

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ МЕТАЛУРГІЇ

курс автоматизованого управління технологічними процесами  
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота / проект

дружній маркетинг  
(рівень вищої освіти)

тему Аналіз системи автоматизованого управління  
маркетинговою системою з реалізацією функційно  
їх на певних кафедрах та курсівки з постійною  
роботою в умовах ВА. Запорізьке АЕС.

Виконав: студент 2 курсу, групи АКІТ-18-1.13  
спеціальності 151 Автоматизація та керування  
інформаційними процесами  
освітньої програми Автоматизація та керування  
інформаційними процесами  
спеціалізації Автоматизація та керування  
інформаційними процесами

Д. В. Григоренко  
(ініціали та прізвище)

Керівник доц. С. Г. Н. кафедри, Д. М. Бараненко  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Рецензент директор І. А. Курілець  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Запоріжжя  
2020

Інформація про спеціальність та спеціалізацію  
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет Механічний  
 Кафедра Автоматизованого управління механічними процесами  
 Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
 (другий (магістерський) рівень)  
 Спеціальність 151 Автоматизація та керування інтегрованими технічними  
 (шифр і назва)  
 Спеціалізація Автоматизація та керування інтегрованими технічними  
 (шифр і назва)  
 Світньо-професійна програма \_\_\_\_\_  
 (шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

“ ” 20 року

**ЗАВДАННЯ**

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Прізвище, ім'я, по батькові Уршицько Олександр Володимирович  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

Тема кваліфікаційної роботи магістра Аналіз системи автоматизованого управління функціями системи управління керування двигуна на основі нейронних мереж та фізичних параметрів парової турбіни в умовах  
 Ім'я кваліфікаційної роботи магістра Уршицько Олександр Володимирович  
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

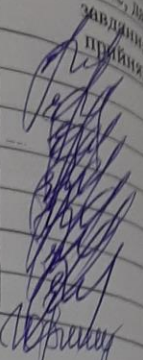
Визначені наказом закладу вищої освіти від “10” 09 2019 року № 1541-С  
 рік подання здобувачем кваліфікаційної роботи магістра 10.12.19

Кількість дані кваліфікаційної роботи магістра аналіз існуючих законів управління, адекватний стан АСУАП механічних процесів двигуна та фізичних параметрів парової турбіни після проходження практики на ВА Заводу АЕС

Перелік розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розв'язати): визначити час роботи системи автоматизованого управління керування двигуна на основі нейронних мереж та фізичних параметрів парової турбіни в умовах роботи системи управління керування двигуна та фізичних параметрів парової турбіни після проходження практики на ВА Заводу АЕС

Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): схема системи АСУ з ВВЕР; структурна схема системи АСУАП ЕБ; структурна схема АСУАП; структурна схема функціонального блоку АСУАП-3; графік параметрів АСУАП функціонального блоку АСУАП; функціональний набір параметрів.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийнято
1	Барішченко Р.М., к.т.н. доц. кафедри АУТН	
2	Барішченко Р.М., к.т.н. доц. кафедри АУТН	
3	Барішченко Р.М., к.т.н. доц. кафедри АУТН	
4	Барішченко Р.М., к.т.н. доц. кафедри АУТН	
5	Барішченко Р.М., к.т.н. доц. кафедри АУТН	
6	Барішченко Р.М., к.т.н. доц. кафедри АУТН	
7	Барішченко Р.М., к.т.н. доц. кафедри АУТН	

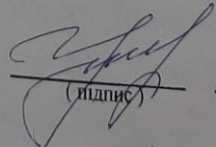
консультант: Довгиченко С.А., к.т.н. доц. кафедри АУТН

7. Дата видачі завдання 01.10.19

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

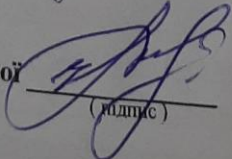
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи магістра	Пр
1	Аналіз об'єкту автоматизації, характеристика об'єкту управління	1.10 - 10.10 2019	
2	Вибір математичної моделі об'єкта управління, визначення параметрів моделі середнього розміру, тестування моделі в середньому розмірі	14.10 - 25.10 2019	
3	Аналіз структурної схеми АСУ ТП ЕБ	26.10 - 30.10 2019	
4	Визначення рівня вимірювальної інтенсивності процесу. Призначення резервувальної зони новий вузол ниску. Робота регулятора рівня в ПНТ-3.	01.11 - 10.11 2019	
5	Надання перелічних характеристик функцій автоматизації керування з функцією регулювання.	11.11 - 25.11 2019	
6	Розрахунок техніко-економічних показників	26.11 - 05.12 2019	
7	Виконання роботи, розробка презентації	06.12 20.12 2019	

Здобувач вищої освіти

  
(підпис)

Ушченко Р.В.  
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи магістра

  
(підпис)

Барішченко Р.  
(прізвище та ініціали)

Перел  
Вступ  
1 Оп  
управ  
2 Мо  
запіз  
реак  
реак  
уста  
реак  
уста  
водо-  
3 Стр

## АНОТАЦІЯ

Грищенко О.В. Аналіз системи автоматизованого управління двоконтурною схемою з реактором корпусного типу на теплових нейронах та турбіні з насиченою парою в умовах ВП «Запорізька АЕС».

Кваліфікаційна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, науковий керівник О.М. Баріщенко. Запорізький інженерний інститут. Факультет металургії, кафедра автоматичного управління технологічними процесами.

Проведена розробка математичної моделі атомної енергетичної установки, ідентифікація систем автоматичного регулювання та процесів атомної енергетичної установки на енергетичних режимах потужності, розрахунок динаміки об'єкта, а також визначена конфігурація систем автоматичного управління. Моделювання виконано за допомогою комплексної програми «Classic». Отримано перехідні функції, частотні і логарифмічні характеристики, проведена оптимізація.

Ключові слова: ПІДГРІВАЧ НИЗЬКОГО ТИСКУ, ЗАКОН РЕГУЛЮВАННЯ, СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ, РЕГУЛЯТОР ТИСКУ.

## ABSTRACT

Grischenko OV Analysis of the automated control system of a double circuit circuit with a hull type reactor on thermal neurons and saturated steam turbines under the conditions of Zaporizhzhya NPP.

Qualification work for higher master's degree in specialty 151 - Automation and computer-integrated technologies, Supervisor EN Baryshenko. Zaporizhzhya Engineering Institute. Faculty of Metallurgy, Department of Automatic Process Control.

The development of a mathematical model of the nuclear power plant, the identification of automatic control systems and processes of the nuclear power plant

on energy modes of power, the calculation of the dynamics of the object, as well as the configuration of automatic control systems. The simulation was performed using the integrated program "Classic". Transient functions, frequency and logarithmic characteristics were obtained, optimization was performed.

Keywords: LOW PRESSURE HEATER, REGULATION LAW, AUTOMATIC CONTROL SYSTEM, PRESSURE REGULATOR.

## АННОТАЦИЯ

Грищенко О.В. Анализ системы автоматизированного управления двухконтурной схемой с реактором корпусного типа на тепловых нейронах и турбине с насыщенным паром в условиях ОП «Запорожская АЭС».

Квалификационная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 151 - Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии, научный руководитель Е.Н. Баришенко. Запорожский инженерный институт. Факультет металлургии, кафедра автоматического управления технологическими процессами.

Проведена разработка математической модели атомной энергетической установки, идентификация систем автоматического регулирования и процессов атомной энергетической установки на энергетических режимах мощности, расчет динамики объекта, а также определена конфигурация систем автоматического управления. Моделирование выполнено с помощью комплексной программы «Classic». Получены переходные функции, частотные и логарифмические характеристики, проведена оптимизация.

Ключевые слова: ПОДОГРЕВАТЕЛЬ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ, ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ, СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ, РЕГУЛЯТОР ДАВЛЕНИЯ.

## ЗМІСТ

Перелік прийнятих скорочень .....	8
Вступ.....	9
1 Опис об'єкта автоматизації.....	12
1.1 Стисла характеристика об'єкта управління .....	12
1.2 Принципова схема атомно-енергетичної установки як об'єкту управління.....	12
1.3 Постановка задачі .....	14
2 Моделювання системи автоматичного управління.....	16
2.1 Розробка математичної моделі об'єкта управління .....	16
2.1.1 Математична модель кінетики ядерного реактора .....	16
2.1.2 Математична модель теплообміну в ядерному реакторі.....	22
2.1.3 Математична модель перемішування і транспортного запізнювання теплоносія.....	26
2.1.4 Математична модель внутрішніх зворотних зв'язків в ядерному реакторі.....	29
2.2 Проектування системи автоматичного регулювання ядерного реактора.....	32
2.2.1 Вибір і обґрунтування програми управління атомно-енергетичної установки .....	32
2.2.2 Система автоматичного регулювання потужності ядерного реактора.....	35
2.2.3 Регулятор нейтронної потужності атомно-енергетичної установки.....	37
2.2.4 Регулятор тиску пара .....	39
2.3 Багатовимірна структурна схема атомно-енергетичної установки з водо-водяним енергетичним реактором – 1000.....	41
3 Структурна схема АСУ ТП.....	44
4 Вибір оптимального закону регулювання та розрахунок параметрів налаштування регулятора рівня в підігрівачі низького тиску .....	64

4.1 Регулятор рівня в підігрівачі низького тиску – 3.....	65
4.1.1 Призначення регенеративної установки низького тиску і її опис.	65
4.1.2 Підігрівач низького тиску –3.....	65
4.1.3 Характеристики регулятора рівня в підігрівачі низького тиску-3..	67
4.1.4 Склад регулятора рівня в підігрівачі низького тиску-3.....	68
4.1.5 Опис роботи регулятора рівня в підігрівачі низького тиску-3....	71
4.1.6 Побудова перехідних характеристик систем автоматичного керування з різними законами регулювання.....	73
4.1.7 Розрахунок показників якості перехідних процесів системи автоматичного керування і порівняльна оцінка різних законів регулювання.....	86
4.1.8 Основи розрахунку настроювання автоматичних регуляторів.....	94
4.2 Реалізація П-закону регулювання на базі ПІ-регулятора з негативним зворотнім зв'язком по положенню регулюючого органу.....	114
5 Надійність спроектованої системи .....	117
6 Охорона праці та довкілля.....	125
6.1 Загальні заходи з охорони праці на атомній електростанції .....	125
6.2 Забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу і населення.....	126
6.3 Умови праці. Якісна і кількісна оцінка умов праці .....	128
7 Техніко–економічне обґрунтування проекту .....	130
7.1 Визначення величини і структури капітальних вкладень .....	130
7.2 Вироблення і відпустка електроенергії .....	133
7.3 Річні експлуатаційні витрати .....	132
7.4 Складові собівартості одиниці електроенергії .....	135
7.5 Фінансові показники проекту .....	135
7.6 Оцінка економічної ефективності проекту .....	137
Висновки.....	141
Сисок використаних джерел.....	143

## ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

АЕС	– атомна електрична станція
АЕУ	– атомна енергетична установка
АСК	– автоматична система контролю
АСР	– автоматична система регулювання
БЩУ	– блочний щит управління
ГЦК	– головний циркуляційний контур
ГЦН	– головний циркуляційний насос
ГЦТ	– головний циркуляційний трубопровід
ВВЕР	– водо–водяний енергетичний реактор
ДМЕ	– диференціальний манометр електроконтактний
ІЗП	– імпульсний запобіжний пристрій
ІОС	– інформаційні обчислювальні системи
КТ	– компенсатор тиску
КТЗ	– комплекс технічних засобів
ЛЧХ	– лінійна частотна характеристика
ПК	– паровий клапан
ПНТ	– підігрівач низького тиску
ПТУ	– паротурбінна установка
ПГУ	– паро генеруюча установка
РО	– регулюючий орган
РУ	– реакторна установка
САК	– система автоматичного керування
СГІУ	– система групового та індивідуального управління
ТВЕЛ	– тепловиділяючий елемент
ТКР	– температурний коефіцієнт реактивності
УКТЗ	– уніфікований комплекс технічних засобів
ЯР	– ядерний реактор



## ВСТУП

*Актуальність роботи.* Стан і масштаби розвитку енергетики є однією з характерних особливостей народно-господарського розвитку України при одночасному посиленні вимог до вирішення екологічних проблем і впровадження енерго- і ресурсозберігаючих технологій.

Основною метою експлуатації АЕС в Україні є виробництво електроенергії. Найкращим режимом роботи ядерних реакторів з точки зору безпеки і надійності є режим роботи на номінальному рівні потужності. Але на практиці енергосистема накладає свої вимоги і, отже, необхідне забезпечення можливості змінювати потужність енергоблоку, щоб забезпечити режим проходження за навантаженням. Тому до сучасних систем автоматизації реакторних установок пред'являються підвищені вимоги, що в першу чергу стосується алгоритмів управління технологічними процесами, які повинні забезпечувати надійні та безпечні умови експлуатації.

Надійність є основною вимогою стандартизації при проектуванні АСУ ТП, яка досягається за рахунок застосування внутрішніх підсистем діагностики, а також завдяки впровадженню систем моніторингу та стандартизації. З іншого боку, грамотного проектування, для того щоб побудувати ефективну інфраструктуру АСУ ТП, не завжди достатньо.

*Мета і задачі дослідження.* Розробка автоматичної системи регулювання рівня двоконтурна схема з реактором корпусного типу на теплових нейтронах і турбіни 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.

Відповідно до поставленої мети досліджень в роботі сформульовані наступні задачі:

- сформулювати коротку характеристику об'єкта управління;
- розробити математичну модель кінетики ядерного реактора, тепло-

обміну в ядерному реакторі, перемішування і транспортного запізнювання теплоносія, внутрішніх зворотних зв'язків в ядерному реакторі;

- знайти передавальну функцію і розроблення структурної схеми АППР;
- спроектувати верхній рівень керування і структурна схема АСУ ТП блоку реактора;
- розробити систему контролю і управління блоку, яка буде забезпечувати автоматичну і автоматизовану діагностику стану і режимів експлуатації, в тому числі і власне технічних і програмних засобів системи контролю та управління;
- виконати розрахунок і вибів приладів контролю та схему електропостачання;
- розробити функціональну схему автоматизації регулювання рівня в ПНТ;
- розглянути організацію охорони праці, проаналізувати умови праці, визначити заходи зниження впливу небезпечних і шкідливих факторів;
- виконати розрахунок економічного обґрунтування проекту і визначити економічну ефективність від модернізації АСК.

*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.* На основі розробленої математичної моделі було виявлено, що САК нейтронної потужності регулює тільки рівень нейтронної потужності, приводячи його у відповідність із заданим значенням.

1. Через помірне наростання потужності реактора його температура збільшується, викликаючи стабілізацію рівня потужності.

2. Розроблена багатовимірна структурна схема АЕУ з ВВЕР – 1000, структура якої дозволяє значно спростити структурну схему стабілізації автоматичної системи керування технологічними процесами АЕС.

*Практичне значення.* 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 виконані автором самостійно. Його особистий внесок полягає: в розробці системи управління технологічним процесом регулювання рівня двоконтурна схема з реактором корпусного типу на теплових нейтронах і турбіна на насиченій парі. Представлені дані також підтверджуються теплогідрравлічними розрахунками по аналізу критеріїв успіху для енергоблоку Запорізької АЕС. Особливості режиму розхолодження корпусу реактора на природній циркуляції аналогічні реакторній установці «малої» серії, тому результати аналізу можуть бути використані і для серійного енергоблоку ПУАЕС.

*Апробація результатів.* Матеріали магістерської роботи були повідомлені та обговорені на наукових конференціях ЗДІА.

*Публікації.* Грищенко О. В. Аналіз системи автоматизованого управління двоконтурною схемою з реактором корпусного типу на теплових нейтронах та турбін з насиченою парою в умовах ВП «Запорізька АЕС» / О. В. Грищенко //Металургія як основа сучасної промисловості : матеріалі XXIV науково-техн. конф. студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗНУШ, Запоріжжя, 26–29 листопада 2019 р. – Запоріжжя: ЗНУШ , 2019. – Т.1. – С.77-78. – 3 прим.

*Структура магістерської роботи.* Магістерська робота складається з вступу, семи розділів, загальних висновків, списку літератури із 24 найменувань і вміщує 129 сторінку основного тексту, 21 таблицю, 54 рисунки, усього 148 сторінок.

## 1.1 Стисла характеристика об'єкта управління

За проєктовану АЕУ вибрана двоконтурна схема з реактором корпусного типу на теплових нейтронах і турбіна на насиченій парі. Як прототип прийнята АЕУ Запорізької АЕС. Для цього типу АЕУ як теплоносіїв використовується знесолена вода під тиском, а в якості робочого тіла – насичена пара [1]. Усі АЕУ АЕС складаються з установки, що виробляє пару, паротурбінної установки і генератора електричної енергії. В результаті ядерних процесів, що відбуваються в реакторі, виділяється теплота, яка потім передається теплоносію. Теплоносієм передає частину своєї енергії робочому тілу в парогенераторі. Пара, що утворилася, поступає на турбіну, де відбувається перетворення теплової енергії пари в механічну енергію обертання ротора турбіни. Ротор турбіни, у свою чергу, обертає ротор електрогенератора, де і відбувається перетворення механічної енергії в електричну.

ПШУ з усіма системами, що забезпечують її роботу, розташована в реакторному відділенні головної будівлі АЕС. ПТУ і електрогенератор, з усіма системами, що забезпечують їх роботу, розташовані в машинному залі головної будівлі АЕС.

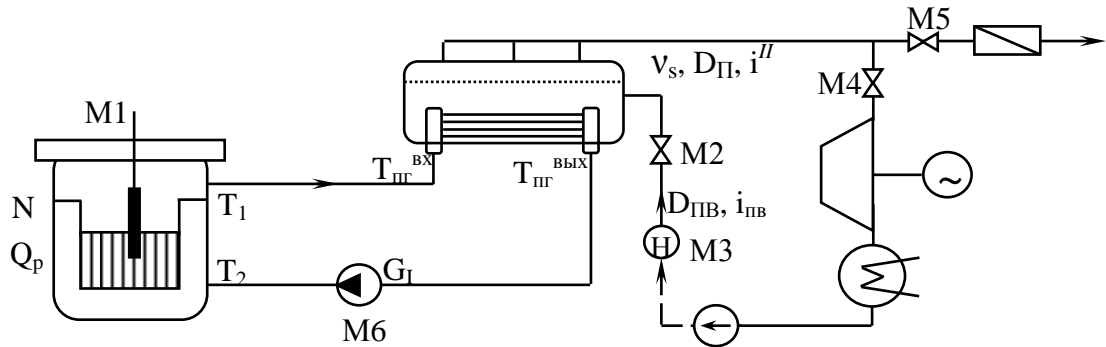
## 1.2 Принципова схема АЕУ як об'єкту управління

Об'єктом управління є двоконтурна АЕУ. Джерелом енергії в АЕУ є водо–водяний енергетичний реактор (ВВЭР). Теплоносієм, циркулюючий за допомогою циркуляційного насоса в першому контурі, переносить теплову енергію з реактора в парогенератор (ПГ) і далі передає її робочому тілу другого контура, яке, нагріваючись до температури кипіння, випаровується і перегрівається.

Перегріта пара поступає в турбіну, що обертає генератор. Після турбіни пара спрямовується в головний конденсатор, в якому перетворюється на воду. Поживна вода з головного конденсатора подається поживним насосом в ПГ, де знову нагрівається до температури насичення, випаровується і перетворюється

на пару. Якість пари, генерованої в ПГ, залежить від кількості підведеного тепла і витрати поживної води. Потужність турбіни залежить від витрати і якості перегрітої пари і тісно пов'язана з потужністю реактора [2].

Принципова схема двоконтурної АЕУ представлена на рисунку 1.1.



M1 – органи регулювання нейтронної потужності ядерного реактора (регулюючі стержні); M2 – рган регулювання витрати поживної води (поживний клапан); M3 – орган регулювання перепаду тиску на поживному клапані; M4 – орган регулювання витрати пари на турбину (паровий клапан); M5 – запобіжний клапан для випадку, коли тиск пари перевищить допустиме (запобіжний орган регулювання); M6 – орган регулювання витрати теплоносія (ТН); N – нейтронна потужність %; Q<sub>p</sub> – теплова потужність, ВТ; T<sub>1</sub> – температура ТН на вході в ядерний реактор; T<sub>2</sub> – температура ТН на виході з ядерного реактора; T<sub>ПГВХ</sub> – температура ТН на вході в ПГ; T<sub>ПГВЫХ</sub> – температура ТН на виході з ПГ; v<sub>s</sub> – температура насиченої пари при цьому тиску; D<sub>П</sub> – витрата насиченої пари; ентальпія насиченої пари; D<sub>ПВ</sub> – витрата поживної води; i<sub>ПВ</sub> – ентальпія поживної води; i'' – ентальпія насиченої пари; D<sub>ПВ</sub> – витрата поживної води; I<sub>ПВ</sub> – ентальпія поживної води.

Рисунок 1.1 – Принципова схема АЕУ з ВВЕР

Рівняння балансу в АЕУ

$$N = Q_p = G_I \cdot C_{pm} (T_1 - T_2) = D_{П} (i'' - i_{П.В}), \quad (1.1)$$

де N – нейтронна потужність %;

T<sub>1</sub> – температура ТН на вході в ядерний реактор;

$T_2$  – температура ТН на виході з ядерного реактора;

$C_{pm}$  – середня теплоємність теплоносія;

$D_{II}$  – витрата насиченої пари;

$i_{пв}$  – ентальпія поживної води;

$i''$  – ентальпія насиченої пари.

### 1.3 Постановка задачі

Аналіз існуючого проекту ВВЕР-1000 не має в розпорядженні необхідного об'єму систем діагностики для аварійних режимів. Для успішного управління аваріями, пов'язаними з втратою запасу теплоносія оператор повинен мати в розпорядженні систему контролю рівня теплоносія в корпусі реактора. Відсутність можливості діагностики зміни рівня на реакторних установках ВВЕР-1000 значно обмежує загальну діагностику і адекватну реакцію оператора по безпечному управлінню аварійними процесами, що ведуть до часткового або потенційно небезпечного оголення активної зони реактора.

Для РУ ВВЕР- 1000 не передбачено універсальних засобів достовірного контролю запасу теплоносія в системі першого контуру, окрім як по рівню теплоносія в КТ. Контроль рівня теплоносія в КТ для аварій з втратою теплоносія не завжди є ефективним і показним засобом контролю запасу теплоносія в системі першого контуру і, тим більше, в активній зоні реактора. Для неконтрольованої течії теплоносія першого контуру – малих і середніх, рівень теплоносія в КТ найчастіше є засобом контролю запасу теплоносія в КТ і непрямим показником втрати запасу теплоносія в системі першого контуру. Рівень в КТ не може бути достатнім засобом контролю запасу теплоносія в корпусі реактора при розхолодженні в режимі природної циркуляції.

Таким чином, операторові завжди необхідно пам'ятати, що наявність високого рівня теплоносія в КТ, як і його відсутність не можуть бути однозначним показником достатності запасу теплоносія в системі першого контуру і активній зоні реактора. Контроль температури перегрівання

теплоносія на виході з активної зони реактора є останнім бар'єром непрямого контролю втрати запасу теплоносія, тобто після того, як оголення активної зони вже наступило і досягло критичних значень. Проектні невизначеності впливу швидкості розхолодження РУ в режимі природної циркуляції на утворення паро-газових порожнин із-за не рівномірності розхолодження кришки ВБ і корпусу реактора вимагають додаткового аналізу і даних експлуатаційного досвіду. Для аварійних режимів супроводжуваних скипанням теплоносія в системі першого контуру існує необхідність використовувати для діагностики запасу теплоносія в системі першого контуру засобів прямого виміру запасу теплоносія, які повинні забезпечувати оператора достовірною інформацією про зміну рівня теплоносія в корпусі реактора. Як найбільш прийнятні засоби діагностики межі розподілу фаз киплячого теплоносія в активній зоні реактора і циркуляційних петлях можуть використовуватися штатні перетворювачі виміру рівня теплоносія САПФІР, які широко використовуються як класичні засоби контролю рівня теплоносія в КТ і ПГ.

*Висновки.* В даному розділі розглянуто об'єкт автоматизації двоконтурної схема з реактором корпусного типу на теплових нейтронах і турбіна на насиченій парі, а також принцип роботи. Проведено аналіз існуючої системи регулювання рівня теплоносія, її недоліків для подальшої модернізації цієї системи.

## 2 МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ

### 2.1 Розробка математичної моделі об'єкта управління

#### 2.1.1 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:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\rho(t)N(t)}{l}, \quad (2.2)$$

де  $N(t)$  – нейтронна потужність;

$\rho(t)$  – реактивність;

$l$  – середній час життя миттєвих нейтронів.

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

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

В результаті лінеаризоване рівняння кінетики набуває вигляду:

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

Застосовуючи перетворення Лапласа, отримаємо передавальну функцію кінетики ядерного реактора без урахування запізнілих нейтронів:



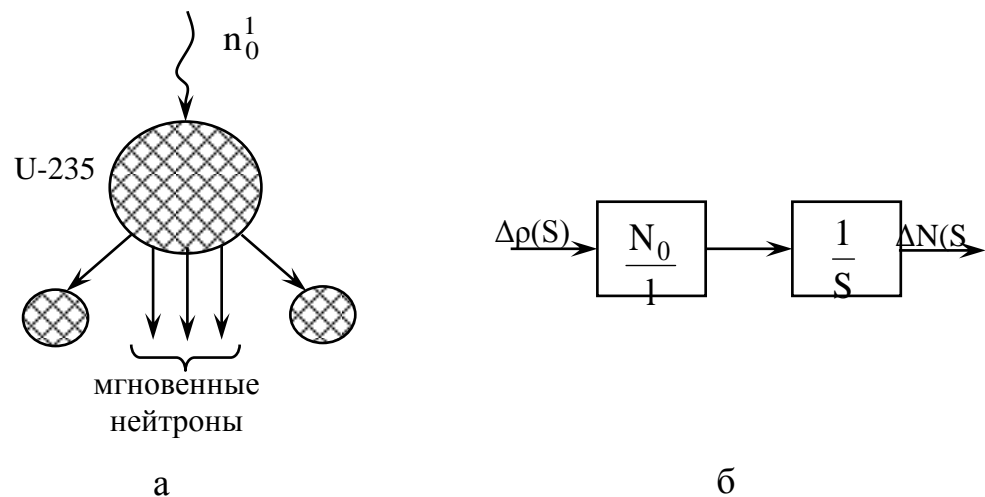
$$W_{\text{кин}}(S) = \frac{\Delta N(S)}{\Delta \rho(S)} = \frac{N_0}{1} \cdot \frac{1}{S}; \quad (2.5)$$

де  $N_0$  – стаціонарний (сталий) рівень потужності реактора;

$\frac{N_0}{1}$  – коефіцієнт, що залежить від рівня потужності і середнього часу

життя миттєвих нейтронів.

Структурна схема кінетики ядерного реактора представлена на рисунку 2.1.



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

б – структурна схема передавальної функції.

Рисунок 2.1 – Структурна схема кінетики ядерного реактора

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

Рівняння кінетики з урахуванням шести груп запізнених нейтронів мають вигляд:

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

де  $N$  – число нейтронів на  $1 \text{ см}^3$ ;  
 $\rho$  – реактивність;  
 $\beta$  – сумарна доля запізнілих нейтронів;  
 $\beta_i$  – частка  $i$ -ї групи запізнілих нейтронів;  
 $l$  – середній час життя миттєвих нейтронів;  
 $\lambda_i$  – постійна розпаду  $i$ -ї групи ядер попередників;  
 $C_i$  – концентрація ядер попередників  $i$ -ї групи.

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

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

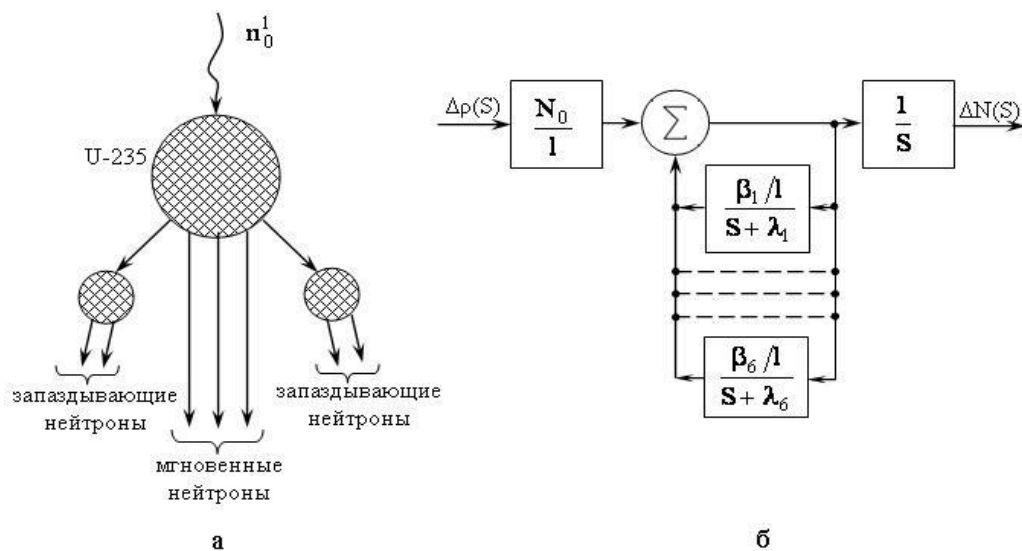
Для реакторів ВВЕР сумарна частка запізнілих нейтронів залежить від кількості Pu-239, що накопичується в активній зоні в процесі вигорання палива. До кінця кампанії  $\beta$  дещо зменшується, що призводить до більш сильного впливу зміни реактивності на зміну нейтронної потужності. У той же час постійні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

Передавальна функція кінетики ядерного реактора з одного осередненої групою запізнілих нейтронів

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

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

Структурна схема кінетики ЯР з урахуванням шести груп запізднучих нейтронів представлена на рисунку 2.2.



а – модель розподілу ядра U-235 з урахуванням запізнених нейтронів;

б – структурна схема кінетики ЯР.

Рисунк 2.2 – Структурна схема кінетики ЯР з урахуванням шести груп запізнених нейтронів

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

Вихідні дані:

- середній час життя миттєвих нейтронів  $l = 10^{-5}$  с;
- постійна розпаду осередненої групи нейтронів  $\lambda_7 = 0,077$  с;

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

– рівень потужності  $N = 30 \%$ .

$$T_1 = 255 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_2 = 265 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_{CP} = 260 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$C_{pm} = \frac{i}{T_{cp}} = \frac{1134.2}{260} = 4.362 \text{ кДж/ (кг}\cdot\text{град)} = 4362 \text{ Дж/ (кг}\cdot\text{град)};$$

$$(c\rho V)_{GOP} = 0.1664 \text{ Дж/град};$$

$$(c\rho V)_T = 0.57 \text{ Дж/град};$$

$$\alpha = 2700 \text{ Вт/м}^2;$$

$$G_I = 84800 \text{ м}^3/\text{час};$$

$$F = 4376,4 \text{ м}^2;$$

$$\Delta G_I = 0.$$

Передавальна функція кінетики ядерного реактора має вигляд:

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

Коефіцієнт посилення кінетики:

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

Постійна часу в області низьких частот:

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

Постійна часу в області низьких частот:

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

Таким чином, передавальна функція кінетики ЯР набуде вигляду:

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

Структурна схема кінетики представлена на рисунку 2.3.

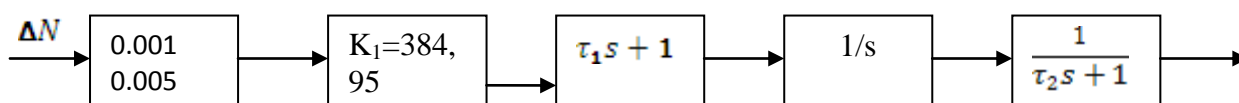


Рисунок 2.3 – Структурна схема кінетики ядерного реактора.

На рисунку 2.4 представлена побудова ЛЧХ кінетики ЯР.

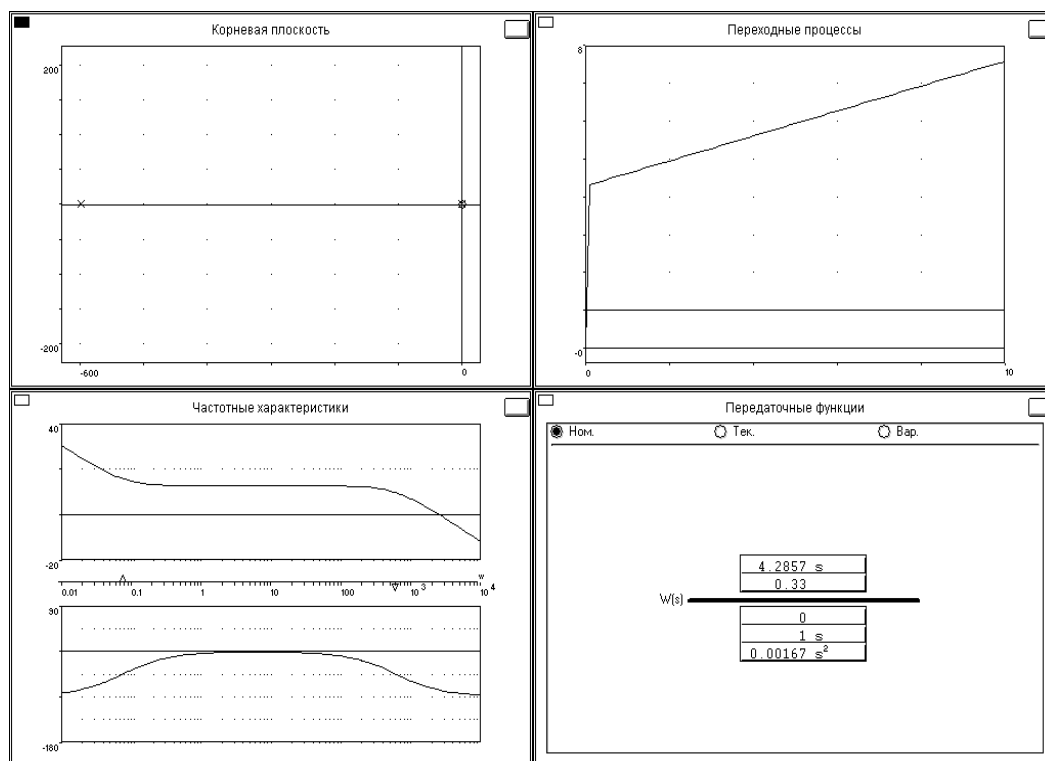


Рисунок 2.4 – Лінійна частотна характеристика кінетики ЯР

На підставі розглянутих співвідношень і графіків можна зробити такі висновки:

1) ПФ кінетики з урахуванням запізнілих нейтронів складається з чотирьох типових ланок: пропорційного, інтегруючого, форсує 1-го порядку і аперіодичного 1-го порядку.

2) Один корінь характеристичного рівняння дорівнює нулю  $S = 0$  – межа стійкості.

3) ЛЧХ відображає поведінку кінетики реактора в трьох областях частот:  
 – найбільш небезпечною областю з точки зору ядерної безпеки є область низьких частот. У цій області характеристика схожа на область ЛЧХ без урахування запізнілих нейтронів. Невелике вивільнення реактивності викликає експоненціальне зростання нейтронного потоку;

– в області середніх частот (ділянка, паралельний осі абсцис) не змінюється рівень потужності ні при яких змінах реактивності. Це спокійна область;

– в ній відсутня запізнювання по фазі (ця область служить для регулювання САК навіть в процесі роботи установки).

– область високих частот – це область спаду нейтронної потужності через вплив інерційності на гармонійне зміна реактивності.

4) Коефіцієнт посилення ПФ кінетики залежить від рівня потужності.

Тому перехід з однієї потужності на іншу викликає нестійкіші нелінійні коливання, обумовлені нелінійними явищами.

### 2.1.2 Математична модель теплообміну в ядерному реакторі

При математичному моделюванні теплообміну в ЯР важливо оцінити можливі похибки, що вносяться спрощеним розглядом процесу акумуляції тепла в матеріалі тепловиділяючого елемента і теплоносія.

В процесі побудови математичної моделі теплообміну в ЯР будемо користуватися наступними припущеннями:

1) Розглядається ЯР з одним циркуляційним контуром.

2) Теплофизические параметри: теплоємність, теплопровідність, щільність, коефіцієнт теплопередачі не залежать від часу і координат.

3) Нехтуються перетікання тепла уздовж довжини тепловиділяючого елемента в порівнянні з потоком тепла в радіальному напрямку, а також перетікання тепла в напрямку течії ТН за рахунок теплопровідності.

4) Розподіл швидкості теплоносія по перетину каналу приймається постійним.

5) Всі тепло виділяється в пальному (в паливі).

6) Не враховується маса металу корпусу реактора.

7) Розглядається зосереджена математична модель. Вона являє собою таку модель, яка як би стискається в точку, однак, їй присвоюються все характеристики реактора в цілому. Таким чином, активна зона (АЗ) являє собою канал, всередині якого знаходиться все пальне. На рисунку 2.5 представлена схема теплообміну в реакторі.

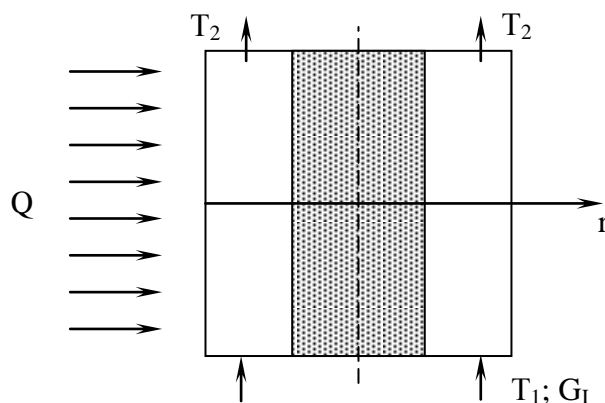


Рисунок 2.5 – Схема теплообміну в реакторі  
(еквівалентну перетин ТВС реактора)

Запишемо рівняння теплового балансу для каналу (ТВС):

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

$$(c\rho V)_{\text{T}} \cdot T_{\text{CP}}(t) = K \cdot F \cdot [\Theta_{\text{CP}}(t) - T_{\text{CP}}(t)] - G_1 C_{\text{pm}} [T_2(t) - T_1(t)], \quad (2.16)$$

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

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

$\rho$  – щільність, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – об'єм, м<sup>3</sup>;

$c$  – теплоємність пального, Дж/град;

$K$  – коефіцієнт теплопередачі;

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

$G_{\text{I}}$  – витрата ТН, кг/с;

$F$  – поверхню нагріву АЗ, м<sup>2</sup>;

$\Theta_{\text{CP}}$  – середня температура блоку пального, °С;

$T_1$  – температура ТН на вході в ядерний реактор, °С;

$T_2$  – температура ТН на виході з ядерного реактора, °С.

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

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  $K_1^* = \frac{1}{K \cdot F + 2G_{\text{I}} \cdot C_{\text{pm}}}$  (гр/Вт);

$$\tau_1^* = \frac{(c\rho V)_{\text{ГОР}}}{K \cdot F} (c); \quad \tau_2^* = \frac{(c\rho V)_{\text{T}}}{K \cdot F + 2G_{\text{I}} \cdot C_{\text{pm}}} (c); \quad (2.19)$$

$$K_2^* = \frac{2G_{\text{I}} \cdot C_{\text{pm}} - K \cdot F}{2G_{\text{I}} \cdot C_{\text{pm}} + K \cdot F}; \quad \tau_3^* = \frac{(c\rho V)_{\text{T}}}{2G_{\text{I}} \cdot C_{\text{pm}} - K \cdot F} (c). \quad (2.20)$$



Рівняння динаміки теплообміну в АЗ реактора:

$$\Delta T_2(S) = W_2(S)\Delta T_1(S) + W_3(S)\Delta Q(S) - W_4(S)\Delta G_1(S) \quad (2.21)$$

Передавальна функція  $W_2(S) = \frac{\Delta T_2(S)}{\Delta T_1(S)}$  характеризує зміну температури

ТН на виході з реактора в залежності від обурення температури ТН на вході в реактор.

Передавальна функція  $W_3(S) = \frac{\Delta T_2(S)}{\Delta Q(S)}$  характеризує зміну температури ТН

на виході з реактора в залежності від обурення теплової потужності;

$W_4(S) = \frac{\Delta T_2(S)}{\Delta G_1(S)}$  – 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 рисунку 2.6.

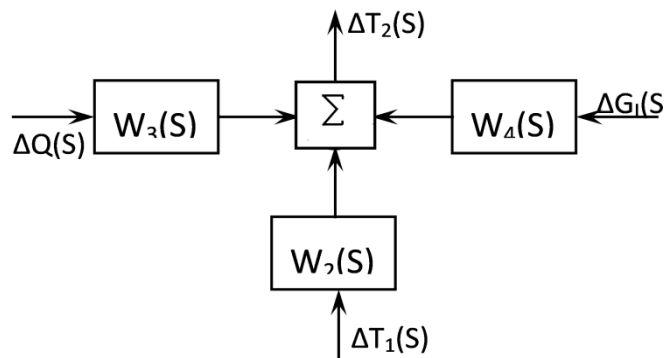


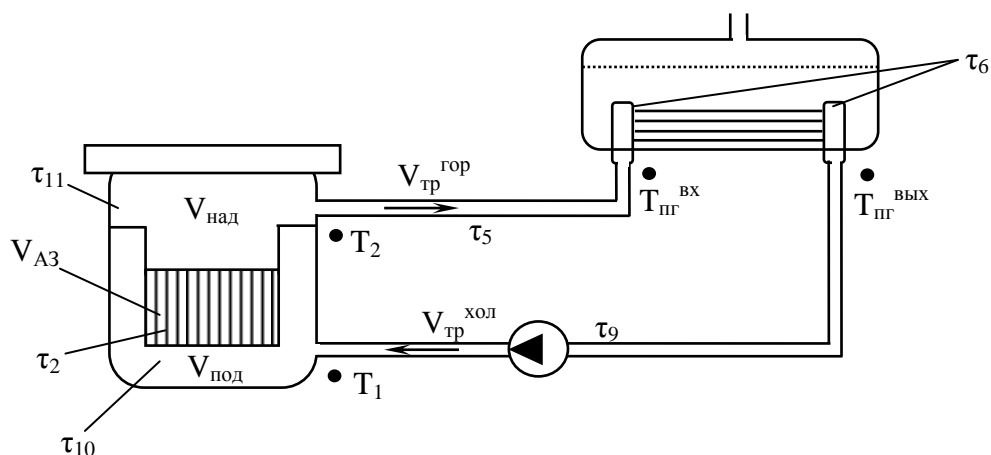
Рисунок 2.6 – Структурна схема теплообміну в активній зоні реактора

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.



$V_{\text{под}}$  – об’єм води під активною зоною;  $V_{\text{над}}$  – об’єм води над активною зоною;  $V_{\text{АЗ}}$  – об’єм води в активній зоні;  $V_{\text{тр}}^{\text{гор}}$  – об’єм води в «гарячому» трубопроводі;  $V_{\text{тр}}^{\text{хол}}$  – об’єм води в «холодному» трубопроводі;  
 $\tau_2, \tau_5, \tau_6, \tau_9, \tau_{10}, \tau_{11}$  – постійні часу запізнювання в згаданих обсягах.

Рисунок 2.7 – Принципова схема транспортних комунікацій

Як видно з рисунку 2.7 транспортні запізнювання в елементах першого контуру відбуваються через протяжності і обсягів комунікацій. Передбачається, 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:

$$T_2(t) = T_{\text{ВХ}}^{\text{ПГ}}(t + \tau_5) . \quad (2.22)$$

Графічна ілюстрація транспортного запізнювання представлена на рисунку 2.8.

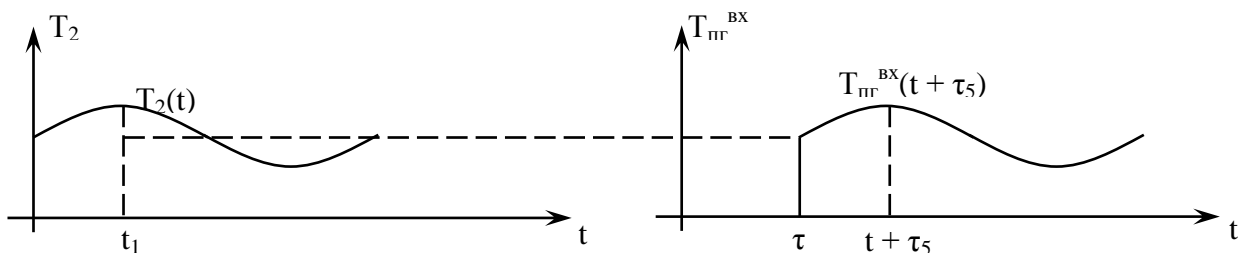


Рисунок 2.8 – Ілюстрація запізнювання в «гарячому трубопроводі»

Використовуючи теорему операційного числення про усунення аргументу оригіналу, отримаємо:

$$L[T_{\text{пр}}^{\text{BX}}(t + \tau_5) = \exp(-\tau_5 \cdot S)] \quad (2.23)$$

Час запізнювання  $\tau_5$ , рівний часу перенесення ТН в трубопроводі від реактора до ПГ, розраховується за формулою:

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

де  $V_{\text{гор}}^{\text{тр}}$  – обсяг ТН в «гарячому» трубопроводі, м<sup>3</sup>;

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

$G_I$  – масова витрата ТН, кг/с.

Розклавши функцію (2.24) в ряд Тейлора і нехтуючи вищими членами ряду, за винятком перших двох, отримаємо:

$$T_2(t) \approx T_{\text{пр}}^{\text{BX}}(t) + \tau_5 \frac{dT_{\text{пр}}^{\text{BX}}}{dt}. \quad (2.25)$$

Застосовуючи перетворення Лапласа, отримаємо наближену ПФ:

$$W_5(S) = \frac{T_{\text{ПГ}}^{\text{ВХ}}(S)}{T_2(S)} = \frac{1}{\tau_5 S + 1} \quad (2.26)$$

ПФ транспортного запізнювання ТН в трубах парогенератора:

$$W_6(S) = \frac{T_{\text{ПГ}}^{\text{ВЫХ}}(S)}{T_{\text{ПГ}}^{\text{ВХ}}(S)} = \frac{1}{\tau_6 S + 1}; \quad (2.27)$$

$$\tau_6 = \frac{V_{\text{КОЛ}}}{G_I/4} \cdot \rho = \frac{21 \cdot 705,965}{16864,36/4} = 3,52 \text{ с.} \quad (2.28)$$

ПФ транспортного запізнювання ТН в «холодному» трубопроводі:

$$W_9(S) = \frac{\Delta T_I(S)}{T_{\text{ПГ}}^{\text{ВЫХ}}(S)} = \frac{1}{\tau_9 S + 1}; \quad (2.29)$$

$$\tau_9 = \frac{V_{\text{ХОЛ}}^{\text{ТР}}}{G_I/4} \cdot \rho = \frac{14,92 \cdot 705,965}{16864,36/4} = 2,5. \quad (2.30)$$

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

Однак, в першому контурі має місце не тільки транспортний запаздивання, 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:

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

Передавальна функція перемішування ТН в нижній камері змішання реактора:

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

Передавальна функція перемішування в верхній камері реактора над АЗ:

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

2.1.4 Математична модель внутрішніх зворотних зв'язків в ядерному реакторі

При математичному моделюванні функціонування АЕУ розрізняють зовнішні і внутрішні зворотні зв'язки (33).

До зовнішніх ЗЗ відносяться зв'язку, які походять від зовнішнього автоматичного управління, тобто регулятори.

До внутрішніх ЗЗ відносяться такі невидимі зв'язки, які, заходів, в реакторі виражаються через зміну реактивності в залежності від температури палива, ТН і сповільнювач. Ці зв'язки відбуваються з так званих температурних коефіцієнтів реактивності (ТКР).

Розрізняють три види ТКР:

1) Температурний коефіцієнт реактивності при температурі палива  $\Theta$ :

$$\sigma_{\Theta} = \frac{\Delta \rho_{\Theta}}{\Delta \Theta_{\text{СР}}} \quad (2.34)$$

2) Температурний коефіцієнт реактивності при температурі ТН  $T_{\text{СР}}$

$$\sigma_T = \frac{\Delta\rho}{\Delta T_{CP}} . \quad (2.35)$$

3) Температурний коефіцієнт реактивності при температурі сповільнювача  $T_3$ :

$$\sigma_3 = \frac{\Delta\rho}{\Delta T_3^{CP}} . \quad (2.36)$$

Будемо вважати, що середня температура сповільнювача дорівнює середній температурі ТН. Тому при побудові математичної моделі внутрішньої ЗЗ будемо враховувати 2 температурних ефекта: ефект внутрішньої ЗЗ по температурі палива і по температурі ТН.

Рівняння балансу теплової енергії в реакторі:

$$(c_p V)_{ГОР} \cdot \frac{d\Theta_{CP}}{dt} = Q(t) - KF(\Theta - T_{CP}) . \quad (2.37)$$

З огляду на те, що  $\Theta_{CP} \gg T_{CP}$ , можна знехтувати  $T_{CP}$ .

$$(c_p V)_{ГОР} \frac{d\Theta_{CP}}{dt} + KF\Theta = Q(t) . \quad (2.38)$$

Застосовуючи перетворення Лапласа, отримаємо:

$$S\Delta\Theta(S) + \frac{KF}{(c_p V)_{ГОР}} \Delta\Theta(S) = Q(S) ; \quad (2.39)$$

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

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

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

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

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

$$\Delta T_{\text{СР}}(S) = \frac{\frac{KF}{(c\rho V)_{\text{Т}}}}{S + \frac{KF}{(c\rho V)_{\text{Т}}}} \cdot \Delta\Theta(S). \quad (2.43)$$

ПФ внутрішньої ЗЗ по температурі ТН:

$$W_{T\Theta}(S) = \frac{\Delta T_{\text{СР}}(S)}{\Delta\Theta_{\text{СР}}(S)}. \quad (2.44)$$

Структурна схема внутрішньої ЗЗ в реакторі представлена на рисунку 2.9.

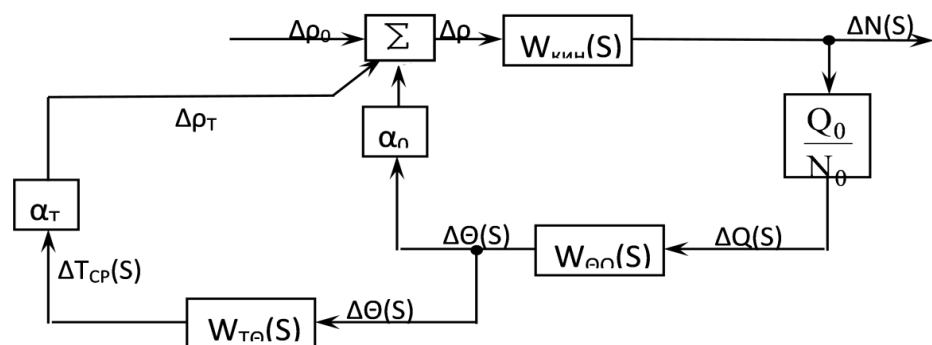


Рисунок 2.9 – Структурна схема внутрішньої ЗЗ в реакторі

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

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

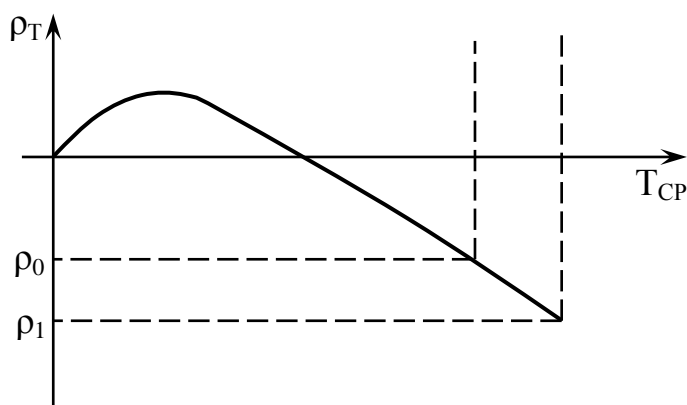


Рисунок 2.10 – Залежність реактивності від середньої температури.

## 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 дві послідовних ланки: ЯР і ПГ [4].

Для опису АЕУ використовуються математичні моделі, описані лінійними диференціальними рівняннями, і перетворюються в передаточні 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  $T_{cp} = \text{const}$ ;

при  $P_{II} = \text{const}$ .



### Базова програма управління АЕУ при $T_{cp} = \text{const}$

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 увелеченні потужності тиск пара в ПГ зменшується.

Переваги цієї програми такі:

- при  $T_{cp} = \text{const}$  і при негативному температурному коефіцієнті реактивності можливо саморегулювання;
- забезпечення в контурі постійної середньої температури теплоносія на всіх режимах роботи забезпечує сталість  $T_{cp}$  у всіх її елементах, тим самим температурне напруження і забезпечує довговічність реактора і ПГ.

$$Q_{nz} = kF(T_{cp} - v_s); \quad (2.48)$$

$$v_s = P_n; \quad (2.49)$$

$$P_n = T_{cp} - \frac{Q_{nz}}{kF}. \quad (2.50)$$

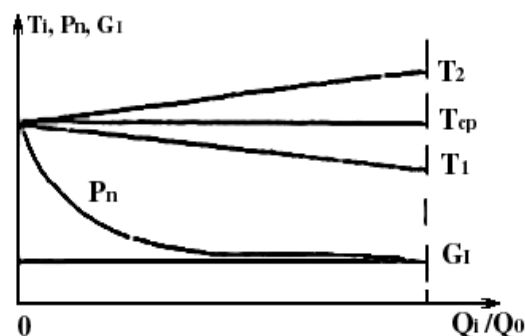


Рисунок 2.11 – Програма регулювання  $t_{cp}^{T/H} = \text{const}$

Система має наступні недоліки:

- для забезпечення підтримки  $T_{CP} = \text{const}$  необхідно застосовувати регулятори, які забезпечують підтримання самого параметра  $T_{CP} = \text{const}$ ;
- зі зменшенням потужності збільшується тиск пара і таким чином збільшується маса трубопроводів другого контуру і ПГ;
- зі зменшенням потужності не тільки збільшиться тиск пара на малих режимах, але і збільшується вологість насиченої пари;
- регулювання теплового параметра здійснюється шляхом впливу на завдання нейтронного потоку. Така схема збільшує інерційність ланцюга управління;
- зменшується швидкість переходного процесу; – зменшується запас на устійчивість САК;

Така тривалість може стати джерелом нестабільності. Базисні режими виконуються на схемах, в які вводиться роздільне управління.

Базова програма управління АЕУ при  $P_n = \text{const}$ .

На рисунку 2.12 представлений графік залежностей тиску пара, середньої температури теплоносія від зміни потужності ЯР.

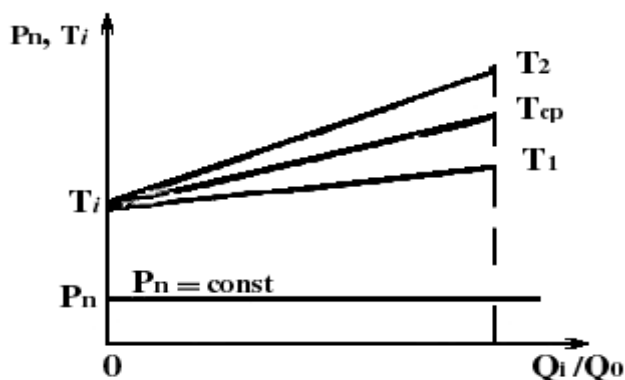


Рисунок 2.12 – Програма регулювання  $P_n = \text{const}$

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:

- а) відсутня самокерування;
- б) оскільки в процесі зміни режимів  $T_{cp}$  змінюється, то з'являється
- в) напруга в конструкції і, отже, зменшується надійність і довговічність;
- г) збільшується навантаження на СУЗ;
- д) погіршуються динамічні характеристики при скидах або збільшенні навантаження.

### 2.2.2 Система автоматичного регулювання потужності ядерного реактора

Системи автоматичного регулювання використовуються в тих випадках, коли необхідно протягом тривалого часу змінювати або підтримувати постійними будь-які фізичні величини, звані регульованими змінними (напруга, тиск, рівень, температуру, частоту обертання і т.д.), що характеризують роботу машини, технологічний процес або динаміку об'єкта, що рухається [4].

Автоматичне регулювання може бути організовано на основі двох основних принципів:

- принцип регулювання по відхиленню регульованої величини від заданого значення (принцип ЗЗ);
- принцип регулювання по обуренню (принцип компенсації).

Пристрої, що реалізують зазначені функції, називають автоматичними регуляторами. Для систем регулювання, що використовуються на енергоблоках, застосовуються регулятори, що реалізують такі закони регулювання:

- пропорційний (П);
- інтегральний (І);
- пропорційно – інтегральний (ПІ);
- пропорційно–інтегрально–диференціальний (ПІД);
- позиційний.

Далі наведені графіки перехідних процесів САК при різних законах регулювання та подачі на САК одиничної дії. Одиничним впливом називається поетапне вплив на САК (управляє або обурює).

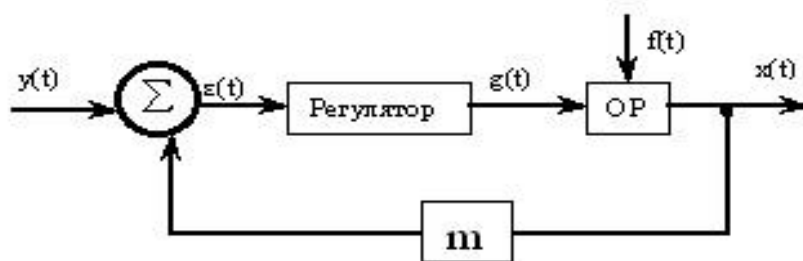
Величина одиничного впливу може бути довільною, але однаковою для всіх САК з різними законами управління.

Об'єктом регулювання є машина або установка, заданий режим роботи яких повинен підтримуватися регулятором за допомогою регулюючих органів.

Вплив регулятора на об'єкт регулювання носить назву керуючого впливу.

Зміни регульованих величин викликаються не тільки керуючими впливами, але і обурюють впливами, прикладеними до системи автоматичного регулювання, які прагнуть порушити необхідну функціональну зв'язок між керуючими впливами і регульованої змінної. Зовнішні впливи, прикладені до системи, призводять до того, що необхідні і дійсні значення регульованої величини відрізняються один від одного. Відхиленням регульованої величини називають різницю між значенням регульованої величини в даний момент часу і деяким фіксованим її значенням, прийнятим за номінальне.

САК з однієї регульованою величиною показана на рисунку 2.13.



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

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

$\varepsilon(t)$  – помилка регулювання;  $m$  – коефіцієнт пропорційності.

Рисунок 2.13 – Функціональна схема системи автоматичного керування за відхиленням

### 2.2.3 Регулятор нейтронної потужності атомної енергетичної установки

САУ АЕУ нейтронної потужності. Вимоги, що пред'являються до систем автоматичного регулювання потужності, наведені в роботі з опису системи автоматичного регулювання реактора і розрахунок елементів детально виконані САК нейтронної потужності є найпростішою системою для регулювання нейтронної потужності. Регулятор описаний в методичному посібнику [3].

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

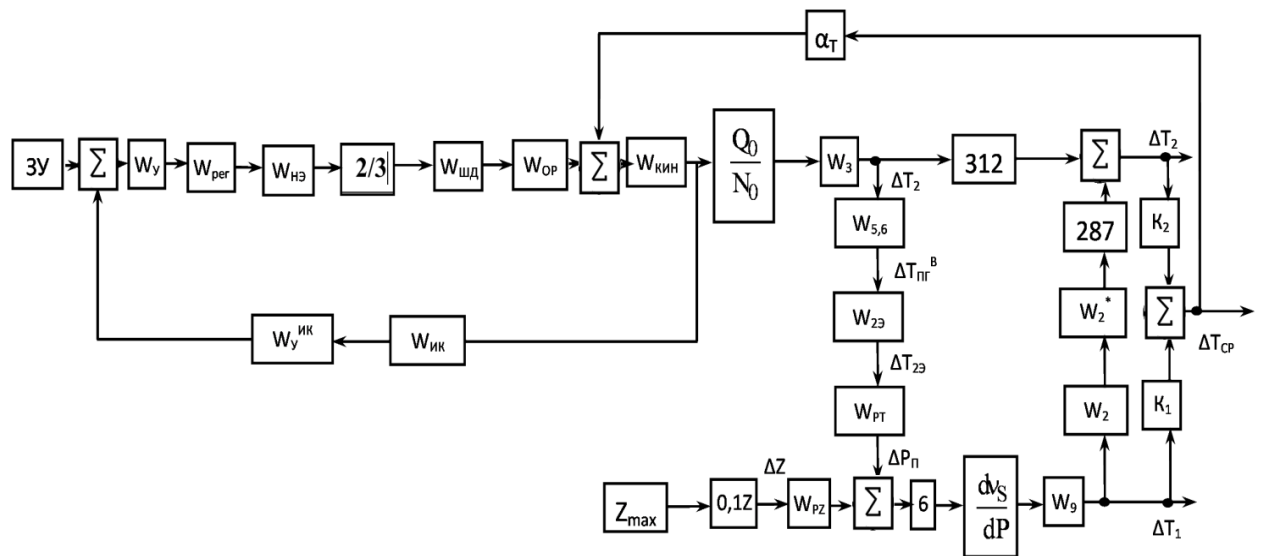


Рисунок 2.14 – Функціональна схема системи автоматичного керування нейтронної потужності (РРН)

Тут використано правило Крамера для отримання ПФ:

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

Схема САК потужності, представленої на рисунку 2.14, використовується на малій потужності до 10%  $N_{ном}$ . На цьому рівні потужності балансні температури  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_{ср}$  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 датчика 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:

$$\dot{z} = \frac{0,07\beta_{\text{эф}}H_{\text{АЗ}}}{\alpha K_{\text{см}}} = 0,245 \text{ м/с}; \quad (2.52)$$

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

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:

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

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:

$$K_{кин} \cong \frac{N_0 \lambda_T}{\beta_{эф}} \equiv N_0 . \quad (2.54)$$

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

Передавальна функція крокової двигуна як виконавчого механізму:

$$W_{шд}(s) = \frac{\Delta Z(s)}{\Delta \dot{Z}_R(s)} = \frac{K_{шд}}{s} . \quad (2.55)$$

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

$$K_{шд} = \frac{Z}{\dot{Z}} = \frac{12,5 \text{ см}}{0,245 \cdot 10^2 \text{ см}} = 0,5 . \quad (2.56)$$

Висновки з безпеки САК нейтронної потужності:

а)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  $\alpha_T \rightarrow 0$ .

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

в)САК нейтронної потужності має велику статичну помилку через вигорання  $V^{10}$  в іонізаційних камерах.

г)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:

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

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

є) Вивчивши основні характеристики елементів контуру, перейдемо до дослідження структурної схеми в цілому. Перша вимога, що пред'являється до САК, полягає в її безумовній 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

Система автоматичного управління АЕУ залежить від програми блоку. На вибір програми впливають фізичні особливості реактора. Наприклад, велика зміна температури теплоносія в ВВЕР може привести до необхідності компенсації великих змін реактивності, що ускладнює систему управління і знижує безпеку експлуатації реактора. За програмою  $T_{CP} = const$  температура на виході реактора зростає, а на вході падає з ростом потужності. Так як перепад між температурою теплоносія на виході і температурою насичення другого контуру зростає при збільшенні потужності, то температура і тиск насиченої пари падають з ростом потужності блоку:

$$Q_{III} = K\Delta TF ; \quad (2.58)$$

$$\frac{Q_{III}}{KF} = (T_{cp} - v_s) ; \quad (2.59)$$



$$v_s = T_{cp} - \frac{Q_{III}}{KF} . \quad (2.60)$$

Програма  $T_{cp} = const$  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 потужностях, 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 великий, ККД також низький через значний перепад тиску на регулюючих клапанах, що крім того, збільшує їх знос. Зазначені недоліки призвели до того, що на практиці при зниженні потужності задане значення  $T_{cp}$  знижувалося вручну.

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

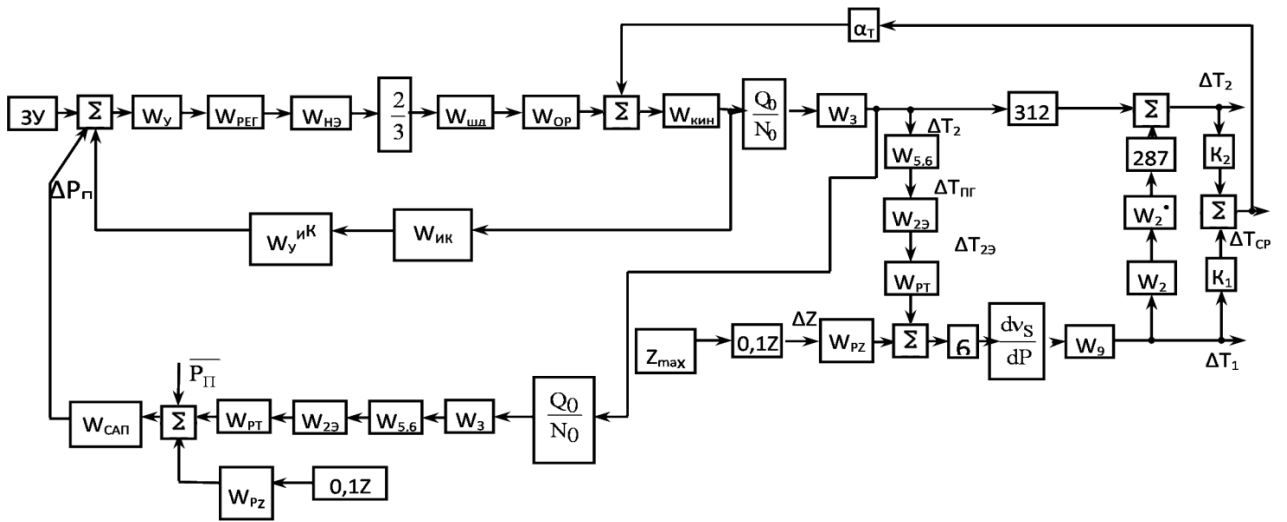


Рисунок 2.15 – Система автоматичного управління потужності ядерної паро генеруючої установки при  $T_{CP} = const$  в режимі РРТ

### 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.

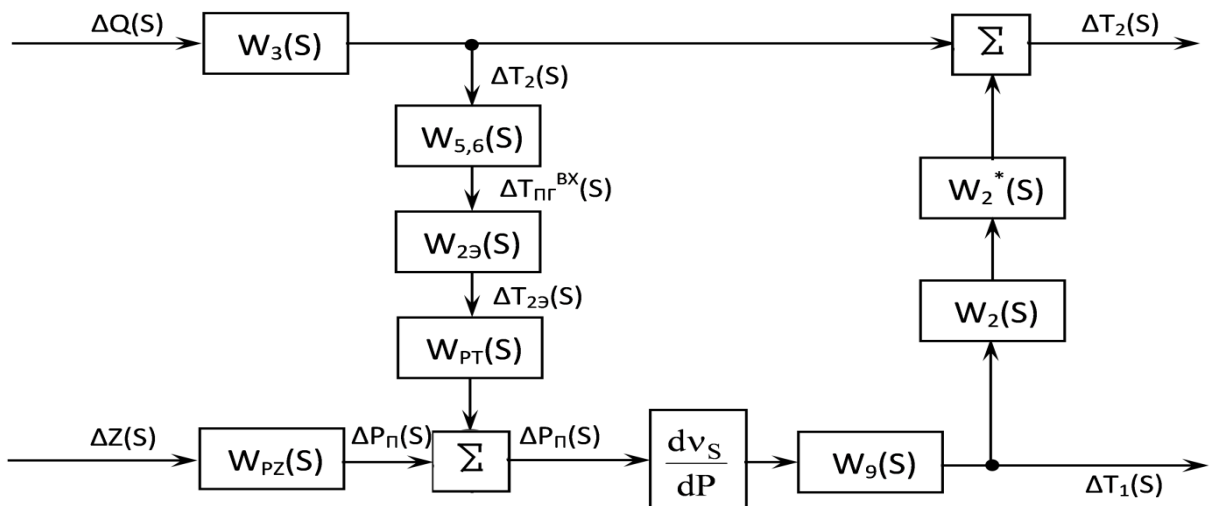


Рисунок 2.16 – Структурна схема (теплова частина)

Рівняння багатовимірної системи:

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

Введемо позначення:

$$A = W_2^*(S) \cdot W_2(S); \quad (2.61)$$

$$B = W_{5,6}(S) \cdot W_{2\varnothing}(S) \cdot W_{PT}(S) \cdot \frac{dv_s}{dP} \cdot W_9(S); \quad (2.62)$$

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

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.

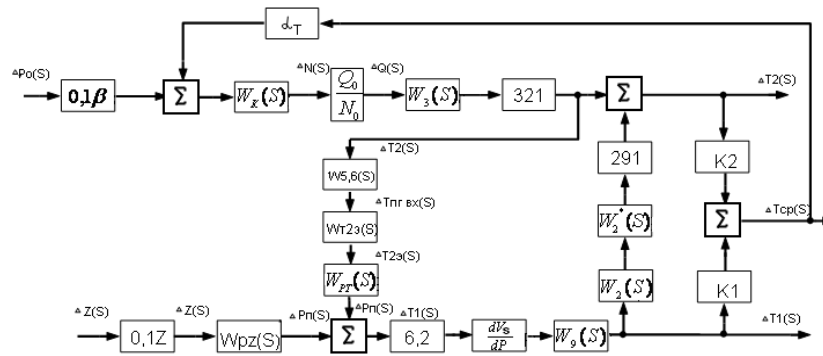


Рисунок 2.17 – Структурна схема АППУ

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

$$W_{T_{CP}}^Z(S) = \frac{\Delta T_{CP}(S)}{\Delta Z(S)} = \frac{1}{2} (\Delta_{T_1}^Z + \Delta_{T_2}^Z) \quad (2.69)$$

*Висновки.* В даному розділі розроблені математичні моделі об'єкта управління, а також багатовимірна структурна схема АППУ.

### 3 СТРУКТУРНА СХЕМА АСУ ТП

На верхніх рівнях знаходиться щити управління, далі йдуть обчислювальні комплекси, які здійснюють обробку інформації для щитів управління. Далі йде ряд локальних підсистем. Вони не є повністю самостійними, так як вони тісно пов'язані між собою каналами обміну інформацією і команд. Це пояснюється тим, що елементи атомної енергетичної установки пов'язані між собою взаємообумовлених потоками енергії і зміни в режимі роботи одного елемента безпосередньо позначаються на роботі іншого елемента.

Система автоматичного регулювання окремих параметрів енергоблоку як складові частини відповідних систем управління виконують такі функції:

- підтримання відповідних параметрів на заданому рівні;
- підтримання відповідності між взаємопов'язаними величинами;
- зміна регульованої величини в часі за певним законом.

Для забезпечення виконання заданих функцій в складі автоматизованої системи управління технологічним процесом в даний час широко використовується цифрова обчислювальна техніка, яка залучається як для збору і обробки інформації, так і для формування керуючих сигналів.

АСУ ТП енергоблока з реактором ВВЕР–1000 є його складовою і невід'ємною частиною при експлуатації установки і призначена для виконання наступних функцій [6]:

1) Інформаційні:

- збір і обробка технологічної інформації і представлення її в різні функціональні підсистеми і оперативному персоналу;
- розподіл інформації про роботу обладнання і про хід технологічного процесу;
- виконання розрахунків пов'язаних з ефективністю роботи енергоблоку.

2) Керуючі – формування дій на обладнання енергоблоку. Ця функція

здійснюється у вигляді дистанційного і автоматичного управління механізмами і арматурою, автоматичного регулювання і технологічного захисту.

4) Допоміжні забезпечують власну життєздатність системи. Вони реалізуються на наступних допоміжних підсистемах:

- система перевантаження палива;
- система пуско–налагоджувальних вимірювань реакторної установки;
- система виявлення дефектів збірок ТВЕЛ;
- система випробування гермооболочки;
- система експериментального контролю турбіни;
- спеціалізований комплекс для проведення спостережень при пуску ядерного реактора та інші системи.

На рівні енергоблоку здійснюється ведення основного і допоміжного технологічних процесів – управління електричними пристроями, координація роботи обладнання енергоблоку, оперативний контроль радіаційної безпеки блоку.

Аналізуючи обстановку, що склалася в даний час на великих підприємствах і особливо на АЕС, стає очевидно, що розробка АСУ ТП є першочерговим завданням при проектуванні будь–якого промислового об'єкта.

Для зручності розробки, поставки, монтажу, налагодження та експлуатації АСУ ТП їх умовно поділяють на підсистеми.

- підсистема технологічного контролю;
- підсистема ядерно–фізичного контролю;
- підсистема технологічної та аварійної сигналізації;
- підсистема технологічних захистів і блокувань;
- підсистема дистанційного керування;
- підсистема автоматичного регулювання.

Кожна підсистема забезпечує контроль і управління частиною об'єкта або об'єднує технічні засоби, що виконують якусь одну певну функцію.

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);
- сигналізації 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 проектній послідовності руху груп;



- переміщує групи ОР при автоматичному регулюванні потужності по сигналах регулятора АРМ в жорсткій проектній послідовності;
- переміщує в будь-якому напрямку будь-яку (одну) групу ОР по ініціативі 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 проектній 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.;
- пристрій 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 магі-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 УКІ-А2 знаходяться 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 здійснюється виключно по дубльованій лінії комунікації УКІ. Крім цієї лінії комунікації до УКІ-А2 підключено тільки напруга живлення (за двома вводи 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 автоматичного 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 послідовність 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 останній ДР не досягне кінцевого положення. Раніше досягли кінцевих положень ЗР зупиняються індивідуальними кінцевими вимикачами.

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. Система 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 принципу «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 живлення 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'язку);

– 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 уоі 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 БЦУ, РЦУ і ППМ і обслуговуючому персоналу в оптичному і акустичному вигляді;

– безперервна реєстрація поточних значень потужності і періоду;

– безперервна діагностика стану технічних засобів і подання отриманої інформації операторам БЦУ 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 РЦУ для РЦУ.

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;
- поканальне завдання уставок захисту по нвантаженню та періоду;
- 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 апаратури для контролю зсуву ротора ВВК–331, КСА–15 і датчиків положення ДПОЗ і ДПСМ.

Для теплотехнічного контролю на ЕБ АЕС використовуються дотримувані 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  $107\% N_{\text{ном}}$ ;
- тиск першого контуру над активною зоною більше  $180 \text{ кгс/см}^2$ ;
- зменшення різниці температури насичення теплоносія першого контуру і максимальної його температури в гарячій нитці будь петлі менш  $100\text{C}$ ;
- тиск над активною зоною реактора:
  - а) менше  $140 \text{ кгс/см}^2$  при температурі теплоносія в гарячих нитках петель більш  $260^{\circ}\text{C}$ ;
  - б) менше  $148 \text{ кгс/см}^2$  при температурі теплоносія в гарячих нитках петель більш  $260^{\circ}\text{C}$  і потужності реактора більше  $75\% N_{\text{ном}}$ ;
- зростання тиску під оболонкою більше  $0,3 \text{ кгс/см}^2$  надлишкового;
- сейсмічна дія на рівні землі більше 6 балів;

- обесточиваніє двох ГЦН з будь-якого числа працюючих при нейтронної потужності більше 75%  $N_{\text{ном}}$  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%  $N_{\text{ном}}$ ;
- зниження перепаду тисків будь-якого з чотирьох ГЦН з 3 кгс/см<sup>2</sup> до 2,5 кгс/см<sup>2</sup> 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 паропроводів:
  - а) різницю температур насичення першого і другого контурів 750 °С;
  - б) тиск в паропроводі менше 50 кгс/см<sup>2</sup>;
- 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<sup>2</sup> при працюючому ГЦН відповідної петлі. Сигнал шунтирується 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<sup>2</sup>;
- тиск другого контуру більше 70 кгс/см<sup>2</sup>;
- 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 працюючих ТПН. Розвантаження здійснюється до заданого рівня потужності (10%  $N_{\text{ном}}$  / 49%  $n_{\text{доп}}$ ) пристроєм РОМ;
- посадка двох з чотирьох СК ТГ. Розвантаження до 39%  $N_{\text{ном}}$  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<sup>2</sup>.

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<sup>2</sup>;
- зменшення тиску масла на регулювання менше 7 кгс/см<sup>2</sup>;
- зменшення тиску масла на редуктор ТПН менше 0,3 кгс/см<sup>2</sup>;
- зменшення тиску масла на змащення ТПН менше 0,6 кгс/см<sup>2</sup>;
- зменшення тиску води на вході головного насоса менше 36 кгс/см<sup>2</sup>;
- збільшення тиску води на виході головного насоса більше 120 кгс/см<sup>2</sup>;
- збільшення тиску пара в ГК більше 0,6 кгс/см<sup>2</sup>;
- збільшення тиску води в камері розвантажувального барабана більш 14 кгс/см<sup>2</sup>;
- збільшення витрат через ТПН більше 4900 м<sup>3</sup>/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 сходиною автоматичного управління обладнанням і вступають в роботу, коли інші засоби не впоралися з підтриманням заданого режиму роботи установки.

Технологічні блокування (ТБ) призначені для попереджування 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, 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 шістьсот 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 переобранім виконанні. В якості основних джерел інформації використовуються первинні перетворювачі «Сапфір–22» з тензочувствительності 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 розгруження 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 осьовий 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 призначена для управління турбіною у всіх режимах роботи блоку. Вплив 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 ПІДГРІВАЧІ НИЗЬКОГО ТИСКУ

### 4.1 Регулятор рівня в підігрівачі низького тиску – 3

#### 4.1.1 Призначення регенеративної установки низького тиску і її опис

Регенеративна установка низького тиску призначена для підігрівання основного конденсату турбоустановки, що подається КЕН– I–ой і II–го ступеня з конденсаторів в деаератори.

Підігрів основного конденсату в ПНТ змішувального типу здійснюється шляхом його безпосереднього контакту з гріючою парою, в ПНТ поверхневого типу – через поверхню трубної системи. Гріючий пар подається з відборів турбіни. У регенеративної установки низького тиску застосована схема, яка використовує ПНТ поверхневого типу, в якій по поверхневому принципом працює ПНТ – 1,2,3,4. Першою сходинкою системи регенерації є ПНТ–1, куди КН– I ступені подається конденсат турбіни, при цьому він попередньо проходить через охолоджувач пара ущільнень. Далі в ПНТ–1 за рахунок різниці висотних відміток установки ПНТ–1 і ПНТ–2 самопливом зливається в ПНТ–2. З ПНТ–2 конденсат відкачується КН–II ступені в деаератори, після–попередньо підігріваючись в ПНТ–3,4. Температура основного конденсату на вході в деаератори при номінальному навантаженні турбоустановки становить приблизно 153 °С. [22]

#### 4.1.2 Підігрівач низького тиску –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.

Гріючий пар через трубу 4 (Dy 1000) подається в міжтрубний простір підігрівача по всій його висоті, з боку другого ходу основного конденсату і рухається паралельними потоками в сторону пристрою відводиться не скондесувалися 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 скондесувалися 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 воздушником.

#### 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 положенню ІМ, а в режимі підтримки тиску використовується ПІ–закон регулювання.

##### 2) Регульований параметр.

Рівень конденсату в корпусі ПНТ–3. Похибка регулювання в межах  $\pm 50$  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 ПІ положення ІМ.

При відмові вимірювання по електричній 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.»;
- ступень відкриття RN51S01 по відношенню до RN50S01 менше 15%.

[9].

#### 4.1.4 Склад регулятора рівня в підігрівачі низького тиску–3 призначення блоків

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

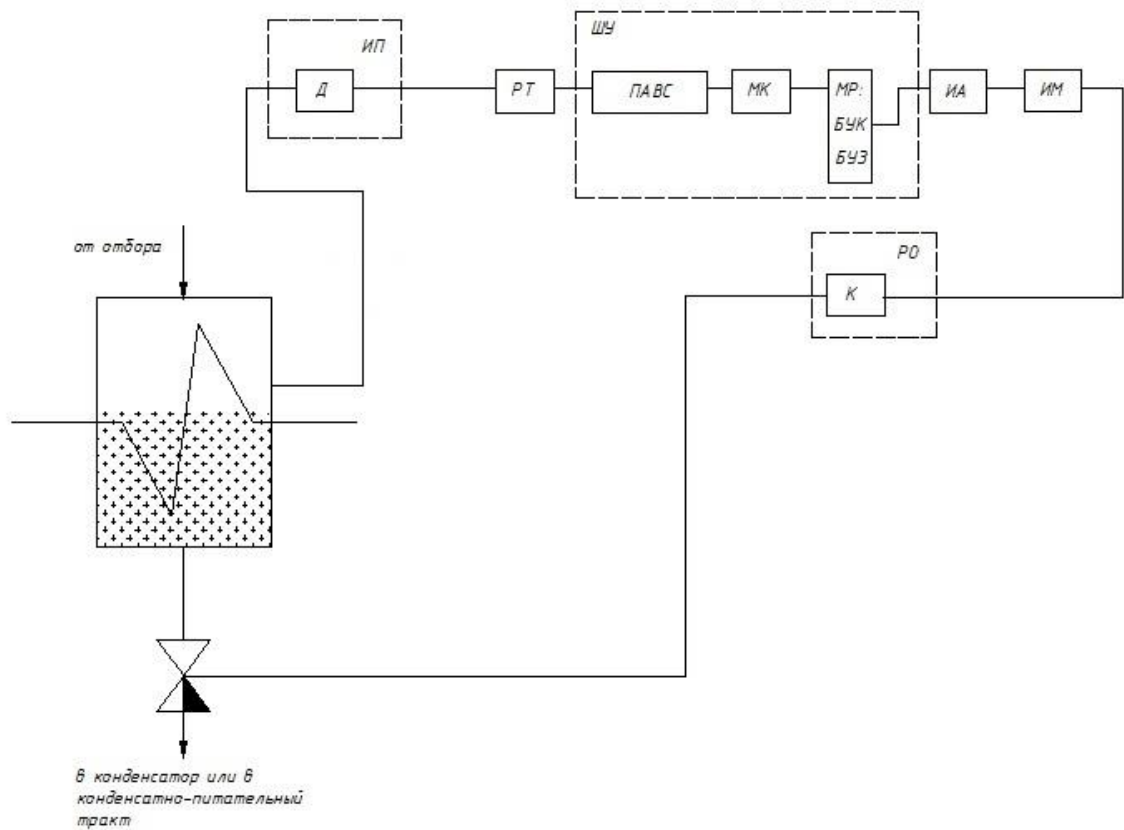


Рисунок 4.1 – Структурная схема регулятора рівня підігрівачі низького тиску-

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 мікроконтролерні пристрій і вісім каналів перетворення гальванічески 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 інформацією 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 інформації у вигляді сигналу постійної напруги позитивної (щодо загального провідника дискретного входу) полярності.

Пристрій видачі дискретної інформації здійснює Комутацію 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 виробу.

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 виконавчим 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 регулюючого 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  $0^\circ - 90^\circ$ ,  $0^\circ - 240^\circ$ ;
- 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 підігрівачі низького тиску – 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 електричній 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 систем автоматичного керування 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)  $x_p(t)$  і відхиленням регульованої величини  $\Delta x(t) = x_z(t) - x_{вих}(t)$  або її функціоналом (похідна, інтеграл та інші)  $x_p(t) = f[\Delta x(t)]$ .

Зазначена математична залежність, як впливає з визначення, може бути пропорційною, диференціальною, інтегральною або комбінованою (пропорційно–диференціальною, пропорційно–інтегральною, пропорційно–інтегрально–диференціальною). 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 прийняттого закону регулювання зводиться до відшукування 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:

$$T_1 \frac{dx_{eux}(t)}{dt} + x_{eux}(t) = k \cdot x_{ex}(t - \tau) \quad . \quad (4.1)$$

2) Рівняння об'єкта при впливі регулятора:

$$T_1 \frac{dx_{eux}(t)}{dt} + x_{eux}(t) = \varepsilon \cdot [x_{ex}(t) - x_p(t)] \quad . \quad (4.2)$$

3) Рівняння кривої розгону:

$$x_{eux}(t) = k \cdot A \cdot \left(1 - \left(1 + \frac{t}{T_1}\right) \cdot e^{-\frac{t+\tau}{T_1}}\right) \quad . \quad (4.3)$$

Параметри системи автоматичного керування зведені в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри САК.

$T_1$	$T_2$	$k$	$\tau$	$X_{вх}=A$	$k_p$	$T_{и}$	$T_{пр}$
0,45	–	0,3	0,75	1,7	0,6	0,4	10,8

Розрахункова структурна схема САК зображена на рисунку 4.2.

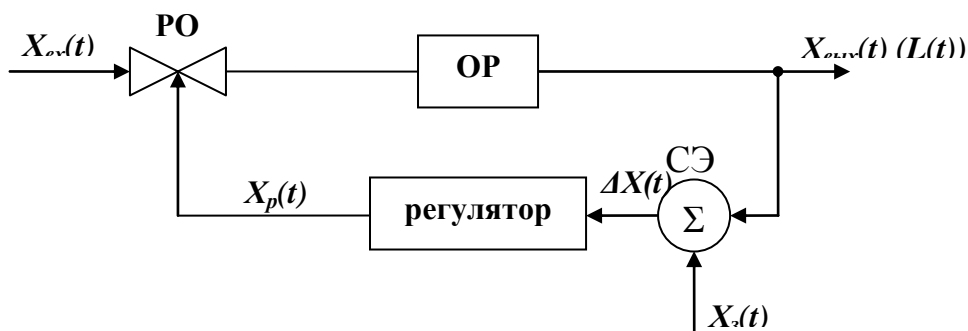


Рисунок 4.2 – Розрахункова структурна схема системи автоматичного керування

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:

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

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

Таблиця 4.2 – Залежність  $X_{\text{вих}}$  от  $t$ 

$t$	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$X_{\text{вих}}$	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 характеристики визначаються параметри об'єкта:

1) Ступінь (коефіцієнт самовирівнювання):

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

3) Час запізнювання:

$$\tau = 0,13 \text{ с.}$$

4) Швидкість розгону:

$$\varepsilon = \frac{X_{\text{вых}}}{X_{\text{вх}} \cdot T_l} = \frac{0,51}{1,7 \cdot 0,45} = 0,667 \quad . \quad (4.5)$$

На рисунку 4.3 зображено графік розгінної характеристики ОК.

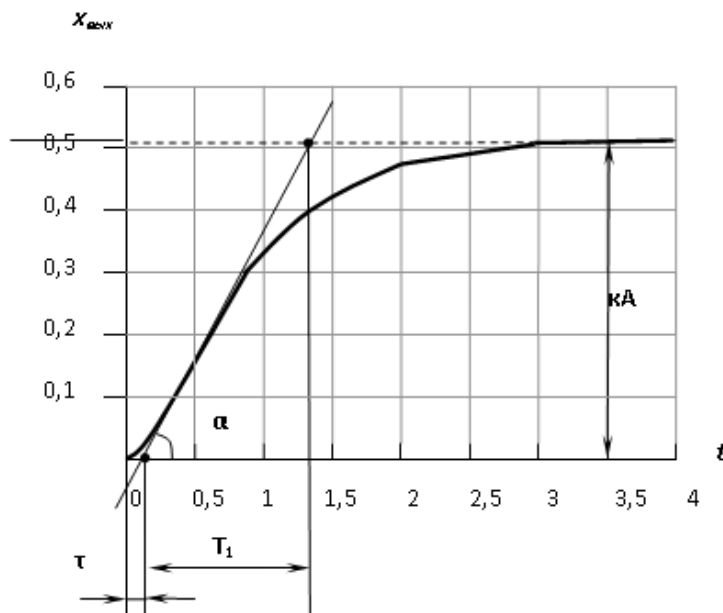


Рисунок 4.3 – Розгонна характеристика ОК.

Залежно від форми розгінної характеристики все ЗР діляться на:

– об'єкти з самовирівнюванням;

– об'єкти без самовирівнювання.

Самовирівнювання – це властивість об'єкта після виникнення обурення 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:

$$T_1 \cdot \frac{d_{e_{ux}}(t)}{dt} + X_{e_{ux}}(t) = \varepsilon \cdot [X_{ex}(t) - X_p(t)] . \quad (4.6)$$

Рівняння П-регулятора:

$$\begin{cases} T_1 \cdot \frac{d_{e_{ux}}(t)}{dt} + X_{e_{ux}}(t) = \varepsilon \cdot [X_{ex}(t) - X_p(t)] \\ X_p(t) = K_p \cdot X_{e_{ux}}(t) \end{cases} . \quad (4.7)$$

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

$$\frac{T}{\varepsilon} \cdot \frac{d^2 X_{e_{ux}}(t)}{dt^2} + \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{dX_{e_{ux}}(t)}{dt} + K_p \cdot \frac{dX_{e_{ux}}(t)}{dt} = \frac{dX_p(t)}{dt} . \quad (4.10)$$

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

$$\frac{d_{e_{ux}}(t)}{dt} = 0 .$$

Тому рівняння (4.10) перетвориться в однорідне диференціальне рівняння:

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

Запишемо рівняння (4.11) в операторній формі:

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

Таким чином, отримали коріння характеристичного рівняння:

$$S_1 = 0$$

$$S_2 = -3,13$$

Загальне рішення диференціального рівняння матиме наступний вигляд:

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

Для визначення  $C_1$  і  $C_2$  вибираємо початкові умови  $t = 0$ :

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

Таким чином, отримуємо:

$$X_{\text{вих}}(t) = 0,36 - 0,36 \cdot e^{-3,13t} . \quad (4.14)$$

Переймаючись значеннями часу  $t$  від 0 до  $\infty$  побудуємо графік перехідного процесу САК з регулятором П-типу.

Отримані значення зведемо в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Залежність  $X_{\text{вих}}$  від  $t$ 

t	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$X_{\text{вих}}$	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 4.4.

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):

$$T_1 \cdot \frac{d_{\text{вих}}(t)}{dt} + X_{\text{вих}}(t) = \varepsilon \cdot [X_{\text{вх}}(t) - X_p(t)].$$

Рівняння І– регулятора:

$$\begin{cases} T_1 \cdot \frac{d_{\text{вих}}(t)}{dt} + X_{\text{вих}}(t) = \varepsilon \cdot [X_{\text{вх}}(t) - X_p(t)] \\ X_p(t) = \frac{K_p}{T_u} \cdot \int_0^{\infty} X_{\text{вх}}(t) dt . \end{cases} \quad (4.15)$$

Далі продифференціюємо обидва рівняння:

$$\frac{T_1}{\varepsilon} \cdot \frac{d^2 X_{\text{вих}}(t)}{dt^2} + \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{dX_{\text{вих}}(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_u} X_{\text{вх}}(t) = 0 . \quad (4.16)$$

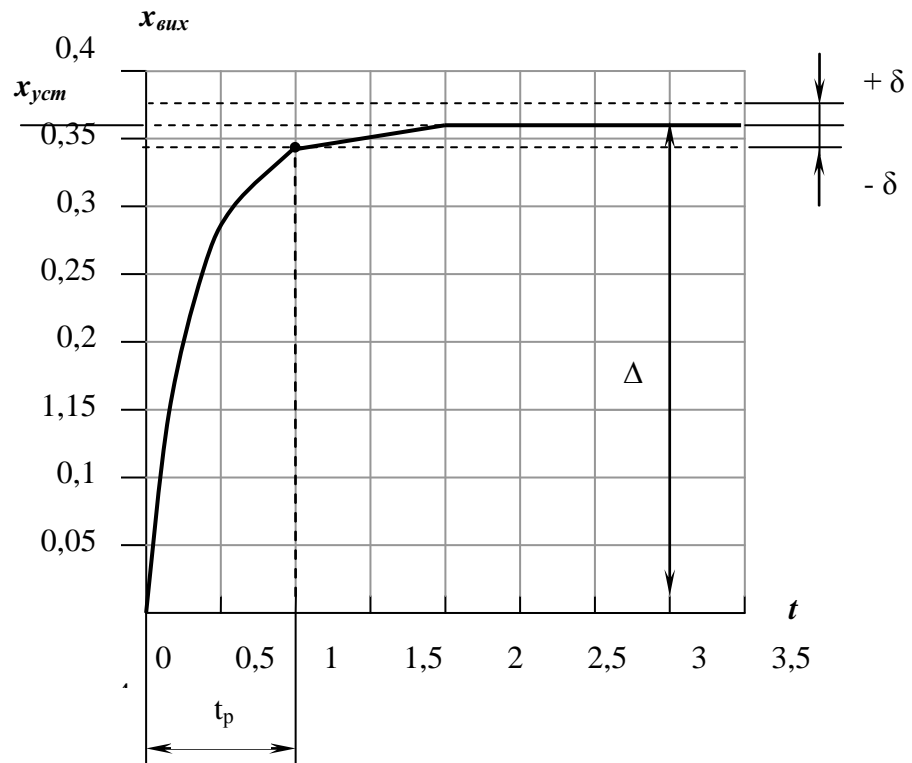


Рисунок 4.4 – Графік перехідного процесу системи автоматичного керування з регулятором П – типу

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

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

Тоді характеристичне рівняння всієї системи матиме такий вигляд:

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

$$0,45 S^2 + S + 1 = 0.$$

Знайдемо коріння характеристичного рівняння:

$$D = 1 - 4 \cdot 0,45 \cdot 1 = -0,8.$$



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

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

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

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

Таким чином, отримуємо:

$$X_{вих} = e^{-1,1 t} (1,141 \cdot \sin(0,9938t)) \quad (4.19)$$

Переймаючись значеннями часу  $t$  від 0 до  $\infty$  побудуємо графік перехідного процесу САК з регулятором І – типу.

Отримані значення зведемо в таблицю 4.4.

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

$t$	0	0,8	2	4	6	8	10
$X_{вих}$	0	0,34	0,11	-0,001	0	0	0

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

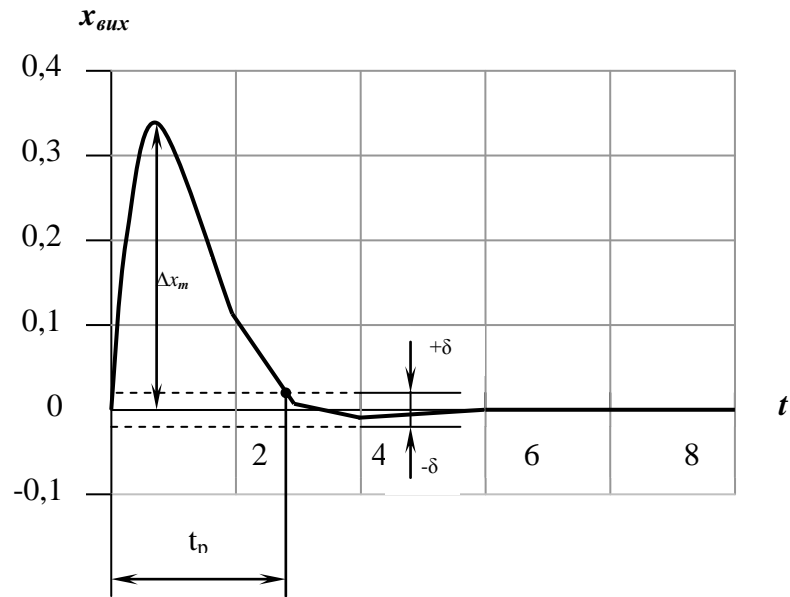


Рисунок 4.5 – Графік перехідного процесу системи автоматичного керування с регулятором І–типу

Побудова перехідного процесу САК з регулятором ІІІ – типу.

Рівняння ЗР з урахуванням регулюючого впливу (4.6):

$$T_1 \cdot \frac{d_{\text{вых}}(t)}{dt} + X_{\text{вых}}(t) = \varepsilon \cdot [X_{\text{ex}}(t) - X_p(t)].$$

Рівняння ІІІ – регулятора:

$$\begin{cases} T_1 \cdot \frac{d_{\text{вых}}(t)}{dt} + X_{\text{вых}}(t) = \varepsilon \cdot [X_{\text{ex}}(t) - X_p(t)] \\ X_p(t) = K_p \cdot X_{\text{вых}}(t) + \frac{K_p}{T_u} \cdot \int_0^{\infty} X_{\text{вых}}(t) dt \end{cases} \quad (4.20)$$

Тоді характеристичне рівняння всієї системи матиме такий вигляд:

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

Таким чином, отримали коріння характеристичного рівняння:

$$S_1 = -2,75;$$

$$S_2 = -0,81.$$

Загальне рішення диференціального рівняння матиме дотримуюся щий вид:

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

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

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

Таким чином, отримуємо:

$$X_{вих}(t) = -0,58 \cdot e^{-2,75t} + 0,36 \cdot e^{-0,81t} \quad (4.23)$$

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

Отримані значення зведемо в таблицю 4.5.

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

t	0	0,8	2	4	6	8	10
$X_{вих}$	0	0,245	0,115	0,02	0,009	0	0

Графік перехідного процесу САК с регулятором ПІ – типу зображений на рисунку 4.6.

Побудова перехідного процесу САК з регулятором ПД – типу.

Рівняння ЗР з урахуванням регулюючого впливу (4.6):

$$T_1 \cdot \frac{dX_{\text{вих}}(t)}{dt} + X_{\text{вих}}(t) = \varepsilon \cdot [X_{\text{ex}}(t) - X_p(t)].$$

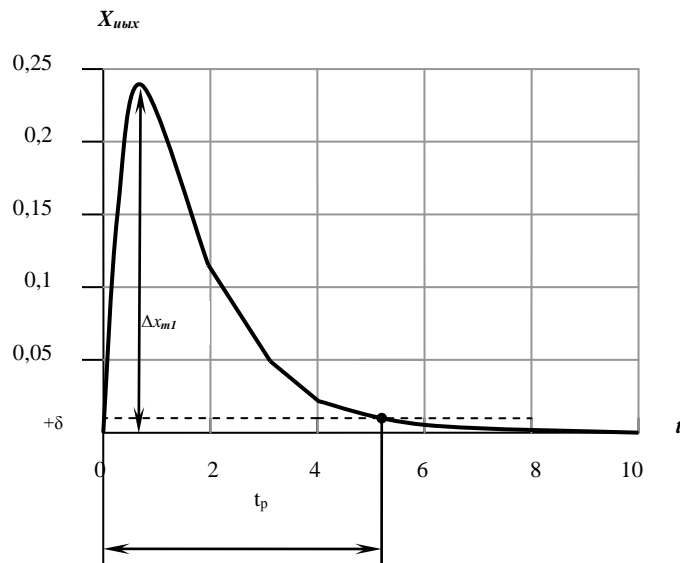


Рисунок 4.6 – Графік перехідного процесу системи автоматичного керування з регулятором ІІІ – типу

Рівняння ПД – регулятора:

$$\begin{cases} T_1 \cdot \frac{dX_{\text{вих}}(t)}{dt} + X_{\text{вих}}(t) = \varepsilon \cdot [X_{\text{ex}}(t) - X_p(t)] \\ X_p(t) = K_p \cdot X_{\text{вих}}(t) + K_p \cdot \frac{T_{np} dX_{\text{вих}}(t)}{dt} \end{cases} \quad (4.24)$$

Отримали коріння характеристичного рівняння:

$$S_1 = 0;$$

$$S_2 = -0,28.$$

Загальне рішення диференціального рівняння матиме такий вигляд:

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

Знайдемо значення постійних інтегрування  $C_1$  і  $C_2$ :

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

Для визначення  $C_1$  і  $C_2$  вибираємо початкові умови  $t = 0$

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

Таким чином, отримуємо:

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

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

Отримані значення зведемо в таблицю 4.6.

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

t	0	2,5	5	10	15	20
$X_{вих}$	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 ПД – типу.

Рівняння ЗР з урахуванням регулюючого впливу (4.6):

$$T_1 \cdot \frac{dX_{вих}(t)}{dt} + X_{вих}(t) = \varepsilon \cdot [X_{ex}(t) - X_p(t)].$$

Рівняння ПД – регулятора:

$$X_p(t) = K_p \cdot X_{вих}(t) + \frac{K_p}{T_u} \cdot \int_0^{\infty} X_{вих}(t) dt + K_p \cdot T_{np} \cdot \frac{dX_{вих}(t)}{dt} . \quad (4.29)$$

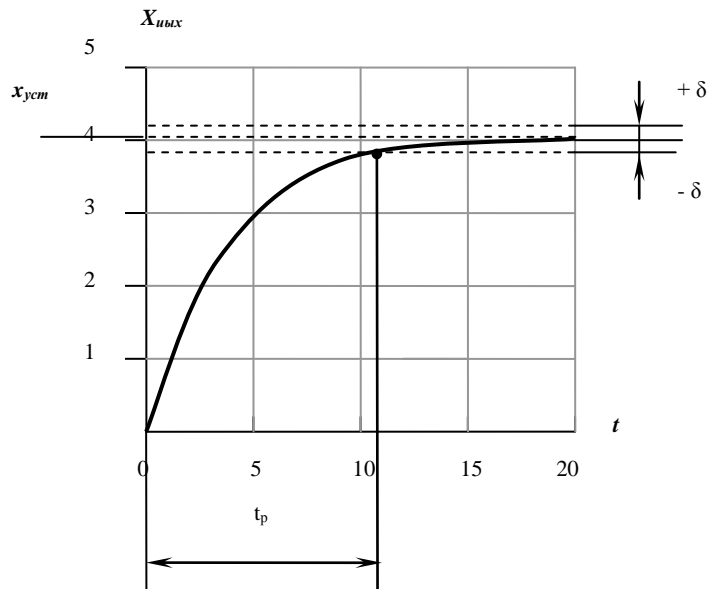


Рисунок 4.7 – Графік перехідного процесу системи автоматичного керування з регулятором ПД – типу

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

$$4,76 S^2 + 1,4 S + 1 = 0.$$

Знайдемо коріння характеристичного рівняння:

$$D = 1,4^2 - 4 \cdot 4,76 = -17,08.$$

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

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

Таким чином, отримуємо:

$$X_{вих} = e^{-0,15 t} (0,256 \cdot \sin (0,434t)) \quad (4.33)$$

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

Отримані значення зведемо в таблицю 4.7.

Таблиця 4.7 – Зависимість  $X_{вих}$  від  $t$

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

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

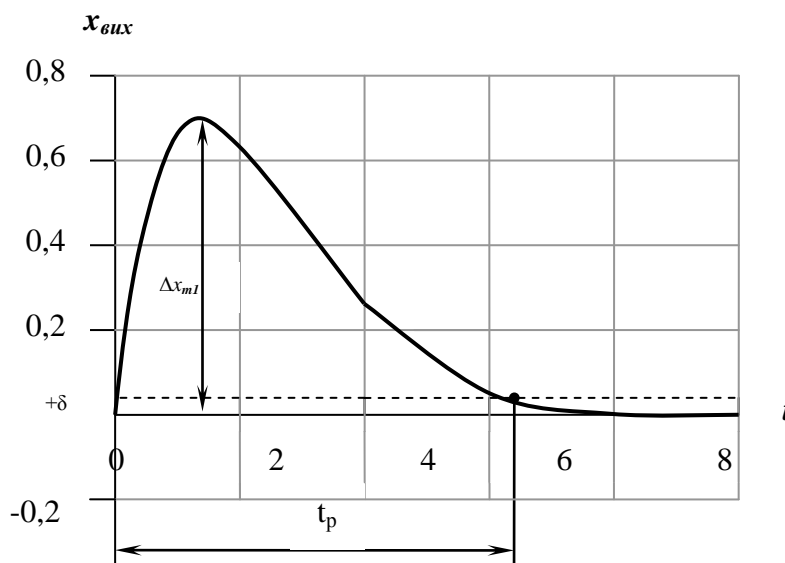


Рисунок 4.8 – Графік перехідного процесу системи автоматичного керування з регулятором ПІД – типу

4.1.7 Розрахунок показників якості перехідних процесів системи автоматичного керування 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 II – типа.

1) Даний регулятор є статичним.

2) Час регулювання ( $t_p$ ) визначається проміжком часу від початку ПХ до того моменту, коли регульована величина буде відрізняться від свого сталого значення ( $X_{уст}$ ) менше, ніж на деяку задану величину  $\delta$ .

$$X_{уст} = 0,36$$

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

3) Перерегулювання ( $\sigma$ ) – це величина максимального динамічного відхилення, визначається максимальним відхиленням регульованої величини  $\Delta X_{m1}$  від  $X_{уст}$ .

$$\Delta X_{m1} = 0, \text{ тоді } \sigma = 0$$

4) Встановлена помилка ( $\Delta$ ) – 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 I – типа.

1) Даний регулятор є астатичним.

2) Час регулювання:

$$\Delta X_{m1} = 0,34;$$

$$\delta = \pm 0,05 \cdot \Delta X_{m1} = \pm 0,05 \cdot 0,34 = \pm 0,02, \text{ тоді } t_p = 3 \text{ с.}$$

3) Колебательность  $n = 0,5$ .

3. Для САК с регулятором III – типа.

1) Даний регулятор є астатичним.

2) Час регулювання:

$$\Delta X_{m1} = 0,245;$$

$$\delta = \pm 0,05 \cdot \Delta X_{m1} = \pm 0,05 \cdot 0,245 = \pm 0,012, \text{ тоді } t_p = 5,3 \text{ с}$$

3) Колебательность  $n = 0,5$

4. Для САК з регулятором ПД – типа.



1) Даний регулятор є статичним.

2) Час регулювання:

$$X_{уст} = 4,1;$$

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

3) Перерегулювання:

$$\Delta X_{м1} = 0, \text{ тогдa } \sigma = 0.$$

4) Встановлена помилка  $\Delta = 4,1$

5) Коливальність  $n = 0$ .

5. Для САК с регулятором ПД – типа.

1) Даний регулятор є астатичним.

2) Час регулювання:

$$\Delta X_{м1} = 0,67;$$

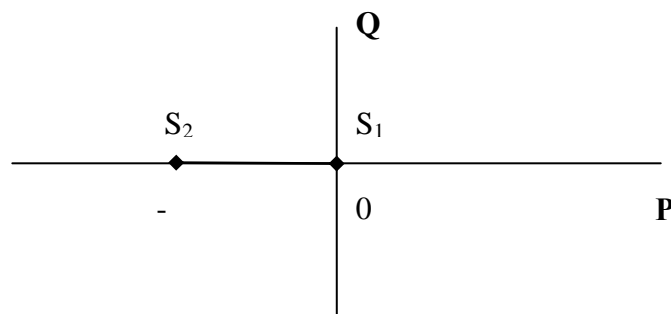
$$\delta = \pm 0,05 \cdot \Delta X_{м1} = \pm 0,05 \cdot 0,67 = 0,03, \text{ тоді } t_p = 6,5 \text{ с}$$

3) Коливальність  $n = 0,5$ .

**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.



Рисунку 4.9 – Зображення коренів характеристичного рівняння системи автоматичного керування з регулятором П – типу на комплексній площині

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

1) ступінь стійкості  $h = 0$ ;

2) ступінь коливальности  $\mu = 0$ .

2) Для САК з регулятором І – типу.

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

1) ступінь стійкості  $h = 1,1$ ;

2) ступінь коливальності  $\mu = \operatorname{tg} \varphi / 2 = \beta_1 / \alpha_1 = 0,9938 / 1,1 = 0,9$ .

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

Для САК з регулятором III – типу.

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

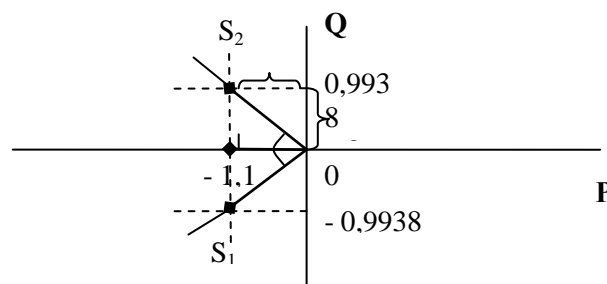


Рисунок 4.10 – Зображення коренів характеристичного рівняння системи автоматичного керування з регулятором I – типу на комплексній площині

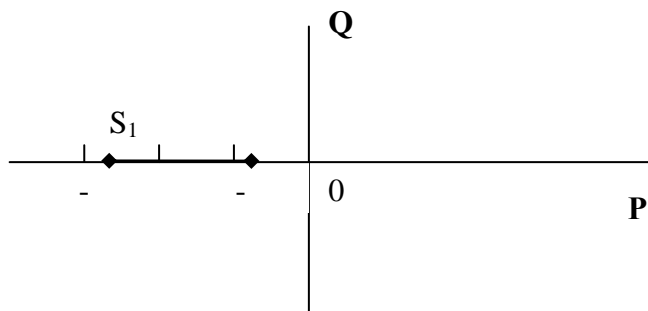


Рисунок 4.11 – Зображення коренів характеристичного рівняння системи автоматичного керування з регулятором III – типу на комплексній площині

1) ступінь стійкості  $h = 0,81$ ;

2) ступінь коливальності  $\mu = 0$ .

Таким чином, можна зробити висновок – дана САК з регулятором III – 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 коливальності  $\mu = 0$ .

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

4. Для САК з регулятором ПД – типу.

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

- 1) ступінь стійкості  $h = 0,15$ ;
- 2) ступінь коливальності  $\mu = \operatorname{tg} \varphi / 2 = \beta_1 / \alpha_1 = 0,434 / 0,15 = 2,89$ .

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

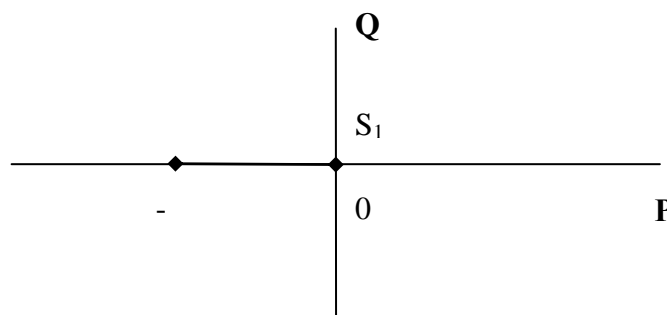


Рисунок 4.12 – Зображення коренів характеристичного рівняння системи автоматичного керування з регулятором ПД – типу на комплексній площині

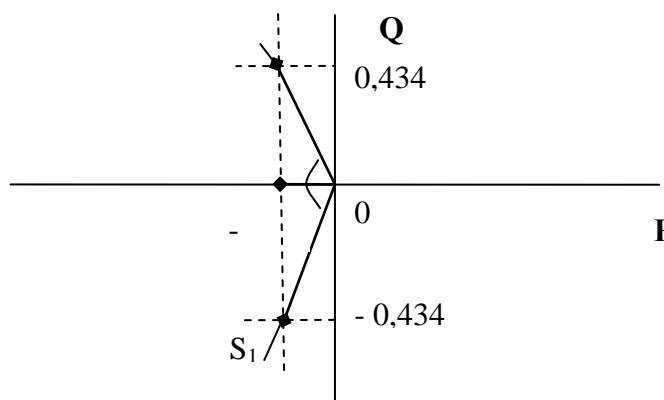


Рисунок 4.13 – Зображення коренів характеристичного рівняння системи автоматичного керування з регулятором ПД – типу на комплексній площині

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 рисунках 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 ІІІ – типу і І – типу з астатичних і регулятор ІІ – типу з статичних. Це підтверджується тим, що дані регулятор найменші значення часу регулювання (у регулятора ІІІ – типу  $t_p = 5,3$  с і І – типу  $t_p = 3$  с; у регулятора ІІ – типу  $t_p = 1$  с).

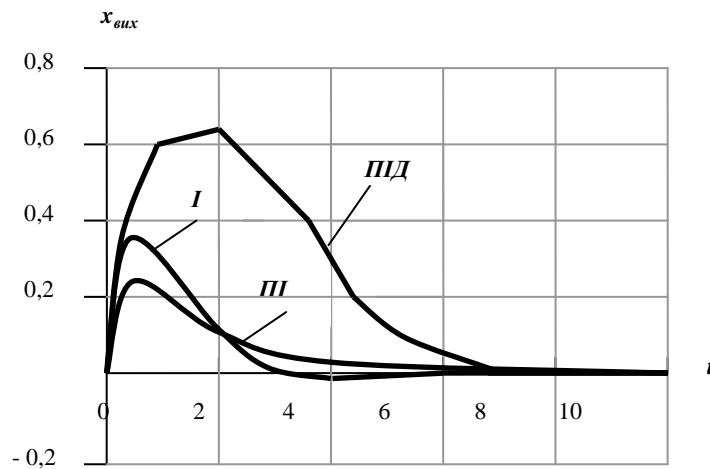


Рисунок 4.14 – Графіки перехідних процесів системи автоматичного керування з регуляторами І – , ІІ – і ІІІ – типів

Однак в порівнянні з іншими астатичними регуляторами, регулятор ІІІ – типу має найбільш вдалим 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 ІІІ – типів (у регулятора І – типу  $h = 1,1$ , у

регулятора ПД – типу  $h = 0,15$ ), тому можна вважати, що регулятор ПІ – типу має дуже високу ступенем стійкості.

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

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

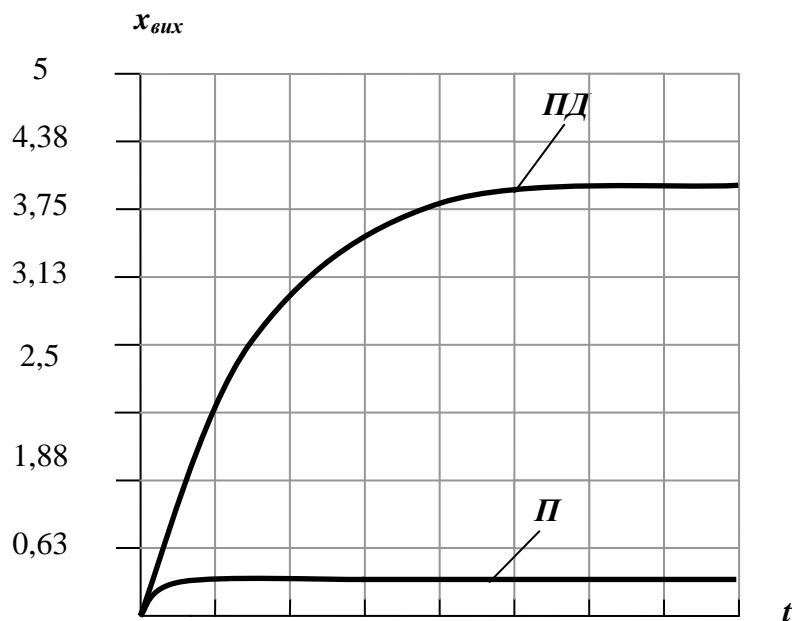


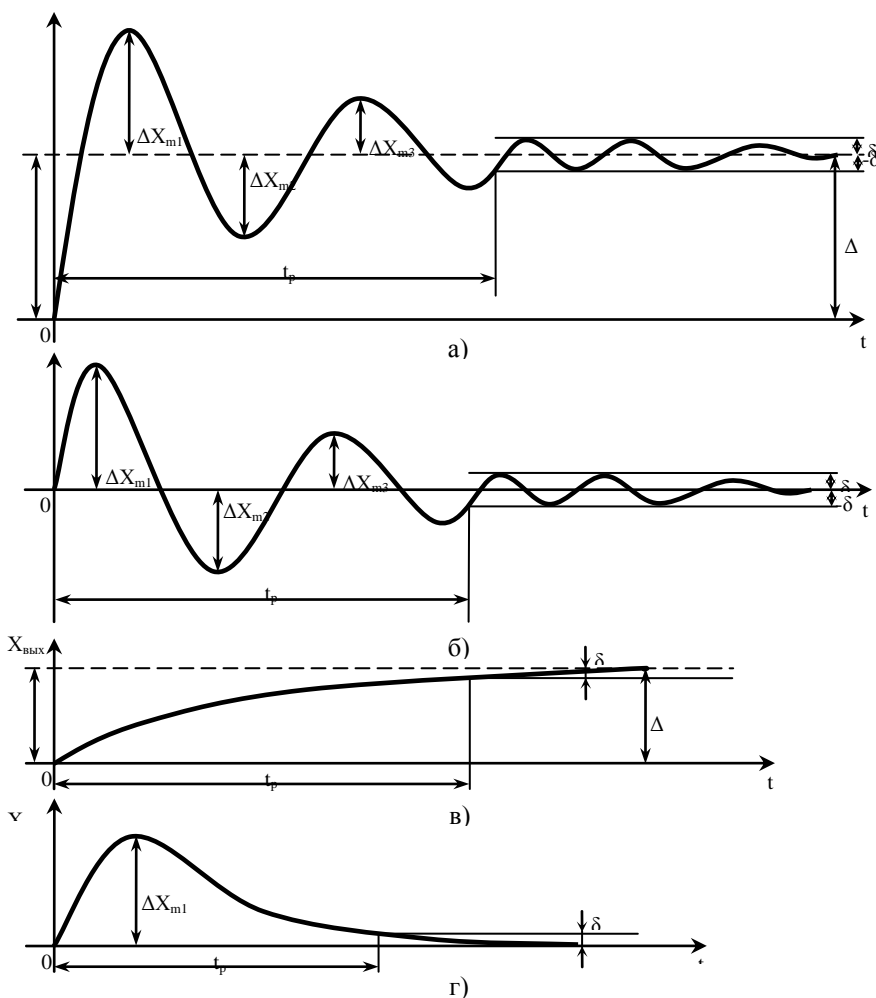
Рисунок 4.15 – Графіки перехідних процесів системи автоматичного керування з регуляторами ПД – і ПІ – типів

#### 4.1.8 Розрахунок параметрів настроювання автоматичних регуляторів

Прямі показники якості визначаються безпосередньо по кривій перехідного процесу САК. Типові графіки зміни регульованої величини для одиничного ступеневої вхідного впливу і прямі показники якості представлені на рисунку 4.16. Характер загасання перехідного процесу стійкої САК залежить від виду коренів характеристичного рівняння. Якщо все коріння рівняння речові і негативні, то загасання процесу буде аперіодическим (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  $X_{вих}^{уст}$  менше, ніж на деяку заздалегідь задану величину  $\delta$ . Для статичного перехідного процесу величина  $\delta$  звичайно приймається рівної 0,05 (5%) від  $X_{вих}^{уст}$ . Якщо  $X_{вих}^{уст}$  (астатичний перехідний процес), то  $\delta = 0,05 \cdot \Delta X_{m1}$ , де  $\Delta X_{m1}$  – максимальне відхилення (перший максимум) регульованої величини від її сталого значення.



- а) коливальний статичний; в) аперіодический статичний;  
б) коливальний астатичний; г) аперіодический астатичний

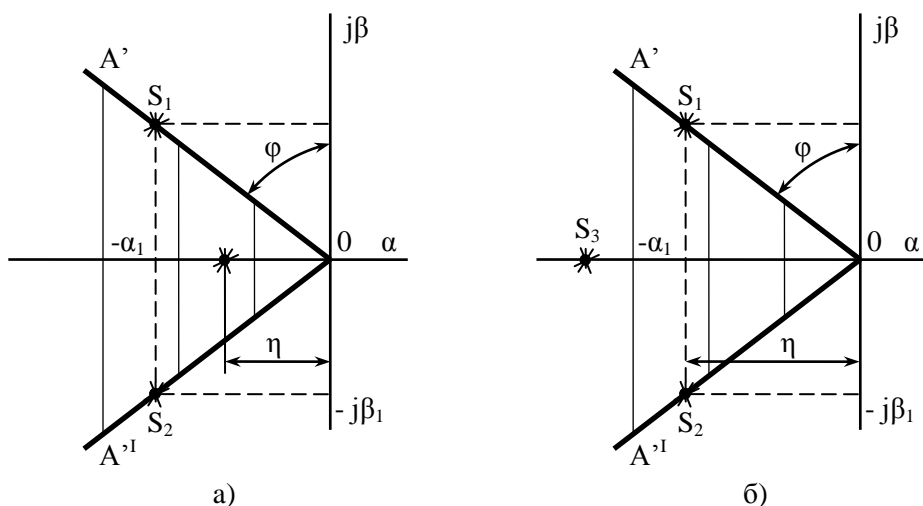
Рисунок 4.16 – Типові графіки перехідних процесів

Величина  $\Delta X_{m1}$  максимального відхилення регульованого параметра від його встановленого значення  $X_{вих}^{уст}$  називається максимальним динамічним відхиленням або динамічною помилкою системи. Для статистичних коливальних перехідних процесів вводиться поняття перерегулювання  $\sigma$  – максимальне відхилення регульованої величини від нового сталого значення, виражене у відсотках:

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

Величина  $\sigma$  в САК не повинна перевищувати 10% - 30%.

Коливання характеризується числом коливань  $n$  вихідної величини за час перехідного процесу  $t_p$ . Число коливань не повинно перевищувати 1,5-2. Якщо найближчий до уявної осі корінь речовинний (рисунок 4.17 а)), то ступінь стійкості називається аперіодическою, якщо коріння когось комплексно (рисунок 4.17 б)) – коливальні.



а) найближчий до уявної осі речовинний корінь  $S_3$ ;

б) найближчі до уявної осі комплексні пов'язані коріння  $S_{1,2}$ .

Рисунок 4.17 – Розташування коренів характеристичного рівняння системи автоматичного керування на комплексній площині

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

На рисунку 4.18 показана амплітудно–частотна характеристика замкнутої САК.

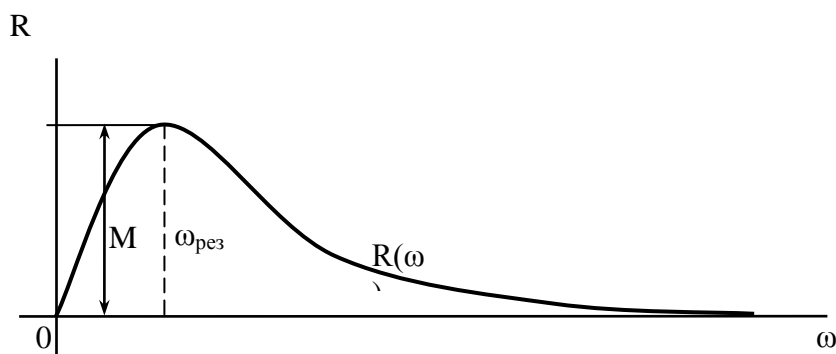


Рисунок 4.18 – Амплітудно–частотна характеристика замкнутої системи автоматичного керування

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

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

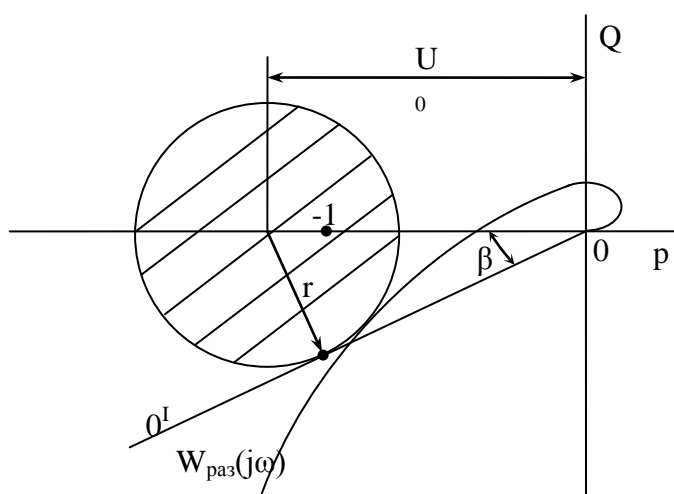


Рисунок 4.19 – АФХ розімкнутої системи автоматичного керування і «заборонена» зона

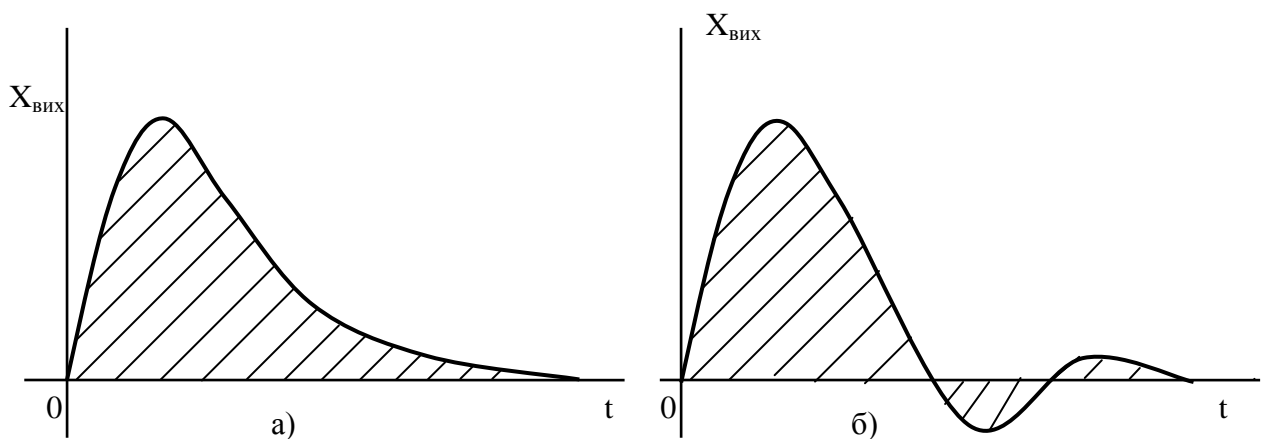


На рисунку 4.19 зображений граничний випадок, коли АФХ розімкнутої САР  $W_{\text{раз}}(j\omega)$  стосується «забороненою» області. При цьому коло, що обмежує «заборонену» область, буде також стосуватися променя  $00'$ , проведеного з початку координат під кутом  $\beta$  до негативної речової піввісь.

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

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.



а) не коливальний (апериодический) процес; б) коливальний процес.

Рисунок 4.20 – Визначення площі перехідного процесу

Розрахунок настройки П– регулятора.

Вираз АФХ розімкнутої системи з П–регулятором має вигляд:

$$W_{\text{раз}}(j\omega) = W_{\text{об}}(j\omega) \cdot W_p(j\omega) = W_{\text{об}}(j\omega) \cdot \kappa_p \quad (4.37)$$

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

Порядок розрахунку настройки П – регулятора наступний:

- 1) За рівняння об'єкта регулювання будується АФХ об'єкта  $W_{\text{об}}(j\omega)$ .
- 2) З початку координат проводиться промінь  $OO'$  под кутом

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

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

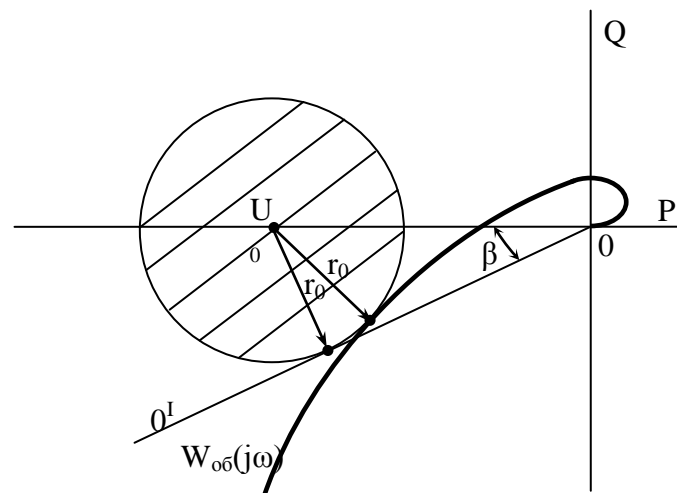


Рисунок 4.21 – Розрахунок налаштування системи автоматичного регулювання з П – регулятором

- 3) Підбирається окружність з центром на негативній речовій напів–осі, що стосується одночасно АФХ об'єкта регулювання  $W_{\text{об}}(j\omega)$  і променя  $OO'$ . Визначається чисельне значення радіуса кола  $r_0$ .

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

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

Оптимальне значення коефіцієнта передачі П- регулятора визначається за формулою:

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

Будуємо АФХ ЗР по заданому рівнянню (4.1):

$$T_1 \frac{dx_{eux}(t)}{dt} + x_{eux}(t) = k \cdot x_{ex}(t - \tau);$$

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

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

Заміняємо  $S = j\omega$ :

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

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

$$P = \frac{k \cdot (\cos \omega \tau - T_1 \omega \cdot \sin \omega \tau)}{1 + T_1^2 \cdot \omega^2} = \frac{0,3 \cdot (\cos 0,75 \cdot \omega - 0,45 \omega \cdot \sin 0,75 \omega)}{1 + 0,45^2 \cdot \omega^2} \quad ; \quad (4.41)$$

$$Q = -\frac{k \cdot (\sin \omega \tau + T_1 \omega \cos \omega \tau)}{1 + T_1^2 \cdot \omega^2} = \frac{0,3 \cdot (\sin 0,75 \cdot \omega - 0,45 \omega \cdot \cos 0,75 \omega)}{1 + 0,45^2 \cdot \omega^2} \quad ; \quad (4.42)$$

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

Таблиця 4.8 – чисельні значення  $P(\omega)$  и  $Q(\omega)$

$\omega$	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  $\Pi$  – регулятора по порядку, викладеному на початку цього підпункту.

На рисунку 4.22 зображений графік настройки  $\Pi$  – регулятора по АФХ об'єкта регулювання.

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

Розрахунок настройки I– регулятора. Вираз АФХ розімкненої САК з I – регулятором має вигляд:

$$W_{\text{раз}}(j\omega) = W_{\text{об}}(j\omega) \cdot W_p(j\omega) = W_{\text{об}}(j\omega) \cdot \frac{\varepsilon_p}{j\omega} . \quad (4.43)$$

Тому що  $\varepsilon_p = \frac{k_p}{T_u}$ ,  $W_{\text{раз}}(j\omega) = \frac{k_p}{T_u \cdot \omega} \cdot W_{\text{об}}(j\omega) \cdot e^{-j\frac{\pi}{2}}$ .

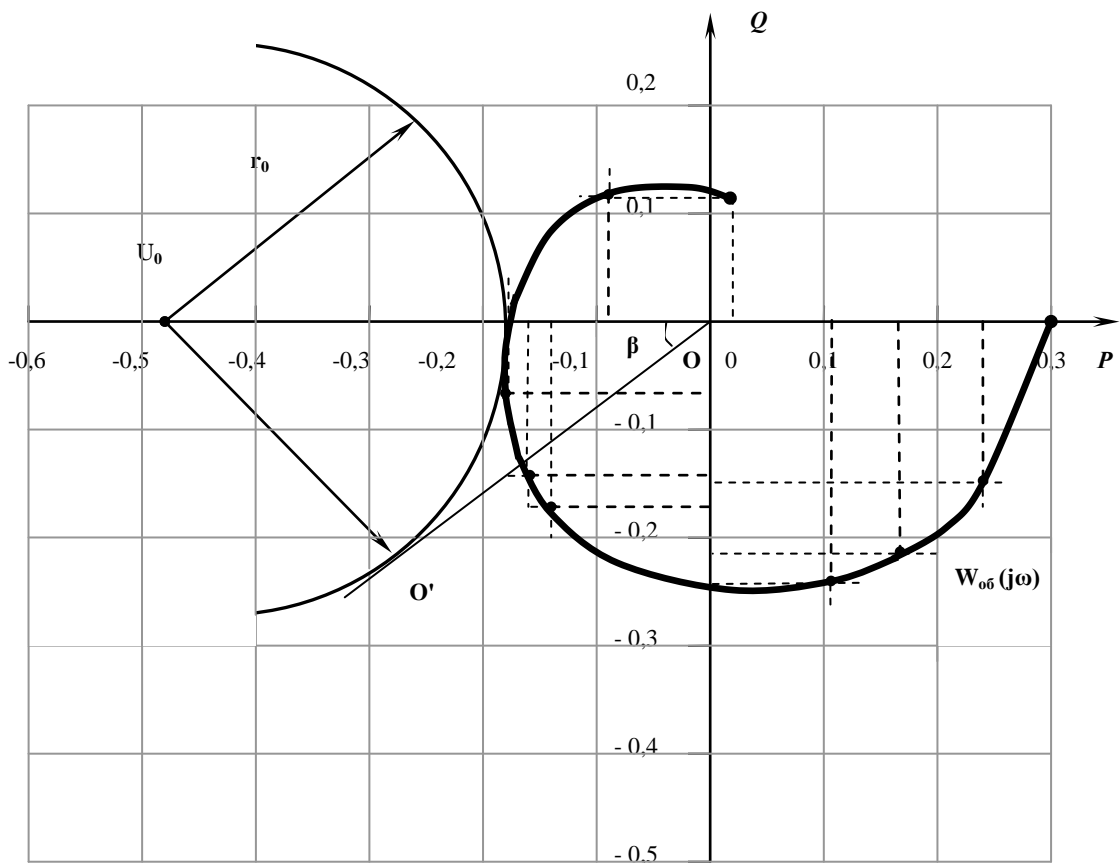


Рисунок 4.22 – Графік настройки П – регулятора по АФХ об'єкта регулювання

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

На рисунку 4.23 показаний розрахунок настройки САК I – регулятором.

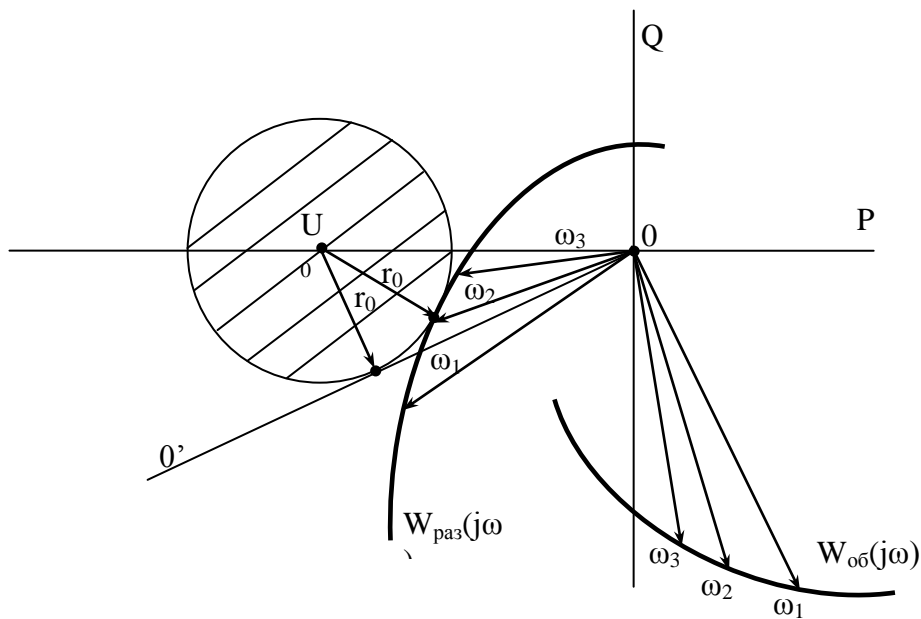


Рисунок 4.23 – Розрахунок настройки системи автоматичного керування  
I- регулятором

Згідно вище викладеного зробимо настройку I – регулятора.

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

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

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

$$T_{и} \cdot \omega_1 = 0,4 \cdot 0,5 = 0,2;$$

$$T_{и} \cdot \omega_2 = 0,4 \cdot 0,8 = 0,32;$$

$$T_{и} \cdot \omega_3 = 0,4 \cdot 1 = 0,4;$$

$$I_{OA'} = I_{OA} / T_{и} \cdot \omega_1 = 1,45;$$

$$I_{OB'} = I_{OB} / T_{и} \cdot \omega_2 = 0,875;$$

$$I_{OC'} = I_{OC} / T_{и} \cdot \omega_3 = 0,675.$$

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

Визначасмо чисельне значення радіуса кола  $r_0 = 0,94$  і оптимальне значення коефіцієнта передачі по формулі (4.38)  $K_p^{opt} = 1,06$ .

Розрахунок настройки ПІ – регулятора.

Вираз АФХ розімкненої САК з ПІ – регулятором має вигляд:

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

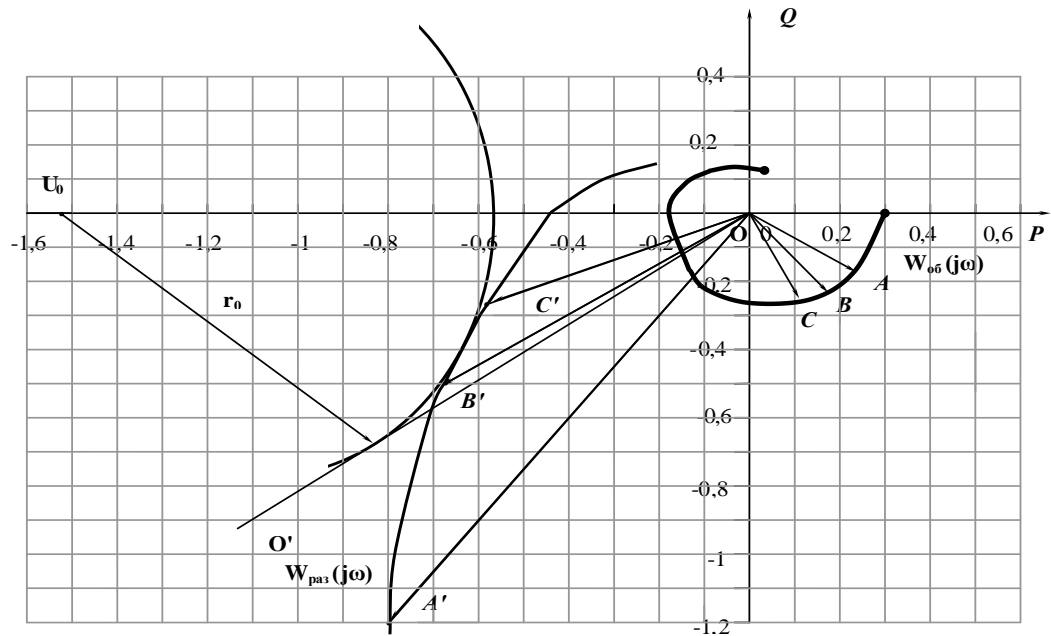


Рисунок 4.24 – Графік настройки І – регулятора по АФХ об'єкта регулювання

Зробимо настройку ПІ – регулятора.

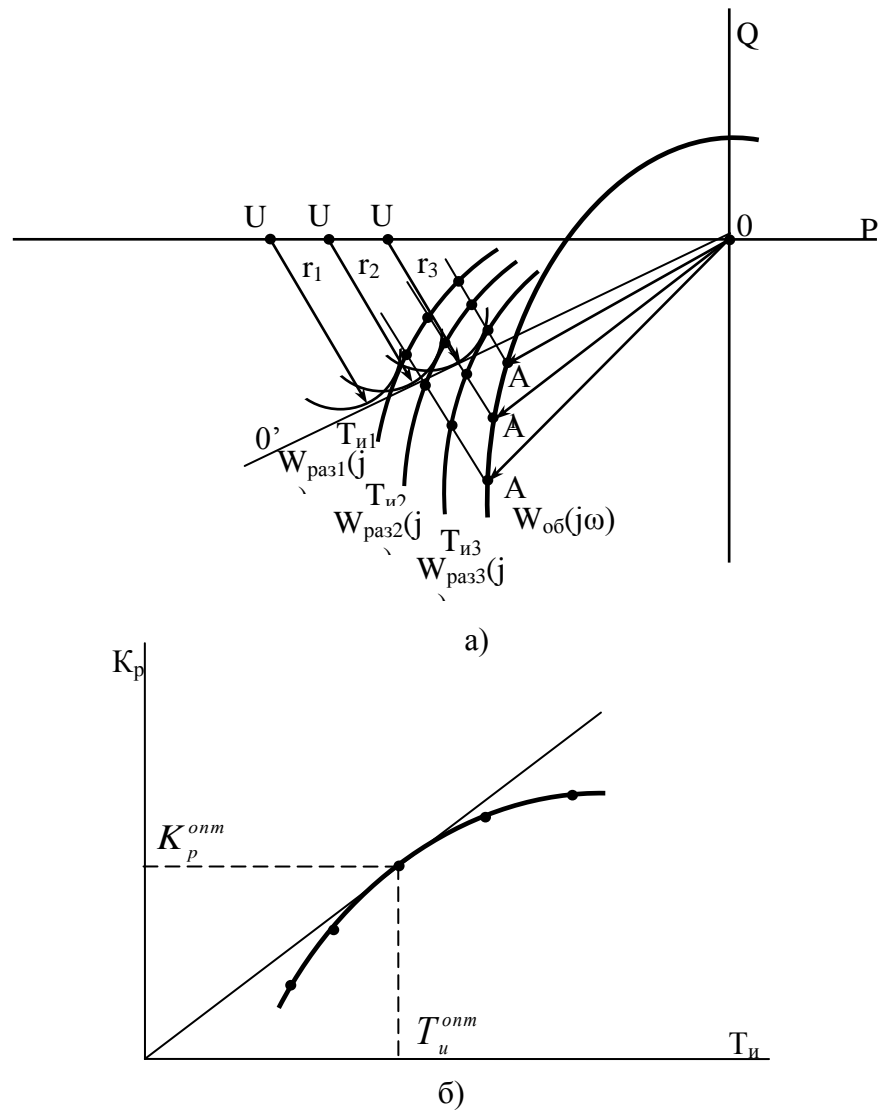
1) Будуємо АФХ об'єкта регулювання за даними наведеними в таблиці 3.8.

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:  $OA_1, OA_2 \dots OA_5$ . До кінців векторів проводимо перпендикуляри.

Задаємося п'ятьма значеннями часу іздрома:

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



- а) сімейство АФХ розімкнутої системи автоматичного керування;  
 б) межа області стійкості системи автоматичного керування

Рисунок 4.25 – Розрахунок настройки системи автоматичного керування з  
 ПІ–регулятором

4) З початку координат проводимо промінь  $OO'$  під кутом  $\beta = 38^\circ$  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  $(T_u, K_p)$  будуємо криву кордонів області стійкості системи  $K_p = f(T_u)$ .



По осі абсцис відкладаємо обрані значення часу іздрома регулятора  $T_{и1}$ ,  $T_{и2}$ ,  $T_{и3}, \dots$ , а по осі ординат – відповідні коефіцієнтам передачі регулятора  $K_{p1} = 0,9$ ;  $K_{p2} = 1,9$ ;  $K_{p3} = 2,7$ ;  $K_{p4} = 2,9$ ;  $K_{p5} = 3,1$ , отримані точки з'єднуємо плавною кривою.

На рисунку 4.26 зображений графік настройки ПІ – регулятора по АФХ об'єкта регулювання.

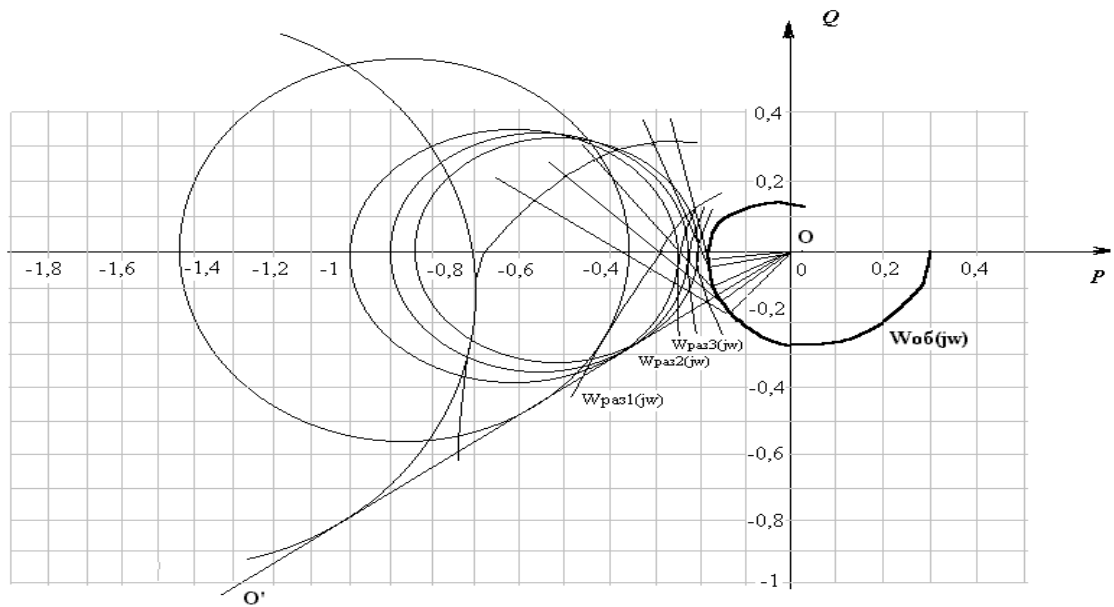


Рисунок 4.26 – Графік настройки ПІ – регулятора по АФХ об'єкта регулювання

Крива кордонів області стійкості системи зображена на рисунку 4.27.

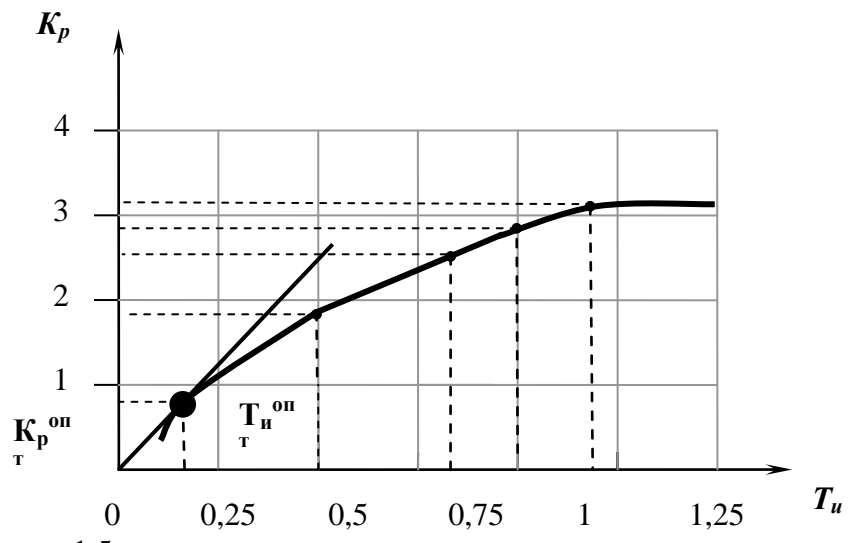


Рисунок 4.27 – Крива кордонів області стійкості системи

б) З початку координат проводимо дотичну до кривої  $K_p = f(T_{и})$ .

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

Отже, отримаємо  $K_p^{opt} = 0,9$ ;  $T_{и}^{opt} = 0,2$ .

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  $K_p$  підставляємо значення  $K_p^{opt} = 3,45$  яке отримали при розрахунку настройки П – регулятора.

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

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

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

Таким чином, отримали коріння характеристичного рівняння:

$$S_1 = 0;$$

$$S_2 = -7,39.$$

Загальне рішення диференціального рівняння матиме дотримуюся щий вид:

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

Знайдемо значення постійних інтегрування  $C_1$  и  $C_2$

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

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

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

Таким чином, отримуємо:

$$X_{вих}(t) = 0,18 + 0,18 \cdot e^{-7,39 t} \quad . \quad (4.48)$$

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

Отримані значення зведемо в таблицю 4.9.

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

t	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$X_{вих}$	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 рисунку 4.28.

Побудова перехідної характеристики САК з регулятором І – типу.

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

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

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

$$0,25S^2 + 0,56S + 1 = 0; \quad (4.49)$$

$$D = 0,56^2 - 4 \cdot 0,25 = -0,6864.$$

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

$$S_1 = -1,62 - j 1,56;$$

$$S_2 = -1,62 + j 1,56.$$

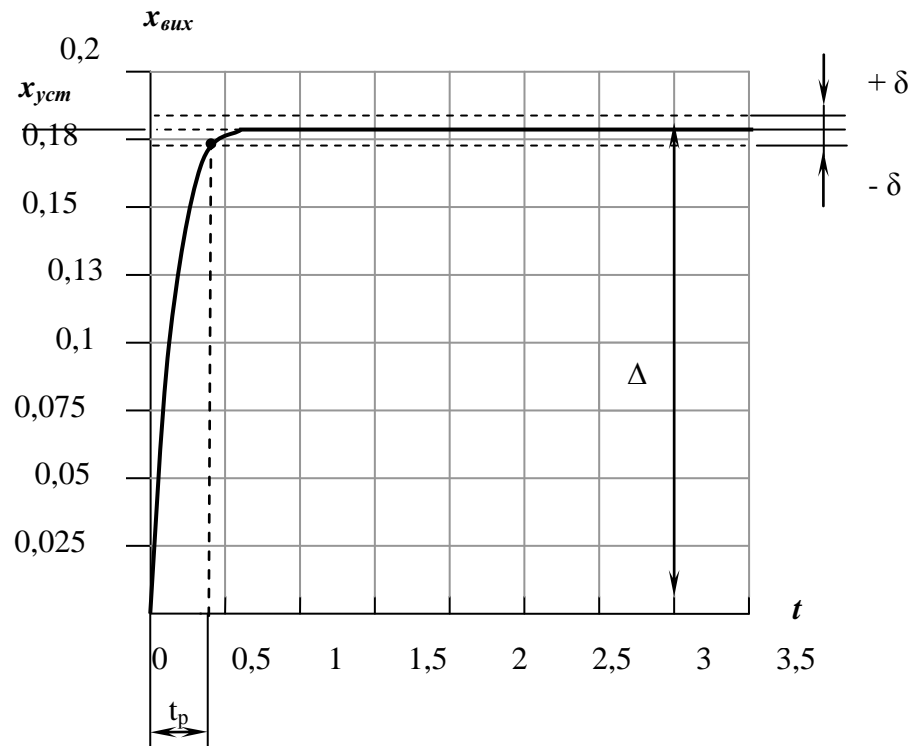


Рисунок 4.28 – Графік перехідного процесу системи автоматичного керування з регулятором П – типу з оптимальними параметрами налаштування

Загальне рішення диференціального рівняння матиме дотримуюся щий вид:

$$X_{\text{вих}} = e^{-1,12t} (C_1 \cdot \sin(1,56t) + C_2 \cdot \cos(1,56t)) \quad (4.50)$$

Знайдемо значення постійних інтегрування  $C_1$  і  $C_2$  :

$$\begin{cases} X_{\text{вих}}(t) = 0 \\ \frac{dX_{\text{вих}}(t)}{dt} = \varepsilon \cdot A \end{cases}$$

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

$$\begin{cases} C_2 = 0; \\ C_1 = 0,86. \end{cases}$$

Таким чином, отримуємо:

$$X_{\text{вих}} = e^{-1,62 t} (0,86 \sin(1,56 t)) \quad (4.51)$$

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

Отримані значення зведемо в таблицю 4.10.

Таблиця 4.10 – Залежність  $X_{\text{вих}}$  від  $t$

$t$	0	0,5	2	3	4	6	8	10
$X_{\text{вих}}$	0	0,254	0	-0,012	0	0	0	0

Графік перехідного процесу САК с регулятором І – типа с оптимальними параметрами настройки изображён на рисунку 4.29.

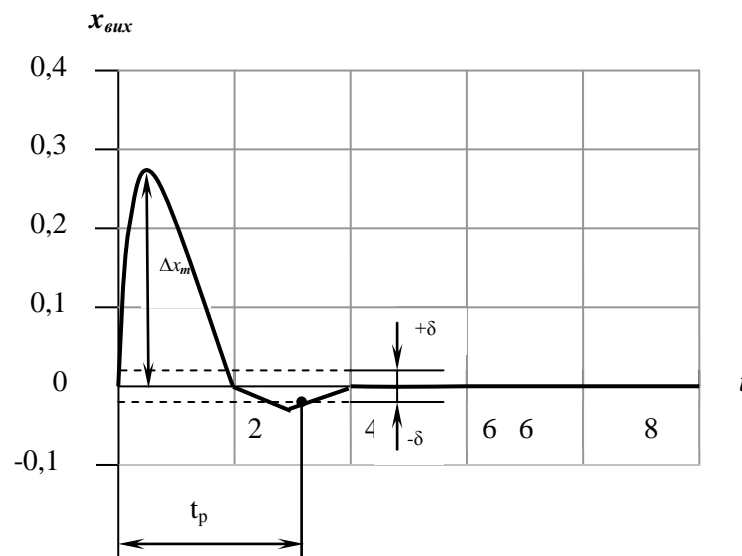


Рисунок 4.29 – Графік перехідного процесу системи автоматичного регулювання з регулятором І – типу з оптимальними параметрами налаштування

Побудова перехідної характеристики САК з регулятором ІІІ – 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  $K_p^{\text{опт}} = 0,9$  і  $T_i^{\text{опт}} = 0,2$ , яке отримали при розрахунку настройки ІІІ – регулятора.

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

Таким чином, отримали коріння характеристичного рівняння:

$$S_1 = -21,63;$$

$$S_2 = -2,05.$$

Загальне рішення диференціального рівняння матиме такий вигляд:

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

Знайдемо значення постійних інтегрування  $C_1$  і  $C_2$ .

$$\begin{cases} X_{\text{вих}}(t) = 0 \\ \frac{dX_{\text{вих}}(t)}{dt} = \varepsilon \cdot X_{\text{вих}}(t) = \varepsilon \cdot A \end{cases}$$

Для визначення  $C_1$  і  $C_2$  вибираємо початкові умови  $t = 0$

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

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

Таким чином, отримуємо:

$$X_{\text{вих}}(t) = -0,07 \cdot e^{-21,63 t} + 0,07 \cdot e^{-2,05 t} \quad . \quad (4.54)$$

Переймаючись значеннями часу  $t$  від 0 до  $\infty$  побудуємо графік перехідного процесу САК з регулятором ПІ-типу з оптимальними параметрами налаштування.

Отримані значення зведемо в таблицю 4.11.

Таблиця 4.11 – Залежність  $X_{\text{вих}}$  від  $t$

$t$	0	0,2	1	2	3	4	5
$X_{\text{вих}}$	0	0,049	0,0018	0,0011	0	0	0

Графік перехідного процесу САК з регулятором ПІ – типу з оптимальними параметрами налаштування зображений на рисунку 4.30.

*Висновки.* 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 4.31. При цьому характеристики регулятора в цілому визначаються властивостями ланцюга, що складається з послідовного включення замкнутого контуру виконавчого механізму.

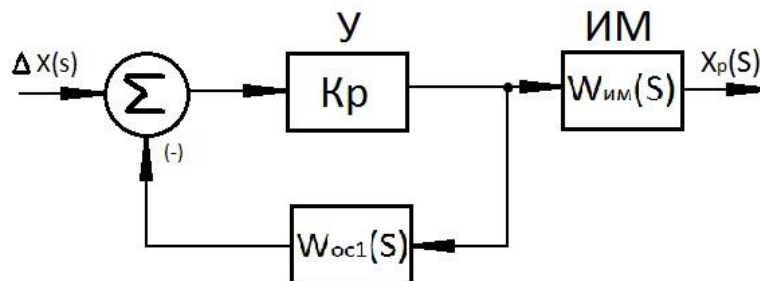


Рисунок 4.31 – Структурна схема регулює блоку ПІ – регулятора без охоплення ІМ ООС

Для схеми представленої на рисунку 4.31 передавальна функція регулятора має вигляд:

$$W_{p1}(s) = W_{\text{вІМ}}(s) \cdot \frac{Kp}{1 + Kp \cdot W_{\text{оцл}}(s)};$$

При значеннях коефіцієнта посилення  $Kp$  підсилювача регулює блоку значно більше одиниці ( $Kp \gg 1$ ), що зазвичай має місце в промислових регуляторах, в подальшому рівнянні можна знехтувати одиницею в знаменнику:

$$W_{p1}(s) = \frac{W_{\text{вІМ}}(s)}{W_{\text{оцл}}(s)}.$$



Тому елемент зворотного зв'язку (коригувальний елемент) для рисунка 4.31, повинен мати передавальну функцію, яка визначається формулою:

$$W_{ocl}(s) = \frac{W_{im}(s)}{W_{p1}(s)}.$$

Для П – закону регулювання:

$$W_{ocl}(s) = \frac{W_{im}(s)}{Kp \cdot \left(1 + \frac{1}{T_u s}\right)} = \frac{W_{im}(s) \cdot T_u s}{Kp \cdot (T_u s + 1)}.$$

Передавальна функція зворотного зв'язку:

$$W_{ocl}(s) = \frac{\frac{1}{T_{im} s} \cdot T_u s}{Kp \cdot (T_u s + 1)} = \frac{T_u}{T_{im} s \cdot Kp \cdot (T_u s + 1)}.$$

П – закону регулювання в регуляторах – рисунок 4.32.

Для схеми, представленої на рисунку 4.32, передавальна функція регулятора має вигляд:

$$W_{p2}(s) \cdot W_{um}(s) \cdot W_{oc2}(s) = W_{um}(s) - W_{p2}(s) \cdot W_{ocl}(s).$$

Тому елементи зворотного зв'язку для схеми рисунок 4.32 повинен мати передавальну функцію, яка визначається формулою:

$$W_{oc2}(s) = \frac{W_{um}(s) - W_{p2}(s) \cdot W_{ocl}(s)}{W_{p2}(s) \cdot W_{um}(s)}.$$

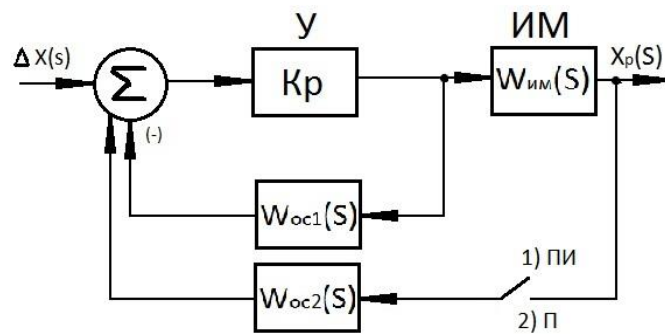


Рисунок 4.32 – Структурна схема регулює блоку, П – регулятора на базі ПІ – регулятора з негативним зворотнім зв'язком по положенню регулюючого органу

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

Під надійністю АСУ ТП ЕБ розуміють комплекс показників, серед яких важливе місце займає ймовірність виконання функцій контролю, управління і захисту за заданий проміжок часу. Виконання цих функцій залежить від виду одержуваної інформації та способів її обробки, надійності використовуваних технічних засобів і людської надійності операторів та ремонтного персоналу.

Вимоги до підвищення надійності технічних засобів АСУ ТП:

- 1) поліпшення якості виготовлення і принципів побудови елементів системи;
- 2) поліпшення структури і введення надмірності;
- 3) підвищення надійності в процесі експлуатації.

Перші два способи підвищення надійності використовуються в процесі проектування і виготовлення, як елементів, так і системи в цілому. В результаті система досягає певного рівня надійності.

Третій спосіб полягає в основному в забезпеченні рівня надійності, досягнутого в результаті розробки і виготовлення технічної системи.

Основа забезпечення надійності будь-якої складної системи – виконання надійних елементів, з яких виготовляється система ([15]).

**Призначення системи.** Підтримує заданий значення рівня в ПНТ. Підігрів основного конденсату здійснюється парою відбору.

**Умови працездатності системи.** Працездатність - здатність виконувати всі задані функції зі збереженням параметрів в необхідних межах.

Регулювання здійснюється за пропорційним законом за рахунок охоплення регулятора зворотним зв'язком по положенню регулюючого органу. Вимірювання рівня виробляється трьома датчиками типу Сапфір 22ДІ. База вимірювання датчиків складає 630 мм. Задане значення рівня  $450 \pm 50$  мм (зона регулювання  $\pm 50$  мм від заданого рівня). При тривалості командного імпульсу більше 5 секунд відбувається відключення регулятора. Управління регулятором здійснюється або в ручному, або в автоматичному режимі від регенеративної системи низького тиску.

**Ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$**  – це ймовірність того що час від моменту включення апаратури до її відмови буде більше або дорівнює часу протягом якого визначається ймовірність безвідмовної роботи, тобто це ймовірність того, що в межах заданої напрацювання відмова об'єкта не виникає:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (5.1)$$

Де  $\lambda$  – інтенсивність відмов.

**Ймовірність відмови** – ймовірність того, що при певних умовах експлуатації в заданому інтервалі часу виникне хоча б один відмову.

$$Q(t) = 1 - P(t)$$

На рисунку 5.1 показана структурна схема регулятора рівня в ПНТ-3.

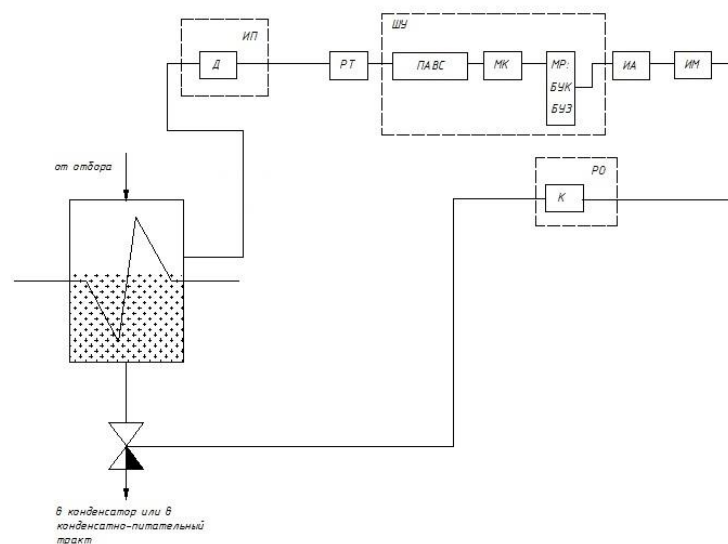


Рисунок 5.1 – Структурна схема регулятора рівня в підігрівачі низького тиску

**Частота відмов** – це щільність ймовірностей часу роботи виробу до першої відмови.

$$a(t) = -\frac{dP(t)}{dt} = \frac{dQ(t)}{dt}$$

**Інтенсивність відмов** – це відношення частоти відмов виробу до ймовірності безвідмовної роботи виробу в одиницю часу.

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}.$$

**Середнє напрацювання до першої відмови** – математичне очікування часу роботи виробу до відмови.

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}.$$

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:

$$\lambda_i(t) = \frac{1}{T_{cp}} \ln\left(\frac{1}{P_i(t)}\right).$$

Зробимо розрахунок  $\lambda$  і внесемо його в таблицю 5.1.

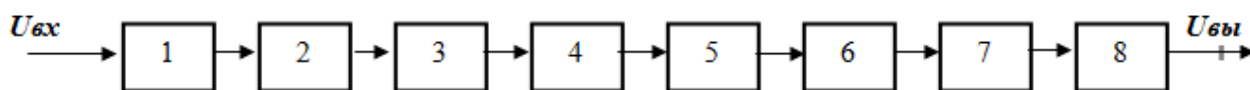
$$\lambda = \frac{1}{2000} \ln\left(\frac{1}{0,97}\right) = 1,523 \cdot 10^{-5}.$$

Таблиця 5.1 Значення інтенсивності відмов елементів системи

Перелік блоків в ФЛС	Назва блока	Інтенсивність відмов $\lambda$ , 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	МЕО	$1,8 \cdot 10^{-6}$
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.



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.

Рисунок 5.2 – Функціонально-логічна схема регулятора рівня в підігрівачі низького тиску

**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

$$T_{\text{общ}} = 4 \cdot 365 \cdot 24 = 35040 \text{ год.}$$

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:

$$t_1 = 7008 \text{ годин (292 дня);}$$

$$t_2 = 14016 \text{ годин (584 дня);}$$

$$t_3 = 21024 \text{ годин (876 днів).}$$

$$t_4 = 28032 \text{ годин (1168 днів);}$$

$$t_5 = 35040 \text{ годин (1460 днів).}$$

**Розрахунок ймовірностей безвідмовної роботи регулятора рівня в ПНТ.** Розрахунок ймовірності безвідмовної роботи будемо розраховувати за формулою (5.1):

$$P_i = e^{-\lambda_i t} ;$$

де  $\lambda_i$  – ймовірність відмови  $i$ -ого елемента;

$t$  – час роботи системи.

Зробимо розрахунок ймовірності безвідмовної роботи елементів системи:

$$P_i = e^{-1,52310^{-5} \cdot 7008} = 0,8987667 .$$

Виконаємо розрахунок ймовірності безвідмовної роботи основного каналу без урахування резервування для часу  $t_1 = 7008$  годин:

$$P_0(t_i) = 0,8987667 \cdot 0,8692191 \cdot 0,9994605 \cdot 0,9965021 \cdot 0,9972007 \cdot 0,9323192 \cdot 0,9874648 \cdot 0,9930165 .$$

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.**

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 1,523 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-5} + 7,7 \cdot 10^{-8} + 5 \cdot 10^{-7} + 4 \cdot 10^{-7} + 1 \cdot 10^{-5} + 1,8 \cdot 10^{-6} + 1,8 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 10^{-6} = \\ &= 4,007 \cdot 10^{-5} .1/ч \end{aligned}$$

**Розрахунок ймовірності безвідмовної роботи системи.** Ймовірності безвідмовної роботи системи  $P_c(t)$  при даному способі резервування і ненавантаженому стані резерву (таблиця 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

Таблиця 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 рисунку 5.3.

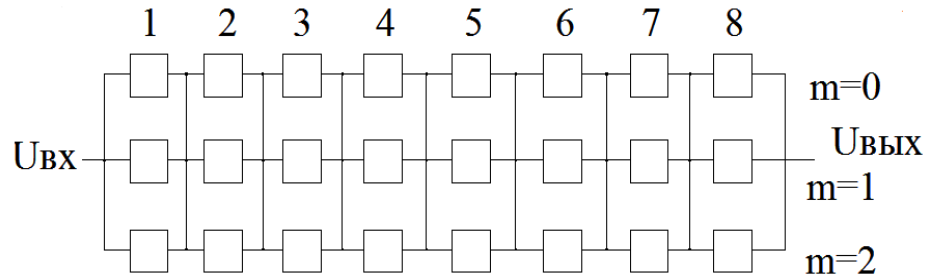


Рисунок 5.3 – Схема розрахунку надійності регулятора для роздільного резервування з постійно включеним резервом і цілої кратністю

Тоді для  $m_i = 0$  і  $N = 8$  отримаємо:

$$P_C(t) = \prod_{i=1}^8 [1 - (1 - P_i(t))^{0+1}] = 0,7093253.$$

Аналогічно проводимо інші розрахунки в програмі «Mathcad». Результати розрахунків наведені в таблиці 5.4.



Побудуємо графік залежності  $P_c(t)=f(\lambda_0 t)$  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  $P_c$  при різних  $m$

$P_c(t)$ \ $t_i, \text{ГОД}$	$t_1=7008$	$t_2=14016$	$t_3=21024$	$t_4=28032$	$t_5=35040$
$P_c$ при $m=0$	0.7093253	0.5031424	0.3568916	0.2531522	0.1795673
$P_c$ при $m=1$	0.9681482	0.8892161	0.7850381	0.6720845	0.5614579
$P_c$ при $m=2$	0.9964167	0.9761862	0.9333499	0.8693026	0.7892888

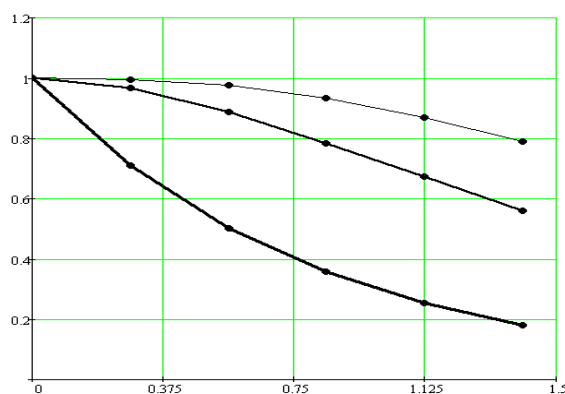


Рисунок 5.4 – Графік залежності  $P_c(t)$  від при  $m = 0,1,2$  і роздільному резервуванні з постійно включеним резервом і цілої кратністю

**Розрахунок середнього часу безвідмовної роботи.** Для даного способу резервування і ненавантаженому стані резерву середній час безвідмовної роботи визначається як:

$$T_{срC} = \frac{(7)!}{4,007 \cdot 10^{-5} \cdot (0+1)!} \cdot \sum_{i=0}^0 \frac{1}{\nu_i \cdot (\nu_i + 1) \cdot \dots \cdot (\nu_i + N - 1)} = 2550,65602.$$

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  $m$

	$m=0$	$m=1$	$m=2$
$T_{ср}$	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.

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ

### 6.1 Забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу і населення

Основними нормативними документами, що визначають умови роботи при дії іонізуючих випромінювань, являються «Основні санітарні правила роботи з радіоактивними речовинами і іншими джерелами іонізуючих випромінювань» і «Норми радіаційної безпеки». У них визначаються допустимі норми дії іонізуючих випромінювань на організм людини. На їх основі розробляються відомчі і галузеві правила, наприклад такі як «Санітарні правила проектування і експлуатації АЕС» (СП–АЕС – 79) і «Загальні стани забезпечення безпеки при експлуатації АЕС» (ОПБ – 82).

В чинних нині нормативних документах встановлені наступні основні принципи забезпечення радіаційної безпеки:

- 1) Не перевищення встановленої основної дозової межі;
- 2) Виключення всякого необґрунтованого опромінення;
- 3) Зниження дози опромінення до можливо низького рівня.

Відповідно до норм радіаційної безпеки встановлені три категорії опромінюваних осіб:

- категорія А – персонал;
- категорія б – обмежена частина населення;
- категорія В – населення області, краю, республіки.

Для персоналу категорії А встановленою основною дозовою межею є гранично допустима доза за календарний рік. Вона встановлюється рівною 5 Бер в рік. Контрольним рівнем є доза рівна 4 Бери в рік. Для категорії б основною дозовою межею є межа дози за рік, який дорівнює 0,5 Бера в рік.

Фактично індивідуальні дози опромінення персоналу АЕС істотно нижче гранично допустимої дози, а фактична опромінення населення того, що мешкає біля АЕС опиняється в десятках разів менше, ніж допустимі рівні встановлювані нормами радіаційної безпеки. Приміром, при нормальній експлуатації ризик смерті від отримання гранично допустимої дози не

перевищує ризику смертності від професійних причин на виробництвах з низькою мірою небезпечних робіт, а ризик смерті від отримання граничної дози відповідає ризику смерті від таких природних явищ як повінь або землетрус.

Для забезпечення радіаційної безпеки на АЕС потрібне проведення радіаційного технологічного, дозиметричного і контролю зовнішнього середовища на радіаційну обстановку. Основним завданням радіаційного технологічного контролю є визначення стану активної зони, герметичності оболонок ТВЕЛ, спостереження за активними продуктами корозії теплоносія і відкладеннями їх на поверхнях устаткування. Основним завданням радіаційного дозиметричного контролю є контроль за радіаційною обстановкою на АЕС і індивідуальний дозиметричний контроль персоналу. Усі види контролю здійснюються службою радіаційного контролю АЕС за допомогою спеціальної апаратури.

## 6.2 Умови праці. Якісна і кількісна оцінка умов праці

Приведемо в таблиці 6.1 показників умов праці на робочому місці.

За показниками шкідливості і безпеки чинників виробничого середовища, тяжкості і напруженості трудового процесу робимо висновок, що умови праці – допустимі. Виходячи з аналізу умов праці виділимо такі виробничі чинники, котрі наближаються до гранично–допустимих значень, встановлених нормативними документами.

За умовами праці необхідно відвідувати устаткування, розташоване в зоні строгого дозиметричного контролю і працювати в діючих електроустановках до 1000 В.

Таблиця 6.1 – Показники умов праці

Показники, одиниці виміру	Фактичне значення	Нормативна вимога	Нормативні документи	
1.Характеристика приміщення:	Виробнича будівля		СНиП 2.09.02–85.	
– вид трудової діяльності персонала;	Майстер виробничої ділянки АРТЗС цехи теплової автоматики і вимірювань ЗАЕС. Майстер обслуговує обладнання ділянки АРТЗС реакторного і турбінного відділення енергоблоків №3 і №4 ЗАЕС			
– висота приміщення, м;	3			
– площа на одного працівника, м <sup>2</sup> ;	54,5 (6 за наявності комп'ютера)			
– категорія по вибухо– і пожежобезпеці;	Д			
– клас за ступенню ураження ел. струмом;	нормальні			
– тип електричної мережі;	220 В, 50 Гц			
– система опалення;	Водяне централізоване			
– система вентиляції;	Витяг примусовий			
– наявність надлишку тепла;	нема			
2.Параметры мікроклімата:				
Холодна пора року				
– температура, °С;	21–22	21–22	ГОСТ 12.1.005–88 "Загальні санітарно – гігієнічні вимоги до повітря робочої зони"	
– вологість, %;	40–50	40–50		
– швидкість шуху повітря, м\с.	0,1	0,1		
Тепла пора року				
– температура, °С;	21–22	21–22		
– вологість, %;	40–50	40–50		
– швидкість шуху повітря, м\с	0,1	0,1		
а. Вміст шкідливих речовин в повітрі робочої зони:				
– хімічні речовини;	–	спирт етиловий	ГОСТ 12.1.00 Загальні санітарно–гігієнічні вимоги до повітря	
– промисловий пил;	нема	–		
Освітлення				
– вид освітлення;	комбинированное	комбинированное	СНиП II–4–79 Природне і штучне освітлення	
– коефіцієнт природної освітленості, %;	~ 2	2		
– найменший розмір об'єкту відмінності, мм;	0,3÷0,5	–		
– характеристика зорової роботи;	високої точності, ШБ	–		

## Продовження таблиці 6.1.

– характеристика зорової роботи;	високої точності, Шб	–	СНиП II–4–79 Природне і штучне освітлення
– освітленість при комбінованому штучному освітленні, лк;	800	800	
– освітленість при загальному штучному освітленні, лк;	300	300	
5. Шум и вібрація:			ДСН 3.3.6.037–99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку
– тимгодина характеристика шуму;	–	–	
– рівень звукового тиску на частоті 1000 Гц, дБ;	50	60	
– тип вібрації;	відсутня		ДСН 3.3.6.039–99 Державні санітарні норми виробничої загальної вібрації
– тривалість вібраційного впливу за зміну, мін;	–	–	
– рівень віброшвидкості на робочих місцях, дБ;	відсутня	92	
6. Електромагнітне випромінювання:			ГОСТ 12.1.002–84
– номер діапазона і значення частоти випромінювання;	відсутня	–	Електричні поля промислової частоти
– напруженість електромагнітного поля для частоти струму 50 Гц, В/м;	не визначено	5	Допустимі впусти напруженості і вимоги до проведення контролю на робочих місцях.
– поверхнева щільність потоку енергії, Вт/м <sup>2</sup> ;	відсутня		Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань
7. Інші види випромінювання:			
– теплове;	отсутствует		НРБУ–97
– іонізуюче, мкБэр/год;	15	120	

### 6.3 Заходи та технічні засоби з профілактики виробничого травматизму і професійних захворювань

**Електробезпека.** Приміщення на АЕС характеризуються великою кількістю електричних приладів, устаткування різної напруги від 12В до 6 кВ і більше. Це пред'являє підвищену увагу до питань електробезпеки.

Технічні і організаційні заходи захисту здійснюються з урахуванням класу

приміщення, напруги і призначення електроустановок. Для забезпечення безпечних умов роботи виконуються наступні технічні захисні заходи: занулення; захисне відключення; застосування малої напруги; захист від небезпеки під час переходу напруги з високого боку на низький; захист від випадкового дотику до токоведущим частин; застосування електрозахисних засобів і так далі. Будівлі і споруди, а також люди, на АЕС захищаються і від атмосферної електрики громовідводами. До організаційних заходів по забезпеченню безпеки робіт: виконуваних на електроустановках, відносяться: видача нарядів і розпоряджень, видача дозволів на підготовку робочих місць і допуску; виробництво допуску до робіт; нагляд під час роботи; організація перерв в роботі і так далі. До роботи на електроустановках допускаються особи не молодше 18 років.

**Вимоги радіаційної безпеки.** Забезпечення радіаційної безпеки на АЕС здійснюється відповідно до вимог «Правил радіаційної безпеки при експлуатації атомних станцій» (ПРБ АС – 84), які містять:

- організаційні заходи при проведенні радіаційно–небезпечних робіт, включаючи роботи по нарядах–допусках, розпорядженням і оперативне обслуговування устаткування в зоні строгого режиму;
- умови і порядок застосування засобів індивідуального захисту;
- порядок користування приладами індивідуального дозиметричного контролю і санітарно–гігієнічними пристроями;
- рекомендації по поведінці персоналу при роботі в зоні строгого режиму і особистій гігієні;
- основні положення по дезактивації приміщень і устаткування;
- порядок збору, транспортування і поховання радіоактивних відходів.

Документом, що визначає граничні рівні дії іонізуючих випромінювань на людину, є «Норми радіаційної безпеки НРБ–76». У ній регламентовані категорії опромінюваних осіб, групи критичних органів і основні дозові межі. Персонал, безпосередньо працюючий з джерелами іонізуючих випромінювань, належить до категорії «А», а особи, які безпосередньо з джерелами іонізуючих

випромінювань не працюють, але за умовами розміщення робочих місць можуть піддаватися дії випромінювання, належать до категорії «Б».

Для категорії «А» основною дозовою межею встановлена гранично допустима доза ПДД за рік, а для категорії «Б» – межа дози ПД за рік. З урахуванням ролі окремих органів або частин тіла в життєзабезпеченні людини і їх відносній радіочутливості встановлені три групи критичних органів:

I група – усе тіло і червоний кістковий мозок;

II група – м'язи, щитовидна залоза, жирова тканина, печінка, бруньки, селезінка, шлунково–кишковий тракт, легені, кришталік очей і інші, окрім тих, що віднесені до I і III групам;

III група – шкірний покрив, кісткова тканина, кисті рук, передпліччя, лодыжки і стопи.

Основні дозові межі опромінення персоналу АЕС представлені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Основні дозові межі опромінення персоналу АЕС

Дозові межі зовнішнього і внутрішнього опромінення, сЗв за рік	Група критичних органів		
	I	II	III
Гранично допустима доза ПДД за рік для категорії «А»	5	15	30
Гранично допустима доза ПДД за рік для категорії «В»	0,5	1,5	3

Основними завданнями забезпечення радіаційної безпеки АЕС є:

– надійне утримання тих, що утворюються в процесі ділення ядерного палива продуктів ділення;

– зниження потоку нейтронного і  $\gamma$ -випромінювання у виробничих приміщеннях АЕС до проектних значень потужності еквівалентної дози.

Рішення цих завдань вирішується комплексом технічних засобів і організаційних заходів. Крім того, в конструкцію ЯЕУ АЕС закладено застосування фізичних бар'єрів безпеки і локалізуючі системи, призначені для локалізації або відвертання поширення радіоактивних продуктів за межі гермозони і території АЕС.



**Вентиляція і опалювання.** На АЕС передбачені припливно–витяжні загальнообмінні і місцеві витяжні системи вентиляції. При цьому дотримується принцип роздільного вентиляювання приміщень зони строгого режиму і зони вільного режиму. Основним принципом організації вентиляції виробничих приміщень ЗСР є забезпечення спрямованості руху повітряних потоків тільки у бік брудніших приміщень. Опалювання приміщень ЗСР передбачається повітряне, поєднане з припливною вентиляцією.

**Освітлення виробничих приміщень.** Раціональне освітлення виробничих приміщень і робочих місць на АЕС має велике значення для виконання персоналів своїх функціональних обов'язків в умовах, коли у більшості приміщень відсутнє природне освітлення. На АЕС передбачається природне, поєднане і штучне освітлення. Для освітлення приміщень використовуються, як правило, газорозрядні лампи низького і високого тиску – люмінесцентні, металлогенні, натрієві, ксенонові і дугові ртутні лампи.

**Захист від шуму і вібрації.** Джерелом виникнення шуму і вібрації є машини, що обертаються, технологічні установки і апарати, в яких відбувається переміщення з великою швидкістю рідин і газів, електротехнічне устаткування зі змінними електромагнітними полями. Для захисту від шуму застосовуються:

- звукоізоляція конструкцій, що захищають;
- звукопоглинальні конструкції і екрани;
- глушники шуму;
- правильне планування і забудова.

*Висновки.* У цій частині дипломного проекту була розглянута організація праці на Запорізькій АЕС. Проаналізувавши умови праці, виділили такі чинники, як виробничий шум, вібрація, температура повітря, вентиляція та освітлення, які перевищують гранично допустимі рівні, встановлені документами, які суттєво впливають на здоров'я персоналу. Були зазначені заходи зниження впливу небезпечних і шкідливих факторів.

## 7 ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

Економічне обґрунтування дипломного проекту утримує визначення капітальних витрат на будівництві АЕС, щорічних експлуатаційних витрат пов'язаних з виробництвом електроенергії, проектних техніко–економічних показників. Початкові дані для розрахунку приведені в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Вихідні данні

Показник	Позначення	Величина
1. Встановлена електрична потужність, МВт	$N_y$	1300
2. Число годинника використання встановленої потужності, година в рік	$h$	7200
3. Коефіцієнт витрати електроенергії на власні продуктивні потреби	$K_{сн}$	0,0798
4. ККД станції бруто	$\eta_{бр}$	0,314
5. Глибина вигорання ядерного палива МВт.сут/т	$b$	40000
6. Питомі капітальні вкладення, грн./кВт	$k$	5000
7. Штатний коефіцієнт, чел/МВт	$n$	1,22
8. Нормальний термін будівництва, років	$T_{стр}$	6
9. Вартість 1кг ядерного палива, грн.	$\Pi_T$	5750
10. Вартість вивезення 1кг ОЯТ, грн.	$\Pi_{хр}$	200
11. Оптовий тариф за 1кВтгодина електроенергії коп./кВт · година	$T_3$	14

### 7.1 Визначення величини і структури капітальних вкладень

Капітальні вкладення – інвестиції, спрямовані на створення основних фондів АЕС [23].

На стадії ескізного проекту величина капвкладень визначається укрупнено по формулі:

$$K = k \cdot N_y = 5000 \cdot 1300 \cdot 1000 = 6500 \text{ млн.грн.} \quad (7.1)$$

де  $K$  – капіталовкладення в проектуємий енергоблок.

$k = 5000$  грн./кВт – питомі капіталовкладення;

$N_y$  – встановлена потужність ЕБ.

За величиною капітальних витрат визначається зразкова технологічна структура капвкладень в проектуваний енергоблок залежно від його типу по якій можна судити про величину витрат по кожному напрямку фінансування. Розподіли капіталовкладень по видах витрат приведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Розподіл капіталовкладень по видах витрат

Основний зміст витрат	%	Млн. грн.
1. Підготовка території	0,6	39
2. Об'єкти основного виробничого призначення	68	4420
3. Об'єкти підсобного призначення	2,2	143
4. Об'єкти вспомогательного енергогосподарства	6,2	403
5. Об'єкти транспорту і зв'язку	2,2	143
6. Зовнішні мережі	2,0	130
7. Благоустрій	0,6	39
8. Тимгодині будівлі і споруди	2,7	175,5
9. Інші роботи і витрати	3,5	227,5
10. Зміст дирекції електричної станції, що будується	0,25	16,25
11. Підготовка експлуатаційного персоналу	0,17	9,75
12. Проектні і до вишукувальні роботи	1,6	104
13. Непередбачені витрати	10	650
Всього	100	6500

## 7.2 Вироблення і випуск електроенергії

Розрахунок вироблення і випуск електроенергії визначається виходячи із заданого в проекті режимі використання ЕБ в енергосистемі, який визначається числом годинника використання встановленої потужності:

$$W_{\text{БРУТТО}} = N_y \cdot h = 1,3 \cdot 10^6 \cdot 7200 = 9,36 \cdot 10^9 \text{ кВтгод}; \quad (7.2)$$

де  $W_{\text{БРУТТО}}$  – годове енерговироблення;

$h$  – число годин роботи по встановленій потужності в рік;

$N_y$  – встановлена потужність ЕБ.

Річна відпустка електроенергії в енергосистему визначається з урахуванням витрати електроенергії на СН:

$$W_{\text{НЕТТО}} = W_{\text{БРУТТО}}(1 - K_{\text{ВП}}) = 9,36 \cdot 10^9 \cdot (1 - 0,0798) = 8,613 \cdot 10^9 \text{ кВт·год}, \quad (7.3)$$

де  $W_{\text{НЕТТО}}$  – кількість відпущеної електроенергії;

$W_{\text{БРУТТО}}$  – річне енерговироблення;

$K_{\text{ВП}}$  – коефіцієнт витрати електроенергії на власні виробничі потреби.

### 7.3 Річні експлуатаційні витрати

Визначення річних витрат на виробництво електроенергії, так звані річних експлуатаційних витрат:

$$B_{\text{ГОД}} = B_{\text{П}} + B_{\text{А}} + B_{\text{РСМ}} + B_{\text{ОП}} + B_{\text{ПР}} + B_{\text{ПВ}}; \quad (7.4)$$

де  $B_{\text{П}}$  – витрати на паливо;

$B_{\text{А}}$  – річні амортизаційні відрахування;

$B_{\text{ОП}}$  – витрати на оплату праці промислово–виробничого персоналу з відрахуваннями на соціальне страхування, до фонду ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи і фонду зайнятості;

$B_{\text{ПР}}$  – інші витрати;

$B_{\text{РЕМ}}$  – витрати на усі види ремонту;

$B_{\text{ПВ}}$  – позавиробничі витрати.

– витрати на паливо:

$$B_{\text{T}} = Gzod \left( \text{Ц}_{\text{T}} + \text{Ц}_{\text{ХР}} + \frac{0,185 \text{Ц}_{\text{T}}}{30} \right) = 31050 \left( 5750 + 200 + \frac{0,185 \cdot 5750}{30} \right) = 185,8 \text{ млн.гр.}; \quad (7.5)$$

де  $G_{\text{год}}$  – річна витрата ЯТ;

$C_{\text{т}}$  – ціна за один кілограм ЯТ з урахуванням виготовлення касет і вартості доставки;

$C_{\text{хр}}$  – витрати на зберігання і вивезення НЯТ за межі України.

$$G_{\text{ГОД}} = \frac{W_{\text{БРУТТО}}}{24 \cdot V \cdot \eta_{\text{БРУТТО}}} = \frac{9,36 \cdot 10^9}{24 \cdot 40000 \cdot 0,314} = 31050,9 \text{ кг.} \quad (7.6)$$

– амортизаційні відрахування:

$$B_a = K \cdot N_a \cdot \alpha = 6,5 \cdot 10^9 \cdot 0,07 \cdot 0,9 = 409,5 \text{ млн.грн;} \quad (7.7)$$

де  $N_a = 7\%$  – середня норма амортизації по основних фондах;

$\alpha = 0,9$  (не уся вартість за сметно–фінансовому розрахунком будівництва переводиться в первинну вартість основних фондів).

– витрати на зарплату ППП з відрахуванням на соцстрахування, до пенсійного фонду, фонду страхування безробіття:

$$B_{\text{зп}} = R_{\text{спис}} \cdot \Phi_{\text{зп}}(1+K') = 1586 \cdot 20000(1+0,3811) = 43,8 \text{ млн.грн;} \quad (7.8)$$

де  $R_{\text{спис}}$  – среднесписочный склад ППП (промислово виробничого персоналу);

$\Phi_{\text{зп}}$  – річний фонд зарплати ППП, може визначатися через середню зарплату ППП  $\Phi_{\text{зп}} = 20000$  грн/рік;

$K'$  – сумарний коефіцієнт відрахувань на соцстрахування, фонд зайнятості  $D_o' = 0,3811$ .

$$R_{\text{спис}} = n_{\text{шт}} \cdot N_y = 1,22 \cdot 1300 = 1586 \text{ чел.,} \quad (7.9)$$

де  $n_{\text{шт}}$  – штатний коефіцієнт для 6–го блоку станції;

$N_y$  – встановлена потужність ЕБ;

Витрати на поточний ремонт  $V_{\text{рем}}$  визначаються залежно від вартості основних фондів:

$$V_{\text{рем}} = K_{\text{рем}} \cdot K \cdot \alpha = 0,03 \cdot 6,5 \cdot 10^9 \cdot 0,9 = 175,5 \text{ млн. грн.}; \quad (7.10)$$

де  $K_{\text{рем}} = 0,03$  – коефіцієнт відрахування витрат на ремонт.

– інші витрати, включають витрати на допоміжні матеріали, роботи по підвищенню безпеки, охорону, автотранспорт і інші загальностанційні витрати:

$$V_{\text{ІПР}} = K_{\text{ІПР}}(V_a + V_{\text{зп}} + V_{\text{рем}}) = 0,15(409,5 + 36,14 + 175,5) = 93,171 \text{ млн.грн}, \quad (7.11)$$

де  $K_{\text{ІПР}} = 0,15$  – коефіцієнт віднесення витрат на інші витрати.

– поза виробничі витрати, відрахування до централізованих і позабюджетних фондів, зняття з експлуатації і інші:

$$V_{\text{вн}} = W_{\text{нетто}} \cdot T_e \cdot 0,015 = 8,613 \cdot 10^9 \cdot 0,14 \cdot 0,015 = 18,087 \text{ млн.грн}; \quad (7.12)$$

де  $T_e$  – середній тариф за 1кВа година.

$W_{\text{нетто}}$  – електроенергія, що відпускається з шин електростанції в енергосистему кВт · година;

$$V_{\text{год}} = V_{\text{т}} + V_a + V_{\text{рем}} + V_{\text{зп}} + V_{\text{ІПР}} + V_{\text{вн}}, \quad (7.13)$$

$$V_{\text{год}} = 185,8 + 409,5 + 175,5 + 43,8 + 93,171 + 18,087 = 925,8 \text{ млн.грн.}$$

#### 7.4 Складові собівартості одиниці електроенергії

Оскільки середнє теплове навантаження за опалювальний період для теплофікації не перевершує 8% від загальної теплової потужності ЕБ, то можна

умовно віднести річні експлуатаційні витрати АЕС на виробництво електроенергії.

Тоді собівартість 1кВт.ч відпущеної електроенергії визначається, коп.:

$$C = \frac{B_{\text{г}}}{W_{\text{НЕТТО}}} \cdot 100 = \frac{925,8}{8613} \cdot 100 = 10,7 \text{ коп.} \quad (7.14)$$

Паливна складова собівартості:

$$C_T = \frac{B_T}{W_{\text{НЕТТО}}} \cdot 100 = \frac{185,8}{8613} \cdot 100 = 2,1 \text{ коп.} \quad (7.15)$$

Постійна складова собівартості:

$$C_{\text{П}} = \frac{B_{\text{Г}} - B_T}{W_{\text{НЕТТО}}} \cdot 100 = \frac{(925,8 - 185,8)}{8613} \cdot 100 = 8,6 \text{ коп} \quad (7.16)$$

### 7.5 Фінансові показники проекту

Дохід від проекту визначається сумою виручки від реалізації електроенергії за гуртовою ціною через національний диспетчерський центр на енергоринку:

$$D = W_{\text{НЕТТО}} \cdot T_{\text{э}} = 8613 \cdot 0,14 = 1205,83 \text{ млн.грн} \quad (7.17)$$

Балансовий прибуток визначається як різниця між доходом від усіх видів діяльності і витратами виробництва:

$$П_{\text{бал}} = D - B_{\text{г}} = 1205,834 - 925,8 = 280,03 \text{ млн.грн} \quad (7.18)$$

Рентабельність виробництва:

$$P = \frac{П_{\text{БАЛ}}}{O_{\Phi} + O_C} \cdot 100 = \frac{280,03}{5850 + 1023,05} \cdot 100 = 4,07\% \quad . \quad (7.19)$$

Первинна вартість основних фондів:

$$O_{\Phi} = K \cdot \alpha = 6500 \cdot 0,9 = 5850 \text{ млн. грн.} \quad (7.20)$$

Обігові кошти:

$$O_C = G_{\text{перв}} \cdot Ц_T \cdot 1,91 = 93,15 \cdot 5750 \cdot 1,91 = 1023,05 \text{ млн. грн.}; \quad (7.21)$$

де  $G_{\text{перв}}$  – первинне завантаження реактора;

1,91– коефіцієнт, що враховує долю вартості первинного паливного завантаження у величині обігових коштів.

Податок на прибуток підприємства:

$$H_{\text{пр}} = a \cdot П_H = 0,15 \cdot 280,03 = 42 \text{ млн. грн.}; \quad (7.22)$$

де  $П_H$  – оподатковуваний дохід =  $П_{\text{бал}}$

$a$  – ставка податку на прибуток 15%.

Чистий прибуток підприємства:

$$П_{\text{ч}} = П_{\text{бал}} - H_{\text{пр}} = 310,45 - 46,57 = 263,89 \text{ млн. грн.} \quad (7.23)$$

Критичний обсяг виробництва:

$$W_{\text{кр}} = \frac{B_{\text{рік}} - B_T}{T_e - C_T} = \frac{925,8 \cdot 10^6 - 185,8 \cdot 10^6}{0,14 - 0,021} = 6218,5 \cdot 10^6 \text{ кВт}\cdot\text{г}; \quad (7.24)$$

де  $B_{\text{рік}}$  – річні експлуатаційні витрати, грн;



$V_t$  – витрати на паливо, грн.;

$T_e$  – тариф за кВт · година, грн.;

$C_t$  – паливна складова в собівартості 1 кВт · година, грн.

## 7.6 Оцінка економічної ефективності проекту

Оцінку економічної ефективності можна зробити на основі дисконтованих грошових потоків за увесь період життєвого циклу проекту.

Визначаються наступні показники:

- чистий приведений прибуток (NPV);
- внутрішня норма прибутку (IRR);
- індекс доходності (PI);
- термін окупності (P);
- чистий приведений прибуток (NPV)

$$NPV = \sum_1^T (D_t - U_t - k_t - H_t)(1+r)^{-t} \quad ; \quad (7.25)$$

де  $D_t$  – доход від реалізації в рік;

$V_t$  – експлуатаційні витрати без урахування амортизації;

$k_t$  – капітальні витрати в рік;

$H_t$  – податок на прибуток в році;

$t$  – поточний рік розрахунку;

$T$  – кінцевий рік експлуатації рівний нормативному терміну служби основного технологічного устаткування;

$r$  – ставка дисконту, рівна потрібній інвестором нормі прибутку.

Критерій (NPV).

– внутрішня норма прибутку (IRR) – перевищення його значення над вимагаємою інвестором нормою прибутку:

$$e(IRR) = r_1 + NPV_1(r_2 - r_1)/(NPV_1 - NPV_2) \quad . \quad (7.26)$$

– індекс прибутковості:

$$PI = \frac{(Dt - Ut - Ht)(1+r)^{-t}}{Kt(1+r)^{-t}} > 1. \quad (7.27)$$

Термін окупності визначається тим роком життєвого циклу проекту, коли значення NPV переходять з області негативних значень в області позитивних.

Розрахунок дисконтних показників приведений в таблицях 7.3 і 7.4.

При  $r = 5\%$   $NPV > 0$ , а при  $r = 10\%$   $NPV < 0$ . Таким чином при  $r = 5\%$  підприємство окупиться через 22 роки з дня початку будівництва (16 років з дня експлуатації), а при  $r = 10\%$  підприємство не окупиться. Максимальна дисконтна ставка при якій проект виходить на нульову прибутковість  $r = 7,51\%$

$$NPV = \sum_1^0 (D_t - U_t - k_t - H_t)(1+r)^{-t} \quad (7.28)$$

Для  $r = 0,05$ ;  $NPV_1 = 2019,404$  млн.грн ;

$r = 0,0751$  ;  $NPV_2 = 0$  млн.грн.

– внутрішня норма прибутку (IRR) – перевищення його значення над вимагаємою інвестором нормою прибутку:

$$e(IRR) = r_1 + NPV_1(r_2 - r_1) / (NPV_1 - NPV_2) ; \quad (7.29)$$

$$e(IRR) = 0,05 + 2019,404(0,0751 - 0,05) / (2019,404 - 0) = 0,0751.$$

– індекс прибутковості:

$$PI = \sum_t^T (Dt - Ut - Ht)(1+r)^{-t} / \sum_1^t Kt (1+r)^{-t} ; \quad (7.30)$$

$$PI = 4939,5 / 4939,5 = 1.$$

Таблиця 7.3 – Розрахунок дисконтних показників

Надходження		Витрати			Результат при $r = 10\%$		
Роки	Дохід	Капітало- вкладення	Експлуат. витрати	Податки	Чистий прибуток	Дисконтний множник	Чистий приведений прибуток NPV
	млн.грн.	млн.грн.	млн.грн.	млн.грн.	млн.грн.	$(1+r)^{-t}$	млн.грн.
1	0,000	260,000	0,000	0,000	-260,000	0,909	-236,364
2	0,000	910,000	0,000	0,000	-910,000	0,826	-752,066
3	0,000	1430,000	0,000	0,000	-1430,00	0,751	-1074,380
4	0,000	1560,000	0,000	0,000	-1560,00	0,683	-1065,501
5	0,000	1560,000	0,000	0,000	-1560,00	0,621	-968,637
6	0,000	780,000	0,000	0,000	-780,000	0,564	-440,290
7	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,513	331,728
8	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,467	301,571
9	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,424	274,156
10	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,386	249,232
11	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,350	226,575
12	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,319	205,977
13	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,290	187,252
14	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,263	170,229
15	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,239	154,754
16	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,218	140,685
17	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,198	127,896
18	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,180	116,269
19	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,164	105,699
20	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,149	96,090
21	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,135	87,354
22	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,123	79,413
23	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,112	72,194
24	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,102	65,631
25	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,092	59,664
26	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,084	54,240
27	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,076	49,309
28	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,069	44,827
29	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,063	40,752
30	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,057	37,047
31	1205,830	0,000	517,571	41,814	646,445	0,052	33,679

Таблиця 7.4 – Звідні дані

Показник	Позначення	Величина
Капіталовкладення, млн.гр.	K	5000
Річне вироблення електроенергії, кВт/година	$W_{\text{брутто}}$	$9,36 \cdot 10^9$
Річна відпустка з шин електроенергії в енергосистему, кВт/година	$W_{\text{нетто}}$	$8,613 \cdot 10^9$
Витрати на паливо, млн.гр.	$B_T$	185,8

Продовження таблиці 7.4

Річні амортизаційні відрахування, млн.гр.	$V_a$	409,5
Річні витрати на зарплату ППП, млн.гр.	$V_{з.п.}$	43,8
Витрати на поточний ремонт, млн.гр.	$V_{рем}$	175,5
Інші витрати, млн.гр.	$V_{пр}$	93,171
Позавиробничі витрати, млн.гр.	$V_{вн}$	18,087
Річні експлуатаційні витрати, млн.гр.	$V_{год}$	925,8
Собівартість 1кВт години	$C$	10,7
Паливна складова, коп.	$C_t$	2,1
Постійна складова, коп.	$C_p$	8,6
Дохід, млн.гр.	$D$	1205,83
Балансовий прибуток, млн.грн.	$P_{бал}$	280,03
Рентабельність виробництва %	$P$	4,06
Податок на прибуток, млн.грн.	$H_{пр}$	42
Чистий прибуток, млн.грн.	$P_ч$	263,89
Критичний обсяг виробництва, кВт/година	$W_{кр}$	$6218,5 \cdot 10^6$

*Висновки.* В результаті проведеного розрахунку економічних показників були визначені капітальні витрати на будівництво, щорічні витрати, пов'язані з виробництвом електроенергії, чистий приведений прибуток, внутрішня норма прибутку, індекс доходності, термін окупності проекту, рентабельність і так далі. За відповідними показниками можна судити, що проект економічно вигідний, але з низьким коефіцієнтом прибутковості, який складає 2/3 від увесь термін експлуатація. Значення внутрішньої норми прибутку рівної 4%, показує, що на будівництво вигідно брати кредити під відсоток нижче розрахункового значення. Термін окупності проекту свідчить про його ліквідність, тобто можливості повернути витрачені спочатку засоби на реалізацію проекту за можливо меншою термін. За рахунок наявності постійної складової собівартості електроенергії, загальна собівартість електроенергії збільшується при зменшенні річного енерговироблення енергоблока. Для збереження максимальної економічної ефективності проєктованого блоку необхідно, щоб енергоблок працював у базовому режимі, на номінальній потужності і не допускався останов блоку, або зниження потужності не пов'язане з вимогами безпеки і збереження працездатності основного устаткування.

## ВИСНОВКИ

Дипломний проект виконаний у повному обсязі відповідно до завдання.

В дипломному проекті була розглянута АЕУ з двоконтурною схемою з реактором корпусного типу на теплових нейтронах і турбіна на насиченій парі.

В результаті дипломного проектування дана коротка характеристика об'єкта управління.

Розроблено математичні моделі кінетики ядерного реактора, теплообміну в ядерному реакторі, перемішування і транспортного запізнювання теплоносія, внутрішніх зворотних зв'язків в ядерному реакторі з яких було знайдено передавальну функцію і розроблена структурна схема АППУ.

На основі отриманих математичних моделей була спроектований верхній рівень керування і структурна схема АСУ ТП блоку реактора. Система контролю і управління блоку забезпечує автоматичну і / або автоматизовану діагностику стану і режимів експлуатації, в тому числі і власне технічних і програмних засобів системи контролю та управління.

Виконан розрахунок і вибів приладів контролю та схему електропостачання.

Розроблена функціональна схема автоматизації регулювання рівня в ПНТ – 3, обран комплекс технічних засобів, представлені принципи вимірювання та регулювання рівня в ПНТ – 3. Приведено опис роботи регулятора рівня в ПНТ – 3.

Розглянуто організацію охорони праці, проаналізувавши умови праці, були визначені заходи зниження впливу небезпечних і шкідливих факторів.

Виконаний розрахунок економічного обґрунтування проекту, визначено економічну ефективність від модернізації АСК.

В результаті проведеного розрахунку економічних показників можна судити, що проект економічно вигідний, але з низьким коефіцієнтом прибутковості, який складає 2/3 від увесь термін експлуатація. Значення внутрішньої норми прибутку рівної 4%, показує, що на будівництво вигідно брати кредити під відсоток нижче розрахункового значення. Такий термін

окупності проекту свідчить про його ліквідність, тобто можливості повернути витрачені спочатку засоби на реалізацію проекту за можливо меншою термін. За рахунок наявності постійної складової собівартості електроенергії, загальна собівартість електроенергії збільшується при зменшенні річного енерговироблення енергоблока. Для збереження максимальної економічної ефективності проєктованого блоку необхідно, щоб енергоблок працював у базовому режимі, на номінальній потужності і не допускався останів блоку, або зниження потужності не пов'язане з вимогами безпеки і збереження працездатності основного устаткування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агій Я.Ю. Охорона праці у галузі : навчальний посібник. Ужгород: ПП «АУТДОР – ШАРК», 2015. 200 с.
2. АЕС з реактором типу ВВЕР–1000. Від фізичних основ експлуатації до еволюції проекту. / С.А. Андрущечко та ін. Москва : Логос, 2010. 604 с.
3. Арзуманов Э. С. Расчет и выбор регулирующих органов автоматических систем. Москва : Энергия, 1971. 112с.
4. Артюх С.Ф., Пантелеева И.В. Электрические станции, сети и системы. Харьков : 2001. 138с.
5. П.С. Атаманчук, В.В. Мендерецький, О.П. Панчук, О.Г. Чорна Основи охорони праці: навч. посіб. Київ: Центр учбової літератури, 2011. 224 с.
6. Бескrestнов Н.В. Охрана труда на атомных станциях: учеб. пособие. Москва: Энергоатомиздат, 1984. 168 с.
7. Беляев Г.Б., Кузицин В.Ф., Смирнов Н.И. Технические средства автоматизации в энергетике. Москва. Энергоиздат, 1982.
8. Бундюк А.М. Комп'ютерні системи аналізу ефективності в енергетиці. Конспект лекцій : Одеса, 2006.
9. М.П. Гандзюк, Є.П. Желібо, М.О. Халімовський; Основи охорони праці: підруч. 5–те видання За ред. М.П. Гандзюка. – Київ.: Каравелла, 2011. 384 с.
10. Голінько В.І. Основи охорони праці: підручник : Міністерство освіти і науки України; Нац. гірн. ун–т. – 2–ге вид. Донецьк: НГУ, 2014. 271 с.
11. Демченко В.А., Автоматизація та моделювання технологічних процесів АЕС і ТЕС: навчальний посібник. – Одеса: Астропринт, 2001. 308с.
12. Денісов В.П., Драгунов Ю.Г. Реакторні установки ВВЕР для атомних електростанцій. Москва: Вид.АТ, 2012. 480 с.
13. Загальні положення безпеки атомних станцій. НП 306.2.141 – 2008.
14. Зорін В.М. Дослідження і математичне моделювання АЕС на основі системного підходу. Москва : Вид-во МЕІ, 2002. 88с.
15. Инструкция по эксплуатации систем автоматического регулирования 123456.ТА.ОО.ИЭ.01.02Д.

16. Инструкция по эксплуатации системы компенсации давления 1 контура. 123456.1234.РО.УР.ИЭ.31Б

17. Инструкция по эксплуатации систем дистанционного управления. ТА.00.ИЭ.01.02.Г.

18. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ–97), Державні гігієнічні нормативи ГДП 6.6.1.–6.5.001–98. видання офіційне. 2003 р. 45 с.

19. П.С. Атаманчук, В.В. Мендерецький, О.П. Панчук, Р.М. Білий. Охорона праці в галузі : навчальний посібник . Київ : «Центр учбової літератури», 2017. 322 с.

20. Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС: схеми, процеси, РЗІ матеріали, конструкції, моделі. О. В. Єфімов та ін.; за ред. О.В. Єфімова. Харків : ТОВ «В справі», 2017. 420 с.

21. Технологічний регламент безпечної експлуатації енергоблоку Запорізької АЕС. 03.ГТ.00.РГ.01.

22. 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.

23. Третій том збірника тез доповідей ІХ Міжнародної науково–технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології». Дніпро. – 2019. – Т. ІІІ. – 98 с.

24. Закон України «Про охорону праці».: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2694–12>.