

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

Перший (бакалаврський)

(рівень вищої освіти)

Моделювання частотних характеристик парогенератора з ПІД-регулятором живильної води для АЕС ВВЕР

(тема)

Виконав:

студент 4 курсу, групи АКТАКІТ-20-1

Твердохліб К. Б.

(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. каф. КІТАМ Ромашов Ю. В.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАМ

(підпис)

Невлюдов І. Ш.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ
 Кафедра _____ КІТАР
 Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський)
 Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
 технології Тип програми _____
 Освітньо-професійна _____
 Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)«26» червня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Твердохлібу Кіріллу Борисовичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання частотних характеристик парогенератора з ПД-
регулятором живильної води для АЕС ВВЕР

Затверджена наказом по університету від _____ 03.06.2024 №544 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 26 червня 2024

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Частотні характеристики; _____

3.2 Парогенератор ПГВ-1000; _____

3.2 Реакторна установка ВВЕР-1000; _____

3.4 ПД-регулятор; _____

3.5 Математична модель у вигляді диференційного рівняння. _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Парогенератори реакторної установки ВВЕР-1000. _____

4.1 Загальний опис конструкції парогенератору ПГВ-1000. _____

4.3 Системи контролю парогенератору ПГВ-1000. _____

4.4 Математична модель рівня живильної води в парогенераторі. _____

4.5 Вплив ПД-регулятора на живлення парогенератора. _____

4.6 Математична модель у вигляді звичайного диференційного рівняння _____

4.7 Висновок. _____

5. Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації

PowerPoint(*.pptx) – 8 с. Формату А4

6. Консультанти розділів роботи

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	Аналіз принципової схеми реакторної установки ВВЕР-1000	03.05.2024	Виконано
2	Загальний опис конструкції парогенератору ПГВ-1000	10.05.2024	Виконано
3	Аналіз системи контролю парогенератору ПГВ-1000	17.05.2024	Виконано
4	Аналіз синтезу адаптивної системи автоматичного регулювання	24.05.2024	Виконано
5	Розрахувати математична модель рівня живильної води в парогенераторі	31.05.2024	Виконано
6	Провести розрахунки впливу ПД-регулятора на живлення парогенератора	07.06.2024	Виконано
7	Аналіз частотних характеристик	14.06.2024	Виконано
8	Зробити комп'ютерне моделювання частотних характеристик	21.06.2024	Виконано

Дата видачі завдання _____

Студент _____
(підпис)Твердохліб К. Б.
(прізвище, ініціали)Керівник роботи _____
(підпис)Ромашов Ю. В.
(посада, прізвище, ініціали)

Я, як студент(ка) ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"23 " червня 2024 р.

Твердохліб К. Б.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 67 с., 3 табл., 2 дод., 11 джерел.

РЕАКТОРНА УСТАНОВКА ВВЕР-1000, ПАРОГЕНЕРАТОР ПГВ-1000, ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПІД-РЕГУЛЯТОР, АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ФАЗОВО-ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ЖИВИЛЬНА ВОДА.

Об'єкт роботи: система управління живильною водою парогенератора ПГВ-1000.

Мета роботи: провести аналіз впливу частотних характеристик на процес живлення парогенераторів живильною водою та виконати моделювання частотних характеристик.

Предмет роботи: частотні характеристики системи управління живильною водою парогенератора ПГВ-1000 та її поведінка при різних збуреннях.

Методи роботи: аналіз впливу частотних характеристик для подальшого комп'ютерного моделювання.

Отримані результати можуть бути використані для покращення існуючих систем управління подачею живильної води в парогенераторах з ПД-регуляторами та проектування нових, більш ефективних та надійних систем.

ABSTRACT

The explanatory note contains: 67 pages, 3 tables, 2 appendices, 11 sources.

REACTOR INSTALLATION VVER-1000, STEAM GENERATOR PGV-1000, FREQUENCY CHARACTERISTICS, SUB-REGULATOR, AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS, PHASE-FREQUENCY CHARACTERISTICS, FEED WATER.

Object of work: the feed water control system of the PGV-1000 steamgenerator.

The purpose of the work: to analyze the effect of frequency characteristics on the process of feeding steam generators with feed water and to perform modeling of frequency characteristics.

Subject of work: frequency characteristics of the feed water control system of the PGV-1000 steam generator and its behavior under various disturbances.

Work methods: analysis of the influence of frequency characteristics for further computer simulation.

The obtained results can be used to improve the existing feed water supply control systems in steam generators with PID controllers and to design new, more efficient and reliable systems.

ЗМІСТ

Перелік скорочень та термінів	8
Вступ.....	9
1 Парогенератори реакторної установки ВВЕР-1000	11
1.1 Принципова схема реакторної установки ВВЕР-1000	13
1.2 Загальний опис конструкції парогенератору ПГВ-1000	15
1.3 Системи контролю парогенератору ПГВ-1000	19
2 Частотні характеристики парогенератора з ПДД-регулятором живильної води та адаптивної системи автоматичного регулювання.....	25
2.1 Синтез адаптивної системи автоматичного регулювання	27
2.2 Синтез систем автоматичного управління з перебудованою структурою	34
3 Комп'ютерне моделювання частотних характеристик рівня живильної води у парогенераторах АЕС... ..	42
3.1 Математична модель рівня живильної води в парогенераторі.....	43
3.1.1 Математична модель у вигляді звичайного диференціального рівняння з необхідними початковими умовами... ..	44
3.1.2 Вплив ПДД-регулятора на живлення парогенератора.....	48
3.2 Частотні характеристики	50
3.2.1 Частотні характеристики рівня живильної води у корпусі парогенератора	52
3.3 Параметри ПДД-регулятора	52
3.4 Комп'ютерне моделювання.....	54
Висновок.....	59
Перелік джерел посилання.....	61
Додаток А Сценарій побудови графіків.....	63
Додаток Б Демонстраційний матеріал.	67

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

АЕС – атомна електростанція

АЧХ – амплітудно частотні характеристики

ВВЕР – водо–водяний енергетичний реактор

ПД – пропорційно-інтегрально-диференціальний

ПГВ – парогенератор вертикальний

СУЗ – система управління і захисту

СУЖВ – система управління живильною водою

ФЗЧ – фаза-частотні характеристики

ЦБУ – центральний блок управління

ВСТУП

Атомні електростанції є одними з найбільш ефективних джерел енергії, що забезпечують стабільне та надійне постачання електроенергії. Одним з ключових компонентів АЕС є парогенератор, який використовується для передачі тепла від реактора до турбіни через теплообмінник. Для забезпечення безпечної та ефективної роботи парогенератора необхідно підтримувати оптимальний рівень живильної води. Це завдання здійснюється за допомогою системи СУЖВ, яка включає ПД-регулятор для точного контролю подачі води.

Парогенератори типу ПГВ-1000, що використовуються на АЕС з реакторами типу ВВЕР (водо-водяний енергетичний реактор), є складними технічними системами, які вимагають високого рівня надійності та ефективності в роботі. Підтримка оптимального рівня живильної води є критично важливою, оскільки надмірно низький рівень може призвести до перегріву і пошкодження труб, а надмірно високий рівень – до гідравлічних ударів і винесення рідини в паропровід.

У даній роботі ми зосередимося на моделюванні та аналізі системи управління живильною водою парогенератора ПГВ-1000 з використанням ПД-регулятора. Використання ПД-регулятора дозволяє забезпечити точне регулювання рівня води, що є ключовим для забезпечення стабільної та безпечної роботи парогенератора. Ми детально розглянемо частотні характеристики системи управління, які дозволять оцінити її стійкість, швидкодію та точність.

Для проведення моделювання ми використовуватимемо програмне забезпечення Scilab та середовище графічного моделювання Xcos. Це дозволить нам створити візуальні моделі системи та провести детальний аналіз її поведінки при різних збуреннях. Результати моделювання будуть використані для оптимізації параметрів ПД-регулятора та розробки рекомендацій щодо налаштування системи для забезпечення її ефективної роботи.

Наше дослідження має на меті зробити вагомий внесок у вдосконалення систем управління живильною водою парогенераторів, що використовуються на

АЕС. Отримані результати можуть бути використані для покращення існуючих систем управління та проектування нових, більш ефективних та надійних систем.

Мета роботи – дослідження та оптимізація системи управління температурою парогенератора з використанням ПД-регулятора живильної води.

Об'єкт розробки – процес моделювання частотних характеристик парогенератора з ПД-регулятором живильної води для АЕС ВВЕР.

Предмет розробки – парогенератор з ПД-регулятором живильної води для АЕС ВВЕР.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- ознайомлення з теоретичними принципами роботи атомного парогенератора та його взаємодією з системою живильної води;
- вивчення принципів роботи ПД-регулятора та його впливу на стабільність та ефективність системи;
- оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [1], а також з методичними вказівками з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи добувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [2-4].

1 ПАРОГЕНЕРАТОРИ РЕАКТОРНОЇ УСТАНОВКИ ВВЕР-1000

Реакторна установка ВВЕР-1000 є однією з найпоширеніших моделей ядерних реакторів у світі. Основні її характеристики включають:

- тип палива: ВВЕР-1000 використовує збагачення уран як паливо. Уранові паливні елементи зазвичай мають форму паливних стержнів, що містять урановий діоксид;

- теплоносій: Основним теплоносієм у ВВЕР-1000 є демінералізована вода. Ця вода циркулює через активну зону реактора для відведення тепла, що виробляється під час ядерних реакцій;

- тип реактора: реактор ВВЕР-1000 відноситься до реакторів тиску води (PWR), де вода під високим тиском використовується як теплоносій та для збереження води в рідкому стані;

- структура реактора: реакторна установка ВВЕР-1000 зазвичай складається з активної зони, де відбуваються ядерні реакції, та з парогенераторів, які перетворюють тепло, що виробляється в реакторі, на пару для приводу турбін та генерації електроенергії;

- безпека: забезпечення безпеки роботи парогенератора є критично важливим аспектом експлуатації реакторної установки ВВЕР-1000. Для цього передбачено численні системи контролю і захисту. Контрольні датчики постійно відстежують температуру, тиск і рівень води як у першому, так і у другому контурах. При виникненні відхилень від нормальних параметрів автоматично активуються системи захисту, які можуть знизити потужність реактора або повністю зупинити його роботу.

Також важливою складовою є система аварійного охолодження, яка забезпечує відведення тепла від активної зони реактора і парогенератора навіть у разі відмови основних систем охолодження. Це досягається за допомогою резервних насосів і додаткових теплообмінників, що входять до складу комплексу безпеки реакторної установки.

Парогенератор ВВЕР-1000 складається з декількох основних частин: корпусу, теплообмінних трубок, сепаратора, колекторів, патрубків для підведення і відведення теплоносія та пари, і контрольно-вимірювальних приладів. Корпус парогенератора є циліндричним судином високого тиску, виготовленим із спеціальних сплавів, здатних витримувати високі температури і тиски. В середині корпусу розміщуються теплообмінні трубки, які утворюють пучок, через який циркулює теплоносій.

Теплообмінні трубки виготовлені з високолегованих сталей або нікелевих сплавів, що забезпечують високу теплопровідність і стійкість до корозії. Вода з першого контуру реактора надходить у трубки теплообмінника, де вона віддає своє тепло воді другого контуру, перетворюючи її на пару.

Сепаратор пари розташований у верхній частині парогенератора і призначений для відокремлення рідкої фази від парової. Це досягається завдяки спеціальним конструктивним елементам, які дозволяють знижувати швидкість потоку пари і сприяють конденсації крапель води, що потім повертаються назад у теплообмінник.

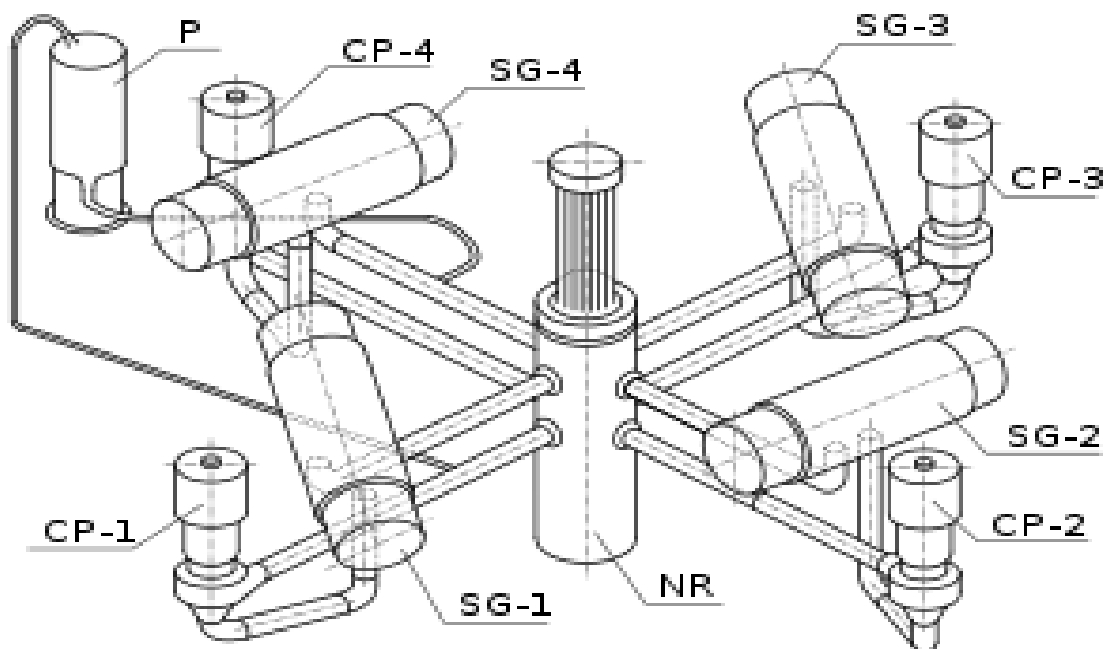
Принцип роботи парогенератора ВВЕР-1000 ґрунтується на передачі тепла від радіоактивного теплоносія першого контуру до води другого контуру через стінки теплообмінних трубок. Перший контур є замкнутим і містить воду, яка проходить через активну зону реактора, нагріваючись до високих температур під дією ядерних реакцій. Ця гаряча вода під високим тиском надходить у парогенератор, де вона передає своє тепло воді другого контуру.

У другому контурі вода під дією тепла перетворюється на пару, яка далі подається до турбінної установки для вироблення електроенергії. Після проходження через турбіни пара конденсується і повертається до парогенератора, де цикл повторюється.

Реакторні установки ВВЕР-1000 широко використовують для виробництва електроенергії в різних країнах світу, і вони є важливою складовою енергетичного міксу багатьох країн.

1.1 Принципова схема реакторної установки ВВЕР-1000

Наведемо принципову схему реакторної установки ВВЕР-1000 (рисунок 2.1).



CP-1 – Циркуляційний насос №1; CP-2 – Циркуляційний насос №2; CP-3 – Циркуляційний насос №3; CP-4 – Циркуляційний насос №4; SG-1 – Парогенератор №1; SG-2 – Парогенератор №2; SG-3 – Парогенератор №3; SG-4 – Парогенератор №4; NR – Реакторний корпус; P – Пресуризатор

Рисунок 1.1 – Принципову схему реакторної установки ВВЕР-1000

Реакторна установка ВВЕР-1000 є складною інженерною системою, та складається з наступних основних компонентів: реакторний корпус, активна зона, система циркуляції теплоносія, парогенератори, СУЗ, турбінний відділ, конденсатори і система охолодження. Реакторний корпус є основною частиною установки, де відбувається ядерна реакція. Корпус виготовлений з високоміцних матеріалів, здатних витримувати високі температури та тиски. Активна зона містить паливні збірки, які складаються з тепловиділяючих елементів (твелів), заповнених ядерним паливом (ураном-235 або змішаним оксидним паливом). Система циркуляції теплоносія забезпечує перенесення тепла від активної зони до парогенераторів, включаючи головні циркуляційні насоси та трубопроводи першого

контур. Парогенератори – це теплообмінні апарати, де тепло від першого контуру передається воді другого контуру, перетворюючи її на пару. СУЗ включає стрижні управління, які регулюють швидкість ядерної реакції та можуть зупинити реактор у разі необхідності. Турбінний відділ направляє пару, утворену у парогенераторах, до турбін, які приводять у дію генератори електроенергії. Конденсатори і система охолодження конденсують пару після турбін і повертають воду до парогенераторів.

Принципова схема реакторної установки ВВЕР-1000 базується на тепловиділенні в активній зоні реактора, де уранове паливо піддається ланцюговій ядерній реакції. Перший контур заповнений водою під високим тиском (до 160 атм), яка циркулює через активну зону, поглинаючи тепло, що виділяється в результаті ядерних реакцій. Перший контур включає активну зону реактора, де відбувається ланцюгова ядерна реакція, яка генерує велику кількість тепла, головні циркуляційні насоси, що забезпечують циркуляцію теплоносія через активну зону і далі до парогенераторів, та парогенератори, де теплоносій першого контуру передає тепло воді другого контуру через теплообмінні трубки, після чого повертається до реактора. Другий контур включає парогенератори, де вода другого контуру перетворюється на пару під дією тепла, отриманого від першого контуру, паропроводи, що направляют пару до турбін, турбіни, які перетворюють теплову енергію пари на механічну енергію обертання, генератори, які перетворюють механічну енергію турбін на електричну енергію, та конденсатори, де пара після турбін охолоджується і конденсується у воду, яка повертається до парогенераторів для повторного використання.

Система управління і захисту є критично важливою для безпеки реакторної установки. Вона включає системи автоматичного управління, датчики та механізми, які регулюють швидкість ядерної реакції. Основним елементом СУЗ є стрижні управління, які можуть бути введені в активну зону для поглинання нейтронів і зупинки реакції у разі аварійної ситуації. Забезпечення ефективного охолодження реактора є ключовим для безпеки ВВЕР-1000. Крім головних циркуляційних насосів, система охолодження включає резервні системи, які можуть бути активовані у разі відмови основних компонентів. Це включає аварійні

насосні установки і додаткові теплообмінники.

Принципова схема реакторної установки ВВЕР-1000 демонструє складну, але добре збалансовану систему, призначену для безпечного і ефективного виробництва електроенергії. Вона поєднує у собі інноваційні технології ядерної енергетики, сучасні системи управління та численні заходи безпеки. ВВЕР-1000 залишається однією з найнадійніших і найефективніших реакторних установок, широко застосовуваних у багатьох країнах світу.

1.2 Загальний опис конструкції парогенератору ПГВ-1000

Парогенератор ПГВ-1000 – це складний теплообмінний апарат, який є невід'ємною частиною реакторної установки типу ВВЕР-1000. Його конструкція забезпечує ефективну передачу тепла від первинного контуру до вторинного, що є критично важливим для безперервної та безпечної роботи атомної електростанції. Основною частиною парогенератора є корпус, який виготовляється з високоміцної сталі, здатної витримувати високі тиски і температури. Корпус має циліндричну форму з напів сферичними днищами. В середині корпусу знаходиться теплообмінний пучок трубок, через які циркулює теплоносій першого контуру. Ці трубки виготовлені з матеріалів, стійких до корозії та високих температур, таких як нержавіюча сталь або сплави на основі нікелю.

Теплообмінний пучок розташований у верхній частині корпусу і складається з декількох тисяч трубок, що згруповані у пучки. Ці трубки мають діаметр близько 20 мм і довжину до 12 метрів. Теплоносій першого контуру, що виходить з активної зони реактора, проходить через ці трубки, віддаючи своє тепло воді другого контуру, яка омиває зовнішню поверхню трубок. Вода другого контуру при цьому перетворюється на пару, яка потім надходить до паропроводів і турбін.

Один з важливих елементів парогенератора ПГВ-1000 – це паровий барабан, який знаходиться у верхній частині корпусу. Паровий барабан виконує функцію сепарації пари від води, забезпечуючи подачу сухої насиченої пари до турбін. Вода, що залишилася після сепарації, повертається до циркуляційного контуру для

повторного нагрівання. Система сепарації включає в себе сепараційні пристрої різних типів: інерційні сепаратори, вихрові сепаратори і каплеуловлювачі, які забезпечують високу ефективність відділення пари від води.

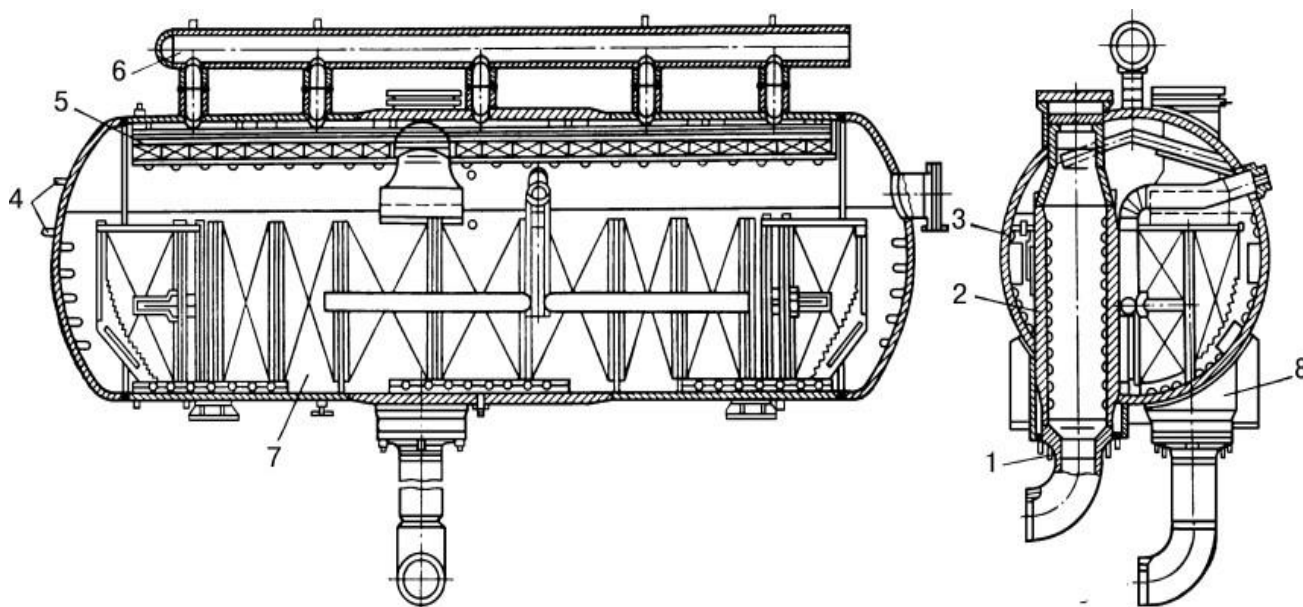
Важливим аспектом конструкції парогенератора є система обв'язки, що включає в себе різні трубопроводи, клапани і насосні установки. Трубопроводи першого і другого контурів підключають парогенератор до реактора і турбінного відділу. Клапани забезпечують регулювання потоку теплоносія і пари, а також ізоляцію окремих секцій парогенератора під час проведення технічного обслуговування або аварійних ситуацій.

Для забезпечення надійної роботи парогенератора ПГВ-1000 передбачено кілька систем контролю і безпеки. Це включає систему контролю рівня води у паровому барабані, систему контролю температури і тиску теплоносія, а також систему автоматичного захисту, яка здатна виявляти та реагувати на аномальні режими роботи, такі як перегрів або перевищення тиску.

Одним з основних завдань конструкції парогенератора є забезпечення його надійності і довговічності. Це досягається за рахунок використання високоякісних матеріалів, спеціальних технологій виготовлення і збирання, а також проведення регулярних інспекцій і технічного обслуговування. Важливим елементом є також система протикорозійного захисту, яка включає в себе антикорозійні покриття і застосування інгібіторів корозії у теплоносії.

Парогенератори ПГВ-1000 є одними з найбільших і найскладніших у своєму класі. Їх конструкція постійно вдосконалюється для підвищення ефективності теплопередачі, зниження втрат на сепарацію пари і покращення експлуатаційної надійності. Парогенератори цього типу успішно експлуатуються на багатьох атомних електростанціях по всьому світу, забезпечуючи надійне і безпечне виробництво електроенергії.

Для більшого розуміння наведемо приклад загальної конструкції парогенератора ПГВ – 1000 (рисунок 1.2).



1 – штуцера дренажу і повітряника; 2 – вхідний колектор першого контуру; 3 – корпус ПГ; 4 – штуцера рівнемірів; 5 – жалюзійний сепаратор; 6 – паровий Колектор; 7 – поверхня теплообміну; 8 – вихідний колектор першого контуру

Рисунок 1.2 – Загальна конструкція парогенератора ПГВ-1000

Штуцера дренажу і повітряника використовуються для відведення конденсату і повітря з системи. Штуцера дренажу забезпечують злив конденсату, що утворюється під час роботи парогенератора, тоді як повітряники служать для видалення повітря, яке може потрапити в систему. Це важливо для підтримання ефективної роботи парогенератора, оскільки наявність повітря в системі може призвести до зниження ефективності теплообміну і навіть до пошкодження обладнання.

Вхідний колектор першого контуру забезпечує подачу теплоносія з реактора в парогенератор. Теплоносій циркулює через колектор і передає тепло поверхням теплообміну. Це тепло використовується для нагрівання води в парогенераторі, що призводить до утворення пари. Вхідний колектор є важливим елементом системи, оскільки забезпечує ефективне передавання тепла від реактора до парогенератора.

Корпус парогенератора є основною оболонкою, яка містить всі внутрішні компоненти парогенератора. Корпус забезпечує герметичність та захист від зовнішніх впливів. Він виготовлений з міцних матеріалів, які здатні витримувати високі температури і тиск, що утворюються в процесі роботи парогенератора. Корпус також забезпечує безпеку роботи, захищаючи внутрішні компоненти від пошкоджень.

Штуцера рівнемірив використовуються для підключення приладів, що вимірюють рівень води всередині парогенератора. Це дозволяє контролювати рівень води та запобігати небезпечним ситуаціям. Підтримка оптимального рівня води в парогенераторі є критично важливою для забезпечення стабільної роботи системи. Занадто низький рівень води може призвести до перегріву і пошкодження труб, а занадто високий – до гідравлічних ударів і винесення рідини в паропровід.

Жалюзійний сепаратор використовується для відділення крапель рідини від пари. Жалюзійний сепаратор забезпечує, щоб тільки суха пара потрапляла до турбіни, запобігаючи пошкодженням обладнання. Це важливий етап у процесі виробництва пари, оскільки наявність крапель рідини в парі може призвести до ерозії лопаток турбіни і зниження ефективності її роботи.

Паровий колектор збирає пару, яка утворюється в парогенераторі, і направляє її до турбіни. Паровий колектор забезпечує ефективне транспортування пари та мінімізацію втрат енергії. Він розташований таким чином, щоб забезпечити рівномірний розподіл пари по всій поверхні теплообміну, що підвищує ефективність процесу виробництва пари.

Поверхня теплообміну складається з трубок, через які циркулює теплоносій. Тепло від теплоносія передається воді, яка знаходиться в парогенераторі, що призводить до утворення пари. Це є основним процесом в роботі парогенератора, оскільки саме тут відбувається перетворення тепла в пару. Поверхні теплообміну виготовлені з матеріалів, які мають високу теплопровідність, що дозволяє ефективно передавати тепло.

Вихідний колектор першого контуру відводить охолоджений теплоносій з парогенератора назад до реактора. Це забезпечує безперервний цикл теплообміну.

Охолоджений теплоносієм циркулює через реактор, де знову нагрівається і повертається до парогенератора. Це дозволяє забезпечити стабільну роботу системи і підтримувати оптимальні умови для виробництва пари.

Принцип роботи парогенератора ПГВ-1000 включає кілька етапів. Спочатку теплоносієм з реактора через вхідний колектор першого контуру надходить до поверхонь теплообміну парогенератора. Теплоносієм циркулює через трубки поверхонь теплообміну, передаючи своє тепло воді, яка оточує ці трубки. Під дією тепла від теплоносія вода в парогенераторі нагрівається і перетворюється на пару. Утворена пара проходить через жалюзійний сепаратор, де від неї відділяються краплі рідини. Це забезпечує, що до турбіни надходить лише суха пара. Пара збирається у паровому колекторі і транспортується до турбіни для виробництва електроенергії. Охолоджений теплоносієм через вихідний колектор першого контуру повертається до реактора для повторного нагріву. Штуцера рівнемірив забезпечують моніторинг рівня води в парогенераторі, що дозволяє підтримувати оптимальні умови роботи. Через штуцера дренажу та повітряника відводиться конденсат і повітря, що забезпечує стабільну роботу системи.

1.3 Системи контролю парогенератору ПГВ-1000

Система контролю парогенератора ПГВ-1000 є ключовим елементом для забезпечення безпечної та ефективної роботи цього обладнання. Вона складається з декількох підсистем і компонентів, які забезпечують моніторинг і регулювання основних параметрів парогенератора. Ці параметри включають рівень води, тиск, температуру, якість пари та стан матеріалів конструкції.

Одним із найважливіших аспектів системи контролю є моніторинг рівня води в паровому барабані. Ці датчики забезпечують безперервний моніторинг рівня води і передають сигнали на центральний блок управління. В разі відхилення рівня води від заданих меж, система автоматично коригує подачу живильної води або відводить надлишок. Це критично важливо, оскільки занадто низький рівень води

може призвести до перегріву трубок теплообмінника, а занадто високий – до погіршення якості пари.

Система контролю тиску в парогенераторі складається з декількох компонентів, включаючи манометри, датчики тиску та системи автоматичного регулювання. Датчики тиску, у свою чергу, передають дані на центральний блок управління, де аналізуються і приймаються рішення щодо регулювання тиску. В разі перевищення допустимого тиску, система аварійного захисту автоматично спрацьовує, знижуючи тиск шляхом відкриття клапанів скидання пари або води.

Дані з цих датчиків також передаються на центральний блок управління, де аналізуються для підтримки оптимального теплового режиму.

Система контролю якості пари включає датчики вологості і складу пари. Волога пара може призвести до ерозії лопаток турбіни, тому важливо забезпечити її високу якість. Датчики вологості визначають рівень насичення пари і передають дані на центральний блок управління, який коригує роботу сепараційних систем для забезпечення сухості пари.

Стан матеріалів конструкції парогенератора контролюється за допомогою системи неразрушаючого контролю (NDT). Ця система включає ультразвукові, рентгенівські та магнітні методи, які дозволяють виявляти дефекти і мікротріщини в матеріалах. Регулярні перевірки дозволяють своєчасно виявляти та усувати потенційні проблеми, забезпечуючи довговічність і безпеку експлуатації парогенератора.

Центральний блок управління є мозком системи контролю. Він збирає дані з усіх датчиків і аналізує їх у режимі реального часу. ЦБУ використовує ці дані для прийняття рішень щодо регулювання різних параметрів парогенератора. Він також забезпечує інтерфейс для оператора, який може здійснювати моніторинг і ручне управління системою за необхідності. В разі виявлення аномалій або аварійних ситуацій, ЦБУ автоматично активує відповідні заходи захисту.

Система контролю ПГВ-1000 також включає резервні та аварійні системи, які забезпечують додатковий рівень безпеки. Наприклад, аварійні клапани тиску автоматично відкриваються в разі критичного підвищення тиску, що дозволяє

запобігти руйнуванню обладнання. Резервні системи живлення забезпечують безперервну роботу системи контролю навіть при збої основного електроживлення.

Незамінною частиною системи контролю є регулярне технічне обслуговування та перевірка всіх компонентів. Це включає калібрування датчиків, перевірку надійності з'єднань, тестування аварійних систем та оновлення програмного забезпечення ЦБУ. Виконання цих заходів гарантує, що система контролю залишається ефективною та надійною протягом всього терміну експлуатації парогенератора.

Для більшого розуміння наведемо приклад відеокадра верхнього рівня системи управління живильною водою (рисунок 1.3), яка є однією з ключових систем, що забезпечують стабільну і безпечну роботу атомної електростанції.

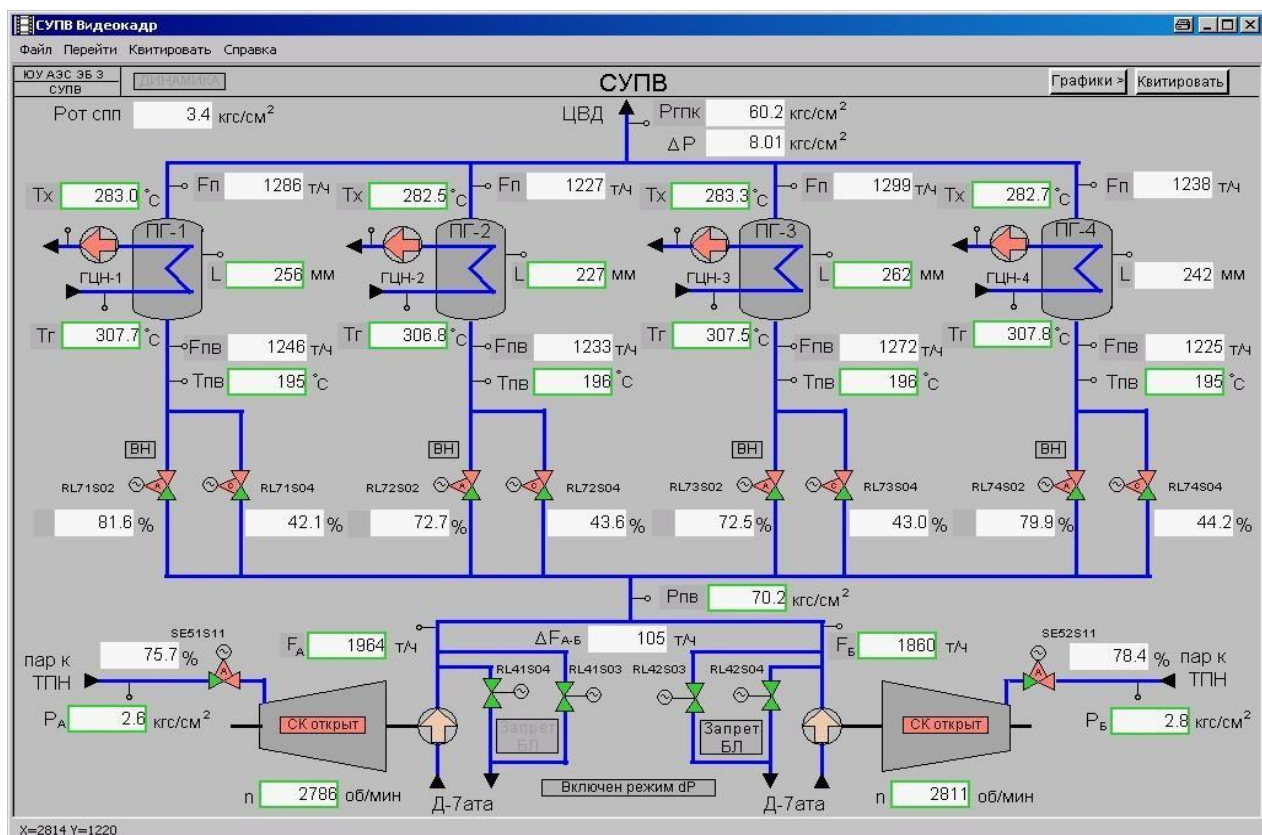


Рисунок 1.3 – Система управління парогенератора ПГВ-1000 для контролю верхнього рівня СУЖВ

Основна функція СУЖВ полягає в автоматичному підтриманні оптимального рівня води в парогенераторі, що дозволяє уникнути як перегріву труб, так і

гідравлічних ударів. Це досягається за допомогою комплексу датчиків, регуляторів і виконавчих механізмів, які працюють у тісній взаємодії.

Для прикладу, якщо уявити відеокадр верхнього рівня СУЖВ, ми бачимо комплексне зображення, яке демонструє взаємодію всіх елементів системи: від датчиків рівня води до керування клапанами подачі живильної води. Всі ці компоненти працюють разом для забезпечення стабільного рівня води в парогенераторі.

Одним із основних компонентів СУЖВ є датчики рівня води, які встановлюються в різних частинах парогенератора. Ці датчики постійно моніторять рівень води і передають дані до центрального контролера. Центральний контролер, в свою чергу, аналізує отримані дані і приймає рішення про необхідність корекції рівня води. Це може бути здійснено шляхом зміни положення клапанів подачі живильної води, які керуються електронними або гідравлічними приводами.

Ключовим елементом СУЖВ є пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор, який забезпечує точне і стабільне управління рівнем води. ПІД-регулятор коригує подачу води на основі трьох компонентів: пропорційного, інтегрального і диференціального. Пропорційний компонент відповідає за корекцію помилки між фактичним і заданим рівнем води. Інтегральний компонент враховує накопичену помилку за певний період часу, що дозволяє зменшити постійну системну помилку. Диференціальний компонент враховує швидкість зміни помилки, що дозволяє покращити динамічну відповідь системи.

Уявімо, що відеокадр демонструє процес регулювання рівня води в реальному часі. Ми бачимо, як датчики рівня води передають дані до центрального контролера, який, аналізуючи інформацію, коригує положення клапанів подачі води. Наприклад, якщо рівень води падає нижче заданого значення, центральний контролер відкриває клапани, збільшуючи подачу води, щоб повернути рівень до норми. Якщо ж рівень води занадто високий, контролер закриває клапани, зменшуючи подачу води.

Крім того, система управління живильною водою включає механізми аварійного відключення, які забезпечують безпеку в разі виникнення нештатних ситуацій. Наприклад, якщо датчики виявляють надмірне збільшення рівня води, що може призвести до гідравлічних ударів, система автоматично закриває клапани подачі води і сповіщає операторів про небезпечну ситуацію. Такі механізми дозволяють швидко реагувати на аварійні ситуації і запобігати можливим пошкодженням обладнання.

Система управління живильною водою також включає засоби моніторингу та діагностики, що дозволяють виявляти потенційні проблеми в роботі системи. Це забезпечує можливість проведення профілактичного обслуговування і своєчасного усунення несправностей, що значно підвищує надійність роботи парогенератора. Оператори можуть використовувати спеціалізоване програмне забезпечення для моніторингу роботи СУЖВ, що дозволяє їм отримувати актуальні дані про стан системи і оперативно реагувати на будь-які відхилення від нормальної роботи.

Також важливим аспектом роботи СУЖВ є її інтеграція з іншими системами автоматичного регулювання на атомній електростанції. СУЖВ взаємодіє з системою управління реактором, системою управління турбіною та іншими критично важливими системами. Це дозволяє забезпечити комплексний підхід до управління всіма процесами на атомній електростанції, що підвищує її ефективність і безпеку.

У загальному контексті роботи атомної електростанції, система управління живильною водою відіграє ключову роль у забезпеченні стабільної та безпечної роботи парогенератора. Вона забезпечує оптимальні умови для виробництва пари, яка необхідна для генерації електроенергії. Завдяки автоматичному контролю рівня води, СУЖВ допомагає уникнути перегріву труб і гідравлічних ударів, що значно підвищує надійність і безпеку роботи парогенератора.

Таким чином, система управління живильною водою є невід'ємною частиною сучасних атомних електростанцій, що забезпечує ефективну і безпечну роботу парогенератора. Завдяки використанню сучасних технологій і методів автоматичного регулювання, СУЖВ дозволяє підтримувати оптимальні умови

роботи парогенератора і забезпечувати стабільне виробництво електроенергії. Це робить її важливим елементом у загальній системі управління атомною електростанцією.

2 ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРОГЕНЕРАТОРА З ПІД-РЕГУЛЯТОРОМ ЖИВИЛЬНОЇ ВОДИ ТА АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

Предметом моделювання є частотні характеристики парогенератора з ПІД-регулятором живильної води та адаптивної системи автоматичного регулювання, що використовується на атомних електростанціях з реактором типу ВВЕР (водо-водяний енергетичний реактор).

Парогенератор є критично важливим компонентом на АЕС. Його основна функція полягає у виробленні пари для турбіни за рахунок тепла, що передається від реактора через теплообмінник. Для ефективної та безпечної роботи парогенератора дуже важливо підтримувати оптимальний рівень живильної води всередині. Занадто низький рівень може призвести до перегріву і пошкодження труб, а занадто високий – до гідравлічних ударів і винесення рідини в паропровід.

Для регулювання рівня води використовується ПІД-регулятор, який коригує подачу живильної води на основі відхилення поточного рівня від заданого значення. ПІД-регулятор дозволяє автоматично підтримувати необхідний рівень води, враховуючи поточні умови та потреби системи. Це забезпечує стабільність роботи парогенератора та запобігає небезпечним ситуаціям.

Моделювання частотних характеристик такої системи полягає у створенні математичної моделі, яка описує як парогенератор та ПІД-регулятор реагують на різні за частотою збурення рівня води. Це дозволяє проаналізувати стійкість, швидкодію, точність та інші важливі характеристики системи регулювання в різних режимах роботи АЕС.

Аналіз частотних характеристик системи управління парогенератором дозволяє отримати важливі дані щодо стабільності, перерегулювання та швидкості реакції системи на зміни навантаження. Результати аналізу показали, що система демонструє стабільну та ефективну роботу, мінімізуючи перерегулювання та час стабілізації.

Частотні характеристики дозволяють визначити, як система реагує на збурення з різною частотою. Наприклад, низькочастотні збурення можуть бути спричинені повільними змінами в роботі реактора або турбіни, тоді як високочастотні збурення можуть виникати через швидкі зміни в подачі живильної води або інші динамічні процеси. Аналіз цих характеристик дає змогу краще зрозуміти, як система буде поводитись в різних ситуаціях та які параметри потребують коригування для забезпечення стабільної роботи.

Моделювання дозволяє провести віртуальні експерименти, змінюючи параметри системи та спостерігаючи за її реакцією. Це дає можливість оптимізувати параметри ПІД-регулятора, вибрати діапазони роботи та перевірити запаси стійкості. Зокрема, моделювання допомагає визначити, як змінювати коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної складових ПІД-регулятора для досягнення найкращих результатів.

Під час моделювання враховуються різні режими роботи парогенератора та можливі збурення, які можуть виникнути в процесі експлуатації. Це дозволяє передбачити поведінку системи в нештатних ситуаціях та розробити відповідні заходи для забезпечення її надійної роботи. Наприклад, якщо моделювання показує, що система нестабільна при певних значеннях параметрів, це може вказувати на необхідність додаткових заходів для підвищення стійкості.

Результати моделювання використовуються для налаштування параметрів ПІД-регулятора, вибору діапазонів роботи, перевірки запасів стійкості та прогнозування можливої поведінки системи в нештатних ситуаціях. Це дає змогу забезпечити безпечну та ефективну роботу парогенератора в умовах реальної експлуатації. Крім того, моделювання дозволяє знизити витрати на експлуатацію та технічне обслуговування, підвищуючи загальну ефективність роботи атомної електростанції.

Отже, моделювання частотних характеристик парогенератора з ПІД-регулятором є важливим етапом у розробці та оптимізації систем управління на АЕС. Це дозволяє забезпечити стабільну та безпечну роботу парогенератора,

знижуючи ризики виникнення аварійних ситуацій та підвищуючи загальну ефективність роботи енергетичної системи.

2.1 Синтез адаптивної системи автоматичного регулювання

Загальноприйнятий порядок синтезу систем керування складається з наступного:

- задається математична модель об'єкта;
- приймається критерій оптимальності системи керування;
- за моделлю об'єкта визначаються структура та чисельні значення параметрів алгоритму функціонування контролера (регулятора), що задовольняють прийнятому критерію оптимальності. Вважається, що якщо модель досить близька до реального об'єкта, а вибраний метод синтезу та розрахунки виконані бездоганно, то спроектована система запрацює без будь-якого істотного доведення при пуску. Однак досвід свідчить про те, що такий оптимістичний прогноз, як правило, не виправдовується. Пояснюється це двома причинами;

- системним характером задачі отримання математичної моделі об'єкта, це означає, що для формулювання критерію наближення останньої необхідно мати алгоритм функціонування контролера, для визначення якого, власне, і потрібна ця модель.

Практичною неможливістю врахування відхилення прийнятої в розрахунках динамічної моделі контролера від реальної (наявність широтно-імпульсного перетворення сигналу на виході контролера, зони нечутливості, люфтів в механічних з'єднаннях виконавчого механізму тощо). Вихід із ситуації, що склалася, полягає в тому, що системи керування навіть з відносно стабільними об'єктами повинні проектуватися як адаптивні (з автоматизованим налаштуванням). Ефективність таких систем визначається тим, що вони оперують усією системою в цілому, причому при відповідному виборі режиму ідентифікації можна здійснювати автоматичну лінеаризацію нелінійності в значному для кожної конкретної системи діапазоні частот і відхилень сигналів. До функцій адаптації не

входить підстроювання параметрів регуляторів до відносно швидкозмінних властивостей об'єкта, викликаних контрольованими збуреннями, передусім – змінами навантаження об'єкта. У цьому випадку повинна застосовуватися звичайна корекція налаштування регуляторів за задалегідь заданими законами, що реалізуються у відповідних коригувальних блоках. Однак до функцій адаптації входить налаштування цих коригувальних блоків. Взагалі можливості теорії автоматичного керування (як і будь-якої іншої теорії) обмежені певними межами. При занадто швидких змінах властивостей об'єкта і пов'язаних з цим появою нелінійних ефектів принципова можливість адаптації систем керування досить складними в динамічному відношенні об'єктами виявляється досить проблематичною. Структура адаптивної системи керування може бути представлена такою, як показано (рисинок 2.1). До контуру регулювання, що включає об'єкт Об і регулятор Рег, підключається адаптуюча установка Ад, на вхід якої подаються вхідний $m(t)$ і вихідний $y(t)$ сигнали об'єкта. В ідентифікуючому пристрої Ід за отриманими сигналами оцінюється модель об'єкта, а в обчислювальному пристрої ВУ визначаються оптимальні параметри налаштування регулятора, які потім встановлюються за допомогою адаптуючого впливу $a(t)$. Причому для реалізації адаптуючого пристрою Ад використовується один з відомих в даний час методів адаптації. У роботі застосовується метод адаптації, що використовує сигнальний гармонічний ідентифікуючий вплив (*метод Циглера-Нікольса*). Перевагою такого методу є можливість обґрунтованого застосування методів математичної статистики в процесі проведення ітераційної процедури руху до оптимуму. Практична значимість цієї обставини полягає в можливості зменшення амплітуди впливів до прийнятного рівня і, незважаючи на це, отримання задовільних оцінок параметрів вихідних коливань завдяки збільшенню тривалості адаптації.

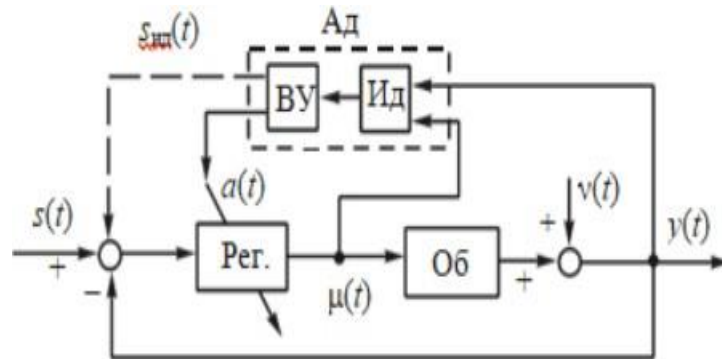


Рисунок 2.1 – Структурна схема адаптивної системи

Спостереження за станом об'єкта в процесі нормального функціонування без введення додаткових пошукових складових не приводить до успіху. Це пояснюється тим, що, оскільки об'єкт знаходиться в складі системи, то і оперувати слід з впливами, які є вхідними сигналами всієї системи; при цьому вхідний сигнал слід вибрати таким чином, щоб ідентифікований канал системи залежав тільки від одного невідомого оператора об'єкта.

Існуюча проблема зводиться не до того, щоб створити систему адаптації, яка функціонує без викликаних ідентифікуючими впливами додаткових відхилень регульованої величини, а до того, щоб зробити ці відхилення досить малими, прийнятними для практики. Це досягається декомпозицією процедури пошуку з використанням в алгоритмах налаштування нижнього рівня спеціально розроблених не екстремальних критеріїв.

Така процедура оснований на використанні активних частотних методів ідентифікації об'єктів та розрахунку оптимального налаштування регулятора.

При формуванні процесу оцінки моделі об'єкта структура адаптивної системи управління, приведена на рисунку 2.1, повинна бути доповнена ще одним ідентифікуючим впливом, яке повинно впливати на адаптуючий пристрій Ад на систему з метою ідентифікації об'єкта. Величина $s_{id}(t)$ показана пунктирною лінією у вигляді сигнального впливу, поданого на задавач регулятора. Таке ідентифікуюче вплив не обов'язково повинно бути сигнальним. Воно може бути також алгоритмічним, параметричним, структурним.

Часто автоматичне налаштування здійснюється шляхом включення в канал сигналу помилки двопозиційного реле з малим вихідним сигналом. Потім за параметрами автоколивань, що виникають в замкнутій системі, визначаються необхідні налаштування регулятора. Причому при такому способі самоналаштування відбувається припинення процесу регулювання об'єкта на час налаштування, спостерігається висока чутливість до шумів у каналі вимірювання, виникає небезпека зриву автоколивань при дії збурень.

Є також алгоритм налаштування регулятора в замкнутому контурі шляхом подачі на вхід системи пробного синусоїдального сигналу. Для цього алгоритму потрібно досить багато часу для налаштування (близько 8-10 періодів коливань на резонансній частоті замкнутої системи).

В роботі використовується метод Ціглера-Ніколса з частотним розділенням каналів управління і самоналаштування, що досягається включенням двох режекторних цифрових фільтрів в зворотний зв'язок контуру регулювання.

На рисунку 2.2 наведена структурна схема адаптивної системи управління. Основний контур складається з настроюваного регулятора P , власне об'єкта управління OY і двох режекторних фільтрів (основного $РФО$ і додаткового $РФД$). Додатковий режекторний фільтр за допомогою перемикача $П1$ включається тільки на першому етапі або періодично для визначення необхідних за методом Ціглера-Ніколса налаштувань. Блоки синхронного детектування $СД1$, $СД2$ визначають встановлені значення амплітуд $Aб$, $A0$ і фаз $Фб$, $Ф0$ пробних складових у вихідних сигналах основного режекторного фільтра $y1$ і об'єкта управління y . Визначення заданого фазового зсуву здійснюється за допомогою блоку фазової автопідстройки частоти.

коефіцієнта C і фазового зсуву Φ_0 в об'єкті управління в момент розрахунку необхідних налаштувань зберігаються в запам'ятовуючих пристроях ЗУ1, ЗУ2. Комутація вхідних сигналів відповідних блоків на різних етапах роботи системи відбувається за командами БУ за допомогою перемикачів П3, П4, П5, П6. Останню операцію доцільно здійснювати з використанням багатофункціональних логічних модулів.

Процес адаптації складається з двох етапів: двочастотного, в кінці якого обчислюються необхідні налаштування і коефіцієнт C ; основного, в якому процес самоналаштування відбувається вже на одній підвищеній частоті пробних коливань з одним режекторним фільтром РФО в контурі зворотного зв'язку. Визначення критичної частоти і відповідної їй амплітуди коливань для блоку ОУ+РФО дозволяє працювати з необхідними параметрами налаштувань на другому етапі. Це здійснюється за допомогою поправочного коефіцієнта C , який встановлює зв'язок між необхідними за методом Циглера–Нікольса налаштуваннями на першому і другому етапах роботи системи.

На рисунку 2.3, 2.4 представлені перехідні процеси розглядуваної системи за каналом задаючого і збурюючого впливу відповідно.

На рисунку 2.5 представлені порівняльні динамічні характеристики створеного адаптивного регулятора з налаштуванням за методом Циглера–Нікольса (крива 1), традиційного ПІД-регулятора, налаштованого вручну на кожному етапі роботи адаптивного регулятора (крива 2), традиційного ПІД-регулятора з фіксованим налаштуванням за методом РАФЧХ на вихідне значення постійної часу об'єкта управління (крива 3).

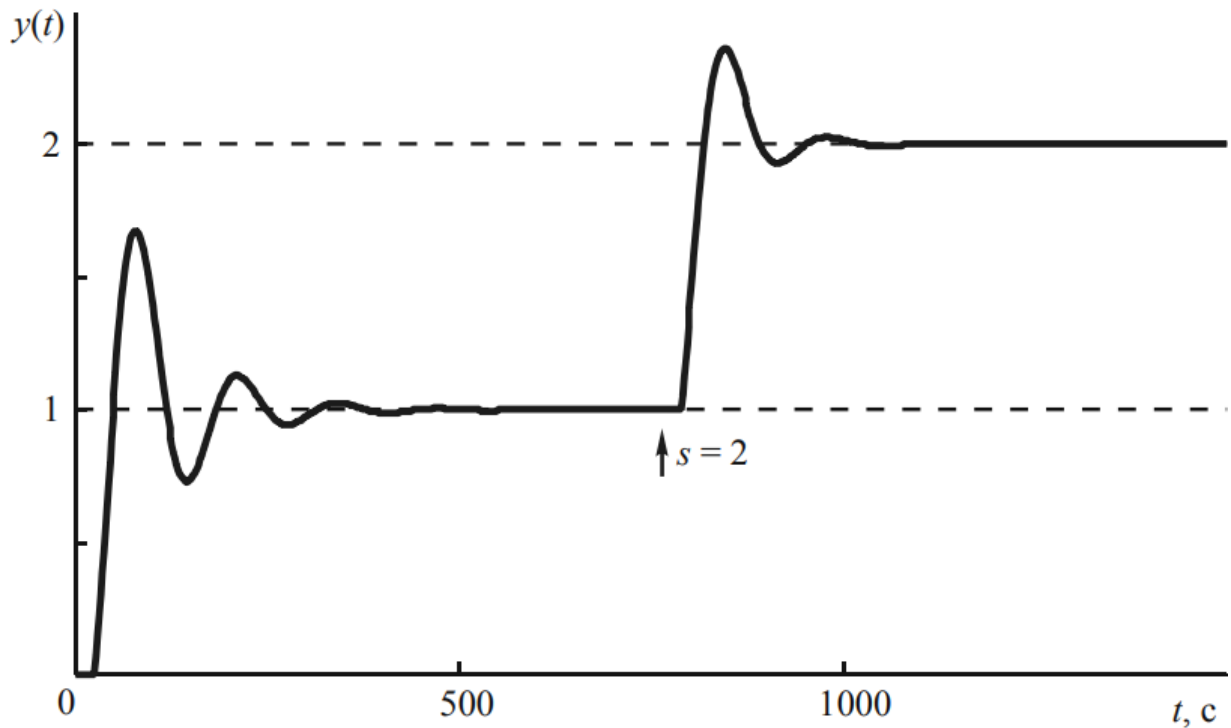


Рисунок 2.3 – Перехідний процес в адаптивній системі автоматичного регулювання по каналу впливу

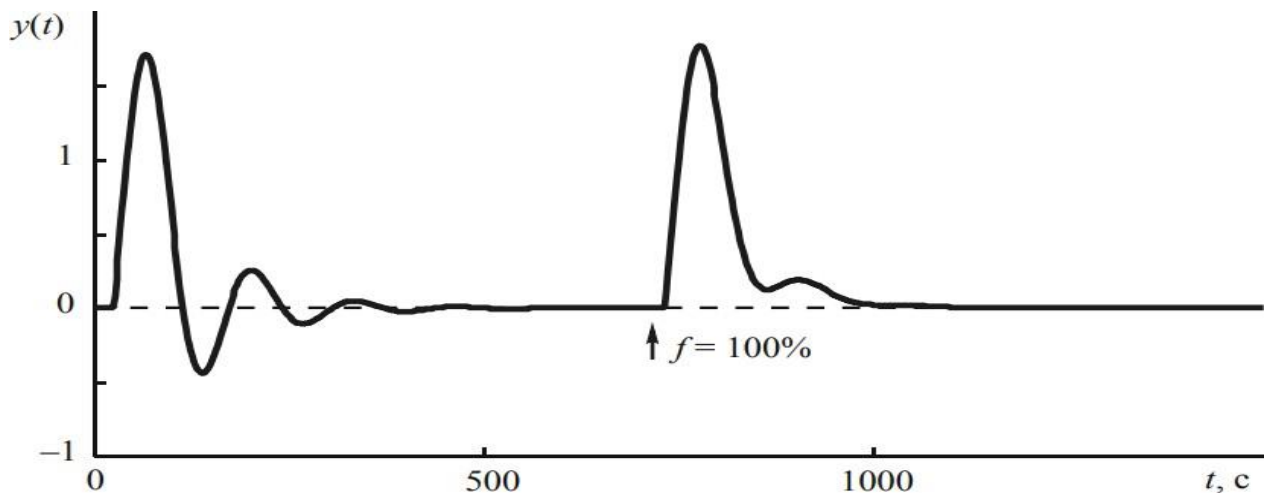
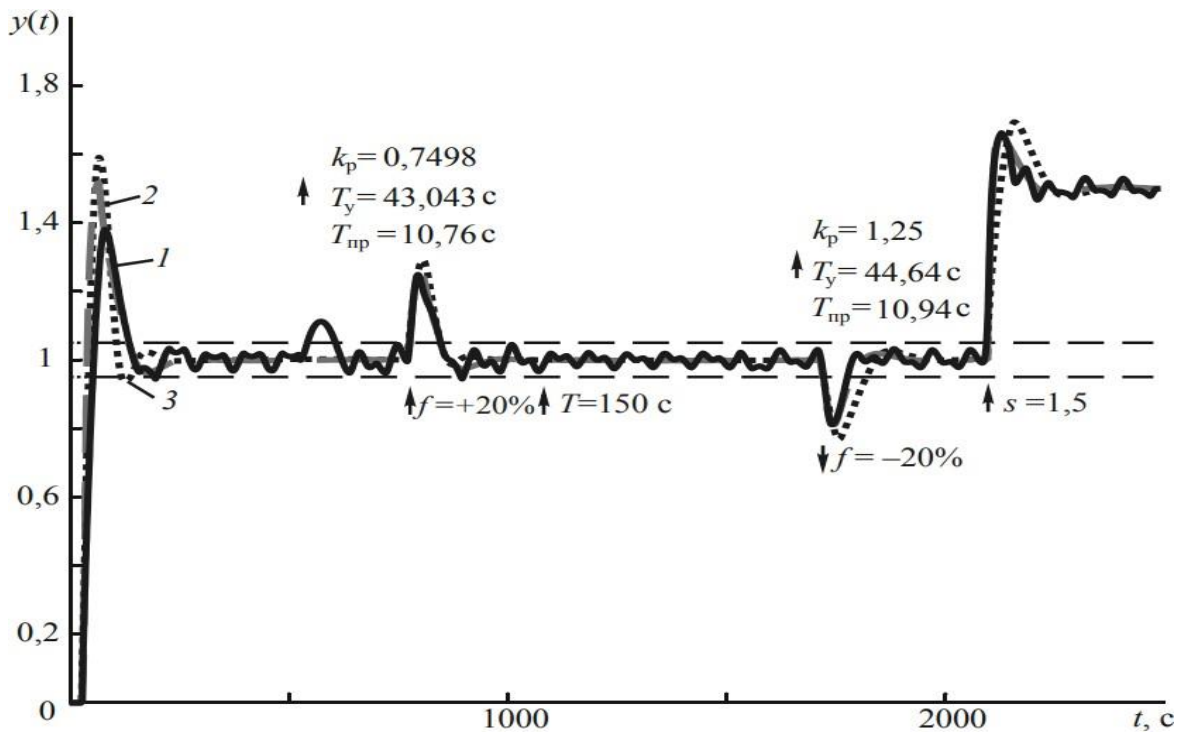


Рисунок 2.4 – Перехідний процес в адаптивній системі автоматичного регулювання каналом обурення, що йде з боку регулюючого органу

Для функціонування системи достатньо в розроблений адаптивний ПІД-регулятор ввести налаштування, що забезпечують стійкість замкнутої системи, тому скористаємося знайденими в попередньому параграфі параметрами налаштування ПІ-регулятора і прийнемо коефіцієнт передачі $k_p = 0,47$ постійну часу подвоєння $T_y = 52,6$ с і постійну часу попередження $T_{пр} = 0$.



1 – адаптивний ПІД-регулятор; 2 – класичний ПІД-регулятор, що налаштовується вручну на кожному етапі роботи адаптивного регулятора; 3 – ПІД-регулятор, налаштований на початкове значення постійного часу об'єкта

Рисунок 2.5 – Динамічні характеристики

2.2 Синтез систем автоматичного управління з перебудованою структурою

Сутність питання зводиться до вибору такого керування u , при якому вихідне значення y об'єкта керування збігалось б із задавальним значенням s або їхня різниця перебувала б у допустимих межах при зміні зовнішнього збурюючого впливу f та a .

Збурення f називається координатним, а збурення a – параметричним. Під впливом зовнішніх збурень, інформації про які часто недостатньо, взаємозв'язок між входом і виходом об'єкта стає неоднозначним і невизначеним, що значно ускладнює вирішення завдання.

Параметричне збурення є невідомою величиною з деякої обмеженої множини, внаслідок дії якої відбувається повільна зміна параметрів об'єкта керування.

Слід зазначити принципову відмінність між цими двома типами збурень. Розглянемо випадок, коли на об'єкт керування $W_{об}(p)$ із вхідним сигналом u і виходом у діють обидва типи збурюючих впливів. Тоді вихідна координата об'єкта матиме вигляд

$$y = W_{об}(p, a)g = W_{об}(p, a)(f + u) = W_{об}(p, a)f + W_{об}(p, a)u.$$

Тепер наочно видно якісну відмінність впливу збурень f та a на виході об'єкта. Координатне збурення f вносить адитивний і незалежний від входу u внесок у реакцію об'єкта, рівний $W_{об}(p, a)f$. Параметричне ж збурення a змінює лише вид або параметри $W_{об}(p, a)$ і не має незалежного від u і f впливу на вихід об'єкта.

Таким чином, збурення f формує "лінійний" вплив зовнішнього середовища на регульовану координату, а збурення a – "нелінійний" її вплив.

Розглянемо, як класичні закони регулювання впливають на якість перехідного процесу системи автоматичного регулювання. В операторній формі рівняння регулятора має вигляд

$$u = W_{рег}(p)e, \quad (2.1)$$

де u – вихідна величина регулятора (керуюча дія);

e – вхідна величина регулятора (похибка регулювання).

В дужках наведені назви величин для замкнутої одноконтурної системи автоматичного регулювання, що складається з послідовно з'єднаних регулятора та об'єкта керування, охоплених одиничним від'ємним зворотним зв'язком.

Такий показник якості, як статична похибка, є одним з важливих і характеризує точність регулювання в статичному режимі.

Покажемо, як пропорційний закон регулювання впливає на статичну похибку перехідного процесу замкнутої системи автоматичного регулювання. Рівняння (2.1) у цьому випадку набуває вигляду:

$$u = k_n \cdot e,$$

де k_n – коефіцієнт передачі регулятора.

Передатна функція $W_{pez}(p)$ може мати й складніший вид, наприклад:

$$W_{pez}(p) = k \frac{A(p)}{nB(p)}, \quad (2.2)$$

де $A(p)$ і $B(p)$ – деякі поліноми від оператора p .

Однак ланцюг регулювання в цьому випадку є статичною ланкою, і при передавальна функція $W_{pez}(p) \rightarrow$ Передавальна функція розімкнутої одноконтурної системи автоматичного регулювання має вигляд:

$$W_{p.c}(p) = W_{pez}(p)W_{ob}(p) = k_n W_{ob}(p), \quad (2.3)$$

де $W_{ob}(p)$ – передавальна функція об'єкта керування.

У сталому стані передавальна функція розімкнутої системи прямує до значення:

$$\lim_{p \rightarrow 0} W_{p.c}(p) = k_n \cdot k_{ob} = K. \quad (2.4)$$

Величина K називається узагальненим коефіцієнтом передачі розімкнутої системи і фізично є відношенням сталого значення регульованої величини до постійного значення похибки $\varepsilon = \varepsilon_0$, якщо ланцюг регулювання спільно з об'єктом розглядати як деякий підсилювач, на вхід якого діє сигнал у вигляді похибки ε , а на виході - посилений сигнал y . В результаті для коефіцієнта передачі можна записати:

$$K = \frac{y_{уст}}{\varepsilon_0}. \quad (2.5)$$

Запишемо вираз в операторній формі для замкнутої системи автоматичного регулювання відносно похибки:

$$\varepsilon = \frac{s}{1+W_{p.c}(p)} \frac{W_f(p)}{1+W_{p.c}(p)} f, \quad (2.6)$$

де s – сигнал завдання;

f – збурююча дія;

$W_f(p)$ – передавальна функція об'єкта керування по збурюючій дії.

Ще одним із важливих показників якості перехідного процесу є час регулювання, час. Інтегральний закон регулювання має низьку швидкодію. Це пояснюється тим, що при $t = 0$ в системі не тільки регулююча дія дорівнює нулю, але дорівнює нулю також і її перша похідна, тобто має пройти деякий час, поки не "накопичиться" інтеграл. Однак в системах автоматичного регулювання це призведе до того, що при малих змінах похибки регулювання вихідна величина

регулятора буде продовжувати швидко змінюватися, внаслідок чого у системи з'явиться схильність до коливань, наведем приклад такої реакції інтегрального регулятора (рисунок 2.6).

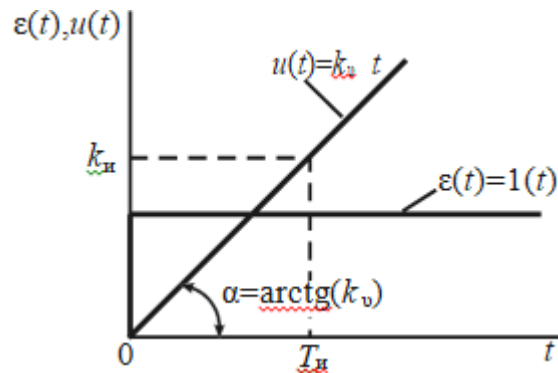


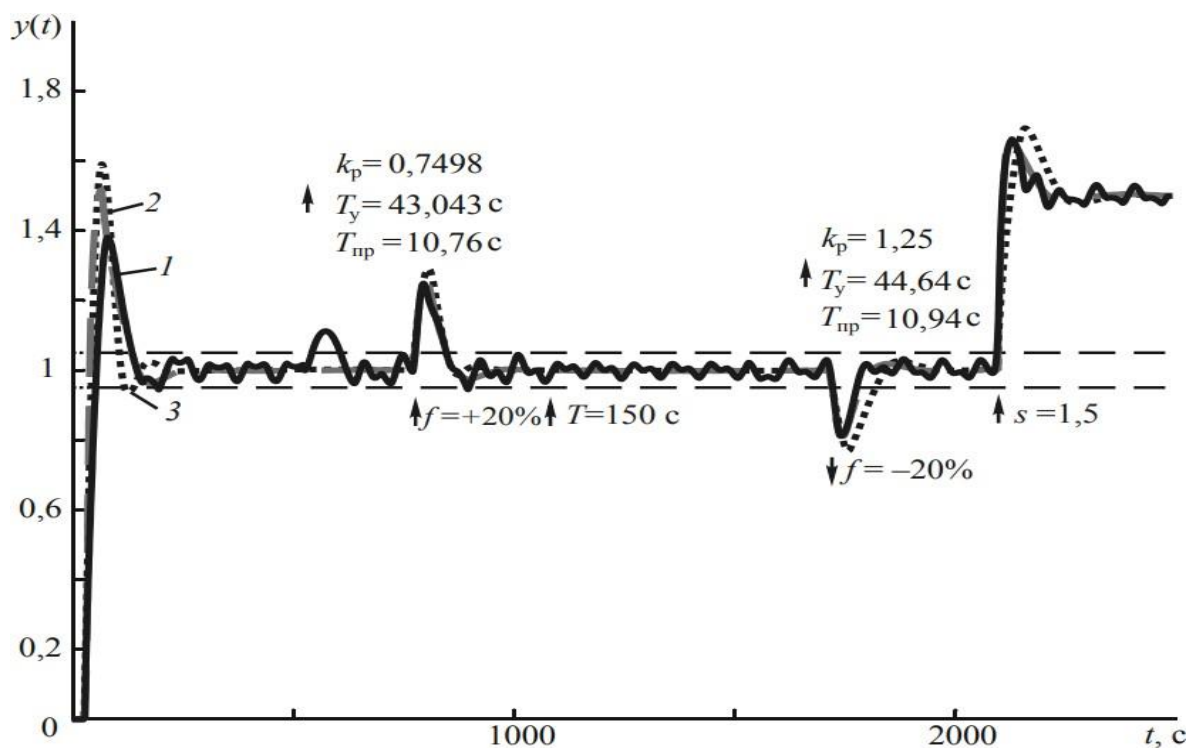
Рисунок 2.6 – Реакція інтегрального регулятора $u(t)$ на помилку регулювання $e(t)$

Тут вже доводиться рахуватися з такими показниками якості, як перерегулювання і ступінь затухання. Тому використання даного типу регулювання передбачає пошук компромісу між швидкістю та ступенем затухання. Пропорційний регулятор має кращу швидкість, тому використання спільно пропорційного та інтегрального регулювання дає деякий вииграш у швидкості і зведенні статичної похибки до нуля. Таке регулювання отримало назву ізодромного або пропорційно-інтегрального (ПІ). Ізодромне регулювання поєднує в собі високу точність інтегрального регулятора та швидкість пропорційного. Надалі система починає працювати як система інтегрального регулювання, тому що з часом переважне значення набуває другий доданок що призводить до подальшого «затягування» процесу.

Параметричний синтез ПІД-регулятора за методом РАФЧХ для об'єкта, що описується передатною функцією при заданих $\psi = 0,95$ та другому інтегральному критерію якості, дав наступні результати: $k_p = 0,727$; $T_y = 51,929$ с; $T_{\text{пр}} = 5,77$ с. Синтез методом Циглера-Нікольса дозволив визначити значення: $k_p = 0,72$; $T_y = 42,35$ с; $T_{\text{пр}} = 5,57$ с.

Встановлено, що перехідний процес системи автоматичного регулювання з регулятором, розрахованим за методом Циглера-Нікольса, має близькі до мінімуму інтегральні оцінки якості, однак у тимчасовій області перехідний процес має менше перерегулювання і меншу максимальну динамічну помилку в порівнянні з процесами, налаштованими за аналітичним методом РАФЧХ, що, безсумнівно, краще для технологічних процесів.

Адаптивний ПД-регулятор з автоматичним настроюванням коефіцієнтів має близькі динамічні характеристики з ПД-регулятором, налаштованим вручну, на кожному етапі адаптації, за методом Циглера-Нікольса, і помітний виграв як регулювання порівняно з ПД-регулятором, що має фіксовані налаштування при параметричному збуренні. Для більш детального порівняння наведемо приклад динамічних характеристик цих ПД-регуляторів (рис. 2.7).



1 – адаптивний ПД-регулятор; 2 – класичний ПД-регулятор, що налаштовується вручну на кожному етапі роботи адаптивного регулятора; 3 – ПД-регулятор, налаштований на початкове значення постійного часу об'єкта

Рисунок 2.7 – Динамічні характеристики

У табл. 2.1 наведем чисельні значення параметрів налаштування регуляторів, а табл. 2.2 – показників якості перехідних процесів. Як видно, адаптивний регулятор характеризується досить високою швидкістю корекції параметрів при збереженні налаштувань на околиці їх розрахункових значень методом Циглера-Нікольса.

Таблиця 2.1 – Параметри налаштування ПІД-регулятора, отримані автоматично та аналітичним способом

Постійна часу T , с	Значення параметрів налаштування адаптивного ПІД-регулятора			Значення параметрів налаштування ПІД-регулятора, розрахованих вручну на кожному етапі адаптації		
	k_p	T_y , с	$T_{пр}$, с	k_p	T_y , с	$T_{пр}$, с
97,7	0,7498	43,043	10,76	0,72	42,4	10,76
150	1,2521	44,641	10,94	1,07	44,58	11,05
50	0,4153	40,181 6	6,02	0,4027	40,116	6,046

Таблиця 2.2 – Оцінки показників якості перехідного процесу системи автоматичного регулювання з ПІД-регуляторами, налаштованими різними способами

Показники якості перехідного процесу	Адаптивний регулятор		ПІД-ПІІД-регулятор с ручним налаштуванням на кожному етапі адаптації				ПІД-регулятор фіксованим налаштуванням		
	<i>T, с</i>								
	50	97,7	150	50	97,7	150	50	97,7	150
<i>y</i>	0,94	0,99	0,99	0,95	0,99	0,98	0,06	0,95	0,99
<i>s, %</i>	56,3	53,9	68,9	53,1	51,7	55,3	115	59,2	45
<i>A_{max}</i>	0,56	0,54	0,69	0,53	0,51	0,55	1,15	0,59	0,45
<i>t_p, с</i>	128	134	133	127	135	138	4×10 ³	135	221

Таким чином, розроблений контролер може широко використовуватися при автоматизації багатьох технологічних процесів, і насамперед таких, як теплоенергетичний, металургійний, хімічний та ін. До недоліків регулятора слід віднести можливість адаптації тільки в стані системи і роботи алгоритму, що встановився, тільки спільно з об'єктами, що володіють зміною фазового зсуву вище -180° . Проведені дослідження свідчать про перспективне використання регулятора під час управління нестационарними технологічними об'єктами.

3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РІВНЯ ЖИВИЛЬНОЇ ВОДИ У ПАРОГЕНЕРАТОРАХ АЕС

Комп'ютерне моделювання частотних характеристик рівня живильної води у парогенераторах атомних електростанцій (АЕС) є важливим інструментом для аналізу і оптимізації роботи цих критично важливих компонентів. Парогенератор є основним елементом, що забезпечує вироблення пари, яка потім використовується для приводу турбін і генерації електроенергії. Підтримка стабільного рівня живильної води в парогенераторі є ключовим фактором для забезпечення його ефективної та безпечної роботи. Комп'ютерне моделювання дозволяє досліджувати динамічні властивості системи управління рівнем води, аналізувати її стійкість та знаходити оптимальні параметри регулювання.

Комп'ютерне моделювання частотних характеристик полягає у створенні математичної моделі системи управління рівнем води, яка описує її поведінку в частотній області. Одним із найпоширеніших методів є використання перетворення Лапласа для отримання передавальної функції системи. Передавальна функція дозволяє визначити, як змінюється вихідний сигнал системи (рівень води) у відповідь на зміну вхідного сигналу (подача води) на різних частотах.

Для початку моделювання створюється структурна схема системи управління, яка включає основні елементи: датчики рівня води, регулятори, виконавчі механізми та сам парогенератор. Кожен з цих елементів описується відповідними математичними рівняннями. Наприклад, динаміка зміни рівня води в парогенераторі може бути описана рівняннями матеріального балансу, що враховують потоки вхідної та вихідної води, а також випаровування.

З отриманих рівнянь формується передавальна функція системи, яка потім аналізується у частотній області. Частотний аналіз дозволяє визначити амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) та фазо-частотну характеристику (ФЧХ) системи. АЧХ показує, як змінюється амплітуда вихідного сигналу при зміні частоти вхідного сигналу, тоді як ФЧХ описує зсув фази вихідного сигналу відносно

вхідного.

Одним з основних завдань частотного аналізу є визначення стійкості системи управління. Система вважається стійкою, якщо її вихідний сигнал залишається обмеженим при будь-якому обмеженому вхідному сигналі. Частотні характеристики дозволяють оцінити запас стійкості системи, тобто наскільки система стійка до змін параметрів або зовнішніх збурень. Наприклад, якщо АЧХ має значні коливання на певних частотах, це може свідчити про потенційні проблеми зі стійкістю.

Крім того, частотний аналіз дозволяє оптимізувати параметри регуляторів. Регулятори, такі як пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори, відіграють ключову роль у підтримці стабільного рівня води. Оптимізація параметрів ПІД-регулятора дозволяє забезпечити швидку та точну реакцію системи на зміни вхідного сигналу, мінімізуючи при цьому коливання рівня води.

Результати моделювання та аналізу частотних характеристик можуть бути використані для покращення існуючих систем управління або розробки нових. Наприклад, на основі результатів можна розробити рекомендації щодо модернізації регуляторів, впровадження додаткових датчиків або змін у конструкції парогенератора.

У підсумку, комп'ютерне моделювання частотних характеристик рівня живильної води у парогенераторах АЕС є важливим інструментом для дослідження та оптимізації систем управління. Завдяки цьому методу можна детально вивчити динамічні властивості системи, оцінити її стійкість та знайти оптимальні параметри регулювання, що сприяє підвищенню безпеки та ефективності експлуатації атомних електростанцій.

3.1 Математична модель рівня живильної води в парогенераторі

Для кількісного моделювання потрібна математична модель, яка точно описує процеси, що відбуваються в парогенераторі. Парогенератор є складною динамічною системою, в якій відбуваються різні фізичні процеси: конвекція,

теплообмін, випаровування та конденсація. Тому для створення адекватної математичної моделі необхідно враховувати усі ці процеси та їх взаємодію.

Основними компонентами математичної моделі є рівняння, що описують баланс маси і енергії в системі. Рівняння балансу маси визначає зміни рівня живильної води в парогенераторі, враховуючи потоки вхідної та вихідної води, а також випаровування. Це рівняння дозволяє визначити, як змінюється маса води в парогенераторі з часом.

Для моделювання динамічної поведінки рівня води в парогенераторі використовується диференціальне рівняння, яке описує зміну рівня води в часі. Це рівняння отримується з рівняння балансу маси і дозволяє визначити, як змінюється рівень води в парогенераторі в залежності від вхідних та вихідних потоків.

Важливим аспектом математичної моделі є врахування нелінійних властивостей парогенератора. Наприклад, швидкість випаровування залежить від температури води і пари, а також від тиску в системі. Тому необхідно враховувати ці взаємозалежності для отримання більш точної моделі.

Математична модель повинна також враховувати динаміку системи управління рівнем води. Для цього вводяться додаткові рівняння, що описують роботу регуляторів і виконавчих механізмів.

Математична модель рівня живильної води в парогенераторі є потужним інструментом для аналізу та оптимізації роботи цього важливого елемента АЕС. Вона дозволяє проводити дослідження динамічних властивостей системи, оцінювати її стійкість, знаходити оптимальні параметри регуляторів, а також проводити моделювання різних режимів роботи.

3.1.1 Математична модель у вигляді звичайного диференціального рівняння з необхідними початковими умовами

Для розрахунку диференціального рівняння спочатку розглянемо як приклад горизонтальний парогенератор (рисунок 3.1).

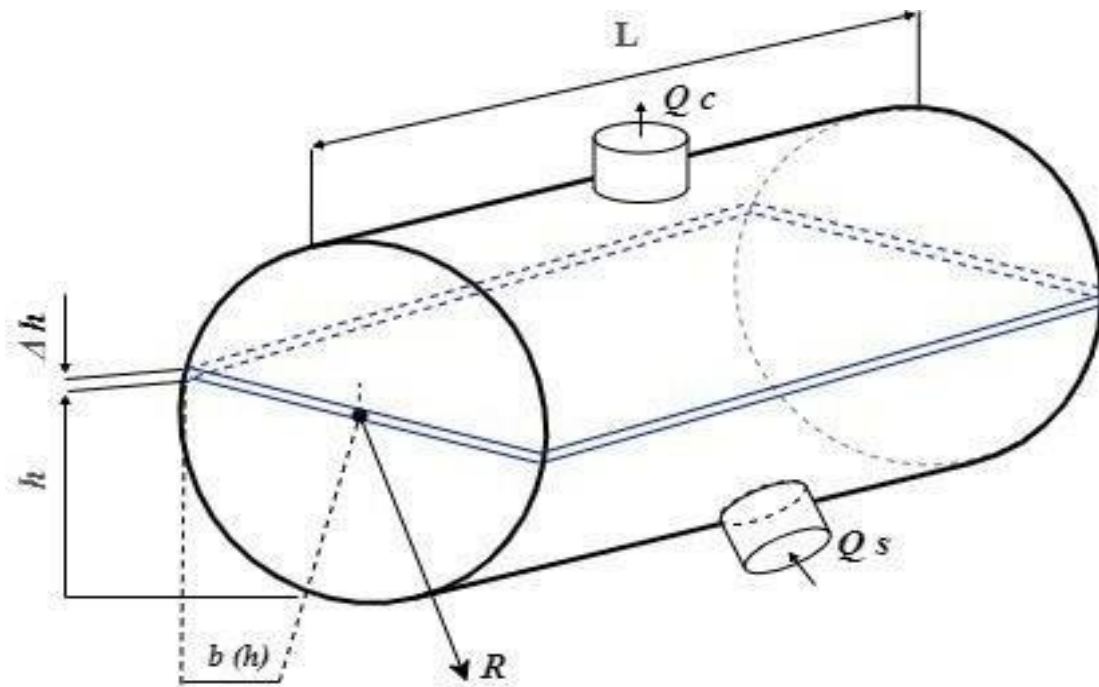


Рисунок 3.1 – Горизонтальний парогенератор

Відомі дані: $[m]L$ – довжина корпусу (внутрішня), $[m]R$ – радіус корпусу (внутрішній) $[m]h = h(t)$ – висота рівня води в корпусі парогенератора, Q_c – вихід води за рахунок пароутворення, Q_s – підняття води, $Q_c = Q_s$ – (припущення при стабільній роботі)

$$h(t + \Delta t) = h(t) + \Delta h, \quad (3.1)$$

де $b = b(h)$ – повна ширина дзеркала випаровування на рівні висоти h

Тоді:

$$\Delta h \cdot 2b(h) \cdot L = Q_s \Delta t - Q_c \Delta t, \quad (3.2)$$

$$2Lb(h) \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} = Q_s - Q_c. \quad (3.3)$$

Розумієм що $\Delta t \rightarrow 0$ тоді із (3.3) отримаємо диференційне рівня у наступному вигляді:

$$2Lb(h) \frac{dh}{dt} = Q_s(t) - Q_c(t), h(t_0) = h_0, \quad (3.4)$$

де t_0 – заданий момент часу, який приймаєм за початковий;

h_0 – задана висота рівня живильної води;

0 – момент часу $t = t_0$.

Для того щоб визначити $b(h)$ розглянемо переріз корпусу парогенератора як приклад наведем (рисунок 3.2).

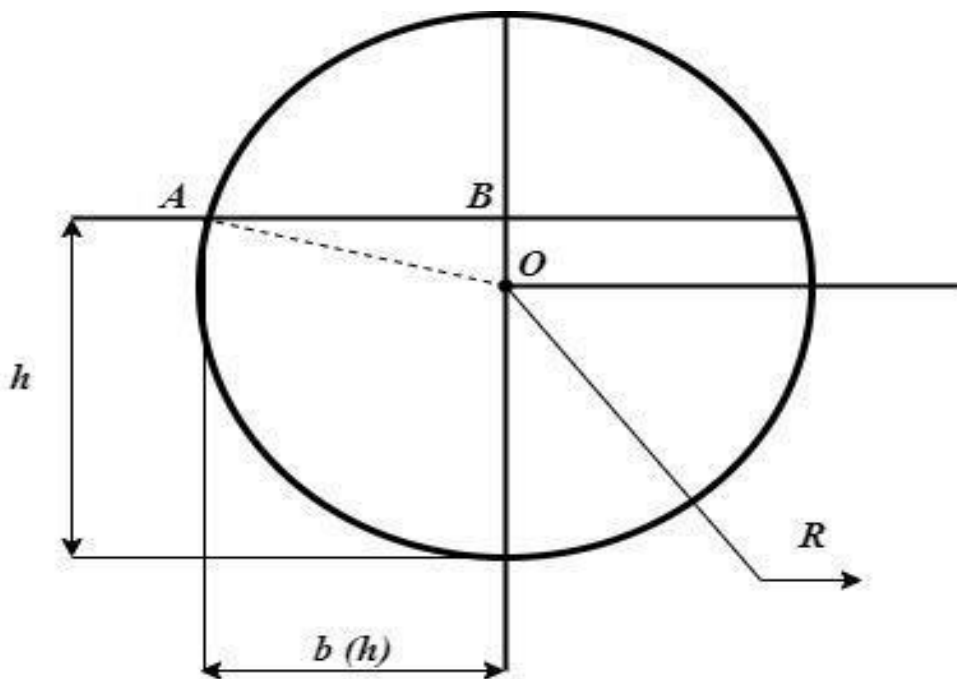


Рисунок 3.2 – Переріз корпусу парогенератора

$$\begin{aligned} \triangle AOB; OA = R; OB = h - R \\ b(h) = \sqrt{R^2 - (h - R)^2} = \sqrt{R^2 - (h^2 - 2hR + R^2)} = \sqrt{R^2 - h^2 + 2hR + R^2} = \sqrt{2hR - h^2}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Тоді отримуємо з (3.5):

$$b(h) = \sqrt{h(2R - h)}. \quad (3.6)$$

За умовою (3.6) задача (3.4) набуває вигляду:

$$2L \sqrt{h(2R - h)} \frac{dh}{dt} = Q_s - Q_c, h(t_0) = h_0. \quad (3.7)$$

Рівняння (3.7) лінійне при відношенні:

$$h(t) \approx t_0. \quad (3.8)$$

За умовою (3.8) рівняння (3.7) набуває вигляду

$$2L \sqrt{h_0(2R - h_0)} \frac{dh}{dt} = Q_s - Q_c, h(t_0) = h_0. \quad (3.9)$$

Обговоримо що:

$$\varpi_0 = 2L \sqrt{h_0(2R - h_0)}. \quad (3.10)$$

З урахуванням введеної змінної в рівнянні (3.10) модель площі дзеркала парогенератора (3.9) набуває вигляду:

$$\varpi_0 \frac{dh}{dt} = Q_s - Q_c, h(t_0) = h_0. \quad (3.11)$$

Тоді у рівнянні (3.4) маємо лінеаризованну модель рівня живильної води у парогенераторі, яка дозволяє точно регулювати подачу води, забезпечуючи стабільну роботу системи. Це підвищує ефективність виробництва пари, знижує ризики аварій та оптимізує використання ресурсів. Така модель сприяє

підвищенню надійності та безпеки експлуатації парогенератора в промислових умовах.

3.1.2 Вплив ПІД-регулятора на живлення парогенератора живильною водою

Для того щоб було зручно виявити вплив ПІД-регулятора на процес живлення парогенератора зручно вести позначення:

$$h(t) = h_0 + x(t); Q_s(t) - Q_c(t) = U(t), \quad (3.12)$$

де $x(t)$ – відхилення рівня живильної води від початкового положення;

$U(t)$ – різниця між подачею та надходженням живильної води до парогенератора.

З урахуванням введеного позначення (4.12) модель (4.11) запишемо так:

$$\varpi \frac{dx}{dt} = U; x(0) = 0, \quad (3.13)$$

де прийнято, що $t_0 = 0$.

Дія ПІД-регулятора визначається за рахунок корекції величини $U(t)$ яка пропорційна величині χ і рівняння запишемо у такому вигляді:

$$\varpi \frac{dx}{dt} = U - K_p x - K_i \int_0^t x(t) dt - K_D \frac{dx}{dt}; x(0) = 0, \quad (3.14)$$

де K_p, K_i, K_D – параметри ПІД-регулятора;

Представимо модель (3.14) у вигляді:

$$\left(\varpi + K_D \right) \frac{dx}{dt} + K_p x + K_i \int_0^t x(t) dt = U(t), x(0) = 0. \quad (3.15)$$

Для того, щоб перетворити модель (3.15) до зручного вигляду введем зміну:

$$x = \frac{dy}{dt}, y(0) = 0, \quad (3.16)$$

де $y(t)$ – нова змінна.

З урахуванням нової змінної (3.16) модель (3.15) прийме вигляд:

$$\omega_0 + \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} + K_I y = U(t), y(0) = 0, \frac{dy}{dt} = 0. \quad (3.17)$$

У вигляді рівняння (3.17) маємо математичну модель рівня води в парогенераторі з урахуванням роботи ПД-регулятора.

Для моделювання частотних характеристик математичну модель (3.17) зручно представити у вигляді динамічної ланки з передавальною функцією:

$$2\Pi = \frac{K_P}{\omega_0 + K_D}, \omega^2 = \frac{K_I}{\omega_0 + K_D}, b_0 = \frac{1}{\omega_0 + K_D}. \quad (3.18)$$

Тоді за урахуванням рівняння (3.18) передавальна функція прийме вигляд:

$$w(s) = \frac{b_0 s}{s^2 + 2ns + \omega^2}. \quad (3.19)$$

3.2 Частотні характеристики

Частотні характеристики є ключовим інструментом для аналізу і синтезу систем автоматичного управління, а також для дослідження лінійних динамічних систем. Вони дозволяють визначати реакцію системи на синусоїдальні вхідні

сигнали різних частот, що є ключовим аспектом при оцінці стабільності, стійкості та поведінки системи в частотній області.

Графічне представлення частотних характеристик часто здійснюється у вигляді Бode-діаграм, які включають два графіки: один для амплітудної характеристики, що показує залежність логарифма амплітуди від частоти на логарифмічній шкалі, і другий для фазової характеристики, що відображає залежність фази від частоти. Таке представлення дозволяє інженерам швидко оцінити поведінку системи на різних частотах.

Аналіз АЧХ та ФЧХ дозволяє визначити основні параметри системи, такі як смуга пропускання, частота зрізу, резонансна частота та ін. Ці параметри мають велике значення для оцінки здатності системи до фільтрації сигналів, стійкості та ефективності у придушенні шумів.

Наприклад, для низькочастотних фільтрів важливо, щоб система мала широку смугу пропускання, що дозволяє пропускати необхідний діапазон частот сигналу без значного спотворення. Для високочастотних фільтрів, навпаки, критичною є здатність придушувати частоти, що перевищують певний поріг, забезпечуючи захист системи від високочастотних завад.

Однією з важливих характеристик є фазова затримка, яка може призвести до нестабільності системи, якщо не враховувати її при проектуванні регуляторів. Аналіз ФЧХ допомагає визначити, на яких частотах виникають найбільші фазові зсуви і як вони впливають на загальну стійкість системи. Наприклад, для систем зі зворотним зв'язком важливо забезпечити такий фазовий запас, щоб уникнути коливань і забезпечити стійкість.

Частотні характеристики також дозволяють здійснювати оптимізацію систем управління. Наприклад, регулятори ПД налаштовуються на основі аналізу частотних характеристик, щоб забезпечити необхідну швидкодію і точність системи. Використовуючи АЧХ та ФЧХ, можна точно підібрати параметри пропорційної, інтегральної та диференціальної складових регулятора, що дозволяє досягти оптимального балансу між швидкістю реакції і стабільністю системи.

У випадку багатомірних систем, частотні характеристики можуть бути представлені у вигляді матриць передатних функцій, що дозволяє досліджувати взаємодію між різними входами і виходами системи.

3.2.1 Частотні характеристики рівня живильної води у корпусі парогенератора

Для отримання частотних характеристик рівня живильної води у корпусі парогенератора використаємо функцію (3.19) в якій:

$$s = i\Omega, \quad (3.20)$$

де $i^2 = -1$;

Ω – частота; (3.20) → (3.19)

$$W(i\Omega) = \frac{b_0 i \Omega}{(i\Omega)^2 + n i \Omega + \omega^2} = \frac{b_0 \Omega i}{\omega^2 - \Omega^2 + 2n\Omega \cdot i} = \frac{b_0 \Omega i ((\omega^2 - \Omega^2) - 2n\Omega i)}{(\omega^2 - \Omega^2)^2 + n\omega\Omega^2} = b_0 \Lambda \frac{2n\Lambda + (\omega^2 - n^2)i}{(\omega^2 - n^2)^2 + n^2 i^2 \Omega^2}. \quad (3.21)$$

Тоді отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} R_e(w(iu)) &= b_0 \Omega \frac{2u\Omega}{(\omega^2 - \Lambda^2)^2 + u^2 i^2 \Omega^2}, \\ I_m(w(iu)) &= b_0 \Omega \frac{\omega^2 - \Omega^2}{(\omega^2 - \Omega^2)^2 + u^2 i^2 \Omega^2}. \end{aligned} \right\} \cdot \quad (3.22)$$

Частотні характеристики:

$$A(\Omega) = \sqrt{R_e^2(w(i\Omega)) + I_m^2(w(i\Omega))}, \quad (3.23)$$

$$\operatorname{tg}\varphi(\Omega) = \frac{I_m(w(i\Omega))}{R_e(w(i\Omega))}, \quad (3.24)$$

де $A(\Lambda\Omega)$ – АЧХ; $\varphi(\Omega)$ – ФЧХ.

За умовою рівняння (3.22) частотні характеристики (3.23) і (3.24) будуть мати вигляд:

$$A(\Omega) = \frac{b_0 \Omega}{\sqrt{(\omega^2 - \Omega^2)^2 + u^2 \Omega^2}}, \quad (3.25)$$

$$\operatorname{tg}\varphi(\Omega) = \frac{\omega^2 - \Omega^2}{2u\Omega}. \quad (3.26)$$

3.3 Параметри ПД-регулятора

Для того, щоб знайти параметри ПД-регулятора скористаємося характеристичним рівнянням:

$$\lambda^2 + 2n\lambda + \omega^2 = 0. \quad (3.27)$$

Корні рівняння (3.27) будуть мати вигляд:

$$\lambda_{1,2} = -n \pm \sqrt{n^2 - \omega^2}. \quad (3.28)$$

Тоді з рівняння (3.28) отримуємо що:

$$R_e \lambda_{1,2} = -n < 0. \quad (3.29)$$

З рівняння (3.29) отримуємо асимптотичну стійкість, проте можливі три варіанти:

$$n^2 > \omega^2 \Rightarrow \frac{K_p}{2(\varpi_0 + K_D)} > \sqrt{\frac{K_I}{\varpi_0 + K_D}}, \quad (3.30)$$

$$n^2 = \omega^2 \Rightarrow \frac{K_p}{2(\varpi_0 + K_D)} = \sqrt{\frac{K_I}{\varpi_0 + K_D}}, \quad (3.31)$$

$$n^2 < \omega^2 \Rightarrow \frac{K_p}{2(\varpi_0 + K_D)} < \sqrt{\frac{K_I}{\varpi_0 + K_D}}. \quad (3.32)$$

Нерівність (3.30)-(3.32) можна розглядати як обмеження параметру K_I при заданих параметрах K_P та K_D :

$$n^2 > \omega^2 \Rightarrow K_I < \frac{K_p^2}{4(\varpi_0 + K_D)}, \quad (3.33)$$

$$n^2 = \omega^2 \Rightarrow K_I = \frac{K_p^2}{4(\varpi_0 + K_D)}, \quad (3.34)$$

$$n^2 < \omega^2 \Rightarrow K_I > \frac{K_p^2}{4(\varpi_0 + K_D)}. \quad (3.35)$$

Зручно вести величину:

$$[K_I] = \frac{K_p^2}{4(\varpi_0 + K_D)}. \quad (3.36)$$

Тоді нерівності (3.33) – (3.35) приймуть вигляд:

$$n^2 > \omega^2 \Rightarrow K_I < [K_I], \quad (3.37)$$

$$n^2 = \omega^2 \Rightarrow K_I = [K_I], \quad (3.38)$$

$$n^2 < \omega^2 \Rightarrow K_I > [K_I]. \quad (3.39)$$

З рівнянь (3.37) – (3.39) отримуємо три характерних випадка.

3.4 Комп'ютерне моделювання

Для моделювання будемо використовувати комп'ютерну систему Scilab та середу графічного моделювання Xcos. Xcos є інтегрованим модулем для

графічного моделювання в Scilab, що дозволяє створювати блок-схеми систем керування та їх моделювання.

Вихідні дані, які необхідні нам для комп'ютерного моделювання отримуємо із статті “The Feed Water Level Improved Automated Control for Steam Generators of Nuclear Power Plants”

$$\varpi = \begin{matrix} 2 \\ 0 \end{matrix} \begin{matrix} 45M \\ ; K_P \end{matrix} ; \begin{matrix} M^2 \\ 15 \frac{M^2}{c} \end{matrix} ; \begin{matrix} K_D \\ 5M \end{matrix} . \quad (3.40)$$

Дані з формули (3.40) та формули (3.37) приведуть до результату:

$$[K_I] = 1,125 \frac{M^2}{c^2}. \quad (3.41)$$

Розглянемо моделювання рівня живильної води для випадкової величини $u(t)$ яка змінюється через кожні t_u одиниць часу.

Приймемо:

$$u(t) = \bar{u} + \tilde{u}(t), \quad (3.42)$$

де \bar{u} – задана постійна;

\tilde{u} – випадкова величина.

Приймемо:

$$\pi = 0,2 \frac{M^3}{c}, \quad (3.43)$$

Випадкова складова $\tilde{u}(t)$ обмежена та змінюється кожні t_u одиниць часу;

Приймемо що:

$$(\tilde{u}(t)) \leq 0,1\bar{u}, t_u = 2c. \quad (4.44)$$

У ході моделювання системи з ПІД- регулятором використовуємо вихідні дані з формул (3.40)-(3.41) та розробимо блок-схему (рисунок 3.3) яка включає генератор випадкових чисел, суматор, передаточну функцію, блоки часу та вивід результатів. Генератора випадкових чисел генерує випадкові значення, які будуть використовуватись як вхідний сигнал для системи. Суматор об'єднує вхідні сигнали з випадковими збуреннями, забезпечуючи сумарний сигнал, який подається на вхід системи. Передаточна функція моделює динаміку системи з урахуванням коефіцієнтів: A_0, K_D, K_p, K_I . Вона представляє собою математичну модель системи, яка описує її поведінку в частотній області. Використовуємо блок для запису результатів моделювання в робоче середовище Scilab. Це допомагає візуально оцінити поведінку системи при змінних вхідних сигналах.

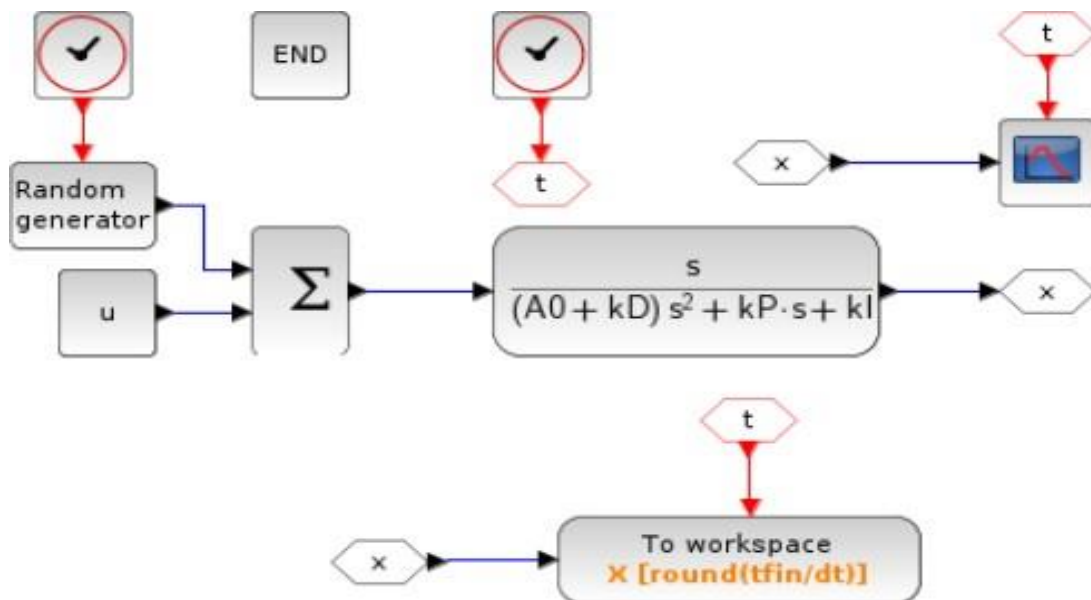


Рисунок 3.3 – Комп'ютерна модель частотних характеристик рівня живильної води з ПІД-регулятором

Використовуючи рівняння (3.37)-(3.39) розглянемо три різних випадка поведінки інтегральної складової ПІД-регулятора (рисунок 3.4).

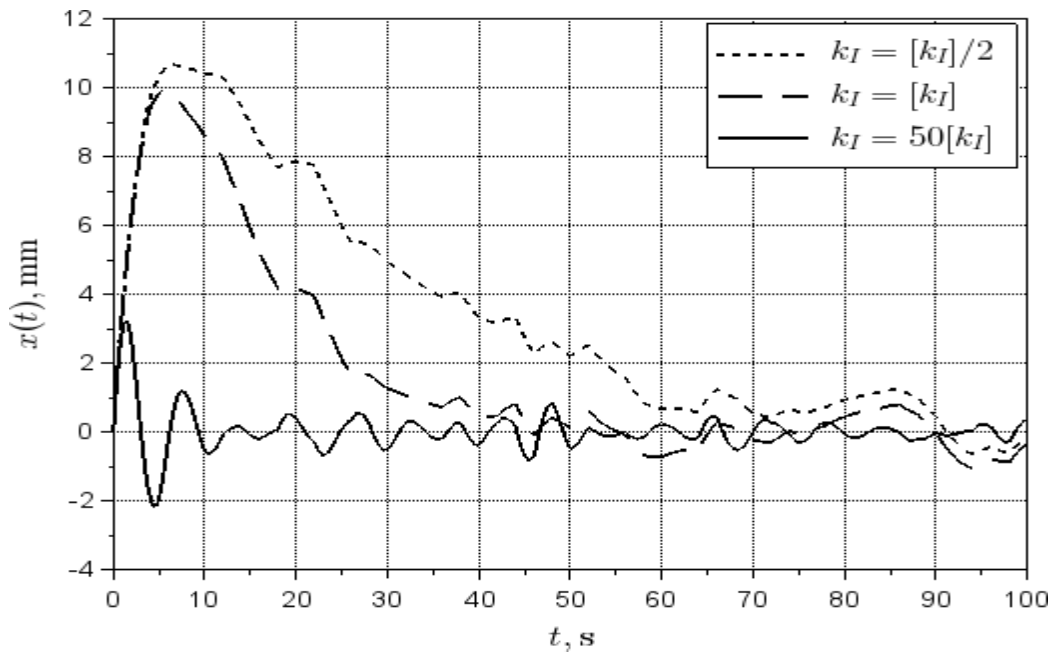


Рисунок 3.4 – Вплив складової частини ПД-регулятора на перехідні процеси стабілізації рівня живильної води

Враховуючи попередній графік та формулу (3.23) розглянемо амплітудно-частотні характеристики системи та побудуємо графік, який відобразить залежність амплітуди вихідного сигналу від частоти вхідного сигналу. Це дозволить нам детальніше проаналізувати поведінку системи при різних частотах, оцінити її стійкість та ефективність регуляції. Після цього ми зможемо визначити оптимальні параметри ПД-регулятора для забезпечення стабільної та ефективної роботи системи.

На основі отриманих результатів можна зробити висновки про налаштування параметрів ПД-регулятора для досягнення найкращої продуктивності.

Також ми проведемо порівняльний аналіз отриманих амплітудно-частотних характеристик для різних значень коефіцієнтів ПД-регулятора. Це допоможе визначити, як зміна параметрів впливає на загальну поведінку системи, та дозволить вибрати оптимальні налаштування для забезпечення максимальної стабільності та ефективності.

Враховуючи попередній графік та формулу (3.24), розглянемо фазово-частотні характеристики системи та побудуємо графік, який відобразить

залежність фазового зсуву вихідного сигналу від частоти вхідного сигналу (рисунок 3.5).

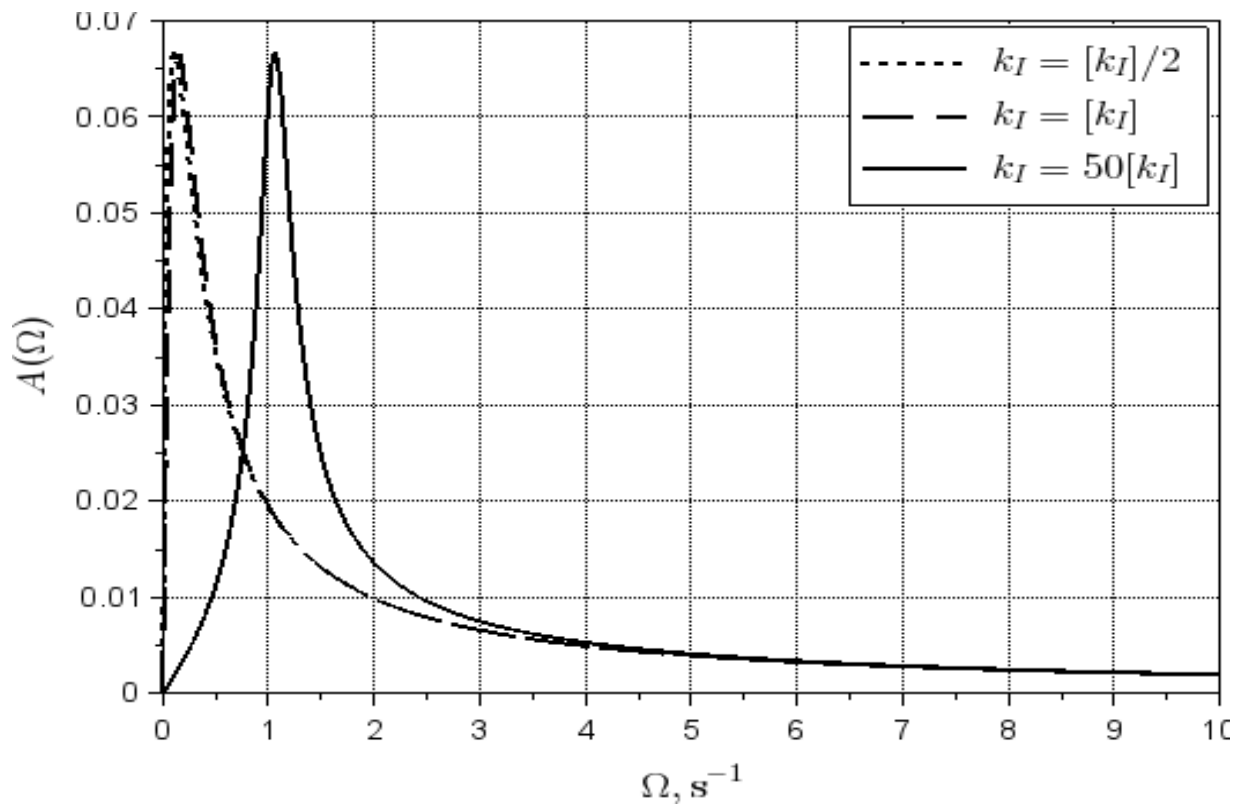


Рисунок 3.5 – Амплітудно частотні характеристики

Цей графік дозволить нам детальніше проаналізувати поведінку системи при різних частотах, оцінити її стійкість та ефективність регуляції. Після цього ми зможемо визначити оптимальні параметри ПІД-регулятора для забезпечення стабільної та ефективної роботи системи.

При побудові фазочастотних характеристик ми будемо використовувати середовище Scilab, щоб визначити, як система реагує на різні частоти збурень та як змінюється фазовий зсув між вхідним і вихідним сигналами.

Також ми проведемо порівняльний аналіз отриманих фазочастотних характеристик для різних значень коефіцієнтів ПІД-регулятора (рисунок 3.6). Це допоможе визначити, як зміна параметрів впливає на загальну поведінку системи, та дозволить вибрати оптимальні налаштування для забезпечення максимальної стабільності та ефективності.

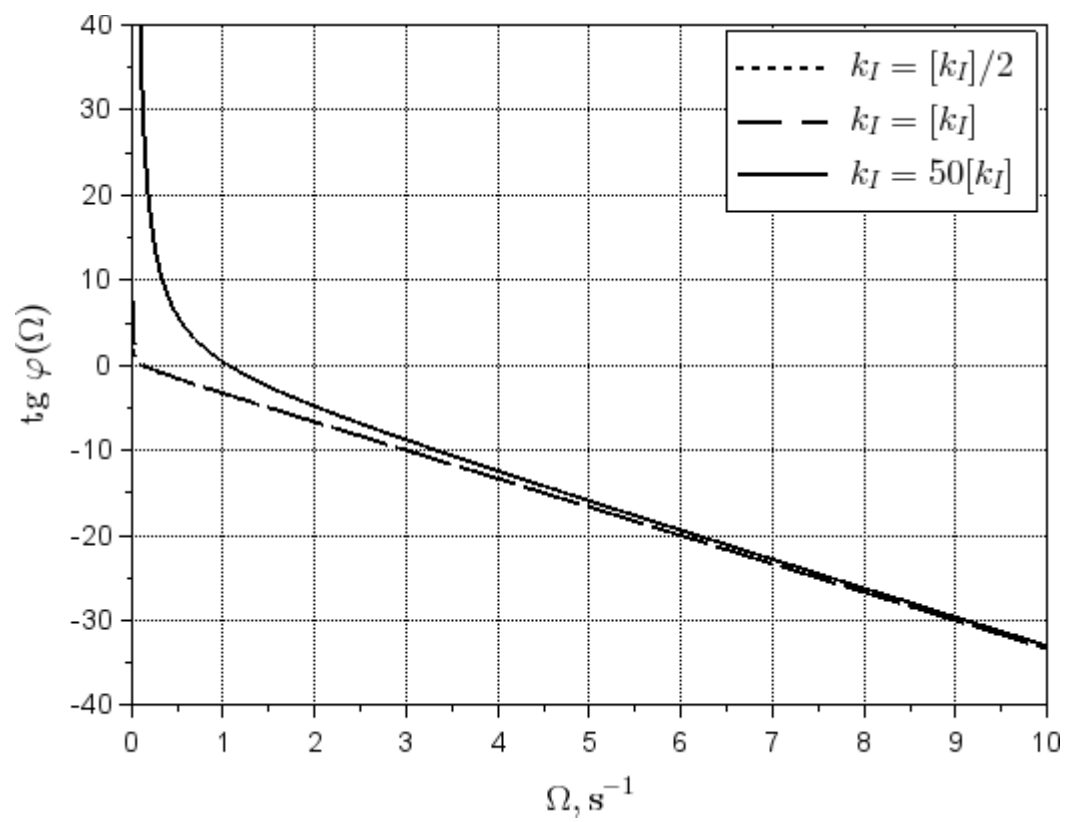


Рисунок 3.6 – Фазово-частотні характеристики

ВИСНОВОК

У процесі дослідження і моделювання системи управління живильною водою парогенератора ПГВ-1000 з використанням ПД-регулятора, були досягнуті значущі та практично важливі результати. Спочатку ми детально розглянули теоретичні основи функціонування парогенератора. Цей важливий компонент атомної електростанції виконує критичну функцію виробництва пари для турбін за рахунок тепла, переданого від реактора через теплообмінник. Парогенератор є складним механізмом, і для його ефективної роботи необхідно точно контролювати рівень живильної води, що потрапляє всередину. Надмірно низький рівень води може призвести до перегріву та пошкодження труб, тоді як занадто високий рівень може викликати гідравлічні удари і призвести до винесення рідини в паропровід, що може бути небезпечно.

Для забезпечення ефективної та безпечної роботи парогенератора використовують ПД-регулятор (пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор), який коригує подачу живильної води на основі відхилення поточного рівня від заданого значення. Це дозволяє підтримувати оптимальний рівень води в системі, забезпечуючи стабільність та ефективність роботи парогенератора. Моделювання частотних характеристик такої системи стало важливим етапом нашого дослідження.

Моделювання частотних характеристик полягає у створенні математичної моделі, яка описує реакцію парогенератора та ПД-регулятора на різні збурення рівня води з різною частотою. Це дозволило нам проаналізувати стійкість, швидкодію, точність та інші важливі характеристики системи регулювання в різних режимах роботи атомної електростанції. Аналіз частотних характеристик системи управління парогенератором показав, що ПД-регулятор забезпечує ефективне регулювання рівня живильної води, зменшуючи амплітуду коливань та покращуючи стабільність системи.

Для проведення аналізу ми використовували середовище Scilab та графічне моделювання Xcos, що дозволило нам створити візуальні моделі та провести детальний аналіз поведінки системи. В результаті нашого моделювання та аналізу частотних характеристик, ми змогли визначити оптимальні параметри ПД-регулятора, які забезпечують стабільну роботу системи при різних збуреннях. Наші результати підтвердили, що правильне налаштування параметрів ПД-регулятора є ключовим фактором для забезпечення надійної та ефективної роботи парогенератора.

Практичні результати моделювання підтвердили теоретичні висновки про ефективність ПД-регулятора. На основі отриманих даних були розроблені рекомендації щодо налаштування параметрів регулятора для забезпечення надійної роботи парогенератора в реальних умовах експлуатації атомної електростанції. Ці рекомендації включають в себе конкретні значення параметрів регулятора, а також стратегії налаштування системи у випадку різних типів збурень та змін робочих умов.

Отже, виконана робота підтвердила важливість використання ПД-регуляторів у системах управління парогенераторами для підвищення їх стабільності і ефективності. Наше дослідження продемонструвало, що правильно налаштований ПД-регулятор може значно знизити амплітуду коливань рівня живильної води, що призводить до покращення стабільності системи і зменшення ймовірності виникнення аварійних ситуацій.

Узагальнюючи, можна сказати, що наша робота зробила значний внесок у розуміння та вдосконалення систем управління парогенераторами на базі ПД-регуляторів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення методів моделювання та аналізу, а також на розробку нових алгоритмів регулювання, що ще більше підвищать ефективність та надійність роботи атомних електростанцій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, С.П. Новоселов, О.В Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2022. 55 с.
3. Бабічев В. П. Атомні електричні станції: основи проектування та експлуатації. – Київ: Енергоатом, 2015. – 360 с.
4. Сидоров Г. В. ПД-регулятори в системах автоматичного керування. – Київ: Техніка, 2011. – 322 с.
5. Методичні рекомендації з моделювання частотних характеристик для парогенераторів АЕС. – Міністерство освіти і науки України, 2014. – 45 с.
6. Циглер Дж. Г., Нікольс Н. Б. Оптимальні параметри регулювання для промислових процесів / Переклад з англійської. – Москва: Мир, 2009. – 210 с.
7. Єфімов, В. М. Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС. – Київ: Вид-во "Наукова думка", 2008. – 350 с.
8. Рассохин, Н. Г. Парогенераторные установки АЭС. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
9. Лукасевич, І. П. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций. – Москва: Машиностроение, 2004. – 420 с.
10. The Feed Water Level Improved Automated Control for Steam Generators of Nuclear Power Plants // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2022. – Vol. 57, No. 2. – P. 5-6.

11. 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.