МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проєкт)

другого (магістерського) рівня освіти
(рівень вищої освіти)

на тему Розробка автоматичної системи регулювання рівня двоконтурної схеми з реактором корпусного типу на теплових нейтронах

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1744
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Головченко Є.В.

Керівник проф., док. т. н. Пазюк М.Ю.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент директор ТОВ «Електротехмаш»
Курілець І. А.

Запоріжжя 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю. М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
(другий (магістерський) рівень)
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп`ютерно- інтегровані технології та робототехніка
(код та назва)
Освітня програма Автоматизація та комп`ютерно-інтегровані технології
(назва)
Спеціалізація
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
«____» _____2025 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ
Головченку Євгенію Валерійовичу
(прізвище, ім`я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Розробка автоматичної системи регулювання рівня двоконтурної схеми з реактором корпусного типу на теплових нейтронах
керівник роботи Пазюк Михайло Юрійович, професор, доктор наук
(прізвище, ім`я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «27» вересня 2025 року № 313-с
2. Строк подання студентом роботи 01 грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: технічна документація, технологічні інструкції, дані, отримані під час проходження виробничої практики
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити математичних моделей кінетики та теплообміну реактора, структурну схему АЕУ, структурної схеми АСУ ТП та вибір технічних засобів для ПНТ-3, розрахунок налаштувань регулятора, моделювання перехідних процесів, розрахунок надійності системи
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов`язкових креслень) презентація роботи

. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Пазюк М.Ю.		
2	Пазюк М.Ю.		
3	Пазюк М.Ю.		
4	Пазюк М.Ю.		
5	Пазюк М.Ю.		

7. Дата видачі завдання 26 травня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання, огляд літератури, опис об'єкта автоматизації	01.03.2025	
2	Розробка математичних моделей кінетики та теплообміну реактора	01.04.2025	
3	Проектування САР потужності та тиску, розробка структурної схеми АБУ	01.05.2025	
4	Розробка структурної схеми АСУ ТП та вибір технічних засобів для ІІПТ-3	01.06.2025	
5	Розрахунок налаштувань регулятора, моделювання перехідних процесів	15.07.2025	
6	Розрахунок надійності системи	01.08.2025	
7	Аналіз результатів дослідження, оформлення висновків	15.09.2025	
8	Розробка презентації роботи, проходження нормконтролю	26.11.2025	
9	Підготовка доповіді	01.12.2025	

Студент _____ Євгеній Головченко
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ Михайло Пазюк
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Віктор Коваленко
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Головченко Є. В. Розробка автоматичної системи регулювання рівня двоконтурної схеми з реактором корпусного типу на теплових нейтронах.

Кваліфікаційна робота магістра на здобуття вищої освіти за спеціальністю. 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, науковий керівник Пазюк М.Ю., Запорізький національний університет, Інженерний науково-навчальний інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем. Запоріжжя, 2025.

Кваліфікаційну роботу присвячено розробці та дослідженню системи автоматичного регулювання рівня теплоносія в елементах двоконтурної ядерної енергетичної установки з реактором типу ВВЕР-1000.

У ході виконання роботи проаналізовано технологічну схему енергоблока як об'єкта керування. Розроблено комплекс математичних моделей, що описують кінетику ядерного реактора, процеси теплообміну, внутрішні зворотні зв'язки та транспортне запізнювання, на основі чого отримано передавальні функції об'єкта.

Спроектовано структурну схему АСУ ТП верхнього рівня та детально розроблено функціональну схему автоматизації регулювання рівня в підігрівачі низького тиску (ПНТ-3). Обґрунтовано вибір технічних засобів контролю та виконавчих механізмів, описано алгоритм роботи регулятора.

Виконано розрахунок надійності системи, розглянуто питання охорони праці та проведено техніко-економічне обґрунтування проекту, яке підтвердило доцільність впровадження розробленої системи.

АТОМНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ АСУТП СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РІВЕНЬ, ПНТ-3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕДАВАЛЬНА ФУНКЦІЯ НАДІЙНІСТЬ ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

ABSTRACT

Golovchenko Ye. V. Development of an automatic level control system for a two-circuit scheme with a vessel-type thermal neutron reactor.

Master’s qualification thesis for the degree in Specialty 174 «Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics» / Scientific supervisor M. Yu. Paziuk; Zaporizhzhia National University, Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu. M. Potebnia, Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems. – Zaporizhzhia, 2025.

The master's thesis is devoted to the development and research of an automatic coolant level control system in the elements of a two-circuit nuclear power plant with a VVER-1000 type reactor.

During the study, the technological scheme of the power unit as a control object was analyzed. A set of mathematical models describing the nuclear reactor kinetics, heat exchange processes, internal feedback loops, and transport delays was developed; based on these, the transfer functions of the object were obtained.

The structural diagram of the upper-level APCS (Automated Process Control System) was designed, and the functional diagram for the automation of level control in the low-pressure heater (LPH-3) was developed in detail. The selection of technical control means and actuators was substantiated, and the controller operation algorithm was described.

A reliability calculation of the system was performed, occupational health and safety issues were examined, and a technical-economic justification of the project was conducted, confirming the feasibility of implementing the developed system.

NUCLEAR POWER PLANT, APCS, AUTOMATIC CONTROL SYSTEM, LEVEL, LPH-3, MATHEMATICAL MODELING, TRANSFER FUNCTION, RELIABILITY, ECONOMIC EFFICIENCY.

ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ 2
АНОТАЦІЯ 4
ABSTRACT 5
ВСТУП 8
1 ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ 13
1.1 Стисла характеристика об’єкта управління 13
1.2 Принципова схема АЕУ як об'єкту управління 14
1.3 Постановка задачі 16
2 МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ 19
РЕГУЛЮВАННЯ 19
2.2 Розробка математичної моделі об'єкта управління 19
2.2.1 Математична модель кінетики ядерного реактора 19
2.1.2 Математична модель теплообміну в ядерному реакторі 26
2.1.3 Математична модель перемішування і транспортного запізнювання теплоносія 30
2.1.4 Математична модель внутрішніх зворотних зв'язків в ядерному реакторі 33
2.2 Проектування системи автоматичного регулювання ядерного реактора 37
2.2.1 Вибір і обґрунтування програми управління АЕУ 37
2.2.2 Система автоматичного регулювання потужності ЯР 40
2.2.3 Регулятор нейтронної потужності АЕУ РРН 42
2.2.4 Регулятор тиску пара в ЦПК РРТ 46
2.3 Багатовимірна структурна схема АЕУ з ВВЕР – 1000 48
3 СТРУКТУРНА СХЕМА АСУ ТП 51
4 ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО ЗАКОНУ РЕГУЛЮВАННЯ ТА 71
РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ НАЛАШТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРА РІВНЯ В ПНТ 71

4.1 Регулятор рівня в ПНТ – 3 71
4.1.1 Призначення регенеративної установки низького тиску і її опис 71
4.1.2 Підігрівач низького тиску ПНТ–3 72
4.1.3 Характеристики регулятора рівня в ПНТ–3 клапан RN51S01 73
4.1.4 Склад регулятора рівня в ПНТ–3 призначення блоків 75
4.1.5 Опис роботи регулятора рівня в ПНТ – 3 79
4.1.6 Побудова перехідних характеристик САК з різними законами регулювання 80
4.1.7 Розрахунок показників якості перехідних процесів САК і порівняльна оцінка різних законів регулювання 92
4.1.8 Розрахунок параметрів настроювання автоматичних регуляторів 98
4.2 Реалізація П - закону регулювання на базі ПІ - регулятора з ООС по положенню регулюючого органу 115
5 НАДІЙНІСТЬ СПРОЕКТОВАНОЇ СИСТЕМИ 118
ВИСНОВКИ 126
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 127

ВСТУП

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

Рівень розвитку енергетичного комплексу України є важливим індикатором загального соціально-економічного стану держави та визначальним чинником її енергетичної безпеки. В умовах зростання споживання електроенергії, інтеграції до європейського енергетичного простору та посилення екологічних обмежень особливого значення набуває впровадження енергоефективних і ресурсозберігаючих технологій, а також зменшення негативного впливу енергетики на довкілля.

Атомні електростанції відіграють ключову роль у структурі виробництва електричної енергії України, забезпечуючи значну частку базового навантаження енергосистеми. З погляду ядерної та радіаційної безпеки найбільш оптимальним режимом функціонування енергоблоків є робота на номінальній потужності, що дозволяє мінімізувати теплові та нейтронно-фізичні коливання в активній зоні реактора. Проте реальні умови експлуатації зумовлюють необхідність маневрування потужністю, оскільки енергосистема потребує гнучкого реагування на зміну добових і сезонних графіків навантаження.

У зв’язку з цим до сучасних систем автоматизації реакторних установок висуваються підвищені вимоги щодо точності, швидкодії та адаптивності алгоритмів керування технологічними процесами. Такі системи мають забезпечувати стабільну та безпечну роботу обладнання в широкому діапазоні режимів, своєчасно реагувати на відхилення параметрів і запобігати розвитку аварійних ситуацій. Особливу роль при цьому відіграють інтелектуальні методи керування, прогнозування стану об’єкта та підтримки прийняття рішень оперативним персоналом.

Актуальною проблемою залишається підвищення стійкості та живучості інформаційно-керуючих систем атомних електростанцій. Її вирішення потребує комплексного підходу, що включає підвищення рівня автоматизації

енерговиробництва, застосування резервування апаратних і програмних засобів, а також використання сучасних комунікаційних технологій з високим рівнем кібербезпеки.

Надійність є базовим принципом стандартизації під час проєктування автоматизованих систем управління технологічними процесами. Вона досягається завдяки впровадженню вбудованих підсистем самодіагностики, багаторівневих систем моніторингу, а також дотриманню міжнародних і національних стандартів у сфері функціональної безпеки. Водночас навіть технічно досконале обладнання не гарантує ефективної роботи АСУ ТП без належного системного проєктування, узгодження між підсистемами та якісної підготовки персоналу. Тому створення надійної та ефективної інфраструктури автоматизованого управління вимагає поєднання сучасних технічних рішень, науково обґрунтованих методів управління і комплексного підходу до експлуатації енергетичних об’єктів.

МЕТА, ОБ’ЄКТ, ПРЕДМЕТ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є розробка автоматичної системи регулювання рівня двоконтурна схема з реактором корпусного типу на теплових нейтронах і турбіна на насиченій парі.

Об’єкт дослідження – двоконтурна схема з реактором корпусного типу на теплових нейтронах і турбіна на насиченій парі.

Предмет дослідження – технологічний процес регулювання рівня в підігрівачі низького тиску.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішено такі завдання:

– надати стислий опис об’єкта керування із визначенням його призначення, основних функцій та особливостей роботи;

– побудувати математичні моделі, що описують кінетику ядерного

реактора, процеси теплообміну в активній зоні, перемішування та транспортне запізнювання теплоносія, а також внутрішні зворотні зв’язки, притаманні реакторній установці;

– визначити передавальну функцію системи автоматичного підтримання потужності реактора та розробити її структурну схему;

– спроєктувати верхній рівень системи керування та сформувати структурну схему автоматизованої системи управління технологічними процесами реакторного блока;

– створити систему контролю й керування блоком, яка забезпечує автоматичну та автоматизовану діагностику технічного стану й режимів експлуатації, включно з контролем працездатності апаратних і програмних компонентів системи;

– виконати розрахунок параметрів і обґрунтований вибір контрольно-вимірювальних приладів, а також розробити схему електропостачання;

– розробити функціональну схему автоматизації процесу регулювання рівня у ПНТ;

– розглянути питання організації охорони праці, провести аналіз умов праці та визначити комплекс заходів щодо зменшення впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів;

– здійснити техніко-економічні розрахунки, обґрунтувати доцільність реалізації проєкту та оцінити економічну ефективність модернізації автоматизованої системи керування.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Методи математичного моделювання для дослідження базується на використанні двох методів виміру рівня в підігрівачі низького тиску: на основі методу індикації рівня за допомогою підігріваємих термопар та гідростатичного методу.

НАУКОВА НОВИЗНА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

1. Аналіз результатів, отриманих на основі побудованої математичної моделі, показав, що система автоматичного керування нейтронною потужністю здійснює регулювання виключно рівня нейтронної потужності, забезпечуючи його відповідність заданому значенню.

2. Унаслідок поступового зростання потужності реактора відбувається підвищення його температури, що, завдяки внутрішнім фізичним зворотним зв’язкам, сприяє самостабілізації потужнісного рівня.

3. Розроблено багатовимірну структурну модель атомної енергетичної установки з реактором типу ВВЕР-1000, архітектура якої дає змогу істотно спростити побудову структурної схеми системи автоматичного керування технологічними процесами атомної електростанції.

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає в тому, що чисельні дослідження на основі комплексної методики розрахунку автоматизованої система управління технологічним процесом регулювання рівня в підігрівачі низького тиску на АЕС з ВВЕР-1000 на основі методу індикації рівня за допомогою підігріваємих термопар можна використовувати на подібних АЕС.

ОСОБИСТИЙ ВНЕСОК

Теоретичні дослідження були проведені автором самостійно. Особистий внесок полягає у створенні системи керування технологічним процесом регулювання рівня в двоконтурній схемі з корпусним ядерним реактором на теплових нейтронах та турбіною, що працює на насиченій парі. Отримані результати підтверджені теплогідравлічними розрахунками, виконаними під час

аналізу критеріїв успішності функціонування енергоблоку Запорізької атомної електростанції.

Встановлено, що особливості режиму розхолодження корпусу реактора в умовах природної циркуляції теплоносія є подібними до характеристик реакторних установок «малої» серії. У зв’язку з цим результати проведеного аналізу можуть бути використані не лише для досліджуваної установки, а й для типових серійних енергоблоків ПУ-АЕС.

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Основні результати дослідження були представлені на науково-технічних конференціях ЗНУ, а також протестовані в програмному симуляторі та на наявній моделі в режимі роботи реального виробництва.

СТРУКТУРА МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

Магістерська робота складається з вступу, семи розділів, загальних висновків, списку літератури із 23 найменувань і вміщує 125 сторінку основного тексту, 21 таблицю, 54 рисунки, усього 128 сторінок.

1 ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Стисла характеристика об’єкта управління

Для проєктованої атомної енергетичної установки обрано двоконтурну теплову схему з реактором корпусного типу на теплових нейтронах та паротурбінною установкою, що працює на насиченій парі. Як базовий прототип прийнято атомну енергетичну установку Запорізької атомної електростанції, яка належить до типу ВВЕР. У таких установках у ролі теплоносія першого контуру використовується знесолена вода під високим тиском, що запобігає її кипінню в активній зоні реактора, тоді як робочим тілом другого контуру є насичена водяна пара [1].

Структурно атомна енергетична установка АЕС включає ядерну паропродукуючу установку, паротурбінну установку та електричний генератор. У процесі ядерного поділу палива в активній зоні реактора відбувається виділення значної кількості теплової енергії, яка відводиться теплоносієм першого контуру. Нагрітий теплоносій надходить до парогенератора, де передає частину своєї теплової енергії воді другого контуру без безпосереднього змішування середовищ, що забезпечує радіаційну безпеку установки.

У парогенераторі вода другого контуру перетворюється на насичену пару, яка спрямовується до проточної частини турбіни. У турбіні відбувається перетворення теплової та потенціальної енергії пари в механічну енергію обертання ротора. Обертальний рух ротора турбіни передається ротору електричного генератора, в якому механічна енергія перетворюється на електричну шляхом електромагнітної індукції.

Після відпрацювання в турбіні пара надходить у конденсатор, де охолоджується та конденсується, після чого за допомогою систем живильної води знову подається до парогенератора, утворюючи замкнений цикл другого

контуру. Така схема підвищує теплову економічність установки та забезпечує стабільність її роботи.

Паропродукуюча установка з усіма допоміжними та захисними системами розміщується в реакторному відділенні головної будівлі АЕС, яке має багаторівневу систему фізичного та радіаційного захисту. Паротурбінна установка та електричний генератор разом із системами конденсації, охолодження та електропостачання розташовані в машинному залі головної будівлі АЕС. Таке конструктивне розділення основних елементів енергоблока сприяє підвищенню безпеки, надійності та ремонтопридатності атомної електростанції.

1.2 Принципова схема АЕУ як об'єкту управління

Об’єктом управління є двоконтурна атомна енергетична установка (АЕУ), виконана за схемою з водо-водяним енергетичним реактором (ВВЕР), який працює на теплових нейтронах. У такій АЕУ перший контур є герметичним і призначений для відведення теплової енергії безпосередньо від активної зони реактора. Як теплоносій використовується знесолена вода під високим тиском, що запобігає її кипінню в межах першого контуру. Циркуляція теплоносія забезпечується головними циркуляційними насосами, які підтримують необхідну витрату та температурний режим.

Теплова енергія, відведена з реактора, передається в парогенераторі теплоносію другого контуру через теплообмінні поверхні без змішування робочих середовищ, що є важливою умовою радіаційної безпеки. У другому контурі поживна вода, надходячи до парогенератора, нагрівається до температури насичення, випаровується та частково перегрівається, утворюючи пару з заданими термодинамічними параметрами.

Перегріта пара подається на парову турбіну, де її теплова та потенційна

енергія перетворюється на механічну енергію обертання ротора турбіни, який безпосередньо з'єднаний з електричним генератором. Електрична потужність, що виробляється генератором, визначається витратою пари, її тиском, температурою та ступенем сухості, а також тісно пов'язана з тепловою потужністю реактора.

Після відпрацювання в турбіні пара надходить до головного конденсатора, де за рахунок теплообміну з охолоджувальною водою вона конденсується, перетворюючись на конденсат. Далі конденсат за допомогою поживних насосів повертається до парогенератора, замикаючи термодинамічний цикл другого контуру.

Якість пари, що генерується в парогенераторі, залежить від інтенсивності теплопередачі з першого контуру, витрати поживної води та ефективності систем регулювання рівня і тиску. Стабільна робота турбінної установки та забезпечення заданої електричної потужності АЕУ можливі лише за умови узгодженого керування параметрами реактора, першого і другого контурів, що визначає ключову роль автоматизованих систем управління та захисту в складі АЕУ [2].

Принципова схема двоконтурної атомної енергетичної установки наведена на рисунку 1.1.

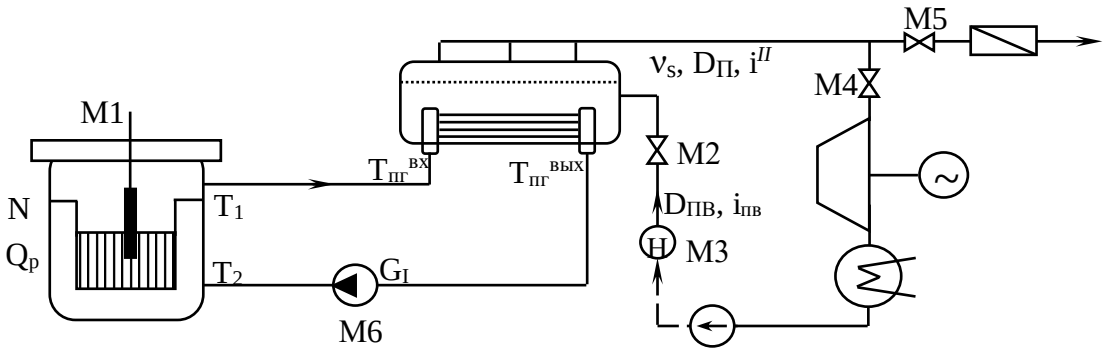


Рисунок 1.1 – Принципова схема АЕУ з ВВЕР.

М1 – органи регулювання нейтронної потужності ядерного реактора (регулюючі стержні);

М2 – орган регулювання витрати поживної води (поживний клапан);

М3 – орган регулювання перепаду тиску на поживному клапані;

М4 – орган регулювання витрати пари на турбіну (паровий клапан);

М5 – запобіжний клапан для випадку, коли тиск пари перевищить допустиме (запобіжний орган регулювання);

М6 – орган регулювання витрати теплоносія (ТН);

N – нейтронна потужність %;

Q_p – теплова потужність, ВТ;

T_1 – температура ТН на вході в ядерний реактор;

T_2 – температура ТН на виході з ядерного реактора;

$T_{пгвх}$ – температура ТН на вході в ПГ;

$T_{пгвых}$ – температура ТН на виході з ПГ;

νs – температура насиченої пари при цьому тиску;

$D_П$ – витрата насиченої пари; ентальпія насиченої пари;

$D_{ПВ}$ – витрата поживної води;

$i_{пв}$ – ентальпія поживної води;

i'' – энтальпія насиченої пари;

$D_{ПВ}$ – витрата поживної води;

$I_{ПВ}$ – ентальпія поживної води.

Рівняння балансу в АЭУ

$$N = Q_p = G_I \cdot C_{pm}(T_1 - T_2) = D_П(i'' - i_{п.в}), \qquad (1.1)$$

де C_{pm} – середня теплоємність теплоносія.

1.3 Постановка задачі

Аналіз проєктних рішень реакторної установки типу ВВЕР-1000 показує, що наявні системи контролю та діагностики не забезпечують достатнього обсягу

інформації для ефективного управління аварійними режимами, зокрема аваріями, пов’язаними з втратою запасу теплоносія першого контуру (LOCA). У таких умовах ключовою задачею є своєчасне та достовірне визначення рівня теплоносія безпосередньо в корпусі реактора та в активній зоні, оскільки саме ці параметри визначають можливість безпечного відведення тепла від паливних елементів.

У чинному проєкті ВВЕР-1000 відсутні універсальні засоби прямого контролю запасу теплоносія в першому контурі. Фактично єдиним параметром, що використовується оператором для оцінки запасу теплоносія, залишається рівень у компенсаторі тиску (КТ). Проте рівень теплоносія в КТ не завжди є репрезентативним показником стану першого контуру, особливо в аварійних ситуаціях із малими та середніми неконтрольованими течами теплоносія.

При таких аваріях рівень у КТ здебільшого відображає лише локальний запас теплоносія в самому компенсаторі та може використовуватись лише як непрямий індикатор втрати теплоносія в системі першого контуру. У режимах розхолодження реакторної установки з використанням природної циркуляції покази рівня в КТ втрачають інформативність щодо реального запасу теплоносія в корпусі реактора та активній зоні. Це значно ускладнює прийняття оператором своєчасних і адекватних рішень з управління аварійними процесами.

Таким чином, як наявність високого рівня теплоносія в КТ, так і його зниження не можуть однозначно свідчити про достатність або дефіцит теплоносія в першому контурі та активній зоні реактора. Контроль температури перегріву теплоносія на виході з активної зони фактично є останнім бар’єром непрямої діагностики втрати теплоносія. Однак підвищення цієї температури свідчить уже про настання оголення активної зони, яке може досягати небезпечних і критичних значень.

Додаткову складність становлять проєктні невизначеності, пов’язані з впливом швидкості розхолодження реакторної установки в режимі природної циркуляції на формування парогазових порожнин. Нерівномірність

температурного поля кришки верхнього блоку та корпусу реактора може призводити до спотворення показів непрямих параметрів і потребує подальшого аналізу з урахуванням експлуатаційного досвіду та результатів моделювання теплогідравлічних процесів.

В аварійних режимах, що супроводжуються закипанням теплоносія в першому контурі, виникає об’єктивна необхідність застосування засобів прямого вимірювання запасу теплоносія. Такі засоби повинні забезпечувати оператора достовірною та безперервною інформацією про зміну рівня теплоносія в корпусі реактора, межу розділу фаз та умови теплообміну в активній зоні.

Як перспективний напрям модернізації систем діагностики можуть розглядатися штатні перетворювачі вимірювання рівня теплоносія типу САПФІР, які традиційно застосовуються для контролю рівня в компенсаторі тиску та парогенераторах. Адаптація та розширення функціональних можливостей цих датчиків для умов киплячого теплоносія дозволяє використовувати їх для діагностики межі розділу фаз у циркуляційних петлях і, потенційно, в активній зоні реактора.

Висновки. У даному розділі розглянуто об’єкт автоматизації – двоконтурну атомну енергетичну установку з реактором корпусного типу на теплових нейтронах та турбінною установкою, що працює на насиченій парі. Проаналізовано принцип роботи АЕУ та існуючу систему контролю і регулювання рівня теплоносія першого контуру.

Виявлено основні недоліки діючих засобів діагностики, які не забезпечують достатнього рівня інформативності в аварійних режимах, особливо при втратах теплоносія та роботі реакторної установки в умовах природної циркуляції. Отримані результати обґрунтовують доцільність подальшої модернізації системи контролю рівня теплоносія шляхом впровадження або адаптації засобів прямого вимірювання, що є необхідною умовою підвищення безпеки експлуатації реакторних установок типу ВВЕР-1000.

2 МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ

2.2 Розробка математичної моделі об'єкта управління

2.2.1 Математична модель кінетики ядерного реактора

Рівняння і передавальна функція кінетики ядерного реактора без урахування запізнілих нейтронів.

Розглянемо особливості кінетики реактора без урахування запізнілих нейтронів. Рівняння кінетики в цьому випадку має вигляд:

$$\frac{dN(t)}{d(t)} = \frac{\rho(t)N(t)}{l}, \tag{2.2}$$

де $N(t)$ – нейтронна потужність;

$\rho(t)$ – реактивність;

l – середній час життя миттєвих нейтронів.

Рівняння (2.2) є нелінійним, так як має місце добутку двох функцій N (t) і ρ (t). Для його лінеаризації розкладемо функцію в ряд Тейлора в зоні рівня потужності $N = N_0$.

$$F\left[N(t) - \frac{\rho(t)N(t)}{l} \right] \tag{2.3}$$

В результаті лінеаризоване рівняння кінетики набуває вигляду:

$$\frac{d\Delta N(t)}{dt} = \frac{N_0}{l}\Delta\rho(t) \tag{2.4}$$

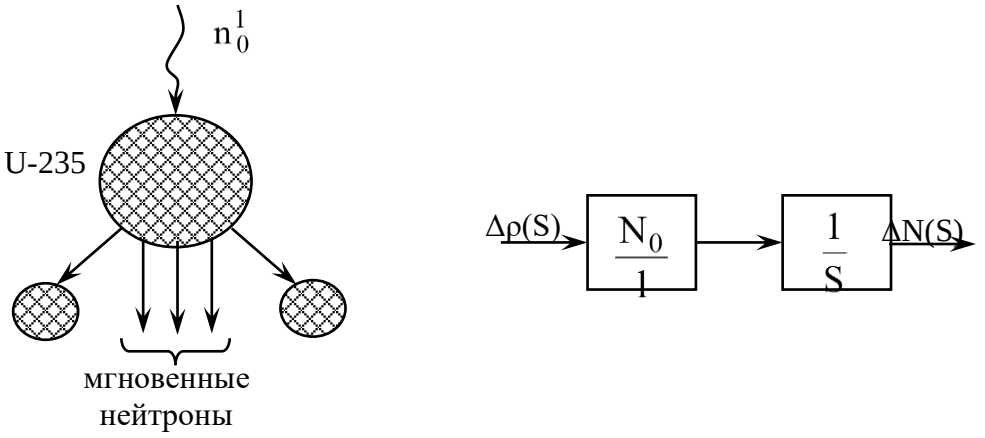
Застосовуючи перетворення Лапласа, отримаємо передавальну функ–цію кінетики ядерного реактора без урахування запізнілих нейтронів:

$$W_{кин}(S) = \frac{\Delta N(S)}{\Delta \rho(S)} = \frac{N_0}{l} \cdot \frac{1}{S} \qquad (1.5)$$

де N_0 – стаціонарний (сталий) рівень потужності реактора;

$\frac{N_0}{l}$ – коефіцієнт, що залежить від рівня потужності і середнього часу життя миттєвих нейтронів.

Структурна схема кінетики ядерного реактора представлена на рисунку 2.1.



а б

а – модель розподілу U – 235 без урахування запізнілих нейтронів;

б – структурна схема передавальної функції

Рисунок 2.1 – Структурна схема кінетики ядерного реактора

Рівняння і передаточна функція кінетики ядерного реактора з урахуванням запізнілих нейтронів. Передавальна функція виводиться з рівнянь кінетики з урахуванням шести груп запізнілих нейтронів.

Рівняння кінетики з урахуванням шести груп запізнілих нейтронів мають вигляд:

$$\left.\begin{aligned}\frac{dN}{dt} &= \frac{\rho-\beta}{l}N + \sum_{i=1}^{6}\lambda_i \cdot C_i \\ \frac{dC_i}{dt} &= \frac{\beta_i}{l}N - \lambda_i \cdot C_i\end{aligned}\right\}, \qquad (2.6)$$

де N – число нейтронів на 1 см^3;

ρ – реактивність;

β – сумарна доля запізнілих нейтронів;

β_i – частка і–ї групи запізнілих нейтронів;

l – середній час життя миттєвих нейтронів;

λ_i – постійна розпаду і–ї групи ядер попередників;

C_i – концентрація ядер попередників і–ї групи.

Після лінеаризації і перетворення вихідних рівнянь, згідно структурної схеми кінетики ядерного реактора з урахуванням шести груп запізнілих нейтронів, отримаємо передавальну функцію кінетики ЯР з урахуванням шести груп запізнілих нейтронів:

$$W_{кин}(S) = \frac{\Delta N(S)}{\Delta\rho(S)} = \frac{N_0}{l} \cdot \frac{1}{S \cdot \left[1 + \sum_{i=1}^{6}\frac{\beta_i / l}{S + \lambda_I}\right]} \qquad (2.7)$$

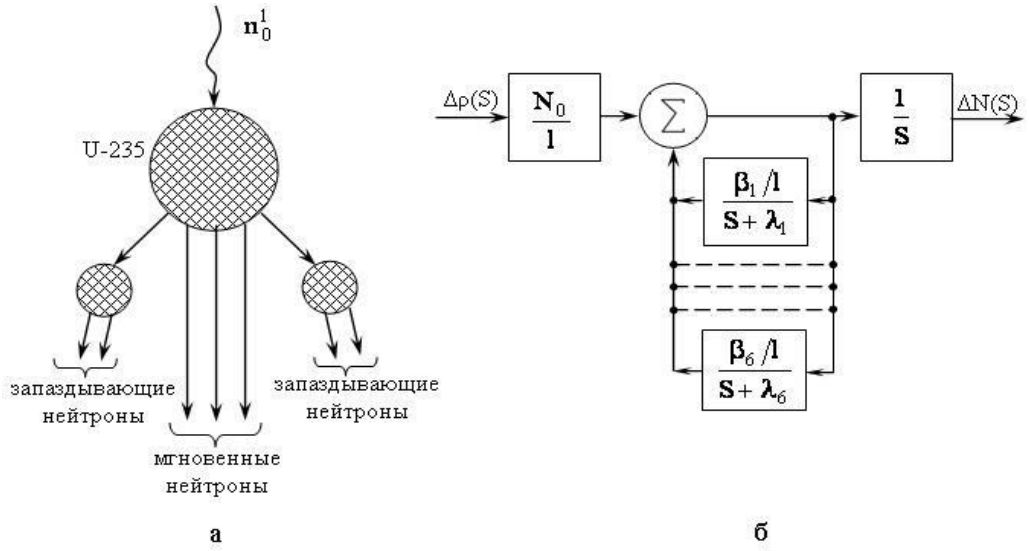
Для реакторів ВВЕР сумарна частка запізнілих нейтронів залежить від кількості Pu-239, що накопичується в активній зоні в процесі вигоряння палива. До кінця кампанії β дещо зменшується, що призводить до більш сильному впливу зміни реактивності на зміну нейтронної потужності. У той же час постійні розпаду λ_i і відносини β_i/β в перебігу кампанії практично не змінюються.

Передавальна функція кінетики ядерного реактора з одного осредненной групою запізнілих нейтронів

При описі нестаціонарних процесів значною тривалості слід враховувати всі групи запізнілих нейтронів. Одним із зручних способів опису кінетики є передавальна функція з одної середньозваженої групою запізнілих нейтронів. Для цього здійснюється осреднение константи.

$$\lambda_I = \frac{\beta}{\sum_{i=1}^{6} \beta_i / \lambda_i} \qquad (2.8)$$

Структурна схема кінетики ЯР з урахуванням шести груп запазди–вающих нейтронів представлена на рисунку 2.2.



а – модель розподілу ядра U–235 з урахуванням запізнілих нейтронів;

б – структурна схема кінетики ЯР

Рисунок 2.2 – Структурна схема кінетики ЯР з урахуванням шести груп запізнілих нейтронів

Розрахунок передавальної функції кінетики ядерного реактора і частотние побудова її логарифмічних характеристик.

Вихідні дані:

– середній час життя миттєвих нейтронів $l = 10^{-5}$ с;

– постійна розпаду осредненной групи нейтронів $\lambda_I = 0{,}077$ с;

– частка запізнілих нейтронів $\beta = 0{,}006$ %;

– рівень потужності $N = 30$ %.

$T_1 = 255\ ^0C$;

$T_2 = 265\ ^0C$;

$T_{CP} = 260\ ^0C$;

$C_{pm} = \frac{i}{T_{cp}} = \frac{1134.2}{260} = 4.362$ kДж/ (кг·град) = 4362 Дж/ (кг·град)

$(c\rho V)_{ГОР} = 0.1664$ Дж/град;

$(c\rho V)_T = 0.57$ Дж/град;

$\alpha = 2700\ Вт/м^2$;

$G_I = 84800$ м^3/час;

$F = 4376{,}4$ м^2;

$\Delta G_I = 0$.

Передавальна функція кінетики ядерного реактора має вигляд:

$$W_{кин}(S) = \frac{\Delta N(S)}{\Delta\rho(S)} = \frac{K_I(\tau_1 \cdot S + 1)}{S(\tau_2 \cdot S + 1)} \qquad (2.10)$$

Коефіцієнт посилення кінетики:

$$K_1 = \frac{N_0}{l} \cdot \frac{\lambda_I}{\lambda_I + \frac{\beta}{l}} = \frac{30}{10^{-5}} \cdot \frac{0{,}077}{0{,}077 + \frac{0{,}006}{10^{-5}}} = 384.95 \qquad (2.11)$$

Постійна часу в області низьких частот:

$$\tau_1 = \frac{1}{\lambda_I} = \frac{1}{0{,}077} = 12{,}987 \text{ с} \qquad (2.12)$$

Постійна часу в області низьких частот:

$$\tau_2 = \frac{l}{\beta} = \frac{10^{-5}}{0{,}006} = 0{,}00167 \text{ с} \qquad (2.13)$$

Таким чином, передавальна функція кінетики ЯР набуде вигляду:

$$W_{кин}(S) = \frac{384{,}95 \cdot (12{,}987S + 1)}{S \cdot (0{,}00167S + 1)} = \frac{4999{,}35S + 384{,}95}{0.00167S^2 + S} \qquad (2.14)$$

Структурна схема кінетики представлена на рисунку 2.3.

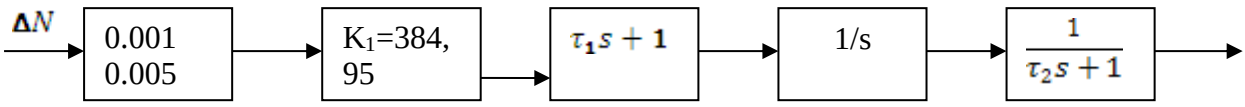


Рисунок 2.3 – Структурна схема кінетики ЯР.

На рисунке 2.4 представлено побудова ЛЧХ кінетики ЯР.

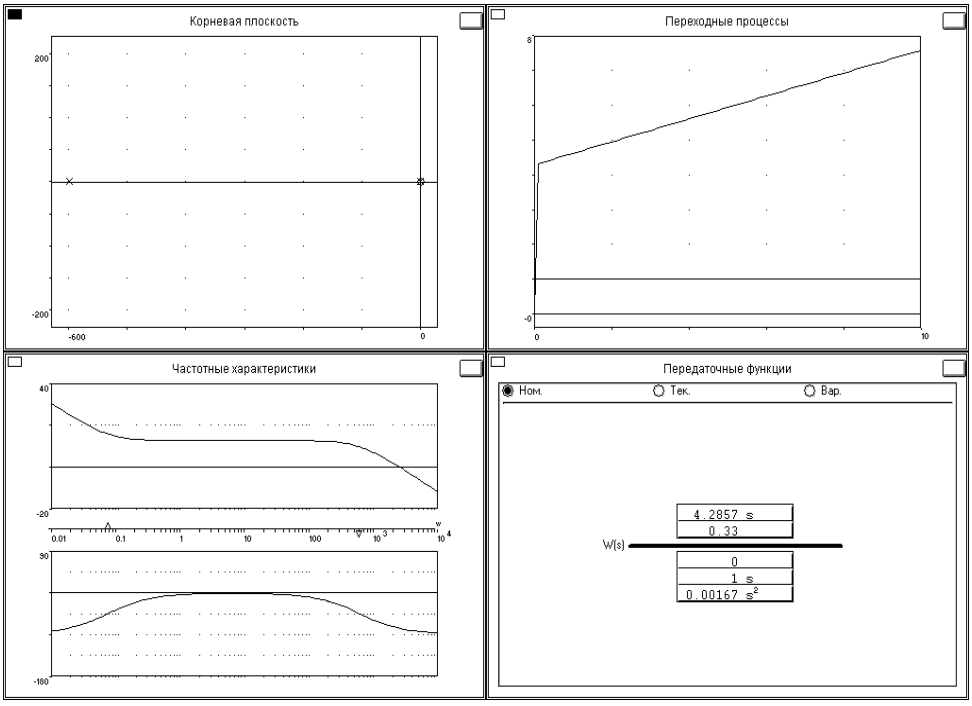


Рисунок 2.4 – ЛЧХ кінетики ЯР

На основі аналізу отриманих аналітичних залежностей і побудованих частотних характеристик можна сформулювати такі висновки:

1. Передавальна функція кінетики реактора з урахуванням запізнілих нейтронів може бути подана у вигляді сукупності чотирьох типових ланок: пропорційної, інтегруючої, форсуючої ланки першого порядку та аперіодичної ланки першого порядку.

2. Характеристичне рівняння системи має корінь, що дорівнює нулю ($s = 0$), що відповідає граничному стану стійкості системи керування.

3. Логарифмічна частотна характеристика відображає особливості динаміки кінетики реактора у трьох характерних діапазонах частот.

4. Найбільш небезпечною з точки зору ядерної безпеки є область низьких частот. У цьому діапазоні поведінка системи практично відповідає кінетиці без урахування запізнілих нейтронів, і навіть незначне введення позитивної реактивності призводить до експоненціального зростання нейтронного потоку.

5. У діапазоні середніх частот, що відповідає горизонтальній ділянці логарифмічної амплітудної характеристики, рівень потужності реактора залишається практично незмінним при варіаціях реактивності, що визначає дану область як динамічно стабільну.

6. Для цієї частотної області характерна відсутність фазового зсуву, що дозволяє ефективно використовувати її для регулювання системи автоматичного керування навіть у процесі безперервної експлуатації енергетичної установки.

7. Область високих частот характеризується спадом нейтронної потужності, що зумовлено впливом інерційних властивостей системи на гармонійні зміни реактивності.

8. Коефіцієнт підсилення передавальної функції кінетики реактора є змінною величиною та залежить від поточного рівня потужності.

9. У зв’язку з цим перехід між різними рівнями потужності супроводжується виникненням нестійких нелінійних коливань, обумовлених нелінійним характером кінетичних процесів у реакторі.

2.1.2 Математична модель теплообміну в ядерному реакторі

При математичному моделюванні процесів теплообміну в ядерному реакторі (ЯР) особливу увагу необхідно приділяти оцінюванню похибок, що виникають унаслідок спрощеного опису процесів акумуляції та перенесення теплової енергії в матеріалі тепловиділяючих елементів (ТВЕЛів) і теплоносії. Такі похибки можуть суттєво впливати на точність прогнозування температурних режимів активної зони, особливо в перехідних і аварійних режимах роботи реакторної установки.

Під час побудови математичної моделі теплообміну в ЯР у даній роботі прийнято низку припущень, які дозволяють спростити аналітичний опис процесів і звести систему диференціальних рівнянь до зручної для аналізу та синтезу системи автоматичного керування форми:

1. Розглядається ядерний реактор з одним циркуляційним контуром теплоносія, що дозволяє не враховувати взаємодію між кількома контурами та зосередитися на процесах теплообміну в активній зоні.

2. Теплофізичні властивості матеріалів (питома теплоємність, теплопровідність, густина, коефіцієнт тепловіддачі) вважаються сталими та не залежать від часу, температури і просторових координат, що є допустимим наближенням у межах нормальних експлуатаційних режимів.

3. Перенесення тепла вздовж осі тепловиділяючого елемента вважається незначним у порівнянні з радіальним тепловим потоком, так само як і теплопровідність теплоносія вздовж напряму його течії. Це дозволяє зосередити увагу на радіальному теплообміні між паливом, оболонкою ТВЕЛа та теплоносієм.

4. Розподіл швидкості теплоносія по поперечному перерізу каналу приймається рівномірним, що відповідає усередненому опису гідродинамічних процесів і спрощує визначення коефіцієнтів теплообміну.

5. Вважається, що вся теплова енергія, яка виділяється в активній зоні, генерується безпосередньо в ядерному паливі, а тепловиділення в конструкційних матеріалах реактора не враховується.

6. Теплова інерція металу корпусу реактора та інших масивних конструктивних елементів не враховується, оскільки їхній вплив на швидкі теплові процеси в активній зоні є порівняно малим.

7. Модель будується як зосереджена параметрична математична модель, у якій просторово розподілені процеси замінюються усередненими значеннями. Така модель умовно «стискає» активну зону в одну точку, але зберігає її інтегральні теплові та динамічні характеристики.

За прийнятих припущень активна зона реактора розглядається як еквівалентний теплогідравлічний канал, усередині якого зосереджене все ядерне паливо. Теплова енергія, що виділяється в паливі, передається через оболонку ТВЕЛів до теплоносія, який відводить її за межі активної зони.

На рисунку 2.5 наведено узагальнену схему теплообміну в ядерному реакторі, яка ілюструє основні ланки передачі тепла: від палива до теплоносія та подальше відведення теплової енергії циркуляційним контуром.

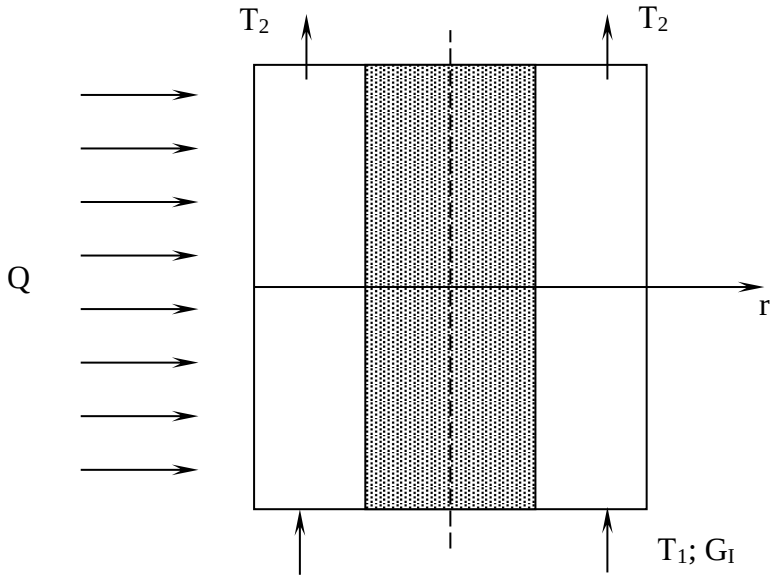


Рисунок 2.5 – Схема теплообміну в реакторі
(еквівалентну перетин ТВС реактора)

Запишемо рівняння теплового балансу для каналу (ТВС):

$$(c\rho V)_{ГОР} \cdot \Theta_{СР}(t) = Q(t) - K \cdot F \cdot [\Theta_{СР}(t) - T_{СР}(t)] \quad (2.15)$$

$$(c\rho V)_{Т} \cdot T_{СР}(t) = K \cdot F \cdot [\Theta_{СР}(t) - T_{СР}(t)] - G_I C_{pm}[T_2(t) - T_1(t)], \quad (2.16)$$

де $(c\rho V)_{ГОР}$ – інтегральна теплоємність маси пального, Дж/град;

$(c\rho V)_{Т}$ – інтегральна теплоємність теплоносія, Дж/град;

ρ – щільність, кг/м^3;

V – об'єм, м^3;

с – теплоємність пального, Дж/град;

К – коефіцієнт теплопередачі;

C_{pm} – середня теплоємність теплоносія, Дж/(кг·град);

G_I – витрата ТН, кг/с;

F – поверхню нагріву АЗ, м^2;

$\Theta_{СР}$ – середня температура блоку пального, ^{0}С;

T_1 – температура ТН на вході в ядерний реактор, ^{0}С;

T_2 – температура ТН на виході з ядерного реактора, ^{0}С.

Щоб в динаміці ЯР була записана спрощена математична модель, використовуємо середню температуру $\Theta_{СР}$.

Переходячи до малих відхилень від розрахункового режиму, отримаємо передавальні функції:

$$W_3(S) = \frac{\Delta T_2(S)}{\Delta Q(S)} = \frac{K_1^*}{(\tau_1^* S + 1)(\tau_2^* S + 1)} \quad (2.17)$$

$$W_2(S) = \frac{\Delta T_2(S)}{\Delta T_1(S)} = \frac{K_2^*(1 - \tau_3^* S)}{\tau_2^* S + 1}, \quad (2.18)$$

де $K_1^* = \dfrac{1}{K \cdot F + 2G_I \cdot C_{pm}} (гр/Вт);$

$$\tau_1^* = \frac{(c\rho V)_{ГОР}}{K \cdot F}(с);\ \tau_2^* = \frac{(c\rho V)_T}{K \cdot F + 2G_I \cdot C_{pm}}(с) \quad (2.19)$$

$$K_2^* = \frac{2G_I \cdot C_{pm} - K \cdot F}{2G_I \cdot C_{pm} + K \cdot F};\ \tau_3^* = \frac{(c\rho V)_T}{2G_I \cdot C_{pm} - K \cdot F}(с) \quad (2.20)$$

Рівняння динаміки теплообміну в АЗ реактора:

$$\Delta T_2(S) = W_2(S)\Delta T_1(S) + W_3(S)\Delta Q(S) - W_4(S)\Delta G_I(S) \quad (2.21)$$

Передавальна функція $W_2(S) = \dfrac{\Delta T_2(S)}{\Delta T_1(S)}$ характеризує зміну температури ТН на виході з реактора в залежності від обурення температури ТН на вході в реактор.

Передавальна функція $W_3(S) = \dfrac{\Delta T_2(S)}{\Delta Q(S)}$ характеризує зміну температури ТН на виході з реактора в залежності від обурення теплової потужності;

$W_4(S) = \dfrac{\Delta T_2(S)}{\Delta G_I(S)}$ – передавальна функція, що характеризує зміну температури ТН на виході з реактора як реакція на стандартне теплове обурення витратою ТН.

Структурна схема теплообміну в АЗ реактора представлена на рисунке 2.6.

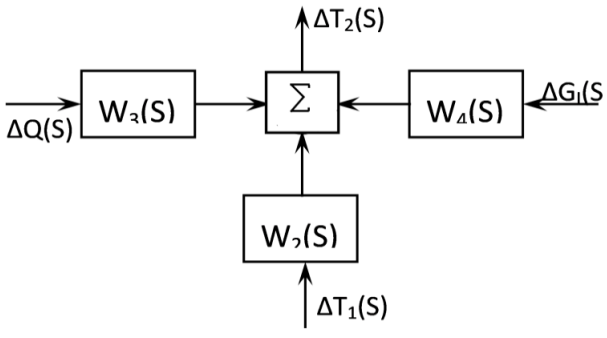


Рисунок 2.6 – Структурна схема теплообміну в активній зоні реактора.

2.1.3 Математична модель перемішування і транспортного запізнювання теплоносія

Реактор і парогенератор в складі ППУ першого контуру пов'язані між собою трубопроводами, за якими здійснюється циркуляція ТН.

Основна роль математичного опису динаміки руху ТН в трубопроводах полягає в обґрунтуванні транспортного і інерційного запізнювання при передачі сигналу – температурного фронту в тракті першого контуру в часі.

Тракт циркуляції теплоносія представлений на рисунку 2.7.

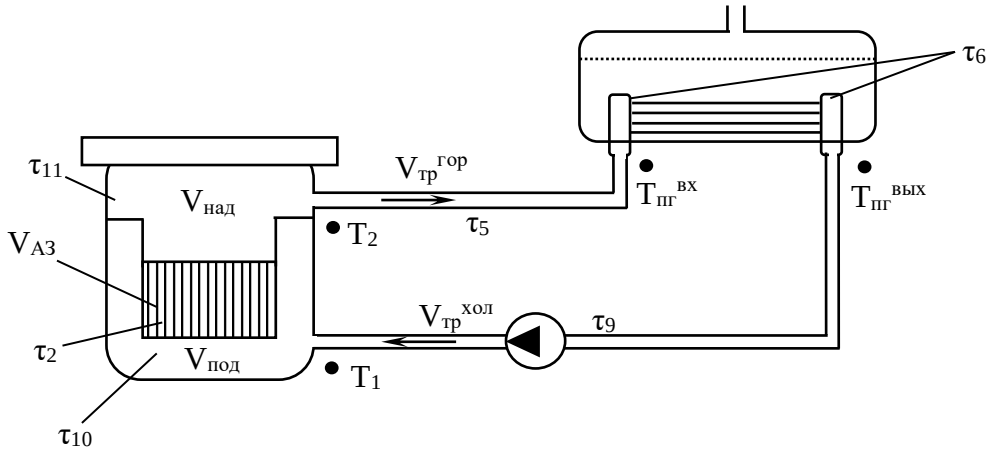


Рисунок 2.7 – Принципова схема транспортних комунікацій.

Позначення на рисунку 2.7:

$V_{под}$ – об’єм води під активною зоною;

$V_{над}$ – об’єм води над активною зоною;

$V_{АЗ}$ – об’єм води в активній зоні;

$V_{тр}^{гор}$ – об’єм води в «гарячому» трубопроводі;

$V_{тр}^{хол}$ – об’єм води в «холодному» трубопроводі;

τ_2, τ_5, τ_6, τ_9, τ_{10}, τ_{11} – постійні часу запізнювання в згаданих обсягах.

Як видно з рисунка 2.7 транспортні запізнювання в елементах першого контуру відбуваються через протяжності і обсягів комунікацій. Передба–

чається, що втрати тепла від ТН в навколишнє середовище відсутні.

Виведемо ПФ транспортного запізнювання на ділянці «гарячого» трубопроводу від реактора до парогенератора [3].

Запишемо функцію у вигляді:

$$T_2(t) = T_{вх}^{пг}(t + \tau_5) \qquad (2.22)$$

Графічна ілюстрація транспортного запізнювання представлена на рисунке 2.8.

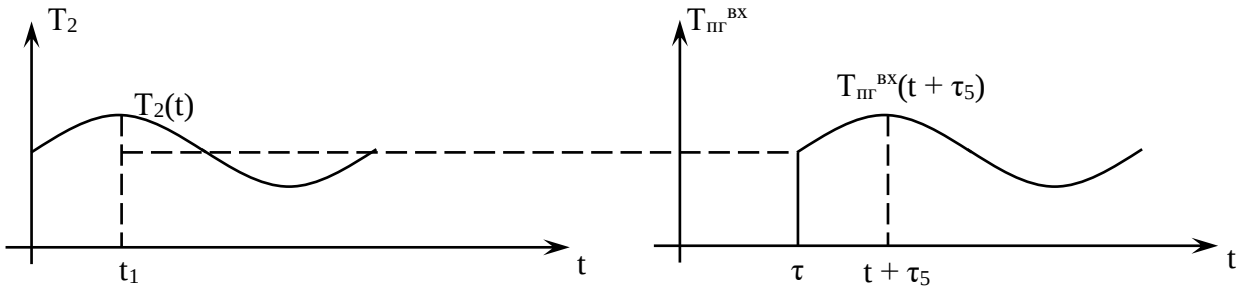


Рисунок 2.8 – Ілюстрація запізнювання в «гарячому трубопроводі».

Використовуючи теорему операційного числення про усунення аргументу оригіналу, отримаємо:

$$L\left[T_{пг}^{вх}(t + \tau_5) = \exp(-\tau_5 \cdot S)\right] \qquad (2.23)$$

Час запізнювання τ_5, рівний часу перенесення ТН в трубопроводі від реактора до ПГ, розраховується за формулою:

$$\tau_5 = \frac{V_{гор}^{тр}}{G_I/4} \cdot \bar{\rho}, \qquad (2.24)$$

де $V_{гор}^{тр}$ – обсяг ТН в «гарячому» трубопроводі, м^3;

$\bar{\rho}$ – середня щільність ТН на досліджуваній ділянці як функція температури при даному тиску;

G_I – масова витрата ТН, кг/с.

Розклавши функцію (5) в ряд Тейлора і нехтуючи вищими членами ряду, за винятком перших двох, отримаємо:

$$T_2(t) \approx T_{пг}^{вх}(t) + \tau_5 \frac{dT_{пг}^{вх}}{dt} \qquad (2.25)$$

Застосовуючи перетворення Лапласа, отримаємо наближену ПФ:

$$W_5(S) = \frac{T_{пг}^{вх}(S)}{T_2(S)} = \frac{1}{\tau_5 S + 1} \qquad (2.26)$$

ПФ транспортного запізнювання ТН в трубах парогенератора:

$$W_6(S) = \frac{T_{пг}^{вых}(S)}{T_{пг}^{вх}(S)} = \frac{1}{\tau_6 S + 1} \qquad (2.27)$$

$$\tau_6 = \frac{V_{кол}}{G_I/4} \cdot \bar{\rho} = \frac{21 \cdot 705{,}965}{16864{,}36/4} = 3{,}52\,с \qquad (2.28)$$

ПФ транспортного запізнювання ТН в «холодному» трубопроводі:

$$W_9(S) = \frac{\Delta T_1(S)}{T_{пг}^{вых}(S)} = \frac{1}{\tau_9 S + 1} \qquad (2.29)$$

$$\tau_9 = \frac{V_{хол}^{тр}}{G_I/4} \cdot \bar{\rho} = \frac{14{,}92 \cdot 705{,}965}{16864{,}36/4} = 2{,}5 \qquad (2.30)$$

Транспортне запізнювання при дослідженні на стійкість в багатьох випадках є джерелом нестабільності.

Однак, в першому контурі має місце не тільки транспортний запаз–диваніе, а й зміна форми перетину трубопроводів, а також включення різних обсягів. Саме в цих місцях відбувається перемішування ТН.

Наприклад, при виході ТН з «гарячого» трубопроводу в ПГ елементарні обсяги проходять різні траєкторії. Цей механізм і є причиною перемішування.

Передавальна функція процесу перемішування має вигляд:

$$W_{\text{перемеш}}(S) = \frac{1}{\tau_{\text{перемеш}} S + 1} \qquad (2.31)$$

Передавальна функція перемішування ТН в нижній камері змішання реактора:

$$W_{10}(S) = \frac{1}{\tau_{10} S + 1};\ \ \tau_{10} = \frac{V_{\text{под}}^{\text{АЗ}}}{G_I} \cdot \bar{\rho} = \frac{10{,}746 \cdot 705{,}965}{16864{,}36} = 0{,}45\,\text{с} \qquad (2.32)$$

Передавальна функція перемішування в верхній камері реактора над АЗ:

$$W_{11}(S) = \frac{1}{\tau_{11} S + 1};\ \tau_{11} = \frac{V_{\text{над}}^{\text{АЗ}}}{G_I} \cdot \bar{\rho} = \frac{59{,}5 \cdot 705{,}965}{16864{,}36} = 2{,}49\,\text{с} \qquad (2.33)$$

2.1.4 Математична модель внутрішніх зворотних зв'язків в ядерному реакторі

При математичному моделюванні функціонування атомної енергетичної установки (АЕУ) прийнято розрізняти зовнішні та внутрішні зворотні зв’язки (ЗЗ), які суттєво впливають на динаміку та стійкість системи.

До зовнішніх зворотних зв’язків належать зв’язки, що формуються засобами систем автоматичного управління, зокрема регуляторами потужності, тиску, температури та рівня. Ці зв’язки реалізуються через керуючі впливи (наприклад, переміщення органів регулювання, зміну витрати теплоносія або

поживної води) і призначені для підтримання заданих режимів роботи АЕУ в умовах збурень.

Внутрішні зворотні зв’язки є фізично зумовленими та не пов’язані безпосередньо з дією автоматичних регуляторів. У ядерному реакторі вони проявляються у вигляді зміни реактивності внаслідок коливань температури ядерного палива, теплоносія та сповільнювача. Ці процеси описуються температурними коефіцієнтами реактивності (ТКР), які визначають величину та знак зворотного впливу температурних змін на нейтронно-фізичні характеристики активної зони.

Завдяки внутрішнім зворотним зв’язкам у більшості енергетичних реакторів реалізується саморегулювальна здатність, коли зростання температури палива або теплоносія призводить до зменшення реактивності і, відповідно, до зниження потужності реактора. Наявність від’ємних температурних коефіцієнтів реактивності є однією з ключових умов ядерної безпеки та стабільної роботи АЕУ.

Таким чином, сукупний вплив зовнішніх і внутрішніх зворотних зв’язків визначає динамічні властивості атомної енергетичної установки, її стійкість, швидкодію та здатність протидіяти зовнішнім і внутрішнім збуренням у різних режимах експлуатації.

Розрізняють три види ТКР:

1.Температурний коефіцієнт реактивності при температурі палива Θ:

$$\sigma_{\Theta} = \frac{\Delta\rho_{\Theta}}{\Delta\Theta_{CP}} \tag{2.34}$$

2. Температурний коефіцієнт реактивності при температурі ТН T_{CP}

$$\sigma_{T} = \frac{\Delta\rho}{\Delta T_{CP}} \tag{2.35}$$

3. Температурний коефіцієнт реактивності при температурі сповільнювача $T_З$:

$$\sigma_З = \frac{\Delta\rho}{\Delta T_З^{СР}} \tag{2.36}$$

Будемо вважати, сто середня температура сповільнювач дорівнює середній температурі ТН. Тому при побудові математичної моделі внутрішньої ОС будемо враховувати 2 температурних ефекту: ефект внутрішньої ОС по температурі палива і по температурі ТН.

Рівняння балансу теплової енергії в реакторі:

$$(c\rho V)_{ГОР} \cdot \frac{d\Theta_{СР}}{dt} = Q(t) - KF(\Theta - T_{СР}) \tag{2.37}$$

З огляду на те, що $\Theta_{СР} >> T_{СР}$, можна знехтувати $T_{СР}$.

$$(c\rho V)_{ГОР} \frac{d\Theta_{СР}}{dt} + KF\Theta = Q(t) \tag{2.38}$$

Застосовуючи перетворення Лапласа, отримаємо:

$$S\Delta\Theta(S) + \frac{KF}{(c\rho V)_{ГОР}}\Delta\Theta(S) = Q(S); \tag{2.39}$$

$$\Delta\Theta_{ГОР}(S)\left(S + \frac{KF}{(c\rho V)_{ГОР}}\right) = \Delta Q(S); \tag{2.40}$$

$$\Delta\Theta_{ГОР}(S) = \frac{\Delta Q(S)}{S + \frac{KF}{(c\rho V)_{ГОР}}} = \frac{(c\rho V)_{ГОР}/KF}{\frac{(c\rho V)_{ГОР} S}{KF} + 1} \cdot \Delta Q(S) \tag{2.41}$$

Таким чином, ПФ внутрішньої ОС по температурі палива буде мати вигляд:

$$W_{\Theta Q}(S) = \frac{\Delta\Theta_{ГОР}(S)}{\Delta Q(S)} \tag{2.42}$$

Аналогічним чином виведемо ПФ внутрішньої ОС по температурі ТН. Для цього запишемо диференціальне рівняння теплового балансу:

$$\Delta T_{CP}(S) = \frac{\frac{KF}{(c\rho V)_T}}{S + \frac{KF}{(c\rho V)_T}} \cdot \Delta\Theta(S) \tag{2.43}$$

ПФ внутрішньої ОС по температурі ТН:

$$W_{T\Theta}(S) = \frac{\Delta T_{CP}(S)}{\Delta\Theta_{CP}(S)} \tag{2.44}$$

Структурна схема внутрішньої ОС в реакторі представлена на рис. 2.9.

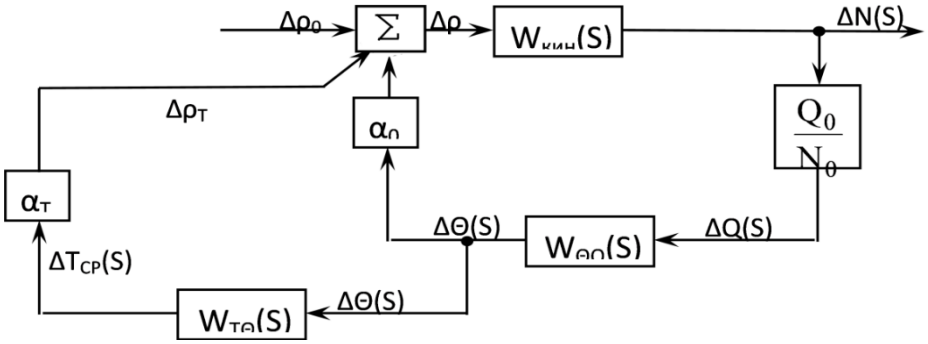


Рисунок 2.9 – Структурна схема внутрішньої ОС в реакторі.

Зворотні зв'язку стабілізує ядерний реактор і захищають від перепалу при миттєвих аварійних ситуаціях. Для виконання цих функцій, необхідно проектувати АЕУ таким чином, щоб ці внутрішні ОС були негативними. При цьому будь–яка аномалія, викликана експлуатацією реактора, стабілізується.

Внутрішня ОС по температурі палива при її негативному значенні є миттєвою, тобто процес стабілізується миттєво. На рисунку 2.10 показана залежність реактивності від середньої температури.

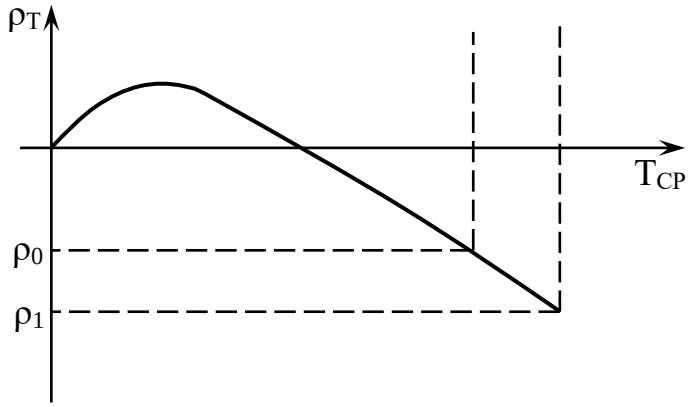


Рисунок 2.10 – Залежність реактивності від середньої температури.

2.2 Проектування системи автоматичного регулювання ядерного реактора

2.2.1 Вибір і обґрунтування програми управління АЕУ

Як показує досвід математичного регулювання, як об'єкт управління, обрані технологічні процеси в АЕУ. Спрощено ці процеси охоплюють два послідовних ланки: ЯР і ПГ [4].

Для опису АЕУ використовуються математичні моделі, описані лінійними диференціальними рівняннями, і перетворюються в переда–точні функції. Статична модель передбачає зв'язок, між вихідними і вхідними координатами в умовах сталого процесу. Зазвичай ця залежність в атомній енергетиці представлена у вигляді графіка.

Існують дві програми управління:

при $T_{ср}$ = const;

при $P_{п}$ = const.

Базова програма управління АЕУ при $T_{ср}$=const

Базовим режимом називають режим в якому потужність блоку (в статистиці) постійна і не залежить від відхилення частоти мережі. На рисунку 1.12 представлений графік залежностей витрати теплоносія тиску пара, середньої

температури від потужності ЯР.

З виразу видно, що з увелечении потужності тиск пара в ПГ зменшується.

Переваги цієї програми такі:

– при $T_{ср}$ = const и при отрицательном температурном коэффициенте реактивности возможно саморегулирование;

– обеспечение в контуре постоянной средней температуры теплоносителя на всех режимах работы обеспечивает постоянство $T_{ср}$ во всех её элементах, тем самым температурное напряжение и обеспечивает долговечность реактора и ПГ.

$$Q_{пг} = kF(T_{ср} - \upsilon_s) \tag{2.48}$$

$$\upsilon_s = P_n \tag{2.49}$$

$$P_n = T_{ср} - \frac{Q_{пг}}{kF} \tag{2.50}$$

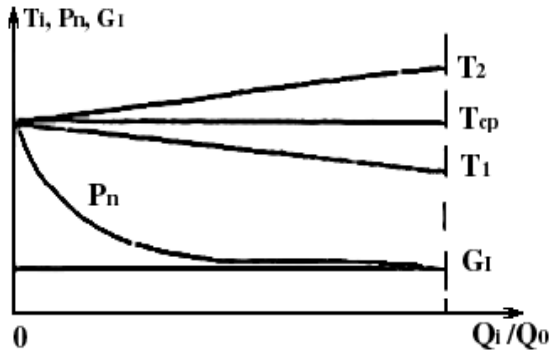


Рисунок 2.11 – Програма регулювання $t_{ср}^{т/н}$ = const

Досліджувана система керування має низку суттєвих недоліків, які обмежують ефективність її використання в широкому діапазоні режимів роботи атомної енергетичної установки.

По-перше, для забезпечення умови підтримання температури насичення робочого середовища $T_{СР}$ = const необхідно застосовувати спеціалізовані регулятори, що безпосередньо стабілізують цей параметр. Це ускладнює структуру системи керування та підвищує вимоги до налаштування регуляторів.

По-друге, зі зниженням потужності енергоблока спостерігається зростання тиску пари у другому контурі, що зумовлює необхідність збільшення маси та міцності трубопроводів другого контуру і парогенераторів, а отже — призводить до ускладнення та подорожчання конструкції.

По-третє, зменшення потужності супроводжується не лише підвищенням тиску пари на малих навантаженнях, але й зростанням вологості насиченої пари, що негативно впливає на умови роботи турбіни та її ресурс.

Крім того, регулювання теплових параметрів у даній схемі здійснюється опосередковано – через вплив на завдання нейтронного потоку реактора. Такий принцип керування збільшує інерційність керуючого контуру, оскільки теплові процеси мають значно більші часові постійні порівняно з нейтронно-фізичними.

У результаті зменшується швидкодія системи, збільшується тривалість перехідних процесів та скорочується запас стійкості системи автоматичного керування (САК). Надмірна тривалість перехідних процесів може стати джерелом коливальних режимів і потенційної нестабільності.

З огляду на зазначені недоліки, базові режими роботи атомної енергетичної установки доцільно реалізовувати із застосуванням схем із роздільним керуванням, що дозволяє підвищити стійкість, зменшити інерційність і покращити динамічні характеристики САК.

Базова програма керування АЕУ при умові підтримання номінальної потужності P_n = const має враховувати наведені особливості та забезпечувати узгоджену роботу реакторної та турбінної частин установки.

На рисунке 2.12 представлен график зависимостей давления пара, средней температуры теплоносителя от изменения мощности ЯР.

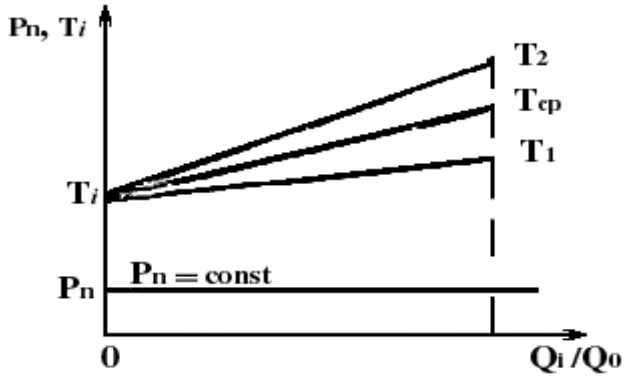


Рисунок 2.12 – Програма регулювання $P_п$ = const.

Дана базова програма має ряд переваг:

– ККД циклу на всіх режимах більше, ніж при застосуванні програми краще умови експлуатації обладнання другого контуру, оскільки не потрібно робити зайвих перемикань, коли змінюється тиск пара. Цей фактор на АЕС є основним при виборі програми управління.

Основними недоліками, які має система, є:

– відсутня самокерування;

– оскільки в процесі зміни режимів $T_{ср}$ змінюється, то з'являється

– напруга в конструкції і, отже, зменшується надійність і довговічність;

– збільшується навантаження на СУЗ;

– погіршуються динамічні характеристики при скидах або збільшенні навантаження.

2.2.2 Система автоматичного регулювання потужності ЯР

Системи автоматичного регулювання застосовуються у випадках, коли виникає необхідність протягом тривалого часу підтримувати або змінювати з заданою точністю певні фізичні величини, які називають регульованими змінними. До таких величин належать напруга, тиск, рівень, температура, частота обертання та інші параметри, що характеризують режим роботи машин,

технологічних процесів або динаміку керованих об’єктів [4].

Автоматичне регулювання може бути реалізоване на основі двох базових принципів:

– принцип регулювання за відхиленням**,** який ґрунтується на використанні зворотного зв’язку та передбачає формування керуючого впливу залежно від різниці між фактичним і заданим значеннями регульованої величини;

– принцип регулювання за збуренням (компенсації)**,** при якому керуючий вплив формується на основі вимірювання збурюючих факторів з метою їх попередньої компенсації.

Пристрої, що реалізують зазначені принципи автоматичного регулювання, називаються автоматичними регуляторами. В системах керування енергоблоками широко використовуються регулятори, які працюють за такими законами регулювання:

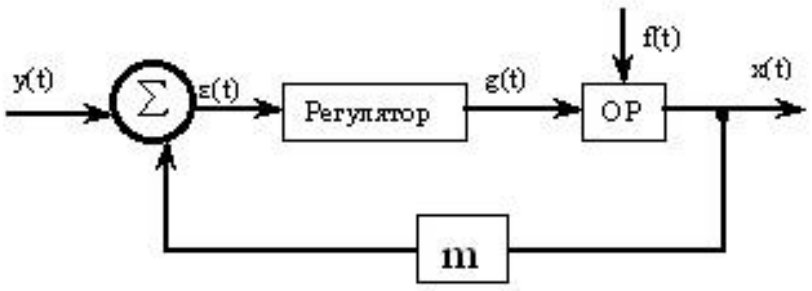
– пропорційним (П);
– інтегральним (І);
– пропорційно-інтегральним (ПІ);
– пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД);
– позиційним.

Для аналізу динамічних властивостей систем автоматичного керування (САК) зазвичай розглядають перехідні процеси, що виникають при подачі на систему одиничного впливу. Одиничним впливом називають ступінчасту зміну керуючого або збурюючого сигналу. Його абсолютне значення може бути довільним, але для коректного порівняння різних систем регулювання воно приймається однаковим.

Об’єктом регулювання є машина або технологічна установка, заданий режим роботи яких повинен підтримуватися регулятором за допомогою відповідних регулюючих органів. Вплив регулятора на об’єкт регулювання називається керуючим впливом.

Зміна регульованих величин зумовлюється не лише керуючими впливами регулятора, а й збурюючими впливами, які діють на систему ззовні та прагнуть порушити заданий режим роботи. Під дією зовнішніх збурень фактичне значення регульованої величини відхиляється від заданого. Відхиленням регульованої величини називають різницю між її поточним значенням у певний момент часу та фіксованим значенням, прийнятим за номінальне або задане.

САК з однієї регульованою величиною показана на рисунке 2.13.



y(t) – заданий сигнал; g(t) – керуючий вплив;

x(t) – значення регульованої величини; f(t) – збуджуючий вплив;

ε(t) – помилка регулювання; m – коефіцієнт пропорційності

Рисунок 2.13 – Функціональна схема САК за відхиленням

2.2.3 Регулятор нейтронної потужності АЕУ РРН

САУ АЕУ нейтронної потужності**.** Вимоги, що пред'являються до сі–стем автоматичного регулювання потужності, наведені в роботі з опис системи автоматичного регулювання реактора і розрахунок еле–ментів детально виконані САК нейтронної потужності є найпростішою системою для регулювання нейтронної потужності. Регулятор описаний в методичному посібнику [3].

На рисунке 2.14 об'єкт представлений в спрощеному вигляді, який отримано в роботі.

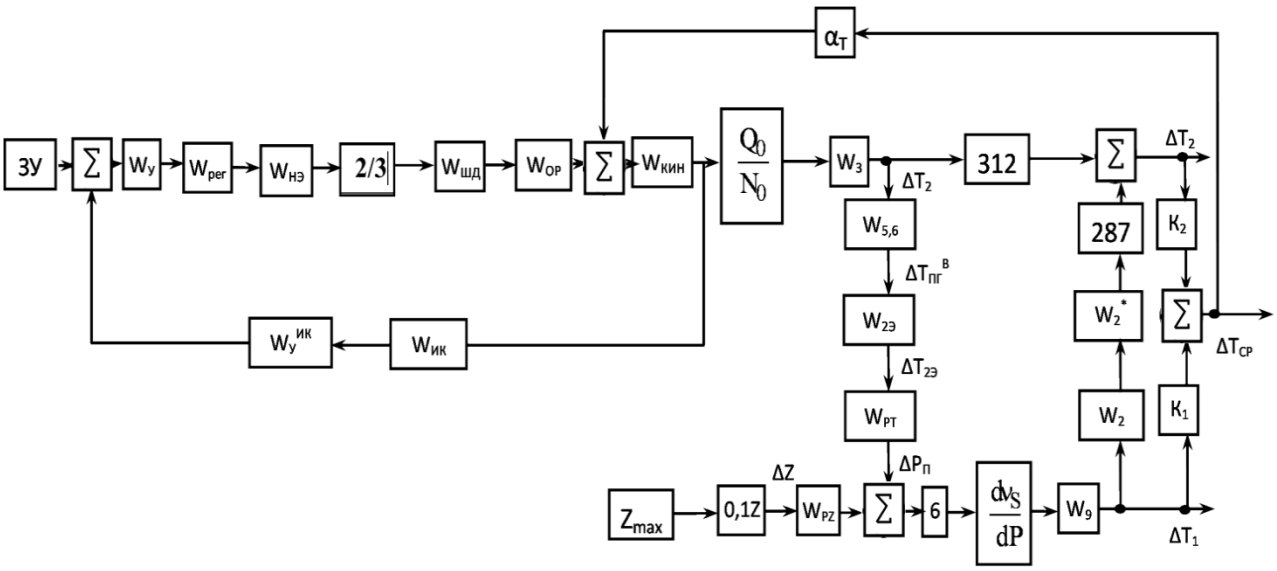


Рисунок 2.14 – Функціональна схема САК нейтронної потужності (РРН)

Тут використано правило Крамера для отримання ПФ:

$$W_{T_{cp}}^{Q}(s) = \frac{\Delta T_{cp}(s)}{\Delta Q(s)} \qquad (2.51)$$

Схема САК потужності, представленої на рисунку 2.14, використовується на малій потужності до 10% $N_{ном}$. На цьому рівні потужності балансні температури T_1, T_2, T_{CP} мало відрізняються один від одного, і, отже, програма управління у вигляді статичних характеристик для вимірювання і реалізації в системі автоматичного регулювання не мають сенсу. Розглянемо розрахунок елементів САК нейтронної потужності.

На вхід в САК за допомогою задатчика подається задана потужність у вигляді $\hat{N}$. Після порівняння заданої потужності $\hat{N}$ і фактичного її значення N виробляється сигнал $\Delta N = \hat{N} - N$ [5].

В підсилювачі У1 (УАР) утворюється відносний сигнал $\varepsilon = \frac{\hat{N} - N}{\hat{N}}$, як видно, роль підсилювача полягає у формуванні функції обернено заданої потужності.

Роль нелінійного підсилювача описана в роботі.

З умов безпеки реактора швидкість введення позитивної реактивності не повинна перевищувати:

$$\dot{Z} = \frac{0{,}07\beta_{эф} H_{АЗ}}{\alpha K_{ст}} = 0{,}245 \text{ м/с}, \qquad (2.52)$$

де $H_{АЗ}$ – висота активної зони ЯР, $\alpha = 2$, $K_{ст} = 0{,}5\beta_{эф}$

Правилами ядерної безпеки встановлено, що максимальна швидкість переміщення стрижнів АР повинна відповідати швидкості зміни реактивності і не більше.

Підрахуємо швидкість введення реактивності в активну зону ядерного реактора при покроковому дії виконавчого механізму:

$$0{,}05\beta_{эф} / c = 3{,}5 \cdot 10^{-4} / c \qquad (2.53)$$

Відзначимо, що коефіцієнт посилення кінетики ядерного реактора під час експлуатації, особливо при зміні потужності змінюється, головним чином, за рахунок зміни «ваги» стрижнів АР. Зміна обумовлено перерозподілом потоку нейтронів по висоті і радіусу. В результаті коефіцієнт посилення кінетики ЯР змінюється пропорційно рівню потужності:

$$K_{кин} \cong \frac{N_0 \lambda_I}{\beta_{эф}} \equiv N_0 \qquad (2.54)$$

Тому стійкість і якість регулювання потрібно досліджувати в широкому діапазоні коефіцієнта посилення в залежності від рівня потужності.

Передавальна функція крокової двигуна як виконавчого механізму:

$$W_{ШД}(s) = \frac{\Delta Z(s)}{\Delta \dot{Z}_R(s)} = \frac{K_{ШД}}{s} \qquad (2.55)$$

З огляду на, зробимо розрахунок передавальної функції крокової двигуна, де $K_{ШД}$ – коефіцієнт посилення крокової двигуна.

$$K_{ШД} = \frac{Z}{\dot{Z}} = \frac{12{,}5см}{0{,}245 \cdot 10^2 см} = 0{,}5 \qquad (2.56)$$

Висновки з безпеки САК нейтронної потужності:

1) САК нейтронної потужності регулює тільки рівень нейтронної потужності, приводячи його у відповідність із заданим значенням. АЕУ як об'єкт управління на 10% потужності має ОТКР $\alpha_T \to 0$.

2) $T_{ср}$, T_1, T_2 (близькі за чисельним значенням), через помірне наростання потужності реактора його температура збільшується, викликаючи стабілізацію рівня потужності.

3) САК нейтронної потужності має велику статичну помилку через вигоряння B^{10} а іонізаційних камерах.

4) Підсилювачі САК потужності компенсує нелінійність за рахунок сигналу назад пропорційного рівню потужності. Беручи до уваги коефіцієнт посилення кінетики нейтронної потужності, і коефіцієнт посилення САК, отримаємо:

$$K_1 \cdot K_y \cong N_0 \frac{1}{N_0} \qquad (2.57)$$

5) Застосування крокового двигуна в якості виконавчого механізму вводить в реактор безпечну реактивність не більше $\approx 0{,}3\beta$.

6) Вивчивши основні характеристики елементів контуру, перейдемо до дослідження структурної схеми в цілому. Перша вимога, що пред'являється до САК, полягає в її безумовної стійкості, тобто при всіх режимах не повинно виникати незатухаючих коливань.

Слід нагадати, що коефіцієнт посилення реактора є функцією рівня потужності. У міру зниження потужності вплив зворотного зв'язку поступово зводиться до нуля. Реактор, що володіє природною стійкістю на високих рівнях потужності, важче піддається регулюванню на малих рівнях потужності. Іншими словами при автоматичному регулюванні ЯР його потужність не повинна знижуватися нижче одного відсотка від номінальної потужності.

2.2.4 Регулятор тиску пара в ЦПК РРТ

Структура та принципи функціонування системи автоматичного управління атомної енергетичної установки значною мірою визначаються обраною програмою керування енергоблоком. Вибір цієї програми, у свою чергу, обумовлюється фізичними особливостями ядерного реактора та теплогідравлічними властивостями першого і другого контурів.

Для реакторів типу ВВЕР істотні зміни температури теплоносія можуть призводити до необхідності компенсації значних змін реактивності. Це пов’язано з дією температурних коефіцієнтів реактивності палива, теплоносія та сповільнювача. У результаті ускладнюється структура системи управління, зростають вимоги до точності регулювання і зменшується загальний рівень безпеки експлуатації реактора.

Відповідно до обраної програми керування, зі зростанням потужності реактора температура теплоносія на виході з активної зони підвищується, тоді як температура на вході до реактора знижується. За таких умов збільшується температурний напір між теплоносієм першого контуру на виході з реактора та температурою насичення робочого тіла другого контуру в парогенераторі.

Оскільки зі збільшенням потужності енергоблока зростає різниця між температурою теплоносія першого контуру та температурою насичення другого контуру, у рамках даної програми керування спостерігається зниження температури та тиску насиченої пари, що надходить на турбіну, зі зростанням

потужності блоку. Зазначена особливість істотно впливає на умови роботи турбінної установки та повинна враховуватися при синтезі та налаштуванні системи автоматичного управління АЕУ.

$$Q_{ПГ} = K\Delta TF \tag{2.58}$$

$$\frac{Q_{ПГ}}{KF} = (T_{ср} - \nu_S) \tag{2.59}$$

$$\nu_S = T_{ср} - \frac{Q_{ПГ}}{KF} \tag{2.60}$$

Програма $T_{СР} = const$ найбільш сприятлива для першого контуру, так як по ній для зміни потужності реактора потрібно внести найменшу реактивність і забезпечуються стабільні температурні умови для першого контуру, що підвищує надійність роботи його обладнання. При роботі блоку за цією програмою обсяг теплоносія першого контуру постійний, внаслідок чого зменшуються необхідні розміри компенсаторів обсягу і полегшується робота їх систем регулювання. Недоліком програми є необхідність підвищення тиску другого контуру при знижених потужностях.

При цьому термічний ККД циклу залишається низьким на всіх потужно–стях, так як на номінальній потужності тиск пари, що надходить на турбіну, нижче допускається за умовами роботи другого контуру, а на зниженій потужності, коли тиск пара велике, ККД також низький через значне перепаду тиску на регулюючих клапанах, що крім того, збільшує їх знос. Зазначені недоліки призвели до того, що на практиці при зниженні потужності задане значення $T_{СР}$ знижувалося вручну.

Застосування конструкцій і пристроїв, локалізують наслідки аварій. На рисунку 2.15 показана САУ потужності ЯПВУ при $T_{СР} = const$ в режимі РРТ.

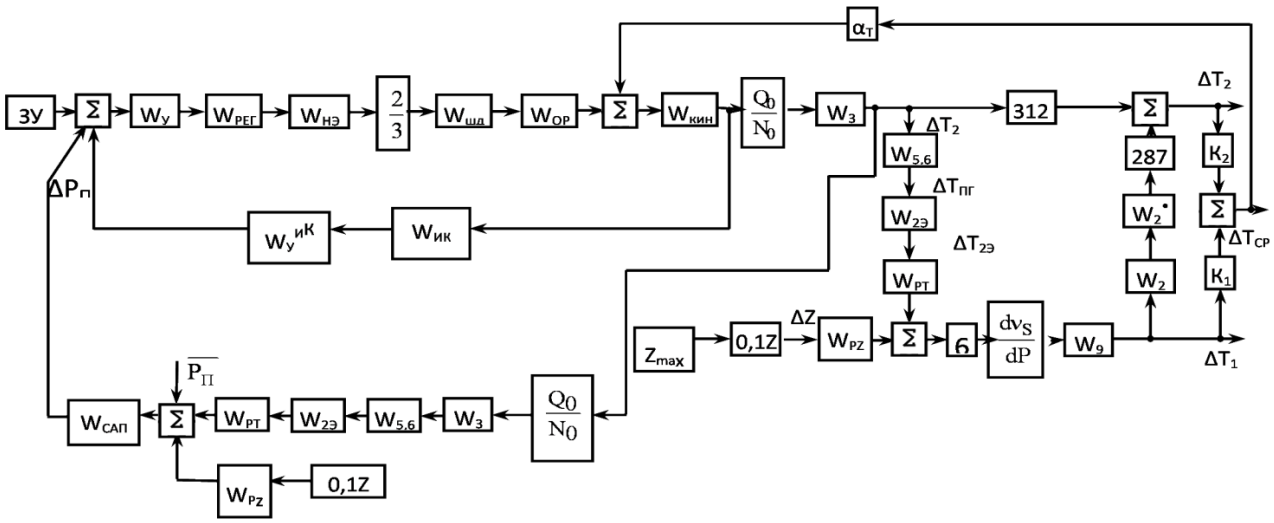


Рисунок 2.15 – САУ потужності ЯПВУ при $T_{CP} = const$ в режимі РРТ

2.3 Багатовимірна структурна схема АЕУ з ВВЕР – 1000

Багатовимірна система – це складний автоматизований комплекс, в якому регулюються відразу кілька фізичних величин. Тому багатовимірна система, на відміну від одновимірної, має більш складну структуру.

Характерною особливістю багатовимірної системи є одночасний автоматизований контроль за декількома фізичними величинами. Властивість взаємозв'язку координат – головна ознака багатовимірної системи.

Розглянемо багатовимірну структурну схему АЕУ. При цьому розглядається не вся схема, а тільки її теплова частина, яка показана на рисунку 2.16.

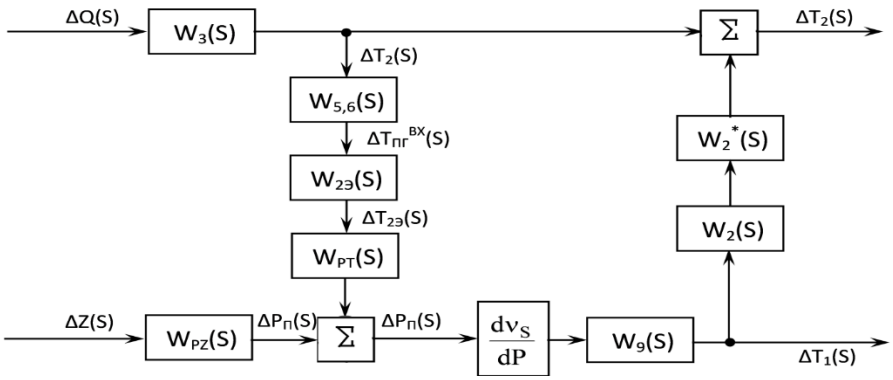


Рисунок 2.16 – Структурна схема АППУ (теплова частина)

Рівняння багатовимірної системи:

$$\begin{cases} \Delta T_2(S) = W_2^*(S) \cdot W_2(S) \cdot \Delta T_1(S) + W_3(S) \cdot \Delta Q(S) \\ \Delta T_1(S) = \left[W_{5,6}(S) \cdot W_{2Э}(S) \cdot W_{PT}(S) \cdot \Delta T_2(S) - W_{PZ}(S) \cdot \Delta Z(S) \right] \frac{d\nu_S}{dP} \cdot W_9(S) \end{cases} \quad (2.61)$$

Введемо позначення:

$$A = W_2^*(S) \cdot W_2(S);$$

$$B = W_{5,6}(S) \cdot W_{2Э}(S) \cdot W_{PT}(S) \cdot \frac{d\nu_S}{dP} \cdot W_9(S) \quad (2.62)$$

$$C = W_{PZ}(S) \cdot \frac{d\nu_S}{dP} \cdot W_9(S) \quad (2.63)$$

Тоді вихідна система набуде вигляду:

$$\begin{cases} -A \cdot \Delta T_1(S) + \Delta T_2(S) = W_3(S) \cdot \Delta Q(S) + 0 \cdot \Delta Z(S) \\ \Delta T_1(S) - B \cdot \Delta T_2(S) = 0 \cdot \Delta Q(S) - C \cdot \Delta Z(S) \end{cases} \quad (2.64)$$

Структурна схема АППУ з урахуванням передавальних функцій теплової системи представлена на рисунку 2.17.

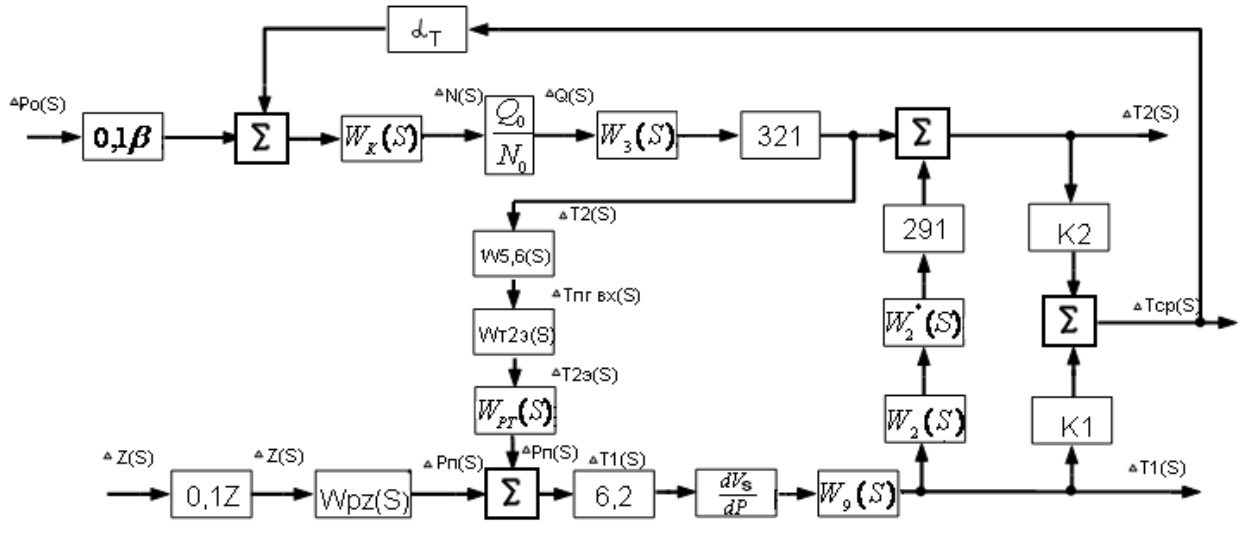


Рисунок 2.17 – Структурна схема АППУ.

Таким чином, передавальні функції теплової системи багатовимірної структурної схеми мають вигляд:

$$W^{Z}_{T_{CP}}(S)=\frac{\Delta T_{CP}(S)}{\Delta Z(S)}=\frac{\frac{1}{2}\left(\Delta^{Z}_{T_1}+\Delta^{Z}_{T_2}\right)}{\Delta} \tag{2.69}$$

Висновки. У даному розділі виконано розроблення математичних моделей об’єкта управління атомної енергетичної установки, які адекватно описують основні нейтронно-фізичні та теплогідравлічні процеси, що відбуваються в реакторній установці та допоміжних системах. Побудовані моделі дозволяють відобразити динамічні властивості об’єкта в широкому діапазоні режимів роботи, зокрема під час перехідних і збурених процесів.

На основі отриманих математичних моделей сформовано багатовимірну структурну схему автоматизованої підсистеми управління потужністю (АППУ), яка враховує взаємозв’язки між основними регульованими параметрами, керуючими впливами та збуреннями. Структурна схема відображає як зовнішні зворотні зв’язки, реалізовані засобами автоматичного регулювання, так і внутрішні зворотні зв’язки, зумовлені фізичними властивостями реактора, зокрема температурними коефіцієнтами реактивності.

Розроблена модельна база та структурна схема АППУ створюють основу для подальшого аналізу стійкості системи автоматичного керування, дослідження її динамічних характеристик і синтезу регуляторів з покращеними показниками якості. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації алгоритмів керування, підвищення безпеки експлуатації АЕУ та обґрунтування технічних рішень щодо модернізації систем автоматичного управління енергоблоком.

3 СТРУКТУРНА СХЕМА АСУ ТП

Структура управління енергоблоком побудована за ієрархічним принципом. Верхній щабель займають щити управління, інформаційну підтримку яких забезпечують потужні обчислювальні комплекси. Нижче розташований рівень локальних підсистем. Особливістю цих підсистем є відсутність повної автономності та наявність тісних інформаційних зв'язків. Це зумовлено специфікою атомної енергетичної установки, де всі елементи поєднані спільними енергетичними потоками, тому зміна режиму роботи одного вузла неминуче впливає на інші.

Системи автоматичного регулювання, як складові частини загальної системи управління, вирішують три основні задачі: стабілізацію параметрів на заданих уставках, підтримку балансу між взаємозалежними величинами та зміну параметрів у часі за визначеним законом. Для реалізації цих завдань, від збору даних до формування керуючих команд, широко застосовується цифрова обчислювальна техніка.

Автоматизована система управління технологічним процесом (АСУ ТП) для блоків з реактором ВВЕР-1000 є невід'ємною частиною експлуатації та виконує ряд функцій. До інформаційних функцій належать збір та обробка даних для персоналу, розподіл інформації про стан обладнання та розрахунок техніко-економічних показників ефективності блоку.

Керуючі функції полягають у формуванні впливів на обладнання. Це реалізується через дистанційне та автоматичне управління механізмами, а також через системи регулювання та технологічного захисту.

Допоміжні функції забезпечують працездатність самої системи та виконання специфічних операцій. Вони реалізуються через спеціалізовані підсистеми, такі як системи перевантаження палива, пуско-налагоджувальних вимірювань, контролю герметичності оболонок тепловиділяючих елементів

(ТВЕЛ), випробування гермооболонки, вібродіагностики турбіни та комплекси для фізичних вимірювань під час пуску реактора.

На рівні енергоблоку система забезпечує ведення технологічного процесу, управління електротехнічним обладнанням, координацію роботи всіх вузлів та контроль радіаційної безпеки. Враховуючи складність сучасних промислових об'єктів, особливо АЕС, розробка АСУ ТП стає пріоритетним завданням при проектуванні.

Для оптимізації процесів створення, монтажу та експлуатації АСУ ТП прийнято розділяти на функціональні підсистеми. До них відносять підсистеми технологічного та ядерно-фізичного контролю, сигналізації (технологічної та аварійної), захистів і блокувань, а також підсистеми дистанційного керування та автоматичного регулювання. Кожна з них відповідає за окрему частину об'єкта або реалізує конкретну функцію управління.

Відповідно до описаними вище функціями в складі АСУ ТП АЕС виділено такі функціональні підсистеми:

- система управління і захисту реактора (СУЗ);
- система внутрішнього реакторного контролю (СВРК);
- апаратура контролю нейтронного потоку (АКНП);
- апаратура контролю герметичності ТВЕЛів;
- автоматична система управління турбіною (АСУТ–1000);
- система контролю технологічних параметрів турбоустановки;
- система автоматичного регулювання (САК);
- керуюча обчислювальна система (УВС);
- уніфікований комплекс технічних засобів (УКТС);
- система контролю радіаційної безпеки (АКРБ);
- система автоматичного регулювання на базі ПТК, мікро–контролерів.

Електрообладнання СУЗ реактора. Електрообладнання СУЗ реактора ВВЕР–1000 включає в себе наступні функціональні системи [7]:

– аварійного та попереджувального захисту;

– групового та індивідуального управління;

– автоматичного регулювання потужності;

– контроль положення органів регулювання;

– електроживлення електрообладнання СУЗ;

– силового управління приводами СУЗ.

Система управління і захисту реактора призначена для виконання наступних функцій:

– автоматичного регулювання потужності ЯР відповідно до потужності, що віддається ТГ в мережу, або стабілізації потужності ЯР в заданому рівні;

– пуску ЯР і виведення його на потужність в ручному режимі;

– компенсації зміни реактивності в ручному і автоматичному режимах;

– аварійного захисту ЯР (припинення або уповільнення ланцюгової реакції в активній зоні ЯР);

– игналізації про причини спрацювання АЗ;

– автоматичного шунтування деяких сигналів АЗ;

– сигналізації про несправності, що виникають в СУЗ;

– індикації положення ОР на БЩУ і РЩУ, а так само видачі інформації про становище кожного ЗР в СВРК і ІТТ.

Система управління і захисту реактора ВВЕР–1000 складається з наступних функціональних систем:

– аварійного та попереджувального захисту (ПТК АЗ– ПЗ);

– групового та індивідуального управління (ПТК СГІУ);

– автоматичного регулювання потужності (ПТК АРП–РОП–ППЗ);

– електроживлення електрообладнання СУЗ.

Програмно–технічний комплекс СГІУ – М. Система групового та індивідуального управління СГІУ–М є однією з підсистем СУЗ реактора і разом

з кроковими електромагнітними приводами ШЕМ–М і датчиками положення УП–2 забезпечує управління ОР СУЗ.

Комплекс виконує наступні основні функції:

– утримує ЗР в крайніх і проміжних положеннях;

– контролює стан всіх ЗР з відображенням на БЩУ і РЩУ;

– відпрацьовує команди аварійного захисту АЗ (обезструмлює електромагніти приводу ШЕМ–М, що викликає падіння всіх ЗР під дією власної ваги);

– відпрацьовує команди прискореного попереджувального захисту УПЗ (обезструмлює електромагніти наперед заданої групи ОР, що викликає падіння даної групи ОР під дією власної ваги);

– переміщує індивідуально обраний ЗР вгору або вниз за директивами оператора;

– переміщує одну жорстко обрану групу ОР вгору або вниз за директивами оператора;

– переміщує групи ОР при пуску і зупинці РУ по директивам оператора від ключа «Групове управління» в жорсткій проектної послідовності руху груп;

– переміщує групи ОР при автоматичному регулюванні потужності по сигналах регулятора АРМ в жорсткій проектної послідовності;

– переміщує в будь–якому напрямку будь–яку (одну) групу ОР по ініціативе оператора від ключа «Групове управління»;

– групу для управління оператор вибирає ключем «Вибір групи»;

– формує команди на послідовний рух вниз груп ОР (починаючи з останньої витягнутої з активної зони реактора групи) в жорсткій проектної послідовності при надходженні сигналу ПЗ–1;

– формує програмний заборону на будь–які переміщення груп та індивідуальних ЗР вгору при надходженні сигналу ПЗ–2;

Крім вищевказаних основних функцій комплекс виконує до–виконавчими інформаційні та діагностичні функції.

До складу комплексу СГІУ–М входять:

– панель силового управління (ПСУ) – 31 шт.;

– панель контролю положення (ПКП) – 16 шт.;

– панель групового та індивідуального управління (ПГІУ) – 1 шт.;

– панель прийому і обробки команд захистів (ППКЗ) – 2 шт.;

– панель діагностики, відображення і протоколювання (ПД) – 1 шт.;

– панель кросових (проміжних) клемників (ПКК) – 1 шт.;

– пристрій грубої індикації положення (УГІП) на БЩУ – 10 шт.;

– пристрій грубої індикації положення (УГІП) на РЩУ – 10 шт.;

– ристрій комунікації і індикації УКІ–А1 – 1 шт.;

– пристрій комунікації і індикації УКІ–А2 – 1 шт.;

– блок ручного управління (БРУ) – 1 шт.;

– блок зовнішніх підключень (БП) – 1 шт.

Взаємозв'язку між внутрішніми частинами комплексу дискретних і аналогових сигналів можна розділити на наступні групи:

– аналогові сигнали грубого положення ОР СУЗ по каналах ПКП на індикатори положення УГІП на БЩУ, РЩУ;

– дискретні сигнали взаємного зв'язку між каналами ПКП і ПСУ;

– дискретні сигнали від ключів оператора на БРУ, що передаються на ПГІУ;

– дискретні сигнали аварійного відключення від ППКЗ на ПКП і так–леї на ПСУ;

– сигнали несправностей, що надходять з різних частин обладнання на ПД.

Примітка. Всі інші команди і сигнали передаються по маги–стральним кабельним зв'язків.

Пристрій УКІ–А2 в складі СГІУ–М є засобом надання оператору додаткової інформації перш за все про точний положенні ОР СУЗ у вигляді

гістограм. Інформація для відображення сформована на п'яти фрагментах. На екрані завжди показаний тільки один з них. Потрібний фрагмент оператор вибирає натиском на кнопку. На УКИ–А2 находятся дисплей и клавиатура «Вибір фрагментів». Кнопки вибору фрагментів на клавіатурі позначені «Ф1» – «Ф5», «Лист вперед» і «Лист назад».

Усередині пристрою знаходиться блок мініатюрного персонального комп'ютера зі вставленими модулями комунікації і блок живлення.

Обмін інформацією між ПГІУ і УКІ–А2 осуществлается виключно по дубльованої лінії комунікації УКІ. Крім цієї лінії коммінікаціі до УКІ–А2 підключено тільки напруга живлення (за двома вводів від двох незалежних джерел).

Час проходження керуючих сигналів (команд) АЗ по ланцюгах ППКЗ і ПСУ – 0,1 с від моменту появи на вході двох будь–яких каналів 1ППКЗ або 2ППКЗ команди АЗ до початку знеструмлення останнього з електромагнітів приводів ШЕМ–М.

Час проходження керуючих сигналів (команд) УПЗ по ланцюгах ППКЗ і ПСУ – 0,1 с від моменту появи на вході двох будь–яких каналів 1ППКЗ або 2ППКЗ команди УПЗ до початку знеструмлення останнього з електромагнітів обраної групи приводів ШЕМ–М.

Час проходження керуючих сигналів (команд) попереджувального захисту по ланцюгах ПГІУ і ПСУ – 1,0 с від моменту появи на вході двох будь–яких каналів ПГІУ команди ПЗ–1 до початку формування послідовності імпульсів постійного струму в режимі опускання чергової групи ОР СУЗ.

Час проходження керуючих сигналів (команд) від автоматиче–ського регулятора потужності по ланцюгах ПГІУ і ПСУ – 1,0 с від моменту появи на вході двох будь–яких каналів ПГІУ команди на рух групи ОР СУЗ вгору або вниз до початку формування послідовності імпульсів постійного струму в режимі підйому або опускання чергової групи ОР СУЗ.

Режим ручного управління 5–ю групою ЗР призначений для вирішення спеціальних завдань управління реактором. Наявність самостійного ключа «Управління 5–ю групою» дозволяє оператору проводити переміщення групи ЗР без впливу на інші групи, незалежно від їх положення і без необхідності проводити вибір групи.

Примітка. Оскільки група №5 не включена в проектну після–довність руху груп, на неї не впливають команди від АРМ і сигнали ПЗ–1.

Оператор управляє групою за допомогою ключа «Управління 5–ю групою». Індикація положення групи на УКІ–А1 не проводиться. Оператор це питання може вирішити, вибираючи, наприклад, один з ОР групи в режим індивідуального управління, і отримати таким чином інформацію про становище групи по дисплею «Положення» в секторі «Індивідуальний ЗР» на блоці індикації УКІ–А1 (положення 1–го по порядку ЗР в групі). Крім того оператор може отримати інформацію про точний положенні всіх вхідних в групу ОР по гістограмі і даними на фрагменті №3 дисплея УКІ–А2.

Що входять до групи ОР, що відстали від середнього положення групи, оператор дотягує до кінцевих положень, просто притримуючи ключ «Управління 5–ю групою» в положенні на рух до тих пір, поки по–следний ДР не досягне кінцевого положення. Раніше досягли кінцевих положень ЗР зупиняються індивідуальними кінцевими вимикачі–лями.

Пристрій розвантаження і обмеження потужності реактора РОМ. РОМ є складовою частиною системи регулювання потужності блоку спільно з пристроями ЕГСР, АРМ і призначене для обмеження по максимуму теплової потужності реактора на рівні, який встановлюється автоматично в залежності від числа включених, ГЦН, ТПН, а також від положення СРК турбоагрегату, КАГ–24 і від зниження частоти живильної мережі ГЦН [7].

Система аварійного та попереджувального захисту реактора. Сис–тема призначена для захисту ядерної парогенеруючі установки від неприпустимих відхилень основних параметрів, таких як витрата, тиск і температура теплоносія

1 контуру, рівня нейтронної потужності ядерного реактора шляхом своєчасного припинення або уповільнення ланцюгової реакції поділу. Аварійна і попереджувальна захист вступають в дію тоді, коли автоматичне регулювання не в змозі забезпечити нормальний розвиток процесу.

Система аварійного захисту включає в себе аварійну і попереджувальну захист 1–го і 2–го родів (ПЗ–1, ПЗ–2). При надходженні послідовно або одночасно декількох аварійних сигналів по тиску, температурі, витраті теплоносія 1 контуру, потужності реактора і іншим параметрам пріоритет має більш сильний захист.

Система АЗ, ПЗ формує команди, що впливають на органи регулювання, які або припиняють, або уповільнюють ланцюгову реакцію ділення. З метою надійності система АЗ складається з двох однакових комплектів (АЗ №1, АЗ №2). Всі комплекти розділені між собою по лініях зв'язку, електроживлення, вхідним і вихідним сигналам і розміщені в різних приміщеннях. Кожен комплект виконаний трьохканальним, а вихідні команди формуються по мажоритарному f прінціпу «два з трьох».

Всі вхідні сигнали розділені на сигнали АЗ, ПЗ 1–го і ПЗ 2–го роду. За цим сигналам відбуваються такі дії на органи регулювання:

– аварійні сигнали АЗ викликають падіння всіх ЗР під дією власної ваги до крайнього нижнього положення. Час падіння від 1,5 до 4 секунд.

– ПЗ 1–го роду викликають почергове рух ЗР всіх груп вниз (в порядку зменшення їх номерів) з робочою швидкістю 20 мм/сек. Рухи ЗР вниз припиняється при зникненні сигналу «ПЗ–1».

– ПЗ 2–го роду забороняють рух ЗР вгору до зняття сигналу «ПЗ–2».

Силове електроживлення СУЗ. Призначено для надійного пита–ня електрообладнання СУЗ [8].

Види електроживлення:

– напругою 110В постійного струму;

– напругою 380 / 220В змінного струму підвищеної надійності;

– напругою 220В змінного струму;

– напругою 220В і 24В постійного струму.

Автоматичний регулятор потужності. Стаціонарні режими роботи АЕУ не можуть підтримуватися мимовільно, так як в процесі роботи установка неминуче піддається різним впливи. Ці обурення можуть бути як зовнішні (зміни навантаження енергосистеми), так і внутрішні (планові або аварійні перемикання обладнання АЕС та ін.), Тому АЕУ АЕС повинна бути забезпечена системою регулювання, яка виробляє котра управляє вплив на органи управління і таким чином підтримує АЕУ на заданому режимі роботи. Одним з елементів системи регулювання і є регулюючий пристрій АРМ.

Автоматичний регулятор потужності реактора АРМ–5С є складовою частиною системи регулювання потужності енергоблоку спільно з системою ЕГСР і пристроєм РОМ. Регулюючий пристрій АРМ призначене для підтримки потужності реактора відповідно до потужності турбогенератора, стабілізації нейтронної потужності реактора на заданому рівні і підтримки потужності турбогенератора відповідно до потужності реактора. Принцип роботи АРМ заснований на безперервному порівнянні значень поточного регульованого параметра (нейтронна потужність реактора, тиск пара в головному паровому колекторі 2–го контуру) зі значеннями параметра, записаними в регуляторі і є для нього завданням. АРМ впливає на ОР СУЗ, приводячи змінився параметр регулювання заданого значення.

Пристрій АРМ–5С забезпечує наступні режими роботи:

– режим астатического підтримки нейтронної потужності (режим «Н»);

– режим астатического підтримки теплотехнічного параметра впливом на ОР СУЗ (режим «Т»);

– сторожам режим підтримки теплотехнічного параметра впливом на ОР СУЗ (режим «С»).

Прискорений попереджувальний захист (УПЗ) призначена для підвищення динамічної стійкості роботи енергоблоку і забезпечення сприятливих режимів

роботи обладнання при непередбачених відключеннях обладнання шляхом швидкого зниження потужності реактора і турбоагрегату (скидання однієї групи ЗР в активну зону) з одночасною корекцією рівня розвантаження реактора пристроєм РОМ.

Система внутрішнього реакторного контролю (СВРК). Призначена для отримання інформації та здійснення централізованого контролю ядерно–фізичних (розподіл щільності нейтронного потоку по радіусу і висоті активної зони) і теплофізичних (температури теплоносія в окремих частинах активної зони реактора) параметрів, що характеризують стан активної зони реактора.

СВРК складається з двох основних частин:

– первинні прилади внутрішнього реакторного контролю, до яких відносяться нейтронні перетворювачі і вимірники температури (КНІ, ТП, лінії зв'яз-
ку);

– вторинна частина з електронної апаратури.

– СВРК виконує наступні функції:

– збір інформації від датчиків аналогових і дискретних сигналів;

– нормування сигналів;

– перетворення вимірюваних сигналів в цифровий код;

– запам'ятовування інформації;

– арифметичну і логічну обробку інформації;

– реєстрацію на паперовій стрічці та перфоленте;

– введення інформації з перфострічки;

– обмін інформацією з ЕОМ;

– перетворення буквено–цифровий та графічної інформації на уои і на цифрових індикаторах.

Програмно–технічний комплекс АКНП. Програмно–технічний комплекс АКНП призначений для роботи в системі управління і захисту (СУЗ) енергетичного реактора АЕС.

ПТК АКНП призначений для виконання наступних основних функцій:

– обчислення і контроль відносної фізичної потужності, швидкості її зміни і реактивності реактора за допомогою вимірювання щільності потоку нейтронів в каналах біологічного захисту реактора в усіх режимах експлуатації реакторної установки;

– формування дискретних сигналів перевищення уставок аварійного та попереджувального захисту, а також уставок регулювання по потужності і періоду для СУЗ і АСУ ТП енергоблока АЕС;

– формування аналогових сигналів пропорційних потужності і назад пропорційних періоду для СУЗ і АСУ ТП енергоблока АЕС;

– надання інформації про значеннях потужності, періоду, реактивності і дискретних сигналів операторам БЩУ, РЩУ і ППМ і обслуговуючому персо налу в оптичному і акустичному вигляді;

– безперервна реєстрація поточних значень потужності і періоду;

– безперервна діагностика стану технічних засобів і подання отриманої інформації операторам БЩУ і обслуговуючому персоналу.

ПТК АКНП має відокремлений структурний побудова і складається з трьох комплектів технічних засобів:

– перший комплект АКНП АПЗ для СУЗ;

– другий комплект АКНП АПЗ для СУЗ;

– комплект АКНП РЩУ для РЩУ.

До складу кожного комплекту входять три незалежні канали контролю потужності, періоду і реактивності.

Кожен комплект у складі ПТК АКНП складається з окремих конструктивно завершених пристроїв, що з'єднуються кабельними лініями зв'язку.

ПТК АКНП забезпечує:

– контроль потужності, періоду і реактивності реактора при перевантаженні (завантаженні) палива, в процесі пуску і роботи на потужності;– поканальное задание уставок защиты по мощности и периоду;

– формування дискретних сигналів аварійного та попереджувального захисту по потужності і періоду для СУЗ;

– формування дискретних сигналів регулювання по потужності і періоду для АРМ;

– формування дискретних сигналів перевищення заданих рівнів потужності для СУЗ і УПЗ;

– формування дискретних сигналів поточного діапазону для СВРК;

– формування дискретних сигналів справності і перевірки вимірювальних каналів для СВРК;

– формування індикаторних дискретних сигналів для пульта оператора на БЩУ;

– формування безперервних аналогових сигналів, пропорційних потужності і назад пропорційних періоду, для АРМ, РОМ, УПЗ, СРТ і СВРК;

– реєстрацію на картах незалежній пам'яті поканального і усереднених значень потужності і періоду;

– цифрове і аналогове, у вигляді гістограм і трендів, уявлення поканального і усереднених значень потужності, періоду і реактивності, а також поканального уставок потужності і періоду;

– акустичну сигналізацію рівня нейтронного потоку;

– автоматичний контроль справності технічних засобів з формуванням поканального сигналів несправності;

– ручну і автоматизовану перевірку каналів контролю потужності, періоду і реактивності.

Технологічний контроль обладнання здійснюється за допомогою на–гою апаратури для контролю зсуву ротора ВВК–331, КСА–15 і датчиків по-
ложення ДПОЗ і ДПСМ.

Для теплотехнічного контролю на ЕБ АЕС використовуються дотримуюся–щие датчики:

– «Сапфір–22ДД» – для вимірювання перепаду тисків;

– «Сапфір–22ДІ» – для вимірювання надлишкового тиску;

– «Сапфір–22ДА» – для вимірювання атмосферного тиску;

– «Сапфір–22ДГ» – для вимірювання гідростатичного тиску;

– термопари ТХК–2077; ТХК–2076;

– термометри опору ТСП–6099 і ТСМ–0979.

Технологічні параметри РУ і ТА, що використовуються для формування сигналів АЗ, ПЗ і захисту турбіни:

1) Аварійний захист здійснюється одночасним скиданням в активну зону всіх кластерів СУЗ за час не більше чотирьох секунд і діє за такими чинниками:

– нейтронний потік в ДІ, ДП і ДЕ вище уставки;

– період розгону в ДІ, ДП і ДЕ менше 10 сек;

– збільшення нейтронної потужності реактора більше 107% $N_{ном}$;

– тиск першого контуру над активною зоною більше 180 кгс/см^2;

– зменшення різниці температури насичення теплоносія першого контуру і максимальної його температури в гарячій нитці будь петлі менш 100С;

– тиск над активною зоною реактора:

а) менше 140 кгс /см^2 при температурі теплоносія в гарячих нитках петель більш 260^{0}С;

б) менше 148 кгс/см^2 при температурі теплоносія в гарячих нитках петель більш 260^{0}С і потужності реактора більше 75% $N_{ном}$;

– зростання тиску під оболонкою більше 0,3 кгс / см^2 надлишкового;

– сейсмічна дія на рівні землі більше 6 балів;

– обесточіваніе двох ГЦН з будь–якого числа працюючих при нейтронної потужності більше 75% $N_{ном}$ з затримкою 6 секунд:

а) одночасно;

б) послідовно протягом часу менше 70 секунд;

– знеструмлення одного ГЦН з двох працюючих з затримкою 1,4 сек при потужності реактора більше 5% $N_{ном}$;

– зниження перепаду тисків будь–якого з чотирьох ГЦН з 3 кгс/см^2 до 2,5 кгс/см^2 за час менше 5 секунд;

– зменшення рівня в ПГ при працюючому ГЦН даної петлі більш ніж на 650 мм нижче номінального з затримкою 5 секунд;

– збіг наступних сигналів за допомогою одного з чотирьох паропрово–дів:

а) різницю температур насичення першого і другого контурів 750 ◦С;

б) тиск в паропроводі менше 50 кгс/см^2;

– збільшення температури теплоносія в гарячій нитці будь петли першого контуру перевищує більш ніж на 80 ◦С номінальну температуру в гарячій нитці;

– зменшення рівня теплоносія в КД менш 4600 мм із затримкою часу 5 секунд;

– зменшення частоти електроживлення на трьох з чотирьох секціях ГЦН менше 46 Гц;

– збільшення тиску в будь–якому з чотирьох ГЦН більше 80 кгс/см^2 при працюючому ГЦН відповідної петлі. Сигнал шунтируется через 50 секунд після відключення ГЦН петлі;

– зникнення силового живлення 220В, 50 Гц на двох вводах СУЗ з витримкою часу 3 с;

– втрата надійного живлення на двох з трьох вводах 380/220 В, 50 Гц;

– втрата живлення 220 В на двох вводах будь ПАК (втрата живлення ланцюгів АЗ);

– сигнал від ключа АЗ з БЩУ;

– сигнал від ключа АЗ з РЩУ.

2) Попереджувальна захист першого роду (ПЗ–1) здійснюється послідовним (з 10–ї по 1–ї групи) введенням в активну зону кластерів СУЗ зі швидкістю 20 мм / с і діє за такими чинниками:

– збільшення нейтронної потужності реактора в ДП ІДЕ вище уставки;

– період розгону в ДІ, ДП і ДЕ менше 20 секунд;

– теплова потужність реактора для даної кількості працюючих ГЦН більш допустимої (67% – для трьох, 49% – для двох протилежних, 39% – для суміжних). Розвантаження реактора проводиться пристроєм РОМ;

– тиск першого контуру (над активною зоною) більше 172 кгс/см^2;

– тиск другого контуру більше 70 кгс/см^2;

– температура теплоносія в гарячій нитці будь петлі перевищує більш ніж на 30 ◦С номінальну температуру в гарячій нитці;

– знеструмлення одного з чотирьох працюючих ГЦН або одного з трьох.

– розвантаження здійснюється пристроєм РОМ;

– відключення останнього працюючого або одного з двох працюю–чих ТПН. Розвантаження здійснюється до заданого рівня потужності (10% $N_{ном}$/ 49% $n_{доп}$) пристроєм РОМ;

– посадка двох з чотирьох СК ТГ. Розвантаження до 39% $N_{ном}$ здійснюється пристроєм РОМ;

– зникнення надійного живлення СУЗ 220В, 50 Гц на двох панелях ПФС;

– сигнал від ключа ПЗ–1 з БЩУ.

3) Попереджувальна захист другого роду (ПЗ–2) здійснює за–прет руху ОР СУЗ вгору і діє при:

– збільшенні нейтронної потужності в ДІ вище уставки;

– падіння одного ОР СУЗ;

– тиск першого контуру (над активною зоною) більше 165 кгс/см^2.

4) Сигнали знижують навантаження турбіни:

– 80% від номінальної – останов одного з чотирьох працюючих ГЦН;

– 60% від номінальної – останов двох з чотирьох працюючих ГЦН;

– 50% від номінальної – останов одного з двох працюючих ТПН;

– до холостого ходу – при відключенні генератора від мережі дією електричних захистів від «зовнішніх пошкоджень».

5) Сигнали захисту ТПН:

– зменшення тиску, що подається до турбіни масла на рівні осі, менш 0,6 кгс/см^2;

– зменшення тиску масла на регулювання менше 7 кгс/см^2;

– зменшення тиску масла на редуктор ТПН менше 0,3 кгс/см^2;

– зменшення тиску масла на змащення ТПН менше 0,6 кгс/см^2;

– зменшення тиску води на вході головного насоса менше 36 кгс/см^2;

– збільшення тиску води на виході головного насоса більше 120 кгс/ см^2;

– збільшення тиску пара в ГК більше 0,6 кгс/см^2;

– збільшення тиску води в камері розвантажувального барабана більш 14 кгс/см^2;

– збільшення витрат через ТПН більше 4900 м^3/год;

– збільшення осьового зсуву ротора більше 0,8 мм;

– збільшення частоти обертання ТПН більше 3500 об/хв.

Система технологічних захистів і блокувань. Основним режимом нормальної експлуатації АЕС є робота ЕБ на потужності, при якій управління ЯР, ПГ, ТГ і іншими агрегатами блоку здійснюється підсистемою автоматичного регулювання, що підтримує співвідношення між віддається в мережу електричною потужністю генератора і тепловою потужністю реактора, і встановлені значення основних параметрів технологічного процесу.

Оперативний персонал в обстановці, близької до аварійної або аварійної, не може гарантувати правильність і швидкість своїх дій. Тому управління обладнанням в таких ситуаціях доручається автоматичних пристроїв – ТЗ і Б [11]

Технологічні захисту (ТЗ) є останньою сходинкою автоматичного управління обладнанням і вступають в роботу, коли інші засоби не впоралися з підтриманням заданого режиму роботи установки.

Технологічні блокування (ТБ) призначені для попереджено–ня неправильних дій оператора по управлінню, автоматичного включення резервних механізмів, одночасного управління групою механізмів тощо.

Інформаційно–обчислювальна система енергоблоку. ІТТ є основною частиною АСУ ТП АЕС енергоблоку з реактором ВВЕР–1000 і виконує інформаційно–обчислювальні функції управління і технологічної сигналізації.

До складу технічних засобів ІТТ входить:

– 4 спеціальних обчислювальних комплексу (ВК) на базі СМ–2М;

– 2 спеціальних ВК СМ–1634;

– 3 комплексу зв'язку з об'єктом (КСВ);

– 2 пристрої логічного управління Улу–2;

– 6 комплектів зв'язку з оперативним персоналом;

– РМОТ–2.

СВК СМ–2М використовується для:

– збору та обробки аналогових і дискретних сигналів, що надходять від зовнішніх систем;

– розрахунку безпосередньо вимірюваних параметрів;

– виявлення відхилень аналогових і дискретних сигналів від норми;

– ідентифікація аварій ЕБ;

– реєстрація вимірюваних, що розраховуються і приходять з інших систем параметрів;

– реєстрація черговості спрацьовування захистів і блокувань, початкового стану і зміни початкового стану механізмів, по–розкладання запірно–регулюючої арматури і дії оператора технолога з управління ЕБ.

– розрахунку управління окремими вузлами ЕБ і видачі керуючої

– інформації оператору технологу;

– управління навантаженням ЕБ в системі оптимального розподілу активних навантажень.

СВК СМ–2М складається з наступних частин:

– ЕОМ СМ–2М;

– пристрій вводу–виводу.

СМ–тисячі шістсот тридцять чотири має таку ж архітектурну лінію, як і СМ–2М.

Термінал РМОТ призначений для компонування робочих місць оператора технолога або диспетчерів і виконує функції відображення інформації про хід технологічного процесу у вигляді гістограм, графіків, алфавітно–цифрових повідомлень, реєстрації алфавітно–цифрової інформації, обробки команд оператора технолога і обміну інформацією з ВК.

Система автоматичного регулювання технологічних параметрів реалізована на базі ПТК АСР РВ і ТО. Система виконана на основі мікроелектроніки в переобраним виконанні. В якості основних джерел інформації використовуються первинні перетворювачі «Сапфір–22» з тензочувствітельності елементами. Розглянемо основні регулятори машинного залу і РУ.

Система управління турбіною К – 1000 – 60/1500. В якості системи управління розглянута автоматизації система регулювання турбіни АСР [12] .АСР турбіни забезпечує (без втручання оператора) в нормальних і аварійних умовах її експлуатації рішення наступних завдань:

– автоматична підтримка частоти обертання ротора турбоагрегату з нерівномірністю 4,5%;

– запобігання підвищення частоти обертання ротора турбіни до установки спрацьовування Р, Б у разі миттєвого скидання навантаження генератора;

– точне регулювання тиску і потужності відповідно до заданої статичної характеристикою, необхідної для системи вторинного регулювання частоти і активної потужності енергосистеми;

– швидке короткочасне разгружение турбіни і швидке тривале обмеження її потужності з можливістю навантаження по сигналу системи ПА енергосистеми;

– попередження неприпустимого зниження тиску свіжої пари перед турбіною;

– захист турбіни від небезпечних режимів роботи (підвищення частоти обертання ротора понад уставки РБ, надмірний осьової зрушення ротора і т. П.).

АСР виконана електрогідравлічною. Структурно вона складається з електричної (ЕЧСР) і гідравлічної частин (ГУР). ЕЧСР виконана із застосуванням мікроЕОМ і включає датчики частоти обертання ротора турбіни, активної потужності генератора, тиску пара в проміжному перегрів, тиску свіжої пари і керуючого тиску в системі регулювання.

ГСР складається з регулятора швидкості (РС), регулятора безпеки (РБ), проміжних підсилювачів і виконавчих механізмів (ІМ) – гідравлічних сервомоторів регулюють і стопорних органів.

Для передачі впливів ЕЧСР на ІМ ГСР служать швидкодіючі (ЕГП, ЗПЗ) і щодо медленнодействующие (МУТ) пристрої, що перетворюють електричні сигнали в гідравлічні.

Об'єкт регулювання і регулюючі органи для ЕЧСР і ГСР загальні. Регулюючими органами є РК ЦВТ і регулюють заслінки ЦВД і ЦНД, скидні клапани

При відмові ЕЧСР турбіна залишається в роботі, лише кілька погіршуються статичні і динамічні характеристики регуляторів.

При відмові ГСР турбіна повинна бути зупинена. ЕЧСР–М призначе–значена для управління турбіною у всіх режимах роботи блоку. Впливів на РК турбіни, ЕЧСР–М дозволяє в залежності від режиму роботи виконувати регулювання наступних параметрів:

- частоти обертання ротора турбоагрегату (частоти мережі);
- електричної активної потужності турбогенератора;
- тиску свіжої пари в ЦПК.

Висновки: в даному розділі дипломної роботи розроблена структурна схема АСУПТ, та описані її основні структурні елементи.

До складу СКУ входять наступні канали управління:

- регулювання частоти обертання ротора турбоагрегату;
- регулювання електричної активної потужності;
- регулювання тиску свіжої пари;
- корекції по тиску свіжої пари;
- корекції по відхиленню частоти мережі;
- стереже регулятора мінімального тиску;
- післяаварійного управління потужністю;
- технологічних обмежень при відключенні обладнання блоку.

4 ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО ЗАКОНУ РЕГУЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ НАЛАШТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРА РІВНЯ В ПНТ

4.1 Регулятор рівня в ПНТ – 3

4.1.1 Призначення регенеративної установки низького тиску і її опис

Система регенерації низького тиску виконує функцію нагрівання основного конденсату турбіни під час його транспортування конденсатними електронасосами (КЕН) першого та другого ступенів від конденсатора до деаераційної установки.

Підвищення температури конденсату відбувається завдяки теплообміну з парою, що відбирається з проміжних ступенів турбіни. Залежно від конструкції, цей процес може відбуватися у підігрівачах змішувального типу (шляхом прямого контакту пари з водою) або поверхневого типу (через стінки трубної системи). У розглянутій схемі застосовано саме поверхневий принцип теплообміну для групи підігрівачів низького тиску з номерами 1, 2, 3 та 4.

Технологічний процес організовано наступним чином: спочатку КЕН-І подають конденсат через охолоджувач пари ущільнень до першого підігрівача (ПНТ-1). Переміщення робочого середовища від ПНТ-1 до ПНТ-2 здійснюється самопливом завдяки різниці у висоті розташування цих агрегатів. Після другого підігрівача у роботу вступають насоси другого ступеня (КЕН-ІІ), які відкачують конденсат з ПНТ-2 і прокачують його далі через ПНТ-3 та ПНТ-4. Кінцевою точкою цього тракту є деаератор, на вхід якого при номінальному навантаженні турбогенератора подається конденсат, нагрітий орієнтовно до 153 °С.

4.1.2 Підігрівач низького тиску ПНТ–3

Підігрівач низького тиску ПНТ–3 поверхневого типу, вертикального виконання з нижнім розташуванням водорозподільної камери є кожухотрубний циліндричний апарат з верхньої поворотної водяний камерою.

Підігрівач складається з корпусу, всередині якого закріплені верхня і нижня трубні дошки. У трубних дошках завальцьовані трубки з нержавіючої сталі з зовнішнім діаметром 16 мм. Щоб уникнути вібрацій трубок вони встановлюються в восьми горизонтальних перегородках. [22]

Підігрівач виконаний двухходовим по руху основного конденсата і одноходовой по руху пари, що гріє.

Основний конденсат по трубі (Dy 800) підводиться в водораспилі тільну камеру підігрівача, в якій виконана спеціальна перегородка, що розділяє простір камери в площині, перпендикулярній напрямками підведення основного конденсату і пари, що гріє. З огляду на це основний конденсат спочатку проходить праву, щодо підведення пари, що гріє, частина трубної системи підігрівача (перший хід), повертає в верхній поворотній водяній камері, проходить через ліву частину трубної системи (другий хід) і через трубу 8 (Dy 800) виходить з підігрівача.

Гріючийпар через трубу 4 (Dy 1000) подається в міжтрубний пространство підігрівача по всій його висоті, з боку другого ходу основного конденсату і рухається паралельними потоками в сторону пристрою відводиться не сконденсувалися газів поперечно омиваючи трубний пучок. Тим самим йде підігрів основного конденсату. Патрубки підведення конденсату пари, що гріє з вищого ПНТ і відведення його в нижчий ПНТ розташовані в нижній частині корпусу підігрівача.

Пристрій для видалення не сконденсувалися газів є два екрани, які відокремлюють певну кількість трубок трубної системи підігрівача, тим самим, запобігаючи прямий контакт пари, що гріє з основним конденсатом.

Таким чином, утворюється «холодна» зона в підігрівачі, де скупчуються несконденсовані гази.

Видалення паро–повітряної суміші здійснюється через штуцер (Dy80) в ПНТ – 2. Конденсат пари, що гріє по трубопроводу зливається в ПНТ – 2 через регулюючий клапан RN51S01. Для запобігання утворення повітряних пробок в трубної і міжтрубному системі підігрівач обладнаний повітряним каналом.

4.1.3 Характеристики регулятора рівня в ПНТ–3 клапан RN51S01

Призначенням регулятора рівня в ПНТ–3 є підтримка заданого значення рівня в ПНТ–3 впливом на регулюючий клапан (РК) RN51S01. [22], [24]

1) Закон регулювання.

Регулятор рівня реалізує в режимі підтримки рівня П–закон регулювання за рахунок охоплення ПІ–регулятора зворотним зв'язком по положе–нию ІМ, а в режимі підтримки тиску використовується ПІ–закон регулювання.

2) Регульований параметр.

Рівень конденсату в корпусі ПНТ–3. Похибка регулювання в межах ±50 мм від номінального значення. Вимірювання рівня виробляється датчиком типу Сапфір–22ДД.

3) Керуючий вплив.

Зміна витрати конденсату впливом на регулюючий клапан RN51S01, встановлений на лінії відводу конденсату з ПНТ–3 в конденсатор.

4) Вхідні сигнали.

Рівень конденсату в ПНТ–3 – регульований параметр.

5) Контроль справності.

Регулятор відключаються при наявності однієї з умов:

а) втрата живлення ІМ з витримкою часу 2 с;

б) відмова вимірювання рівня в ПНТ–3 (RM50L01B0);

в) відмова ІП положення ІМ.

При відмові вимірювання по електричної навантаженні (GT01Q10B0)

регулятор працює зі значенням навантаження, яке було за 1 с до відмови.

Інформація про роботу регуляторів виводиться на пульт управління АСУТ–1000М на відповідні табло «RN51S01» – регулятор в режимі підтримки рівня в ПНТ–3.

Уставки спрацьовування – 2,6 В; + 0,8 В.

6) Автобаланс.

На задане значення рівня з використанням блоку Д05, постійна часу інтегрування – 30 с.

7) Управління регулятором.

– ручне – БРУ–32 в положенні «Дист.».

– регулятор вступає в роботу при БРУ–32 в положенні «Авт.» і початку відкриття засувки RN51S03;

Регулятор RN51S01 переходить в стерегущий режим при наявності однієї з умов:

– закрите положення засувки RN51S03;

– робота блокувань відкриття РК RN51S01 при ступеня його відкриття по відношенню до РК RN50S01 менше 15% при закритому положенні засувки RN51S03;

– робота блокувань закриття РК RN51S01 при ступеня його відкриття по відношенню до РК RN50S01 більше 15% при закритому положенні засувки RN51S03.

8) Захисту і блокування.

РК RN51S01 закривається в режимі імпульс 1 з пауза 5 с при одночасній наявності умов:

– засувка RN50S03 закрита;

– БРУ–32 РК RN50S01 і RN51S01 в положенні «Авт.»;

– ступінь відкриття RN51S01 по відношенню до RN50S01 більше 15%.

РК RN51S01 в режимі стеження відкривається (імпульс 1 с, пауза 5 с) при одночасній наявності умов:

– засувка RN50S03 закрита;

– БРУ–32 РК RN50S01 і RN51S01 в положенні «Авт.»;

– степень відкриття RN51S01 по відношенню до RN50S01 менше 15%. [9].

4.1.4 Склад регулятора рівня в ПНТ–3 призначення блоків

На рисунку 4.1 показана структурна схема регулятора рівня в ПНТ–3.

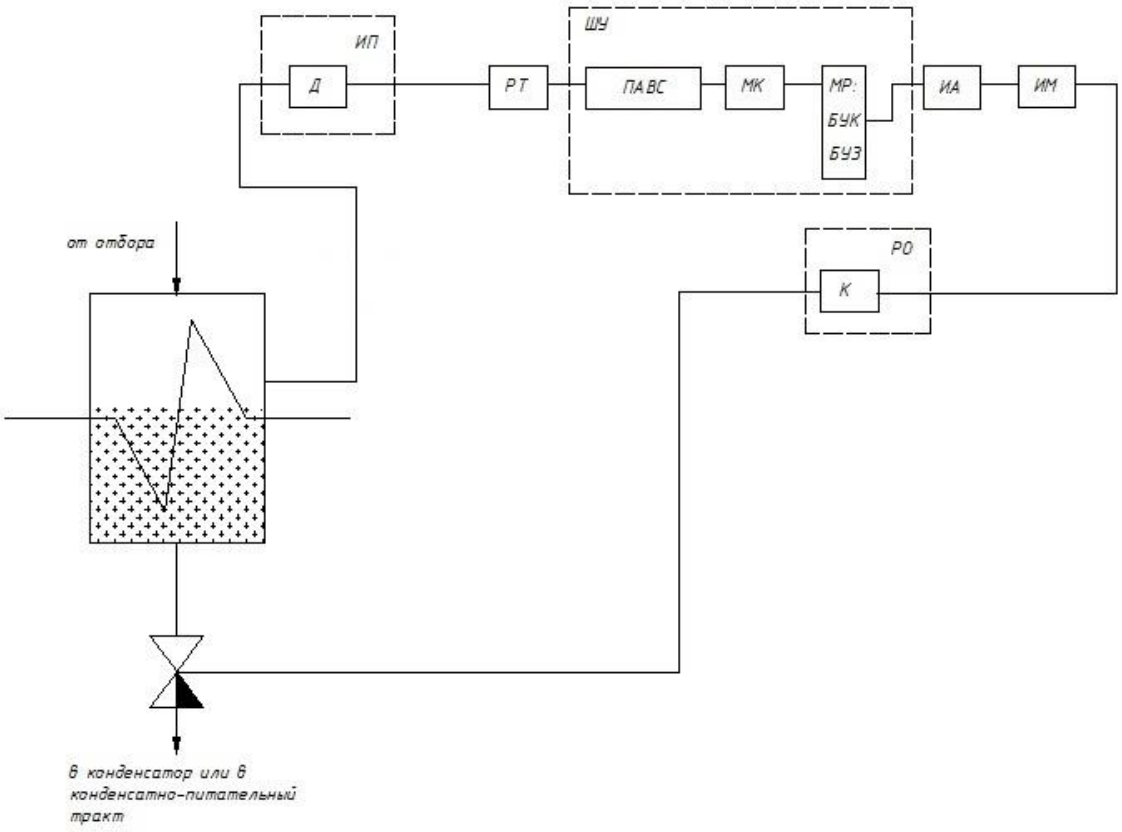


Рисунок 4.1 – Структурная схема регулятора рівня ПНТ–3.

1) Вимірювальний перетворювач типу Сапфір – 22ДД призначений для вимірювання регульованого параметра (рівня в ПНТ–3) і перетворення результатів вимірювання в сигнал постійного струму від 0 до 5 мА пропорційний вимірюваному параметру.

2) Шафа РТ призначений для розподілу і захисту токового сигналу, отриманого від датчика з уніфікованим виходом нормують перетворювачів. У шафі розміщені вентилятори, БКІН, два блоки живлення П41240 /1,36 блоків БР – Т або БГР – Т.

3) Панель прийому аналогових вхідних сигналів (ПАВС – 112).

Субблок ПАВС–112 призначений для прийому і перетворення в код 8 незалежних струмових вхідних сигналів в діапазонах від 0 до 5 мА, а так само обміну інформацією з МК по дубльованому послідовному каналу.

Субблок містить мікроконтроллерні пристрій і вісім каналів перетворення гальванически розділених один від одного і від мікроконтролерного пристрою.

4) Субблок МК – 187.

Субблок – це функціонально закінчений пристрій, призначений для:

– збору інформації по 4–м незалежним, гальванічно розв'язаним локальним шинам послідовного обміну від МСО;

– обробки зібраної інформації по функціональним алгоритмам;

– видачі керуючих впливів в МСО;

– обміну за допомогою 2–х незалежних, гальванічно розв'язаних послідовних інтерфейсів з дублюючим МК;

– обміну по мережі Ethernet з верхнім рівнем;

– прийому 8–ми дискретних сигналів напругою до 24 В;

– видачі 8–ми дискретних сигналів напругою до 60 В і струмом до 100 мА.

Субблок має наступні функціональні пристрої:

– модуль мікрокомп'ютера;

– програмовану логічну інтегральну схему;

– 64 Мбайт ОЗУ;

– 16 Мбайт ППЗУ типу FLASH;

– 1 канал зв'язку RS–232;

– 6 каналів зв'язку RS–485;

– 2 входи прийому сигналів синхронізації;

– 2 виходи видачі сигналів синхронізації;

– один канал зв'язку Ethernet;

– модуль живлення.

5) субблока МР – 195.

Субблок є конструктивно закінчений пристрій, призначене для прийому і видачі дискретних сигналів і обміну ін–формацією з МК за допомогою стандартного дуплексного / полудуплексного інтерфейсу типу RS–485.

Субблок містить наступні функціональні пристрої:

– пристрій прийому дискретних сигналів;

– пристрій видачі дискретних сигналів;

– мікроконтроллерні пристрій.

Пристрій прийому дискретних сигналів здійснює прийом інфор–мації у вигляді сигналу постійної напруги позитивної (щодо загального провідника дискретного входу) полярності.

Пристрій видачі дискретної інформації здійснює Коммут–цію вихідних сигналів безконтактними напівпровідниковими ключами, управління якими здійснюється за допомогою оптронів, що забезпечують гальванічну розв'язку між мікро контролером і вихідними ключами.

Мікроконтроллерні пристрій виконує наступні функції:

– обмін інформацією з МК по дубльованому послідовному каналу, який виконаний на базі стандартного полнодуплексного/полудуплексного інтерфейсу типу RS–485;

– формування команд видачі дискретних сигналів;

– обслуговування схеми прийому дискретної інформації і обробки дискретної інформації;

– діагностику функціонування вироби.

Субблок має:

– 12 незалежних дискретних входів 24 В;

– 9 дискретних виходів з навантажувальною здатністю 300 мА, 60 В;

– 4 дискретних виходи для управління виконавчими механізмами (ІМ) 300 мА, 60 В з контролем спрацьовування ключів управління

У цьому субблока закладений алгоритм управління БУК, БУЗ.

5) Виконавчий автомат (ІА).

ІА призначений для безконтактного управління електричним ис–виконавчими механізмом з однофазним конденсаторним електродвигуном. [23]

ІА має наступні технічні характеристики:

– живлення здійснюється від однофазної мережі змінного струму 220 В, частотою 50 Гц.

Вхідні сигнали:

– логічна одиниця – від 24 до 32 В;

– логічний нуль – від 0 до 2 В;

– вхідний опір не менше 750 Ом;

– максимальний комутований струм – 4 А;

– потужність – 10ВА.

Підключення регулює блоку до виконавчого механізму (за допомогою схеми управління) здійснюється за допомогою органів (перемикачів) управління. Необхідність їх визначається тим, що крім автоматичного управління виконавчих механізму передбачається також дистанційне за допомогою ключа або кнопок управління.

У зв'язку з тим, що вихідний сигнал схеми управління недостатній для включення виконавчого механізму, в регуляторі є реверсивний пусковий пристрій ІА, що забезпечує перетворення сигналів в напругу достатньої потужності.

Виконавчий механізм складається з електричного двигуна і системи механічної передачі (редуктора, важелів), необхідних для переміщення регулюю-

чого органу. [23]

5) Виконавчий механізм (МЕВ 630/25).

Блок призначений для переміщення органів регулювання. МЕВ забезпечує безконтактне управління, включає асинхронний двофазний електродвигун, багатоступінчастий редуктор, електромагнітне гальмо, датчик переміщення:

– частота обертання валу постійна.

– кут повного переміщення вала 0 ° – 90 °, 0 ° – 240 °;

– фрикційна муфта електричного гальма розташована на валу електродвигуна.

5) Регулюючий орган (К).

Клапан Т – 149Пс поворотно–золотниковий. [23]

4.1.5 Опис роботи регулятора рівня в ПНТ – 3

Регулятор RN51S01 при регулюванні рівня підтримує розбаланс рівним нулю.

Для компенсації статичної нерівномірності при зміні електричного навантаження блоку в закон регулювання введений сигнал по електричної навантаженні і поправка коефіцієнта, величина і знак якої залежать від величини і напрямку відхилення поточного значення рівня в ПНТ–3 від заданого [22], [24].

При включенні регулятора RN51S01, в автоматичний режим як завдання регулятору встановлюється поточне значення рівня в ПНТ–3 за умови, що воно знаходиться в діапазоні від 450 до 650 мм. У разі, коли поточне значення рівня виходить із зазначеного діапазону, то встановлюється відповідно завдання нижньої 450 мм або верхньої 650 мм кордону діапазону.

При перекладі регулюючого органу в автоматичний режим, ланцюги управління регулює блоку підключаються до виконавчого механізму через схему управління і вступає в роботу негативний зворотний зв'язок (ООС), тобто сигнал від 0 до 5 мА, що надходить з датчика положення, змінюється пропорційно положенню клапана RN51S01, забезпечуючи роботу регулятора на підтримку регульованого параметра має місце в момент включення режиму «автомат».

4.1.6 Побудова перехідних характеристик САК з різними законами регулювання

Управління регулюючим органом в регуляторі здійснюється згідно із законом (алгоритму) визначає динамічні властивості САК і тип регулятора.

Законом (алгоритмом) регулювання називається математична залежність між регулюючим впливом (положенням регулюючого органу) хр (t) і відхиленням регульованої величини Δх (t) = хз (t) –$х_{вих}$ (t) або її функціоналом (похідна, інтеграл та інші) $х_р$ (t) = f [Δх (t)].

Зазначена математична залежність, як випливає з визначення, може бути пропорційною, диференціальної, інтегральної або комбінованої (пропорційно–диференціальної, пропорційно–інтегральної, пропорційно–інтегрально–диференціальної). В принципі можлива побудова регуляторів, заснованих на інших, більш складних законах, але їх реалізація не завжди виправдана і пов'язана з технічними труднощами.

Одна з основних завдань, яке виникає при розробці систем автоматичного регулювання, полягає у виборі потрібного для даного об'єкта закону регулювання. Завдання вибору найбільш прийнятного закону регулювання зводиться до відшукання розумного компромісу між стійкістю, якістю і простотою системи регулювання. [20], [21]

Для побудови перехідних характеристик САК з різними законами регулювання задамося вихідними даними САК.

1) Рівняння об'єкта регулювання:

$$T_1 \frac{dx_{вых}(t)}{dt} + x_{вых}(t) = k \cdot x_{вх}(t - \tau) \qquad (4.1)$$

2) Рівняння об'єкта при впливі регулятора:

$$T_1 \frac{dx_{вых}(t)}{dt} + x_{вых}(t) = \varepsilon \cdot [x_{вх}(t) - x_p(t)] \qquad (4.2)$$

3) Рівняння кривої розгону:

$$x_{вых}(t) = k \cdot A \cdot (1 - (1 + \frac{t}{T_1}) \cdot e^{\frac{-t+\tau}{T_1}}) \qquad (4.3)$$

Параметри САК зведені в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри САК.

T_1	T_2	к	**τ**	$X_{вх}=A$	$к_р$	$T_и$	$T_{пр}$
0,45	–	0,3	0,75	1,7	0,6	0,4	10,8

Розрахункова структурна схема САК зображена на рисунку 4.2.

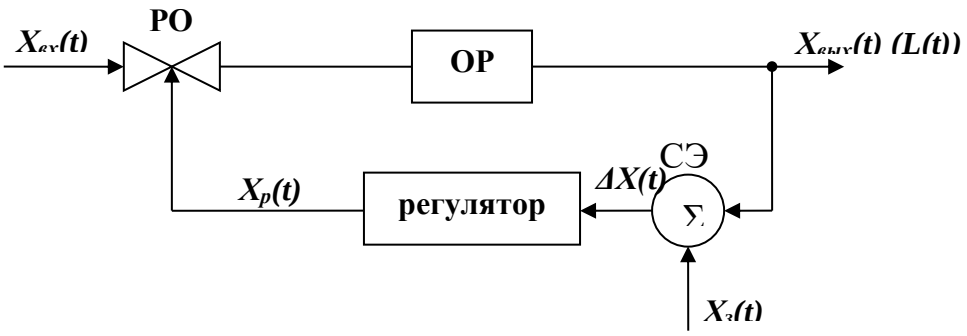


Рисунок 4.2 – Розрахункова структурна схема САК.

Дана структурна схема побудована таким чином, що основним (цікавлять нас) впливом є вплив з боку регульованою середовища $X_{вх}$ (t).

Розгінна характеристика будується по заданому рівнянню (4.3) у вигляді кривої розгону:

$$X_{вых}(t) = 0{,}51 \cdot (1 - (1 + \frac{t}{0{,}45}) \cdot e^{\frac{-t}{0{,}45}})$$

Для побудови задамося значеннями часу в проміжку від 0 до ∞ і знайдемо відповідні значення $X_{вих}$(t). Отримані значення зведемо в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Залежність $X_{вых}$ от t

t	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$x_{вых}$	0	0,1	0,33	0,42	0,48	0,49	0,51	0,51	0,5

За значеннями з таблиці 4.2 побудуємо графік розгінної характеристики органу регулювання.

За розгінної характеристиці визначаються параметри об'єкта:

1) Ступінь (коефіцієнт самовирівнювання):

$$\rho = \frac{1}{K} = \frac{1}{0,3} = 3,33 \qquad (4.4)$$

2) Час запізнювання:

$$\tau = 0,13 \text{ с.}$$

3) Швидкість розгону:

$$\varepsilon = \frac{X_{вых}}{X_{вх} \cdot T_1} = \frac{0,51}{1,7 \cdot 0,45} = 0,667 \qquad (4.5)$$

На рисунку 4.3 зображено графік розгінної характеристики ОК.

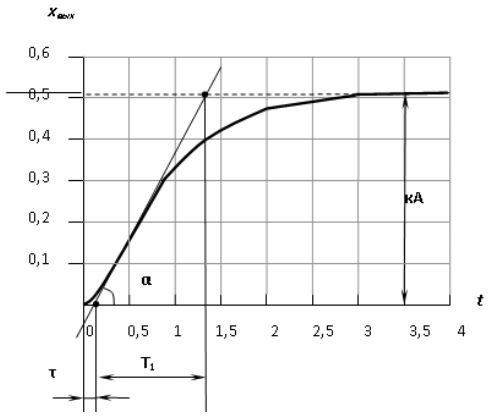


Рисунок 4.3 – Розгонна характеристика ОК.

Залежно від форми розгінної характеристики все ЗР діляться на:

– об'єкти з самовирівнюванням;

– об'єкти без самовирівнювання.

Самовирівнювання – це властивість об'єкта після виникнення віз–мущенія знову приходити в стан рівноваги без зовнішнього втручання.

По виду графіка розгінної характеристики можна зробити висновок, що САК є системою з самовирівнюванням.

Побудова перехідного процесу САК з регулятором П – типу. Для визначення аналітичного виразу перехідної характеристики (ПХ) САК необхідно з рівняння об'єкта з урахуванням регулюючого віз–дії і закону регулювання, отримати диференціальне рівняння всієї системи.

Рівняння ЗР з урахуванням регулюючого впливу має такий вигляд:

$$T_1 \cdot \frac{d_{вых}(t)}{dt} + X_{вых}(t) = \varepsilon \cdot \left[X_{вх}(t) - X_p(t)\right] \qquad (4.6)$$

Рівняння П–регулятора:

$$\begin{cases} T_1 \cdot \frac{d_{вых}(t)}{dt} + X_{вых}(t) = \varepsilon \cdot \left[X_{вх}(t) - X_p(t)\right] \\ X_p(t) = K_p \cdot X_{вых}(t) \end{cases} \qquad (4.7)$$

Отримаємо диференціальне рівняння всієї системи. Перенесемо в ліву частину доданок з вихідної змінної і її похідної, а в праву – похідні із вхідними.

$$\frac{T}{\varepsilon_1} \cdot \frac{d^2 X_{вых}(t)}{dt^2} + \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{dX_{вых}(t)}{dt} + K_p \cdot \frac{dX_{вых}(t)}{dt} = \frac{dX_p(t)}{dt} \qquad (4.10)$$

При вхідному одиничному східчастому вплив для t> 0 швидкість його зміни буде дорівнює нулю, тобто:

$$\frac{d_{вых}(t)}{dt} = 0$$

Тому рівняння (3.10) перетвориться в однорідне диференціювання ально рівняння:

$$\frac{T}{\varepsilon_1} \cdot \frac{d^2 X_{вых}(t)}{dt^2} + \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{dX_{вых}(t)}{dt} + K_p \cdot \frac{dX_{вых}(t)}{dt} = 0 \qquad (4.11)$$

Запишемо рівняння (3.11) в операторної формі:

$$\frac{T}{\varepsilon_1} \cdot S^2 \cdot X_{вых}(S) + \frac{1}{\varepsilon} \cdot S \cdot X_{вых}(S) + K_p \cdot S^2 \cdot X_{вых}(S) = 0$$

Таким чином, отримали коріння характеристичного рівняння:

$$S_1 = 0$$

$$S_2 = -3{,}13$$

Загальне рішення диференціального рівняння матиме наступний вигляд:

$$X_{вых}(t) = C_1 + C_2 \cdot e^{-3,13} \qquad (4.13)$$

Для визначення С1 і С2 вибираємо початкове умова t = 0:

$$\begin{cases} C_1 = -0{,}36 \\ C_2 = 0{,}36 \end{cases}$$

Таким чином, отримуємо:

$$X_{вых}(t) = 0{,}36 - 0{,}36 \cdot e^{-3,13t} \qquad (4.14)$$

Переймаючись значеннями часу t від 0 до ∞ побудуємо графік перехідного процесу САК з регулятором П–типу.

Отримані значення зведемо в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Залежність $X_{вых}$ від t

t	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$x_{вых}$	0	0,257	0,347	0,35	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36

Графік перехідного процесу САК з регулятором П – типу зображений на рисунку 3.4.

Подальші побудови перехідних процесів САК з різними законами регулювання будуть проводитися аналогічним способом.

Побудова перехідного процесу САК з регулятором І – типу.

Рівняння ЗР з урахуванням регулюючого впливу (4.6):

$$T_1 \cdot \frac{d_{вых}(t)}{dt} + X_{вых}(t) = \varepsilon \cdot \left[X_{вх}(t) - X_p(t)\right]$$

Рівняння І– регулятора:

$$\begin{cases} T_1 \cdot \dfrac{d_{вых}(t)}{dt} + X_{вых}(t) = \varepsilon \cdot \left[X_{вх}(t) - X_p(t)\right] \\ X_p(t) = \dfrac{K_p}{T_u} \cdot \int_0^{\infty} X_{вых}(t)dt \end{cases} \qquad (4.15)$$

Далі продифференцируем обидва рівняння:

$$\frac{T_1}{\varepsilon} \cdot \frac{d^2 X_{вых}(t)}{dt^2} + \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{dX_{вых}(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_u} X_{вых}x(t) = 0 \qquad (4.16)$$

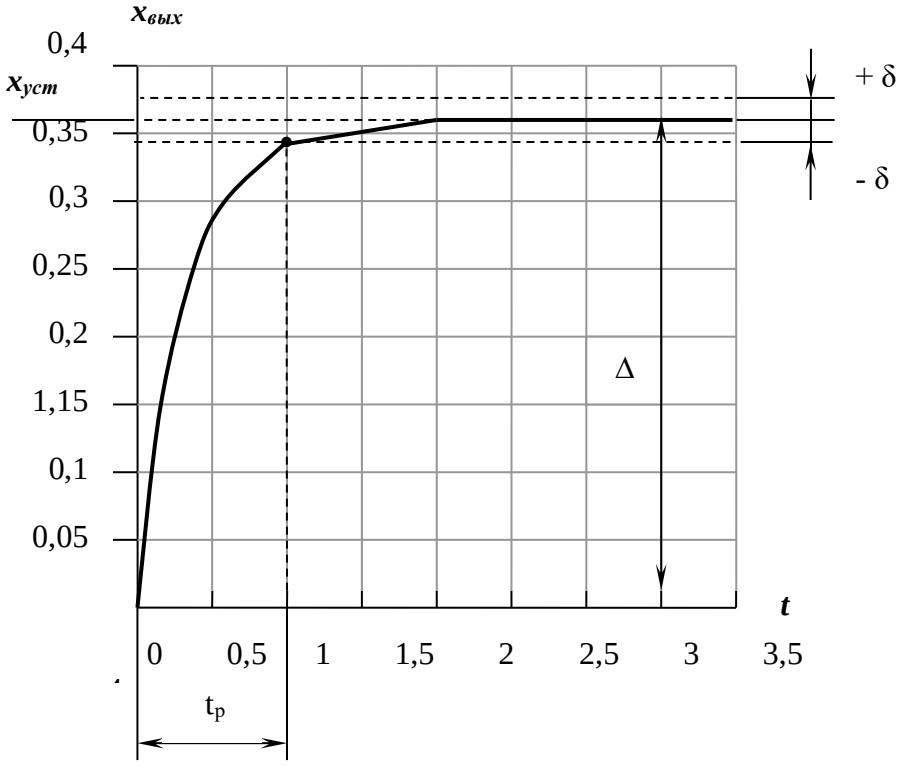


Рисунок 4.4 – Графік перехідного процесу САК с регулятором П –типу.

Запишемо рівняння (4.16) в нормалізувати формі, помноживши кожне його доданок на $\frac{T_u}{K_p}$:

$$\frac{T_1}{\varepsilon}\cdot\frac{T_u}{K_p}\cdot S^2\cdot X_{вых}(t)+\frac{T_u}{\varepsilon\cdot K_p}S\cdot X_{вых}(t)+X_{вых}(S)=0$$

Тоді характеристичне рівняння всієї системи матиме такий вигляд:

$$\frac{T_1}{\varepsilon}\cdot\frac{T_u}{K_p}\cdot S^2\cdot+\frac{T_u}{\varepsilon\cdot K_p}S+1=0 \qquad (4.17)$$

$$0{,}45\ S^2+S+1=0$$

Знайдемо коріння характеристичного рівняння:

$$Д=1-4\cdot 0{,}45\cdot 1=-0{,}8$$

Так як дискримінант від'ємний, то коріння будуть комплексними числами:

$$S_{1(2)}=-1{,}1-j\ 0{,}9938$$

Для визначення С1 і С2 вибираємо початкове умова t = 0:

$$\begin{cases} C_2=0 \\ C_1=1{,}141 \end{cases}$$

Таким чином, отримуємо:

$$X_{вых}=e^{-1{,}1\,t}\ (1{,}141\cdot Sin(0{,}9938t)) \qquad (4.19)$$

Переймаючись значеннями часу t від 0 до ∞ побудуємо графік перехідного процесу САК з регулятором I – типу.

Отримані значення зведемо в таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 – Зависимость $X_{вых}$ от t

t	0	0,8	2	4	6	8	10
$x_{вых}$	0	0,34	0,11	–0,001	0	0	0

Графік перехідного процесу САК з регулятором І – типу зображений на рисунку 4.5.

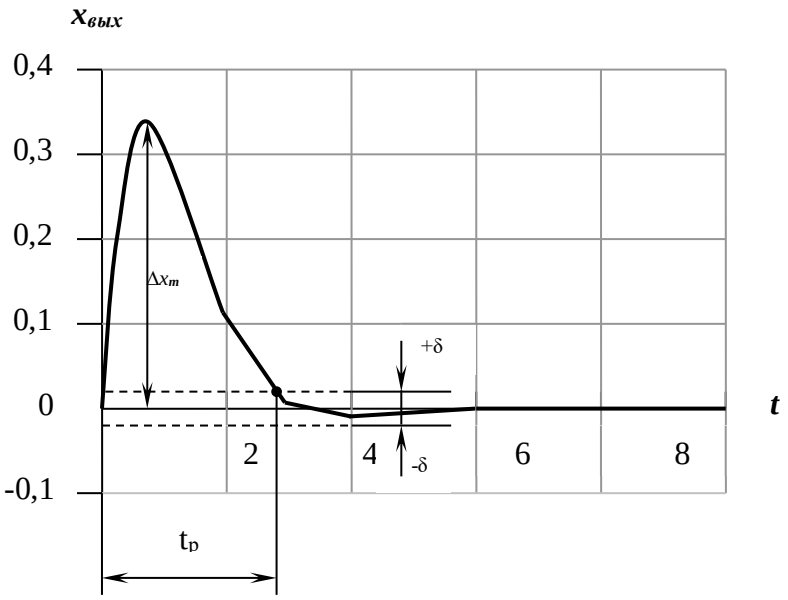


Рисунок 4.5 – Графік перехідного процесу САК с регулятором І–типу.

Побудова перехідного процесу САК з регулятором ПІ – типу.

Рівняння ЗР з урахуванням регулюючого впливу (4.6):

$$T_1 \cdot \frac{d_{вых}(t)}{dt} + X_{вых}(t) = \varepsilon \cdot \left[X_{вх}(t) - X_p(t)\right]$$

Рівняння ПІ – регулятора:

$$\begin{cases} T_1 \cdot \dfrac{d_{вых}(t)}{dt} + X_{вых}(t) = \varepsilon \cdot \left[X_{вх}(t) - X_p(t)\right] \\ X_p(t) = K_p \cdot X_{вых}(t) + \dfrac{K_p}{T_u} \cdot \int_0^{\infty} X_{вых}(t)dt \end{cases} \qquad (4.20)$$

Тоді характеристичне рівняння всієї системи матиме такий вигляд:

$$\frac{T_1}{\varepsilon} \cdot \frac{T_u}{K_p} \cdot S^2 + \frac{T_u}{\varepsilon \cdot K_p} \cdot S + T_u \cdot S + 1 = 0 \qquad (4.21)$$

Таким чином, отримали коріння характеристичного рівняння:

$S_1 = -2{,}75;$

$S_2 = -0{,}81.$

Загальне рішення диференціального рівняння матиме дотримуюся щий вид:

$$X_{вых}(t) = C_1 \cdot e^{-2,75\,t} + C_2\, e^{-0,81t} \qquad (4.22)$$

Для визначення С1 і С2 вибираємо початкове умова t = 0:

$$\begin{cases} C_1 = -0,58 \\ C_2 = 0,36 \end{cases}$$

Таким чином, отримуємо:

$$X_{вых}(t) = -0,58 \cdot e^{-2,75t} + 0,58 \cdot e^{-0,81t} \qquad (4.23)$$

Переймаючись значеннями часу t від 0 до ∞ побудуємо графік перехідного процесу САК з регулятором ПІ – типу.

Отримані значення зведемо в таблицю 4.5.

Таблиця 4.5 – Залежність $X_{вых}$ от t.

t	0	0,8	2	4	6	8	10
$x_{вых}$	0	0,245	0,115	0,02	0,009	0	0

График переходного процесса САК с регулятором ПИ – типа изображён на рисунке 4.6.

Побудова перехідного процесу САК з регулятором ПД – типу.

Рівняння ЗР з урахуванням регулюючого впливу (4.6):

$$T_1 \cdot \frac{d_{вых}(t)}{dt} + X_{вых}(t) = \varepsilon \cdot \left[X_{вх}(t) - X_p(t)\right]$$

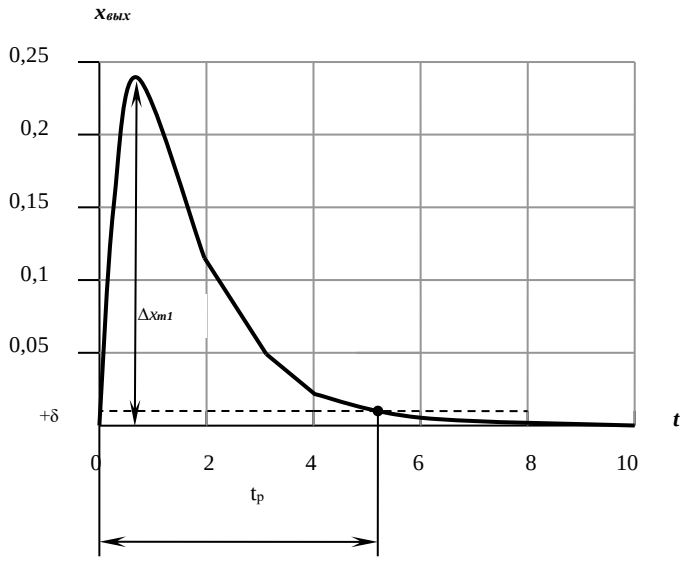


Рисунок 4.6 – Графік перехідного процесу САК з регулятором ПІ – типу.

Рівняння ПД – регулятора:

$$\begin{cases} T_1 \cdot \dfrac{d_{вых}(t)}{dt} + X_{вых}(t) = \varepsilon \cdot \left[X_{вх}(t) - X_p(t)\right] \\ X_p(t) = K_p \cdot X_{вых}(t) + K_p \cdot \dfrac{T_{пр} dX_{вых}(t)}{dt} \end{cases} \quad (4.24)$$

Отримали коріння характеристичного рівняння:

$$S_1 = 0;$$

$$S_2 = -0{,}28$$

Загальне рішення диференціального рівняння матиме такий вигляд:

$$X_{вых}(t) = C_1 + C_2 \, e^{-0{,}28\,t} \quad (4.27)$$

Знайдемо значення постійних інтегрування C_1 і C_2:

$$\begin{cases} X_{вых}(t) = 0 \\ \dfrac{dX_{вых}(t)}{dt} = \varepsilon \cdot X_{вых}(t) = \varepsilon \cdot A \end{cases}$$

Для визначення С1 і С2 вибираємо початкове умова t = 0

$$\begin{cases} C_1 = -4{,}05 \\ C_2 = 4{,}05 \end{cases}$$

Таким чином, отримуємо:

$$X_{вых}(t) = 4{,}05 - 4{,}05 \cdot e^{-0{,}28t} \qquad (4.28)$$

Переймаючись значеннями часу t від 0 до ∞ побудуємо графік перехідного процесу САК з регулятором ПД – типу.

Отримані значення зведемо в таблицю 4.6.

Таблиця 4.6 – Залежність $X_{вых}$ від t

t	0	2,5	5	10	15	20
$x_{вых}$	0	2	3	3,025	3,8	4,1

Графік перехідного процесу САК з регулятором ПД – типу зображений на рисунку 3.7.

Побудова перехідного процесу САК з регулятором ПІД – типу.

Рівняння ЗР з урахуванням регулюючого впливу (4.6):

$$T_1 \cdot \frac{d_{вых}(t)}{dt} + X_{вых}(t) = \varepsilon \cdot \left[X_{вх}(t) - X_p(t)\right]$$

Рівняння ПІД – регулятора:

$$X_p(t) = K_p \cdot X_{вых}(t) + \frac{K_p}{T_u} \cdot \int_0^{\infty} X_{вых}(t)dt + K_p \cdot T_{пр} \cdot \frac{dX_{вых}(t)}{dt} \qquad (4.29)$$

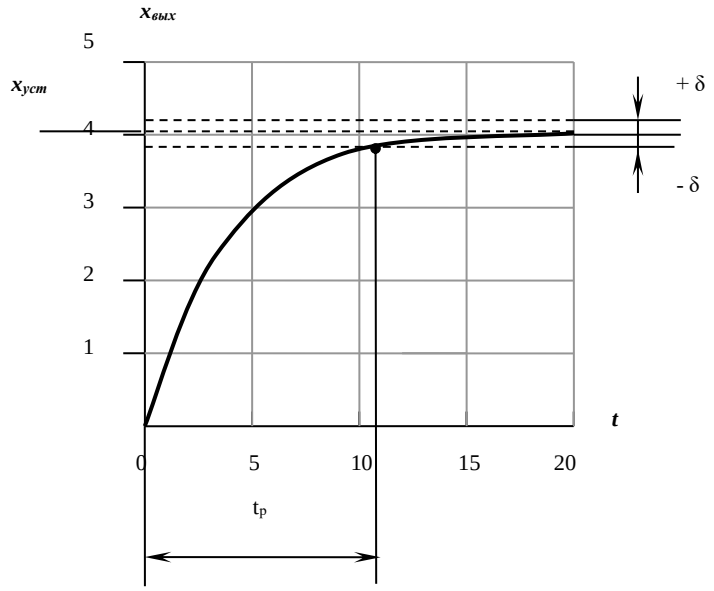


Рисунок 4.7 – Графік перехідного процесу САК з регулятором ПД – типу.

Запишемо рівняння (4.30) в нормалізувати формі, помноживши кожне його доданок на $\frac{T_и}{K_р}$:

$$4{,}76\ S^2 + 1{,}4\ S + 1 = 0$$

Знайдемо коріння характеристичного рівняння:

$$Д = 1{,}4^2 - 4 \cdot 4{,}76 = -17{,}08.$$

Для визначення С1 і С2 вибираємо початкове умова t = 0:

$$\begin{cases} C_1 = 2{,}56 \\ C_2 = 0 \end{cases}$$

Таким чином, отримуємо:

$$X_{вых} = e^{-0{,}15\ t}\ (0{,}256 \cdot Sin\,(0{,}434t)) \qquad (4.33)$$

Переймаючись значеннями часу t від 0 до ∞ побудуємо графік перехідного процесу САК з регулятором ПІД – типу.

Отримані значення зведемо в таблицю 4.7.

Таблиця 4.7 –Зависимость $X_{вых}$ від t

t	0	1,5	2	4	6	8	10
$x_{вых}$	0	0,67	0,62	0,24	0,13	0	0

Графік перехідного процесу САК з регулятором ПІД – типу зображений на рисунку 4.8.

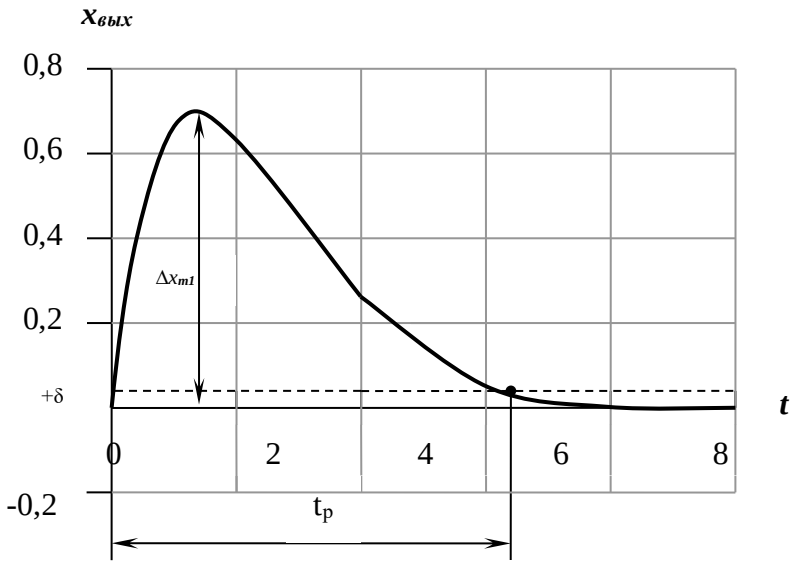


Рисунок 4.8 – Графік перехідного процесу САК з регулятором ПІД – типу.

4.1.7 Розрахунок показників якості перехідних процесів САК і порівняльна оцінка різних законів регулювання

Розрахунок показників якості перехідних процесів САК.

Якість САУ визначають показниками якості – це величини, що характеризують поведінку системи в перехідних процесах.

Визначимо прямі показники якості.

1. Для САК с регулятором П – типа.

1) Даний регулятор є статичним.

2) Час регулювання (t_p) визначається проміжком часу від початку ПХ до того моменту, коли регульована величина буде відрізнятися від свого сталого значення (Хуст) менше, ніж на деяку задану величину δ.

$X_{уст} = 0,36$

$\delta = \pm 0,05 \cdot X_{уст} = \pm 0,05 \cdot 0,36 = \pm 0,02$, тоді $t_р = 1$ с.

3) Перерегулювання (σ) – це величина максимального динамічного відхилення, визначається максимальним відхиленням регульованої ве–личини $\Delta X_{м1}$ від $X_{уст}$.

$\Delta X_{м1} = 0$, тогда $\sigma = 0$

4) Встановлена помилка (Δ) – це відхилення фактичного значення регульованої величини від заданого значення.

$\Delta = 0,36$

Коливальність (n) – характеризується числом коливань вихідної величини за час ПХ.

$n = 0$

2. Для САК з регулятором І – типа.

1) Данний регулятор є астатичним.

2) Час регулювання:

$\Delta X_{м1} = 0,34$

$\delta = \pm 0,05 \cdot \Delta X_{м1} = \pm 0,05 \cdot 0,34 = \pm 0,02$, тоді $t_р = 3$ с.

3) Колебательность n = 0,5

3. Для САК с регулятором ПІ – типа.

1) Данний регулятор є астатичним.

2) Час регулювання:

$\Delta X_{м1} = 0,245$

$\delta = \pm 0,05 \cdot \Delta X_{м1} = \pm 0,05 \cdot 0,245 = \pm 0,012$, тоді $t_р = 5,3$ с

3) Колебательность n = 0,5

4. Для САК з регулятором ПД – типа.

1) Данний регулятор є статичним.

2) Час регулювання:

$X_{уст} = 4,1$

$\delta = \pm 0,05 \cdot X_{уст} = \pm 0,05 \cdot 4,1 = \pm 0,2$, тоді $t_р = 11$ с

3) Перерегулювання:

$\Delta X_{м1} = 0$, тогда $\sigma = 0$

4) Встановлена помилка $\Delta = 4,1$

5) Коливальність $n = 0$.

5. Для САК с регулятором ПІД – типа.

1) Данний регулятор є астатичним.

2) Час регулювання:

$\Delta X_{м1} = 0,67$

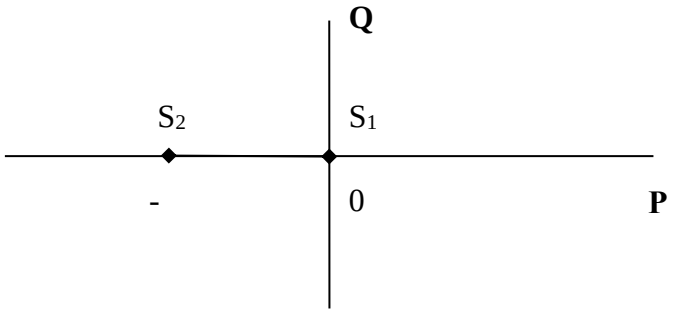
$\delta = \pm 0,05 \cdot \Delta X_{м1} = \pm 0,05 \cdot 0,67 = 0,03$, тоді $t_р = 6,5$ с

3) Колебательність $n = 0,5$.

Визначимо непрямі показники якості.

1. Для САК з регулятором П – типу.

На рисунку 4.9 зображені коріння характеристичного рівняння САК з регулятором П – типу (4.12) на комплексній площині.



Рисуноку 4.9 – Зображення коренів характеристичного рівняння САК з регулятором П – типу на комплексній площині.

Таким чином, для САК з регулятором П – типу непрямі показники:

1) ступінь стійкості $h = 0$;

2) ступінь колебательности $\mu = 0$.

2) Для САК з регулятором І – типу.

На рисунку 4.10 зображені коріння характеристичного рівняння САК з регулятором І – типу (4.17) на комплексній площині.

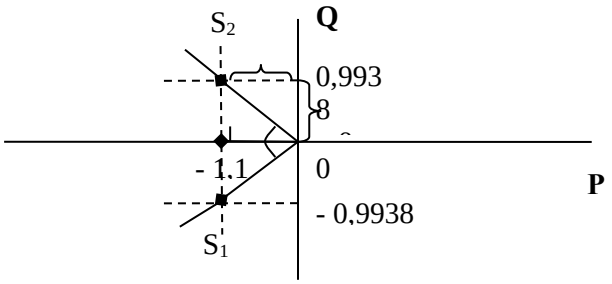
1) ступінь стійкості $h = 1,1$;

2) ступінь колебательности $\mu = tg\ \varphi / 2 = \beta 1 / \alpha 1 = 0,9938 / 1,1 = 0,9$.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що дана САК з регулятором І – типу стійка.

Для САК з регулятором ПІ – типу.

На рисунку 4.11 зображені коріння характеристичного рівняння САК з регулятором ПІ – типу (4.21) на комплексній площині.



Рисунку 4.10 – Зображення коренів характеристичного рівняння САК з регулятором І – типу на комплексній площині.

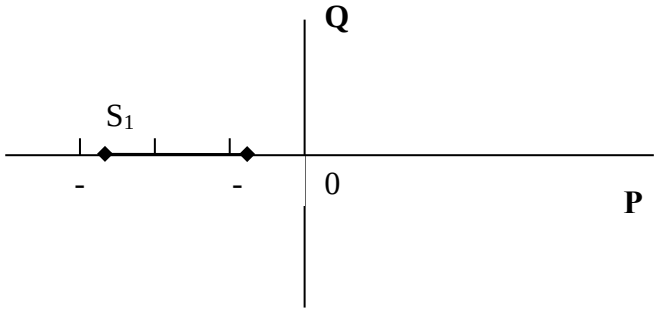


Рисунок 4.11 – Зображення коренів характеристичного рівняння САК з ре– регулятора ПІ – типу на комплексній площині.

1) ступінь стійкості h = 0,81;

2) ступінь колебательности μ = 0.

Таким чином, можна зробити висновок – дана САК з регулятором ПІ – типу стійка.

3. Для САК з регулятором ПД – типу.

На рисунку 4.12 зображені коріння характеристичного рівняння САК з регулятором ПД – типу (4.26) на комплексній площині.

1) ступінь стійкості h = 0;

2) ступінь колебательности $\mu = 0$.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що дана САК з регулятором ПД – типу перебувати на кордоні стійкості.

4. Для САК з регулятором ПІД – типу.

На рисуноку 4.13 зображені коріння характеристичного рівняння САК з регулятором ПИД – типу (4.31) на комплексній площині.

1) ступінь стійкості $h = 0,15$;

2) ступінь колебательности $\mu = tg\ \varphi / 2 = \beta 1 / \alpha 1 = 0,434 / 0,15 = 2,89$.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що дана САК з регулятором ПІД – типу стійка.

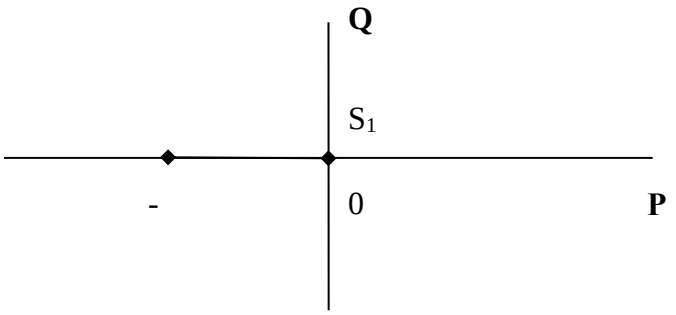


Рисунок 4.12 – Зображення коренів характеристичного рівняння САК з регуляторної–тором ПД – типу на комплексній площині.

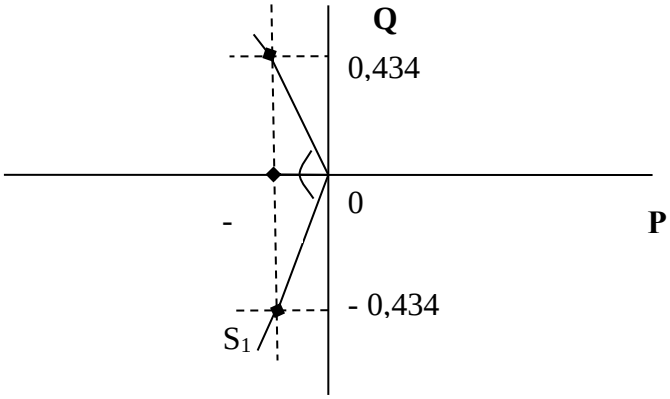


Рисунок 4.13 – Зображення коренів характеристичного рівняння САК з регулятором ПІД – типу на комплексній площині.

Порівняльна оцінка різних законів регулювання. Зробимо порівняльну оцінку САК з різними типами регуляторів за показниками якості. Для цього

побудуємо графіки перехідних процесів САК з різними типами регуляторів в одній системі координат.

Графіки перехідних процесів САК з різними типами регуляторів показані на малюнках 4.14 і 4.15.

На рисунку 4.14 показані перехідні процеси САК з астатичними регуляторами, а на рисунку 4.15 зі статичними регуляторами.

За отриманими значеннями показників якості і зображеним графіками можна судити про те, що найоптимальнішими показниками якості мають регулятор ПІ – типу і І – типу з астатичних і регулятор П – типу з статичних. Це підтверджується тим, що дані регулятор найменші значення часу регулювання (у регулятора ПІ – типу $t_р$ = 5,3 с і І – типу $t_р$ = 3 с; у регулятора П – типу $t_р$ = 1с).

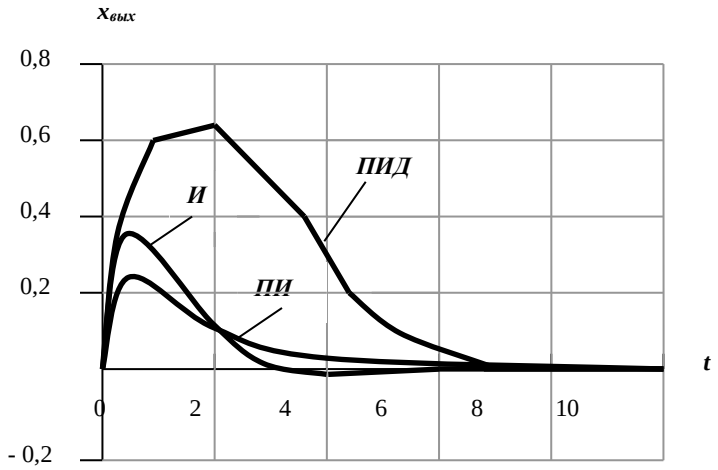


Рисунок 4.14 – Графіки перехідних процесів САК з регуляторами І –, ПІ – і ПІД – типів.

Однак в порівнянні з іншими астатичними регуляторами, регулятор ПІ – типу має найбільш вдалими співвідношеннями часу регулювання і максимального відхилення регульованої величини. Ступінь стійкості h = 0,81 за чисельним значенням знаходиться в проміжку між значеннями ступенів стійкості регуляторів І – і ПІД – типів (у регулятора І – типу h = 1,1, у регулятора ПІД – типу h = 0,15), тому можна вважати, що регулятор ПІ – типу має дуже високу ступенем стійкості.

Серед статичних регуляторів можна виділити регулятор П – типу, так як його статична помилка і час регулювання в кілька разів менше ніж у регулятора ПД – типу (у регулятора П – типу $\Delta = 0{,}36$, $t_р = 7{,}56$, у регулятора ПД – типу $\Delta = 4{,}1$, $t_р = 11$ с).

Таким чином, зробивши порівняльну оцінку за всіма показниками, можна зробити висновок, що найоптимальнішими регуляторами (з наилуч–шими показниками якості) є регулятори П – і ПІ – типів.

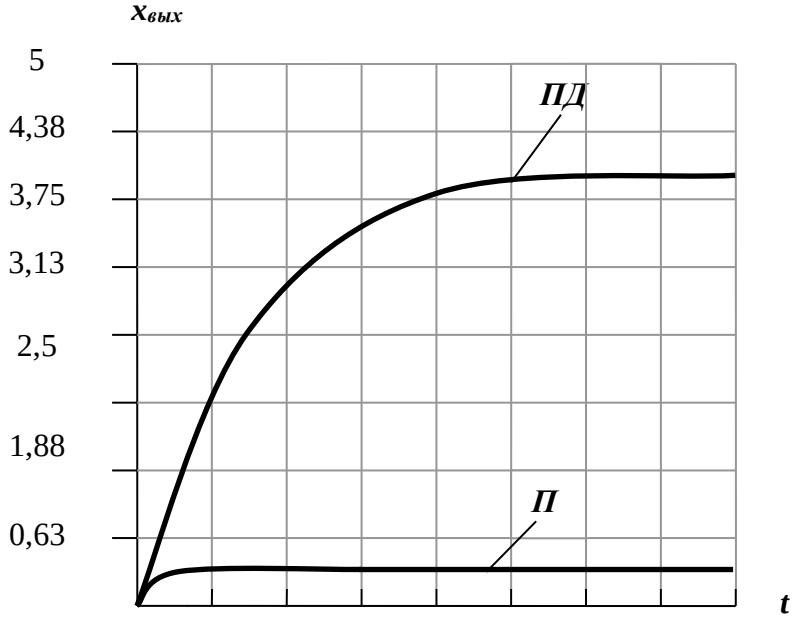


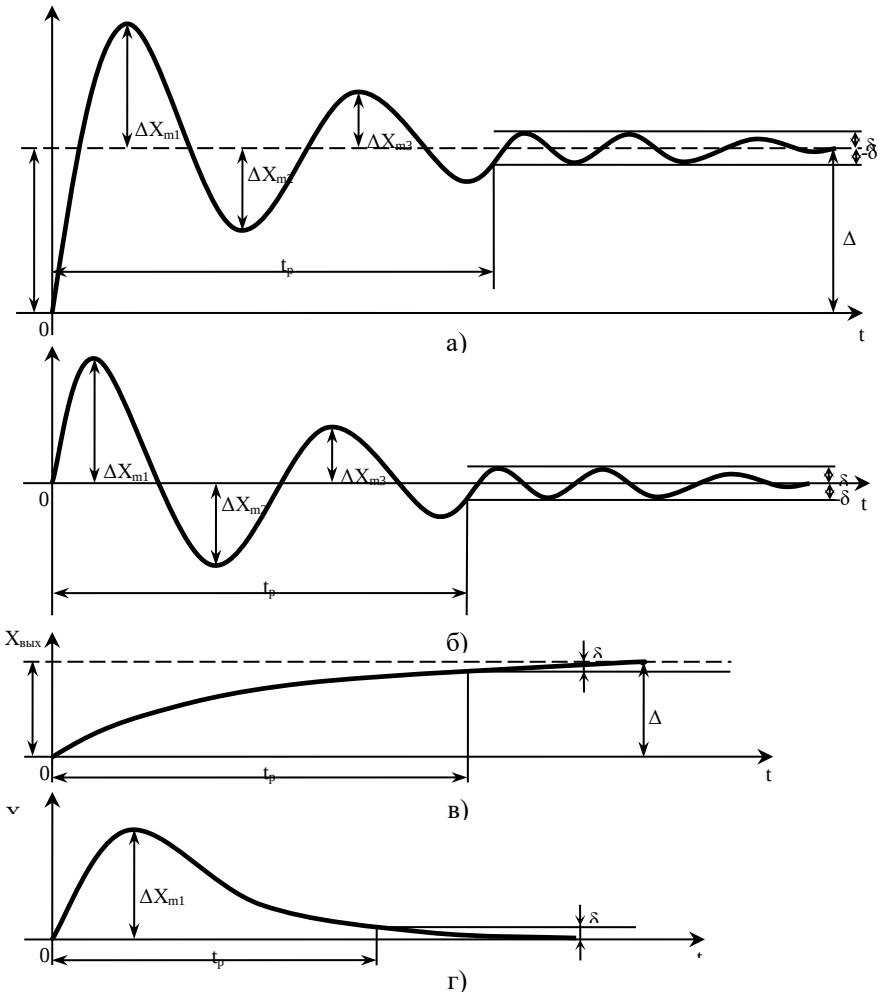
Рисунок 4.15 – Графіки перехідних процесів САК з регуляторами ПД – і П – типів

4.1.8 Розрахунок параметрів настроювання автоматичних регуляторів

Прямі показники якості визначаються безпосередньо по кривої перехідного процесу САК. Типові графіки зміни регульованої величини для одиничного ступеневої вхідного впливу і прямі показники якості представлені на рисунку 3.16. Характер загасання перехідного процесу стійкої САК залежить від виду коренів характеристичного рівняння. Якщо все коріння рівняння речові і негативні, то загасання процесу буде апериодическим (рисунок 4.16 в) і г)),

тобто регульована величина наближається до нового сталого значення тільки з одного боку. У разі, коли серед коренів характеристичного рівняння є пов'язані комплексні корені з негативною дійсною частиною, перехідний процес буде коливальним (рисунок 4.16 а) і б)).

Час регулювання t_p характеризує швидкодію системи і визначається проміжком часу від початку перехідного процесу до того моменту, коли регульована величина буде відрізнятися від свого сталого значення $X_{вых}^{уст}$ менше, ніж на деяку заздалегідь задану величину δ. Для статичного перехідного процесу величина δ звичайно приймається рівної 0,05 (5%) від $X_{вых}^{уст}$. Якщо $X_{вых}^{уст}$ (астатичний перехідний процес), то $\delta = 0{,}05 \cdot \Delta X_{m1}$, де ΔX_{m1} – максимальне відхилення (перший максимум) регульованої ве–личини від її сталого значення.



а) коливальний статичний; в) апериодический статичний;
б) коливальний астатичний; г) апериодический астатичний

Рисунок 4.16 – Типові графіки перехідних процесів.

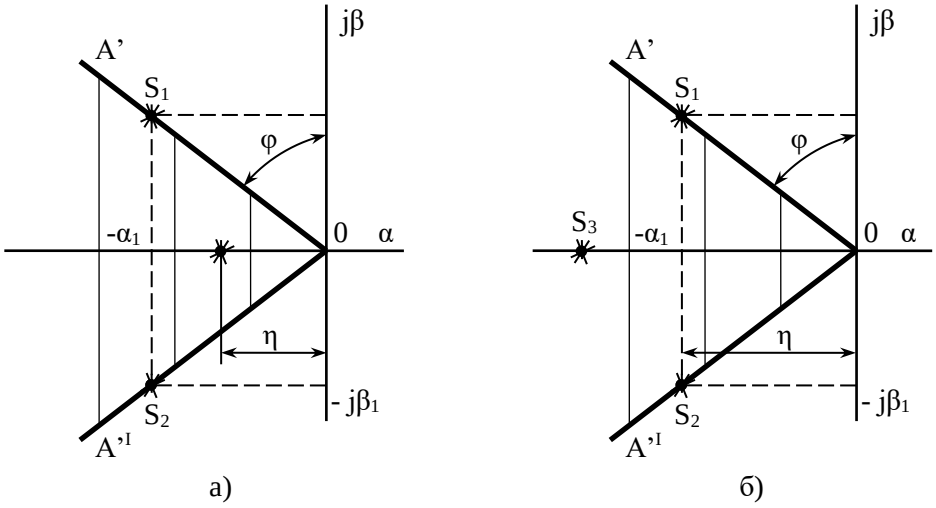
Величина ΔX_{m1} максимального відхилення регульованого параметра від його втановленного значення $X_{вых}^{уст}$ називається максимальним динамічним відхиленням або динамічної помилкою системи. Для статистичних коливальних перехідних процесів вводиться поняття перерегулирования а – максимальне відхилення регульованої величини від нового сталого значення, виражене у відсотках:

$$\sigma = \frac{\Delta X_{m1}}{X_{вых}^{уст}} \cdot 100\% \qquad (4.34)$$

Величина σ в САК не должна превышать 10% – 30%.

Колебательность характеризуется числом колебаний n выходной величины за время переходного процесса t_p Число колебаний не должно превышать 1,5–2.

Якщо найближчий до уявної осі корінь речовинний (рисунок 4.17 а)), то ступінь стійкості називається апериодической, якщо коріння когось комплексно (рисунок 4.17 б)) – коливальні.



а) б)

а) ближайший к мнимой оси вещественный корень S_3;

б) ближайшие к мнимой оси комплексные сопряженные корни $S_{1,2}$.

Рисунок 4.17 – Розташування коренів характеристичного рівняння САК на комплексній площині.

Из рисунка 4.17 видно, що $m = \frac{\alpha_1}{\beta_1} = tg\varphi$.

На рисунку 4.18 показана амплітудно–частотна характеристика замкнутої САК.

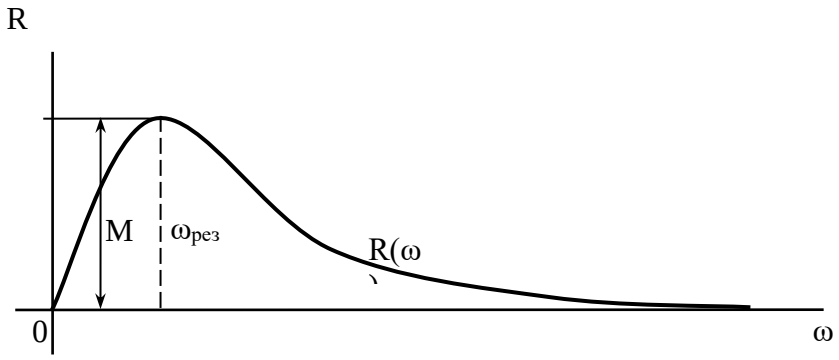


Рисунок 4.18 – Амплитудно–частотна характеристика замкнутої САК.

Досвід експлуатації САК показує, що для задовільної якості перехідного процесу системи показник колебательности М повинен знаходитися в діапазоні 1,3 – 2,4. Така величина М забезпечує ступінь загасання перехідного процесу ψ в межах 0,75 – 0,95.

На рисунке 4.19 зображена АФХ розімкнутої САК і «заборонена» зона.

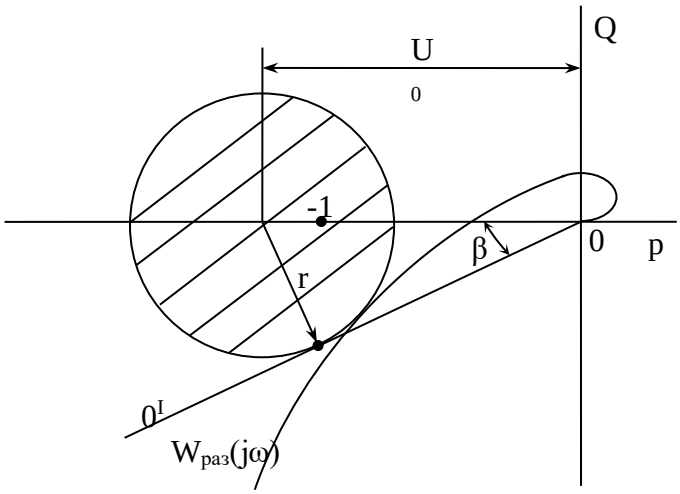


Рисунок 4.19 – АФХ розімкнутої САК і «заборонена» зона.

На рисунке 4.19 зображений граничний випадок, коли АФХ розімкнутої САР Wраз (jω) стосується «забороненою» області. При цьому коло, що обмежує

«заборонену» область, буде також стосуватися променя 00 ', проведеного з початку координат під кутом β до негативної речової піввісь.

$$\angle\beta = \arcsin\frac{r}{U_0} = \arcsin\frac{1}{M} \qquad (4.36)$$

Відповідно до цього критерію найменшої площі перехідного процесу. з двох налаштувань вважається найкращою та, при якій площа перехідного процесу (тобто площа, який знаходиться між графіком перехідного процесу і лінією нового визначеного значення регульованого параметра, заштрихованная на рисунку 4.20) має меншу величину. [20], [21]

Для НЕ коливального (апериодического) перехідного процесу (рисунок 4.20 а)), при якому знак відхилення регульованої величини залишається незмінним, використовується найбільш простий для обчислення лінійний інтегральний критерій.

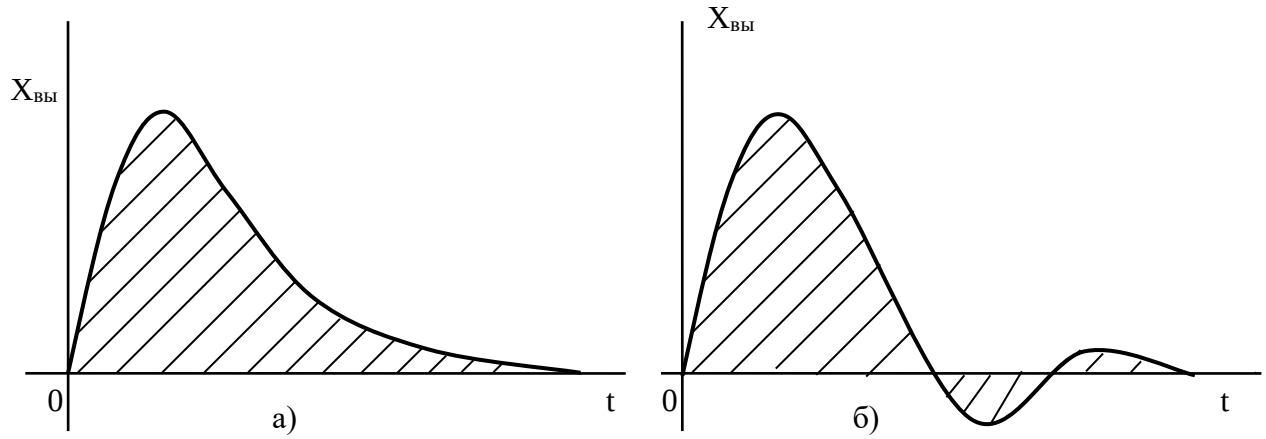


Рисунок 4.20 – Визначення площі перехідного процесу:
а) не коливальний (апериодический) процес; б) коливальний процес.

Розрахунок настройки П– регулятора.

Вираз АФХ розімкнутої системи з П–регулятором має вигляд:

$$W_{раз}(j\omega) = W_{об}(j\omega)\cdot W_р(j\omega) = W_{об}(j\omega)\cdot к_р \qquad (4.37)$$

При $к_р$ =1 АФХ розімкнутої системи збігається з АФХ об'єкта регулювання $W_{раз}(j\omega) = W_{об}(j\omega)$. [20], [21]

Порядок розрахунку настройки П – регулятора наступний:

1) За рівняння об'єкта регулювання будується АФХ об'єкта $W_{об}$ (jω).

2) З початку координат проводиться промінь ОО'под кутом

$\angle\beta = \arcsin\frac{r}{M} = \arcsin\frac{1}{1{,}62} = 38^0$ до негативної речової піввісь.

На рисунку 4.21 показаний розрахунок настройки САК з П – регулятором.

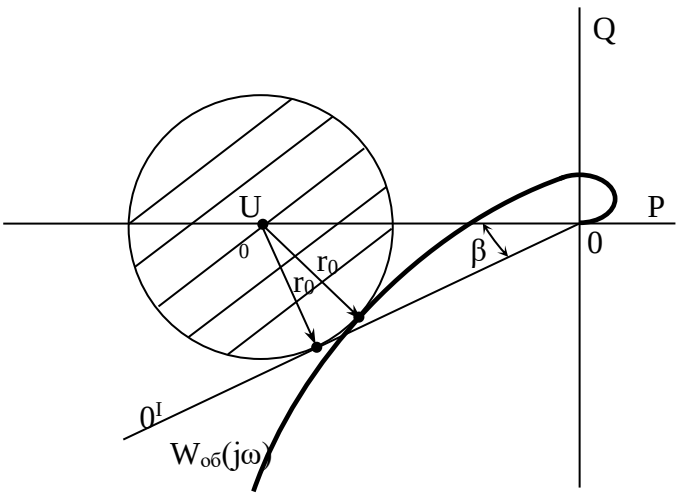


Рисунок 4.21 – Розрахунок налаштування САР з П – регулятором.

3) Підбирається окружність з центром на негативній речової напів–осі, що стосується одночасно АФХ об'єкта регулювання Wоб(jω) і променя ОО '. Визначається чисельне значення радіуса кола r_0.

4) Коло радіусом r_0 побудована для умови $К_р$ =1. Тому r_0 буде меньше необхідного по співвідношенню значення $r = \frac{M}{M^2 - 1} = 1$ в $К_р$ разів, тобто

$$r_0 = \frac{r}{k_p} = \frac{1}{k_p}.$$

Оптимальне значення коефіцієнта передачі П– регулятора визначається за формулою:

$$k_p = \frac{1}{r_0} \qquad (4.38)$$

Будуємо АФХ ЗР по заданому рівнянню (4.1):

$$T_1 \frac{dx_{вых}(t)}{dt} + x_{вых}(t) = k \cdot x_{вх}(t-\tau)$$

$$T_1 S \cdot X_{вых}(S) + x_{вых}(S) = k \cdot e^{-\tau \cdot s} \cdot x_{вых}(S) \qquad (4.39)$$

Для цього за рівнянням (4.39) необхідно визначити ПФ об'єкта $W_0(S)$

Заміняємо S = jω:

$$T_1 S \cdot X_{вых}(j\omega) + x_{вых}(j\omega) = k \cdot e^{-\tau \cdot s} \cdot x_{вых}(j\omega)$$

$$W_0(S) = \frac{k \cdot e^{-\tau \cdot s}}{T_1 S + 1} \qquad (4.40)$$

$$P = \frac{k \cdot (Cos\omega\tau - T_1\omega \cdot Sin\omega\tau)}{1 + T_1^2 \cdot \omega^2} = \frac{0{,}3 \cdot (Cos0{,}75 \cdot \omega - 0{,}45\omega \cdot Sin0{,}75\omega)}{1 + 0{,}45^2 \cdot \omega^2} \qquad (4.41)$$

$$Q = -\frac{k \cdot (Sin\omega\tau + T_1\omega\, Cos\omega\tau)}{1 + T_1^2 \cdot \omega^2} = -\frac{0{,}3 \cdot (Sin\,0{,}75 \cdot \omega - 0{,}45\omega \cdot Cos\,0{,}75\,\omega)}{1 + 0{,}45^2 \cdot \omega^2} \qquad (4.42)$$

Переймаючись значеннями ω від 0 до ∞, обчислимо значення P (ω) і Q (ω), які необхідні для побудови АФХ об'єкта регулювання. Отримані значення зведемо в таблицю 4.8.

Таблиця 4.8 – чисельні значення P(ω) и Q(ω)

ω	0	0,5	0,8	1	2	2,2	2,3	2,4	2,6	2,8	3	4	5
P	0,30	0,24	0,16	–0,11	–0,14	–0,16	–0,17	–0,17	–0,18	–0,18	–0,18	–0,08	0,02
Q	0	–0,16	–0,23	–0,25	–0,17	–0,14	–0,12	–0,1	–0,06	–0,02	0,007	0,12	0,12

Далі зробимо розрахунок настройки П – регулятора по порядку, викладеному на початку цього підпункту.

На рисунке 4.22 зображений графік настройки П – регулятора по АФХ об'єкта регулювання.

Визначаємо чисельне значення радіуса кола $r_0 = 0{,}29$ і оптимальне значення коефіцієнта передачі по формулі (4.38) $К_р^{опт} = 3{,}45$.

Розрахунок настройки І– регулятора. Вираз АФХ розімкнутої САК з І – регулятором має вигляд:

$$W_{раз}(j\omega) = W_{об}(j\omega) \cdot W_р(j\omega) = W_{об}(j\omega) \cdot \frac{\varepsilon_р}{j\omega} \qquad (4.43)$$

Тому що $\varepsilon_р = \frac{k_р}{T_и}, W_{раз}(j\omega) = \frac{k_р}{T_и \cdot \omega} \cdot W_{об}(j\omega) \cdot e^{-j\frac{\pi}{2}}$

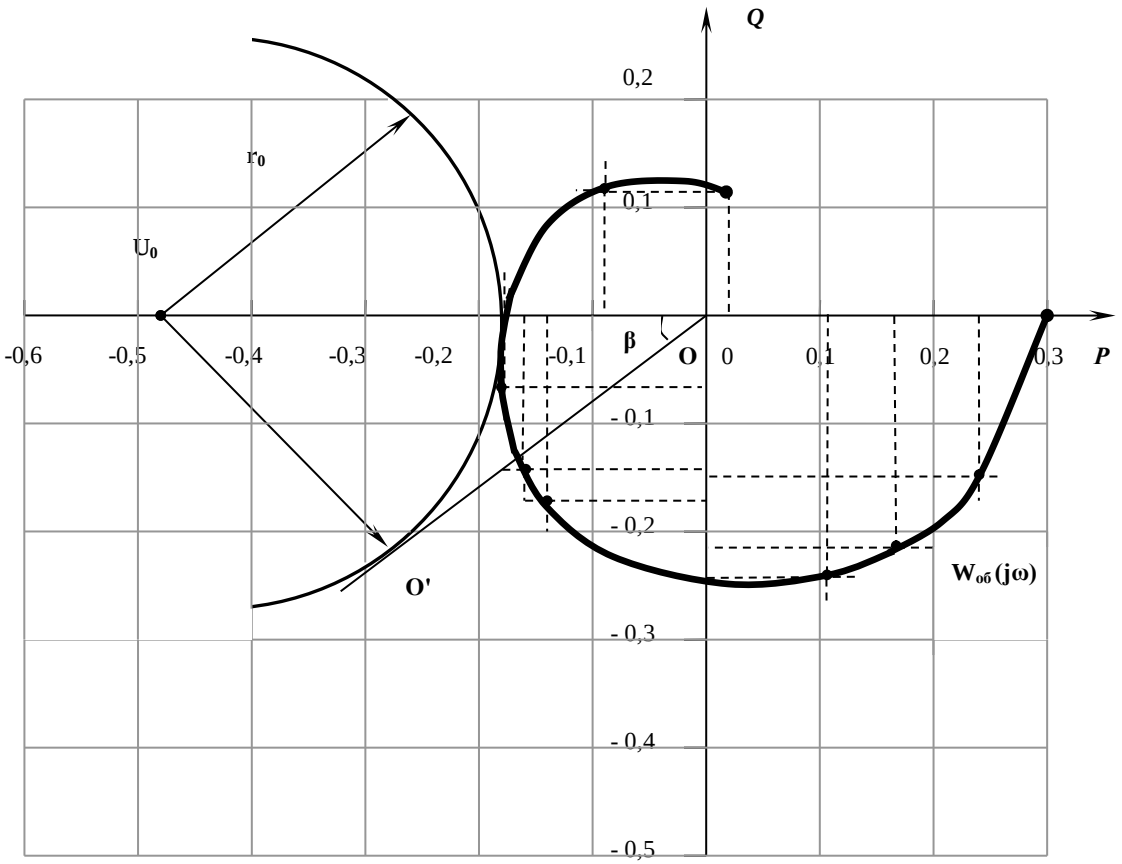


Рисунок 4.22 – Графік настройки П – регулятора по АФХ об'єкта регулювання.

Якщо $К_р = 1$, для побудови АФХ розімкнутої системи $W_{раз}(j\omega)$ необхідно кожен вектор АФХ об'єкта регулювання $W_{об}(j\omega)$ повернути на кут 90^0 за годинниковою стрілкою і зменшити його довжину в $Т_и \cdot \omega$ разів. [20], [21]

На рисунку 4.23 показаний розрахунок настройки САК І – регулятором.

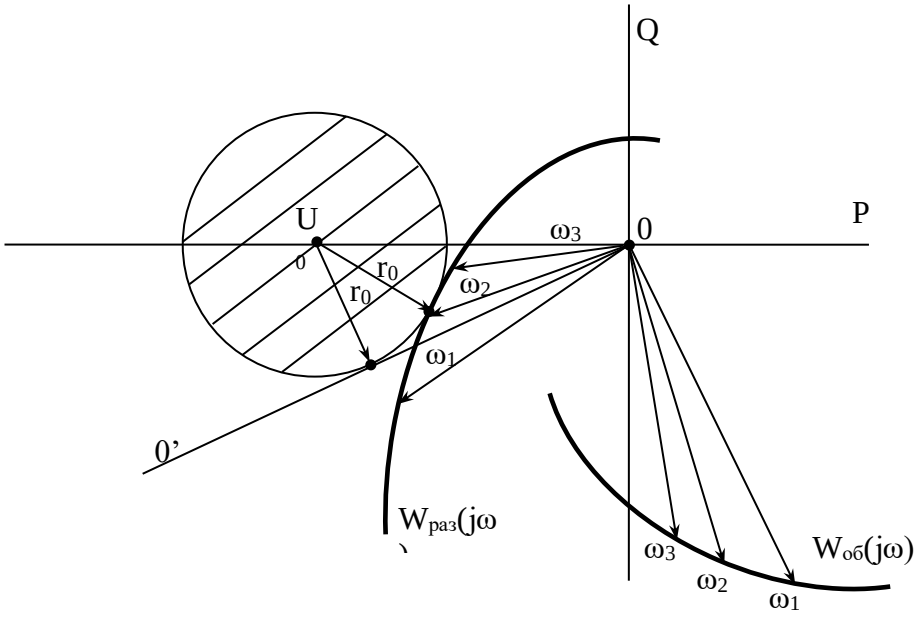


Рисунок 4.23 – Розрахунок настройки САК І – регулятором.

Згідно вище викладеного зробимо настройку І – регулятора.

$$\omega_1 = 0{,}5 \rightarrow l_{OA} = 0{,}29$$

$$\omega_2 = 0{,}8 \rightarrow l_{OB} = 0{,}28$$

$$\omega_3 = 1 \rightarrow l_{OC} = 0{,}27$$

$$T_и \cdot \omega_1 = 0{,}4 \cdot 0{,}5 = 0{,}2$$

$$T_и \cdot \omega_2 = 0{,}4 \cdot 0{,}8 = 0{,}32$$

$$T_и \cdot \omega_3 = 0{,}4 \cdot 1 = 0{,}4$$

$$l_{OA'} = l_{OA} / T_и \cdot \omega_1 = 1{,}45$$

$$l_{OB'} = l_{OB} / T_и \cdot \omega_2 = 0{,}875$$

$$l_{OC'} = l_{OC} / T_и \cdot \omega_3 = 0{,}675$$

На рисунку 4.24 зображений графік настройки І – регулятора по АФХ об'єкта регулювання.

Визначаємо чисельне значення радіуса кола $r_0 = 0{,}94$ і оптимальне значення коефіцієнта передачі по формулі (3.38) $К_р^{опт} = 1{,}06$.

Розрахунок настройки ПІ – регулятора.

Вираз АФХ розімкнутої САК з ПІ – регулятором має вигляд:

$$W_{раз} = W_{об}(j\omega) \cdot W_p(j\omega) = W_{об}(j\omega) \cdot \kappa_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_и \cdot j\omega}\right) \qquad (4.45)$$

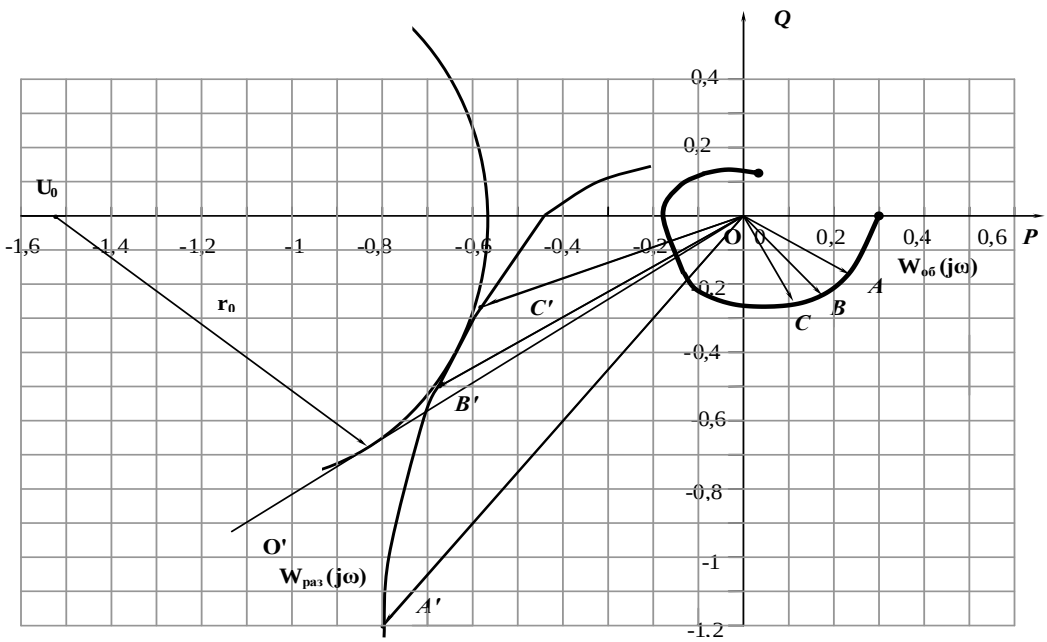


Рисунок 4.24 – Графік настройки І – регулятора по АФХ об'єкта регулювання.

Зробимо настройку ПІ – регулятора.

1) Будуємо АФХ об'єкта регулювання за даними наведеними в таблиці 3.8.

2) Обираємо п’ять крапок A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, відповідних частотам: $\omega_1 = 2$;

$\omega_2 = 2{,}3$; $\omega_3 = 2{,}4$; $\omega_4 = 2{,}6$; $\omega_5 = 2{,}8$.

Проводимо 5 векторів: $OA_1, OA_2 \ldots OA_5$. До кінців векторів проводимо перпендикуляри.

Задаємося п'ятьма значеннями часу ізодрома:

$T_{и1} = 0{,}2$, $T_{и2} = 0{,}5$, $T_{и3} = 0{,}8$, $T_{и4} = 1$, $T_{и5} = 1{,}5$.

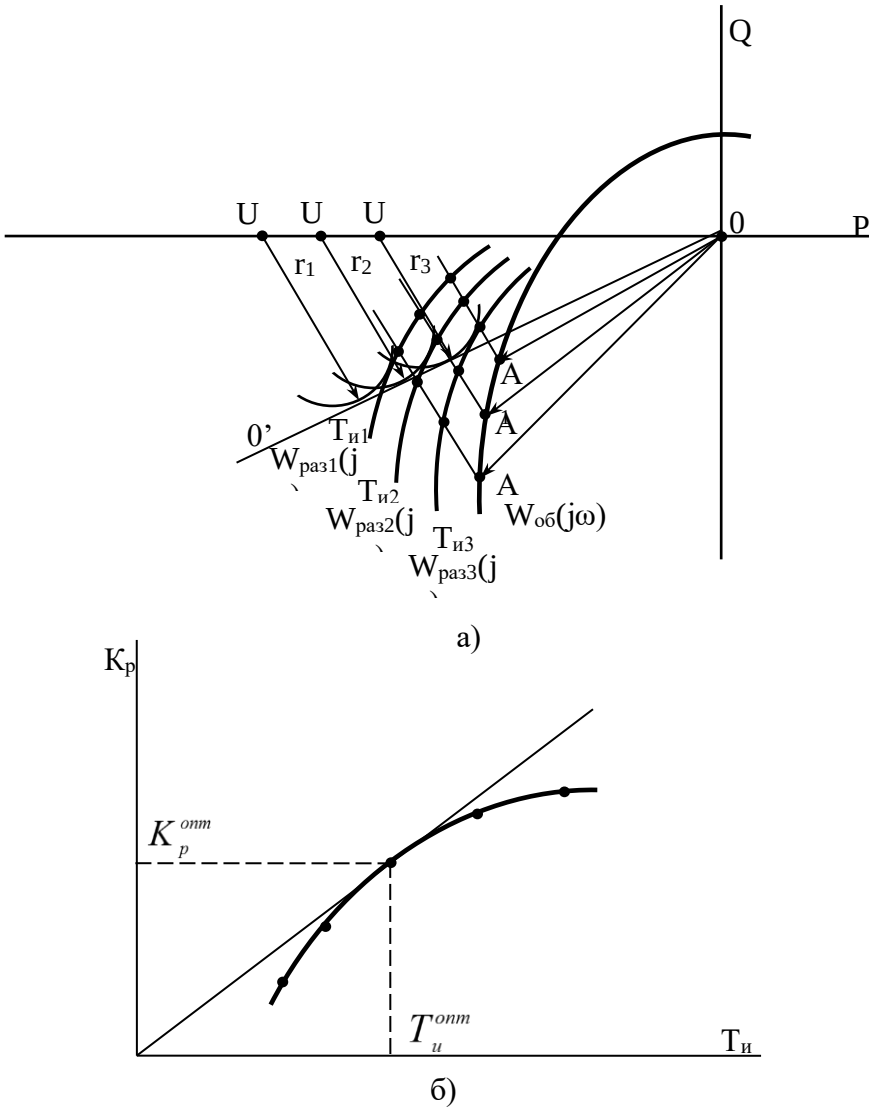


Рисунок 4.25 – Розрахунок настройки САК з ПІ–регулятором:

а) сімейство АФХ розімкнутої САК;

б) межа області стійкості САК

4) З початку координат проводимо промінь ОО' під кутом β = 38° до негативної речової піввісь.

Підбираємо і проводимо окружності з центрами на негативній речової піввісь $U_1(0,53; 0)$, $U_2(0,57; 0)$, $U_3(0,62; 0)$, $U_4(0,9; 0)$, $U_5(1,8; 0)$. Визначаємо чисельні значення радіусів окружності:

$r_1 = 0,32$; $r_2 = 0,34$; $r_3 = 0,39$; $r_4 = 0,56$; $r_5 = 1,1$.

5) В координатах ($T_и$, $K_р$) будуємо криву кордонів області стійкості системи $K_р = f(T_и)$.

По осі абсцис відкладаємо обрані значення часу ізодрома регулятора $T_{и1}$, $T_{и2}$, $T_{и3}$,..., а по осі ординат – відповідні коефіцієнтам передачі регулятора $K_{р1}$= 0,9; $K_{р2}$ = 1,9; $K_{р3}$ = 2,7; $K_{р4}$ = 2,9; $K_{р5}$ = 3,1, отримані точки з'єднуємо плавною кривою.

На рисунку 3.26 зображений графік настройки ПІ – регулятора по АФХ об'єкта регулювання.

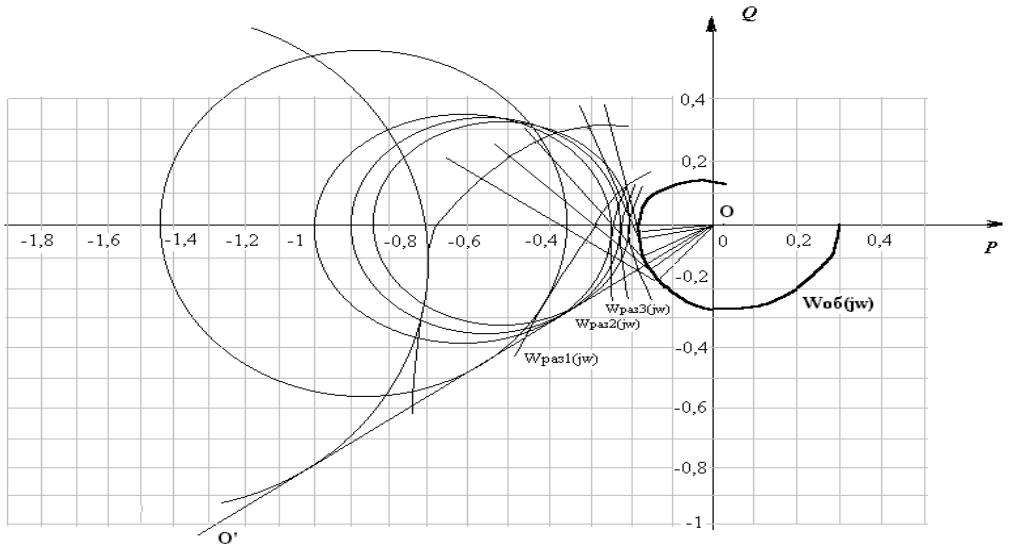


Рисунок 4.26 – Графік настройки ПІ – регулятора по АФХ об'єкта регулювання.

Крива кордонів області стійкості системи зображена на рисунку 4.27.

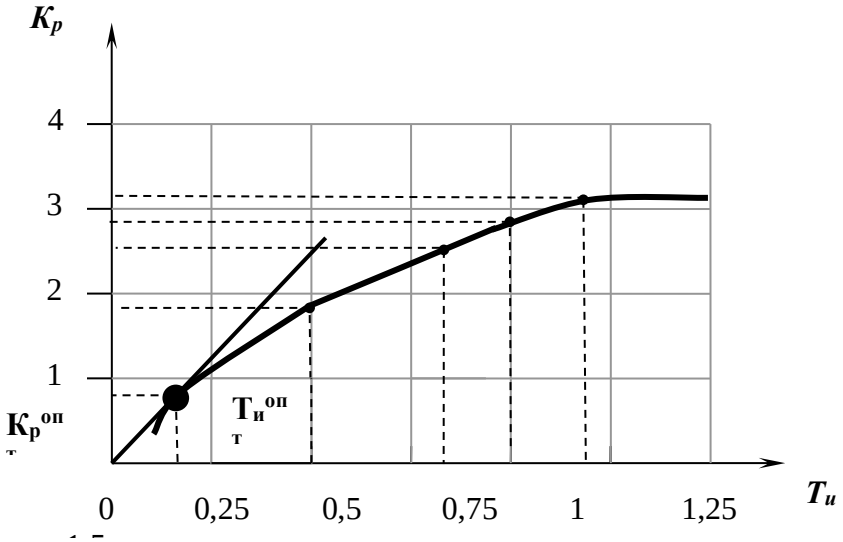


Рисунок 4.27 – Крива кордонів області стійкості системи.

6) З початку координат проводимо дотичну до кривої $К_р = f(Т_и)$.

Координати точки дотику (0,2; 0,9) визначають оптимальне значення параметрів настройки ПІ–регулятора.

Отже, отримаємо $К_р^{опт} = 0,9$; $Т_и^{опт} = 0,2$.

Побудова перехідної характеристики САК з регулятором П – типу. Для спрощення розрахунків використовуємо готове (традиційне) рівняння (3.12).

$$\frac{T}{\varepsilon_1} \cdot S^2 + \frac{1}{\varepsilon} \cdot S + K_p \cdot S^2 = 0$$

Замість заданого значення коефіцієнта передачі $К_р$ підставляємо значення $К_р^{опт} = 3,45$ яке отримали при розрахунку настройки П – регулятора.

$$0,67\ S^2 + 4,95\ S = 0 \qquad (4.46)$$

$$S \cdot (0,67S + 4,95) = 0$$

$$0,67\ S + 4,95 = 0$$

Таким чином, отримали коріння характеристичного рівняння:

$$S_1 = 0$$

$$S_2 = -\ 7,39$$

Загальне рішення диференціального рівняння матиме дотримуюся щий вид:

$$X_{вых}(t) = C_1 + C_2 \cdot e^{-7,39\,t} \qquad (4.47)$$

Знайдемо значення постійних інтегрування $С_1$ и $С_2$.

$$\begin{cases} X_{вых}(t) = 0 \\ \dfrac{dX_{вых}(t)}{dt} = \varepsilon \cdot X_{вых}(t) = \varepsilon \cdot A \end{cases}$$

Для визначення $С_1$ і $С_2$ вибираємо початкове умова t = 0

$$\begin{cases} C_2 = -\ 0,18 \\ C_1 = 0,18 \end{cases}$$

Таким чином, отримуємо:

$$X_{вых}(t) = 0{,}18 + 0{,}18 \cdot e^{-7{,}39\,t} \qquad (3.48)$$

Переймаючись значеннями часу t від 0 до ∞ побудуємо графік перехідного процесу САК з регулятором П – типу з оптимальними параметрами налаштування.

Отримані значення зведемо в таблицю 4.9.

Таблиця 4.9 – Залежність $X_{вых}$ від t

t	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$X_{вых}$	0	0,181	0,183	0,183	0,183	0,183	0,183	0,183	0,183

Графік перехідного процесу САК з регулятором П –типу з оптимальними параметрами налаштування зображений на рисунке 4.28.

Побудова перехідної характеристики САК з регулятором І – типу.

Для спрощення розрахунків використовуємо готове (традиційне) рівняння (4.17).

$$\frac{T_1}{\varepsilon} \cdot \frac{T_u}{K_p} \cdot S^2 \cdot + \frac{T_u}{\varepsilon \cdot K_p} S + 1 = 0$$

Замість заданого значення коефіцієнта передачі $K_р$ підставляємо значення $K_р^{опт} = 1{,}06$, яке отримали при розрахунку настройки І – регулятора.

$$0{,}25S^2 + 0{,}56S + 1 = 0 \qquad (4.49)$$

$$Д = 0{,}56^2 - 4 \cdot 0{,}25 = -0{,}6864$$

Так як дискримінант від'ємний, то коріння будуть комплексними числами:

$$S_1 = -1{,}62 - j\,1{,}56$$

$$S_2 = -1{,}62 + j\,1{,}56$$

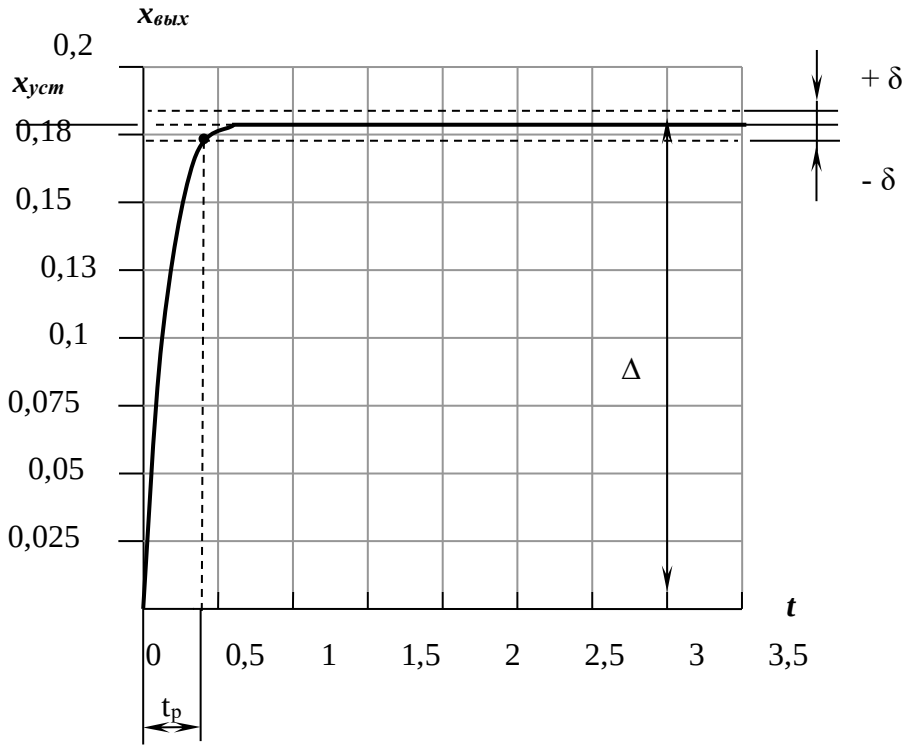


Рисунок 4.28 – Графік перехідного процесу САК з регулятором П – типу з оптимальними параметрами налаштування.

Загальне рішення диференціального рівняння матиме дотримуюся щий вид:

$$X_{вых} = e^{-1,12t}\,(C_1 \cdot Sin(1,56\,t) + C_2\,Cos(1,56t)) \qquad (4.50)$$

Знайдемо значення постійних інтегрування C_1 і C_2 .

$$\begin{cases} X_{вых}(t) = 0 \\ \dfrac{dX_{вых}(t)}{dt} = \varepsilon \cdot A \end{cases}$$

Для визначення C_1 і C_2 вибираємо початкове умова t = 0:

$$\begin{cases} C_2 = 0 \end{cases}$$

$$C_1 = 0,86$$

Таким чином, отримуємо:

$$X_{вых} = e^{-1,62t}(0,86\ Sin(1,56t)) \qquad (4.51)$$

Переймаючись значеннями часу t від 0 до ∞ побудуємо графік перехідного процесу САК з регулятором І – типу з оптимальними параметрами налаштування.

Отримані значення зведемо в таблицю 4.10.

Таблиця 4.10 – Залежність $X_{вых}$ від t

t	0	0,5	2	3	4	6	8	10
$X_{вых}$	0	0,254	0	–0,012	0	0	0	0

График переходного процесса САК с регулятором І – типа с оптимальными параметрами настройки изображён на рисунке 4.29.

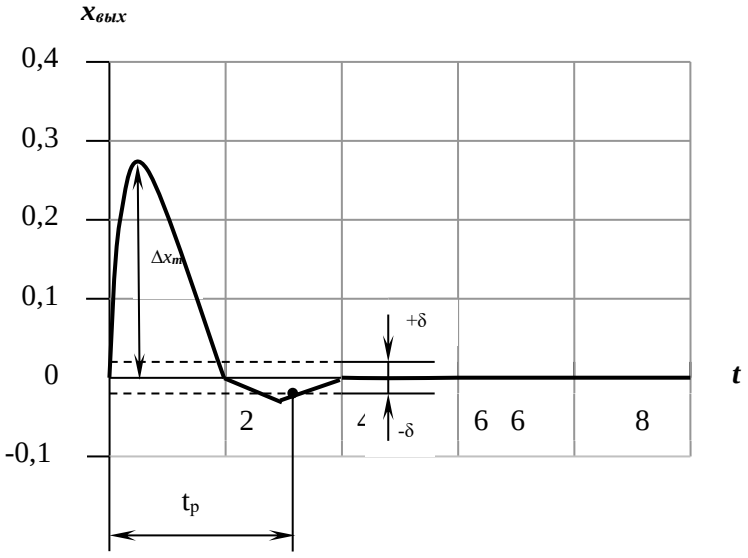


Рисунок 4.29 – Графік перехідного процесу САР з регулятором І – типу з оптимальними параметрами налаштування.

Побудова перехідної характеристики САК з регулятором ПІ – типу. Для спрощення розрахунків використовуємо готове (традиційне) рівняння (4.21).

$$\frac{T_1}{\varepsilon}\cdot\frac{T_u}{K_p}\cdot S^2+\frac{T_u}{\varepsilon\cdot K_p}\cdot S+T_u\cdot S+1=0$$

Замість заданого значення коефіцієнта передачі K_p і значення часу ізодрома T_i підставляємо значення $K_p^{опт} = 0,9$ и $T_и^{опт} = 0,2$, яке отримали при розрахунку настройки ПІ – регулятора.

$$0,15\ S^2 + 0,533\ S + 1 = 0 \qquad (4.52)$$

Таким чином, отримали коріння характеристичного рівняння:

$$S_1 = -21,63;$$

$$S_2 = -2,05$$

Загальне рішення диференціального рівняння матиме такий вигляд:

$$X_{вых}(t) = C_1\cdot e^{-21,63\,t} + C_2\ e^{-2,05} \qquad (4.53)$$

Знайдемо значення постійних інтегрування C_1 и C_2 .

$$\begin{cases} X_{вых}(t) = 0 \\ \dfrac{dX_{вых}(t)}{dt} = \varepsilon\cdot X_{вых}(t) = \varepsilon\cdot A \end{cases}$$

Для визначення C_1 и C_2 вибираємо початкове умова t = 0

$$\begin{cases} C_1 = -C_2 \\ -21,63\cdot C_1 - 2,05\cdot C_2 = 1,339 \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_2 = 0,07 \\ C_1 = -0,07 \end{cases}$$

Таким чином, отримуємо:

$$X_{вых}(t)= -0,07 \cdot e^{-21,63\,t} + 0,07 \cdot e^{-2,05\,t} \qquad (4.54)$$

Переймаючись значеннями часу t від 0 до ∞ побудуємо графік перехідного процесу САК з регулятором ПІ–типу з оптимальними параметрами налаштування.

Отримані значення зведемо в таблицю 4.11.

Таблиця 4.11 – Залежність $X_{вых}$ від t

t	0	0,2	1	2	3	4	5
$x_{вых}$	0	0,049	0,0018	0,0011	0	0	0

Графік перехідного процесу САК з регулятором ПІ – типу з опти–мінімальними параметрами налаштування зображений на рисунку 3.30.

Основним завданням, поставленим в даному розділі, було здійснення вибору оптимального закону регулювання і розрахунок параметрів настройки регулятора рівня в ПНТ–3.

Серед статичних регуляторів був обраний регулятор П – типу, так як його статична помилка і час регулювання в кілька разів менше ніж у регулятора ПД – типу (у регуляторі П – типа $\Delta = 0,36$, $t_p = 7,56$, у регуляторі ПД – типа $\Delta = 4,1$, $t_p=11$ с).

4.2 Реалізація П - закону регулювання на базі ПІ - регулятора з ООС по положенню регулюючого органу

Зазвичай промислові ПІ – регулятори виконуються по структурним схема зі зворотним зв'язком. Найбільш поширеним варіантом є схема, в якій виконавчий механізм (ІМ) не охоплюється зворотним зв'язком і ПІ – закон регулювання формується шляхом охоплення зворотним зв'язком тільки підсилювача (У) регулює блоку (РБ) рисунок 3.31. При цьому характеристики

регулятора в цілому визначаються властивостями ланцюга, що складається з послідовного включення замкнутого контуру виконавчого механізму.

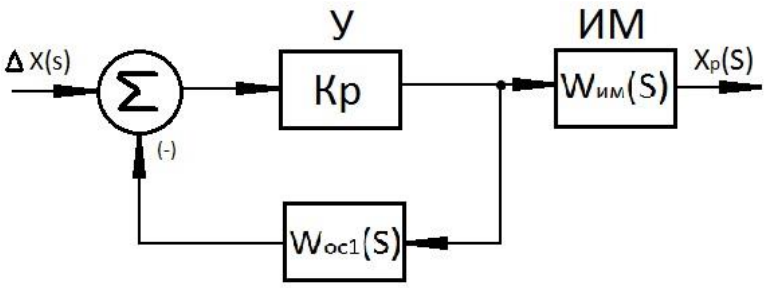


Рисунок 4.31 – Структурна схема регулює блоку ПІ – регулятора без охоплення ІМ ООС.

Для схеми представленої на рисунку 4.31 передавальна функція регулятора має вигляд:

$$W_{p1}(s) = W_{ИМ}(s) \cdot \frac{Kp}{1 + Kp \cdot W_{oc1}(s)}$$

При значеннях коефіцієнта посилення Кр підсилювача регулює блоку значно більше одиниці (Кр >> 1), що зазвичай має місце в промислових регуляторах, в подальшому рівнянні можна знехтувати одиницею в знаменнику:

$$W_{p1}(s) = \frac{W_{ИМ}(s)}{W_{oc1}(s)}$$

Тому елемент зворотного зв'язку (коригувальний елемент) для малюнка 3.31, повинен мати передавальну функцію, яка визначається формулою:

$$W_{oc1}(s) = \frac{W_{ИМ}(s)}{W_{p1}(s)}$$

Для ПІ – закону регулирования:

$$W_{oc1}(s) = \frac{W_{ИМ}(s)}{Kp \cdot \left(1 + \frac{1}{T_u s}\right)} = \frac{W_{ИМ}(s) \cdot T_u s}{Kp \cdot (T_u s + 1)}$$

Передавальна функція зворотного зв'язку:

$$W_{oc1}(s) = \frac{\frac{1}{T_{им} S} \cdot T_u S}{Kp \cdot (T_u S + 1)} = \frac{T_u}{T_{им} S \cdot Kp \cdot (T_u S + 1)}.$$

П – закону регулювання в регуляторах – рисунок 4.32.

Для схеми, представленої на рисунку 4.32, передавальна функція регулятора має вигляд:

$$W_{p2}(s)\cdot W_{им}(s)\cdot W_{oc2}(s)=W_{им}(s)-W_{p2}(s)\cdot W_{oc1}(s)$$

Тому елементи зворотного зв'язку для схеми рисунок 4.32 повинен мати передавальну функцію, яка визначається формулою:

$$W_{oc2}(s)=\frac{W_{им}(s)-W_{p2}(s)\cdot W_{oc1}(s)}{W_{p2}(s)\cdot W_{им}(s)}$$

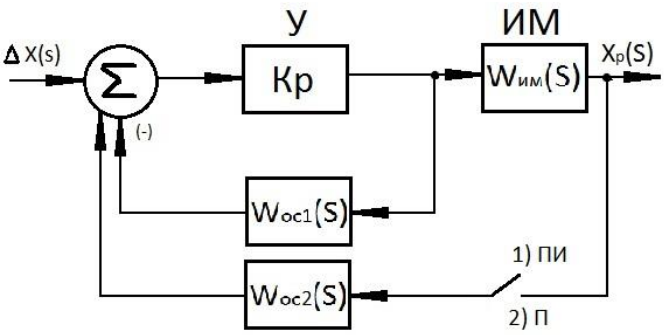


Рисунок 4.32 – Структурна схема регулює блоку, П – регулятора на базі ПІ – регулятора з ООС по положенню регулюючого органу.

Для П – закона регулювання $W_{p2}(s)=Kp$, за рахунок $W_{им}(s)=\frac{1}{T_{им}s}$:

$$W_{oc1}(s)=\frac{T_u}{T_{им}\cdot Kp\cdot(T_u s+1)}=\frac{1}{Kp\cdot(T_u s+1)}.$$

Висновки. В даному розділі дипломної роботи зроблено вибір оптимального закону регулювання та розрахунок параметрів налаштування регулятора рівня в ПНТ. Оптимальними законами регулювання є пропорційний (П) і пропорційно–інтегральний (ПІ) закони регулювання, а відповідно найбільш підходящими для промислового використання є регулятор П – типу і регулятор ПІ – типу, що підтверджується практикою використання даних регуляторів на ЗАЕС. В даному регуляторі рівня в ПНТ – 3 регулювання здійснюється саме по одному з цих законів, а саме, за пропорційним законом за рахунок охоплення ПІ–регулятора ОС.

5 НАДІЙНІСТЬ СПРОЕКТОВАНОЇ СИСТЕМИ

Надійність АСУ ТП енергоблоку визначається як сукупність властивостей системи, що гарантують виконання функцій контролю, управління та захисту протягом визначеного часу. Ключовим показником тут є ймовірність безвідмовної роботи ($P(t)$) — це ймовірність того, що протягом заданого проміжку часу (t) в системі не виникне відмови, а обладнання збереже свою працездатність.

Рівень надійності системи залежить від трьох основних факторів:

1. Якості вхідної інформації та алгоритмів її обробки.

2. Безвідмовності технічних засобів (апаратної частини).

3. Людського фактора (надійності дій оперативного та ремонтного персоналу).

4. Шляхи підвищення надійності

Забезпечення високих показників надійності реалізується на різних етапах життєвого циклу системи [15]:

На етапі проектування та виготовлення:

Використання високоякісної елементної бази та вдосконалених технологій виробництва.

Оптимізація структури системи, зокрема впровадження апаратного та інформаційного резервування (надмірності).

На етапі експлуатації:

Підтримка досягнутого при розробці рівня надійності через якісне технічне обслуговування та дотримання регламентів.

Умови працездатності

Під працездатністю розуміють стан системи, при якому вона здатна виконувати всі покладені на неї функції, а значення її параметрів знаходяться в межах, встановлених нормативно-технічною документацією.

Характеристика системи регулювання рівня в ПНТ.

Функціональне призначення

Система призначена для автоматичної стабілізації рівня основного конденсату в підігрівачі низького тиску (ПНТ). Технологічний процес передбачає підігрів конденсату парою, що надходить із VII відбору турбіни.

Технічна реалізація та алгоритми

Система управління реалізована з можливістю роботи як в автоматичному, так і в ручному режимах.

Контроль рівня здійснюється за схемою «2 з 3» або з усередненням, використовуючи три датчики типу «Сапфір-22ДІ». База вимірювання (діапазон) датчиків становить 630 мм.

Використовується П-регулятор (пропорційний закон регулювання). Для забезпечення стійкості та точності в контур введено жорсткий зворотний зв'язок за положенням регулюючого органу.

Номінальне значення рівня (уставка) становить 450 мм. Допустимий діапазон відхилення (зона регулювання) – ±50 мм.

Передбачено захист від несправності керуючого каналу: якщо тривалість командного імпульсу перевищує 5 секунд, регулятор автоматично відключається, запобігаючи помилковим діям виконавчого механізму.

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \qquad (4.1)$$

де λ – інтенсивність відмов.

Імовірність відмови – ймовірність того, що при певних умовах експлуатації в заданому інтервалі часу виникне хоча б один відмову.

$$Q(t) = 1 - P(t)$$

На рисунке 5.1 показана структурна схема регулятора рівня в ПНТ-3.

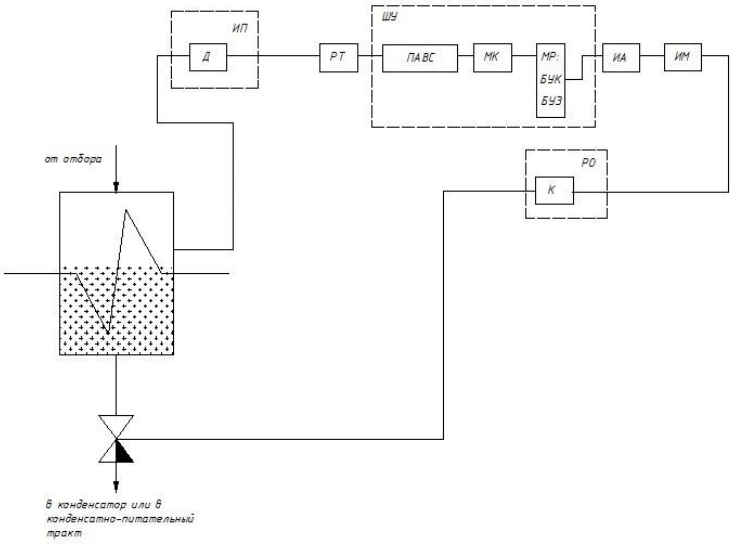


Рисунок 5.1 – Структурна схема регулятора рівня в ПНТ.

Частота відмов – це щільність ймовірностей часу роботи вироби до першої відмови.

$$a(t) = -\frac{dP(t)}{dt} = \frac{dQ(t)}{dt}$$

Інтенсивність відмов – це відношення частоти відмов вироби до ймовірності безвідмовної роботи вироби в одиницю часу.

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}$$

Середнє напрацювання до першої відмови – математичне очікування часу роботи вироби до відмови.

$$T_{ср} = \frac{1}{\lambda}$$

У таблиці 4.1 наведені інтенсивності відмов блоків, що входять в канал, взяті з технічного опису для кожного блоку, крім Сапфір-22 ДІ. Але для нього відомі інші дані ймовірність безвідмовної роботи ([24]) P(t) = 0,97 за 2000 годин, тому інтенсивність відмови можна розрахувати за формулою:

$$\lambda_i(t) = \frac{1}{T_{ср}} \ln\left(\frac{1}{P_i(t)}\right)$$

Зробимо розрахунок λ і внесемо його в таблицю 5.1.

$$\lambda = \frac{1}{2000}\ln(\frac{1}{0,97}) = 1,523 \cdot 10^{-5}$$

Таблиця 5.1 Значення інтенсивності відмов елементів системи

Перелік блоків в ФЛС	Назва блока	Інтенсивність відмов λ, 1/ч
1	Сапфір-22ДИ	$1,523 \cdot 10^{-5}$
2	РТ	$2 \cdot 10^{-5}$
3	ПАВС	$7,7 \cdot 10^{-8}$
4	МК	$5 \cdot 10^{-7}$
5	МР	$4 \cdot 10^{-7}$
6	ИА	$1 \cdot 10^{-5}$
7	МЭО	$1,8 \cdot 10^{-6}$
8	РК	$1 \cdot 10^{-6}$

Функціонально-логічна схема регулятора. На підставі структурної схеми регулятора (рисунок 5.1) складаємо розрахунково-логічну схему (рисунок 5.2). До складу структурної схеми так само входять Д05, БГР, БРУ-32, БСПТ, але ці блоки не беруться до уваги надійності, так як керуючий сигнал пройде через основний канал (Сапфір-22ДД, РТ, ПАВС, МК, МР, ІА, МЕВ, РК). Це відіб'ється на надійності (зменшить її), але система залишиться працездатною.

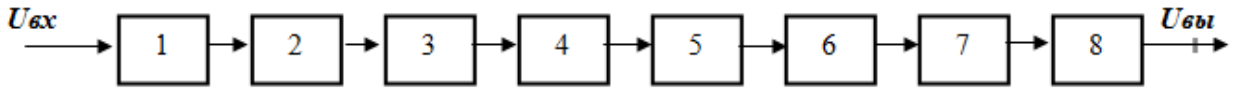


Рисунок 5.2 – Функціонально-логічна схема регулятора рівня в ПНТ: 1 – Сапфір 22ДД, 2 – шафа розподільник струмових, 3 – прийом аналогових вхідних сигналів, 4 – мікроконтролер, 5 – субблок МР, 6 – виконавчий автомат, 7 – механізм електричний однооборотний, 8 –регулюючий клапан.

Вибір часу роботи всіх елементів основного каналу. Так як час кампанії енергоблоку становить 4 роки (при використанні ТВС-А), виберемо загальний час роботи елементів системи, рівне

$$T_{общ} = 4 \cdot 365 \cdot 24 = 35040 \text{ год.}$$

Розіб'ємо цей час на п'ять рівних ділянок по 7008 годин. Подальші розрахунки будемо робити, спираючись на ці значення часу.

Таким чином, час роботи основних елементів каналу складе:

t_1 = 7008 годин (292 дня);

t_2 = 14016 годин (584 дня);

t_3 = 21024 годин (876 днів).

t_4 = 28032 годин (1168 днів);

t_5 = 35040 годин (1460 днів).

Розрахунок ймовірностей безвідмовної роботи регулятора рівня в ПНТ. Розрахунок ймовірності безвідмовної роботи будемо розраховувати за формулою (5.1):

$$P_i = e^{-\lambda_i \cdot t}$$

де λ_i – імовірність відмови $i^{-ого}$ елемента;

t – час роботи системи.

Зробимо розрахунок ймовірності безвідмовної роботи елементів системи:

$$P_i = e^{-1,523 \cdot 10^{-5} \cdot 7008} = 0,8987667$$

Виконаємо розрахунок ймовірності безвідмовної роботи основного каналу без урахування резервування для часу t_1 = 7008 годин:

$$P_0(t_i) = \cdot 0,8987667 \cdot 0,8692191 \cdot 0,9994605 \cdot 0,9965021 \cdot 0,9972007 \cdot 0,9323192 \cdot 0,9874648 \cdot 0,9930165$$

Аналогічно виконаємо розрахунки для часу t_2,t_3, t_4, t_5 в програмі «Mathcad» і представимо їх у таблиці 5.2.

Інтенсивність відмови основного каналу.

$$\lambda_0 = 1{,}523 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-5} + 7{,}7 \cdot 10^{-8} + 5 \cdot 10^{-7} + 4 \cdot 10^{-7} + 1 \cdot 10^{-5} + 1{,}8 \cdot 10^{-6} + 1{,}8 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 10^{-6} =$$
$$= 4{,}007 \cdot 10^{-5}.1/ч$$

Розрахунок ймовірності безвідмовної роботи системи. Ймовірності безвідмовної роботи системи $P_c(t)$ при даному способі резервування і ненаван таженому стані резерву (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Ймовірності безвідмовної роботи елементів системи

t_i ,год / $P_i(t)$	7008	14016	21024	28032	35040
P_1	0,8987667	0.8077815	0.7260071	0.6525109	0.5864551
P_2	0.8692191	0.7555419	0.6567315	0.5708436	0.4961882
P_3	0.9994605	0.9989214	0.9983825	0.9978439	0.9973056
P_4	0.9965021	0.9930165	0.9895431	0.9860818	0.9826326
P_5	0.9972007	0.9944093	0.9916257	0.9888498	0.9860818
P_6	0.9323192	0.8692191	0.8103897	0.7555419	0.7044063
P_7	0.9874648	0.9750868	0.9628639	0.9507942	0.9388759
P_8	0.9930165	0.9860818	0.9791955	0.9723573	0.9655668

Таблица 5.3 – Значення ймовірностей безвідмовної роботи на основній лінії

t_i,год / $P_{0i}(t)$	7008	14016	21024	28032	35040
$P_0(t)$	0.7093251	0.5031422	0.3568912	0.2531524	0.1795675

Схема розрахунку надійності регулятора для роздільного резервування з постійно включеним резервом і цілої кратністю представлено на рисунке 4.3.

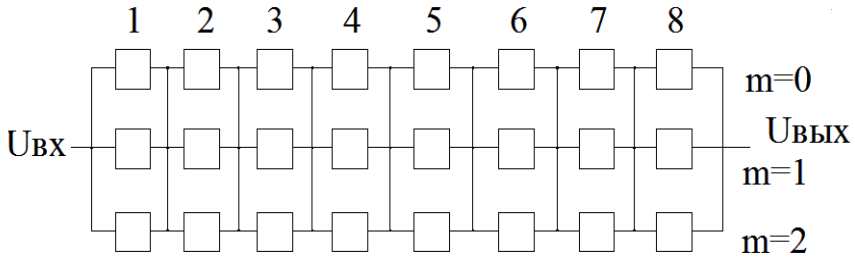


Рисунок 5.3 – Схема розрахунку надійності регулятора для роздільного резервування з постійно включеним резервом і цілої кратністю.

Тоді для $m_i = 0$ і N = 8 отримаємо:

$$P_C(t) = \prod_{i=1}^{8} \left[1 - (1 - Pi(t))^{0+1}\right] = 0{,}7093253$$

Аналогічно проводимо інші розрахунки в програмі «Mathcad». Результати розрахунків наведені в таблиці 5.4.

Побудуємо графік залежності Pc(t)=f(λ_0t) при роздільному резервуванні з постійно включеним резервом і цілої кратністю при різних значеннях кратності резервування (m = 0,1,2) і представимо його на рисунку 5.4.

Таблиця 5.4 – Ймовірності безвідмовної роботи системи Pc при різних m

t_i,год / $P_c(t)$	t_1=7008	t_2=14016	t_3=21024	t_4=28032	t_5=35040
P_cпри m=0	0.7093253	0.5031424	0.3568916	0.2531522	0.1795673
P_cпри m=1	0.9681482	0.8892161	0.7850381	0.6720845	0.5614579
P_cпри m=2	0.9964167	0.9761862	0.9333499	0.8693026	0.7892888

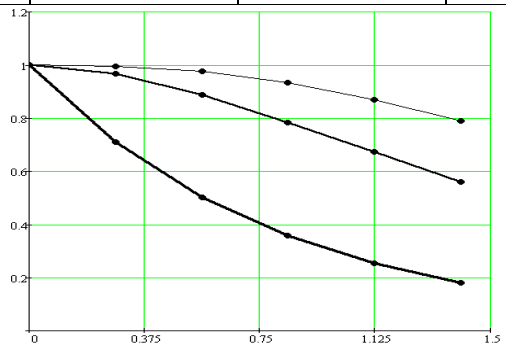


Рисунок 5.4 − Графік залежності $P_c(t)$ від при m = 0,1,2 і роздільному резервуванні з постійно включеним резервом і цілої кратністю.

Розрахунок середнього часу безвідмовної роботи. Для даного способу резервування і ненавантаженому стані резерву середній час безвідмовної роботи визначається як:

$$Tcp_C = \frac{(7)!}{4{,}007 \cdot 10^{-5} \cdot (0+1)!} \cdot \sum_{i=0}^{0} \frac{1}{\upsilon_i \cdot (\upsilon_i + 1) \cdot \ldots \cdot (\upsilon_i + N - 1)} = 2550{,}65602$$

Аналогічно проводимо інші розрахунки для m = 1,2 в програмі «Mathcad». Результати розрахунків наведені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Значення середнього часу безвідмовної роботи резервованої системи при різних значеннях m

	m=0	m=1	m=2
Tcp	2550.6560287	62155.9398877	6211.8708125

Висновки. В даному розділі дипломної роботи було зроблено розрахунок

значень ймовірності безвідмовної роботи системи без урахування і з урахуванням резервування. При роздільному резервуванні з постійно включеним резервом і цілої кратністю значення ймовірності безвідмовної роботи системи вище спочатку отриманого. Резервування системи значно підвищує надійність роботи об'єкта, хоча і ускладнює його конструкцію і оптимальним рішенням є заміна часто відмовляє елемента.

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота магістра виконана у повному обсязі згідно з виданим технічним завданням.

У роботі досліджено атомну енергетичну установку (АЕУ), що функціонує за двоконтурною схемою з корпусним реактором на теплових нейтронах та турбіною, що працює на насиченій парі. За результатами проєктування наведено коротку характеристику об'єкта керування. Розроблено математичні моделі, що описують кінетику реактора, процеси теплообміну, ефекти перемішування та транспортного запізнювання теплоносія, а також внутрішні зворотні зв'язки. Це дозволило отримати передавальну функцію та побудувати структурну схему атомної паровиробляльної установки (АППУ). Спроектовано верхній рівень керування та структурну схему АСУ ТП енергоблока. Передбачено функції автоматичної та автоматизованої діагностики стану обладнання, а також самодіагностики технічних та програмних засобів системи керування. Розраховане значення ймовірності безвідмовної роботи системи без урахування і з урахуванням резервування. При роздільному резервуванні з постійно включеним резервом і цілої кратністю значення ймовірності безвідмовної роботи системи вище спочатку отриманого. Резервування системи значно підвищує надійність роботи об'єкта, хоча і ускладнює його конструкцію і оптимальним рішенням є заміна часто відмовляє елемента.

Розроблено систему автоматизації ПНТ-3: створено функціональну схему регулювання рівня в підігрівачі низького тиску №3, підібрано комплекс технічних засобів, описано принципи вимірювання та алгоритм роботи регулятора.

Враховуючи значну частку постійних витрат у собівартості електроенергії, для забезпечення максимальної ефективності необхідна експлуатація енергоблока в базовому режимі на номінальній потужності. Будь-які позапланові зупинки або розвантаження блоку (не пов'язані з питаннями безпеки) негативно впливають на економічні показники.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлювання. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. – 29 с.

2. Аллахверанов Р. Ю., Альохіна С. В., Невлюдов І. Ш., Ромашов Ю. В. Основи моделювання та ідентифікація об’єктів автоматизації: навч.посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2023.

3. Агій Я.Ю. Охорона праці у галузі: навч. пос. / Я.Ю. Агій, І.М. Лях. – Ужгород: ПП «АУТДОР – ШАРК», 2015. – 200 с.

4. Андрушечко, С.А. та ін. АЕС з реактором типу ВВЕР–1000. Від фізичних основ експлуатації до еволюції проекту [Текст] / С.А. Андрушечко, А.М. Афров, Б.Ю. Васильєв, В.М. Генералів, К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков, В.Ф. Українців. – М .: Логос, 2010. – 604 с.

5. Атаманчук П.С. Основи охорони праці: навч. посіб. / П.С. Атаманчук, В.В. Мендерецький, О.П Панчук, О.Г. Чорна.– К.: Центр учбової літератури, 2011.–224 с.

6. Бундюк А.М. Комп`ютерні системи АНАЛІЗУ ефективності в енергетіці. Конспект лекцій.: Одеса, 2006.

7. Гандзюк М.П. Основи охорони праці: підруч. / М.П. Гандзюк, Є.П. Желібо, М.О. Халімовський; 5–те видання / За ред. М.П. Гандзюка. – К.: Каравелла, 2011. – 384 с.

8. Голінько В.І. Основи охорони праці: підручник / В.І. Голінько; М–во освіти і науки України; Нац. гірн. ун–т. – 2–ге вид. – Д.: НГУ, 2014. – 271 с.

9. Демченко В.А., Автоматизація та моделювання технологічних процесів АЕС і ТЕС: навчальний посібник. – Одеса: Астропринт, 2001. – 308с.

10. Денісов В.П., Драгунов Ю.Г. Реакторні установки ВВЕР для атомних електростанцій. М.: Вид.АТ, 2012. – 480 с.

11. Посібник з лекцій з дисципліни «Автоматизовані системи керування

технологічними процесами» / Укладач : Карташов В.В. – Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017 – 149 с.

12. Загальні положення безпеки атомних станцій. НП 306.2.141 – 2008.

13. Зорін, В.М. Дослідження і математичне моделювання АЕС на основі системного підходу [Текст] / В.М. Зорін. – М .: Вид-во МЕІ, 2002. – 88с.

14. Інформаційні та керуючі системи атомно-електричних станцій безпеки та захисту. М.О. Ястребенецький, В.С. Харченко / США, IGI Global, 2014. 450 с.

15. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ–97), Державні гігієнічні нормативи ГДП 6.6.1.–6.5.001–98. видання офіційне. 2003 р. – 45 с.

16. Охорона праці в галузі [текст]: навчальний посібник / П.С. Атаманчук, В.В. Мендерецький, О.П. Панчук, Р.М. Білий – К.: «Центр учбової літератури», 2017. – 322 с.

17. Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС: схеми, процеси, Р31 матеріали, конструкції, моделі / О. В. Єфімов, М. М. Пилипенко, Т. В. Потаніна та ін.; за ред. О.В. Єфімова. – Харків : ТОВ «В справі», 2017. – 420 с.

18. Технологічний регламент безпечної експлуатації енергоблоку Запорізької АЕС. 03.ГТ.00.РГ.01.

19. Технічний опис та інструкція з експлуатації. Блок з реактором ВВЕР–440/1000. Споруди обробки додаткової води. Система предочистки. Енергоблок 1–4 »171–36–Е–ХЦ.

20. Бегун В. В. Опис систем, важливих для безпеки АЕС з реактором ВВЕР-1000. Навчальний посібник для студентів технічних ВНЗ України / Видавництво НТУУ «КПІ». – К., 2009. 297 с.

21. Третій том збірника тез доповідей IX Міжнародної науково–технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології». Дніпро. – 2019. – Т. III. – 98 с.

22. Закон України «Про охорону праці» [Електронний ресурс].– Режим доступу: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2694–12.

23. Open AI. (2023). ChatGPT [велика мовна модель]. Режим доступу: https://www.openai.com/chatgpt (дата звернення: 22.11.2025).