного процесу при ступінчастій зміні завдання для системи з ПІ-регулятором (рис. 3.2) видно, що правильно налаштований ПІ-регулятор забезпечує аперіодичний або слабкоколивальний характер перехідного процесу та повне усунення статичної похибки.

Окрему увагу під час налаштування ПІ-регулятора приділено аналізу керуючого сигналу $u(t)$. У реальних умовах виконавчий механізм (регулюючий клапан живильної води) має обмежений діапазон переміщення та швидкості, що накладає обмеження на форму керуючого сигналу.

У Simulink ці обмеження можуть бути враховані шляхом введення блоку Saturation або Rate Limiter. У межах даної роботи основна увага зосереджується на аналізі поведінки системи в номінальному режимі, однак навіть без введення жорстких обмежень аналіз графіків $u(t)$ дозволяє оцінити плавність керування та відсутність різких стрибків сигналу.

Для перевірки ефективності налаштування ПІ-регулятора виконано моделювання реакції системи на збурення, що імітує зміну витрати пари.

За результатами моделювання (рис. 3.3), видно, що система з ПІ-регулятором забезпечує швидке відновлення рівня живильної води після дії збурення та не переходить у коливальний режим.

Реалізація ПІ-регулятора в середовищі MATLAB/Simulink та його налаштування на основі частотного синтезу дозволили отримати САР ЖВ з прийнятними показниками якості. Отримані результати підтверджують, що параметри регулятора, визначені за частотними характеристиками, є коректними та забезпечують стабільну роботу системи в часовій області.

Налаштований ПІ-регулятор використовується у наступних підрозділах для проведення детального аналізу перехідних процесів, оцінювання показників якості регулювання та порівняння результатів моделювання з теоретичними висновками, отриманими у другому розділі.

3.4 Експериментальні дослідження імітаційного моделювання

Програма експериментальних досліджень імітаційного моделювання розробляється з метою всебічної перевірки працездатності САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000а з ПІ-регулятором. Вона охоплює сукупність модельних сценаріїв, які дозволяють оцінити якість регулювання в типових і критичних режимах роботи, а також підтвердити відповідність системи вимогам, сформульованим у попередніх розділах.

Проведення імітаційних експериментальних досліджень здійснюється в середовищі MATLAB/Simulink на основі структурної моделі (рис. 3.1). Для кожного експерименту задаються конкретні умови, вхідні впливи та показники якості, що підлягають аналізу.

Загальна структура програми експериментальних досліджень імітаційного моделювання включає такі основні етапи:

а) дослідження реакції системи на зміну заданого рівня. Метою першого експерименту є дослідження перехідних процесів у замкненій системі при

ступінчастій зміні заданого рівня живильної води $H_{\text{зад}}(t)$. Такий вплив є стандартним тестом для оцінювання швидкодії та точності САР. У Simulink заданий рівень формується за допомогою блоку Step, який задає миттєву зміну рівня з початкового значення до нового сталого рівня. Аналізуються часові залежності фактичного рівня $H(t)$ та похибки регулювання. Основними показниками якості, що оцінюються в цьому експерименті, є:

- 1) час встановлення;
- 2) максимальне перерегулювання;
- 3) наявність або відсутність статичної похибки;
- 4) характер перехідного процесу (аперіодичний або коливальний);

б) дослідження реакції на збурювальний вплив. Експеримент спрямований на оцінювання здатності системи автоматичного регулювання компенсувати збурювальні впливи. Як основне збурення розглядається зміна витрати пари, що є характерною для реальних умов експлуатації парогенератора. Збурення моделюється у вигляді ступінчастого сигналу, який додається до входу об'єкта керування. При цьому заданий рівень залишається сталим. Аналізується реакція рівня живильної води на збурення та швидкість відновлення заданого режиму. Основними критеріями оцінювання є:

- 1) максимальне відхилення рівня від заданого значення;
- 2) час компенсації збурення;
- 3) наявність коливань після дії збурення;

в) порівняльне дослідження системи без регулятора та з ПІ-регулятором. Метою третього експерименту є наочне порівняння динамічних властивостей системи без регулятора та системи з ПІ-регулятором. Для цього моделюються ідентичні сценарії зміни завдання та дії збурень, а результати порівнюються за основними показниками якості. Результати даного експерименту є важливим аргументом на користь доцільності застосування ПІ-регулятора для регулювання рівня живильної води парогенератора ПГВ-1000а. Порівняльний аналіз дозволяє:

1) підтвердити усунення статичної похибки при використанні ПІ-регулятора;

2) показати зменшення часу встановлення;

3) оцінити вплив регулятора на характер перехідних процесів (робастності системи).

г) дослідження стійкості та характеру перехідних процесів (робастності системи). Четвертий експеримент передбачає перевірку робастності системи шляхом варіювання параметрів моделі об'єкта керування. Зокрема, досліджується вплив зміни коефіцієнта підсилення, сталих часу та запізнення на динаміку системи. Отримані результати дозволяють зробити висновок щодо запасів стійкості та робастності системи, що є критично важливим для реальних умов експлуатації. Метою експерименту є оцінювання:

1) збереження стійкості системи;

2) зміни показників якості регулювання;

3) чутливості системи до параметричної невизначеності;

д) оцінювання робастності системи до змін параметрів об'єкта.

Для кожного етапу досліджень визначено окремий модельний експеримент, що дозволяє отримати кількісні та якісні показники роботи системи.

Для проведення імітаційних експериментальних досліджень і отримання кількісних показників якості САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000а у середовищі MATLAB/Simulink було розроблено тестову схему моделювання (рис. 3.3), яка забезпечує гнучке формування вхідних впливів, введення збурень, а також наочне спостереження і реєстрацію основних сигналів системи.

Тестова схема Simulink-моделі побудована на основі структурної моделі САР РЖВ та включає такі основні функціональні блоки:

– блок формування заданого рівня живильної води;

– блок формування збурювального впливу;

– ПІ-регулятор;

- модель об'єкта керування;
- засоби спостереження та реєстрації сигналів.

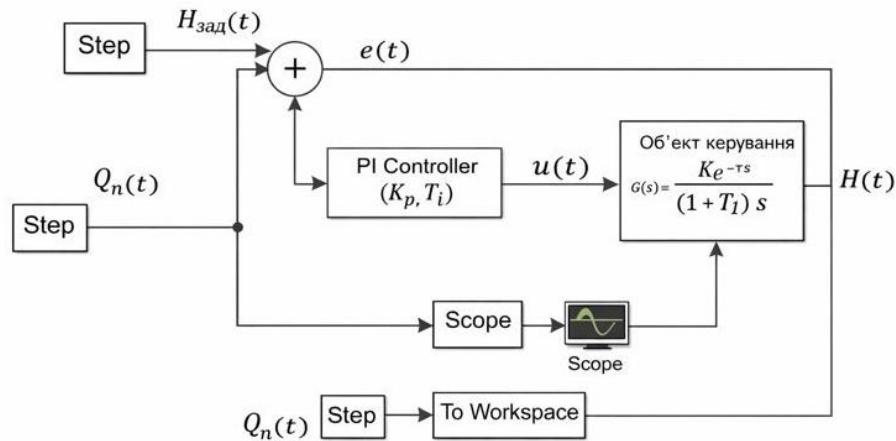


Рисунок 3.3 – Тестова схема Simulink-моделювання

У тестовій схемі заданий рівень формується за допомогою блоку Step або Signal Builder, що дозволяє реалізувати різні сценарії зміни завдання. Збурювальний вплив, який імітує зміну витрати пари, вводиться у відповідній точці моделі об'єкта керування.

Для аналізу поведінки САР у часовій області у Simulink організовано спостереження за такими основними сигналами:

- заданий рівень $H_{\text{зад}}(t)$;
- фактичний РЖВ $H(t)$;
- похибка регулювання $\varepsilon(t)$;
- керуючий сигнал $u(t)$;
- збурювальний сигнал $Q_{\text{п}}(t)$.

Спостереження за сигналами здійснюється за допомогою стандартних блоків Scope та To Workspace, що дозволяє як візуалізувати сигнали у режимі реального часу, так і зберігати їх для подальшого аналізу та побудови графіків.

Основними графіками, які використовуються для аналізу результатів моделювання, є:

- графіки перехідних процесів рівня $H(t)$;

- графіки керуючого сигналу $u(t)$;
- графіки реакції системи на збурення.

Аналіз графіків (рис. 3.2 – 3.3) дозволяє оцінити швидкодію, стійкість і точність системи.

Додатково у процесі моделювання аналізується керуючий сигнал $u(t)$, що дозволяє оцінити його плавність і відсутність різких стрибків, які могли б негативно впливати на роботу виконавчих механізмів.

Для узагальнення результатів експериментальних досліджень імітаційного моделювання сигнали, збережені у робочому просторі MATLAB, використовуються для обчислення кількісних показників якості регулювання. На основі отриманих даних сформульовані табл. 3.1 – 3.2, що містять основні параметри перехідних процесів.

Таблиця 3.1 – Основні сигнали, що контролюються у тестовій схемі

Сигнал	Позначення	Призначення
заданий рівень	$H_{\text{зад}}(t)$	формування бажаного режиму
фактичний рівень	$H(t)$	оцінювання якості регулювання
похибка	$\varepsilon(t)$	аналіз точності регулювання
керуючий сигнал	$u(t)$	оцінка навантаження на виконавчий механізм
Збурення	$Q_{\text{п}}(t)$	імітація зміни витрати пари

Таблиця 3.2 – Показники якості, що визначаються за результатами моделювання

Показник	Опис
час встановлення	час до досягнення сталого режиму
перерегулювання	максимальне перевищення рівня
статична похибка	відхилення у сталому режимі
максимальне відхилення при збуренні	міра робастності системи

Наведені таблиці дозволяють систематизувати результати моделювання та забезпечують зручність подальшого аналізу і порівняння різних режимів роботи системи.

Розроблена програма імітаційних експериментальних досліджень забезпечує комплексне дослідження САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000а. Вона дозволяє оцінити якість регулювання в різних режимах, перевірити стійкість і робастність системи, а також підтвердити ефективність синтезованого ПІ-регулятора. Запропонована організація спостереження сигналів забезпечує наочний аналіз динаміки системи, формування графіків і таблиць показників якості.

3.5 Аналіз результатів імітаційного моделювання та оцінювання показників якості

У даному підрозділі наведено аналіз результатів імітаційного моделювання системи автоматичного регулювання рівня живильної води парогенератора ПГВ-1000а, отриманих у середовищі MATLAB/Simulink відповідно до програми експериментів, описаної у підрозділі 3.4. Аналіз виконується на основі часових графіків перехідних процесів і кількісних показників якості регулювання.

Основна увага приділяється порівнянню роботи системи без регулятора та з ПІ-регулятором, синтезованим за частотними характеристиками.

З аналізу графіків (рис. 3.2) видно, що система без регулятора характеризується повільною реакцією, значною статичною похибкою та незадовільною динамікою, що унеможливує її практичне застосування.

Введення ПІ-регулятора істотно змінює динамічні властивості системи. Перехідний процес із ПІ-регулятором має аперіодичний або слабкоколивальний характер, характеризується відсутністю статичної похибки та значно меншим часом встановлення. Це підтверджує правильність вибору структури та параметрів регулятора.

На рис. 3.3 показано реакцію САР РЖВ на збурювальний вплив, що імітує зміну витрати пари. У системі без регулятора збурення призводить до тривалого відхилення рівня від заданого значення.

Система з ПІ-регулятором забезпечує ефективне придушення збурення та швидке відновлення заданого рівня. Максимальне відхилення рівня є обмеженим, а після компенсації збурення коливання практично відсутні. Це свідчить про високу робастність системи та її здатність працювати в умовах змінних навантажень.

Для узагальнення результатів імітаційного моделювання виконано оцінювання основних показників якості регулювання. До них належать:

- час встановлення $t_{вст}$;
- максимальне перерегулювання σ ;
- статична похибка $\varepsilon_{ст}$;
- характер перехідного процесу.

Результати оцінювання основних показників якості регулювання РЖВ наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняльні показники якості регулювання РЖВ

Показник	Без регулятора	З ПІ-регулятором
час встановлення, с	великий (необмежений)	малий
перерегулювання, %	–	незначне
статична похибка	наявна	відсутня
характер процесу	повільний, нестійкий	аперіодичний / слабкоколивальний
робастність	низька	висока

Аналіз даних (табл. 3.3) підтверджує, що застосування ПІ-регулятора дозволяє суттєво покращити всі основні показники якості автоматичного регулювання РЖВ.

3.5.4 Аналіз частотних характеристик у контексті часових результатів

Отримані часові характеристики узгоджуються з результатами частотного аналізу, наведеними у другому розділі. Зокрема, сформовані ЛАЧХ та ФЧХ (рис. 3.4 – 3.5) забезпечують достатній запас фазової та амплітудної стійкості, що безпосередньо відображається на характері перехідних процесів у часовій області.

В цілому, результати імітаційного моделювання підтверджують ефективність частотного синтезу ПІ-регулятора та правильність обраних параметрів.

Проведений аналіз результатів імітаційного моделювання дозволяє зробити такі основні висновки:

- система без регулятора не забезпечує необхідної якості регулювання рівня;
- застосування ПІ-регулятора повністю усуває статичну похибку;
- перехідні процеси мають прийнятний характер і відповідають вимогам до швидкодії та стійкості;
- система є робастною до збурювальних впливів та зміни параметрів об'єкта.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування ПІ-регулятора, синтезованого за частотними характеристиками, для автоматичного регулювання РЖВ парогенератора ПГВ-1000а.

3.6 Висновки до третього розділу

У третьому розділі кваліфікаційної роботи виконано імітаційне моделювання САР РЖВ парогенератора ПГВ-1000а в середовищі MATLAB/Simulink.

Побудовано структурну Simulink-модель об'єкта керування, яка адекватно відтворює динамічні властивості реального технологічного процесу. Модель враховує інтегровальний характер каналу регулювання рівня,

інерційність теплогідравлічних процесів і наявність запізнення, що є визначальними факторами при дослідженні систем регулювання парогенераторів.

Реалізовано ПІ-регулятор у структурному вигляді та виконано його налаштування на основі параметрів, визначених методом частотного синтезу. Уточнення параметрів регулятора в часовій області дозволило досягти аперіодичного або слабкоколивального характеру перехідних процесів, усунути статичну похибку та забезпечити прийнятний компроміс між швидкістю і стійкістю системи.

Розроблено програму імітаційних експериментів, яка включає дослідження реакції системи на зміну заданого рівня, аналіз впливу збурювальних факторів, порівняльне дослідження системи без регулятора та з ПІ-регулятором, а також перевірку робастності при зміні параметрів моделі. Проведення цих експериментів дозволило комплексно оцінити роботу системи в різних режимах.

За результатами аналізу перехідних процесів встановлено, що система з ПІ-регулятором забезпечує значно кращі показники якості регулювання порівняно з системою без регулятора. Зокрема, досягнуто повного усунення статичної похибки, зменшення часу встановлення та ефективної компенсації збурень, що імітують зміну витрати пари.

Організація тестової схеми Simulink-моделювання та системи спостереження сигналів дозволила отримати наочні графіки РЖВ, керуючого сигналу та похибки регулювання, а також сформулювати узагальнюючі таблиці показників якості. Аналіз керуючого сигналу підтвердив його плавний характер і відсутність різких стрибків, що є важливим з точки зору практичної реалізації системи на реальному об'єкті.

Отримані результати імітаційного моделювання повністю узгоджуються з висновками частотного аналізу, виконаного у другому розділі. Це підтверджує правильність вибору структури ПІ-регулятора та доцільність застосування частотних методів синтезу для САР РЖВ парогенераторів типу ПГВ-1000А.

4 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНИХ УМОВ ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці в лабораторії

Дослідження з кваліфікаційної роботи проводилися в лабораторії розміром: 4,2 м × 3,5 м × 3,2 м. У приміщенні працює 1 людина. Площа приміщення становить 14,7 м², об'єм – 47,04 м³. На одне робоче місце припадає вся площа і об'єм приміщення, відповідає нормативному документу НПАОП 0.00-1.28-10 [23].

Було визначено, згідно з ДСТУ 2293-99, що в лабораторії існують небезпечні та шкідливі фактори:

- знижена рухливість повітря;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини (небезпечний фактор).

Домінуючий шкідливий виробничий фактор – недолік штучного освітлення.

4.2 Промислова безпека в лабораторії

В лабораторії використовується трифазна чотирьохдротова мережа змінного струму напругою 220/380 В, частота 50 Гц, режим нейтралі – глухозаземлена. Згідно НПАОП 40.1-1.21-98, приміщення належить до класу приміщень без підвищеної небезпеки. Умови, які створюють підвищену та особливу небезпеку (підвищена вологість, струмопровідна пил, струмопровідні підлоги, можливість одночасного дотику до заземлених металоконструкцій будівлі і металевих поверхонь електроприладів), відсутні.

Для захисту працівників від ураження електричним струмом в лабораторії, згідно НПАОП 40.1-1.32-01, використовується система заземлення TN-C-S типу та захисне відключення.

Необхідно проводити контроль ізоляції відповідно до вимог ПУЕ-2011. Контроль проводити між нульовим та фазним провідниками, а також між фазами. Опір ізоляції не менше 500 кОм на фазу. Контроль проводити не рідше 1 разу на рік при відключеному електроживленні.

Електропроводка в приміщенні виконана з можливістю заміни: прихована в каналах будівельних конструкцій, що відповідає вимогам НПАОП 40.1-1.32-01.

4.3 Виробнича санітарія і гігієна праці

Роботи, що виконуються в приміщенні лабораторії, проводяться сидячи та не потребують систематичних важких фізичних навантажень, підняття та перенесення важких речей. В таких умовах енерговитрати працівників складають не більше 120 ккал/год. Отже, виконувані роботи відносяться до категорії 1а.

Згідно ДСН 2.2.6.042-99 та категорії виконуваних робіт, для приміщення встановлені наступні оптимальні норми мікроклімату: температура в літній період 23 – 25 °С, в зимовий період 22 – 24 °С, відносна вологість повітря 40 – 60 %, швидкість руху повітря $\leq 0,1$ м/с.

Щоб забезпечити необхідні норми мікрокліматичних параметрів та чистоти повітря в лабораторії використовується кондиціонування. Підтримка зазначених параметрів в холодний період здійснюється системою опалення відповідно до СНиП 1.04.05-91.

Ще одним шкідливим фактором є розумове перенапруження. Основні заходи щодо захисту від розумового перенапруження людини:

– регулярно, через кожні 40 – 50 хв. робочого часу робити технологічні перерви, для розрядки розумового напруження;

– проведення фізичних вправ (зарядки, розминки) під час перерви.

Рівень загального штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності.

Розрахунок штучного освітлення проводиться методом коефіцієнта використання світлового потоку. Мета перевірного розрахунку – визначення фактичної освітленості в приміщенні. Основна розрахункова формула методу коефіцієнта використання світлового потоку:

$$F = \frac{E_f k_z S_z}{n \eta \gamma N}, \quad (4.1)$$

де E_f – фактична освітленість, лк;

S – площа освітлюваного приміщення, що залежить від розмірів приміщення;

z – коефіцієнт нерівномірності освітленості ($z=1,1$);

k_z – коефіцієнт запасу, що враховує запилення світильників та знос джерел запасу світла в процесі експлуатації;

N – кількість світильників в ряду;

η – коефіцієнт використання світлового потоку ламп;

γ – коефіцієнт затінення ($\gamma=0,8$);

n – кількість рядів світильників;

У таблиці 4.1 наведено вихідні дані.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані

F_l	n_l	N	η	N	k_z
1600	2	2	0.5	4	1.5

Фактична освітленість складає:

$$E_f = \frac{Fm\eta\gamma N}{k_z S_z}, \quad (4.2)$$

$$F = F_i n_i. \quad (4.3)$$

$$F = 1600 \cdot 2 = 3200 \text{ Лк.}$$

$$E_f = \frac{3200 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot 4 \cdot 0,88}{1,5 \cdot 14,07 \cdot 1,1} = 441 \text{ Лк.}$$

За результатами розрахунку отримали освітленість складає 441 лк, що належить допустимому діапазону 200 – 500 лк. У приміщенні нестачі штучного освітлення немає.

4.4 Пожежна безпека лабораторії

Приміщення лабораторії за вибухо- та пожежною небезпекою відноситься до категорії В за НАПБ Б.02.002-2007, оскільки в приміщеннях лабораторії знаходяться тверді горючі матеріали [23]. Основними причинами виникнення пожежі можна вважати:

- випадкове пошкодження ізоляції струмоведучих провідників;
- незадовільний стан вилок, розеток;
- перенавантаження дротів живлення.

Лабораторія розташована в будівлі II ступеня вогнестійкості відповідно до ДБН В.1.1.7-2016 .

За пожежонебезпекою, згідно з ПУЕ-2011, лабораторія належить зоні П – Па [17]. У ній присутні тверді горючі речовини, папір, меблі, одяг.

Заходи пожежної профілактики відповідно до ГОСТ 11.1.004-91. ССБТ, до яких входять: застосування системи запобігання пожежі, протипожежного захисту, виконання організаційних заходів.

Згідно НАПБ Б02.001-2004 в приміщеннях розміщені первинні засоби пожежогасіння – вуглекислотний вогнегасник ВВК-1,4 з розрахунку 1 вогнегасник на 3 ПК, але не менше 1 на приміщення [23].

Згідно ДБН В.1.5.56-2010 в приміщеннях встановлено точковий димової-пожежний сповіщувач ДПП-1, який контролює площу до 86 м².

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розв'язано актуальну науково-практичну задачу щодо підвищення якості та надійності автоматичного регулювання рівня живильної води в корпусі парогенератора ПГВ-1000а шляхом розроблення ПІ-регулятора з використанням частотних методів синтезу.

У ході виконання роботи проведено комплексний аналіз парогенератора ПГВ-1000а як об'єкта автоматичного керування. Встановлено, що процес регулювання рівня живильної води характеризується значною інерційністю, інтегровальними властивостями, наявністю транспортних і динамічних запізнень, а також суттєвим впливом збурень, основним з яких є зміна витрати пари. Показано, що нелінійні теплогідравлічні ефекти набухання та усадки рівня істотно ускладнюють динамічну поведінку системи в перехідних режимах.

Побудовано спрощену лінеаризовану математичну модель каналу регулювання рівня живильної води, яка адекватно відображає основні динамічні властивості об'єкта в області малих відхилень. Отримана модель представлена у вигляді послідовного з'єднання інтегровальної, інерційної ланок та ланки чистого запізнення, що створює передумови для застосування частотних методів аналізу та синтезу системи автоматичного керування.

На основі аналізу лінеаризованої моделі сформульовано вимоги до системи автоматичного регулювання рівня, зокрема щодо забезпечення нульової статичної похибки, достатніх запасів фазової стійкості, обмеження перерегулювання, прийнятної швидкодії та робастності до змін параметрів об'єкта. Обґрунтовано доцільність використання ПІ-регулятора як базового елемента системи керування.

У роботі застосовано частотний підхід до синтезу ПІ-регулятора, який дозволяє цілеспрямовано формувати логарифмічні амплітудно-частотні та фазо-частотні характеристики замкненої системи. Запропонований підхід

забезпечує необхідні запаси стійкості та підвищує робастність системи автоматичного керування в умовах дії збурень і параметричної невизначеності.

Розроблено імітаційну модель системи автоматичного регулювання рівня живильної води парогенератора ПГВ-1000а в середовищі MATLAB/Simulink, що дозволило дослідити перехідні процеси, реакцію системи на збурення та оцінити основні показники якості регулювання. Результати моделювання підтвердили ефективність запропонованого ПІ-регулятора та його здатність забезпечувати стабільну роботу системи в широкому діапазоні режимів експлуатації.

Отримані в роботі результати мають практичну цінність і можуть бути використані при проєктуванні та модернізації систем автоматичного регулювання рівня парогенераторів енергоблоків з реакторами типу ВВЕР-1000.

Таким чином, поставлену мету магістерської роботи досягнуто, а отримані результати підтверджують доцільність використання частотних методів синтезу ПІ-регуляторів для підвищення якості та надійності автоматичного регулювання РЖВ в парогенераторах типу ПГВ-1000а.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» /Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2023. – 49 с.

2. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. № 143. – Режим доступу: https://nure.ua/wpcontent/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-dijurishennja-vchenoi-radi-universitetu.pdf.

3. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація «Звіти у сфері науки і техніки». Структура та правила оформлювання. / В. Земцева; Ю. Поліщук, канд. фіз.-мат. наук; Р. Санченко, канд. техн. наук; Л. Шрамко; А. Ямчук (науковий керівник) ДП «УкрНДНЦ» від 22 червня 2015р. № 61 з 2017-07-01.

4. Tverdokhlib Kirill. Analysis of the steam generator control system // III International scientific and practical conference “Evolving Science: Theories, Discoveries and Practical Outcomes” – (February 03-05, 2025. Zurich, Switzerland). European Open Science Space. – 2025. pp. 237-240. url: https://www.eoss-conf.com/wp-content/uploads/2025/02/Zurich_Switzerland_3.02.25.pdf

5. Nuclear Power Reactors in the World / Reference Data Series No. 2, 2020 Edition. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2020. – 81 p.

6. Бабічев В. П. Атомні електричні станції: основи проектування та експлуатації.– Київ: Енергоатом, 2015.– 360 с.

7. Єфімов В. М. Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС. – Київ: Вид-во "Наукова думка", 2008. – 350 с.
8. S. Alyokhina, I. Nevliudov, Yu. Romashov, "Safe Transportation of Nuclear Fuel Assemblies by Means of Wheeled Robotic Platforms", Nuclear and Radiation Safety, vol. 3(91), pp. 43-50, 2021.
9. Система управління живильною водою парогенераторів енергоблоку №3: інструкція з експлуатації / Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, ДП «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом», ВП «Південно-Українська АЕС», Цех теплової автоматики та вимірів. – Південноукраїнськ, 2013.– ИЭЭ.3.0011.0509.– 63 с.
10. ДСТУ 3440-96. Системи енергетичні. Терміни та визначення. – Київ: Держстандарт України, 1997. – 45 с.
11. Шпаковський В. С. Системи автоматичного керування енергетичними установками. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 284 с.
12. IEC 61513:2011. Nuclear power plants — Instrumentation and control important to safety – General requirements for systems.
13. Сердюк В. П., Кравченко О. П. Автоматизація теплотехнічних процесів. – Харків: ХНУРЕ, 2010. – 312 с.
14. Åström K. J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. – 2nd ed. – Research Triangle Park : ISA, 1995. — 343 p.
15. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. — 13th ed. — Boston : Pearson Education, 2017. — 1104 p.
16. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A., Doyle F. J. Process Dynamics and Control. – 3rd ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2011. – 592 p.
17. IAEA. Instrumentation and Control Systems Important to Safety in Nuclear Power Plants : Safety Guide No. SSG-39. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 2016. – 188 p.
18. Franklin G. F., Powell J. D., Emami-Naeini A. Feedback Control of Dynamic Systems. – 7th ed. – Boston : Pearson, 2015. – 928 p.

19. Кунцевич В. М. Частотные методы анализа и синтеза систем управления. – Киев : Наукова думка, 1988. – 364 с.
20. Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. – 2nd ed. – Chichester : John Wiley & Sons, 2005. – 592 p.
21. MathWorks. MATLAB & Simulink User's Guide. – Natick, MA: The MathWorks, Inc., 2023.
22. MathWorks. Simulink – Dynamic System Simulation for MATLAB: User's Guide. – Natick, MA : The MathWorks, Inc., 2023.
23. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Організація керування умовами праці» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 108 с.