

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Новіков Павло Валерійович

УДК 621.181.1:681.5

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ ІНЕРЦІЙНИМИ**  
**КАНАЛАМИ ЕНЕРГОБЛОКУ ТЕПЛОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З**  
**ВИКОРИСТАННЯМ ДВОКАНАЛЬНОГО НЕЧІТКОГО КОНТРОЛЕРА**  
05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ П.В. Новіков

Науковий керівник Ковриго Юрій Михайлович, к. т. н., професор

Київ – 2019

## АНОТАЦІЯ

Новіков П.В. Автоматизація процесів керування інерційними каналами енергоблоку теплової електростанції з використанням двоканального нечіткого контролера. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 «Автоматизація процесів керування» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2019.

Дисертацію присвячено підвищенню ефективності роботи систем автоматичного керування інерційними контурами енергоблоків ТЕС, що працюють у маневрових режимах.

Мета дослідження полягає у підвищенні ефективності роботи систем автоматичного керування інерційними контурами енергоблоків ТЕС, що працюють у маневрових режимах.

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого керування інерційними контурами водо-парового тракту прямоточного котлоагрегату.

Предмет дослідження – система автоматичного регулювання температурного режиму водо-парового тракту пилувугільного прямоточного котлоагрегату ТЕС, що працює в умовах нестаціонарності динамічних характеристик об'єкту керування.

У роботі застосовано теоретичні основи теплоенергетичних процесів та автоматизації, методи ідентифікації, статистичні методи дослідження, а також методи математичного і комп'ютерного моделювання динамічних процесів.

У дисертаційній роботі вперше запропоновано паралельну двоканальну схему керування з використанням блоків нечіткої логіки в обох каналах. Така структура дає змогу реалізувати інтелектуальний керуючий блок, який забезпечує необхідну якість функціонування системи керування у всьому діапазоні зміни навантаження енергоблоку.

Вперше розроблено і досліджено систему автоматичного керування температурним режимом прямого котлоагрегату на основі двоканального нечіткого контролера. Це досягнуто за рахунок розробки бази правил нечіткої логіки, яка побудована на основі досвіду керування в ручному режимі операторами-технологами, що дозволило підвищити швидкість реакції контролера, покращити прямі показники якості, а також мінімізувати кількість включень регулюючої апаратури.

Удосконалено математичні моделі у вигляді функцій передачі інерційних контурів енергоблоку ТЕС на всьому робочому діапазоні навантажень за рахунок застосування методу додаткових членів для процедури ідентифікації об'єкта керування, що дало змогу виявити і формалізувати особливості зміни динамічних характеристик котлоагрегату при зміні режиму роботи.

Для двоканального нечіткого контролера запропоновано новий підхід оцінювання стійкості. За рахунок приведення нелінійної системи керування до еквівалентної схеми з адаптацією налаштувань регулятора її можливо розглядати як лінійну в кожний момент часу. Це дало змогу використати методи оцінки стійкості, що ґрунтуються на методах лінійної теорії автоматичного керування.

Виконано такі завдання: аналіз існуючих способів керування інерційними об'єктами з запізненням та змінними параметрами; дослідження динамічних властивостей пароводяного тракту прямого котлоагрегата як об'єктів керування, ідентифікація та створення математичних моделей; аналіз дій оператора-технолога при керуванні в ручному режимі інерційними контурами пароводяного тракту котлоагрегата; розробка інтелектуального контролера на основі двоканальної структури з використанням блоків нечіткої логіки; моделювання роботи системи керування з двоканальним нечітким контролером і порівнянням ефективності функціонування з відомими рішеннями; розробка методики оцінки стійкості нелінійної системи керування з використанням блоків нечіткої логіки; розробка методики

налаштування двоканального нечіткого контролера; розробка автоматизованої системи керування температурним режимом котлоагрегату; технічна реалізація АСК на промислових засобах автоматизації.

Розглянуто прямоточний котлоагрегат як технологічний об'єкт керування і виконано аналіз проблем регулювання котлоагрегатами ТЕС, що працюють в маневрових режимах. Прямоточний котлоагрегат є складним об'єктом для автоматизації, що характеризується яскраво вираженими акумулюючими властивостями, наявністю часових затримок, нелінійностей, люфтів регулюючої апаратури, а також нестаціонарності динамічних характеристик.

Однією із основних систем регулювання на прямоточному котлі є система автоматичної підтримки температурного режиму водо-парового тракту від його початку до першого регульованого впорскування. Ефективність функціонування цієї системи суттєво впливає на якість роботи системи первинного перегріву пари, а від так і на надійність та економічність роботи котлоагрегата в цілому.

Наявні методи і схеми керування не задовольняють в повній мірі вимогам, що висуваються до систем автоматизації інерційних контурів ТЕС. В першу чергу причиною цього є складність ідентифікації об'єкту керування. Значна нелінійність залежно від режиму функціонування, стохастичність вимірювання технологічних параметрів, взаємопов'язаність контурів є причинами такої ситуації. Багато методів підвищення якості функціонування, що пропонуються теорією автоматичного керування, практично неможливо застосовувати в умовах промислової експлуатації прямоточних котлоагрегатів. Можливим шляхом підвищення ефективності функціонування систем керування є використання інтелектуальних систем, до яких відносяться системи нечіткої логіки.

Проведена процедура параметричної ідентифікації температурних контурів регулювання, що задіяні в регулюванні температурного режиму котлоагрегату, а також викладені засади проектування нової схеми керування

на основі нечіткої логіки. На основі отриманих експериментальних даних розроблено математичні моделі контурів регулювання температурного режиму пароводяного тракту у вигляді функцій передачі для двох крайніх значень навантаження енергоблоку – 225 МВт 300 МВт. Виявлено значну нелінійність динамічних характеристик об'єкта керування залежно від навантаження.

Проведено синтез двоканального нечіткого контролера для керування температурою в проміжній точці проточного котлоагрегату на основі отриманих математичних моделей. Визначені необхідні вхідні змінні, їх діапазони, кількість і вид лінгвістичних термів. В даній схемі як вхідні змінні двоканального fuzzy-контролера визначені сигнал неузгодженості  $e$ , похідна сигналу неузгодженості за часом  $de/dt$  і сигнал по навантаженню  $N$ . Отримані аналітичні залежності функцій належності вхідних і вихідних змінних. Розроблено базу правил для обох блоків нечіткої логіки двоканального fuzzy контролера.

Структура двоканального fuzzy-контролера може використовуватися для зниження коливальності і організації процесу керування, близького до ручного керування досвідченого оператора-технолога. Дана двоканальна структура дозволяє органічно реалізувати такий спосіб керування, при якому всі значення керуючого впливу відповідають певним етапам перехідного процесу (розгону, гальмування, корекції).

Порівняльне дослідження роботи двоканального нечіткого контролера і ПД– регулятора показало, що по каналу завдання при номінальному навантаженні нечіткий контролер має менший час регулювання – 560 с, що на 12% менше в порівнянні з ПД, при цьому кількість включень регулятора є мінімальною і складає 2, відтворюючи сигнал керування, близький до оптимального. За каналом збурення динамічна похибка в схемі з двоканальним нечітким контролером складає  $5.8^{\circ}\text{C}$ , що на 22% менше ніж в схемі ІМС, час регулювання становить 536 с, на 31% менше ніж з ІМС-регулятором.

Розглянуто реалізацію програмно-апаратної системи керування з використанням відомостей про характеристики об'єкта керування на базі програмованого логічного контролеру. Наведено методику налаштування запропонованої системи. Мовою ST стандарту IEC 61131-3 реалізовано алгоритм нечіткого виводу Мамдані, за яким розраховуються значення тривалості імпульсів і пауз, а також програмно реалізована структура двоканального нечіткого контролера. Виконано порівняльне моделювання у реальному масштабі часу стандартного і нового контуру регулювання з двоканальним нечітким контролером. Обробка записів даних підтвердила збільшення ефективності регулювання за критерієм зниження дисперсії сигналу на високих частотах коливань вихідного параметру (температури), а також зменшення перерегулювання й коливальності.

Додатковим результатом виконаної роботи (окрім покращення динаміки регулювання) є підвищення економічності роботи даного технологічного об'єкту за рахунок кращого регулювання теплового навантаження, а саме точної підтримки заданого значення температури первинної пари на виході з котлу. Підвищена ефективність роботи системи регулювання первинного перегріву пари, так як були усунені небажані максимальні викиди температури водопарової суміші у проміжних точках котла, що можуть привести до ушкодження найбільш термічно напружених поверхонь нагрівання, паропроводу та турбіни. Також були усунені можливі зниження температури пари від заданого значення, які становлять небезпеку для останніх ступенів турбіни внаслідок підвищення вологості пари.

Ключові слова: котлоагрегат, маневрові режими, динамічні характеристики, температурний режим, нечітка логіка, показники якості функціонування, алгоритм керування, паралельна структура.

## ABSTRACT

Novikov Pavlo V. Control processes automation of thermal power plant unit inertial channels using a two-channel fuzzy controller. – the Manuscript.

The dissertation for a candidate degree of technical sciences on the specialty 05.13.07 - Automation of control processes. - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to increase of automatic control systems efficiency of inertial contours of thermal power plant units, which operate in maneuvering modes.

The purpose of the study is to increase the efficiency of the systems of automatic control of inertial contours of TPP power units operating in maneuvering modes.

The object of research is the process of automated control of inertial contours of the water-steam line of the direct-current boiler unit.

The subject of research - the system of automatic control of the temperature regime of the water-steam tract of the PU coal-fired boiler unit TPP, which operates under conditions of unsteadiness of the dynamic characteristics of the control object.

The theoretical bases of heat energy processes and automation, methods of identification, statistical methods of research, as well as methods of mathematical and computer simulation of dynamic processes are applied in this work.

A parallel two-channel control scheme using fuzzy logic blocks in both channels is proposed. This enables the implementation of an intelligent control unit that provides the necessary quality operation of the control system throughout the range of load variation of the power unit.

The control algorithm based on two-channel structure are developed. It forms the output control signal to the object, is approximated to the optimal one.

The mathematical models in the form of transfer functions of inertial circuits of the power plant unit on the whole working range of loads are improved. This made it possible to identify and formalize the peculiarities of changing the dynamic characteristics of the boiler unit when changing the operating mode.

The dissertation highlights the following problem: analysis of existing control methods of inertial objects with transport delayed and variable parameters;

investigation of dynamic properties of the direct-flow boiler water-steam path as control object, identification and creation of mathematical models; analysis of operator actions in manual mode to control inertial contours of the water-steam path of the boiler unit; development the intellectual controller based on two-channel structure using fuzzy logic blocks; simulation of control system operation with two-channel fuzzy controller and comparison of operation efficiency with known solutions; development of method for evaluating the stability of a nonlinear control system using fuzzy logic; development of method for tuning a two-channel fuzzy controller; implementation proposed algorithm using industrial automation equipment.

The direct-current boiler unit as a technological control object is considered and the analysis of regulation problems by TPP boilers operating in maneuver regimes is performed. Straight boiler is a complex object for automation, characterized by pronounced accumulation properties, the presence of time delays, nonlinearities, backlashes of regulatory equipment, as well as non-stationary dynamic characteristics.

One of the main control systems in a direct-current boiler is the system of automatic maintenance of the temperature regime of the water-steam tract from its beginning to the first regulated injection. The efficiency of this system has a significant effect on the quality of the system of primary steam overheating, but also on the reliability and efficiency of the boiler as a whole.

Available methods and control schemes do not fully meet the requirements for the automation systems of the inertial circuits of the TPP. First of all, this is due to the difficulty of identifying the control object. Significant nonlinearity, depending on the mode of operation, stochasticity of the measurement of technological parameters, interconnected contours are the causes of such a situation. Many methods for improving the quality of operation proposed by the theory of automatic control, it is practically impossible to apply in the conditions of industrial operation of direct-current boiler units. The possible way to increase



the efficiency of the operation of control systems is the use of intelligent systems, which include fuzzy logic systems.

The procedure of parametric identification of the temperature control circuits involved in the regulation of the boiler's temperature mode and the principles of designing a new control scheme based on fuzzy logic are outlined. On the basis of the received experimental data, mathematical models of the parameters of the temperature regime of the steam-water tract in the form of transfer functions for two extreme load values of the power unit - 225MW 300 MW were developed. A considerable nonlinearity of the dynamic characteristics of the control object depending on the load is revealed.

A synthesis of a two-channel fuzzy controller for controlling the temperature at the intermediate point of a direct-current boiler unit is carried out on the basis of obtained mathematical models. The necessary input variables, their ranges, quantity and type of linguistic terms are determined. In this scheme, the input variables of a two-channel fuzzy controller are defined by the inconsistency signal  $e$ , the derivative of the time-deviation signal  $de/dt$  and the signal on the load  $N$ . The analytic dependences of the membership and input variables functions are obtained. A rule base has been developed for both blocks of fuzzy logic of a two-channel fuzzy controller.

The structure of the two-channel fuzz-controller can be used to reduce the oscillation and to organize a management process that is close to the manual control of an experienced operator-technologist. This two-channel structure allows for the organic implementation of such a control method in which all the values of the control influence correspond to certain stages of the transient process (acceleration, inhibition, correction).

A multi-circuit control scheme with the introduction of differentiators through outgoing channels was developed and a synthesis of a two-channel fuzzy controller was carried out. According to the results of computer simulation for various load units of the power unit, the main indicators of the quality of the system functioning are compared with other known control schemes.

A comparative study of the operation of a dual-channel fuzzy controller in the inertial circuits of the boiler control unit provides for a dynamic deviation reduction of 12%, a reduction of the adjustment time in the case of perturbation compensation by an average of 30%, improves the integral quality indices by 20-50% in the conditions of load change and reduces the total displacement of the mechanism. with classic solutions based on PID controllers, which provides longer life of basic equipment and saves energy.

The implementation of the software-hardware control system with the use of information about the characteristics of the control object based on the programmable logic controller is considered. The methods of setting up the proposed system are presented. In the language of ST, IEC 61131-3, an algorithm for fuzzy output of Mamdani is implemented, which calculates the values of pulse duration and pause, as well as the software implemented structure of the two-channel fuzzy controller.

A digital control system structure has been developed, proposed by a two-level hierarchy, where local automation with software implemented by the fuzzy controller, necessary protections and selectors of operating modes is separated from the control level, which controls and controls the power unit as a whole.

Along with the improvement of the dynamics of regulation, an additional positive effect is achieved in the form of reducing the wear of the equipment components of the actuating devices (valves, actuators, etc.). Increase of the calculated lifetime of the main elements of the boiler unit due to the smaller number of cycles of thermal stresses and their amplitude that arose during the regular operation of the boiler unit. The technical implementation of the proposed dynamic correction does not require additional sensors, and the control channels are implemented by the software of the control system.

Keywords: boiler unit, maneuvering modes, dynamic characteristics, temperature control, fuzzy logic, fuzzy control, performance indicators, control algorithm, parallel structure.

## Список публікацій здобувача

1. Ковриго Ю.М. Двоканальний нечіткий контролер для регулювання технологічних параметрів в умовах нестационарності динамічних характеристик об'єкта керування [Текст] / Ю.М. Ковриго, П.В. Новіков // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів.– Одеса, 2019. Том 11 № 1.– С. 4-13.
2. Штіфзон О.Й. Розробка адаптуючого fuzzy-logic пристрою для керування в умовах параметричної нестационарності [Текст] / О.Й. Штіфзон, П.В. Новіков, Т.Г. Баган / Східно-європейський журнал передових технологій – Харків, 2018. – Том 1 № 2.– С. 30-37. (видання України, включене до міжнародної наукометричної бази Scopus)
3. Бунке О.С. Проблеми та передумови вдосконалення автоматизації процесів управління ТЕЦ [Текст] / О.С. Бунке, Р.П. Саков, П.В. Новіков // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки", Луцьк, 2018, Випуск № 61.– С. 20-25.
4. Новіков П.В. Застосування інтегро-диференціюючої ланки в схемі з динамічною корекцією вихідного сигналу регулятора / П.В. Новіков, Є.В. Васильченко, В.А. Бондарева // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: XVI міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ. : мат. конф. – К., 2018.
5. Ковриго Ю.М. Fuzzy-регулятор для керування інерційними технологічними параметрами котлоагрегату ТЕС / Ю.М. Ковриго, А.С.Бунке, П.В. Новіков // Nauka i Studia.– NR 8 (169) 2017.– С. 76-84. (іноземне видання)
6. Новіков П.В. Fuzzy-контролер підтримання мікроклімату в приміщенні за значеннями індексу дискомфорту [Текст] / П.В. Новіков, О.В. Степанець, Р.П. Саков // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів.– Одеса, 2017. Том 10 № 4.– С. 76-83.
7. Новіков П.В. Контролер на базі системи нечіткого виводу для регулювання інерційних теплоенергетичних параметрів / П.В.Новіков,

О.С.Бунке // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2017: IV міжнар. наук.-прак. конф. мол. уч, асп., і студ.: мат. конф.– К., 2017.– С. 31-32.

8. Новіков П.В. Інтелектуальна система керування інерційними технологічними параметрами на базі fuzzy-регулятора / П.В.Новіков, О.С.Бунке // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: XV міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ. : мат. конф.– К., 2017.

9. Ковриго Ю.М. Применение метода динамической коррекции в системах регулирования инерционными технологическими объектами [Текст] / Ю.М. Ковриго, А.С.Бунке, П.В. Новіков // Scientific Science Rise. – №1/2 (18) 2016.– С. 21-27.

10. Патент України на корисну модель №107383UA. Регулятор з динамічним коректором для об'єктів з часовою затримкою/ Ю.М. Ковриго, П.В. Новіков.– № u201506730; заявл. 07.07.2015; опубл. 10.06.2016. – Бюл. № 11/2016.

11. Новіков П.В. Застосування методу динамічної корекції для керування інерційними теплоенергетичними об'єктами / П.В.Новіков, Ю.М.Ковриго // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: XIV міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ. : мат. конф.– К., 2016.

12. Новіков П.В. Застосування динамічного коректора в каскадних системах при керуванні інерційними об'єктами / П.В.Новіков, Ю.М.Ковриго // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: XII міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ. : тези доп. – К., 2014.– С. 123.

13. Новіков П.В. Method of tuning of regulator with using dynamic corrector / П.В.Новіков, Ю.М.Ковриго // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: XI міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ. : тези доп. – К., 2013.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....</b>	<b>16</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>18</b>
<b>Розділ 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ ІНЕРЦІЙНИМИ КОНТУРАМИ КОТЛОАГРЕГАТИВ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ .....</b>	<b>23</b>
1.1. Конструктивні та технологічні особливості котлоагрегату ТЕС як об'єкта регулювання .....	23
1.1.1. Характеристика прямооточного котлоагрегату.....	23
1.1.2. Особливості інерційних контурів прямооточного котлоагрегату ...	28
1.1.3. Вплив зміни навантаження на роботу систем керування котлоагрегата .....	30
1.2. Аналіз існуючих методів регулювання інерційних контурів.....	33
1.2.1. Проблеми використання ПІД-закону регулювання .....	33
1.2.2. Керування інерційними об'єктами з запізнюванням за допомогою предикторів .....	35
1.2.3. Методи налаштування регуляторів з використанням моделі об'єкта управління .....	37
1.2.4. Метод динамічної корекції для побудови робастних систем керування.....	39
1.2.5. Адаптивні системи керування .....	42
1.2.6. Промислове використання нечітких регуляторів.....	45
1.3. Висновки за розділом і постановка задачі дослідження.....	49
<b>Розділ 2 СПОСІБ КВАЗІОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ІНЕРЦІЙНИМИ КОНТУРАМИ КОТЛОАГРЕГАТУ ТЕС .....</b>	<b>52</b>
2.1. Ідентифікація основних контурів регулювання.....	52
2.1.1. Вибір методу ідентифікації.....	52
2.1.2. Ідентифікація при навантаженні 300 МВт .....	55
2.1.3. Ідентифікація при навантаженні 225 МВт .....	61
2.1.4. Функції передачі об'єкта керування .....	66
2.1.5. Перевірка моделей на адекватність .....	67

2.2. Особливості використання нечітких регуляторів на теплоенергетичних об'єктах керування.....	69
2.3. Засади проектування двоканальної схеми нечіткого контролера.....	73
2.4. Принципова схема двоканального нечіткого контролера.....	82
2.5. Алгоритм роботи двоканального нечіткого контролера.....	85
2.6. Висновки до розділу 2.....	93

### **Розділ 3 РОЗРОБКА ДВОКАНАЛЬНОГО НЕЧІТКОГО КОНТРОЛЕРА ДЛЯ КЕРУВАННЯ ІНЕРЦІЙНИМИ КОНТУРАМИ КОТЛОАГРЕГАТУ ТЕС..... 95**

3.1. Розрахунок схеми керування з введенням диференціаторів в проміжних точках.....	95
3.2. Опис вхідних і вихідних змінних двоканального нечіткого контролера.....	98
3.3. Розробка бази правил нечіткої логіки.....	104
3.2.1. Визначення бази правил для каналу формування імпульсів.....	104
3.2.2. Визначення бази правил для каналу формування пауз.....	107
3.4. Комп'ютерне моделювання запропонованої схеми на прикладі локальної системи керування котлоагрегатом.....	108
3.4.1. Синтез двоканального нечіткого контролера в MATLAB.....	108
3.4.2. Моделювання замкненої системи в Simulink.....	113
3.5. Методика оцінки стійкості замкненої системи з двоканальним нечітким контролером.....	118
3.6. Висновки за розділом 3.....	131

### **Розділ 4 ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РІШЕНЬ З НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ..... 134**

4.1. Розробка двоканального нечіткого контролера в нотації FCL.....	134
4.2. Методика налаштування.....	138
4.3. Програмно-технічні рішення системи керування температурним режимом.....	142
4.4. Імітаційне моделювання АСР температурного режиму пароводяного тракту прямооточного котлоагрегату.....	151
4.5. Імітаційне моделювання АСР температури первинної пари.....	153

	15
4.6. Висновки за розділом 4 .....	159
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ЗА РОБОТОЮ.....</b>	<b>161</b>
<b>ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>164</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>176</b>
Додаток А.....	176
Додаток Б.....	177
Додаток В.....	178
Додаток Г.....	179
Додаток Д.....	180
Додаток Е.....	181
Додаток Є.....	186
Додаток Ж.....	191

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- $e$  – сигнал неузгодженості;
- $de/dt$  – перша похідна від сигналу неузгодженості;
- $N$  – електрична потужність;
- $W(s)$  – функція передачі за Лапласом;
- $\tau$  – транспортна затримка;
- $S_m$  – показник запасу стійкості за чутливістю;
- $u$  – сигнал керування регулятора.
- F1 – блок нечіткої логіки для формування імпульсів;
- F2 – блок нечіткої логіки для формування пауз;
- FBD – function block diagram;
- FCL – Fuzzy Control Language;
- HIL – hardware-in-the-loop;
- IEC – International Electrotechnical Commission;
- IMC – internal model control;
- ST – structured text;
- АЕС – атомна електростанція;
- АСУ ТП – автоматизована система управління технологічним процесом;
- АСК – автоматична система керування;
- АСР – автоматизована система регулювання;
- АШ – антрацитовий штиб;
- ВЕС – вітрова електростанція;
- ВМ – виконавчий механізм;
- ВРЧ – верхня радіаційна частина;
- ГАЕС – гідро-акумуляуюча електростанція;
- ГЕС – гідроелектростанція;
- КПП – конвективний пароперегрівач;
- КУ – когенераційна установка;
- НРЧ – нижня радіаційна частина;
- ОК – об'єкт керування;



ПЗ – програмне забезпечення;  
ПІ – пропорційно-інтегральний;  
ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний;  
ПІ-К – пропорційно-інтегральний з динамічною корекцією;  
ПЛК – програмований логічний контролер;  
ППП – поточний пароперегрівач;  
РАФХ – розширена амплітудно-фазова характеристика;  
САР – система автоматичного регулювання;  
СЕС – сонячна електростанція;  
СК – система керування;  
ТЕС – теплоелектростанція;  
ТЕЦ – теплоелектроцентраль;  
ТКЗ – таганрозький котельний завод;  
ТОУ – технологічний об'єкт управління;  
ФБ – функціональний блок;  
ФН – функція належності;  
ХТГЗ – харківський турбогенераторний завод;  
ЦВТ – циліндр високого тиску.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Останні 15 років характеризуються швидким зростанням у світі попиту на електричну енергію. У період з 2008 по 2035 р. зростання попиту на електроенергію в середньому оцінюють у 2,2 % щороку. Ці цифри цілком корелюються із звітом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України за минулий рік. В 2018 році виробництво електроенергії в Україні збільшилося на 2,5% порівняно з 2017 роком.

При загальному виробітку електроенергії в 150,3 млрд кВт\*год доля в структурі виробництва блоків АЕС склала 53%. На другому місці ТЕС – 30%, а якщо враховувати ТЕЦ і КУ, то доля теплової енергетики доходить до 36,9%. Доля ГЕС та ГАЕС становить 7,5%. Незважаючи на бурхливий ріст вітрової і особливо сонячної енергетики, їх доля в структурі виробництва електроенергії залишається дуже малою. ВЕС, СЕС і станції на біомасі разом узяті за 2018 рік виробили 1,7% електроенергії від загальної кількості.

У 2014—2015 рр. Україна опинилася в стані глибокої економічної кризи. Внаслідок воєнних дій на Південному Сході України значно постраждала її економіка і, зокрема, енергетичний сектор. У 2014 р. вперше у своїй історії країна виявилася залежною від імпорту всіх видів енергоресурсів, оскільки до імпорту природного газу і нафтопродуктів додався імпорт вугілля і періодичний імпорт електричної енергії. Енергоблоки пилувугільних ТЕС, що залишилися без донбаського антрациту, знизили навантаження, а в ряді випадків навіть були зупинені, тому країна була змушена закуповувати вугілля в ПАР, Австралії та Росії [1].

Хоча доля ТЕС у виробітку електроенергії за останні 5 років впала на 10% (з 40% до 30%), їх роль у відпрацюванні графіків електричних навантажень залишається провідною. Енергоблоки ТЕС потужністю 100-150 МВт, які можуть ефективно використовуватись як маневрові напівпікові потужності, становлять лише 18% проти необхідних 30-35%. Найбільшу кількість (81%) складають енергоблоки потужністю 200-300 МВт. Поширеною практикою є використання в маневрових напівпікових режимах

саме цих блоків, які для цього не пристосовані і проектувалися для роботи в базових режимах [2]. З метою збереження цих маневрових потужностей в структурі електричної генерації було прийнято рішення про перевід пиловугільних блоків, що працювали на вугіллі марки АШ, на інший вид палива – газове вугілля, поклади якого зосереджені у Волинському і Павлоградському басейнах.

Енергетичний блок теплової електростанції є дуже складним комплексом агрегатів і механізмів, які мають працювати узгоджено між собою. До проблем автоматизації блоків середньої потужності, які вимушені працювати в маневрових режимах, додалася ще одна важлива проблема – зміна палива. Для її вирішення неминучим є переоснащення основного обладнання подачі палива, а від так і засобів автоматизації, їх переналаштування або ж повна заміна.

З огляду на вище зазначене, на даному етапі розвитку енергетики в Україні є актуальним модернізація пиловугільних енергоблоків діючих ТЕС з метою підвищення їх ефективності, введення більш точного регулювання навантаження енергоблоків та частоти струму для покращення якості електроенергії, зниження витрат на обслуговування обладнання. Тим не менш досягнення поставленої мети, зокрема покращення точності регулювання, має певні практичні і теоретичні складнощі.

Питання вдосконалення і модернізації систем керування складними теплоенергетичними об'єктами вирішувалися в роботах М.А. Коновалова, Г.Т. Кулакова, Ю.М. Ковриго, В.П. Свириденко, В.А. Біленко, О.В. Степанця, О.С. Бунке, Т.Г. Багана. Досвід налагоджувальних і експериментальних робіт, проведених рядом організацій, як в нашій країні, так і за кордоном, виявив ряд принципових проблем, що знижують ефективність використання найбільш розповсюджених промислових регуляторів, зокрема ПІ- та ПІД-регуляторів [3]. Водночас об'єктам теплової енергетики, в тому числі котлоагрегатам ТЕС, притаманні зміни динамічних характеристик як у межах доби (маневрові режими), так і під час тривалої

експлуатації (переоснащення основного обладнання, утворення накипу тощо). Наслідком незадовільної роботи встановлених регуляторів є випадки перегріву пари, перевитрати пального, зменшення ресурсу котлоагрегатів за рахунок термоциклічних напруг і зношування виконавчих пристроїв, що збільшує експлуатаційні витрати, а також підвищує технологічну небезпеку ТЕС. На практиці оператори ТЕС досить часто вимушені переходити на ручний режим керування для уникнення великих динамічних відхилень і тривалих низькочастотних коливань технологічних параметрів котлоагрегату, що регулюються. Тому розробка нових законів керування, що забезпечують необхідну якість регулювання і одночасно зберігають стійкість в умовах суттєвих змін динамічних характеристик об'єкта керування є актуальною науковою проблемою.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є підвищення ефективності роботи систем автоматичного керування інерційними контурами енергоблоку ТЕС, що працюють у маневрових режимах.

Головна ідея роботи полягає у розробці нового алгоритму керування інерційними об'єктами, який реалізується шляхом застосування двоканальної структури контролера, побудованого на базі нечіткої логіки. Це дозволяє одночасно підвищити швидкодію без втрачання стійкості всієї системи.

Такий підхід є цілком правомірним з точки зору методів регулювання нелінійних об'єктів із інерційними контурами, та не потребує складних методів ідентифікації об'єкта або постійного підлаштування параметрів моделі, тому є більш стійким при зміні параметрів об'єктів, ніж схеми регуляторів із предикторами.

*Об'єкт дослідження* — процес автоматизованого керування інерційними контурами водо-парового тракту прямоточного котлоагрегату.

*Предмет дослідження* — система автоматичного регулювання температурного режиму водо-парового тракту пилувугільного прямоточного котлоагрегату ТЕС, що працює в умовах нестаціонарності динамічних характеристик об'єкту керування.

**Наукова новизна** одержаних результаті полягає у наступному:

1. Вперше запропоновано паралельну двоканальну схему керування з використанням блоків нечіткої логіки в обох каналах. Така структура дає змогу реалізувати інтелектуальний керуючий блок, який забезпечує необхідну якість функціонування системи керування у всьому діапазоні зміни навантаження енергоблоку.
2. Вперше розроблено і досліджено систему автоматичного керування температурним режимом прямоточного котлоагрегату на основі двоканального нечіткого контролера. Це досягнуто за рахунок розробки бази правил нечіткої логіки, яка побудована на основі досвіду керування в ручному режимі операторами-технологами, що дозволило підвищити швидкість реакції системи керування, покращити прямі показники якості, а також мінімізувати кількість включень регулюючої апаратури.
3. Удосконалено математичні моделі у вигляді функцій передачі інерційних контурів енергоблоку ТЕС на всьому робочому діапазоні навантажень за рахунок застосування методу додаткових членів для процедури ідентифікації об'єкта керування, що дало змогу виявити і формалізувати особливості зміни динамічних характеристик котлоагрегату при зміні режиму роботи.
4. Для двоканального нечіткого контролера запропоновано новий підхід оцінювання стійкості. За рахунок приведення нелінійної системи керування до еквівалентної схеми з адаптацією налаштувань регулятора її можливо розглядати як лінійну в кожний момент часу. Це дало змогу використати методи оцінки стійкості, що ґрунтуються на методах лінійної теорії автоматичного керування.

**Практичне значення одержаних результатів.** За результатами теоретичних та експериментальних досліджень розроблена система автоматичного регулювання температурного режиму пароводяного тракту, де застосування двоканального нечіткого контролера дозволило підвищити

показники якості перехідних процесів. Розроблені структурна схема системи керування, алгоритм роботи запропонованого нечіткого контролера, методика налаштування двоканального нечіткого контролера. Рішення реалізовані на засобах промислової автоматизації.

Розроблена структурна схема системи керування, алгоритм роботи двоканального контролера і програмне забезпечення пройшли дослідну перевірку на Трипільській ТЕС та передані для подальшої модернізації системи регулювання теплового навантаження парового котла, що підтверджено відповідним актом впровадження.

Результати роботи використовуються в навчальному процесі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі автоматизації теплоенергетичних процесів.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ ІНЕРЦІЙНИМИ КОНТУРАМИ КОТЛОАГРЕГАТІВ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

### 1.1. Конструктивні та технологічні особливості котлоагрегату ТЕС як об'єкта регулювання

#### 1.1.1. Характеристика прямооточного котлоагрегату

Котлоагрегат потужністю 300 МВт Таганрозького котельного заводу (ТКЗ) типу ТПП-210А прямооточний, двокорпусний, розрахований для роботи в дубль-блоці з турбіною К-300-240 ХТГЗ за схемою з однократним проміжним перегрівом пари. Двокорпусний котел має продуктивність 950 т/г. Корпус котла – самостійний котлоагрегат П-подібного компонування, що має наступні параметри [4]:

продуктивність:

по гострій парі - 475 т/год;

по вторинному - 360 т/ год;

тиск:

гострої пари - 24,5 МПа;

вторинної пари - 3,63 МПа;

температура:

гострої і вторинної пари –  $545 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ;

живильної води -  $265^{\circ}\text{C}$ ;

гарячого повітря -  $350^{\circ}\text{C}$ ;

вихідних газів -  $156^{\circ}\text{C}$  ;

Котел складається із таких елементів, які знаходяться під тиском: подового екрану, нижньої та верхньої радіаційних частин, стельового пароперегрівника, екранів поворотної камери, конвективних пароперегрівників високого та низького тисків, водяного економайзера, вприскувальних пароохолоджувачів високого і низького тиску, трубопроводів та елементів котельного допоміжного обладнання (рис. 1.1).

Основним паливом для котлів ТПП-210А слугує антрацитовий штиб (АШ). Останнім часом проводиться модернізація системи пилеподачі для можливості спалювання бурого вугілля Волинського і Павлоградського басейнів. Для розпалювання котлоагрегат розрахований на природний газ і мазут, тому пальники зроблено пилогазовими. Мазут також є аварійним паливом для підсвітки факелу при нестійкому горінні пиловугільної суміші.

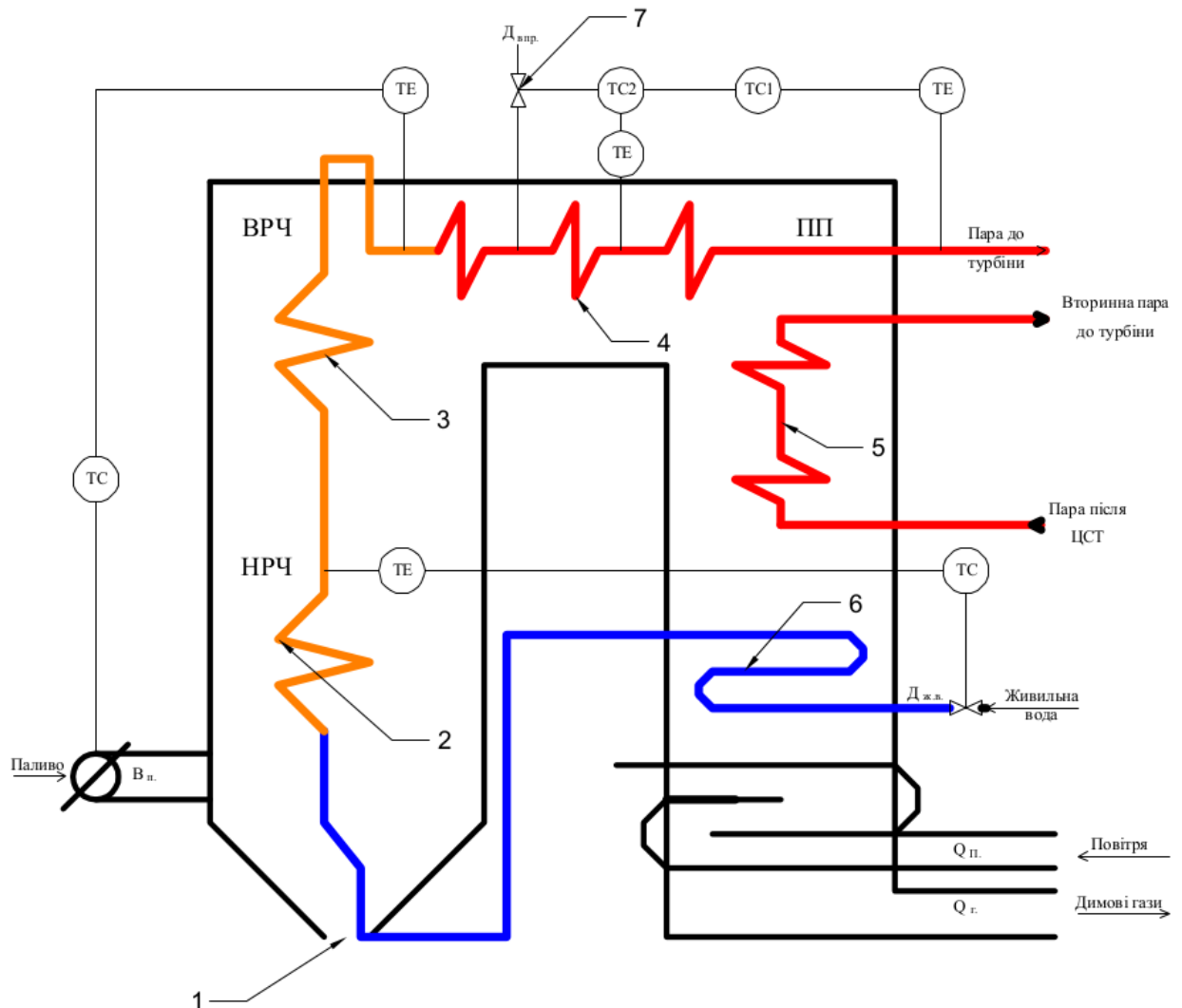


Рис. 1.1. Принципова технологічна схема парового котла ТПП-210А

В топічній камері розташовано шість вихрових пилогазових пальників в один ярус, по три на фронтівій і задній стінках (рис. 1.2). Вузол подачі пилу складається з бункера, пилепроводів до пальників та пилеживильників. Найважливішою задачею цього вузла при заданому навантаженні котла є



стабільна витрата вугільного пилу. Підвищенню цієї стабільності сприяє застосування аероживильників для кожного пальника.

Основними автоматичними системами регулювання в прямоточному котлі є системи регулювання процесу горіння, перегріву пари, економічності горіння, розрідження в топці, температурного режиму, тиску і витрати пари на турбину. Разом системи регулювання температурного режиму, тиску і витрати пари утворюють систему регулювання теплового навантаження котлоагрегату.

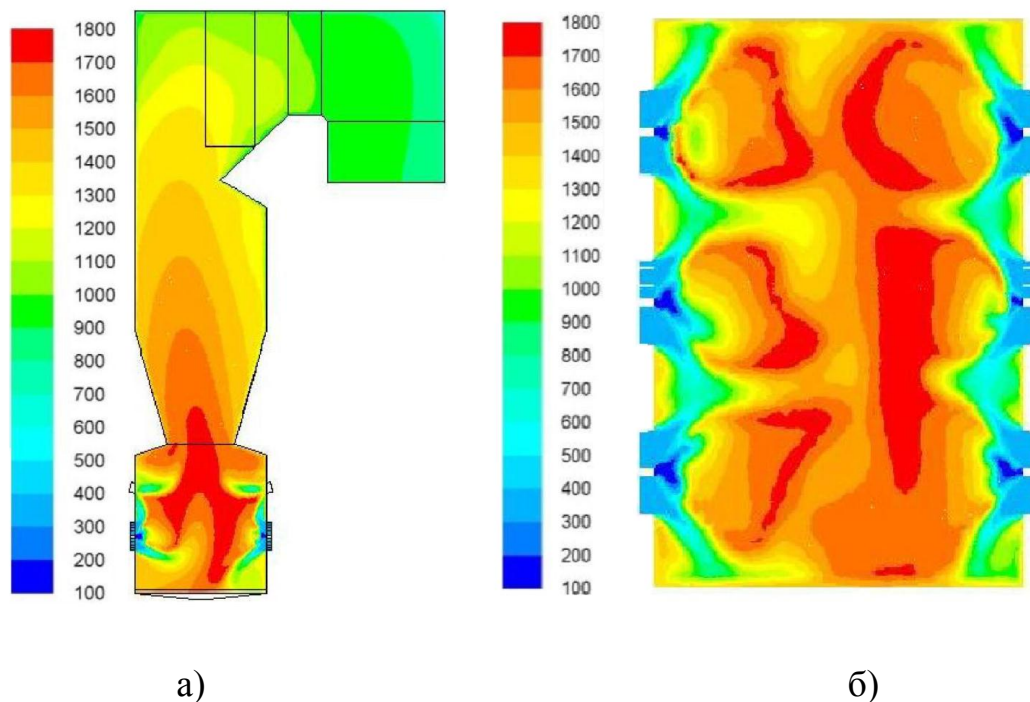


Рис. 1.2. Поля температур: а) в розрізі корпусу котла; б) на рівні яруса пальників

Водопаровий тракт складається з двох незмішуваних потоків А і Б. Витрата живильної води на котел регулюється безпосередньо живильним насосом. Регулюючі клапани живильної води виконують функцію розподілу живильної води по потокам таким чином, щоб значення температури середовища в однойменних перетинах поверхонь нагріву обох потоків були однаковими. Кожен потік займає свою напівтопку.

Кожен потік за фазовим станом робочого середовища можна розділити на три частини: водяну, водо-парову та парову. Живильна вода проходить

водяний економайзер, нижню (НРЧ) і верхню (ВРЧ) радіаційні частини теплообмінників, а потім потрапляє в поточний пароперегрівач (ППП). Після ППП пара перегрівається в двох ступенях конвективних пароперегрівачів і з заданими параметрами подається в циліндр високого тиску турбіни (ЦВТ). Межа фазового переходу, на відміну від барабанних котлів, може змінюватися в прямоточному котлоагрегаті залежно від витрати живильної води і кількості теплової енергії, що виробляється при спалюванні палива.

При порушенні матеріального чи енергетичного балансу виникають змінні, або перехідні, режими роботи. Такі режими відбуваються внаслідок впливу зовнішніх або внутрішніх збурюючих факторів різної природи. Як зовнішні збурюючі фактори можна зазначити зміну навантаження споживача, зміну тиску, температури живильної води. Істотним внутрішнім збуренням для котлоагрегата є зміна складу або якості палива, що спалюється [5].

При зміні режиму змінюються показники роботи котлоагрегату, що впливають на його вихідні параметри. В цьому випадку необхідно виробити такий керуючий вплив, щоб відновити матеріально-енергетичний баланс за мінімально можливий проміжок часу. Для досягнення цієї мети автоматично за допомогою засобів автоматизації, або вручну оператором в дистанційному режимі здійснюються відповідні команди керування на зміну положення регулюючих органів.

Регулювання теплового навантаження котла полягає в підтримці заданих значень температури, тиску пари на виході з парогенератору, що досягається за рахунок регулювання подачі палива та живильної води.

На дослідженому об'єкті використовується обернена схема регулювання теплового навантаження пилувугільного котла (рис. 1.3). За даною схемою витрата живильної води змінюється пропорційно навантаженню енергоблока. Регулювання температурного режиму здійснюється шляхом підтримання заданої температури пари у проміжній точці водопарового тракту. Також для зменшення часу реакції на збурення,

спричинені зміною навантаження, складом палива, відхиленнями в роботі системи пилеподачі або іншими факторами на регулятор палива через диференціатор подаються швидкості зміни температури за нижньою радіаційною частиною (НРЧ) і за верхньою радіаційною частиною (ВРЧ). Ці сигнали є випереджаючими і додаються до основного сигналу по температурі після ППП.

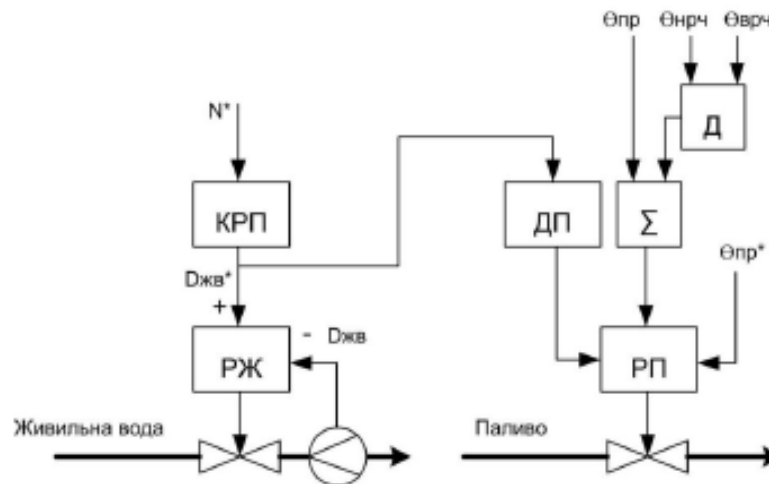


Рис. 1.3. САР теплового навантаження та живлення пилувугільного котлоагрегату за оберненою схемою

Вихід температури пари у проміжній точці котла за установлені межі може стати причиною ушкодження основних і найбільш напружених поверхонь нагрівання в теплообмінниках, паропроводах і перших ступенях циліндрів турбіни. Крім того, надмірний перегрів пари призводить до зниження економічності блок. В свою чергу зменшення установленного значення температури пари недопустиме через підвищення вологості пари, що становить небезпеку для останніх ступенів турбіни внаслідок ймовірної конденсації пари.

З огляду на умови надійності металу труб паропроводів і турбіни важливим є не тільки підтримання температури пари в заданих межах, але й не допущення її різких коливань. Часті коливання температури можуть призвести до теплових напруг у металі і є причиною пришвидшення його втоми, а від так зменшення терміну експлуатації .

### **1.1.2. Особливості інерційних контурів прямого котлоагрегату**

У класичній теорії автоматичного керування загально визнані декілька факторів, що ускладнюють створення високоефективних САР [6, 7]:

- відсутність повноти опису математичної моделі об'єкту керування;
- нестабільність динамічних характеристик у часі;
- наявність неконтрольованих збурень;
- присутність транспортного і перехідного запізнення.

Практична реалізація САР ускладнюється наступними факторами:

- складність проведення активного експерименту на об'єкті;
- виконання великої кількості поточних ремонтів, які призводять до заміни робочих характеристик як основного обладнання, так і регулюючої апаратури;

- нестабільність зони фазового переходу робочого середовища;
- особливості роботи аераційних пилеживильників, яким притаманне так зване "самонавантажування" і "саморозвантажування".

Для пилувугільних котлоагрегатів середньої і великої потужності (>100 МВт) найбільш важливими задачами, що мають вирішуватися за допомогою САР є наступні:

- покращення показників динаміки функціонування;
- зменшення викидів в атмосферу шкідливих речовин;
- подовження періодів між відключеннями на обслуговування.

Вирішенню цих задач заважають зміни якості вугілля та його параметрів від різних постачальників з різних родовищ, знос та шлакування камер горіння, достатньо жорсткі вимоги щодо викидів в атмосферу оксидів вуглецю, сірки, азоту та часток пилу. За даними робіт [3, 8], коефіцієнт передачі, транспортне запізнення та постійні часу контуру регулювання теплового навантаження можуть змінюватися на 30-50%. Великі зміни параметрів об'єкту є першою основною особливістю котлоагрегатів ТЕС.

Тому системи керування повинні забезпечити робастність об'єкта до змін його параметрів.

Іншою важливою особливістю котлоагрегатів ТЕС, як об'єктів регулювання, є істотно велике запізнення по каналах керуючих впливів і збурення. Результати, що отримані у роботі з великої серії активних експериментів на робочому енергетичному агрегаті, доводять затримку впливу теплової потужності на продуктивність системи керування [3, 8, 9, 10].

До описаних особливостей котлоагрегата як об'єкта регулювання додаються складнощі в тому відношенні, що контури регулювання мають взаємний вплив один на одного всередині об'єкта. Зміна будь-якого з регулюючих впливів призводить до зміни всіх параметрів, тобто мають місце перехресні зв'язки через об'єкт регулювання [5, 11].

Спрощена схема зв'язків між вхідними і вихідними величинами прямого котла представлена на рис. 1.4 [11].

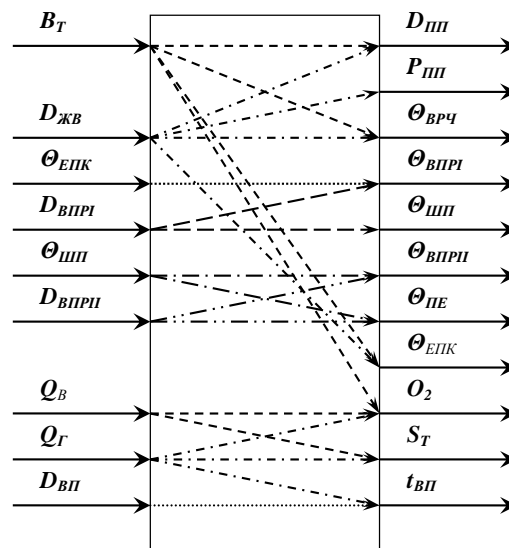


Рис. 1.4. Спрощена схема зв'язків між вхідними і вихідними величинами прямого котла

де:  $D_{ВПРІ, II}$  - витрата живильної води на I та II впорскування;

$D_{ЖВ}$  - витрата живильної води до котла;  
 $V_T$  - витрата палива;  
 $\theta_{ВРЧ}$  - температура середовища за ВРЧ;  
 $\theta_{ВПР,II}$  – температура пари за I та II впорскуваннями;  
 $\theta_{ШП}$  – температура пари за ширмовим перегрівачем;  
 $\theta_{ПЕ}$  – температура пари на виході з парогенератору;  
 $\theta_{ЕК}$  – температура пари за екранами поворотної камери;  
 $Q_B$  - витрата повітря;  
 $Q_G$  - витрата димових відхідних газів;  
 $D_{ВП}$  - витрата вторинної пари;  
 $D_{ПП}$  - витрата перегрітої пари;  
 $P_{ПП}$  - тиск перегрітої пари;  
 $O_2$  - вміст кисню в відхідних газах;  
 $S_T$  - розрідження в топці котла;  
 $t_{ВП}$  - температура пари вторинного перегріву.

### 1.1.3. Вплив зміни навантаження на роботу систем керування котлоагрегата

Ефективність роботи енергетичної системи визначається балансом виробленої і спожитої енергії в один і той самий проміжок часу. Ця залежність формує графіки електричних навантажень, які показують, що протягом заданого періоду часу (день, місяць, рік) енергосистема повинна генерувати змінну кількість енергії.

Основним графіком навантаження є добовий. Електроспоживання протягом доби змінюється у відносно короткі проміжки часу, що вимірюються годинами, а у випадку пікових навантажень навіть хвилинами, тому покриття цього графіка – найвідповідальніше завдання [12].

При відпрацюванні добового графіка електронавантаження енергоблоки працюють в широкому діапазоні навантажень – від номінального до мінімального, який обмежений технологічними умовами експлуатації. Перехідні процеси в режимах часткових навантажень

становлять практичний інтерес при експлуатації блоку електростанції. В цих режимах робота систем автоматизації особливо відповідальна.

На рис. 1.5 показаний приклад добового графіка електричного навантаження для зимового дня котла ТПП-210А Трипільської ТЕС.



Рис. 1.5. Типовий вигляд добового графіка електричних навантажень котла ТПП-210А Трипільської ТЕС

Із рис. 1.5 видно, що графік має максимуми і мінімуми, і загалом має змінну структуру, що обумовлює зміну режимів роботи електричних станцій протягом дня. Відповідно графіка доводиться часто змінювати режими роботи парового котла, переходячи його від одного навантаження до іншого. При зміні теплового навантаження котла змінюється і навантаження топки, що впливає на динамічні характеристики котлоагрегата [13, 14, 15].

Під динамічними характеристиками розуміються закономірності зміни в часі технологічних параметрів об'єктів при дії різного роду збурень. Характерною особливістю динамічних властивостей теплоенергетичних об'єктів є те, що відразу після нанесення збурення не відбувається помітної зміни параметра. Якщо у простих одноємнісних об'єктів початкова швидкість зміни параметра є максимальною, то у складних багатоемнісних – швидкість зміни параметра починає змінюватися від нульової і досягає максимальної лише через достатньо великий проміжок часу. Ця обставина суттєво впливає на поведінку системи автоматичного регулювання на початковій фазі перехідного процесу. Система регулювання неадекватно

реагує на збурення через малість його кількісних показників, виражених зміною технологічних параметрів.

Динамічні випробування, проведені на різноманітних об'єктах ТЕС з блочними установками, показали, що більшість теплоенергетичних об'єктів регулювання характеризуються значною величиною акумулюючої здатності, наявністю часових затримок і, що особливо важливо, нестабільністю динамічних характеристик в умовах змінних навантажень енергоблоків.

В табл. 1.1 наведені динамічні характеристики для прямооточного котлоагрегату, що працює в блоці з турбіною К-300-240. Динамічні характеристики отримані експериментальним шляхом при різних рівнях навантаження енергоблоку [3].

Таблиця 1.1

Динамічні характеристики прямооточного котлоагрегату при різних навантаженнях

Параметр	Збурення	Характеристика об'єкта	Розмірність	Навантаження енергоблоку		
				50%	75%	100%
Температура пари за НРЧ, °С	Паливом	$\tau_{НРЧ}$	<i>c</i>	20	–	5
		<i>T</i>	<i>c</i>	25	–	40
		$K_{об}$	$\frac{^{\circ}C}{m/год}$	0,5	–	0,22
	Жив. ВОДОЮ	$\tau_{НРЧ}$	<i>c</i>	20,5	16	10
		<i>T</i>	<i>c</i>	25	75	85
		$K_{об}$	$\frac{^{\circ}C}{m/год}$	0,56	0,42	0,26
Температура пари за ВРЧ, °С	Паливом	$\tau_{ВРЧ}$	<i>c</i>	105	–	55
		<i>T</i>	<i>c</i>	565	–	325
		$K_{об}$	$\frac{^{\circ}C}{m/год}$	3,7	–	1,7
	Жив. ВОДОЮ	$\tau_{ВРЧ}$	<i>c</i>	225	110	85
		<i>T</i>	<i>c</i>	410	310	270
		$K_{об}$	$\frac{^{\circ}C}{m/год}$	4,1	2,1	1,8



З табл. 1.1 видно, що динамічні характеристики мають суттєву інерційність. Це створює серйозні проблеми для автоматизації енергоблоку потужністю 300 МВт навіть при роботі на номінальному навантаженні. Перевід же енергоблоку згідно диспетчерського графіка на знижене навантаження (50% або 75%) збільшує інерційність об'єктів регулювання, що призводить до погіршення якості перехідних процесів. Це пов'язано з тим, що при зниженні навантаження величина запізнювання і постійної часу зростає в 1,5-2 рази. Аналогічним чином збільшується і коефіцієнт підсилення об'єкта, що призводить до зменшення запасу стійкості замкнутої системи керування.

Нестабільність динамічних характеристик енергоблоку створює серйозні проблеми, пов'язані з ефективним використанням автоматичних регуляторів в умовах роботи енергоблоку в широкому діапазоні навантажень.

## **1.2. Аналіз існуючих методів регулювання інерційних контурів**

### **1.2.1. Проблеми використання ПД-закону регулювання**

ПД-регулятор відноситься до найбільш поширеного типу регуляторів. Приблизно 90-95% регуляторів [16, 17, 18, 19], що знаходяться в даний час в експлуатації, використовують ПД-алгоритм. Причинами такої високої популярності є простота побудови і промислового використання, ясність функціонування, придатність для вирішення більшості практичних завдань і низька вартість. Серед ПД-регуляторів 64% припадає на одноконтурні регулятори і 36% – на багатоконтурні системи [20].

Після появи дешевих мікропроцесорів і аналого-цифрових перетворювачів в промислових ПД-регуляторах використовуються автоматичне налаштування параметрів, адаптивні алгоритми, нейронні мережі, генетичні алгоритми, методи нечіткої логіки. Ускладнилася структура регуляторів: з'явилися регулятори з двома ступенями свободи, із застосуванням принципів розімкнутого керування в поєднанні зі зворотним зв'язком, з вбудованою моделлю об'єкта. Крім функції регулювання, в ПД-

контролер були введені функції аварійної сигналізації, контролю розриву контуру регулювання, виходу за межі динамічного діапазону та інше.

Незважаючи на довгу історію розвитку і велику кількість публікацій, залишаються проблеми в питаннях усунення інтегрального насичення, регулювання об'єктів з гістерезисом і нелінійностями, автоматичного налаштування і адаптації [21, 22]. Практичні реалізації ПІД-контролерів не завжди містять антиаліасні фільтри, надмірний шум і зовнішні збурення ускладнюють налаштування параметрів. Проблеми ускладнюються тим, що в сучасних системах управління динаміка часто невідома, параметри регулювання не є незалежними, дані вимірювань сильно зашумлені, навантаження об'єкта змінне, технологічні процеси безперервні і т.д [23].

Дослідження налаштування систем автоматичного регулювання, викликані, з одного боку, новими можливостями сучасної контролерної техніки, а з іншого – підвищеними вимогами до надійності і ефективності, дали вражаючі результати. Кількість методик зросла на порядок: якщо на кінець ХХ ст. вона не перевищувала 200, то в даний час, згідно з [18], їх число досягло тисяча сімсот тридцять однієї (563 для ПІ- і 1168 для ПІД-алгоритмів). У зв'язку з цим постає закономірне питання: чому, незважаючи на величезні зусилля, немає кількох, досить універсальних і прийнятих практикою ефективних методів?

Для простих випадків, коли вимоги до якості функціонування невисокі, модель адекватна, ситуація зі збуреннями ясна, система працює в режимі стабілізації, проблем з налаштуванням систем не виникає. Такі умови роботи забезпечують 20-25% систем регулювання в промисловості. У той же час за різними оцінками 50-55% систем регулювання показують кращі результати при ручному управлінні, тому або частково працюють в автоматичному режимі, або взагалі його не використовують (25-30%) [18, 24]. Насправді проблема має комплексний характер і у неї немає простого рішення.

Існує велика кількість вимог до якості функціонування, багато з яких є суперечливими. Це добре зрозумілі практикам прямі показники якості

(максимальне динамічне відхилення, час регулювання, характеристики загасання і ін.), проте вони недостатньо конструктивні, щоб їх прийняти за основу методів проектування [25, 26, 27]. Непрямі показники (інтегральні, частотні, кореневі), кожен з яких вельми односторонній, зручні для теоретичних досліджень, широко використовуються як основа оптимізаційних або аналітичних методів, але їх зв'язок з реальною якістю функціонування досить штучний [28, 29, 30].

Розробники більшості методик розрахунків регуляторів вибирають деякі "зручні" показники якості функціонування і, беручи до уваги лише окремі властивості реальних об'єктів керування, отримують результати, придатні для вузького класу задач. Перенесення цих методів на інші об'єкти управління не дає очікуваних результатів [19].

Враховуючи все вище сказане, можна говорити про обмеженість ПІД-регулятора як такого. Його простота, виражена через усього три параметри налаштування, зрозумілість фізичного змісту кожного з них, разом з тим зумовлює зменшення кола задач, де він може бути використаний ефективно. Відомий вже більш, як сторіччя, ПІД-регулятор практично вичерпав свій потенціал щодо вдосконалення. Підтвердженням цього є той факт, що при величезному зростанні методик налаштування і модифікацій, суттєвого ефекту на практиці не досягнуто [31].

### **1.2.2. Керування інерційними об'єктами з запізнюванням за допомогою предикторів**

Як правило, при регулюванні процесів з великими часовими затримками звичайні одноконтурні системи регулювання не задовольняють вимогам, що до них висуваються, тому актуально розглянути схеми регулювання, що спеціально розроблені для боротьби із значними часовими затримками. До таких схем відносяться схема з предиктором Сміта і схема з внутрішньою моделлю (ІМС).

Предиктор Сміта – модель об'єкта управління, яка дозволяє передбачити поведінку об'єкта з транспортною затримкою. Його

рекомендують застосовувати при співвідношенні величини запізнювання до постійної часу об'єкту [32, 33, 34, 35, 36]:

$$\frac{\tau}{\tau + T} > (0,2 \dots 0,5) \quad (1.1)$$

Модель складається з двох частин: з моделі затримки і динамічної моделі об'єкта без затримки. Якщо модель правильно ідентифікована, то з її допомогою можна передбачити вихідну змінну, вирішуючи рівняння моделі, тобто не чекаючи реакції об'єкта на керуючий вплив.

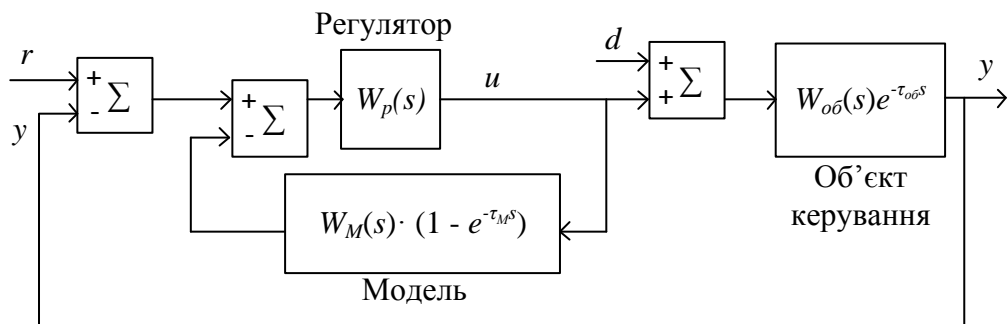


Рис. 1.6. Схема з предиктором Сміта

Схема керування з предиктором Сміта являє собою систему із зворотним зв'язком, яка має в собі внутрішній зворотний зв'язок.  $W_{об}(s)$  позначає технологічний об'єкт без затримки.  $\tau_{об}$  позначає час затримки.  $W_M(s)$  і  $\tau_M$  є номінальними версіями  $W_{об}(s)$  і  $\tau_{об}$  відповідно, які отримуються за допомогою моделювання процесу.  $W_p(s)$  позначає раціональну функцію, що характеризує компенсатор, який ще називають первинним контролером. Внутрішній зворотний зв'язок фактично працює без часу затримки, тим самим надаючи компенсатору прогнозоване значення вихідної величини. Як компенсатор може успішно застосовуватися ПД-регулятор разом з класичними методами налаштування.

Якщо  $W_{об}(s) = W_M(s)$  і  $\tau_{об} = \tau_M$ , то вихідна величина  $y$  залежить від завдання  $r$  і від збурення  $d$  наступним чином:

$$y = \frac{W_{об} W_p}{1 + W_{об} W_p} e^{-\tau} r + \frac{W_{об}}{1 + W_{об} W_p} e^{-\tau} d + \frac{W_{об} W_p}{1 + W_{об} W_p} e^{-\tau} W_{об} (1 - e^{-\tau}) d \quad (1.2)$$

У цьому виразі член  $W_{об}W_p/(1+W_{об}W_p)$  являє собою функцію передачі замкненої системи без урахування транспортної затримки. Відсутність затримки в контурі моделі об'єкта пришвидшує реакцію системи керування. Основний сигнал від об'єкта керування додається до контуру з предиктором через проміжок, який визначається транспортною затримкою.

На практиці має місце ряд невизначеностей, які впливають на точність прогнозування в предикторі. Як правило основною причиною незадовільної роботи даної схеми є відсутність достовірної інформації про об'єкт керування і неточність його математичного опису.

Крім того схема з предиктором Сміта ефективно відпрацьовує зміну уставки і не дає суттєвих переваг при компенсації збурення. Також вона є чутливою до змін параметрів об'єкта керування. Невідповідність предиктора існуючому об'єкту може призвести не тільки до погіршення процесу регулювання, а і до втрати стійкості системи керування.

### **1.2.3. Методи налаштування регуляторів з використанням моделі об'єкта управління**

У випадку наявності точної математичної моделі об'єкта керування можна уникнути процедури проектування і складного налагодження системи керування, використавши регулятор з внутрішньою моделлю (від англ. *Internal Model Control – IMC*).

Дана схема викликає великий інтерес у науковців, про що свідчить велика кількість запропонованих методик налаштування регуляторів із використанням моделі об'єкта управління [18, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45].

Схема керування з внутрішньою моделлю (ІМС) – це схема, яка включає модель об'єкта, як показано на рис. 1.7  $W_{об}(s)$ ,  $\tau_{об}$ ,  $W_M(s)$  і  $\tau_M$  мають те ж саме значення, що і в попередньому підрозділі.  $W_{IMC}$  є передавальною функцією, яка обирається із стабільних раціональних функцій як параметр, що проектується. Припустимо, що технологічний об'єкт веде себе так само,

як і модель, тобто  $W_{об}(s)e^{-\tau_{об}s} = W_M(s)e^{-\tau_M s}$ . Тоді вихідна величина  $y$  залежить від  $r$  і  $d$  наступним чином:

$$y = W_{об}W_{IMC}e^{-\tau s}r + W_{об}e^{-\tau s}(1 - W_{об}W_{IMC}e^{-\tau s})d \quad (1.3)$$

Видно, що стабільність системи залежить від вибору структури та параметрів передавальної функції  $W_{IMC}$ .

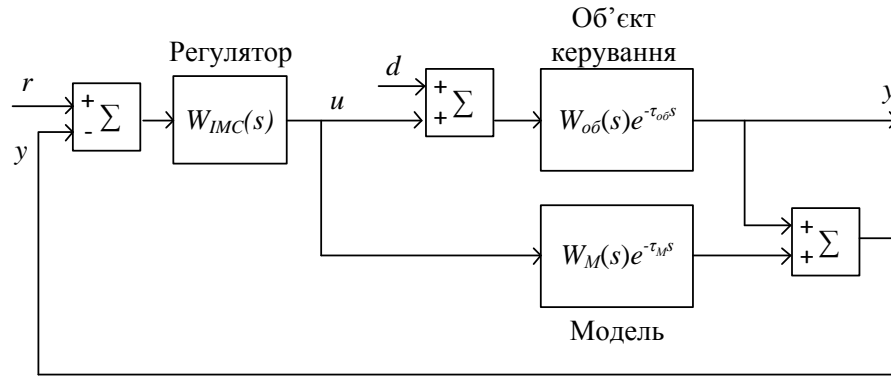


Рис. 1.7. Структура ІМС

Процедура налаштування ІМС наступна. Припустимо, що  $W_{об}(s) = W_M(s)$  і  $\tau_{об} = \tau_M$ . Тоді  $W_{IMC}$  повинна мати вигляд:

$$W_{IMC} = W_{об}^{-1}(s)F(s) \quad (1.4)$$

де  $F(s)$  – раціональна функція з  $F(0) = 1$ , що називається ІМС-фільтром. У найпростішому випадку  $F(s)$  має вигляд:

$$F(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (1.5)$$

де  $\lambda$  – додатне число з плаваючою точкою,  $n$  – додатне ціле число.

Після підстановки (1.5) у (1.4) отримаємо остаточну формулу для вихідної величини  $y$ :

$$y = Fe^{-\tau s}r + W_{об}e^{-\tau s}(1 - Fe^{-\tau s})d \quad (1.6)$$

Для об'єктів керування першого порядку регулятор з внутрішньою моделлю повністю еквівалентний ПІД-регулятору, якщо затримку  $e^{-\tau s}$  замінити апроксимацією Паде першого порядку [33].

Важливою особливістю регулятора з внутрішньою моделлю є можливість налаштування робастності незалежно від вибору інших

параметрів регулятора [46, 47, 48]. Для цього вибирають відповідний фільтр  $F$  або параметр  $\lambda$  для фільтра (1.5). Регулятор з внутрішньою моделлю може дати дуже хорошу реакцію на зміну уставки, проте реакція на зовнішні збурення може бути занадто сповільненою [49, 50].

Розглянуті схеми з математичними моделями об'єкту керування мають свої переваги і недоліки. До переваг відносяться краще відпрацювання перехідного процесу за каналом завдання-вихід. Тим не менш, застосування математичної моделі об'єкту має і свої слабкі місця. По-перше, ідеальна робота системи буде в тому випадку, якщо модель повністю співпадає з реальним об'єктом. На практиці процедура точної ідентифікації стикається з великою кількістю перешкод, а саме із значною складністю аналітичного виводу моделі за допомогою диференціальних рівнянь з одного боку, і з неточністю апроксимації при здійсненні активного експерименту – з іншого.

Крім того, як вже зазначалося, теплоенергетичним об'єктам притаманні нестационарність і нелінійність їх динамічних характеристик. В такому випадку використання схем з внутрішньою моделлю вимагає застосування алгоритмів адаптації, що значно ускладнює систему керування в цілому.

#### **1.2.4. Метод динамічної корекції для побудови робастних систем керування**

Контролерну реалізація традиційних алгоритмів управління, введення в структуру додаткових модулів, таких як обмежувачі, фільтри, нелінійні елементи, складні диференціатори, захисту від інтегрального насичення, захисту від П- і Д-ударів, значно розширили можливості структурного синтезу систем управління. Однак, за оцінками експертів, в промисловій автоматизації домінуючими залишаються ПІ і ПІД-регулятори (приблизно 95%) [18, 20], при чому більша частина припадає все ж на ПІ-регулятори. В теорії ПІД-регулятор має значні переваги за рахунок використання диференціатора, однак на практиці існує цілий ряд проблем, які потребують тих чи інших інженерних вишукувань, що забезпечують задовільні умови для адекватної роботи Д-складової в ПІД-регулятор. Не завжди вирішення цих

проблем є доцільним при наявності обмеженості часових і фінансових ресурсів, тому часто в ПД-регуляторах просто відмовляються від Д-складової, і вони працюють як П-регулятори. До недоліків ПД-регуляторів можна віднести:

1. Чутливість до високочастотних перешкод.
2. Вузкий діапазон налаштувань постійної часу диференціювання, яку часто вибирають як 10-20% від постійної часу інтегрування.
3. Введення диференціатора знижує запас стійкості системи управління.

Для забезпечення стійкості систем регулювання нестационарними технологічними об'єктами співробітниками кафедри АТЕП КПІ ім. Ігоря Сікорського розроблений метод динамічної корекції комплексної частотної характеристики (КЧХ) системи [51, 52, 53, 54, 55, 56]. Вихідна задача полягає в тому, щоб, підключивши певний набір ланок (коректор) до стандартного П-регулятора, змістити годограф КЧХ в робочій частотній області якнайдалі від точки  $-1; j0$  (рис. 1.8). Регулятор з коректором називається П-К-регулятором. Даним дослідженням займалися Ковриго Ю.М., Бунке О.С., Коновалов М.А. [8,19,57,58]

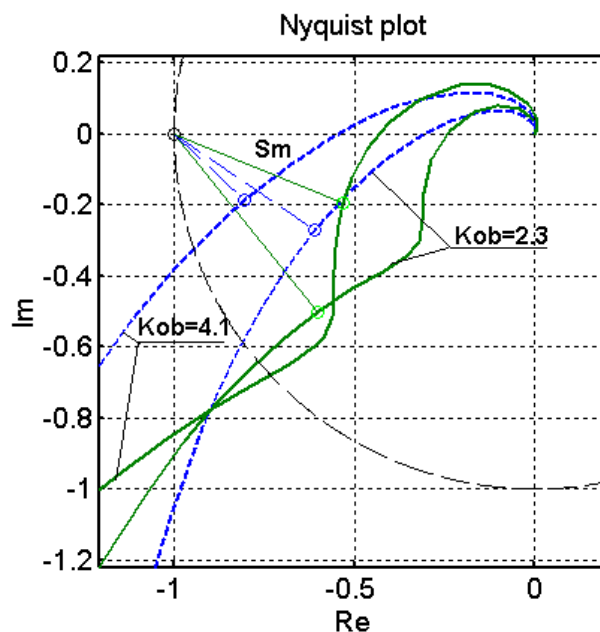


Рис. 1.8. Вплив динамічного коректора на АФЧХ розімкненої системи



Для робастності системи необхідно забезпечити, щоб показник запасу стійкості  $S_m$  знаходився в діапазоні від 1.2 до 2.0, при цьому чим менше  $S_m$ , тим більше запас стійкості і тим система більш робастна.

Для збільшення запасу стійкості і формування потрібного керуючого впливу використовується двоканальна структура (рис. 1.9) [59, 60]: основний канал містить стандартний ПІ-регулятор, а коригувальний канал – набір передавальних ланок, що забезпечують компенсуючий ефект основного каналу на завершальній стадії перехідного процесу [8]. Основний канал відповідає за швидкодію системи, а канал корекції через встановлений час запізнювання (яке залежить від параметрів об'єкта регулювання) компенсує надмірний сигнал керуючого впливу, забезпечуючи стійкість САР на кінцевій ділянці перехідного процесу, і дозволяє використовувати форсовані налаштування основного каналу. Використання ланки запізнювання в структурі ПІ-регулятора було запропоновано в [61] для поліпшення реакції системи на збурення, але ніяких рішень по збільшенню швидкодії запропоновано не було. Використання ж двох каналів дає додатковий ступінь свободи при налаштуванні регулятора і дозволяє поєднати швидкодію і стійкість системи.

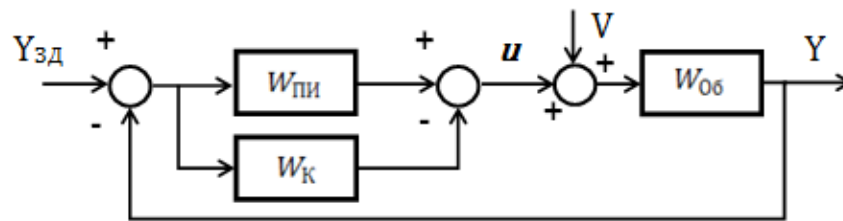


Рис. 1.9. Структура ПІ-К-регулятора

Критерієм налаштування в запропонованому методі виступає радіус кола з центром в точці  $(-1; j0)$ . По суті це максимум функції чутливості  $M_s$ :

$$M_s = \frac{1}{\eta} = \max_{\omega} S(\omega) = \max_{\omega} \frac{1}{|1 + W_{PC}(j\omega)|} \quad (1.7)$$

Результати комп'ютерного моделювання і впровадження на прямоточному котлоагрегаті показали ефективність даного методу. Тим не менш, він має і ряд недоліків.

По-перше, критерієм налаштування є непрямий показник якості –  $M_s$ . Він є частотним показником і не має зв'язку з прямими показниками якості функціонування системи автоматичного регулювання. За результатами моделювання [19] перехідні процеси в номінальному режимі функціонування об'єкту керування є дещо гіршими, ніж в звичайній одноконтурній системі з ПІ-регулятором. Схема з коректором, порівняно з ПІ-регулятором, значно краще проявляє себе при зміні параметрів моделі об'єкта керування, проте в обмеженому діапазоні.

По-друге, аналітична методика налаштування параметрів коректора є досить складною, а інженерні формули розрахунку носять емпіричний характер і не гарантують оптимальних налаштувань для кожного конкретного випадку.

### **1.2.5. Адаптивні системи керування**

Для забезпечення надійної роботи обладнання енергоблоків необхідно підтримувати основні параметри в доволі вузьких діапазонах, незважаючи на зміну режиму роботи обладнання (навантаження). Тому багаторежимність роботи обладнання вимагає розширення функцій систем автоматичного керування та висуває жорсткі вимоги до якості їх роботи.

При зміні навантаження енергоблоку змінюється витрата пари через турбіну, відповідно і живильної води в котлі. При цьому температури в точках водопарового тракту повинні підтримуватися практично в незмінних значеннях, що досягається зміною витрати палива. При зміні витрати водопарової суміші змінюється швидкість проходження через поверхні теплообміну, що безпосередньо впливає на динамічні характеристики котлоагрегату. Ці зміни носять як кількісний, так і якісний характер. Річ у тім, що у прямоточному котлі немає фіксованої конструктивної зони розділення води і пари. При зміні навантаження енергоблоку у великих

межах змінюється як витрата, так і тиск робочого середовища, що спричиняє зміщення зони фазового перетворення від води в пару, так званої зони максимальної теплоємності. Тому швидкість зміни температури в одній і тій самій точці тракту котла може суттєво відрізнятись залежно від навантаження [11, 62].

Для систем з суттєво змінними динамічними характеристиками об'єкта можливі дві принципові стратегії, що забезпечують нормальну експлуатацію САР, тобто дозволяють виключити постійні відключення регуляторів і перехід на ручний режим керування:

1. використання "слабких", але всережимних налаштувань регуляторів;
2. забезпечення адаптації налаштувань регуляторів до зміни характеристик об'єкта.

Як показують дослідження фірми Honeywell, всережимне налаштування стандартних регуляторів шляхом "загрублення" їх коефіцієнтів забезпечує робастність системи регулювання [31].

Такий підхід забезпечує стійкість і всережимність систем регулювання, але його недоліком є значне зниження ефективності функціонування систем автоматичного регулювання в неномінальних режимах, що виражається в економічних втратах [63, 64, 65].

Альтернативою використанню в промислових системах регуляторів зі сповільненою реакцією є побудова адаптивних систем.

Найпростішим і широко вживаним на практиці методом адаптації регулятора до змінних параметрів об'єкта або його нелінійних властивостей є табличне керування. Фактично це є застосування деякого дискретного напору налаштувань регулятора залежно від режиму роботи основного обладнання.

Маючи апріорну інформацію або експертні знання про особливості роботи в різних режимах, виконують ідентифікацію об'єкта для декількох основних точок діапазону змін режимів, після чого знаходять параметри регулятора для кожної точки. Отримані значення записують в базу налаштувань у вигляді таблиці. Під час функціонування системи величина,

яка характеризує режим роботи системи, наприклад, навантаження енергоблоку, визначає вибір тих чи інших значень з таблиці коефіцієнтів регулятора.

Табличне керування характеризується простотою алгоритму переходу між режимами.

Недоліками такого методу є:

1. великі часові затрати на проведення процедури ідентифікації;
2. зниження показників якості перехідних процесів при підході до межі режимів;

Крім того табличне керування не вирішує проблеми керування інерційними об'єктами з великими часовими затримками.

Численні алгоритми побудови адаптивних пристроїв для розпізнавання змін в об'єкті і ідентифікації використовують в більшості випадків періодичний автоматичний ввід в розімкнутий контур спеціально генеруючих збурень, або вивід замкнутого контуру на границю стійкості. За умов експлуатації такі збурення, несанкціоновані технологічним персоналом, зокрема на прямоточному котлоагрегаті, часто недопустимі і призводять до вимкнення адаптуючих пристроїв [66, 67, 68, 69].

З іншого боку, намагання без спеціальних збурень використовувати для адаптації статистичну близькість записів за технологічними змінними і їх модельованих значень призводило до недопустимих помилок у визначенні параметрів моделі [31]. Такі помилки пояснюються цілим рядом факторів:

1. як вже зазначалося, контури прямоточного котлоагрегату є взаємозв'язаними, тому не можна однозначно судити про причини відхилення технологічного параметру від нормального значення. Це може бути як вплив іншого контуру, так і зовнішнє збурення;
2. статистичні вибірки можуть братися на недопустимо короткому діапазоні;
3. вимірювання технологічних змінних в промислових умовах піддаються впливу нестационарних завад з невідомим розподіленням.

Зазначимо, що незалежно від наявності автоматичного підлаштування налаштувань контролера, не гарантується забезпечення необхідної якості регулювання з причин, які не залежать від ефективності і досконалості закладених в нього алгоритмів.

Навіть якщо вдалося уникнути або компенсувати вище наведені проблеми і побудувати пристрій адаптації, що саме по собі є складною задачею, це не гарантує значного збільшення ефективності функціонування САР. На практиці розрахунок налаштувань регулятора за формулами, що ґрунтуються на параметрах моделі об'єкта керування, часто не дає задовільних результатів, або ж кажуть про необхідність оптимізації налаштувань. Оптимізація налаштувань регулятора необхідна через те, що інженерні методики розрахунку параметрів регулятора, які найлегше реалізувати програмно в алгоритмах адаптації, не враховують таких особливостей реальних об'єктів керування як нелінійність характеристик, розподіленість параметрів у просторі, люфти виконавчої виконавчої апаратури, а сама модель є ідеалізацією реального процесу і містить похибки.

Згадані проблеми при побудові адаптивних пристроїв пояснюють практично повсюдне розчарування їх використання і дискредитацію [31].

### **1.2.6. Промислове використання нечітких регуляторів**

Лінійні закони керування, описані вище, зокрема ПІД-закон, мають погані показники якості при управлінні нелінійними і складними системами, а також при недостатній інформації про об'єкт управління. Характеристики регуляторів в цих випадках можна поліпшити за допомогою методів нечіткої (фаззі-) логіки [70, 71].

Нечітке управління (управління на основі методів теорії нечітких множин) використовується при недостатньому знанні об'єкта управління, але наявності досвіду управління ним; в нелінійних системах, ідентифікація яких занадто трудомістка; а також у випадках, коли за умовами задачі необхідно використовувати знання експерта. Прикладом може бути доменна піч, колона ректифікації, прямоточний котел, математична модель яких містить багато

емпіричних коефіцієнтів, що змінюються в широкому діапазоні і викликають великі труднощі при ідентифікації [72, 73, 74]. У той же час кваліфікований оператор досить добре управляє такими об'єктами, користуючись показаннями приладів і накопиченим досвідом. Знання, на які спирається оператор, реалізуються у формі правил "ЯКЩО-ТО", що мають нечіткий інформаційний зміст [75, 76].

Інтерес до теорії нечітких множин постійно посилюється, про що свідчить експоненційне зростання публікацій в цій галузі за останні тридцять років (табл. 1.2) [77]. Видаються більше десяти спеціалізованих міжнародних журналів з теорії та застосування нечітких множин, серед яких "Fuzzy Sets and Systems" і "Applied Soft Computing" (видавництво Elsevier Science), "Journal of Intelligent and Fuzzy Systems" (видавництво IOS Press), "International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems" (видавництво World Scientific), "IEEE Transactions on Fuzzy Systems" (видавництво IEEE), "Soft Computing" (видавництво Springer-Verlag).

Таблиця 1.2

Кількість публікацій, в назві яких зустрічаються слова "fuzzy" і "fuzzy control" (дані BISC - Berkeley Initiative in Soft Computing)

Период	База даних INSPEC (технічні науки)	База даних MathSciNet (математичні науки)
	"fuzzy", "fuzzy control"	"fuzzy", "fuzzy control"
1970-1979	607	443
1980-1989	2618	2504
1990-1999	27896	5814
2000-2003	10453	2865
2003-2013	47791	11031

У 1993 році Коско (Kosko) довів теорему про нечітку апроксимацію (FAT Fuzzy Approximation Theorem) [78], згідно якої, будь-яка математична

система може бути апроксимована системою на нечіткій логіці. Отже, за допомогою природничо-мовних висловлювань "ЯКЩО ТО", з подальшою їх формалізацією засобами теорії нечітких множин, можна скільки завгодно точно відобразити довільний взаємозв'язок "вхід-вихід" без використання складного апарату диференціального і інтегрального числення, традиційно застосовуваного в управлінні та ідентифікації. Сьогодні нечітка логіка розглядається як стандартний метод моделювання та проектування. У січні 1997 року мова нечіткого управління Fuzzy Control Language внесена до Міжнародного стандарту програмованих контролерів ІЕС 1131-7.

Велика кількість публікацій з нечіткої логіки пояснюється широким колом задач, яке вона охоплює. Спектр застосувань дуже широкий: від побутових відеокамер, пілососів і пральних машин до засобів наведення ракет ППО і управління бойовими вертольотами. В цьому напрямку як і раніше лідирує Японія, в якій випущено понад 4800 "нечітких" патентів (в США близько 1700 патентів). Практичний досвід розробки систем на нечітких множинах свідчить, що терміни і вартість їх проектування значно нижче, ніж при використанні традиційного математичного апарату, при цьому забезпечується необхідні рівні якості. Лотфі Заде якимось з цього приводу зауважив, що "майже завжди можна зробити такий же самий продукт без нечіткої логіки, але з нечіткою буде швидше і дешевше" ("In almost every case you can build the same product without fuzzy logic, but fuzzy is faster and cheaper "[79]).

Що стосується застосування нечіткої логіки в системах управління технологічними процесами, то тут, незважаючи на величезну кількість публікацій (див. табл. 1.2), можна виокремити лише два принципових підходи до побудови структурних схем систем керування: для побудови самого регулятора і для організації підлаштування коефіцієнтів ПІ-регулятора.

Одна із найбільш розповсюджених структур нечіткого ПІ-регулятора показана на рис. 1.10. На вхід регулятора поступає сигнал неузгодженості  $e$  і

похідна сигналу неузгодженості  $de/dt$ . Обидві величини спочатку піддаються операції фазифікації, потім отримані нечіткі змінні використовуються в блоці нечіткого виводу для отримання вихідного сигналу, який після виконання операції дефазифікації подається на вихід регулятора як сигнал керування  $u$  [33, 80].

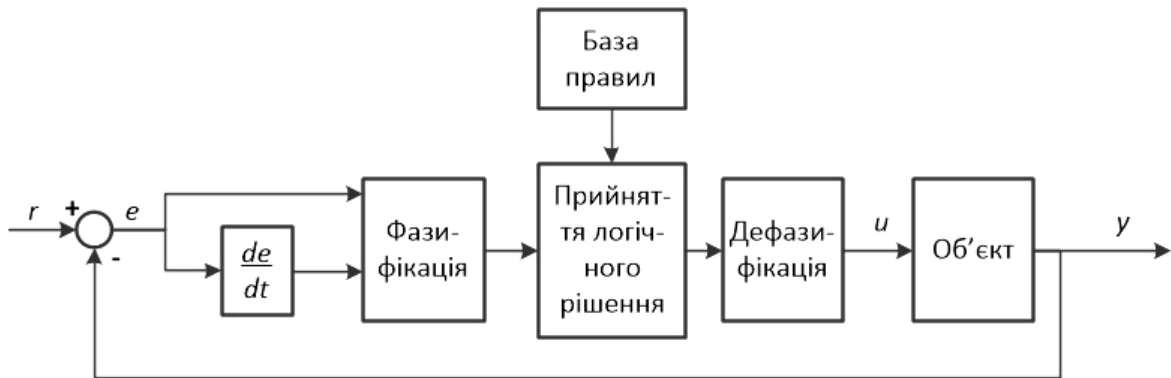


Рис. 1.10. Структура нечіткого контролера

В умовах параметричної нестационарності ОК особливо цікавий другий варіант (рис. 1.11), в якому нечіткий регулятор по суті виступає як блок адаптації коефіцієнтів основного ПІ-регулятора.

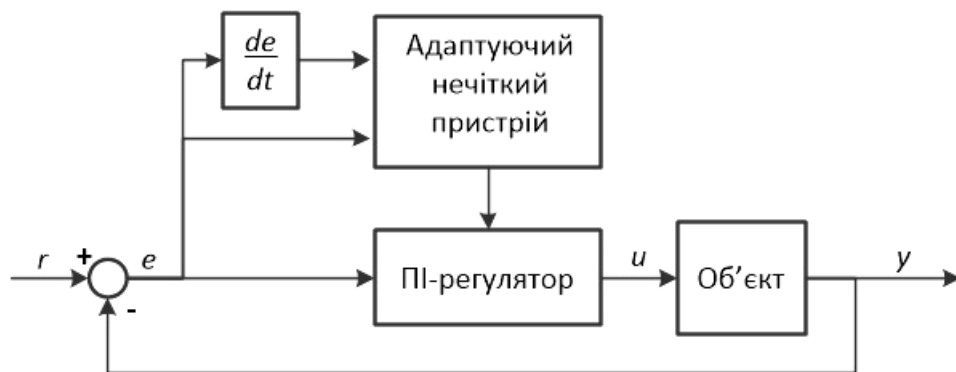


Рис. 1.11. ПІ-регулятор з адаптуєчим fuzzy-logic пристроєм

Відсутність блоку нечіткої логіки в основному каналі регулювання дозволяє в кожний окремо взятий момент часу розглядати систему керування як лінійну, а відтак, застосовувати добре відомі методи аналізу і синтезу лінійних систем, наприклад частотні характеристики [81]. Тим не менш,



реалізація блоку адаптації для ПД-регулятора викликає проблеми, оскільки він повинен мати три блоки нечіткої логіки у відповідності з трьома параметрами ПД-регулятора, крім того дана структура не вирішує проблему безударного переходу між налаштуваннями регулятора.

Основним недоліком нечітких контролерів є складність їх налаштування, що виражається в тривалій ітераційній процедурі їх налаштування.

### **1.3. Висновки за розділом і постановка задачі дослідження**

На підставі проведеного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. Прямоточний котлоагрегат є складним об'єктом для автоматизації, що характеризується яскраво вираженими акумулюючими властивостями, наявністю часових затримок, нелінійностей, люфтів регулюючої апаратури, а також нестаціонарністю динамічних характеристик.
2. Умови експлуатації енергоблоків ТЕС потужністю до 300 МВт в наш час не в повній мірі відповідають проектним. По-перше, суттєва зміна навантаження протягом доби знижує їх ефективність функціонування в цілому, а системи автоматизації, що були спроектовані на роботу в номінальному режимі, не справляються з новими вимогами зміни навантаження за графіком. По-друге, якість і склад твердого палива може значно варіюватися, залежно від територіального походження. Ця проблема стала ще гострішою, коли на пилувугільних котлоагрегатах спробували використовувати вугілля, поставлене з-за кордону.
3. Наявні методи і схеми керування не задовольняють в повній мірі вимогам, що висувуються до систем автоматизації інерційних контурів ТЕС. В першу чергу причиною цього є складність ідентифікації об'єкту керування. Значна нелінійність залежно від режиму функціонування, стохастичність вимірювання технологічних параметрів, взаємопов'язаність контурів є причинами такої ситуації. Багато методів підвищення якості функціонування, що пропонуються теорією автоматичного керування, практично неможливо застосовувати в

умовах промислової експлуатації прямоточних котлоагрегатів. Зокрема, адаптивні пристрої не прижилися через несанкціоновані оперативним персоналом збурення, які вони вносили в хід технологічного процесу. Використання предикторів неефективне через неточність моделі об'єкта. Через це близько 60% всіх контурів функціонує із "слабкими" налаштуваннями ПІД-регуляторів, які забезпечують надійність роботи систем автоматизації, але зумовлюють економічні втрати через неефективність роботи.

4. Незважаючи на об'єктивні складнощі автоматизації контурів ТЕС, оператори-технологи тим не менш цілком успішно керують перебігом технологічного процесу в ручному режимі. Знання, на які спирається оператор, реалізуються у формі правил "ЯКЩО-ТО", що мають нечіткий інформаційний зміст. Цей принцип використовується при автоматизації керування на базі нечіткої логіки, тому цей напрямок дослідження є перспективним для вирішення зазначених проблем.
5. Для такого складного теплоенергетичного об'єкту керування, як прямоточний паровий котел, стандартні і відомі методи керування в повній мірі не задовольняють заданим вимогам. Необхідно розробити структуру схеми керування і алгоритм, який би ефективно вирішував специфічні проблеми і задовольняв вимогам технологічної експлуатації.

На підставі вищезазначених висновків сформульовано мету дисертаційного дослідження: розробити алгоритм роботи системи автоматизації, що нечутливий до невизначеності параметрів об'єкту, враховує наявність запізнення у часі по каналах керування і збурення та гарантує при цьому задану якість регулювання у перехідних режимах роботи, а також отримати метод синтезу розробленого контролера. Розроблений алгоритм має реалізовуватися на промислових засобах автоматизації і повинен легко вбудовуватися в існуючі АСУТП ТЕС і не вимагати для своєї

реалізації додаткових каналів вимірювання сигналів або спеціальних датчиків.

Досягнення сформульованої мети потребує вирішення наступного переліку наукових задач:

- аналіз існуючих способів керування інерційними об'єктами з запізненням та змінними параметрами;
- дослідження динамічних властивостей пароводяного тракту прямоточного котлоагрегата як об'єкту керування, ідентифікація та створення математичних моделей;
- аналіз дій оператора-технолога при керуванні в ручному режимі інерційними контурами пароводяного тракту котлоагрегата;
- розробка інтелектуального контролера на основі двоканальної структури з використанням блоків нечіткої логіки;
- моделювання роботи системи керування з двоканальним нечітким контролером і порівнянням ефективності функціонування з відомими рішеннями;
- розробка методики оцінки стійкості нелінійної системи керування з використанням блоків нечіткої логіки;
- розробка автоматизованої системи керування температурним режимом котлоагрегату;
- технічна реалізація АСК на промислових засобах автоматизації.

## РОЗДІЛ 2

### СПОСІБ КВАЗІОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ІНЕРЦІЙНИМИ КОНТУРАМИ КОТЛОАГРЕГАТУ ТЕС

#### 2.1. Ідентифікація основних контурів регулювання

##### 2.1.1. Вибір методу ідентифікації

Для вирішення будь-якої задачі, пов'язаної з аналізом динаміки систем автоматичного регулювання, необхідно, насамперед, мати в наявності диференціальні рівняння досліджуваної системи.

Система автоматичного регулювання називається лінійною або нелінійною залежно від того, лінійними або відповідно нелінійними математичними залежностями (диференціальними або алгебраїчними рівняннями) описуються зв'язки, що пов'язують між собою вихідні і вхідні величини системи (або окремого її елемента).

Всі реальні системи автоматичного регулювання є в тій чи іншій мірі нелінійними. В цьому випадку рішення нелінійних диференціальних рівнянь, якими вони описуються, в загальному випадку отримати або неможливо, або ця задача є дуже складною. В той же час системам регулювання притаманний ряд властивостей: відносно малі амплітуди коливань багатьох координат системи, неперервність і «мала кривизна» нелінійних залежностей, що дозволяє випрямляти їх на певних ділянках і т.д. Завдяки цьому можливо більшу частину реальних нелінійних систем наближено описувати лінійними диференціальними рівняннями [82].

Принципово для отримання математичної моделі об'єкта керування існує три способи:

1. Аналітичний;
2. Експериментальний;
3. Комбінований.

При аналітичному способі модель об'єкта отримується на основі хімічних, фізичних і інших законів і залежностей, завдяки яким виводяться необхідні диференціальні рівняння. Варто зауважити, що цим способом

визначення динамічних властивостей може бути успішно виконано або на етапі проектування об'єкту керування (пристрою, установки, агрегату тощо), або для порівняно простих об'єктів. В іншому випадку задача аналітичного виводу стає надмірно трудомісткою, при цьому точність моделі знижується. Через свою складність аналітичні методи визначення динамічних характеристик об'єктів регулювання не отримали широкого розповсюдження.

Експериментальний спосіб ґрунтується на дослідженні перехідних часових характеристик динамічної системи. До таких характеристик відносять криві розгону і імпульсні перехідні функції. Крива розгону представляє собою рішення диференційного рівняння системи при стрибкоподібному входному впливі і нульових початкових умовах. Вона, як і диференційне рівняння, адекватно характеризує динамічні властивості лінійної системи. Таким чином, криві розгону дають наочне представлення про характер перехідних процесів в системі без знання природи процесів, що протікають всередині досліджуваного об'єкта. Експериментальні методи відносно прості і дозволяють швидко отримати математичний опис об'єкту, тому вони набули широкого розповсюдження при дослідженні об'єктів, що підлягають автоматизації. Методи експериментального визначення моделей об'єктів керування в наш час залишаються найбільш достовірними і легкодоступними на промислових підприємствах.

При комбінованому способі дослідник задається основними відомими закономірностями і структурою об'єкта, а числові значення параметрів рівнянь динаміки визначаються з експериментальних даних. В цьому випадку усувають недоліки обох вище розглянутих способів і, в той же час, зберігаються їх переваги.

Теплоенергетичні об'єкти характеризуються неперервними технологічними процесами і представляють собою інерційні динамічні системи. З точки зору динаміки їх можна розглядати як фільтри інфранизьких частот з полосою пропускання від  $\omega=0$  до  $\omega=0,1\div 0,2$  рад/сек

[82]. Вказані об'єкти, як правило, достатньо стаціонарні в часовому інтервалі, що значно перевищує час проведення експерименту.

Експериментальне дослідження динаміки теплоенергетичних об'єктів ділиться на три етапи:

1. планування і підготовка експерименту (вивчення об'єкта, вибір апаратури, методів дослідження і порядок проведення досліду);
2. проведення досліду;
3. обробка результатів (згладжування і усереднення отриманих даних) з метою підготовки для якісного розрахунку моделі.

Об'єктом, що потребує ідентифікації, є пароводяний тракт прямоточного котлоагрегату ТПП-210А, а саме температури робочого середовища до першого впорскування за зонами НРЧ, ВРЧ і ППП.

На температуру пари в проміжній точці можна впливати двома способами – змінюючи витрату живильної води/пари або витрату палива. На даному об'єкті витратою води/пари підтримують задане теплове навантаження котлоагрегата, тоді як температурний режим котла – витратою палива. Зміна електричного навантаження турбіни потребує зміни витрати пари через турбіну. Відтак зміна навантаження фактично є збуренням для контуру регулювання «паливо-температура пари».

Ідентифікацію об'єкта керування проведемо за допомогою методу додаткових членів [83, 84]. Перевагою цього методу є те, що крім сталих часу об'єкта можна визначити також порядок диференційного рівняння  $n$ .

В загальному випадку модель об'єкта має вигляд:

$$W_{об}(s) = \frac{K_{об} e^{-\tau_{об}s}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1) \dots (T_ns + 1)} \quad (2.1)$$

$K_{об}$  визначається за перехідною характеристикою об'єкта керування як значення  $h(\infty)$ .

Час чистого транспортного запізнювання  $\tau_{об}$  визначається як час, протягом якого вихідна величина після нанесення збурення знаходиться в межах  $\pm 2\%$  від сталого значення.

На рис. 2.1 наведено допоміжний графік для визначення порядку диференційного рівняння за методом додаткових членів.

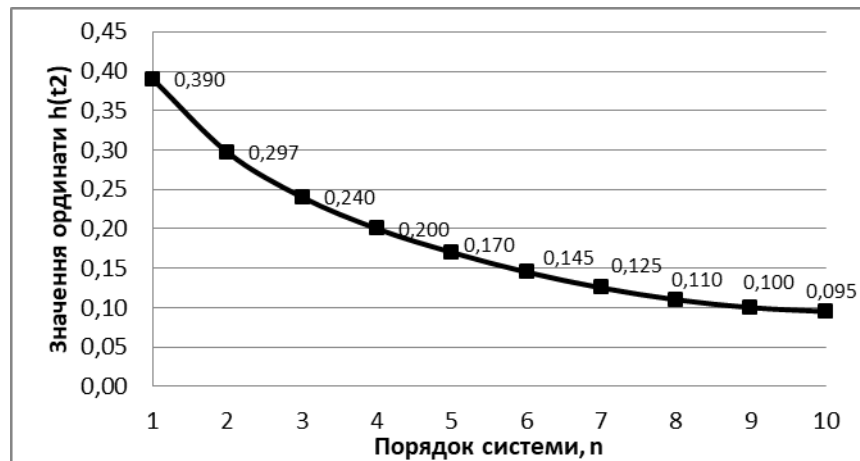


Рис. 2.1. Допоміжний графік для визначення порядку диференційного рівняння

Наведемо порядок визначення сталих часу об'єкта керування.

1. На графіку нормованої перехідної характеристики  $h_n(\infty) = 1$  при  $h(t_1) = 0,6321$  визначаємо  $t'_1$ , при чому  $t_1 = t'_1 - \tau_{об}$ , та  $t_2 = 0,5t_1 + \tau_{об}$ . За  $t_2$  визначаємо  $h(t_2)$ .
2. На допоміжному графіку (див. рис. 2.1) за знайденим значенням  $h(t_2)$  визначимо порядок диференційного рівняння  $n$ .
3. З табл. 2.1 за допомогою формул (2.2) визначимо сталі часу.

$$T_1 = D_n t_1; T_2 = \frac{T_1}{2}; T_3 = \frac{T_1}{3}; T_4 = \frac{T_1}{4}; \dots \quad (2.2)$$

Таблиця 2.1

Таблиця коефіцієнтів для визначення сталих часу

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D_n$	0,962	0,642	0,524	0,462	0,421	0,391	0,371	0,354	0,339	0,321

### 2.1.2. Ідентифікація при навантаженні 300 МВт

Експериментальні дані для ідентифікації були отримані в результаті проведення активного експерименту на котлоагрегаті ТПП-210А

Трипільської ТЕС при навантаженнях 300 МВт (рис. 2.2) і 225 МВт (рис. 2.11) для температур НРЧ, ВРЧ, ППП. Криві розгону отримані шляхом стрибкоподібної зміни витрати палива при сталій витраті живильної води.

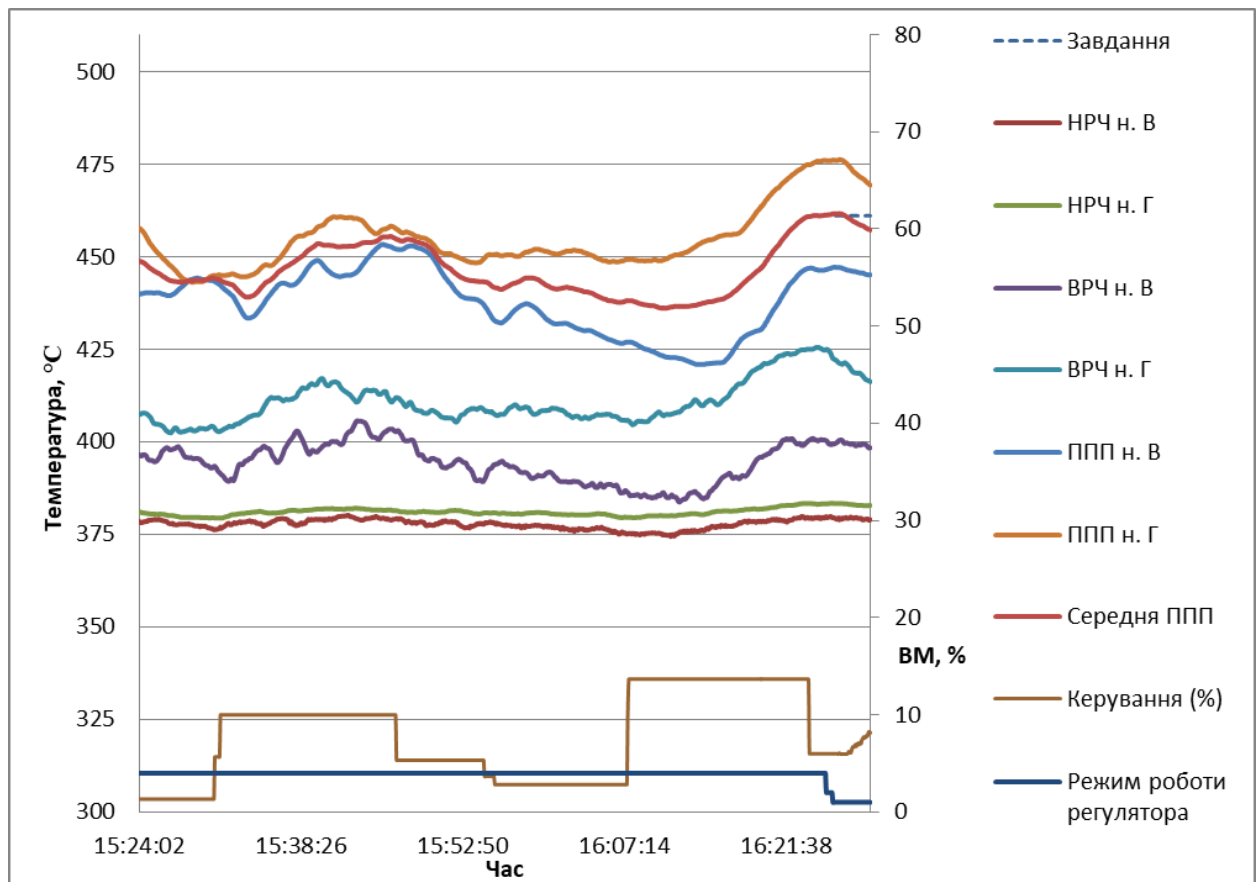


Рис. 2.2. Графіки переходних процесів при навантаженні 300 МВт

На рис. 2.2 видно, що було здійснено дві спроби зняття кривих розгону. Отримані масиви даних використані для ідентифікації контурів «паливо-температура НРЧ», «паливо-температура ВРЧ», «паливо-температура ППП» при навантаженні 300 МВт.

Коефіцієнт підсилення контуру ППП складає  $K_{об}=2.67$  °C/% (див. рис. 2.3). Час чистого транспортного запізнювання  $\tau_{об}$  складає 85 с.

Графічно процедура визначення порядку диференційного рівняння і сталих часу об'єкту за методом додаткових членів наведена на рис. 2.4.

$$t_1 = t'_1 - \tau_{об} = 402 - 85 = 317;$$

$$t_2 = 0.5 * t_1 + \tau_{об} = 0.5 * 317 + 85 = 244;$$

$$h(t_2) = 0.21.$$



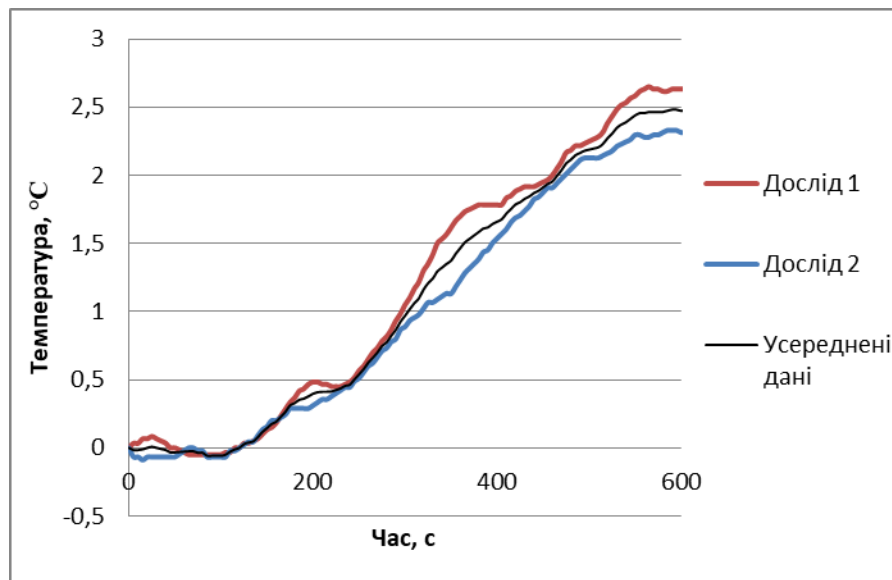


Рис. 2.3. Перехідні характеристики температури за ППП при навантаженні 300 МВт

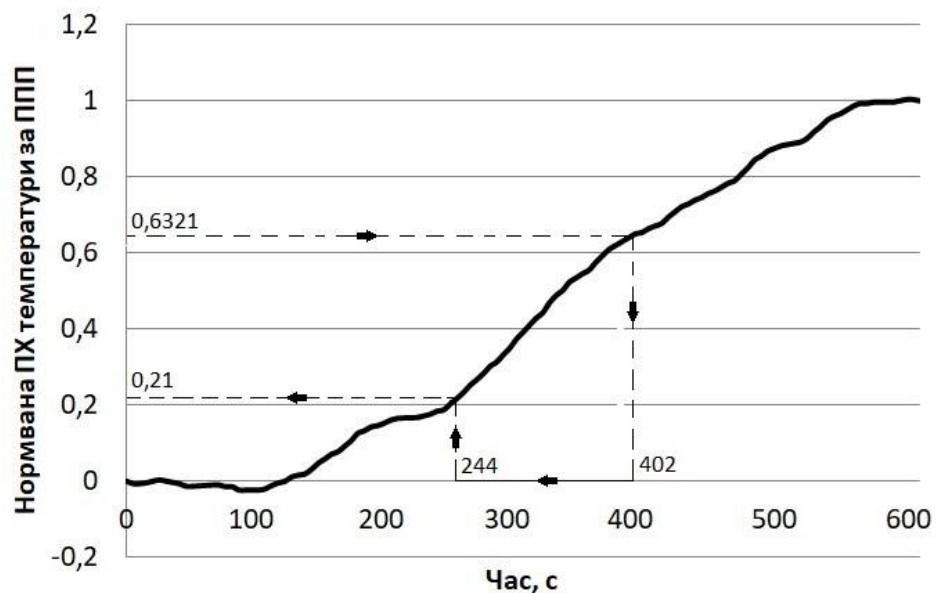


Рис. 2.4. Процедура ідентифікації об'єкта керування

Згідно рис. 2.1 значення  $h(t_2)=0.21$  відповідає порядку диференційного рівняння  $n=4$ . При  $n=4$   $D_n=0.462$ . Тоді відповідно до формул (2.2):

$$T_1 = D_n * t_1 = 0.462 * 317 \approx 146 \text{ (с)};$$

$$T_2 = T_1 / 2 = 146 / 2 = 73 \text{ (с)};$$

$$T_3 = T_1 / 3 = 146 / 3 \approx 49 \text{ (с)};$$

$$T_4 = T_1 / 4 = 146 / 4 \approx 37 \text{ (с)}.$$

Модель об'єкта керування 4-го порядку буде мати вигляд:

$$W_{\sigma\sigma}(s) = \frac{2.67e^{-85s}}{(146s+1)(73s+1)(49s+1)(37s+1)} \quad (2.3)$$

Похибка апроксимації для моделі температури за ППП не перевищує 6,6%.

На відміну від температури за ППП, сигнали температури після НРЧ і ВРЧ є зашумленим. Для проведення ідентифікації цих контурів експериментальні дані слід згладити.

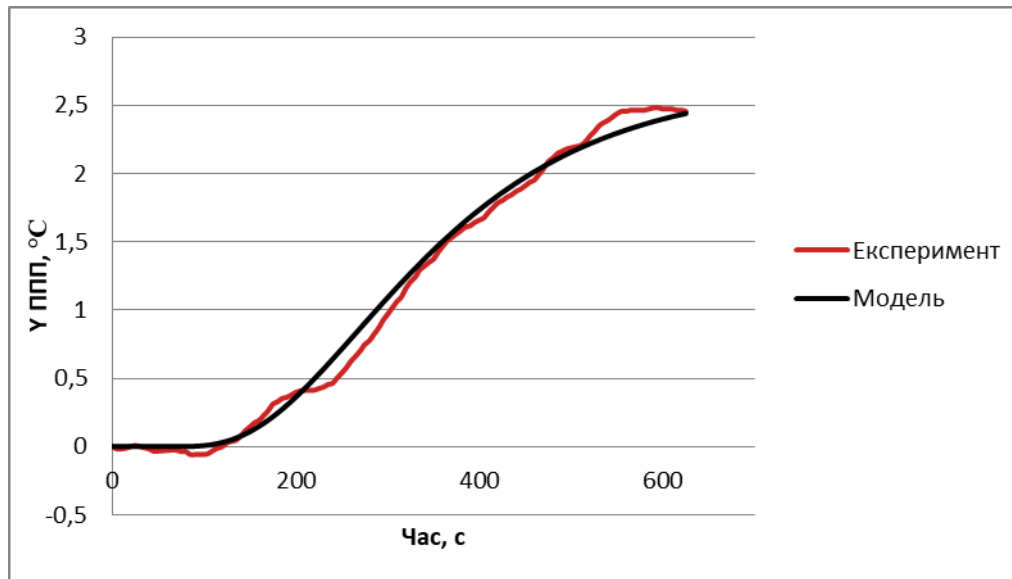


Рис. 2.5. Порівняння експериментальних даних ППП при 300 МВт з моделлю

Згладжування експериментальних даних проведемо за допомогою модифікованого методу ковзного середнього. Перевагою цього методу є те, що він не вносить додаткової динамічної затримки, на відміну від звичайного експоненційного фільтру. Згладжений сигнал за модифікованим методом ковзного середнього визначається за наступною формулою:

$$y_z(t_i) = \frac{1}{b} \sum_{k=-\frac{b-1}{2}}^{\frac{b-1}{2}} y(t_{i+k}) \quad (2.4)$$

де  $b$  – кількість точок для усереднення;

На рис. 2.6 і рис. 2.7 наведені згладжені перехідні характеристики по температурам НРЧ і ВРЧ для навантаження 300 МВт.

Чисте транспортне запізнювання за каналом НРЧ складає  $\tau_{НРЧ}=20$  с,  $t_1=320-20=300$  (с),  $t_2=300/2+20=170$  (с),  $h(t_2)=0,341$ . Відповідно до рис. 2.1 порядок диференційного рівняння, що описує динаміку даного контуру, становить  $n=2$ .  $D_n=0,642$ ,  $T_1=193$ ,  $T_2=96$ .  $K_{об}^{НРЧ}=0,46$  °С/‰.

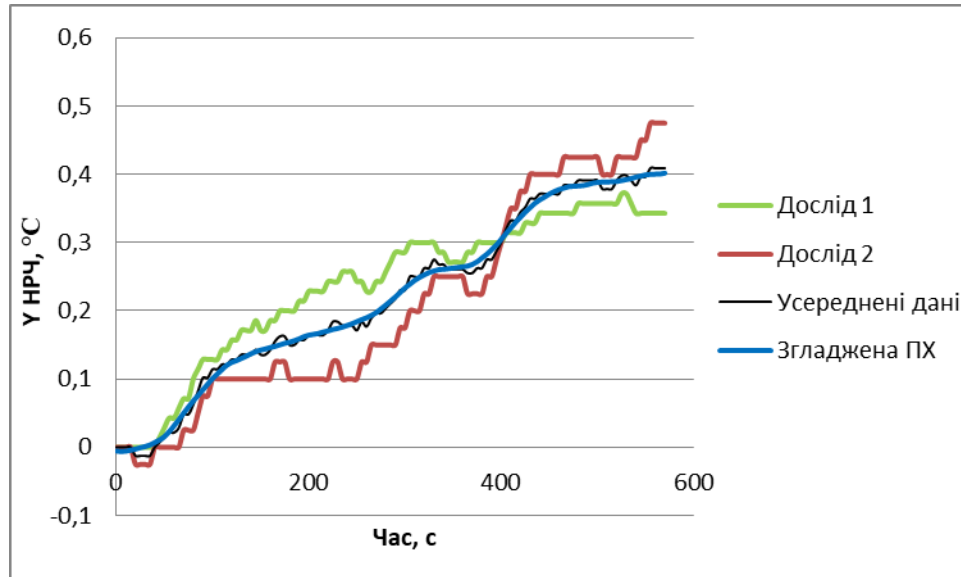


Рис. 2.6. Згладжена ПХ температури НРЧ при 300 МВт

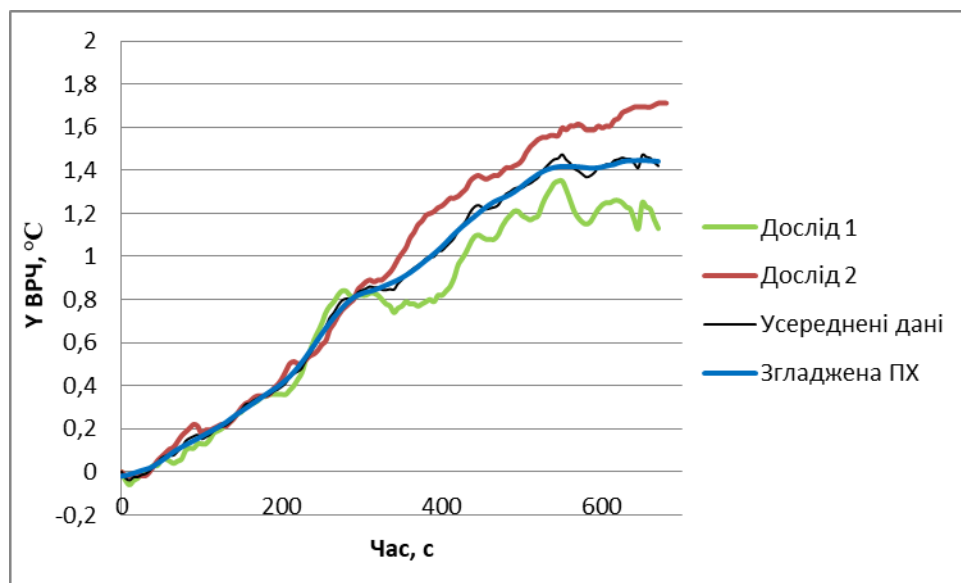


Рис. 2.7. Згладжена ПХ температури ВРЧ при 300 МВт

Чисте транспортне запізнювання за каналом ВРЧ складає  $\tau_{ВРЧ}=15$  с,  $t_1=345-15=330$  (с),  $t_2=330/2+15=180$  (с),  $h(t_2)=0,248$ . Відповідно до рис. 2.1 порядок диференційного рівняння, що описує динаміку даного контуру, становить  $n=3$ .  $D_n=0,524$ ,  $T_1=173$ ,  $T_2=86$ ,  $T_3=58$ .  $K_{об}^{ВРЧ}=1,56$  °С/‰.

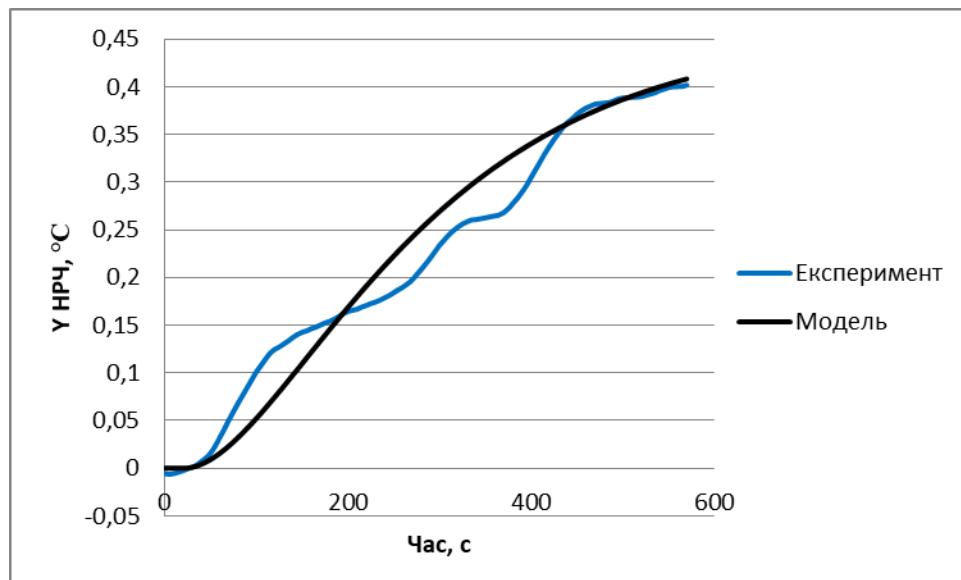


Рис. 2.8. Порівняння експериментальних даних НРЧ при 300 МВт з моделлю

Похибка апроксимації для моделі температури НРЧ складає 11,4%.

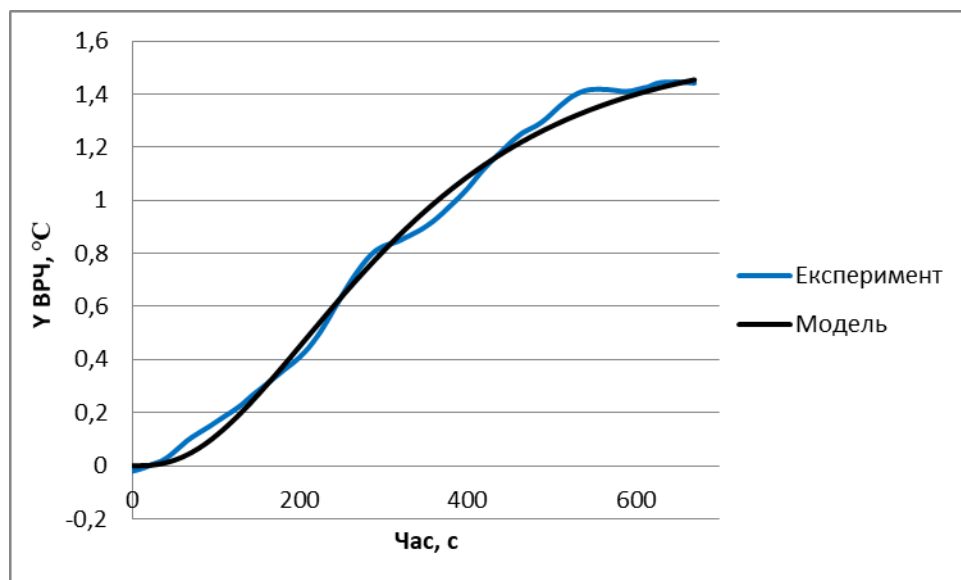


Рис. 2.9. Порівняння експериментальних даних ВРЧ при 300 МВт з моделлю

Похибка апроксимації для моделі температури ВРЧ складає 5,6%.

На рис. 2.10 наведено порівняння перехідних характеристик отриманих моделей при навантаженні 300 МВт. З рис. 2.10 можна зробити висновок, що чим далі за пароводяним трактом знаходиться точка зняття температури, тим більшим є коефіцієнт передачі. Також суттєві відмінності в моделях по чистому транспортному запізненню – від 15 с для температури ВРЧ до 85 с для температури за ППП. Динамічні властивості виявилися приблизно однаковими для температур ВРЧ і ППП, а інерційність температури НРЧ є

навіть більшою, ніж температури ВРЧ. Дійсно, з досвіду експлуатації оперативного персоналу ТЕС, при номінальному навантаженні енергоблоку сигнал по температурі НРЧ практично не реагує на зміну витрати палива або витрати живильної води. Таку поведінку можна пояснити тим, що саме в цій зоні пароводяного тракту знаходиться так звана зона максимальної теплоємності [85].

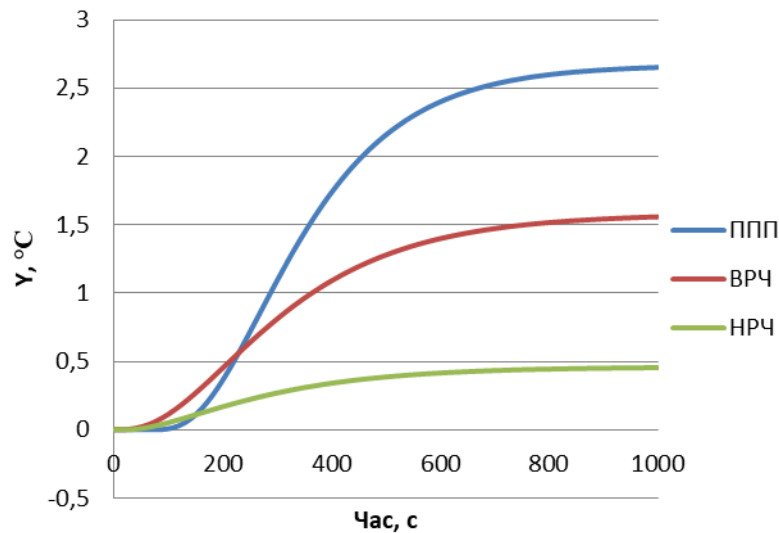


Рис. 2.10. Порівняння моделей (300 МВт)

### 2.1.3. Ідентифікація при навантаженні 225 МВт

На рис. 2.11 наведені перехідні процеси в проміжок з 11:30 до 12:40 при навантаженні 225 МВт. В цей проміжок було здійснено дві спроби зняття кривих розгону. Обидва досліді можна вважати вдалимими. Проведена процедура ідентифікації контурів «паливо-температура НРЧ», «паливо-температура ВРЧ» і «паливо-температура ППП» при навантаженні 225 МВт.

На рис. 2.12 наведена перехідна характеристика температури пари за ППП.

Чисте транспортне запізнювання за каналом ППП складає  $\tau_{\text{ППП}}=94$  с,  $t_1=254-94=160$  (с),  $t_2=160/2+94=174$  (с),  $h(t_2)=0,305$ . Відповідно до рис. 2.1 порядок диференційного рівняння, що описує динаміку даного контуру, становить  $n=2$ . Незважаючи на це, обираємо  $n=4$ , щоб забезпечити структуру моделі, аналогічну до моделі при навантаженні 300 МВт.  $D_n=0,462$ ,  $T_1=74$ ,

$T_2=37$ ,  $T_3=25$ ,  $T_4=18$ .  $K_{об}^{ППП}=4,54$  °C/%. Похибка апроксимації для моделі температури ППП складає 8,73%.

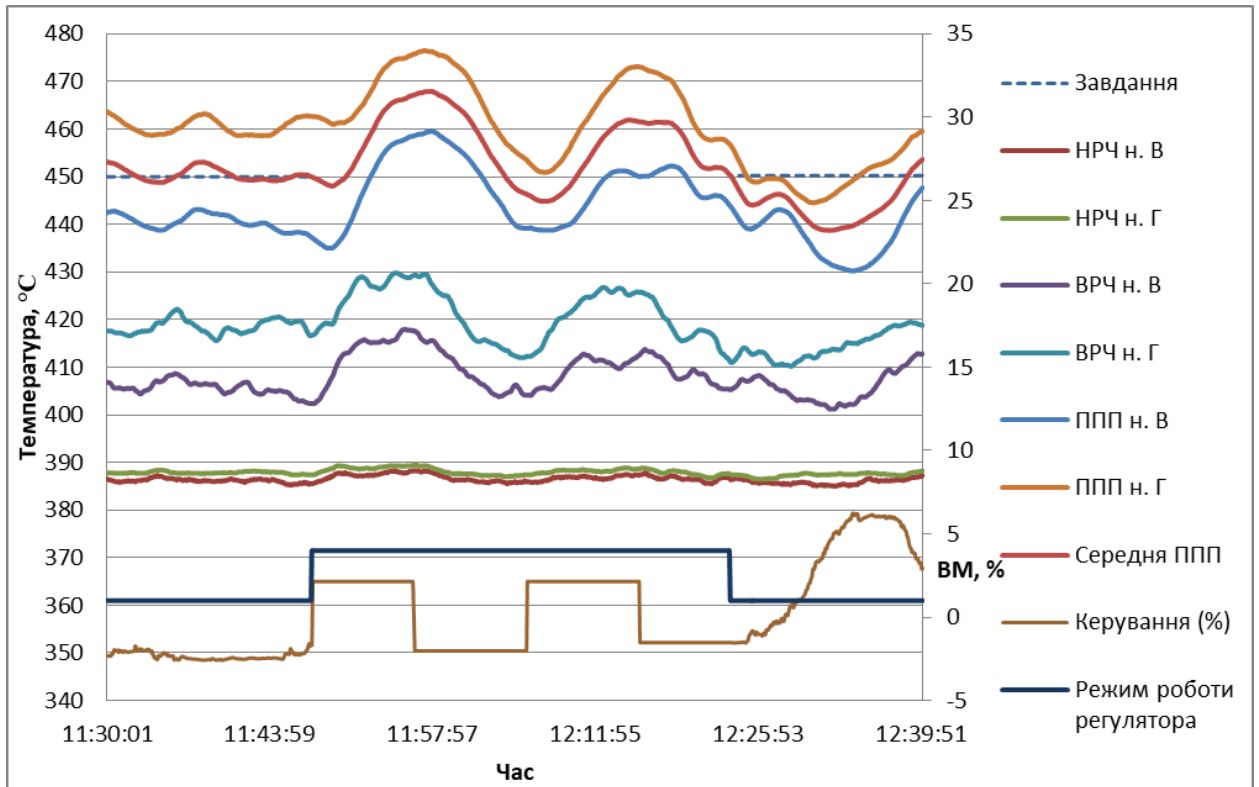


Рис. 2.11. Графіки перехідних процесів при навантаженні 225 МВт

Порівняння моделі і експериментальних даних наведено на рис. 2.13.

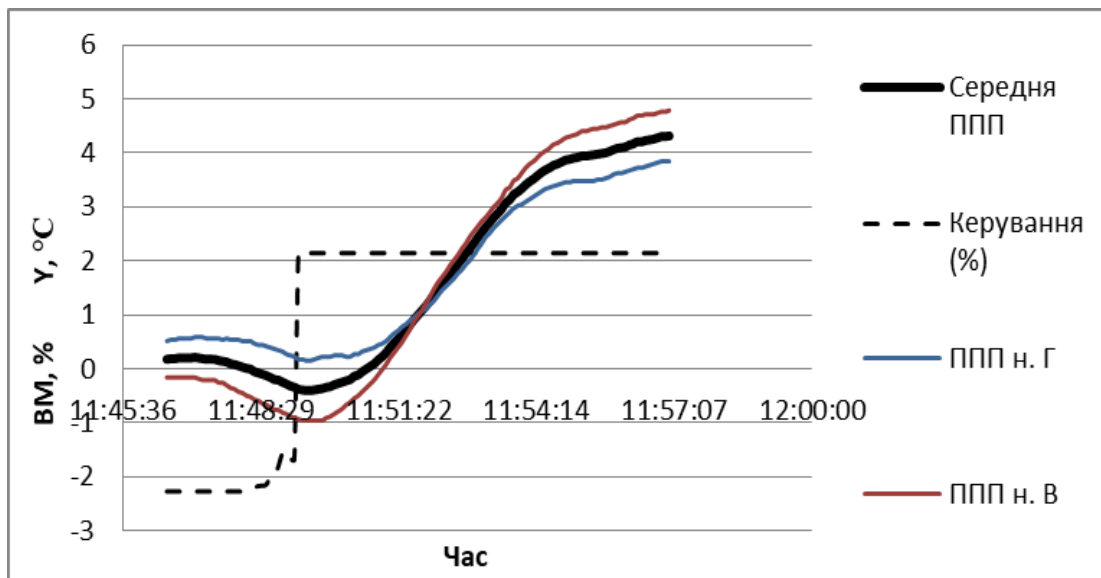


Рис. 2.12. Перехідна характеристика температури за ППП при навантаженні 225 МВт

Чисте транспортне запізнювання за каналом НРЧ складає  $\tau_{НРЧ}=10$  с,  $t_1=95-10=85$  (с),  $t_2=85/2+10=52,5$  (с),  $h(t_2)=0,31$ . Відповідно до рис. 2.1 порядок диференційного рівняння, що описує динаміку даного контуру, становить  $n=2$ .  $D_n=0,642$ ,  $T_1=55$ ,  $T_2=28$ .  $K_{об}^{НРЧ}=0,55$  °C/%. Похибка апроксимації для моделі температури НРЧ складає 8,1%. Порівняння моделі і експериментальних даних наведено на рис. 2.15.

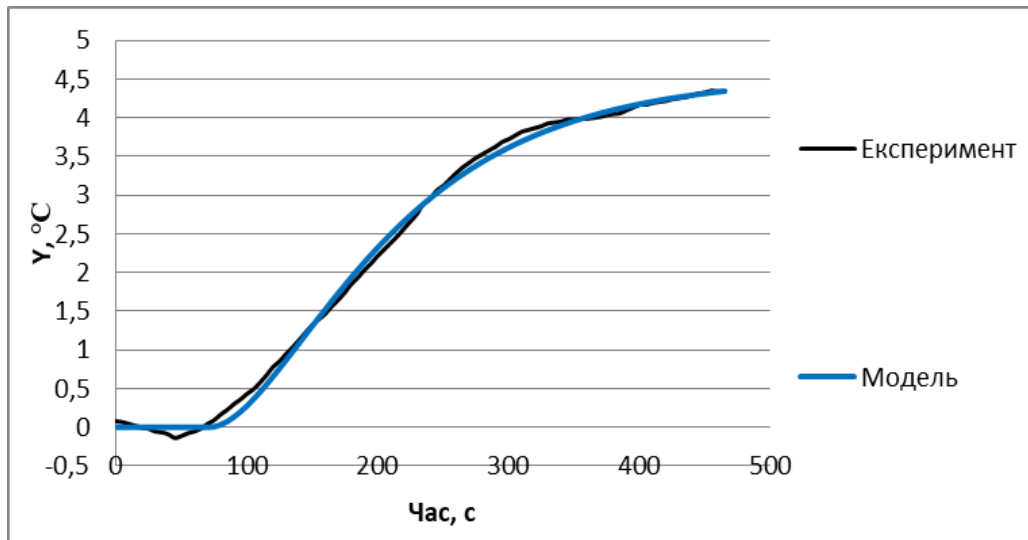


Рис. 2.13. Порівняння експериментальних даних ППП при 225 МВт з моделлю

На рис. 2.14 наведена перехідна характеристика температури пари за НРЧ.

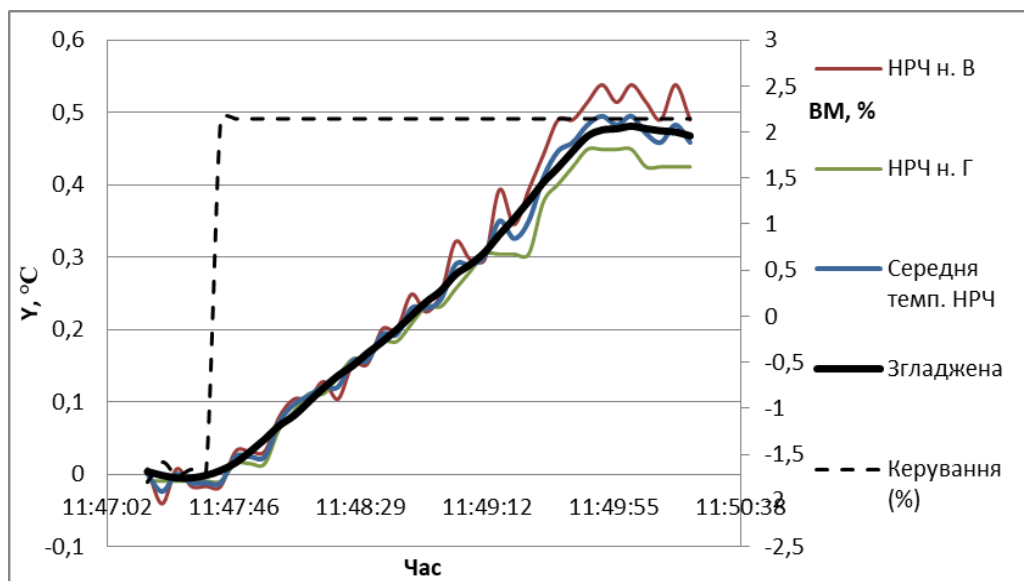


Рис. 2.14. Перехідна характеристика температури за НРЧ при навантаженні 225 МВт

На рис. 2.16 наведена перехідна характеристика температури пари за ВРЧ.

Чисте транспортне запізнювання за каналом ВРЧ складає  $\tau_{\text{ВРЧ}}=20$  с,  $t_1=170-20=150$  (с),  $t_2=150/2+20=95$  (с),  $h(t_2)=0,254$ . Відповідно до рис. 2.1 порядок диференційного рівняння, що описує динаміку даного контуру, становить  $n=3$ .  $D_n=0,524$ ,  $T_1=79$ ,  $T_2=39$ ,  $T_3=26$ .  $K_{об}^{ВРЧ}=3,14$  °С/%. Похибка апроксимації для моделі температури ВРЧ складає 9,2%. Порівняння моделі і експериментальних даних наведено на рис. 2.17.

На рис. 2.18 наведене порівняння перехідних характеристик отриманих моделей при навантаженні 225 МВт.

При навантаженні 225 МВт динамічні характеристики кожного з контурів суттєво відрізняються від характеристик при номінальному навантаженні.

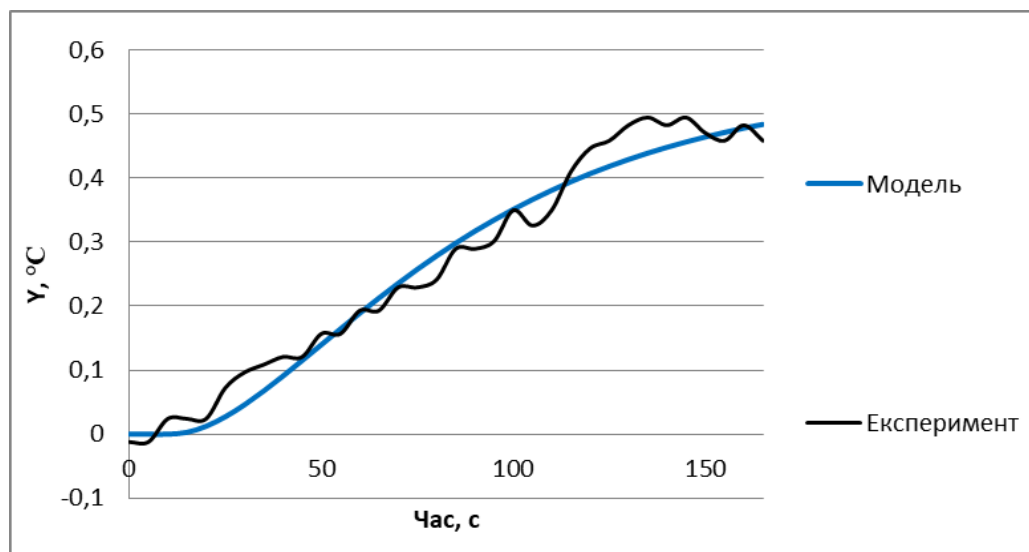


Рис. 2.15. Порівняння експериментальних даних НРЧ при 225 МВт з моделлю

Особливо це стосується контуру по температурі НРЧ. Вона є найшвидшою, з найменшим транспортним запізненням  $\tau_{\text{НРЧ}}=10$  с. Динамічні властивості контуру ВРЧ також покращилися – основна стала часу зменшилася від 317 навантаженні 300 МВт до 144 при навантаженні 225 МВт. Транспортне запізнення контуру ППП  $\tau_{\text{ППП}}$  практично не змінилося – 94 с проти 85 с при номінальному навантаженні, на відміну від інерційних



властивостей – основна стала часу зменшилася майже в 2 рази і склала 154 с при мінімальному навантаженні.

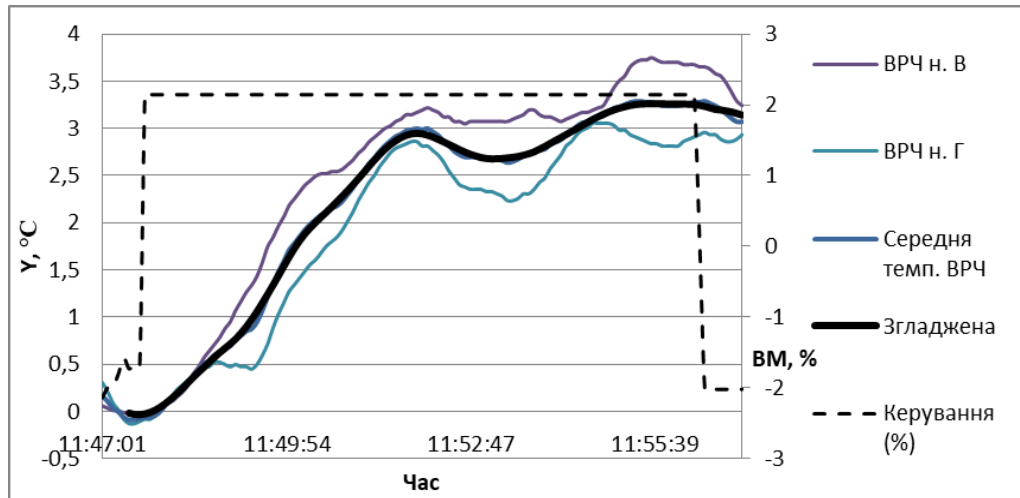


Рис. 2.16. Перехідна характеристика температури за ВРЧ при навантаженні 225 МВт

Варто відзначити також характер зміни коефіцієнту підсилення по контурам. Для температури НРЧ він збільшився лише на 19% і складає 0,55 °C/%, в той час як по контурам ВРЧ і ППП коефіцієнт підсилення при зменшенні навантаження збільшився в 2 і 1.7 рази відповідно.

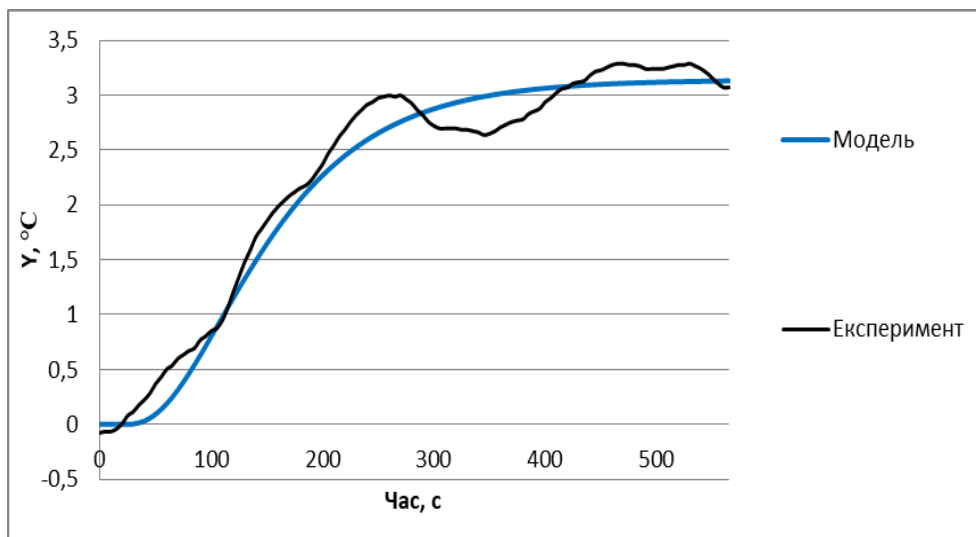


Рис. 2.17. Порівняння експериментальних даних ВРЧ при 225 МВт з моделлю  $K_{об}$  по контуру ВРЧ становить 3.14 °C/%, а по контуру ППП – 4.54 °C/%.

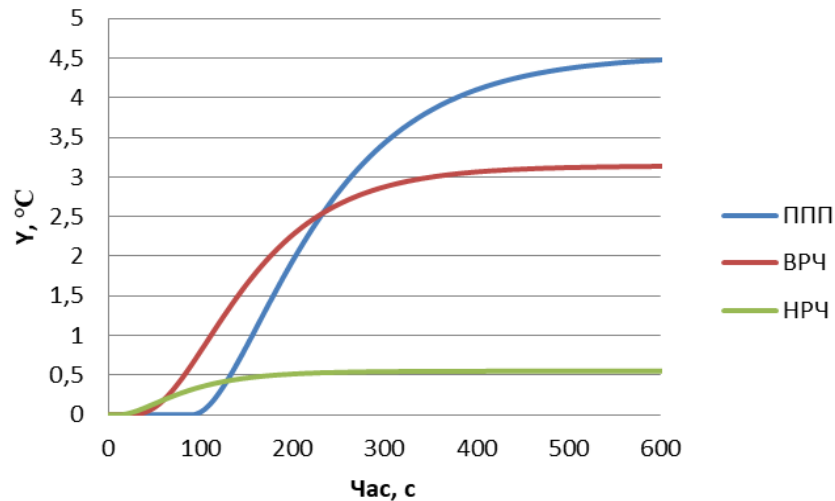


Рис. 2.18. Порівняння моделей (225 МВт)

#### 2.1.4. Функції передачі об'єкта керування

За результатами ідентифікації контурів об'єкта керування отримано математичні моделі у вигляді функцій передачі для двох крайніх режимів роботи котлоагрегату: при навантаженні 225 МВт (75% від номіналу) і 300 МВт (100% навантаження).

Функція передачі контуру ППП при 100% навантаженні має вигляд:

$$W_{ППП}^{300}(s) = \frac{2.67e^{-85s}}{(146s + 1)(77s + 1)(49s + 1)(37s + 1)} \quad (2.5)$$

Функція передачі контуру ВРЧ при 100% навантаженні:

$$W_{ВРЧ}^{300}(s) = \frac{1.56e^{-15s}}{(173s + 1)(86s + 1)(58s + 1)} \quad (2.6)$$

Функція передачі контуру НРЧ при 100% навантаженні:

$$W_{НРЧ}^{300}(s) = \frac{0.46e^{-20s}}{(193s + 1)(96s + 1)} \quad (2.7)$$

Функція передачі контуру ППП при 75% навантаженні має вигляд:

$$W_{ППП}^{225}(s) = \frac{4.54e^{-94s}}{(74s + 1)(37s + 1)(25s + 1)(18s + 1)} \quad (2.8)$$

Функція передачі контуру ВРЧ при 75% навантаженні:

$$W_{ВРЧ}^{225}(s) = \frac{3.14e^{-20s}}{(79s + 1)(39s + 1)(26s + 1)} \quad (2.9)$$

Функція передачі контуру НРЧ при 75% навантаженні:

$$W_{НРЧ}^{225}(s) = \frac{0.55e^{-10s}}{(55s+1)(28s+1)} \quad (2.10)$$

Таблиця 2.2

Параметри ідентифікованих моделей

N, МВт	Зона топки	$K_{об},$ °C/%	$T_1,$ с	$T_2,$ с	$T_3,$ с	$T_4,$ с	$\tau_{об},$ с
225	НРЧ	0,55	55	28	-	-	10
	ВРЧ	3,14	79	39	26	-	20
	ППП	4,54	74	37	25	18	94
300	НРЧ	0,46	193	96	-	-	20
	ВРЧ	1,56	173	86	58	-	15
	ППП	2,67	146	77	49	37	85

### 2.1.5. Перевірка моделей на адекватність

Для подальшого використання отриманих математичних моделей необхідно провести їх перевірку на адекватність. Адекватність моделі – збіг властивостей (функцій, параметрів, характеристик і т.п.) моделі і відповідних властивостей модельованого об'єкта. Оцінкою адекватності моделі називають перевірку відповідності моделі реальній модельованій системі. Оцінка адекватності моделі реальному об'єкту оцінюється по близькості результатів розрахунків з експериментальними даними. Одним із основних підходів оцінки адекватності є порівняння дисперсій відхилень відгуків моделі від середнього значення відгуків системи. Для цього зручно застосовувати критерій Фішера, який також відомий як F-тест.

Критерій Фішера дозволяє порівнювати величини вибірових дисперсій двох рядів спостережень. Для обчислення потрібно знайти відношення дисперсій двох вибірок, причому так, щоб більша за величиною дисперсія перебувала б в чисельнику, а менша – в знаменнику. Формула обчислення за критерієм Фішера:

$$F_e = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (2.11)$$

де  $S_1^2, S_2^2$  - вибірові оцінки дисперсій двох рядів спостережень.

$$S_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad S_2^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.12)$$

де  $\bar{x}, \bar{y}$  – середні значення вибірок  $x$  і  $y$ .

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i \quad (2.13)$$

Оскільки, згідно з умовою критерію, величина чисельника повинна бути більше або дорівнює величині знаменника, то значення завжди буде більше або дорівнює одиниці, тобто  $F_e \geq 1$ .

Якщо обчислене значення критерію  $F_e$  більше критичного для певного рівня значущості  $\alpha$  і відповідних чисел ступенів свободи для чисельника і знаменника, то дисперсії вважаються різними. Іншими словами, перевіряється гіпотеза, яка полягає в тому, що генеральні дисперсії розглянутих сукупностей рівні між собою:  $H_0 = \{D_x = D_y\}$ .

Крім зазначеного критерію додатково застосовують коефіцієнт множинної детермінації, який характеризує, на скільки відсотків побудована модель пояснює варіацію значень результативної змінної щодо свого середнього рівня, тобто показує частку загальної дисперсії результативної змінної, що пояснюється варіацією факторних змінних, включених в модель регресії. Чим більше значення коефіцієнта множинної детермінації, тим краще побудована модель характеризує взаємозв'язок між змінними. Коефіцієнт множинної детермінації  $R^2$  розраховується за формулою:

$$R^2 = 1 - \frac{ESS}{TSS} \quad (2.14)$$

де  $ESS$  (Error Sum Square) – сума квадратів залишків моделі множинної регресії:

$$ESS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.15)$$

$TSS$  (Total Sum Square) – загальна сума квадратів моделі множинної регресії:

$$TSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.16)$$

де  $y_i$  – фактичні значення;  
 $\hat{y}_i$  – значення, розраховані за моделлю;  
 $\bar{y}$  – середнє значення вибірки.

Для усіх моделей розраховане значення критерію Фішера є менше табличного (табл. 2.3), відповідно розбіжності між моделями і експериментальними даними можна вважати несуттєвими.

Таблиця 2.3

Основні статистичні показники перевірки моделей на адекватність

Коеф. Модель	показник якості кореляції	коефіцієнт множинної детермінації	дисперсія експерименту	дисперсія моделі	критерій Фішера	табличне значення
$t_{HPч}$ 225	0,9921	0,9819	0,0296	0,0307	1,036	2,33
$t_{BPч}$ 225	0,9900	0,9745	1,1964	1,3000	1,087	1,88
$t_{ППП}$ 225	0,9976	0,9940	3,3733	3,1764	1,062	1,88
$t_{HPч}$ 300	0,9888	0,9693	0,0254	0,0297	1,169	1,76
$t_{BPч}$ 300	0,9779	0,9476	0,8018	0,8502	1,060	1,79
$t_{ППП}$ 300	0,9826	0,9526	1,5216	1,7131	1,126	1,76

## 2.2. Особливості використання нечітких регуляторів на теплоенергетичних об'єктах керування

Теплоенергетичні об'єкти представляють собою складні системи, є істотно нелінійними і в ряді випадків зі змінними характеристиками у часу. Просте ПД (П) - регулювання на базі лінійної теорії в таких системах не завжди дає задовільні результати. Для застосування більш складних алгоритмів управління часто не вистачає інформації про об'єкт керування і його надійного математичного опису. Цим пояснюється той факт, що як і раніше деякі складні технологічні процеси керуються вручну досвідченими операторами-технологами, при цьому на подив цілком успішно. Знання про хід процесу, на які спирається досвідчений оператор-технолог, реалізуються їм також у формі правил ЯКЦО-ТО, що мають нечіткий інформаційний зміст. Цей же принцип використаний при автоматизації технологічних процесів на базі систем fuzzy-управління.

Fuzzy-системи з нечіткою логікою функціонують за наступним принципом: показання вимірювальних приладів фазифікуються (переводяться в нечіткий формат), обробляються на основі бази правил, дефазифікуються і потім у вигляді звичайних сигналів подаються на виконавчі механізми. Кожна лінгвістична величина інтерпретується як fuzzy-множина і описується функцією належності (ФН). Цим якісне лінгвістичне висловлювання перекладається в кількісну величину для кожного поточного чисельного значення вхідної змінної, яка повідомляє ступінь належності до тієї непарної множини, яка символізує конкретну лінгвістичну величину.

Для формування логічного рішення застосовується лінгвістичне правило виду ЯКЩО-А, ТО-В, що зазвичай називають робочим правилом. Сукупність усіх сформульованих правил (база правил) є ядром fuzzy-контролера. Для визначення числової величини на виході fuzzy-контролера проводиться процедура дефазифікації, тобто перетворення лінгвістичної величини в числову. Найбільш часто для дефазифікації використовується «метод центру тяжіння» [86].

Як приклад, що пояснює принцип fuzzy-керування розглянемо можливу поведінку fuzzy-регулятора з двома вхідними сигналами: за відхиленням параметра і його похідної стосовно типового інерційного температурного об'єкту – прямого котла. Покажемо, як формується база правил для пропорційно-диференціального ПД-fuzzy-регулятора.

- 1) Стратегія керування ПД-fuzzy-регулятора виглядає наступним чином: якщо сигнал помилки  $\xi = X_{зд} - X_{вим}$  додатний (від'ємний), то керуючий вплив у має бути додатним (від'ємним), щоб сигнал помилки привести швидше до нуля, а вихідний сигнал  $X_{вим}$  зробити рівним заданому  $X_{зд}$ ;
- 2) якщо похідна  $\dot{\xi}$  сигналу помилки за часом додатна (від'ємна), то сигнал помилки збільшується (зменшується), і відповідно керуючий вплив у також має збільшуватися (зменшуватися);

3) якщо ж сигнал помилки і його похідна мають протилежні знаки і близькі лінгвістичні значення, то при виробленні керуючого впливу пріоритет повинен віддаватися сигналу помилки.

Величина відхилення температури пари від заданої уставки лінгвістично може бути сформульована як «різниця температур» і може приймати значення «мала», «середня» і «велика». Природньо, з позиції fuzzy-управління, чим більше «різниця температур» в даний момент, тим більшим повинен бути керуючий вплив.

Другою лінгвістичною змінною ПД-fuzzy-регулятора є «швидкість зміни параметра», якій також надамо лінгвістичні значення «мала», «середня» і «велика». Якщо швидкість зміни температури велика, то природньо потрібно і відповідне (форсоване) переміщення регулюючого органу. В міру наближення регульованого параметра до заданої уставки швидкість зміни параметра буде зменшуватися, а швидкість регулюючого впливу – знижуватися.

Величина регулюючого впливу таким чином є вихідною змінною, якій присвоюються такі терми: «дуже мала», «мала», «середня», «велика» і «дуже велика». Зв'язок між входом і виходом fuzzy-системи може бути представлений в табличній формі у вигляді нечітких правил (табл. 2.4).

Кожен запис відповідає своєму нечіткому правилу. Наприклад, якщо різниця температур середня, а швидкість зміни велика, то швидкість регулюючого впливу повинна бути також велика. Подання вхідних параметрів у вигляді лінгвістичних змінних з нечіткими термами дозволяє описати причинно-наслідкові зв'язки «вхідні параметри-рішення» на природній мові за допомогою нечітких логічних висловлювань, що зв'язують лінгвістичні змінні рішень і вхідних параметрів.

Найбільш часто в fuzzy-системах використовуються трикутні і трапецієвидні ФН. Для визначення конкретного значення керуючого впливу формується «результуюча фігура», обмежена результуючої ФН. Потім проводиться пошук абсциси «центру ваги» результуючої фігури. Аналізуючи

процеси при використанні в системі управління нечітких fuzzy-регуляторів з двома, трьома і сімома ФН, можна зробити висновок, що із збільшенням числа ФН величина максимальної динамічної помилки неузгодженості зменшується незначно.

Таблиця 2.4

Залежність величини сигналу керування від різниці температур і швидкості її зміни

Швидкість зміни температури	Різниця температур		
	Мала	Середня	Велика
Мала	Дуже мала	Мала	Середня
Середня	Мала	Середня	Велика
Велика	Середня	Велика	Дуже велика

Прагнення поліпшити динамічні властивості і якісні показники fuzzy-систем змусило вдатися до дослідження замість трикутних і трапецеїдальних ФН колокоподібних, експоненційних, гаусових, сигмоїдальних, об'єднаних Z- і S-подібних функцій. Однак відчутного результату при цьому досягти не вдалося. Більшого зменшення помилки неузгодженості можна домогтися тільки використанням багатоканальної функціональної структури нечіткого fuzzy-регулятора і вибором тимчасових інтервалів для підключення кожного каналу протягом перехідного процесу [57]. При цьому, природно, ускладнюється як сама функціональна структура, так і процес налаштування fuzzy-регулятора.

Формування бази правил виключно тільки з урахуванням величини відхилення регульованого параметра від нормативного значення (див. табл. 2.4) і фактично відсутність обліку реальних динамічних властивостей об'єкта керування, що автоматизується, призводить до того, що fuzzy-системи виявляються недостатньо ефективними при автоматизації інерційних теплоенергетичних об'єктів з істотним запізненням, особливо в умовах нестационарних режимів. У той час як досвідчений оператор-технолог при ручному управлінні враховує ці обставини.



Таким чином, при формуванні бази правил в стандартній зазвичай рекомендованій fuzzy-системі завжди зберігається небезпека того, що буде сформована така база правил, яка володіє лише обмеженим діапазоном справедливості. Це обмежує діапазон ефективного використання fuzzy-систем через те, що відсутня достатня гарантія того, що результуюче значення величини керуючого впливу буде в достатній мірі відповідати величині зовнішнього збурення і дійсним характеристикам реального об'єкта управління.

Зазначені істотні недоліки fuzzy-систем можна усунути, якщо застосувати таку логічну стратегію, яка виробляла б алгоритм fuzzy-управління, аналогічний діям досвідченого оператора-технолога при ручному управлінні.

### **2.3. Засади проектування двоканальної схеми нечіткого контролера**

Аналізуючи поведінку fuzzy-регулятора на типовому температурному об'єкті, що володіє акумулюючої здатністю, інерційністю і запізненням, і порівнюючи його з діями досвідченого оператора-технолога при ручному управлінні, бачимо, що за зовнішньою формальною привабливістю системи з fuzzy-регулятором і діями оператора в аналогічній ситуації спостерігається істотна відмінність. Покажемо це на типовому перехідному процесі, характерному для температурного об'єкта прямоточного котла (наприклад поведінка температури пари за поверхнями нагріву: НРЧ, ВРЧ, ППП див. розд. 1). Перехідна характеристика температурного об'єкта при зовнішньому збуренні наведена на рис. 2.19.

Розглянемо поведінку fuzzy-регулятора для такого об'єкта в лінгвістичній термінології нечіткої fuzzy-логіки. У початковій фазі (ділянка 1) повільне наростання відхилення параметра ( $\Delta\theta$ ) диктує і відповідну реакцію fuzzy-регулятора (див. табл. 2.4, дуже мала). Потім починається етап швидкого наростання  $\Delta\theta$  (ділянка 2), що має викликати відповідну реакцію fuzzy-регулятора щодо прискореного переміщення регулюючого органу в

нове положення (по табл. 2.4, велика). Надалі відбувається етап повільного наростання (ділянка 3) при великій різниці  $\Delta\theta$  (по табл. 2.4, велика-середня), який потім змінюється етапом повільного зменшення (ділянка 4) при великій різниці  $\Delta\theta$  (по табл. 2.4, велика-середня).

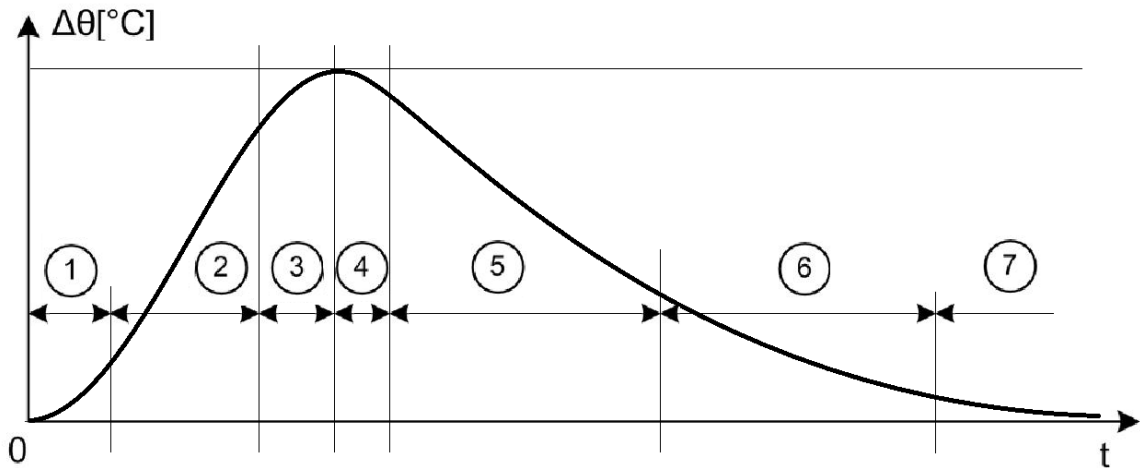


Рис. 2.19. Перехідний процес об'єкту керування при зовнішньому збуренні

На ділянці 5 швидкість зміни температури велика, а відхилення температури  $\Delta\theta$  має середнє значення, що відповідає реакції fuzzy-регулятора по табл. 2.4 як «велика». На заключному етапі (ділянка 6) при повільному поверненні параметра до свого заданого значення реакція fuzzy-регулятора характеризується по табл. 2.4 як «дуже мала».

Ділянки 3 і 4 відповідають максимуму відхилення параметра, що в термінології нечіткої fuzzy-логіки відповідає «дуже великий» реакції fuzzy-регулятора. На піку відхилення  $\Delta\theta$  (max різниця) вектор зміни температури двічі змінює напрямок від повільного наростання (+) до повільного зменшення (-). Яка в цей період (ділянки 3 і 4) повинна бути реакція fuzzy-регулятора? Судячи по максимуму відхилення ( $\Delta\theta_{max}$ ) регулюючий вплив має бути направлено на максимально швидке переміщення регулюючого органу, щоб якнайшвидше ліквідувати відхилення параметра ( $\Delta\theta$ ). У той час як дія оператора-технолога при ручному управлінні на цьому етапі переходного процесу (ділянки 3, 4, 5) як раз є прямо протилежною. Оператор «вичікує» певний час, поки з урахуванням інерційності і запізнення

«з'явиться» результат форсованого переміщення регулюючого органу, вироблений ним в початковій стадії перехідного процесу (ділянки 1, 2) [57].

Таким чином не важко помітити, що на інерційному теплоенергетичному об'єкті з запізненням при наявності додатного (від'ємного) відхилення параметра  $\Delta\theta$  реакція fuzzy-регулятора, що діє на основі лінгвістичних міркувань (див. табл. 2.4), переміщає регулюючий орган з більшою або меншою інтенсивністю навіть тоді, коли в цьому немає ніякої необхідності (ділянки 3, 4, 5). Таким чином, дії fuzzy-регулятора вступають в «протиріччя» з діями оператора-технолога в аналогічній ситуації.

Доцільність ефективного використання fuzzy-регуляторів в такому традиційному виконанні можна виявити тільки в разі застосування їх для автоматизації найпростіших (одноємнісних) статичних об'єктів (без запізнення), коли керуючий вплив миттєво без «затримки» відбивається на величині відхилення регульованого параметра, тобто коли існує однозначна лінійна залежність між положенням регулюючого органу і величиною відхилення регульованого параметра.

Про недостатню ефективність систем fuzzy-управління при автоматизації інерційних теплоенергетичних об'єктів з запізненням ( $T_{об} \gg \theta$ ,  $\tau_{об} \gg 0$ ) свідчить також той факт, що деякі автори рекомендують поліпшити динамічні властивості fuzzy-регулятора шляхом використання додаткових коригувальних зв'язків, коли в системі управління крім сигналу помилки « $\zeta$ » використовують також похідну і інтеграл цього сигналу, які зазвичай застосовуються в промислових системах регулювання з стандартними ПІД-регуляторами [99].

З наведеного аналізу випливає, що для підвищення ефективності використання fuzzy-регуляторів на інерційному об'єкті з запізненням необхідно організувати алгоритм його керуючої дії відповідно до дій досвідченого оператора-технолога при ручному управлінні. Тобто алгоритм переміщення регулюючого органу повинен включати в себе наступні основні фази (див. рис. 2.20):

- ділянку розгону, тобто «форсованого» переміщення регулюючого органу в початковій фазі перехідного процесу (ділянки 2, 3), незважаючи на повільне наростання відхилення параметра при малій різниці;

- ділянку інтенсивного «гальмування» переміщення регулюючого органу (ділянки 4, 5, 6), незважаючи на початок швидкої зміни відхилення параметра при великій різниці;

- ділянку корекції (ділянки 7) на заключному етапі перехідного процесу, коли параметр повертається до свого заданого значення, але ще не досяг його.

Очевидно, що логіка формування керуючого впливу, закладена в базу правил fuzzy-регулятора, вступає в «протиріччя» з діями оператора-технолога, спрямованими на отримання оптимального, найбільш бажаного перехідного процесу. При повільному наростанні відхилення fuzzy-регулятор реагує слабо, в той час як оператор «форсовано» переміщає регулюючий орган, прагнучи зменшити відхилення. Коли параметр досягає максимальних відхилень (ділянки 4, 5) fuzzy-регулятор максимально впливає на виконавчий механізм, в той час як оператор «вичікує» і не робить ніяких дій.

Усунення зазначеного «протиріччя» і підвищення ефективності використання систем fuzzy-управління може бути досягнуто лише в тому випадку, якщо будуть використані принципово нові логічні стратегічні підходи формування бази правил. Такі логічні стратегічні підходи вже отримали своє науково-технічне обґрунтування і реалізацію при синтезі систем з двоканальною структурою алгоритму управління (див. розд. 1).

База правил в одноканальній структурі fuzzy-контролера формує керуючий вплив виключно за величиною відхилення параметра від заданого нормативного значення без урахування динамічних властивостей об'єкта, що автоматизується. У той час як оператор-технолог цю специфіку враховує, «вичікуючи» (ділянки 3, 4, 5), поки «з'явиться» результат його вжитих форсованих дій по переміщенню регулюючого органу на самому початку перехідного процесу (ділянки 1, 2).

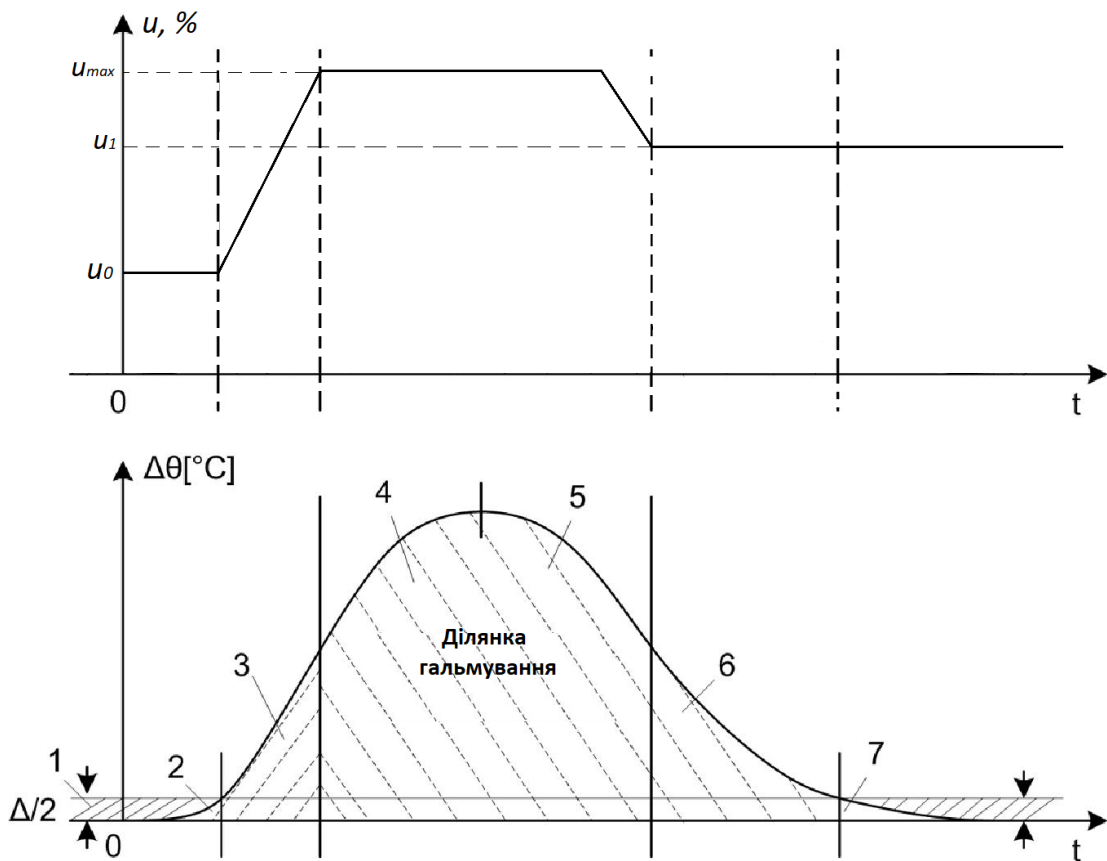


Рис. 2.20. Перехідний процес при ручному керуванні

Усунути «протиріччя» за допомогою функцій належності в сформованій базі правил одноканального fuzzy-контролера технічно не представляється можливим. Нова концепція в логічній стратегії управління fuzzy-контролера полягає в формуванні двоканальної структури алгоритму управління, закладеного в базу правил, шляхом реалізації самостійних позитивних і негативних функцій належності, що забезпечують алгоритм управління, тотожний діям оператора-технолога. В основу нової стратегії покладено концепцію про те, що потрібно вирішити, чому віддати перевагу: «позитивній рекомендації», що вироблена, базою правил позитивних функцій належності або «застереження» щодо заборони керуючих впливів, вироблених функціями належності негативного каналу. Нова стратегія повинна забезпечувати такі значення вихідної величини fuzzy-контролера на різних етапах перехідного процесу, які найбільшою мірою відповідали б діям оператора-технолога при ручному керуванні.

Нова стратегія може бути реалізована в двоканальній структурі алгоритму управління на основі наступних принципів (рис. 2.21):

- верхній канал (модулі 1, 3, 5) відповідає звичайному fuzzy-контролеру. Він видає на виході модуля 5 позитивну функцію належності  $\mu_e^+(y)$ , яка повідомляє, якою мірою вихідна величина рекомендується за результатами висновків, сформованих з позитивних правил;

- нижній канал (модулі 2, 4, 6), навпаки, містить негативні правила. Відповідно на виході модуля 6 функція належності  $\mu_e^-(y)$  повідомляє, якою мірою за результатами висновків негативного каналу має повідомлятися «застереження» (заборона) на керуючий вплив.

Підключений до виводів обох каналів модуль 7 проводить доцільне зважування «рекомендацій» і «застережень», що надходять з обох каналів на його вхід, і за функціями належності  $\mu_e^+(y)$  і  $\mu_e^-(y)$  визначає результуючий сигнал керування на об'єкт.

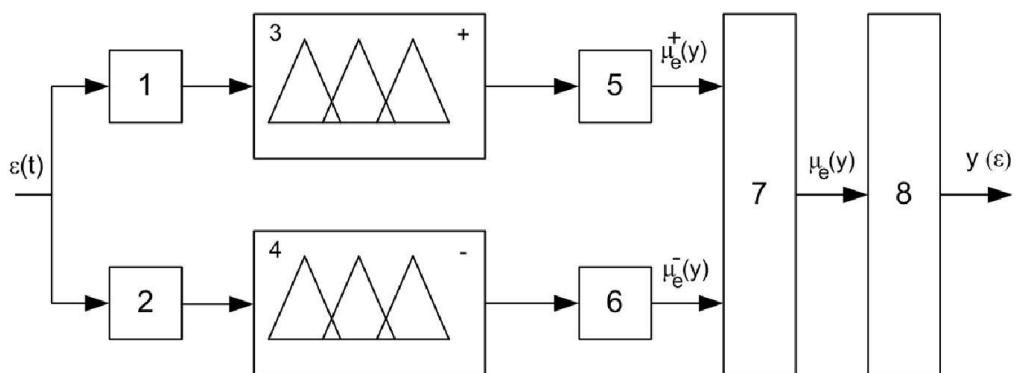


Рис. 2.21. Структура двоканального fuzzy-контролера:

1 – модуль фазифікації 1-го каналу; 2 – модуль фазифікації 2-го каналу; 3 – fuzzy-регулятор 1-го каналу; 4 – fuzzy-регулятор 2-го каналу; 5 – механізм гіперлогіки 1-го каналу; 6 – механізм гіперлогіки 2-го каналу; 7 – модуль 2-х вихідних ФН; 8 – модуль дефазифікації

Описана структура двоканального fuzzy-контролера може використовуватися для зниження коливальності і організації процесу

керування, близького до ручного управління досвідченого оператора-технолога. Дана двоканальна структура дозволяє органічно реалізувати таку стратегію управління, при якій всі значення керуючого впливу відповідають певним етапам перехідного процесу (розгону, гальмування, корекції). Такий режим може бути реалізований для тих станів fuzzy-контролера, в яких вектор стану системи знаходиться в достатній близькості до точки рівноважного стану системи. При цьому на виході fuzzy-контролера відсутній керуючий сигнал, а надходить сигнал про те, що всі вихідні величини заборонені. При появі такого сигналу присутня в цей момент величина керуючого впливу повинна зберігатися незмінною.

Таким чином, запропонована двоканальна структура fuzzy-контролера дозволяє реально використовувати досвідчені знання експертів у вигляді рекомендацій і «заборон». Це сприяє підвищенню якості регулювання і економічності ведення процесу.

Двоканальна структура формування алгоритму управління fuzzy-контролера відкриває нові перспективи і недосліджену раніше можливість організувати базу правил за допомогою позитивних і негативних функцій належності таким чином, щоб найбільшою мірою забезпечувалося поетапне виконання алгоритму управління, здійснюваного досвідченим оператором-технологом при ручному управлінні (див. рис. 2.20).

До переваг двоканальної структури fuzzy-управління можна віднести також можливість реалізації асиметрії ФН в позитивному і негативному каналах. Ця можливість сприяє реалізації різного ступеня інтенсивності керуючого впливу на різних етапах перехідного процесу (розгону, гальмування, корекції). Внутрішній «діалог» ФН між каналами сприяє реалізації алгоритму управління fuzzy-регулятора, аналогічного до дій оператора-технолога при ручному управлінні. В даний час можливості використання асиметрії ФН в двоканальній структурі fuzzy-контролера вивчена недостатньо і вимагає спеціальних наукових досліджень.

Головна перевага двоканальної функціональної структури fuzzy-контролера полягає в тому, що досягається більш якісне лінгвістичне «висловлювання», характерне для кожного етапу перехідного процесу (розгону, гальмування, корекції), аналогічно діям оператора-технолога при ручному управлінні. Тобто, при двоканальній структурі з'являється можливість удосконалення лінгвістичного «діалогу», закладеного в базу правил кожного каналу (додатного, від'ємного) і таким чином з'являється можливість враховувати у функціях належності не тільки величину відхилення параметра від нормативного значення, але і реальний стан динамічних властивостей об'єкта, що автоматизується.

Таким чином, при двоканальній структурі fuzzy-контролера з'являється можливість реалізації більш досконалої функціональної структури алгоритму управління інерційними теплоенергетичними об'єктами з урахуванням їх динамічних характеристик, а не тільки ґрунтуючись на величині відхилення параметра від нормативного значення, як це має місце в одноканальній структурі. Поточне значення кожної вихідної величини fuzzy-контролера визначається в результаті лінгвістичного «діалогу» функцій належності, закладених в базу правил кожного каналу.

Крім зазначених вище, однією з переваг двоканальної структури fuzzy-контролера є також той факт, що вона дозволяє розгалужити вирішення питань щодо швидкодії і стійкості САР індивідуальним формуванням ФН (додатних, від'ємних) в кожному каналі і можливістю організації «діалогу» розподілення завдань швидкодії і стійкості у часі (спочатку швидкодія, потім стійкість). Це сприяє збереженню керованості обладнанням в складних експлуатаційних режимах, підвищенню якості і економічності ведення технологічного процесу.

Оскільки система fuzzy-керування з використанням мікро-ЕОМ є цифровою, найважливішою характеристикою системи є крок квантування (інтервал дискретизації аналогового сигналу). Значення кроку квантування багато в чому визначає значення інших параметрів цифрової системи, в тому



числі і параметрів традиційних цифрових регуляторів. Тому при синтезі систем fuzzy-управління необхідно приділяти особливу увагу вибору значення кроку квантування цифрової системи. Fuzzy-контролери реалізуються на практиці, як правило, у формі програмного забезпечення високого рівня, наприклад «Pascal» або «C», що забезпечує більшу гнучкість при їх налаштуванні. При цьому за результатами моделювання та випробувань можна змінювати кількісні діапазони лінгвістичних змінних, функції належності і модифікувати базу правил з метою отримання необхідної якості керування.

Ефективність роботи fuzzy-контролера (як і будь-якого іншого) оцінюється по тому, яку швидкодію і точність керування він забезпечує.

З точки зору робастності двоканальний fuzzy-контролер з компенсуючим негативним каналом має підвищений запас стійкості в порівнянні з традиційними fuzzy-системами і стандартними ПІД (ПІ) - регуляторами. Незважаючи на велике різноманіття підходів до побудови fuzzy-систем і на переважання евристичних прийомів алгоритмізації задач fuzzy-управління можна виділити наступні, зазвичай рекомендовані процедури синтезу [86]:

1. Попередньо вивчають об'єкт керування (ОК), його традиційну модель, досвід експертів і операторів-технологів по його експлуатації.

2. Вибирають вимірювані вхідні змінні  $x_i$  і керуючі сигнали  $u_j$ , встановлюють межі їх зміни і підбирають масштабні коефіцієнти, що забезпечують всі змінні в безрозмірному діапазоні  $[-1, 1]$ .

3. Вводять лінгвістичні змінні  $x_i$  і  $u_j$  та представляють їх за допомогою кількох ФН, що відповідають 3-7 термам. При цьому дуже важливим для забезпечення якості та ефективності управління є вибір кількості, форми і взаємного розташування ФН на нормованому інтервалі.

4. На основі інтерв'ю та анкетування експертів та операторів-технологів, інженерів-конструкторів формують логічні правила (алгоритми) управління. При цьому корисно консультування операторів-технологів по

об'єкту керування з експертом з fuzzy-управління. У разі необхідності корегують обрані в п. 3 ФН.

5. Сформульовані правила перевіряють на їх повноту, несуперечність і надмірність.

6. У разі двох вхідних змінних  $x_1$  і  $x_2$  складають таблиці лінгвістичних правил, що встановлюють відповідність між лінгвістичними значеннями вхідних і вихідних змінних.

7. Обирають оператори імплікації, інференц-процедури і метод дефазифікації.

8. З використанням спеціалізованого пакету програм (наприклад, MATLAB/SIMULINK) програмують всі ФН, правила, процедури агрегування посилок окремих правил і всіх правил між собою.

9. Проводять моделювання та випробування системи fuzzy-управління на основі нової стратегії синтезу систем оптимального керування в поєднанні з моделлю об'єкта керування (ОК) і оцінюють працездатність, стійкість і якість системи керування (СК).

#### **2.4. Принципова схема двоканального нечіткого контролера**

Для підвищення якості функціонування системи керування і економічності ведення перехідних процесів запропоновано двоканальну структуру fuzzy-контролера, завдяки якій з'являється можливість реалізації більш досконалої функціональної структури алгоритму управління інерційними теплоенергетичними об'єктами з урахуванням їх динамічних характеристик.

Алгоритм керування, що відображає загальну мету системи управління, повинен будуватися на основі чіткого логічного опису технологічних процесів управління, які ґрунтуються на теоретичному аналізі статистичних і динамічних характеристик об'єкта керування, а також аналізі експлуатаційних результатів дій оператора-технолога при ручному керуванні регулювальним органом.

Проаналізуємо алгоритм дій оператора при регулюванні деякого параметра, наприклад, температури.

При відхиленні параметра від заданого значення оператором здійснюється керуюча дія у вигляді імпульсу певної тривалості. Як правило, виконавчими механізмами на ТЕС є реверсивні двигуни постійної швидкості. Тривалість імпульсу пропорційна ступеню зміни положення регулювального органу. Чим більша тривалість імпульсу, тим більше відкриється/закриється регулювальний орган. Тривалість імпульсу визначається оператором залежно від багатьох умов: режиму роботи котлоагрегату (номінальний чи половина потужності), швидкості відхилення від уставки, його абсолютного значення тощо. При цьому точно сказати про тривалість імпульсу не можна. Оператор скоріше оперує термінами: імпульс малої тривалості, середньої, великої. В теорії нечітких множин це є не що іншим як розбиття діапазону на лінгвістичні терми.

З іншого боку, важливу роль відіграє тривалість пауз між імпульсами. На відміну від широтно-імпульсної або часо-імпульсної модуляції, за допомогою яких на аналоговій техніці реалізовувалися лінійні закони регулювання, наприклад, ПД, при ручному регулюванні інерційних технологічних параметрів оператором-технологом тривалість паузи набуває ще одного змісту.

Після нанесення імпульсу оператор вичікує деякий час, як буде змінюватися параметр. Чи достатньо виробленої дії, чи варто ще більше вплинути задля стабілізації параметра, або навпаки, компенсувати надмірний вплив.

Такий спосіб регулювання пояснюється наявністю великих часових затримок. Застосування предиктора Сміта або схеми ІМС ускладнене відсутністю надійних математичних моделей, що описують динаміку технологічного параметра. Не маючи точного математичного опису динамічної моделі об'єкта, але спираючись на свій досвід та знання з експлуатації об'єкта керування, оператор дозовано здійснює вплив на перебіг

технологічного процесу. Паузи, пов'язані з вичікуванням, необхідні навіть досвідченому оператору, адже незважаючи на досконалі багаторічні знання про динаміку об'єкта, теплоенергетичні агрегати, такі як котлоагрегати ТЕС великої і середньої потужності, схильні до технологічного (утворення накипу) та технічного старіння («втома» металу, люфти виконавчих механізмів), піддаються впливу багатьох зовнішніх факторів в умовах невизначеностей (невідповідність якості палива, раптові локальні поломки). Всі ці фактори не дають змоги говорити про сталість динамічних характеристик.

Тож ми маємо дві основні характеристики, якими оперує оператор-технолог при ручному керуванні перебігом технологічного процесу – тривалість керуючих імпульсів і тривалість пауз. Природно, щоб для реалізації послідовностей цих імпульсів і пауз використовувалися два різних блоки нечіткої логіки, при чому вони повинні бути включені в схему керування паралельно і працювати по чергово. Звідси випливає двоканальна структура fuzzy-контролера (рис. 2.22), перший канал якої відповідає за вироблення керуючої дії, тобто формування імпульсів, а другий канал працює як «заборона» на подачу керуючої дії, тобто формування пауз.

Ці два канали поступають на блок комутації, який визначає, якому з каналів слід працювати в даний момент. Перемикання між каналами відбувається в блоці комутації сигналів. Кінець імпульсу (паузи) є початком наступної паузи (імпульсу).

Кожен момент часу обидва fuzzy-блоки виробляють тривалість імпульсу/паузи залежно від набору вхідних змінних і баз правил, які в них закладені. Блок комутації сигналів опитує той чи інший канал, знімаючи числове значення з виходу опитуваного fuzzy-блоку. Це числове значення є тривалістю імпульсу або паузи, після чого зв'язок між блоком комутації і fuzzy-блоками розривається. Блок комутації знову опитає інший fuzzy-блок після того, як сплине час, рівний знятому числовому значенню.

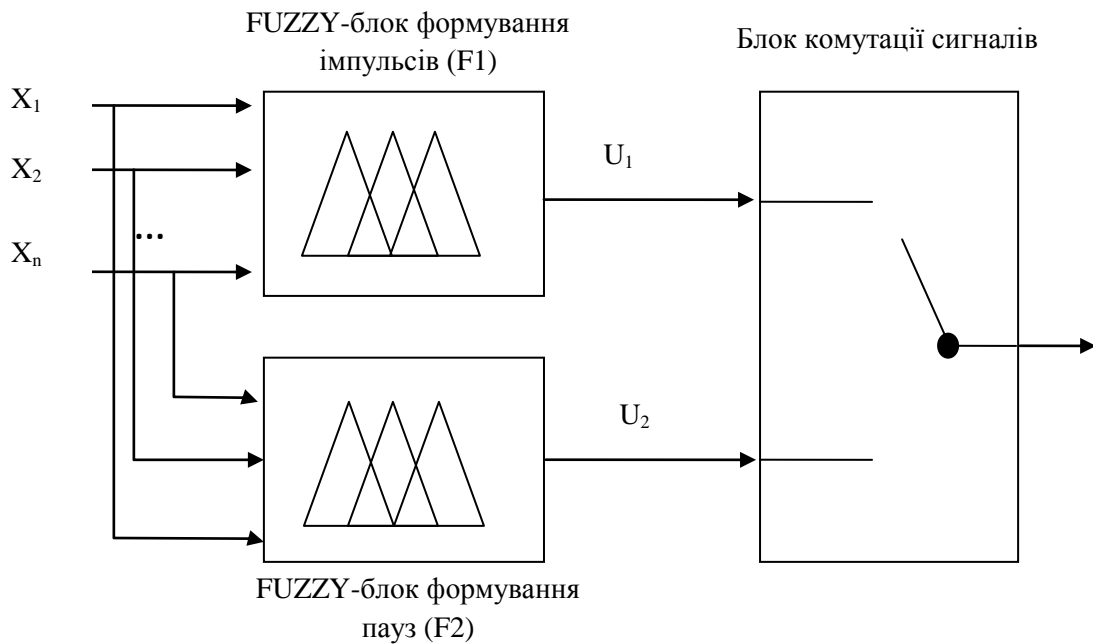


Рис. 2.22. Принципова схема двоканального fuzzy-контролера

## 2.5. Алгоритм роботи двоканального нечіткого контролера

На рис. 2.23 наведено приклад функціонування двоканального fuzzy-контролера. На рисунку наведено 5 графіків із сумісними часовими вісями.

Перший графік відображає зміну технологічного параметра, зумовлену деяким зовнішнім збуренням. Цей графік можна розбити на 5 ділянок:

Перша ділянка – етап незначного поступового відхилення регульованого параметра від уставки без виходу із зони нечутливості.

Друга ділянка – етап стрімкого відхилення регульованого параметра від уставки. Ця ділянка характеризується необхідністю форсованого керуючого впливу на перехідний процес.

Третя ділянка – етап прямування регульованого параметра в сторону уставки. На цьому етапі перехідного процесу стає зрозуміло, що керуючої дії достатньо для того, щоб змінити напрямок руху зміни параметра зі збільшення неузгодженості на її зменшення. Тобто «переломити» хід перехідного процесу в бажану сторону.

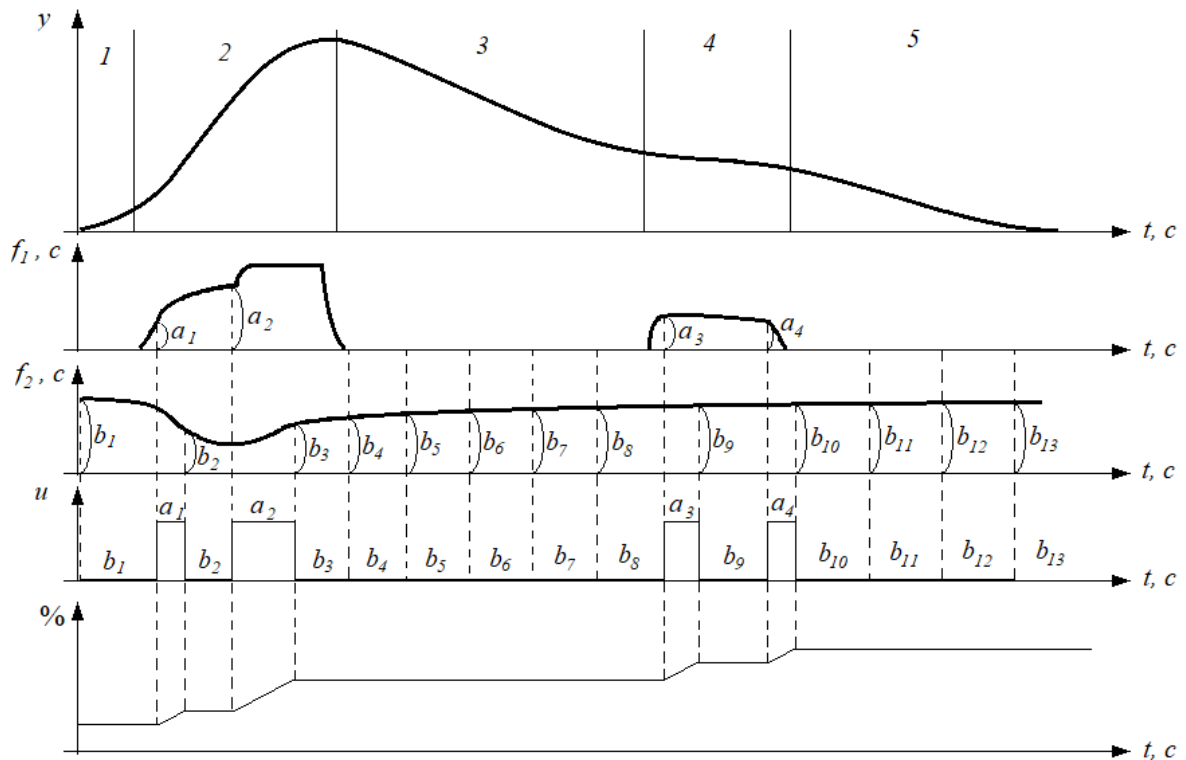


Рис. 2.23. Принцип роботи двоканального fuzzy-контролера на прикладі перехідного процесу компенсації збурення

Четверта ділянка – етап корекції перехідного процесу. На цьому етапі стає зрозуміло, що керуючої дії, виробленої під час ділянки 2, недостатньо, щоб в повній мірі компенсувати зовнішнє збурення. Тому виробляється додаткова керуюча дія для того, щоб «довести» регульований параметр в задані рамки, які, як правило, визначаються зоною нечутливості контролера.

П'ята ділянка – етап поступового прямування регульованого параметра до уставки із потраплянням в зону нечутливості. Завершенням цієї ділянки вважається момент, коли величина неузгодженості стає менше заздалегідь заданої допустимої величини:

$$|e| < \varepsilon,$$

де  $e$  – різниця між уставкою і регульованим параметром  $y$ ,

$\varepsilon$  – задана допустима величина неузгодженості.

Як бачимо, логіка перебігу перехідного процесу узгоджується із діями оператора-технолога під час ручного керування. Є ділянка *реакції* при

надмірному відхиленні параметра від уставки (ділянка 2); є ділянка *вичікування*, під час якої оператор-технолог витримує паузу, щоб визначитися, чи достатньо він виробив керуючої дії, або ж навпаки, здійснив перерегулювання (ділянка 3); є ділянка *корекції*, в якій стає зрозумілим, що керуючої дії недостатньо і треба дозовано виробити додатковий сигнал керування з метою «доведення» параметра в бажані рамки (ділянка 4).

Тепер розглянемо більш детально, яким чином досягається вище наведений алгоритм керування, а саме розглянемо роботу двоканального fuzzy-контролера.

Другий і третій графіки ( $f_1(t)$ ,  $f_2(t)$ ) відображають відповідно вихідні сигнали fuzzy-блоку формування імпульсів (F1) і fuzzy-блоку формування пауз (F2).

На ділянці 1 вихідний сигнал  $f_1(t)$  дорівнює нулю, тому що регульований параметр має мале відхилення від уставки і знаходиться в зоні нечутливості.

На ділянці 2, коли сигнал неузгодженості зростає, на виході блоку F1 починає вироблятися сигнал керування. Вихідна величина блоку F1 є ні чим іншим, як тривалістю нанесення керуючого імпульсу. Тривалість цього імпульсу визначається на основі вхідних параметрів блоку F1 і бази знань, занесеної в цей блок.

На рис. 2.23 на графіку  $f_1(t)$  тривалість першого імпульсу позначено як  $a_1$ , і вона визначається за віссю абсцис. На графіку  $u(t)$  вже формується сам імпульс керування, який триває час  $a_1$ . Після завершення часу  $a_1$  сигнал керування зникає і знімається інформація із блоку F2, роботу якого більш детально ми розглянемо нижче.

Ділянка 2 є достатньо тривалою, тому на ній регулятор встигає сформувати ще один імпульс керування  $a_2$ , тривалість якого є вже більшою. Це пояснюється тим, що абсолютна похибка на початку імпульсу  $a_2$  є більшою за абсолютну похибку на початку імпульсу  $a_1$ .

Формування тривалості імпульсу в кожний момент часу чітко відображено на графіку  $f_1(t)$ . На початку ділянки 2 похибка  $e$  невелика, тому відповідна їй ділянка на графіку  $f_1(t)$  також зростає повільно. Із збільшенням похибки  $e$  збільшується і тривалість імпульсу. В деякий момент часу це наростання має злам в сторону збільшення тривалості імпульсу. На графіку  $f_1(t)$  цей момент настає відразу після початку імпульсу  $a_2$ . Цей злам означає те, що в блоці F1 починають задіюватися інші терми. Тобто наша похибка  $e$  перейшла від лінгвістичного значення «середня» до значення «велика», відповідно запрацювали інші правила в базі знань блоку F1.

Кінець ділянки 2 характеризується зміною градієнта руху регульованого параметра – від збільшення до зменшення. В цей момент вихідний сигнал боку F1 різко зменшується до нуля. В цей момент починають працювати правила двоканального fuzzy-регулятора, що реалізують алгоритм вичікування, тобто сигнали керування не подаються, навіть при значенні похибки  $e$ , що відповідає лінгвістичному значенні «велика». Такий алгоритм стає можливим реалізувати завдяки наявності другого вхідного параметра fuzzy-регулятора – швидкості зміни похибки  $de/dt$ . Дуже важливим є те, що як і сигнал похибки  $e$ , цей параметр є знаковмінним. Як раз зміна знаку параметра  $de/dt$ , є сигналом до того, щоб регулятору переходити від стратегії формування керуючої дії, до стратегії вичікування.

Ділянка 3 є ділянкою вичікування, на якій як видно з графіка  $f_1(t)$  не виробляється жодного імпульсу керування, незважаючи на те, що абсолютна похибка  $e$  має великі значення. На цій ділянці проявляються інерційні властивості об'єкту керування. Тільки на цій ділянці стає відчутний вплив від імпульсів  $a_1$  і  $a_2$ .

З технологічної точки зору можна сказати, що під час ділянки 3 ми «відпускаємо» перехідний процес і він продовжує свій рух за власною інерцією. Можна провести аналогією між роботою fuzzy-регулятора на цій ділянці із керуванням автомобілем під час під'їзду до світлофора.



Досвідчений водій із спокійним стилем їзди, заздалегідь побачивши, що попереду горить червоне світло світлофора, перестає тиснути на педаль акселератора, тим самим дозволяючи за інерцією доїхати автомобілю до світлофора, і при цьому мінімізувати натискання на педаль гальма.

В кінці на ділянці 3 перехідний процес уповільнюється, не доходячи до значення уставки. Від так мету не досягнуто і необхідно *довести* параметр до необхідного значення. Це відбувається на ділянці 4.

База правил двоканального fuzzy-регулятора побудована таким чином, щоб при дуже повільній зміні регульованого параметра, але недопустимій похибці  $e$  все ж виробити необхідні керуючі дії і довести параметр  $u$  до необхідної уставки.

На ділянці 4 формуються 2 імпульси –  $a_3$  і  $a_4$ . Аналогічно до ділянки 2, на виході блоку F1 формується вихідний сигнал, що відповідає тривалості керуючих імпульсів. Після нанесення імпульсу  $a_4$  fuzzy-регулятор переходить в режим вичікування, що визначається параметрами перехідного процесу – сигналом похибки  $e$  і похідної від цієї похибки  $de/dt$ .

Ділянка 5 є реакцією об'єкта керування на вплив, здійснений двома імпульсами на ділянці 4. В кінці ділянки регульований параметр досягає уставки і входить в зону нечутливості контролера. На цьому перехідний процес вважається завершеним.

Вихідний сигнал блоку формування пауз F2 зображено на графіку  $f_2(t)$ . В початковий момент часу  $t=0$  знімається інформація із виходу блоку F2. Значення аргумента графіка  $f_2(t)$  в початковий момент часу позначено як  $b_1$ . На графік  $u(t)$  значення  $b_1$  переноситься як тривалість паузи.

Ділянці 1 відповідає вихід блоку F2 з великими значеннями тривалості пауз. Як видно з рис. 2.23, найбільші значення пауз присутні на початку ділянки 1 і на кінці ділянки 5, тобто з найменшим значенням похибки  $e$ . По мірі збільшення похибки  $e$  тривалість пауз зменшується. Така логіка узгоджується із ощадним використанням ресурсів контролера і в загальному відображає характер спостереження за процесом оператором-технологом. В

стаціонарному режимі немає сенсу безвідривно уважно спостерігати за об'єктом з великою інерційністю, адже щоб «розігнати» подібний об'єкт необхідний значний проміжок часу. Тому при стаціонарному режимі оператор періодично поглядає на значення технологічного параметра. У випадку ж перехідного процесу інтенсивність спостереження значно вища, тому і час пауз у fuzzy-контролера повинен бути меншим.

Після завершення паузи  $b_1$  блок комутації сигналів перемикається на блок формування імпульсів F1. Так як на прикладі рис. 2.23 в цей момент похибка  $e$  вже достатньо велика, щоб на виході блоку F1 почав формуватися вихідний сигнал тривалості імпульсу, то ця інформація знімається і виробляється імпульс, в даному випадку тривалості  $a_1$ . Далі по завершенні імпульсу  $a_1$  блок комутації сигналів знову перемикається на блок формування пауз F2. Знімається тривалість паузи  $b_2$ , по завершенні якої блоком комутації сигналів перевіряється наявність вихідного сигналу з виходу блоку F1 і т.д.

Варто відзначити, що на ділянці 2 тривалість пауз досягає свого мінімуму. Мінімум тривалості пауз співпадає з максимальним за модулем значенням похідної від сигналу похибки  $de/dt$ . Тобто коли швидкість зміни регульованої величини максимальна в сторону віддалення від уставки, необхідна максимальна інтенсивність керуючих дій.

Ділянка 3 характеризується відсутністю керуючих імпульсів. На ділянці 3 паузи  $b_4 - b_8$  ідуть підряд, тобто між ними немає сигналів керування. Алгоритм дій двоканального fuzzy-контролера на цій ділянці відносно пауз наступний. По завершенні паузи 3 блок комутації сигналів перемикається на канал формування імпульсів. В цей час на виході блоку F1 вихідний сигнал вже дорівнює нулю, тому керуючий імпульс не формується і відразу блок комутації сигналів перемикається назад на блок формування пауз F2. Після чого формується пауза  $b_4$ . Аналогічним чином формуються паузи  $b_5 - b_8$ . Таким чином фактично ми маємо не одну велику паузу на ділянці 3, а послідовність пауз без імпульсів між ними. По завершенні кожної

паузи блок комутації сигналів перемикається на канал формування імпульсів і, отримавши сигнал 0, перемикається назад на канал формування пауз. Ці перемикання можна трактувати як перевірку, чи не з'явилася необхідність в сигналі керування. Упевнившись, що сигнал керування з блоку формування імпульсів дорівнює нулю, fuzzy-контролер знову переходить в режим паузи, поки не буде здійснена наступна перевірка.

Ділянка 4 характеризується наявністю двох імпульсів. По закінченні паузи  $b_8$  хід перехідного процесу уповільнився, не досягши заданої уставки, тому на виході блоку F1 почав формуватися сигнал керування. Відповідно при перемиканні на канал формування імпульсів був знятий не нульовий сигнал. В цілому робота двоканального fuzzy-контролера на ділянці 4 аналогічна його роботі на ділянці 2. Але так як значення сигналу помилки  $e$  і його похідної  $de/dt$  інші за величиною, то задіяні інші правила в базі знань fuzzy-контролера. Від так на ділянці 4 маємо значно більші величини тривалості пауз і менші величини тривалості імпульсів. Такий алгоритм відповідає стратегії корекції перехідного процесу на завершальній його стадії. Здійснивши дозований вплив на перехідний процес на ділянці 4 ми таким чином його «розганяємо» для доведення до бажаного коридору зони нечутливості двоканального fuzzy-контролера.

Ділянка 5 характеризується відсутністю керуючих імпульсів. Алгоритм роботи fuzzy контролера на цій ділянці повністю співпадає з роботою на ділянці 3. Сигнал з блоку F1 дорівнює нулю, тому паузи  $b_{10} - b_{13}$  слідує одна за одною без проміжних імпульсів.

Проаналізувавши роботу двоканального fuzzy-контролера, наведену на рис. 2.23, стає зрозуміла ефективність двоканальної схеми керування. Завдяки наявності окремих каналів, а саме каналу формування імпульсів (каналу безпосереднього керування) і каналу формування пауз (каналу вичікування або заборони на керування), значно збільшилася гнучкість формування баз правил для fuzzy блоків. Всього лише чотирма імпульсами може бути досягнута мета керування для складного інерційного

теплоенергетичного об'єкта. Порівняно із класичними способами модуляції, наприклад широтно-імпульсною або часо-імпульсною модуляціями, тривалість імпульсів в запропонованій схемі значно більша, а їх кількість – менша. Це неодмінноощадніше для виконавчої апаратури. Варто також зазначити, що при широтно-імпульсній або часо-імпульсній модуляції послідовність імпульсів є лише наближенням, способом реалізації деякого неперервного закону керування, як це має місце при модуляції вихідного сигналу ПІ-, ПІД-регулятора. В запропонованій схемі двоканального fuzzy-контролера вихідний сигнал вже подається у формі імпульсів і без проміжних перетворень є остаточним сигналом, який подається на підсилювач. Таким чином не має необхідності в додаткових блоках модуляції, адже вихідний сигнал є прийнятним для виконавчих механізмів, які як правило для сфери задач, що розглядається, є реверсивними редуційними електричними двигунами. Відсутність необхідності підлаштування вихідного сигналу під наявні виконавчі механізми спрощує практичне застосування двоканального fuzzy-контролера. Можна навіть сказати, що відсутність блоку модуляції вихідного сигналу в деякій мірі спрощує і саму схему керування, але це не зовсім було б справедливо, тому що такий характер роботи досягається ускладненням самої структури контролера, адже вона є двоканальною з двома fuzzy блоками, кожен з яких має свою базу правил. Це перша і основна особливість запропонованого двоканального fuzzy-контролера, завдяки якій досягається алгоритм керування, подібний до алгоритму керування оператором-технологом при ручному керуванні. Іншим важливим фактором успішної реалізації даного алгоритму є точність і повнота бази правил, що сформована для кожного з каналів. Але таку особливість можна застосовувати для будь-якої схеми з блоком нечіткої логіки у складі, тому вона не є вирішальною. Тим не менш її не варто недооцінювати, бо без належної експертизи і досвіду роботи з інерційними об'єктами керування двоканальна структура не була б завершеною і не мала би сенсу. Саме експертні знання і досвід роботи з

теплоенергетичними установками підштовхнули до розгалуження звичної одноканальної структури на два канали. А нечітка логіка є підходящим інструментом для досягнення поставленої мети керування.

## **2.6. Висновки до розділу 2**

1. Для технологічного об'єкту керування отримані математичні моделі контурів регулювання за температурами НРЧ, ВРЧ, ППП при навантаженнях енергоблоку 300 МВт (100% від номіналу) і 225 МВт (75% від номіналу). Спостерігається суттєва відмінність моделей для різних режимів роботи. При зменшенні навантаження коефіцієнти підсилення моделей збільшуються, а інерційність контурів – зменшується. Найбільшої зміни зазнають зміни в чистому транспортному запізненні. Для моделі НРЧ різниця складає 7,5 разів, а для ВРЧ – 5,25 рази. Контур НРЧ, який для 75% навантаження є ефективним випереджальним сигналом, при 100% навантаженні демонструє найбільшу інерційність, що робить його застосування неефективним при номінальному навантаженні.

2. Простота ПІД-регулятора, виражена через усього три параметри налаштування і зрозумілість фізичного змісту кожного з них, разом з тим зумовлює зменшення кола задач, де він може бути використаний ефективно. Для складних багатосмісних об'єктів керування в теплоенергетиці необхідно застосовувати більш досконалу структуру регулятора.

3. Описана структура двоканального fuzzy-контролера може використовуватися для зниження коливальності і організації процесу керування, близького до ручного керування досвідченого оператора-технолога. Дана двоканальна структура дозволяє органічно реалізувати такий спосіб керування, при якому всі значення керуючого впливу відповідають певним етапам перехідного процесу (розгону, гальмування, корекції). Таким чином, запропонована двоканальна структура fuzzy-контролера дозволяє реально використовувати досвідчені знання експертів у вигляді рекомендацій і заборон.

4. Двоканальна структура нечіткого контролера збільшує гнучкість при формуванні сигналу керування на об'єкт. Завдяки наявності двох окремих блоків розмежовуються задачі форсованого керування на початковій стадії перехідного процесу і стабілізації вихідної величини на завершальній стадії. В першому випадку досягаються бажані показники якості перехідного процесу, а в другому – забезпечується необхідний запас стійкості системи автоматичного керування.

### РОЗДІЛ 3

## РОЗРОБКА ДВОКАНАЛЬНОГО НЕЧІТКОГО КОНТРОЛЕРА ДЛЯ КЕРУВАННЯ ІНЕРЦІЙНИМИ КОНТУРАМИ КОТЛОАГРЕГАТУ ТЕС

### 3.1. Розрахунок схеми керування з введенням диференціаторів в проміжних точках

САР температурного режиму пароводяного тракту являє собою систему з введенням похідних від випереджаючих сигналів, тому для налаштування регулятора спочатку треба отримати налаштування диференціаторів [87, 88, 89].

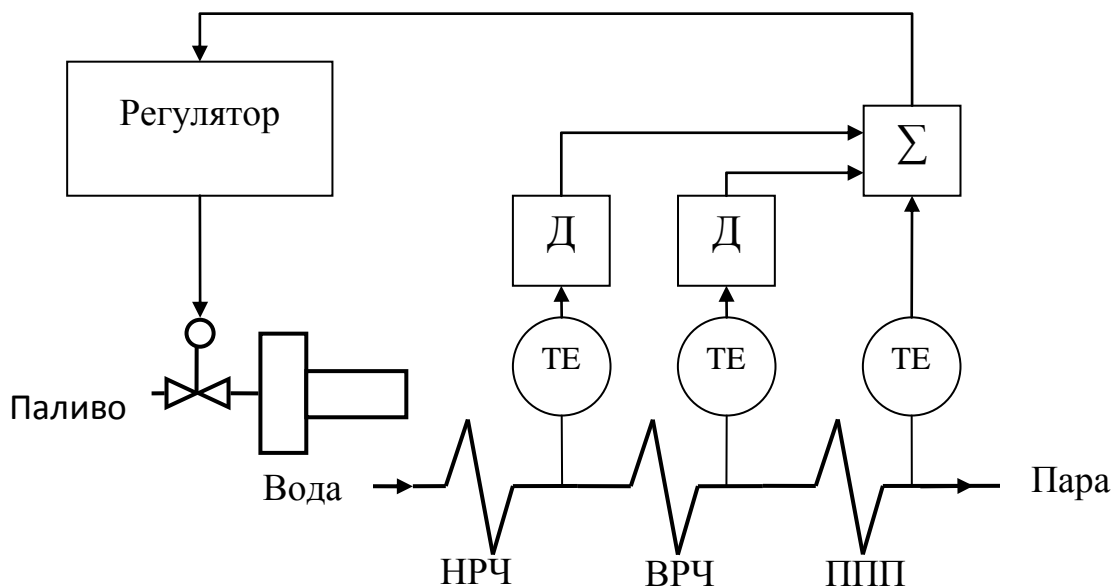


Рис. 3.1. Структурна схема САР температурного режиму

Параметри диференціаторів будемо брати як обернені параметрам ПІ-регулятора, що синтезується для випереджаючої ділянки.

Параметри ПІ-регулятора для ділянки НРЧ розраховані за методом РАФХ на квадратичний критерій якості  $m=0.485$ , що приблизно відповідає коефіцієнту затухання перехідного процесу  $\psi=0.95$ . Об'єктом для розрахунку виступає функція передачі за каналом НРЧ.

Отримані параметри ПІ-регулятора  $K_P=0.39$ ,  $T_i=25.2$ .

З параметрів ПІ-регулятора отримуємо параметри диференціатора:

$$K_D=1/0.39=2.56, T_D=T_i=25.2.$$

Функція передачі диференціатора для ділянки НРЧ має вигляд:

$$W_D^{НРЧ} = \frac{2.56 \cdot 25.2s}{25.2s + 1} = \frac{64.5s}{25.2s + 1} \quad (3.1)$$

Параметри ПІ-регулятора для ділянки ВРЧ розраховані за методом РАФХ на квадратичний критерій якості  $m=0.485$ , що приблизно відповідає коефіцієнту затухання перехідного процесу  $\psi=0.95$ . Об'єктом для розрахунку виступає відношення функції передачі за каналом ВРЧ до функції передачі за каналом НРЧ.

Отримані параметри ПІ-регулятора  $K_P=0.48, T_i=70$ .

З параметрів ПІ-регулятора отримуємо параметри диференціатора:

$$K_D=1/0.48=2.08, T_D=T_i=70.$$

Функція передачі диференціатора для ділянки НРЧ має вигляд:

$$W_D^{ВРЧ} = \frac{2.08 \cdot 70s}{70s + 1} = \frac{145.6s}{70s + 1} \quad (3.2)$$

На рис. 3.2 наведено порівняння реакції об'єкта керування на одиничне ступінчате збурення з урахуванням сигналів від диференціаторів при різних значеннях навантаження.

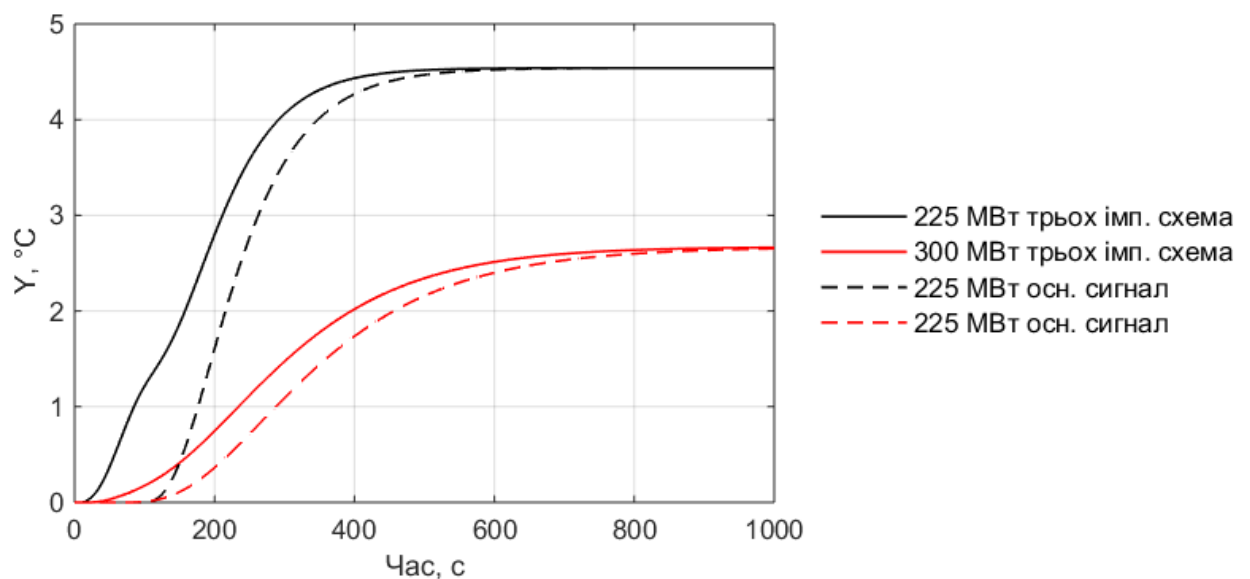


Рис. 3.2. Порівняння перехідних характеристик об'єкта

Структура ПІД-регулятора:



$$W_{\text{ПД}} = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + K_D \frac{T_D s}{T_D s + 1} \right) \quad (3.3)$$

Отримані наступні налаштування для ПД-регулятора:

1. Навантаження 225 МВт:  $K_P=0.23$ ,  $T_i=100$ ,  $K_D=2.2$ ,  $T_D=17$ ;
2. Навантаження 300 МВт:  $K_P=0.67$ ,  $T_i=200$ ,  $K_D=6$ ,  $T_D=12.2$ .

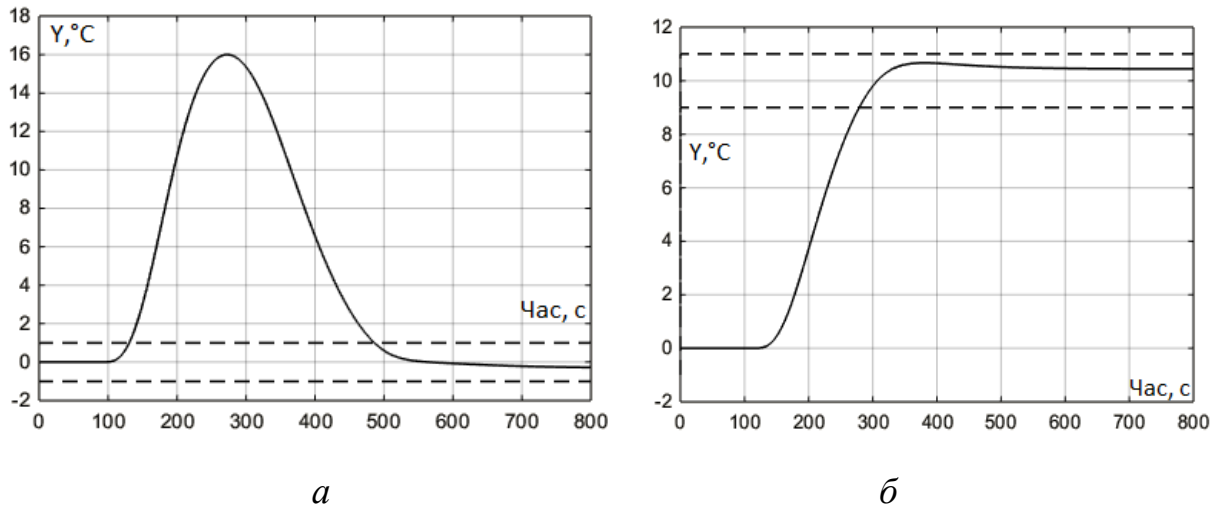


Рис. 3.3. Перехідні процеси при навантаженні 225 МВт:  
а – збурення, б – завдання

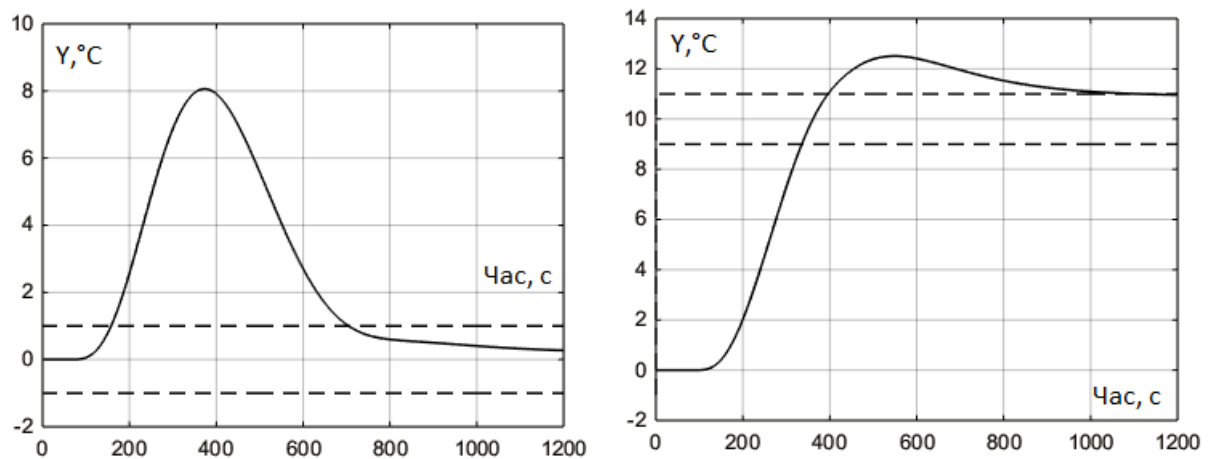


Рис. 3.4. Перехідні процеси при навантаженні 300 МВт:  
а – збурення, б – завдання

За результатами комп'ютерного моделювання контуру температурного режиму пароводяного тракту при різних навантаженнях можна зробити висновок, що класичний ПД-регулятор не забезпечує необхідної якості перехідних процесів в усьому діапазоні режимів роботи котлоагрегату, наявне велике динамічне відхилення при мінімальному навантаженні (більше

14°C при збуренні навантаженням на 10% [90]), присутнє перерегулювання більше 20% при відпрацюванні завдання на номінальному навантаженні.

### 3.2. Опис вхідних і вихідних змінних двоканального нечіткого контролера

Розроблена схема керування, що ґрунтується на експертних знаннях та досвіді операторів-технологів при керуванні інерційними теплоенергетичними об'єктами, а також нова структура алгоритму керування на її основі [91, 92, 93, 94]. Принципова схема керування з двоканальним fuzzy-контролером зображена на рис. 3.5. В даній схемі як вхідні змінні двоканального fuzzy-контролера розглядаються сигнал неузгодженості  $e$  і похідна сигналу неузгодженості за часом  $de/dt$ . Відповідно для кожного з блоків нечіткої логіки необхідно визначити діапазон змін вхідних параметрів і розбити кожен з діапазонів на лінгвістичні терми. При необхідності кількість вхідних сигналів може бути збільшена. Для котлоагрегату ТЕС при регулюванні температури пари по водопаровому тракту актуальним є введення додаткового сигналу за потужністю  $N$ .

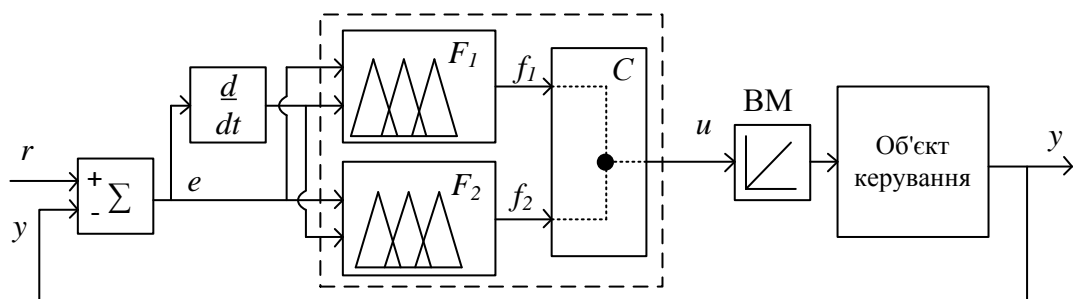


Рис. 3.5. Схема керування з двоканальним контролером

$r$  – завдання (уставка),  $y$  – вихідна величина,  $u$  – сигнал керування,  $f$  – послідовність імпульсів керування,  $e$  – сигнал неузгодженості,  $de/dt$  – похідна сигналу неузгодженості за часом, ВМ – виконавчий механізм

Розглянемо блок формування імпульсів  $F_1$ . Він має два вхідних параметра і один вихідний.

Для вхідного параметру  $e$  задамося діапазоном від -20 °C до +20 °C. Такі межі зумовлені вимогами до точності підтримання температури

перегрітої пари. Для вхідного параметру  $de/dt$  задамося діапазоном від  $-0,3$  °C/с до  $+0,3$  °C/с. Межі швидкості зміни сигналу помилки визначаються динамічними властивостями об'єкту керування та величиною збурень. Даний діапазон отриманий на основі моделей, отриманих в результаті процедури ідентифікації об'єкту керування. Для вхідного параметру  $N$  задамося діапазоном від 75% (225 МВт) від номінальної потужності до 100% (300 МВт).

Вихідним параметром блоку F1 є тривалість імпульсів. Діапазон зміни цього параметру задається на основі експертних знань і досвіду експлуатації конкретного об'єкта керування, або на основі моделі. Від'ємні значення вихідного параметра свідчать про те, що імпульси керування повинні бути від'ємної полярності, щоб виконавчий механізм рухався в протилежному напрямку.

Для вхідного параметру  $e$  визначимо дев'ять лінгвістичних термів з наступними діапазонами:

1. «негативна дуже велика» або HHNE (high-high negative error),  $e_{HHNE} \in [-20, -11]$ ;
2. «негативна велика» або HNE (high negative error),  $e_{HNE} \in [-15, -7]$ ;
3. «негативна середня» або MNE (medium negative error),
4.  $e_{MNE} \in [-10, -3]$ ;
5. «негативна мала» або LNE (low negative error),  $e_{LNE} \in [-5, -1]$ ;
6. «нульова» або ZE (zero error),  $e_{ZE} \in [-1.5, 1.5]$ ;
7. «додатна мала» або LPE (low positive error),  $e_{LPE} \in [1, 5]$ ;
8. «додатна середня» або MPE (medium positive error),  $e_{MPE} \in [3, 10]$ ;
9. «додатна велика» або HPE (high positive error),  $e_{HPE} \in [7, 15]$ ;
10. «додатна дуже велика» або HHPE (high-high positive error),  $e_{HHPE} \in [11, 20]$ .

У відповідності до визначеного діапазону  $[-20^{\circ}\text{C}; +20^{\circ}\text{C}]$  зобразимо ці терми у вигляді функцій належності на рис. 3.6.

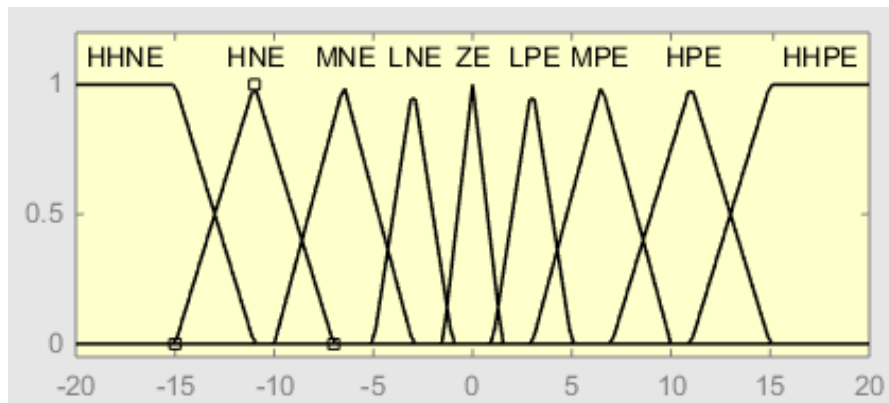


Рис. 3.6. Функції належності вхідного сигналу  $e$

Аналогічним чином визначимо одинадцять лінгвістичних термів для вхідного параметру  $de/dt$ :

1. «негативна велика 225» або HHNDE (high-high negative derivative error),  $e_{\text{HHNDE}} \in [-0.3; -0.1]$ ;
2. «негативна середня 225» або HMNDE (high-medium negative derivative error),  $e_{\text{HMNDE}} \in [-0.2; -0.06]$ ;
3. «негативна велика 300» або HNDE (high negative derivative error),  $e_{\text{HNDE}} \in [-0.08; -0.03]$ ;
4. «негативна середня 300» або MNDE (medium negative derivative error),  $e_{\text{MNDE}} \in [-0.045; -0.015]$ ;
5. «негативна мала 300» або LNDE (low negative derivative error),  $e_{\text{LNDE}} \in [-0.03; 0]$ ;
6. «нульова» або ZDE (zero derivative error),  $e_{\text{ZDE}} \in [-0.01; 0.01]$ ;
7. «додатна мала 300» або LPDE (low positive derivative error),  $e_{\text{LPDE}} \in [0; 0.03]$ ;
8. «додатна середня 300» або MPDE (medium positive derivative error),  $e_{\text{MPDE}} \in [0.015; 0.045]$ ;
9. «додатна велика 300» або HPDE (high positive derivative error),  $e_{\text{HPDE}} \in [0.03; 0.08]$ ;
10. «додатна середня 225» або HMPDE (high-medium positive derivative error),  $e_{\text{HMPDE}} \in [0.06; 0.2]$ ;
11. «додатна велика 225» або HHPDE (high-high positive derivative error),

$$e_{\text{HHPDE}} \in [0.1; 0.3].$$

У відповідності до визначеного діапазону  $[-0,3^{\circ}\text{C}/\text{c}; 0,3^{\circ}\text{C}/\text{c}]$  зобразимо ці терми у вигляді функцій належності на рис. 3.7.

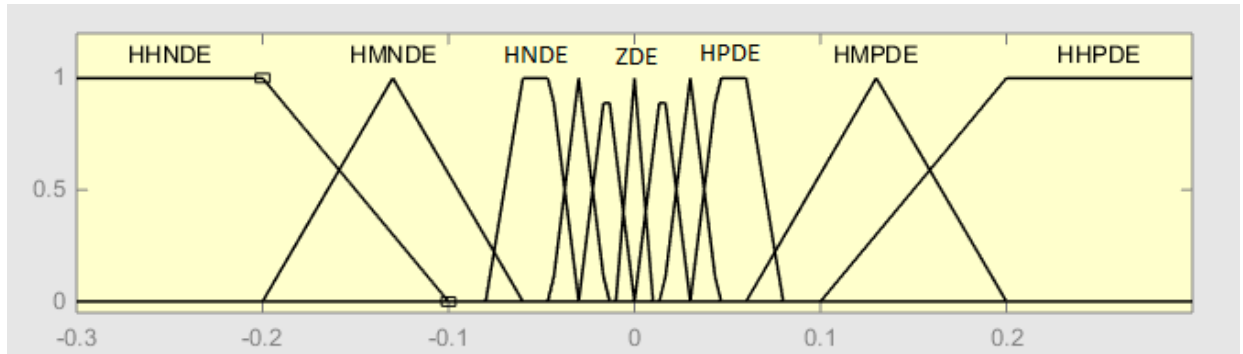


Рис. 3.7. Функції належності вхідного сигналу  $de/dt$

Для врахування поточного режиму роботи (навантаження енергоблоку) додатково введений третій інформаційний сигнал за відсотком навантаження.

Для вхідного параметр  $N$  визначимо два лінгвістичних терми з наступними діапазонами:

1. «мінімальне» або 75P (75 % навантаження),  $N_{75} \in [75, 95]$ ;
2. «максимальне» або 100P (100 % навантаження),  $N_{100} \in [84, 100]$ .

У відповідності до визначеного діапазону  $[75\%; 100\%]$  зобразимо ці терми у вигляді функцій належності на рис. 3.8.

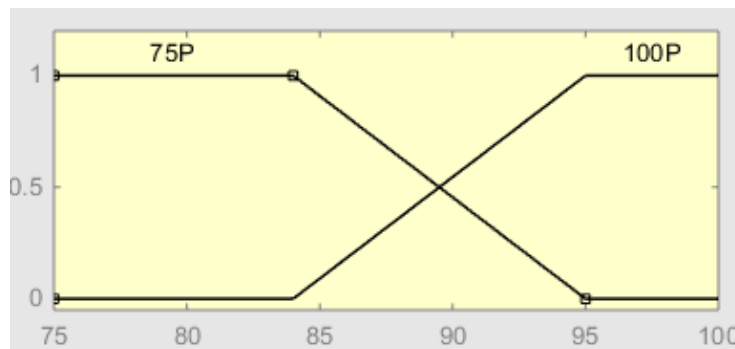


Рис. 3.8. Функції належності вхідного сигналу  $N$

Вище були розглянуті побудови функцій належності для трьох вхідних параметрів блоку F1 – сигналу помилки  $e$ , похідної від сигналу помилки  $de/dt$  і сигналу за потужністю  $N$ . Аналітичні функції належності використовуються на етапі фазифікації. Тепер розглянемо побудову функцій належності для

вихідного параметру блоку F1. Блок F1 є блоком формування імпульсів, тому вихідним параметром буде тривалість імпульсу, що вимірюється в секундах.

Позначимо вихідний сигнал блоку F1 як  $f_1$ . Для вихідного параметра  $f_1$  визначимо дев'ять лінгвістичних термів з наступними діапазонами:

1. «великої тривалості на закриття» або HNI (high negative impulse),  $f_{\text{HNI}} \in [-4.2, -1.75]$ ;
2. «середньої тривалості на закриття» або MNI (medium negative impulse),  $f_{\text{MNI}} \in [-2.8, -0.9]$ ;
3. «малої тривалості на закриття» або LNI (low negative impulse),  $f_{\text{LNI}} \in [-1.75; 0.3]$ ;
4. «дуже малої тривалості на закриття» або LLNI (low-low negative impulse),  $f_{\text{LLNI}} \in [-0.6; -0.2]$ ;
5. «зона нечутливості» або ZI (zero impulse),  $f_{\text{ZI}} \in [-0.3; 0.3]$ ;
6. «дуже малої тривалості на відкриття» або LLPI (low-low positive impulse),  $f_{\text{LLPI}} \in [0.2; 0.6]$ ;
7. «малої тривалості на відкриття» або LPI (low positive impulse),  $f_{\text{LPI}} \in [0.3; 1.75]$ ;
8. «середньої тривалості на відкриття» або MPI (medium positive impulse),  $f_{\text{MPI}} \in [0.9, 2.8]$ ;
9. «великої тривалості на відкриття» або HPI (high positive impulse),  $f_{\text{HPI}} \in [1.75, 4.2]$ ;

У відповідності до визначеного діапазону  $[-4.2 \text{ с}; +4.2 \text{ с}]$  зобразимо ці терми у вигляді функцій належності на рис. 3.9. Нагадаємо, що від'ємні значення вихідного параметра  $f_1$  свідчать про те, що імпульси керування повинні бути від'ємної полярності, щоб виконавчий механізм рухався в протилежному напрямку.

Розглянемо блок формування пауз F2. Він має ідентичні вхідні сигнали, що і блок формування імпульсів F1 – сигнал помилки  $e$ , похідну від сигналу помилки  $de/dt$  і сигнал за потужністю  $N$ . Діапазони сигналів теж ідентичні –

від  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  для  $e$ , від  $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$  до  $+0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$  для  $de/dt$  і від 75% до 100% для  $N$ . Відповідно, лінгвістичні терми сигналів  $e$ ,  $de/dt$  і  $N$  є ідентичними, що і для блоку F1.

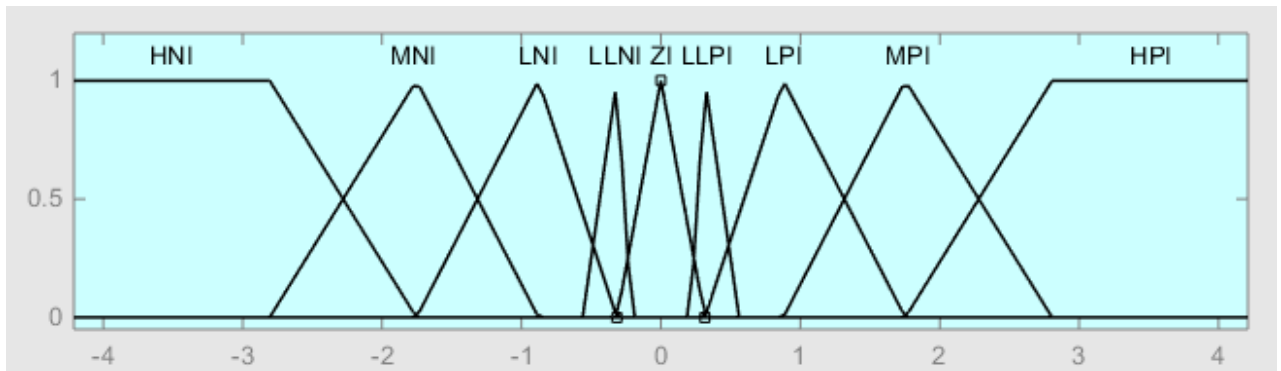


Рис. 3.9. Функції належності вихідного сигналу  $f_1$

Вихідним параметром блоку F2 є тривалість пауз. Діапазон зміни цього параметру задається на основі експертних знань, досвіду експлуатації конкретного об'єкта керування, а також його динамічних характеристик. Для досліджуваного об'єкта мінімальна пауза складає 10 секунд, що визначається мінімальним часом запізнення об'єкта керування при мінімальному навантаженні. Максимальна пауза може бути визначена, як час, через який інерційний параметр набирає найбільшу швидкість зміни. Для об'єкта на максимальному навантаженні ця тривалість складає 210 с.

Позначимо вихідний сигнал блоку F2 як  $f_2$ . Для вихідного параметра  $f_2$  визначимо сім лінгвістичних термів з наступними діапазонами:

1. «мала пауза 225» або LP225 (low pause,  $N=75\%$ ),  $f_{2LP225} \in [10; 25]$ ;
2. «середня пауза 225» або MP225 (medium pause,  $N=75\%$ ),  $f_{2MP225} \in [10; 50]$ ;
3. «дуже мала пауза» або VLP (very low pause),  $f_{2VLP} \in [25; 100]$ ;
4. «мала пауза» або LP (low pause),  $f_{2LP} \in [60; 135]$ ;
5. «середня пауза» або MP (middle pause),  $f_{2MP} \in [100; 175]$ ;
6. «велика пауза» або HP (high pause),  $f_{2HP} \in [135; 210]$ ;
7. «дуже велика пауза» або VHP (very high pause),  $f_{2VHP} \in [175; 210]$ .

У відповідності до визначеного діапазону [10 с; 210 с] зобразимо ці терми у вигляді функцій належності на рис. 3.10.

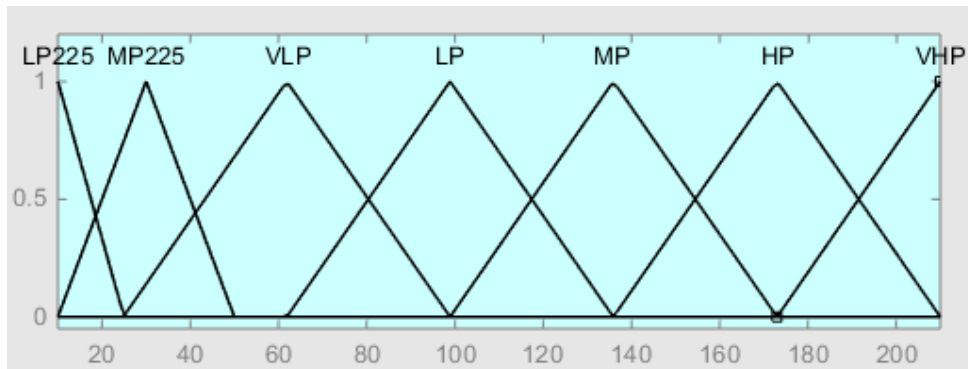


Рис. 3.10. Функції належності вихідного сигналу  $f_2$

### 3.3. Розробка бази правил нечіткої логіки

#### 3.2.1. Визначення бази правил для каналу формування імпульсів

Маючи лінгвістичні терми всіх параметрів і їх функцій належності можна скласти базу правил блоку нечіткої логіки. База правил для блоку F1 подана нижче у вигляді табл. 3.1. База правил для блоку F1 при навантаженні  $N=75\%$  наведена в додатку А.

Таблиця 3.1  
База правил блоку нечіткої логіки F1 для навантаження  $N=100\%$

		Сигнал помилки $e$								
		HHNE	HNE	MNE	LNE	ZE	LPE	MP	HPE	HHPE
Швидкість зміни помилки $de/dt$	HHNDE	HNI	MNI	MNI	HNI	ZI	LNI	LNI	MNI	LNI
	HMNDE	HNI	MNI	MNI	HNI	ZI	LNI	LNI	MNI	LNI
	HNDE	HNI	MNI	MNI	HNI	ZI	LNI	LNI	MNI	LNI
	MNDE	HNI	MNI	LNI	LNI	LLNI	LLNI	LLNI	ZI	ZI
	LNDE	LNI	LNI	ZI	LLNI	ZI	ZI	ZI	ZI	ZI
	ZDE	LNI	LNI	LLNI	LLNI	ZI	LLPI	LLPI	LPI	LPI
	LPDE	ZI	ZI	ZI	ZI	ZI	LLPI	ZI	LPI	LPI
	MPDE	ZI	ZI	LLPI	LLPI	LLPI	LPI	LPI	MPI	HPI
	HPDE	LPI	MPI	LPI	LPI	ZI	HPI	MPI	MPI	HPI
	HMPDE	LPI	MPI	LPI	LPI	ZI	HPI	MPI	MPI	HPI
HHPDE	LPI	MPI	LPI	LPI	ZI	HPI	MPI	MPI	HPI	

На основі дев'яти лінгвістичних термів сигналу  $e$  і одинадцяти лінгвістичних термів сигналу  $de/dt$  сформовано 99 логічних правил.



Обчислені значення істинності для передумов кожного правила застосовуються до рішень (висновків) кожного правила. Як правила логічного висновку зазвичай використовуються тільки операції  $\min$  (мінімуму) або  $\text{prod}$  (множення). В логічному висновку  $\min$  функція належності висновку "відсікається" по висоті, що відповідає обчисленому ступіню істинності передумови правила (нечітка логіка "І"). В логічному висновку  $\text{prod}$  функції належності висновку масштабуються обчисленими величинами добутків ступеней істинності передумов кожного правила.

Отримані нечіткі підмножини ("урізані по висоті" функції належності) об'єднуються разом для формування однієї нечіткої підмножини (результуючої функції належності) для змінної висновку (рішення). Для об'єднання зазвичай використовуються операції  $\max$  (максимум) або  $\text{sum}$  (сума). При композиції  $\max$  результуюча нечітка підмножина конструюється як поточковий максимум за всіма отриманими нечіткими підмножинами (нечітка логіка "АБО"). При композиції  $\text{sum}$  результуюча нечітка підмножина конструюється як поточкова сума за всіма отриманими нечіткими підмножинами [100].

Найбільш розповсюдженим для логічних висновків є "мінімакський" метод (MAX-MIN Inferenz), зображений на рис. 3.11. 1, 2 – функції належності 1-го і 2-го правила, 3 – результуюча функція належності бази правил.

Обидві операції ( $\min$  при логічному висновку і  $\max$  при композиції "урізаних" функцій належності) сумісно проводять для результуючої функції належності, яка може бути описана наступною залежністю:

$$\mu_c(q) = \max_{k=1, \dots, n} [\min_{i=1, \dots, m} [\mu_k(q_i)], \mu_k(q_c)] \quad (3.4)$$

де  $n$  – число правил,  $m$  – число вхідних параметрів,  $\mu_k(q_i)$  – величина істинності для передумови  $i$ -го параметра в  $k$ -му правилі,  $\mu_k(q_c)$  – функція належності для вихідного параметра  $q_c$   $k$ -го правила,  $\mu_c(q)$  – результуюча функція належності.

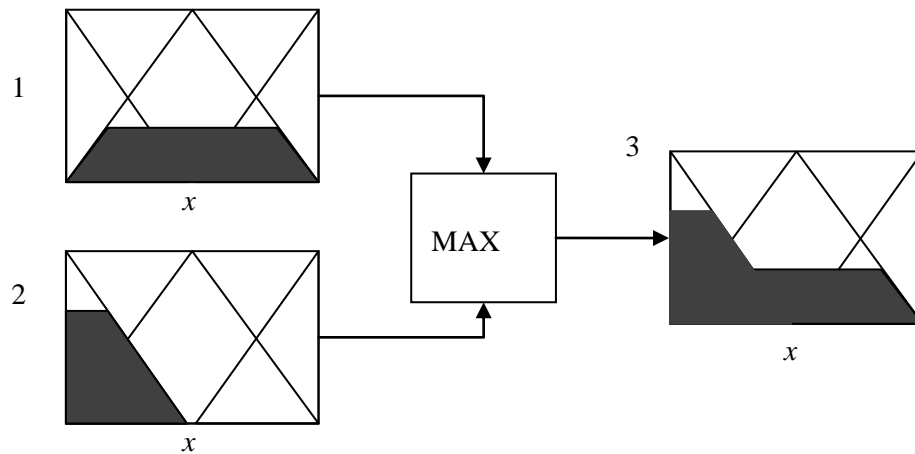


Рис. 3.11. Визначення результуючої функції належності "мінімаксім" методом

Методи логічних висновків і композицій за нечіткою логікою забезпечують для заданих в часі величин вхідних змінних як вихідну інформацію бази правил функцію належності за рівнянням (3.4), тобто нечітку вихідну величину. Застосовуючи це для нечіткого контролера виникає безвідмовна необхідність цю нечітку інформацію перетворити в задовільну числову величину, так як виконавчий орган механізму керування не придатний до обробки функцій належності. Для визначення числової величини на виході блока нечіткої логіки, яку як найкраще характеризує отримана функція належності, проводиться процедура дефазифікації, тобто перетворення лінгвістичної величини в числову [75].

Як і для логічних висновків, для дефазифікації існують різноманітні методи. Широкого використання набув метод "центра ваги" (Centre of Gravity) площини  $S$  результуючої фігури, що лежить під графіком результуючої функції належності. Загальне правило розрахунку абсциси центра тяжіння  $s_c = S(q_c, \mu_c)$  ділянки площини, що покривається результуючою функцією  $\mu_c(q)$  в межах зміни параметра  $q \in [Q_1, Q_2]$ , визначається формулою:

$$q_c = \frac{\int_{Q_1}^{Q_2} q \mu_c(q) dq}{\int_{Q_1}^{Q_2} \mu_c(q) dq} \quad (3.5)$$

де  $q_c$  – результат дефазифікації.

Якщо параметра  $q$  визначений на універсальній множині  $q \in [0,1]$ , то формула (3.5) прийме вигляд:

$$q_c = \frac{\int_0^1 q\mu_c(q) dq}{\int_0^1 \mu_c(q) dq} \quad (3.6)$$

При надходженні на блок нечіткої логіки F1 в деякий момент часу значень вхідних змінних  $e$ ,  $de/dt$  відбувається перерахунок вхідних змінних в змінні  $q_1$ ,  $q_2$  на універсальній множині  $Q=[0,1]$  і розрахунок значень функцій належності для цих змінних.

### 3.2.2. Визначення бази правил для каналу формування пауз

Маючи лінгвістичні терми всіх параметрів і їх функцій належності можна скласти базу правил блоку нечіткої логіки. База правил для блоку F2 подана нижче у вигляді табл. Таблиця 3.2. База правил для блоку F2 при навантаженні  $N=75\%$  наведена в додатку А.

Таблиця 3.2

База правил блоку нечіткої логіки F2 для навантаження  $N=100\%$

		Сигнал $e$								
		HHNE	HNE	MNE	LNE	ZE	LPE	MP	HPE	HHPE
Сиг- нал $de/dt$	HHNDE	VHP	VHP	HP	VLP	LP225	VHP	VHP	HP	HP
	HMNDE	VHP	VHP	MP	VLP	LP225	VHP	VHP	HP	HP
	HNDE	VHP	VHP	MP	VLP	LP225	VHP	VHP	HP	HP
	MNDE	HP	HP	MP	MP225	LP225	VHP	MP	HP	HP
	LNDE	HP	LP225	HP	VLP	LP225	HP	MP	LP225	HP
	ZDE	HP	HP	MP	MP	LP225	MP	MP	HP	HP
	LPDE	HP	LP225	MP	HP	LP225	VLP	HP	LP225	HP
	MPDE	HP	HP	MP	VHP	LP225	MP225	MP	HP	HP
	HPDE	HP	HP	VHP	VHP	LP225	VLP	MP	VHP	VHP
	HMPDE	HP	HP	VHP	VHP	LP225	VLP	MP	VHP	VHP
HHPEDE	HP	HP	VHP	VHP	LP225	VLP	HP	VHP	VHP	

Результуюча функція належності визначається за мінімакним методом і обраховується за формулою (3.4).

Для процедури дефазифікації використаємо вже знайомий метод "центра ваги". Загальне правило розрахунку абсциси центра тяжіння результуючої фігури визначається формулами (3.5) або (3.6).

### **3.4. Комп'ютерне моделювання запропонованої схеми на прикладі локальної системи керування котлоагрегатом**

#### **3.4.1. Синтез двоканального нечіткого контролера в MATLAB**

Вище описувалася загальна процедура визначення вихідної величини контролера на базі нечіткої логіки. Описаний алгоритм носить назву алгоритму Мамдані [86, 95, 100]. Алгоритм Мамдані і багато інших алгоритмів нечіткого виводу вже реалізовані в різноманітних програмних продуктах, наприклад Fuzzy Logic Toolbox, що є розширенням для MatLab, або fuzzyTECH. Зокрема пакет Fuzzy Logic Toolbox дозволяє будувати нечіткі системи двох типів – Мамдані та Сугено. В системах типу Мамдані база знань складається з правил виду "Якщо  $x_1$  = низький І  $x_2$  = середній, то  $y$  = високий". В системах типу Сугено база знань складається з правил виду "Якщо  $x_1$  = низький І  $x_2$  = середній, то  $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$ ". Таким чином, основна відмінність між системами Мамдані та Сугено полягає в різних способах задання значень вихідних змінних в правилах, що утворюють базу знань. в системах типу Мамдані значення вихідної змінної задаються нечіткими термами, в системах типу Сугено – як лінійна комбінація вхідних змінних [96].

Fuzzy Logic Toolbox – це пакет прикладних програм, що входять до складу середовища MatLab. Він дозволяє створювати системи нечіткого логічного висновку і нечіткої класифікації в рамках середовища MatLab, з можливістю їх інтегрування в Simulink [97]. Базовим поняттям Fuzzy Logic Toolbox є FIS-структура – система нечіткого виводу (Fuzzy Inference System). FIS-структура містить всі необхідні дані для реалізації функціонального

відображення "входи-виходи" на основі нечіткого логічного висновку згідно зі схемою, наведеною на рис. 3.12.

FIS-редактор призначений для створення, збереження, завантаження і виведення на друк систем нечіткого логічного висновку, а також для редагування наступних властивостей:

- тип системи;
- найменування системи;
- кількість вхідних і вихідних змінних;
- найменування вхідних і вихідних змінних;
- параметри нечіткого логічного висновку.

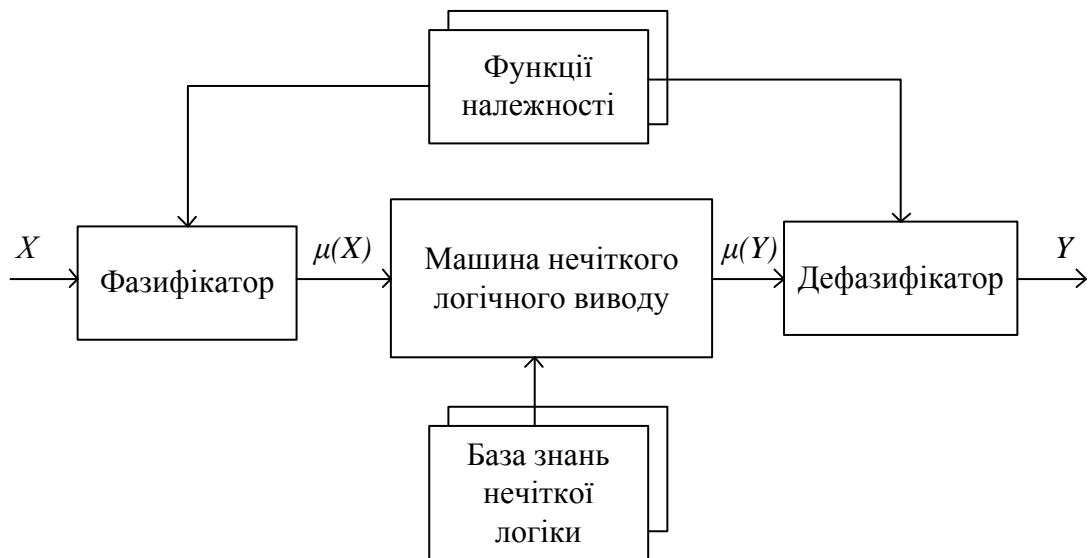


Рис. 3.12. Структура нечіткого логічного виводу в пакеті Fuzzy Logic Toolbox

Розглянемо основні етапи проектування системи типу Мамдані в пакеті Fuzzy Logic Toolbox на прикладі створення системи регулювання температури пари в проміжній точці прямооточного котлоагрегату з використанням двоканального нечіткого контролера.

Для завантаження основного FIS-редактора необхідно в командний рядок ввести команду `fuzzy`, після чого відкриється нове графічне вікно редактора. Для реалізації двоканального нечіткого контролера необхідно створити два FIS-редактора – для каналу формування імпульсів і для каналу

формування пауз. FIS-редактори блоків імпульсів і пауз зображені відповідно на рис. 3.13 і рис. 3.14.

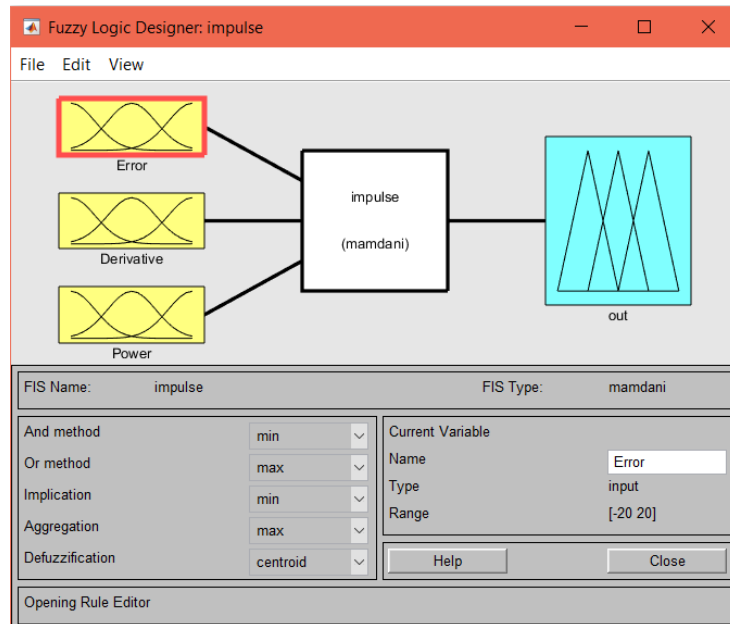


Рис. 3.13. Вікно FIS-редактора блоку імпульсів

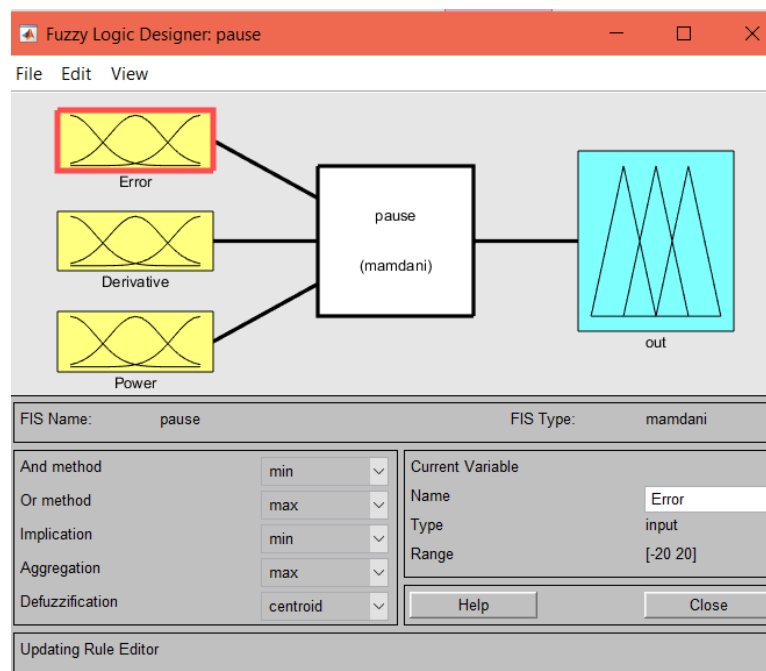


Рис. 3.14. Вікно FIS-редактора блоку пауз

Структура цих блоків є однаковою, при чому абсолютно однаковими є і вхідні змінні – сигнал неузгодженості  $e$  (Error) і похідна від сигналу неузгодженості  $de/dt$  (Derivative). Це відповідає структурі, що наведена на рис. 3.5. Відмінними в цих блоках є бази правил, якісне визначення лінгвістичних величин вихідних змінних і відповідно їх функції належності.

Базу правил FIS-блоку імпульсів сформуємо на основі табл. 3.1. База знань в редакторі RuleEditor FIS-блоку імпульсів наведена на рис. 3.15.

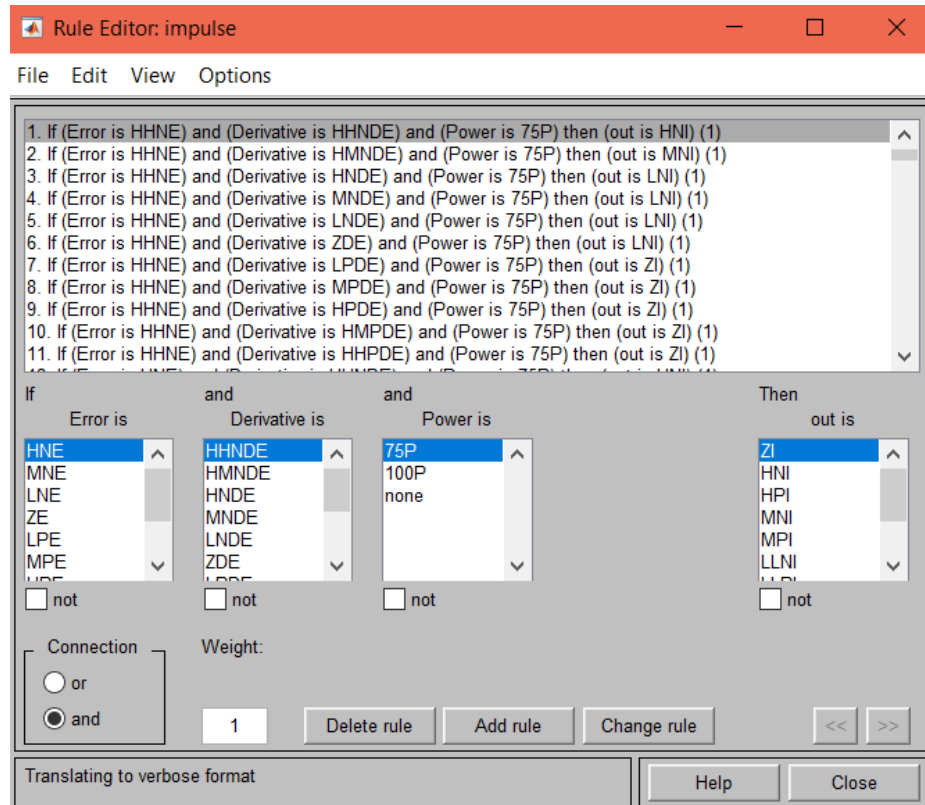


Рис. 3.15. База знань FIS-блоку імпульсів

На рис. 3.16 наведені поверхні "вхід-вихід", що відповідає FIS-блоку імпульсів. Фактично ця поверхня є статичною характеристикою нечіткого контролера. За допомогою поверхні в тривимірному просторі, на відміну від таблиці, краще виражено характер роботи такого нелінійного елемента, як блок з нечітким логічним виводом.

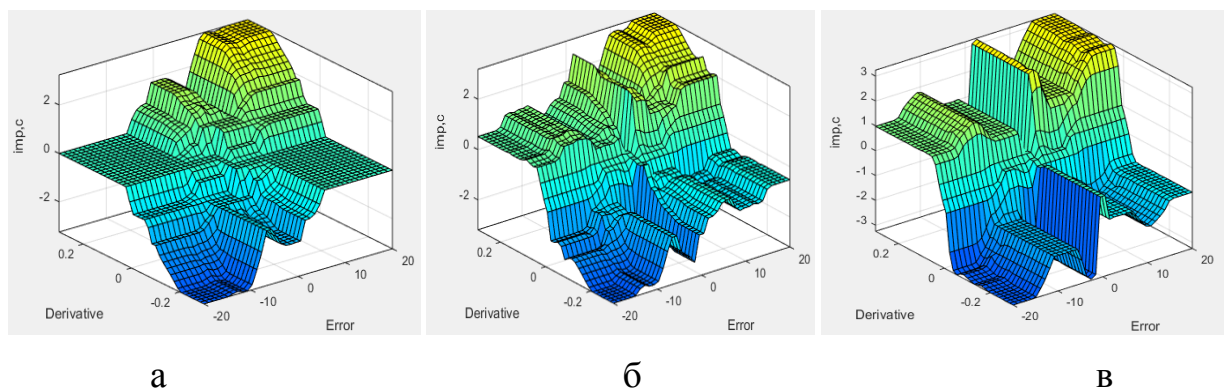


Рис. 3.16. Поверхня "вхід-вихід" FIS-блоку імпульсів:

а –  $N=225\text{MBT}$ , б –  $N=265\text{MBT}$ , в –  $N=300\text{MBT}$

Базу правил FIS-блоку пауз сформуємо на основі табл. 3.2. База знань в редакторі RuleEditor FIS-блоку пауз наведена на рис. 3.17.

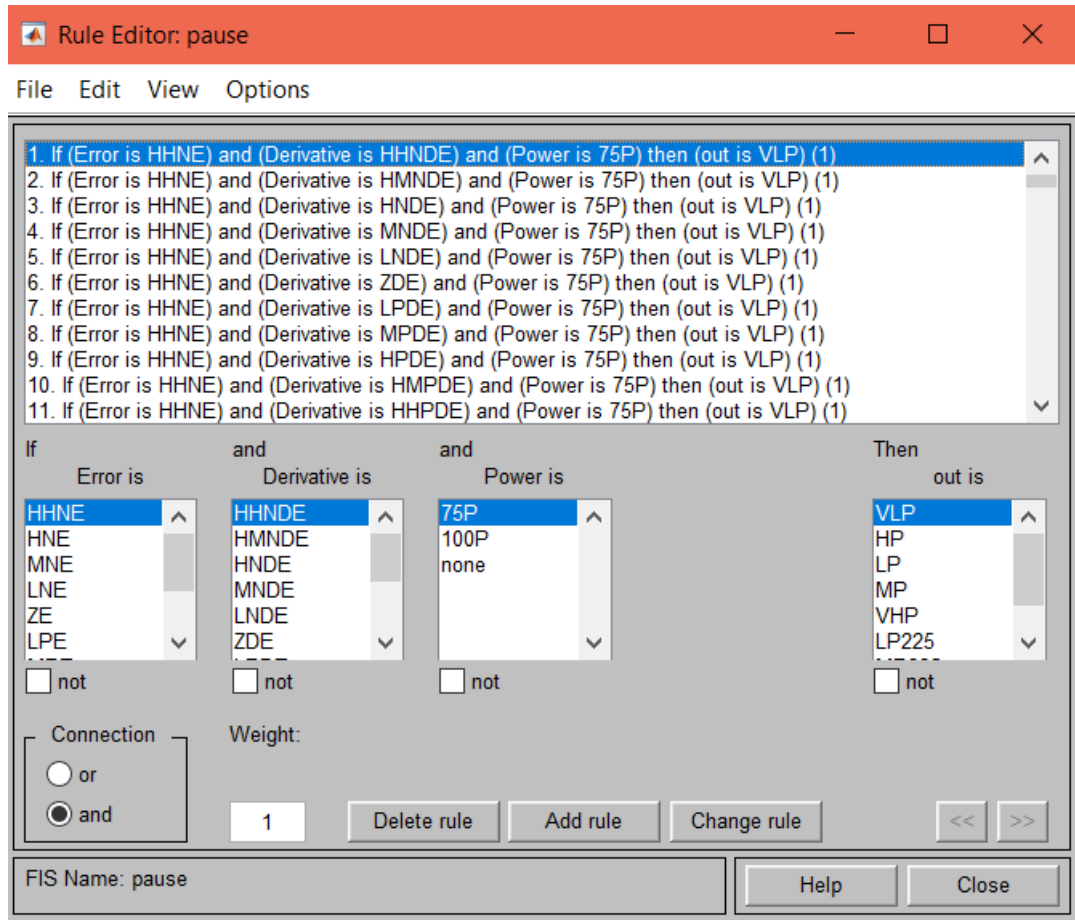


Рис. 3.17. База знань FIS-блоку пауз

На рис. 3.18 наведені поверхні "вхід-вихід", що відповідає FIS-блоку пауз. Ця поверхня фактично є статичною характеристикою нечіткого контролера.

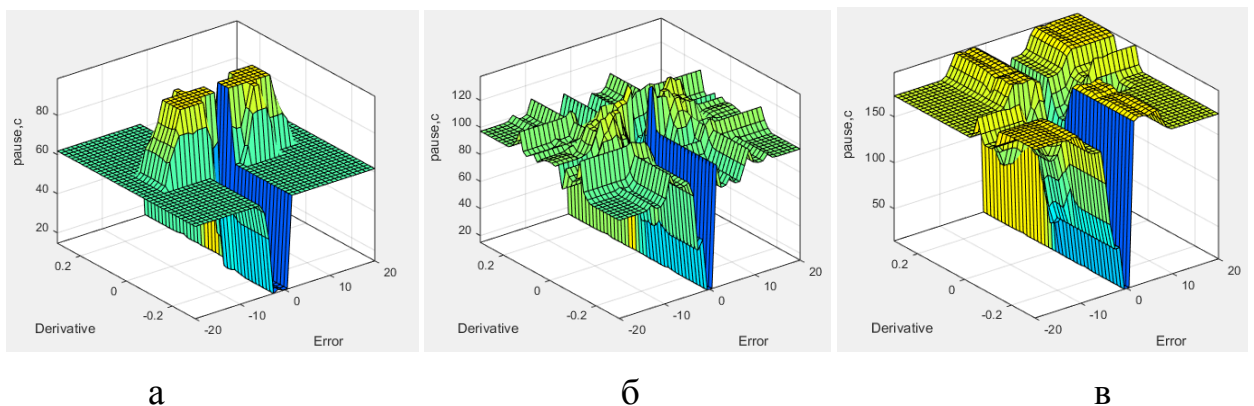


Рис. 3.18. Поверхня "вхід-вихід" FIS-блоку пауз:

а –  $N=225\text{MBт}$ , б –  $N=265\text{MBт}$ , в –  $N=300\text{MBт}$



### 3.4.2. Моделювання замкненої системи в Simulink

Принципова структурна схема керування з двоканальним контролером наведена на рис. 3.5. В середовищі MatLab Simulink реалізована дана схема (рис. 3.19), а також алгоритм роботи двоканального нечіткого контролера, що описаний в розділі 2.

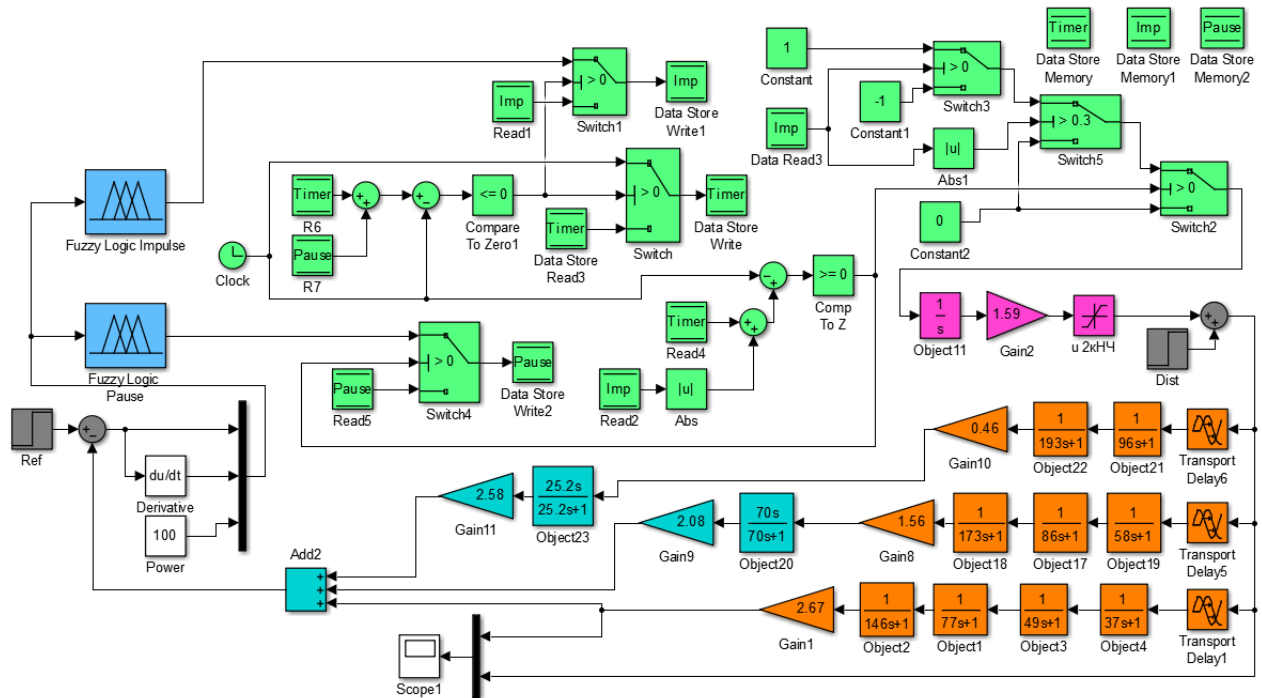


Рис. 3.19. Схема моделювання в Simulink

*Порівняння з ПІД-регулятором*

Функція передачі ПІД-регулятора для навантаження 300 МВт:

$$W_{\text{ПІД}}^{300} = 0.67 \left( 1 + \frac{1}{200s} + \frac{73.2s}{12.2s + 1} \right) \quad (3.7)$$

Функція передачі ПІД-регулятора для навантаження 225 МВт:

$$W_{\text{ПІД}}^{225} = 0.23 \left( 1 + \frac{1}{100s} + \frac{34.7s}{17s + 1} \right) \quad (3.8)$$

Зона нечутливості регулятора  $\pm 1^\circ\text{C}$ , період слідування імпульсів ШИМ – 20 с, мінімальна тривалість включення ВМ – 0.3 с.

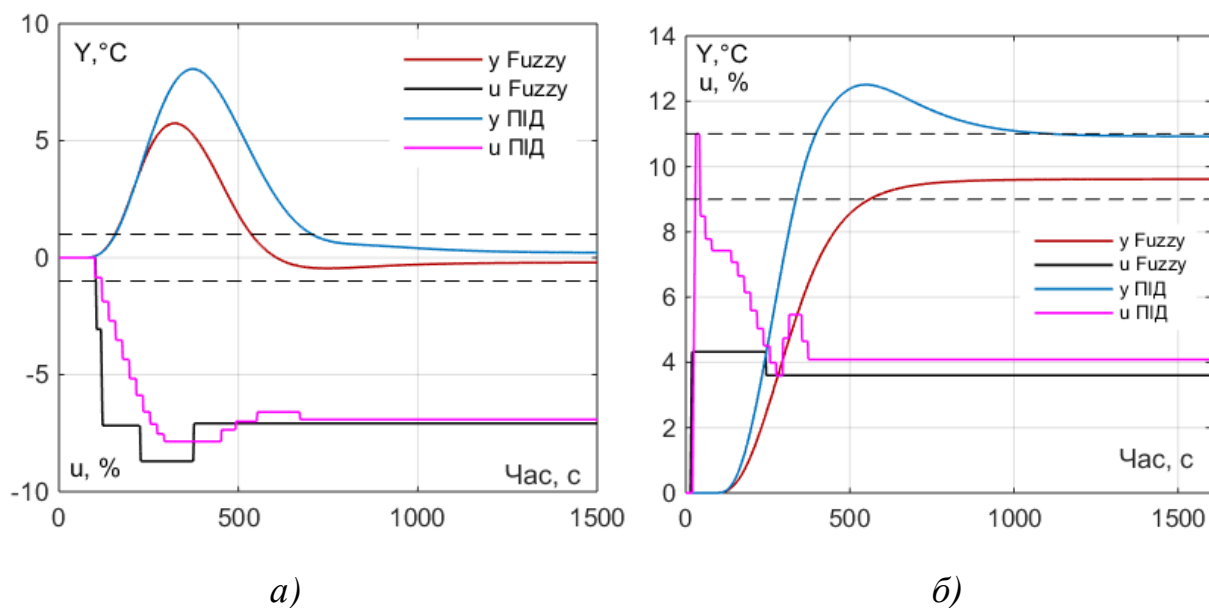


Рис. 3.20. Порівняння з ПІД (300 МВт):  
а – за збуренням, б – за завданням

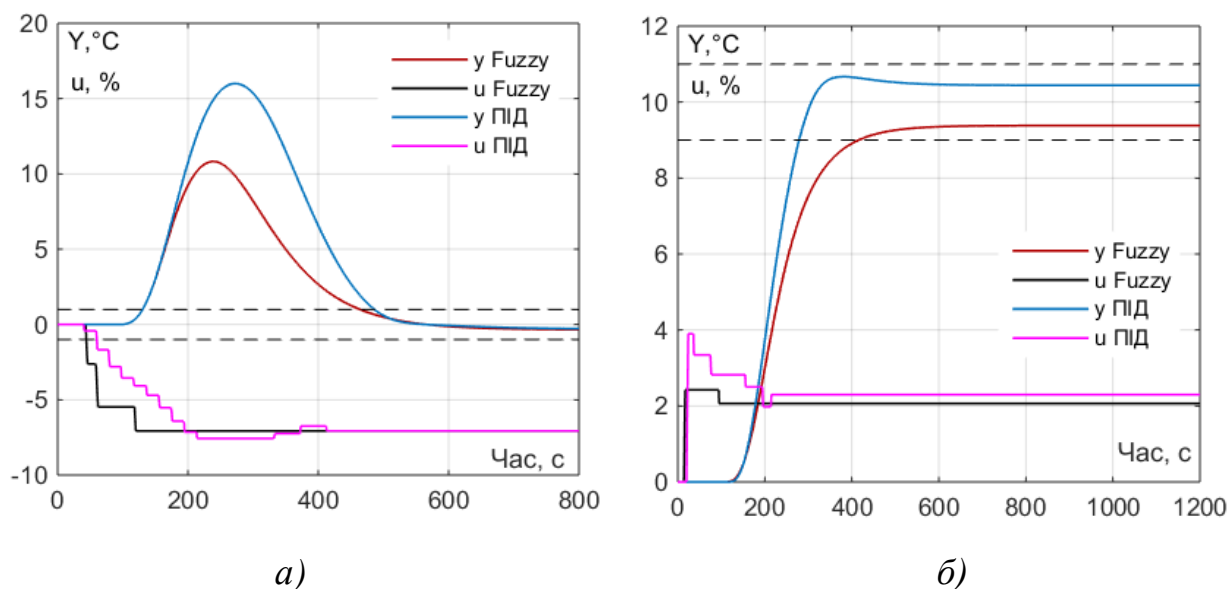


Рис. 3.21. Порівняння з ПІД (225 МВт):  
а – за збуренням, б – за завданням

Таблиця 3.3

Показники якості в порівнянні з ПІД-регулятором

Показник якості	300 МВт				225 МВт			
	Завдання		Збурення		Завдання		Збурення	
	2кНЧ	ПІД	2кНЧ	ПІД	2кНЧ	ПІД	2кНЧ	ПІД
Динам. похиб., °С	0	2.5	5.8	8.1	0	0	10.8	16
Час рег., с	560	1115	536	705	416	280	464	486
Кількість включень ВМ	2	16	4	15	2	6	3	13
ІАЕ	2326	2248	1092	2089	1273	1164	1797	3187
Перерегулювання, %	0	25	0	0	0	0	0	0

Порівняння з динамічним коректором (ПІ-К)

Функція передачі ПІ-регулятора для навантаження 300 МВт:

$$W_{III} = 0.6 \left( 1 + \frac{1}{253s} \right) \quad (3.9)$$

Функція передачі коректора для навантаження 300 МВт:

$$W_K = \frac{0.2}{(80s+1)^2} \quad (3.10)$$

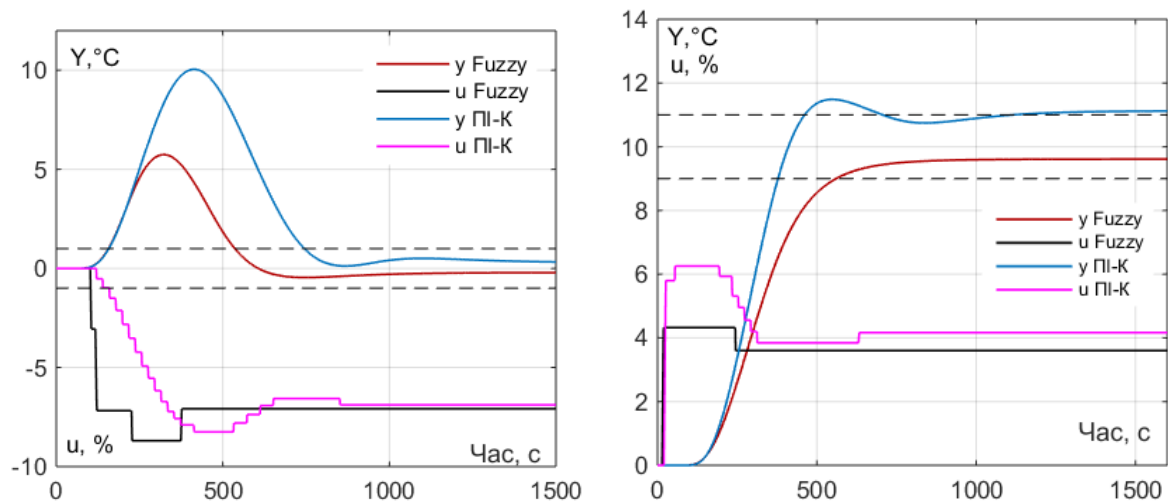
Функція передачі ПІ-регулятора для навантаження 225 МВт:

$$W_{III} = 0.45 \left( 1 + \frac{1}{150s} \right) \quad (3.11)$$

Функція передачі коректора для навантаження 225 МВт:

$$W_K = \frac{0.3}{(30s+1)^2} \quad (3.12)$$

Зона нечутливості регулятора  $\pm 1^\circ\text{C}$ , період слідування імпульсів ШИМ – 20 с, мінімальна тривалість включення ВМ – 0.3 с.



а)

б)

Рис. 3.22. Порівняння з ПІ-К (300 МВт):  
а – за збуренням, б – за завданням

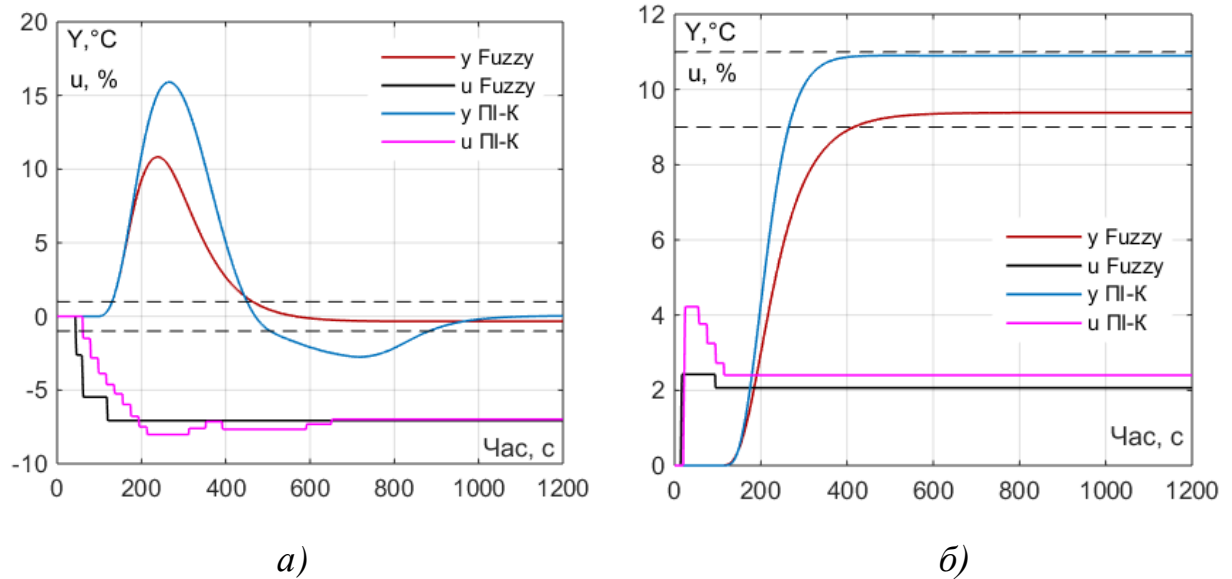


Рис. 3.23. Порівняння з ПІ-К (225 МВт):  
а – за збуренням, б – за завданням

Таблиця 3.4

Показники якості в порівнянні з ПІ-К

Показник якості	300 МВт				225 МВт			
	Завдання		Збурення		Завдання		Збурення	
	2кНЧ	ПІ-К	2кНЧ	ПІ-К	2кНЧ	ПІ-К	2кНЧ	ПІ-К
Динам. похиб., °С	0	1.5	5.8	10.0	0	0	10.8	15.9
Час рег., с	560	1114	536	745	416	264	464	882
Кількість включень ВМ	2	9	4	20	2	5	3	14
ІАЕ	2326	2146	1092	3006	1273	1162	1797	3614
Перерегулювання, %	0	15	0	0	0	0	0	17

*Порівняння з ІМС*

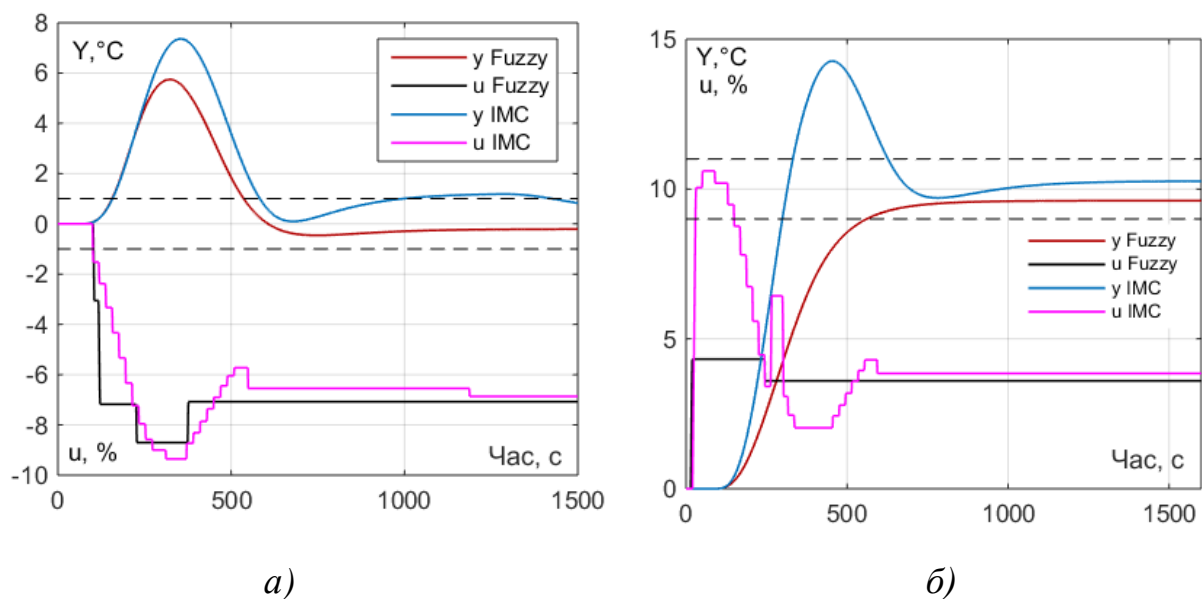
Функція передачі регулятора для навантаження 300 МВт:

$$W_c^{300} = \frac{(160s + 1)(80s + 1)}{2.67s(15^2 s + 2 \cdot 15 + 60)} \quad (3.13)$$

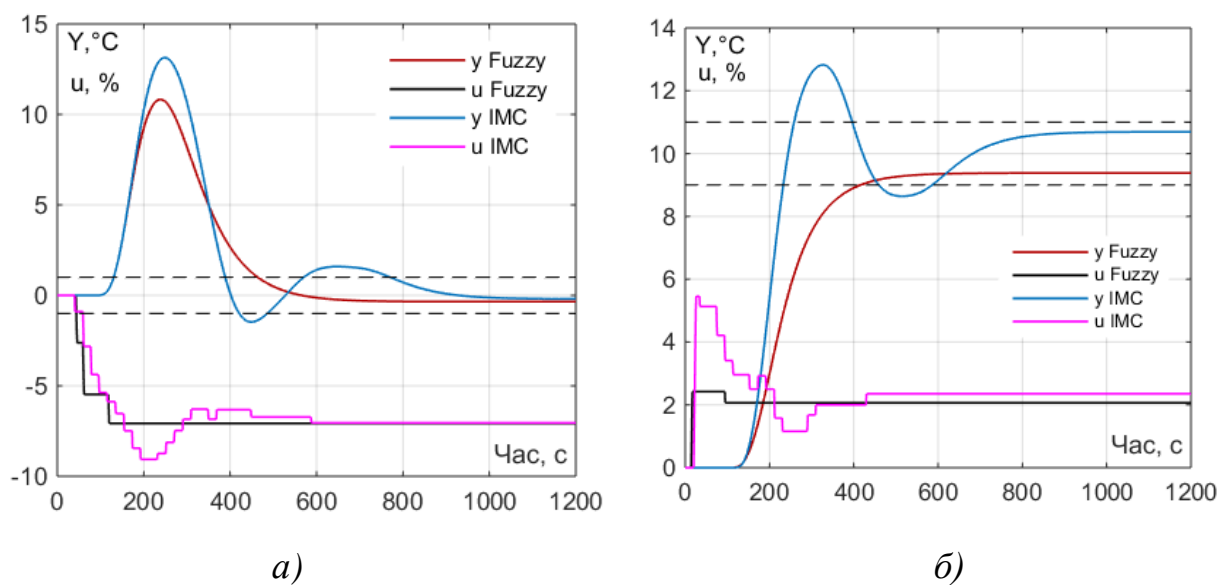
Функція передачі регулятора для навантаження 225 МВт:

$$W_c^{225} = \frac{(90s + 1)(45s + 1)}{4.54s(22^2 s + 2 \cdot 22 + 20)} \quad (3.14)$$

Зона нечутливості регулятора  $\pm 1^\circ\text{C}$ , період слідування імпульсів ШИМ – 20 с, мінімальна тривалість включення ВМ – 0.3 с.



а) б)  
Рис. 3.24. Порівняння з ІМС (300 МВт):  
а – за збуренням, б – за завданням



а) б)  
Рис. 3.25. Порівняння з ІМС (225 МВт):  
а – за збуренням, б – за завданням

Таблиця 3.5

Показники якості в порівнянні з ІМС

Показник якості	300 МВт				225 МВт			
	Завдання		Збурення		Завдання		Збурення	
	2кНЧ	ІМС	2кНЧ	ІМС	2кНЧ	ІМС	2кНЧ	ІМС
Динам. похиб., $^\circ\text{C}$	0	4.2	5.8	7.4	0	2.8	10.8	13.1
Час рег., с	560	625	536	1425	416	586	464	770
Кількість включень ВМ	2	21	4	21	2	13	3	18
ІАЕ	2326	2188	1092	1623	1273	1182	1797	2152
Перерегулювання, %	0	42	0	0	0	28	0	11.2

### **3.5. Методика оцінки стійкості замкненої системи з двоканальним нечітким контролером**

Забезпечення стійкості систем зі зворотним зв'язком є фундаментальною проблемою техніки керування. Тільки стійка система дозволяє досягати поставлену мету керування, наприклад, швидке реагування на довільні збурення або швидке досягнення заданого сталого стану об'єкта. Ці вимоги в рівній мірі відносяться і до систем з fuzzy-контролерами.

При застосуванні систем fuzzy-керування, особливо на об'єктах, що вимагають підвищеної безпеки і стійкої роботи, необхідна ретельна оцінка стійкості і безпечної роботи об'єкта керування. Таким чином дослідження і забезпечення стійкості систем fuzzy-керування є обов'язковою задачею. Звичайно, базою для перевірки стійкості системи є наявність достатньо точних математичних моделей замкненого контуру, особливо це стосується об'єкта керування.

Одним з головних мотивів застосування fuzzy-керування, як зазначалося раніше, є автоматизація процесів, які погано піддаються математичному опису, але тим не менш успішно керуються досвідченими операторами. Якщо ж все-таки вдається процес, що розглядається, задовільно описати математично, то аналіз стійкості системи бажано проводити відомими методами, що розроблені для дослідження нелінійних систем.

Для нечітких регуляторів загальноприйнятих, універсальних методів перевірки стійкості на сьогоднішній день не існує, але є спроби адаптації класичних аналітичних підходів. У табл. 3.6 наведено порівняльний аналіз застосовності аналітичних методів дослідження стійкості для нечітких систем управління.

Основна складність аналітичного дослідження стійкості нечітких регуляторів полягає в їх суттєвій нелінійності, неможливості лінеаризації. У тому випадку, якщо математична модель об'єкта управління відсутня, говорити про проведення теоретичного дослідження системи управління взагалі немає сенсу.

Таблиця 3.6

## Аналіз методів оцінки стійкості нелінійних систем керування

Суть методу	Переваги	Недоліки
<i>Перший метод Ляпунова</i>		
Проводиться аналіз лінеаризованих рівнянь системи	Має застосування для систем будь-якої структури	Дає лише необхідні умови стійкості
		Система повинна містити тільки такі нелінійності, що лінеаризуються
<i>Другий (прямий) метод Ляпунова</i>		
Зводить задачу дослідження стійкості системи до дослідження функції Ляпунова	Універсальність	Дає лише достатню умову стійкості
	Дозволяє визначити область стійкості відносно початкових умов	Складність вибору функцій Ляпунова
		Громіздкість викладок
<i>Метод гармонічної лінеаризації (гармонічного балансу)</i>		
Розрахунок проводиться за декількома першими гармоніками сигналів, які діють в системі	Простота, наочність	Не є ні необхідним, ні достатнім
		Застосовується для нелінійних систем спеціального виду
		Необхідне виконання гіпотези фільтру
<i>Метод Попова (для неперервних систем) Геометричний критерій стійкості, критерій Ципкіна (для дискретних систем)</i>		
Дозволяє визначити сектор, при знаходженні в якому характеристики статичного нелінійного елемента система буде сітка в цілому (абсолютна стійкість)	Простота, наочність	Дає лише достатню умову стійкості
		Застосовується для нелінійних систем спеціального виду

Розглянуті методи аналізу нечітких систем управління мають істотні недоліки, в більшості своїй не дають суворого обґрунтування стійкості, а скоріше забезпечують можливість перевірки працездатності, коли точно відомий вид збурювальних і вхідних впливів на систему, вид початкових умов і т.д. [98].

У разі непридатності аналітичних методик можливим рішенням може стати застосування емпіричних, експериментальних підходів. Їх основна ідея полягає в необхідності синтезу і подальшого комп'ютерного аналізу нечітких моделей об'єкта управління і регулятора. Застосування сучасної обчислювальної техніки, програмних пакетів моделювання, таких як

MATLAB, дозволяє вести всебічний аналіз складних багатовимірних систем, незалежно від числа сигналів, що на них впливають.

Недоліком емпіричних методів є істотна складність або неможливість узагальнення отриманих на їх основі результатів. Вони просто підтверджують стійкість системи для конкретних умов, які розглядаються в ході моделювання [98].

Пошук методів, що дозволяють проводити дослідження стійкості систем управління на основі апарату нечіткої логіки, ведеться давно, але більшість способів є адаптацією методів дослідження стійкості з класичної теорії управління.

Для схеми з двоканальним нечітким контролером (рис. 3.26) пропонується застосувати добре відомі методи оцінки стійкості з лінійної теорії автоматичного керування. Для цього необхідно розглянути вихідний сигнал, який формується завдяки послідовному з'єднанню двоканального нечіткого контролера та інтегрувальної ланки (рис. 3.27).

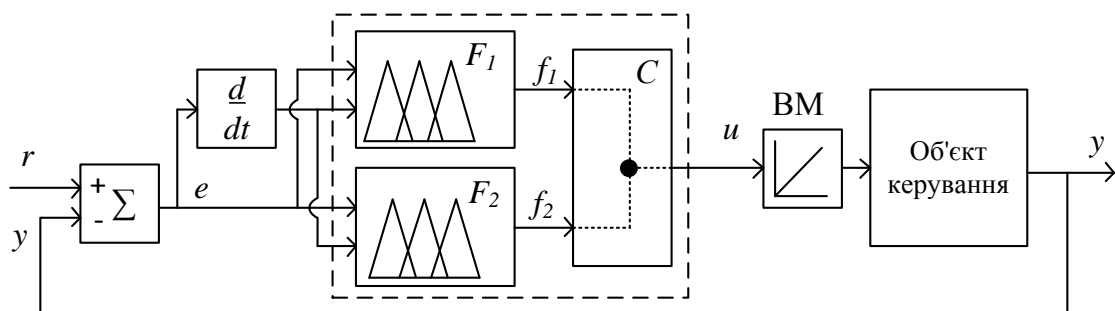


Рис. 3.26. Схема з двоканальним нечітким контролером

При надходженні на входи двоканального нечіткого контролера сигналу неузгодженості  $e$  на виході блоку імпульсів  $F_1$  буде сформовано сигнал керування, який виражається тривалістю імпульсу керування  $\tau_{imp}$ . Аналогічним чином буде сформовано сигнал тривалості пауз  $\tau_{pause}$ . При сталості вхідного сигналу  $e$  тривалість імпульсів і пауз також буде незмінною, що показано на графіку залежності  $\tau(t)$ . В такому випадку сигнал на виході інтегратора буде мати поступово наростаючий вигляд, як це показано на графіку  $u(t)$  рис. 3.27. Штрихова похила лінія синього кольору



відображає усереднення ступінчатого вихідного сигналу інтегратора. Зважаючи на це, сигнал керування двоканального нечіткого контролера можна розглядати як еквівалент сигналу керування інтегрального регулятора.

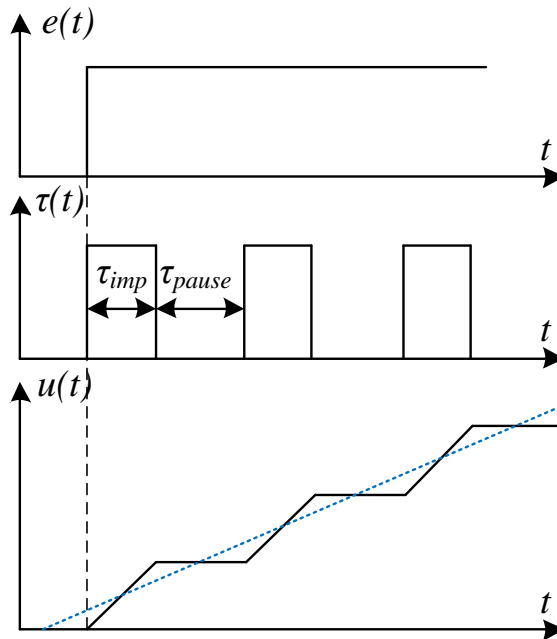


Рис. 3.27. Формування вихідного сигналу нечіткого контролера

Так як у схемі з двоканальним нечітким контролером в явному вигляді присутня ланка інтегрування, то структуру з двома паралельно ввімкненими блоками нечіткої логіки можна подати як змінний коефіцієнт підсилення інтегрального регулятора (див. рис. 3.28). Тому принципово схему з двоканальним нечітким контролером можна звести до одноконтурної схеми регулювання з інтегральним регулятором, в якій коефіцієнт підсилення є змінним параметром залежно від вхідних сигналів.

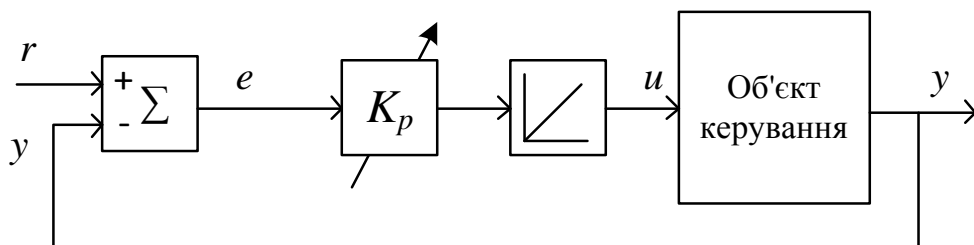


Рис. 3.28. Схема керування зі змінним коефіцієнтом підсилення регулятора

Звичайно, структури з підлаштуванням одного або декількох параметрів залежно від зовнішніх факторів правомірно відносити до

адаптивних систем керування. На рис. 3.29 наведена схема, яка пояснює, яким чином відбувається автопідлаштування коефіцієнту підсилення  $K_p$  інтегрального регулятора.

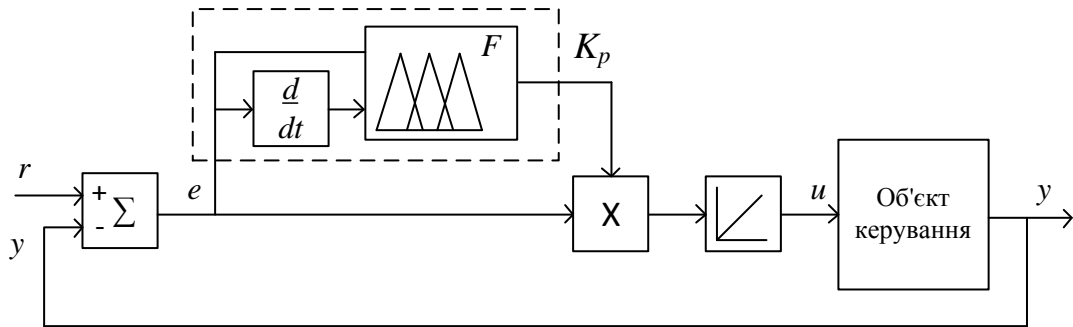


Рис. 3.29. Схема з адаптивним підлаштуванням коефіцієнту підсилення регулятора

В ній як ланка інтегрування виступає виконавчий механізм зі своєю сталою часу інтегрування, а швидкість зміни положення регулювального органу можна змінювати за рахунок зміни коефіцієнту підсилення  $K_p$ . Залежно від сигналу помилки  $e$ , швидкості його зміни  $de/dt$  і бази правил Fuzzy-блоку адаптації  $F$  коефіцієнт  $K_p$  змінюється від деякого максимального значення  $K_{pmax}$  до нуля.

Для повної еквівалентності структури з адаптивним інтегральним регулятором до структури з двоканальним нечітким контролером необхідно детальніше описати Fuzzy-блок адаптації  $F$  (див. рис. 3.30).

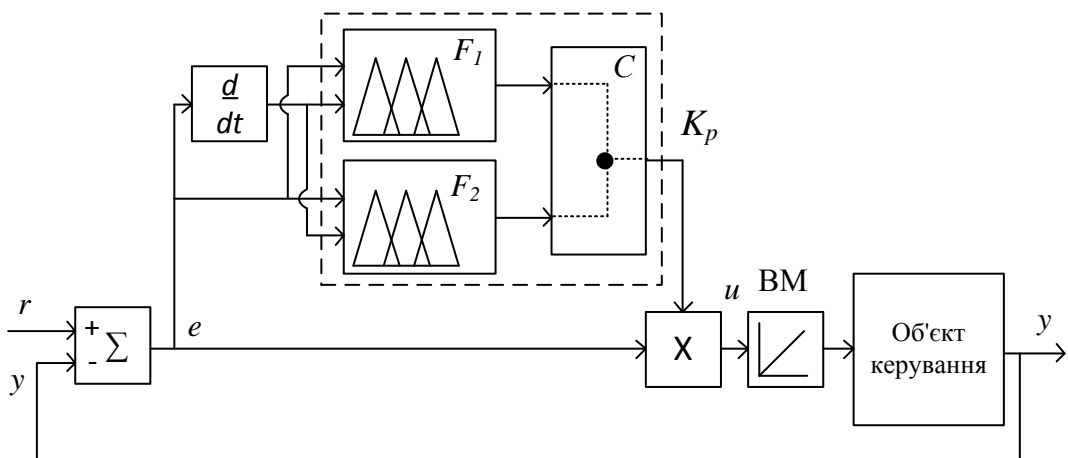


Рис. 3.30. Еквівалентна схема з адаптивним підлаштуванням коефіцієнту підсилення регулятора

Для того, щоб зменшувати коефіцієнт підсилення  $K_p$  до нуля незважаючи на наявність сигналу неузгодженості, одного fuzzy-блоку недостатньо, тому для реалізації часової затримки на керування навіть у схемі з адаптацією параметрів регулятора необхідний ще один блок, ввімкнений паралельно. Не важко помітити ідентичність структур блоків нечіткої логіки на рис. 3.26 і рис. 3.30. Дійсно, логіка роботи адаптивного пристрою схожа на роботу двоканального нечіткого контролера. Блок  $F_1$  формує значення коефіцієнту підсилення  $K_p$  в деякому діапазоні, а блок  $F_2$  визначає часові відтинки, коли цей параметр необхідно звести до нуля. Звичайно, структура, наведена на рис. 3.30, складніша в реалізації, але в ній нелінійний блок виведений за межі замкненого контуру регулювання. Це дозволяє розглядати замкнену систему керування як лінійну для різних значень коефіцієнту підсилення  $K_p$ , що дуже зручно для оцінки стійкості системи автоматичного керування. Не важко здогадатися, що для визначення стійкості системи керування в першу чергу необхідно провести дослідження на стійкість при максимальному значенні  $K_{pmax}$ . Якщо при цьому значенні параметра система буде стійкою, то і для всіх інших значень  $K_p$  система автоматичного керування буде зберігати стійкість.

Еквівалентом максимальному значенню параметра  $K_p$  в адаптивній системі є максимальна тривалість імпульсу керування  $\tau_{imp}$  в схемі з двоканальним нечітким контролером (рис. 3.31).

Для оцінки стійкості системи з двоканальним нечітким контролером необхідно визначити, при яких значеннях вхідних змінних комбінація імпульсу і паузи будуть давати найбільше сумарне переміщення виконавчого механізму. Як правило, найбільша сумарна швидкість наростання сигналу керування відбувається при максимальних значеннях сигналу неузгодженості  $e$  і швидкості його зміни  $de/dt$ . Цим значення вхідних змінних відповідає найбільша тривалість імпульсу керування  $\tau_{imp}^{max}$ , а також деяке значення тривалості паузи  $\tau_{pause}$ .

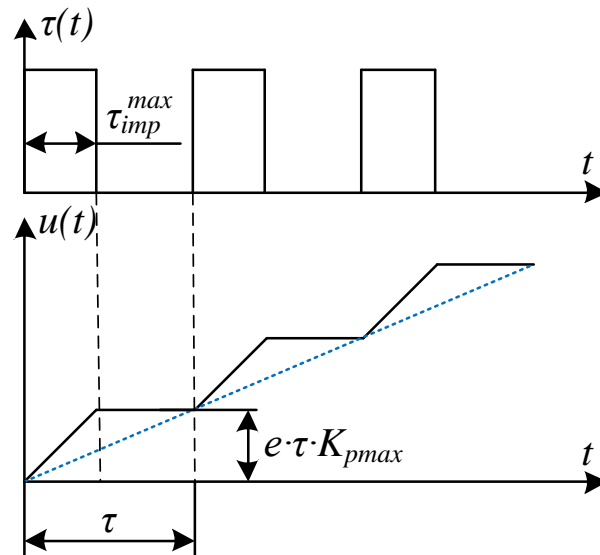


Рис. 3.31. Еквівалентність вихідних сигналів інтегрального регулятора і нечіткого контролера

Відповідно до рис. 3.31 при такій послідовності імпульсів і пауз буде формуватися ступінчатий сигнал керування, який буде характеризуватися найбільшою швидкістю наростання. На рис. 3.32 наведений вигляд даного сигналу керування.

Еквівалентним цьому сигналу є сигнал у вигляді прямої, кут нахилу якої визначається величиною сигналу неузгодженості  $e$  і значенням параметра  $K_p^{max}$  інтегрального регулятора. Задача оцінки стійкості зводиться до визначення критичного параметра  $K_p^{kp}$ , при якому система виходить на границю стійкості і порівняння цього параметра з  $K_p^{max}$ .

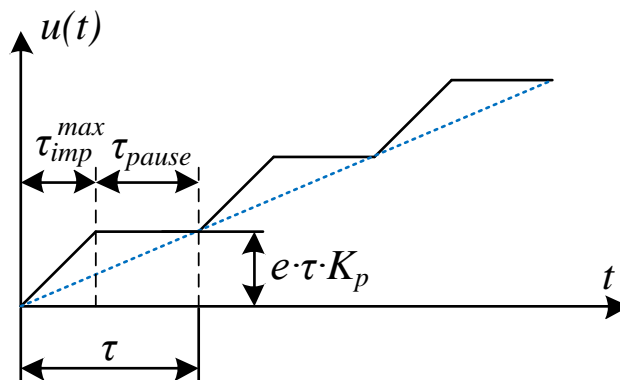


Рис. 3.32. Сигнал керування найбільшої швидкості

Для визначення критичного значення  $K_p^{kp}$  зручно користуватися частотним критерієм якості, що визначає запас стійкості системи автоматичного керування за підсиленням  $M_k$ :

$$M_k = \frac{1}{|W_{PC}(\omega_\pi)|} \quad (3.15)$$

де  $|W_{PC}(\omega_\pi)|$  – модуль АФЧХ розімкнутої системи на частоті, що відповідає куту  $180^\circ$  повороту вектора АФЧХ.

Графічна інтерпретація цього запасу стійкості за підсиленням наведена на рис. 3.33.

Якщо значення модулю АФЧХ  $|W_{PC}(\omega_\pi)|$  визначати при  $K_p=1$ , то критичне значення  $K_p^{kp}$  буде дорівнювати запасу стійкості за підсиленням  $M_k$ :

$$K_p^{kp} = M_k = \frac{1}{|W_{PC}(\omega_\pi)|_{K_p=1}} \quad (3.16)$$

Після визначення значення  $K_p^{kp}$  необхідно порівняти перехідні характеристики двоканального нечіткого контролера і еквівалентного йому інтегрального регулятора із значенням параметру підсилення  $K_p^{kp}$  при значенні сигналу неузгодженості  $e_{max}$ .

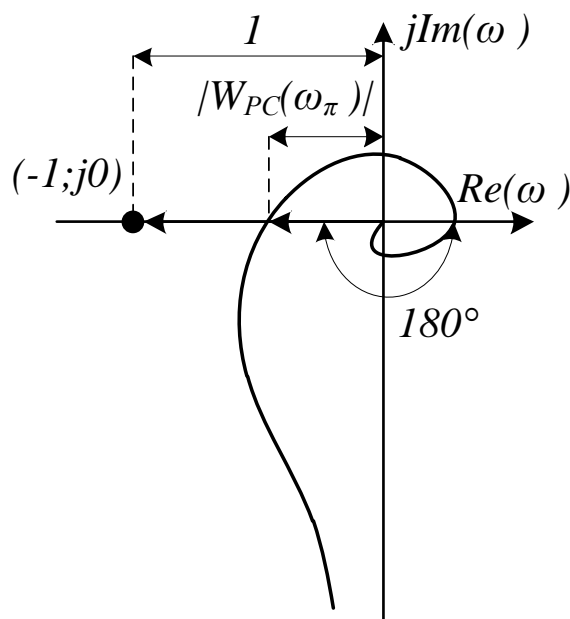


Рис. 3.33. Запас стійкості за підсиленням за АФЧХ розімкнутої системи

Система з двоканальним нечітким контролером може вважатися стійкою в усьому діапазоні вхідних змінних, якщо максимальна швидкість наростання сигналу керування є меншою, ніж швидкість наростання сигналу керування інтегрального регулятора з параметром  $K_p^{kp}$  (див. рис. 3.34).

Відповідно, якщо швидкість наростання сигналу керування є більшою, ніж у еквівалентної схеми з інтегральним регулятором, то система в цьому діапазоні вхідних змінних вже працює за межею стійкості.

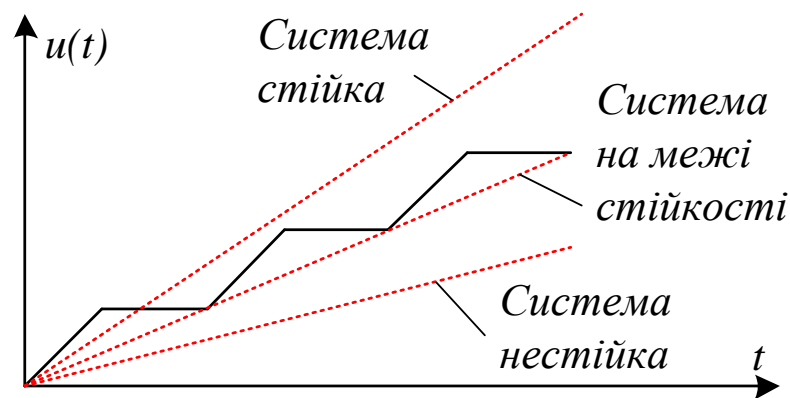


Рис. 3.34. Сигнал керування двоканального нечіткого контролера (суцільна лінія), сигнал керування інтегрального регулятора на межі стійкості (пунктирна лінія)

Якщо швидкість наростання сигналу керування співпадає з швидкістю зміни сигналу керування еквівалентної схеми з інтегральним регулятором, то система в цьому діапазоні вхідних змінних працює на межі стійкості.

Для дослідження системи на стійкість при інших вхідних змінних необхідно провести аналогічні дії для відповідних значень тривалості імпульсів і пауз, а також сигналу неузгодженості  $e$ . Наприклад, для моделі об'єкту температури в проміжній точці, що відповідає навантаженню 300МВт, розраховані значення  $K_p$  еквівалентного інтегрального регулятора наведені для всього діапазону вхідних змінних наведені на рис. 3.35.

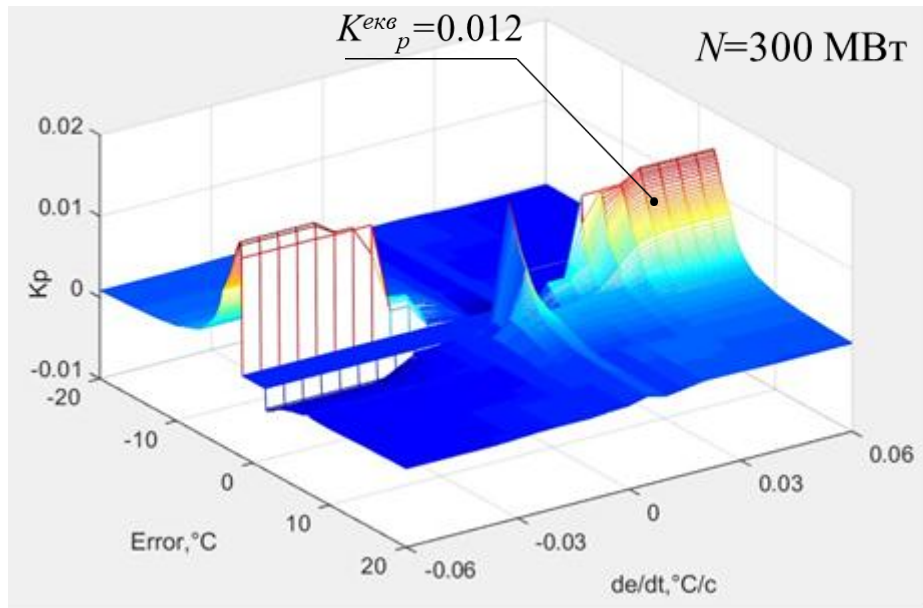


Рис. 3.35. Поверхня значень  $K_p$  еквівалентного інтегрального для навантаження 300МВт

На рис. 3.35 зображена точка  $K_p=0.012$ , яка відповідає вхідному значенню сигналу неузгодженості  $e$   $2^{\circ}\text{C}$  і вхідному значенню похідної від сигналу неузгодженості  $de/dt$   $0.034^{\circ}\text{C}/\text{c}$ . Для даного об'єкта критичним значенням  $K_p$ , при якому в системі керування з'являються незатухаючі коливання, є  $K_p^{kp} = 0.000974$ , або стала часу становить  $1026.7$  с. Це означає, що при  $e=2^{\circ}\text{C}$  і  $de/dt=0.034^{\circ}\text{C}/\text{c}$  еквівалентний інтегральний регулятор працює за межею стійкості. По мірі того, як буде зменшуватися значення неузгодженості, коефіцієнт підсилення також буде зменшуватися, потрапляючи в зону стійких значень  $K_p$ , що можна спостерігати на рис. 3.35.

Порівняння роботи схеми еквівалентного інтегрального регулятора з двоканальним нечітким контролером підтверджує справедливність вище наведених міркувань (рис. 3.36). Розбіжність в перехідних процесах пояснюється похибкою апроксимації вихідного сигналу нечіткого контролера. Вихідний сигнал двоканального нечіткого контролера апроксимується прямою, яка проходить по "нижнім" крайнім точкам (див. рис. 3.31). Аналогічним чином вихідний сигнал еквівалентного інтегрального регулятора проходить і на рис. 3.36.

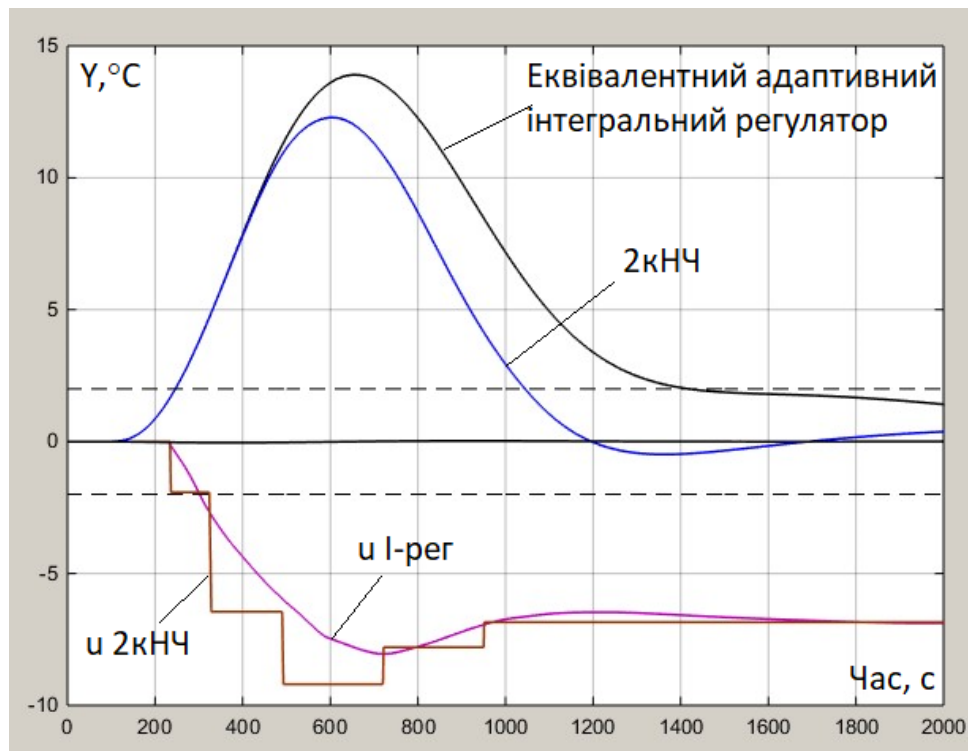


Рис. 3.36. Перехідні процеси в еквівалентній схемі з адаптивним І-регулятором і двоканальним нечітким контролером

Більш точним наближенням вихідного сигналу двоканального нечіткого контролера є вихідний сигнал ПІ-регулятора, замість І-регулятора (рис. 3.37). В цьому випадку також однозначно можна визначити параметри налаштування регулятора  $K_{PI}$  і  $T_{PI}$ .

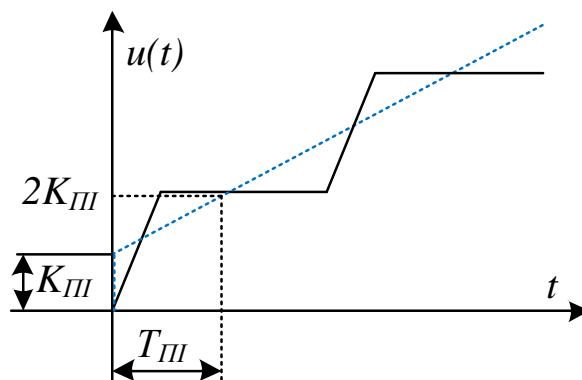


Рис. 3.37. Апроксимація вихідного сигналу нечіткого контролера сигналом ПІ-регулятора,  $K_{PI}$  – коефіцієнт підсилення регулятора,  $T_{PI}$  – стала часу інтегрування

Для цього вихідний сигнал двоканального нечіткого контролера слід апроксимувати лінійною залежністю,



$$y = ax + b \quad (3.17)$$

яку зручно визначити за допомогою методу найменших квадратів. Для розрахунку коефіцієнтів рівняння (3.17) достатньо чотирьох точок, які однозначним чином визначаються за значеннями тривалості імпульсу і паузи (рис. 3.38).

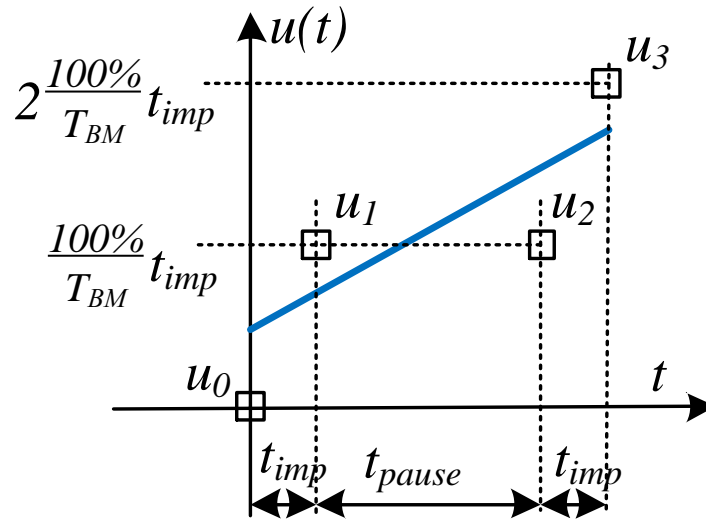


Рис. 3.38. Апроксимація вихідного сигналу нечіткого регулятора методом МНК

Коефіцієнти рівняння (3.17) визначаються за наступними формулами:

$$a = \frac{\sum_{i=0}^3 t_i \sum_{i=0}^3 u_i - 4 \sum_{i=0}^3 u_i t_i}{\left(\sum_{i=0}^3 t_i\right)^2 - 4 \sum_{i=0}^3 t_i^2} \quad (3.18)$$

$$b = \frac{\sum_{i=0}^3 t_i^2 \sum_{i=0}^3 u_i - \sum_{i=0}^3 t_i \sum_{i=0}^3 u_i t_i}{4 \sum_{i=0}^3 t_i^2 - \left(\sum_{i=0}^3 t_i\right)^2} \quad (3.19)$$

При структурі ПІ-регулятора:

$$W_p(s)K_{III} = K_{III} \left(1 + \frac{1}{T_{III}s}\right) \quad (3.20)$$

налаштування ПІ-регулятора розраховуються як:

$$K_{III} = \left| \frac{b}{e} \right| \quad (3.21)$$

де  $e$  – значення сигналу неузгодженості, для якого проводиться розрахунок,

$$T_{III} = \left| \frac{1}{\frac{a}{K_{III}e}} \right| \quad (3.22)$$

Таким чином для всього діапазону вхідних змінних можна розрахувати налаштування ПІ-регулятора, після чого не важко визначити необхідні характеристики системи керування, наприклад, запас стійкості за модулем  $G_m$  (див. рис. 3.39). Особливу цікавість на даній поверхні викликає діапазон значень  $G_m$  при однознакових значеннях сигналів  $e$  та  $de$  (див. рис. 3.40), яка відповідає фазі відхилення технологічного параметра від уставки. Значення  $G_m=1$  означає, що система знаходиться на межі стійкості, при  $G_m<1$  система є нестійкою. На рис. 3.40 наглядно зображено, в яких діапазонах регулятор має форсовані налаштування. Завдяки цьому досягається збільшення швидкості реакції системи керування на збурення.

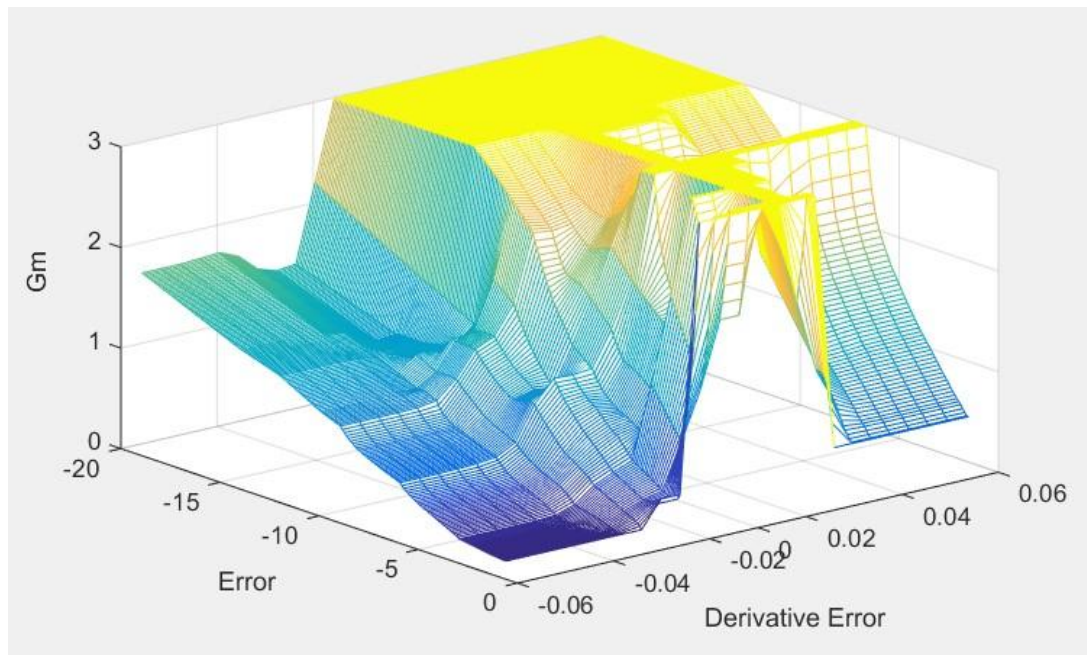


Рис. 3.39. Поверхня запасів стійкості за модулем  $G_m$  системи керування при навантаженні 300 МВт

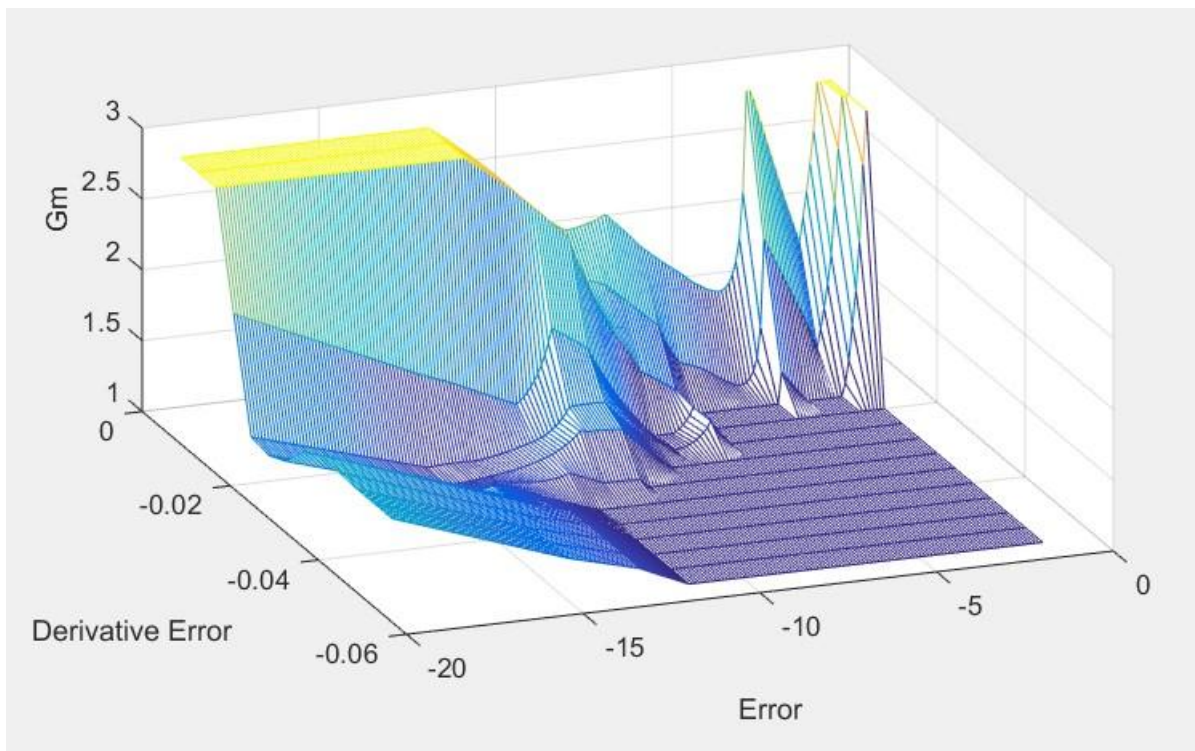


Рис. 3.40. Поверхня значень  $G_m$  при однознакових значеннях вхідних змінних

Дана методика надає зручний спосіб оцінки стійкості нелінійної системи керування шляхом приведення її до еквівалентної схеми з адаптивним інтегральним або пропорційно-інтегральним регулятором. Вона не надає однозначної відповіді про стійкість системи керування в цілому, але тим не менш є достатньо простою у використанні і в ній застосовуються добре відомі критерії оцінки стійкості з лінійної теорії автоматичного керування. Також вона може слугувати основою для аналітичного проектування і налаштування двоканального нечіткого контролера. Більш достовірною перевіркою на стійкість в цілому системи з двоканальним нечітким контролером залишається комп'ютерне моделювання.

### 3.6. Висновки за розділом 3

На основі математичних моделей температур за ділянками НРЧ, ВРЧ і ППП розраховано схему керування з введенням диференціаторів в проміжних точках. До основного сигналу по температурі ППП через диференціатори додаються сигнали по випереджальним ділянкам НРЧ і ВРЧ.

Для основного параметра з урахуванням сигналів від диференціаторів розраховані налаштування ПД-регулятора для крайніх режимів роботи котлоагрегату. Отримані перехідні процеси не задовольняють заданим вимогам якості: при можливих зовнішніх збуреннях (в еквіваленті 10% зміни навантаження) динамічна похибка є більшою за допустиму ( $>14^{\circ}\text{C}$ ), присутнє перерегулювання більше 20%.

Проведено синтез двоканального нечіткого контролера для температурного об'єкту керування, а саме температури в проміжній точці пароводяного тракту прямооточного котлоагрегату. Визначено вхідні і вихідні змінні двоканального нечіткого контролера. Для сигналу похибки діапазон зміни визначено  $[-20^{\circ}\text{C}; +20^{\circ}\text{C}]$  як допустимі межі коливання температури, для сигналу швидкості зміни похибки діапазон визначено  $[-0.3^{\circ}\text{C}/\text{c}; +0.3^{\circ}\text{C}/\text{c}]$  на основі динамічних властивостей отриманих еквівалентних моделей, і для сигналу за потужністю енергоблоку  $[75\%; 100\%]$ .

Запропонована методика оцінки стійкості системи з двоканальним контролером. Обґрунтована можливість представлення даної схеми як еквівалентної з адаптивним I- або III-регулятором. В цьому разі в основному контурі регулювання відсутні нелінійні елементи і в кожний окремо взятий момент часу схему можна розглядати як лінійну.

Проведене комп'ютерне моделювання синтезованої схеми з двоканальним контролером в програмному додатку Matlab Simulink. Результати моделювання показали кращу якість функціонування двоканальної схеми в порівнянні з ПД-регулятором, ІМС і динамічним коректором. При компенсації збурення на навантаженні 300 МВт динамічна похибка при збуренні в еквіваленті зміни виконавчого механізму на 7% складає  $5.8^{\circ}\text{C}$ , що менше на  $1.8^{\circ}\text{C}$  в порівнянні з ІМС-регулятором. Час регулювання суттєво менший в схемі з двоканальним нечітким контролером – 536 с, що на 31% менше, а в абсолютному вираженні – на 169 с. Кількість включень при відпрацюванні збурення також є мінімальною і складає 4 включення – 3 в початковій фазі перехідного процесу для формування

форсованого керуючого впливу, і 1 в кінцевій фазі – для корекції перехідного процесу. В ПІД-регуляторі кількість включень ВМ в аналогічній ситуації становить 15. При навантаженні 225 МВт динамічна похибка на  $2.3^{\circ}\text{C}$  менше в порівнянні з ІМС. За інтегральним критерієм якості двоканальний нечіткий контролер на 20% кращий за схему ІМС.

При відпрацюванні завдання при 100% навантаженні система з двоканальним контролером швидше виводить параметр на нове значення – 560 с проти 625 с у ПІД-регулятора. При мінімальному навантаженні котлоагрегату система з двоканальним контролером повільніше виводить параметра на нове значення, в середньому на 35%. При цьому кількість включень регулятора мінімальна і складає 2 включання, що в 2.5 рази менше, ніж в динамічному коректорі.

## РОЗДІЛ 4

### ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РІШЕНЬ З НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

#### 4.1. Розробка двоканального нечіткого контролера в нотації FCL

Мова нечіткого керування (Fuzzy Control Language - FCL) розроблена для подання нечітких моделей систем керування, зокрема, моделей ПЛК в формі структурованого тексту, який може бути інтерпретований як програма на мові високого рівня. Мова описана в стандарті ІЕС 61131-7, в якому визначаються мета розробки цієї мови, її базова нотація, і приводяться приклади запису моделей нечіткого керування з використанням нотації. Хоча стандарт не визначає вимоги до обчислювальних пристроїв і середовищ, які можуть реалізовувати трансляцію, компіляцію і виконання програм на FCL, описана в ньому нотація основних компонентів систем нечіткого виводу дозволяє досягти формального рівня строгості, необхідного для подальшої розробки відповідних інструментальних засобів [101].

Під нечітким керуванням (Fuzzy Control) розуміється область застосування загальної методології теорії нечітких множин і нечіткої логіки для вирішення практичних завдань керування. Нечітке керування виникло як технологія, здатна розширити можливості автоматизації виробництва і призначена для вирішення прикладних завдань в області керування, які в загальному випадку можуть бути реалізовані за допомогою ПЛК.

Нечітке керування базується на використанні не стільки аналітичних або теоретичних моделей, скільки на практичному застосуванні знань, які можна представити у формі баз правил, що називаються лінгвістичними. Широкий діапазон застосувань і природність підходу, заснованого на досвіді фахівців, робить нечітке керування основним засобом, яке як стандарт має бути доступним для всіх користувачів ПЛК. Нечітке керування може також безпосередньо комбінуватися з класичними методами керування.

Додатки нечіткого керування, розроблені в формі програм на FCL, відповідно до стандарту ІЕС 61131-7, повинні бути інкапсульовані в

функціональні блоки (ФБ) на основі стандарту ІЕС 61131-3, який визначає використання мов програмування в ПЛК. Тип ФБ, що визначається в FCL, задається вхідними і вихідними параметрами, спеціальними правилами і оголошеннями нечіткого керування. Відповідні екземпляри ФБ повинні містити значення даних конкретних додатків нечіткого керування. ФБ, записані на FCL, можуть бути використані в будь-якій з п'яти мов стандарту ІЕС 61131-3. При цьому типи даних вхідних і вихідних параметрів ФБ на FCL повинні відповідати аналогічним параметрам такого середовища реалізації.

Для керування температурним режимом котлоагрегату ТЕС розроблена програма мовою FCL для фази блоків двоканального нечіткого контролера. Як алгоритм нечіткого виводу використовується алгоритм Мамдані, тому методом активізації буде MIN. Для акумуляції висновків правил будемо використовувати метод MAX, який найбільш часто застосовується в разі схеми нечіткого виводу методом Мамдані. Нарешті, як метод дефазифікації використаємо метод центру тяжіння, який задається за допомогою ключового слова COG.

Таким чином, блок нечіткої логіки, який відповідає за формування імпульсів керування, в нотації FCL буде мати вигляд:

```
FUNCTION_BLOCK F_imp
VAR_INPUT
e: REAL; //неузгодженість
de: REAL; //швидкість зміни неузгодженості
N: REAL; //потужність
END_VAR
VAR_OUTPUT
imp: REAL;
END_VAR
FUZZIFY e
TERM HHNE := (-20, 1) (-15, 1) (-11, 0) ;
TERM HNE := ( -15 , 0) ( -11 , 1) ( -7 , 0 ) ;
TERM MNE := ( -10 , 0) ( -6.5 , 1) ( -3 , 0 ) ;
TERM LNE := ( -5 , 0) ( -3 , 1) ( -1 , 0 ) ;
TERM ZE := ( -1.5 , 0) ( 0 , 1) ( 1.5 , 0 ) ;
TERM LPE := ( 1 , 0) ( 3 , 1) ( 5 , 0 ) ;
TERM MPE := ( 3 , 0) ( 6.5 , 1) ( 10 , 0 ) ;
TERM HPE := ( 7 , 0) ( 11 , 1) ( 15 , 0 ) ;
TERM HHPE := ( 11 , 0) ( 15 , 1 ) ( 20 , 1 ) ;
```

```

END_FUZZIFY
FUZZIFY de
TERM HHNE := (-0.3, 1) (-0.2, 1) (-0.1, 0) ;
TERM HMNE := (-0.2, 0) (-0.13, 1) (-0.06, 0) ;
TERM HNDE := (-0.08, 0) (-0.06, 1) (-0.045, 1) (-0.03, 0) ;
TERM MNDE := (-0.045, 0) (-0.03, 1) (-0.015, 0) ;
TERM LNDE := (-0.03, 0) (-0.015, 1) (0, 0) ;
TERM ZDE := (-0.01, 0) (0, 1) (0.01, 0) ;
TERM LPDE := (0, 0) (0.015, 1) (0.03, 0) ;
TERM MPDE := (0.015, 0) (0.03, 1) (0.045, 0) ;
TERM HPDE := (0.03, 0) (0.045, 1) (0.06, 1) (0.08, 0) ;
TERM HMPDE := (0.06, 0) (0.13, 1) (0.2, 0) ;
TERM HHPDE := (0.1, 0) (0.2, 1) (0.3, 1) ;
END_FUZZIFY
FUZZIFY N
TERM 75P := (75, 1) (85, 1) (95, 0) (100, 0) ;
TERM 100P := (75, 0) (85, 0) (95, 1) (100, 1) ;
END_FUZZIFY
DEFUZZIFY imp
TERM HNI := (-4.2, 1) (-2.8, 1) (-1.75, 0) ;
TERM MNI := (-2.8, 0) (-1.75, 1) (-0.9, 0) ;
TERM LNI := (-1.75, 0) (-0.9, 1) (-0.3, 0) ;
TERM LLNI := (-0.6, 0) (-0.3, 1) (-0.2, 0) ;
TERM ZI := (-0.3, 0) (0, 1) (0.3, 0) ;
TERM LLPI := (0.2, 0) (0.3, 1) (0.6, 0) ;
TERM LPI := (0.3, 0) (0.9, 1) (1.75, 0) ;
TERM MPI := (0.9, 0) (1.75, 1) (2.8, 0) ;
TERM HPI := (1.75, 0) (2.8, 1) (4.2, 1) ;
ACCU: MAX;
METHOD : COG
DEFAULT := 0
END_DEFUZZIFY
RULEBLOCK Num_1
AND : MIN;
RULE 1: IF e IS HHNE AND de IS HNDE AND N IS 100P THEN imp IS HNI;
RULE 2: IF e IS HHNE AND de IS MNDE AND N IS 100P THEN imp IS HNI;
RULE 3: IF e IS HHNE AND de IS LNDE AND N IS 100P THEN imp IS LNI;
RULE 4: IF e IS HHNE AND de IS ZDE AND N IS 100P THEN imp IS LNI;
RULE 5: IF e IS HHNE AND de IS LPDE AND N IS 100P THEN imp IS ZI;
RULE 6: IF e IS HHNE AND de IS MPDE AND N IS 100P THEN imp IS ZI;
RULE 7: IF e IS HHNE AND de IS HPDE AND N IS 100P THEN imp IS LPI;
//Інші правила блоку формування імпульсів
END_RULEBLOCK
END_FUNCTION_BLOCK

```



Оскільки цей ФБ записаний в нотації FCL, яка є мовою програмування високого рівня, то розглянута програма за структурою повністю відповідає деякій процедурі. Формальними параметрами такої процедури є вхідні змінні блоку правил, а повертаються значення вихідної змінної після дефазифікації. Виклик такої процедури в деякій зовнішній програмі може бути реалізований, наприклад, наступним чином:

```
F_imp(e:=-5,de:=-0.024,N:=95);
VarImp := F_imp.imp;
```

Аналогічним чином розроблений блок нечіткої логіки, який відповідає за формування пауз керування. В нотації FCL він буде мати вигляд:

```
FUNCTION_BLOCK F_pause
VAR_INPUT
e: REAL; //неузгодженість
de: REAL; //швидкість зміни неузгодженості
N: REAL; //потужність
END_VAR
VAR_OUTPUT
pause: REAL;
END_VAR
FUZZIFY e
TERM HHNE := (-20, 1) (-15, 1) (-11, 0) ;
TERM HNE := ( -15 , 0) ( -11 , 1) ( -7 , 0 ) ;
TERM MNE := ( -10 , 0) ( -6.5 , 1) ( -3 , 0 ) ;
TERM LNE := ( -5 , 0) ( -3 , 1) ( -1 , 0 ) ;
TERM ZE := ( -1.5 , 0) ( 0 , 1) ( 1.5 , 0 ) ;
TERM LPE := ( 1 , 0) ( 3 , 1) ( 5 , 0 ) ;
TERM MPE := ( 3 , 0) ( 6.5 , 1) ( 10 , 0 ) ;
TERM HPE := ( 7 , 0) ( 11 , 1) ( 15 , 0 ) ;
TERM HHPE := ( 11 , 0) ( 15 , 1 ) ( 20 , 1 ) ;
END_FUZZIFY
FUZZIFY de
TERM HHNDE := (-0.3, 1) (-0.2, 1) (-0.1, 0) ;
TERM HMNDE := (-0.2, 0) (-0.13, 1) (-0.06, 0) ;
TERM HNDE := ( -0.08 , 0) ( -0.06 , 1) ( -0.045 , 1 ) ( -0.03 ,
0 ) ;
TERM MNDE := ( -0.045 , 0) ( -0.03 , 1) ( -0.015 , 0 ) ;
TERM LNDE := ( -0.03 , 0) ( -0.015 , 1) ( 0 , 0 ) ;
TERM ZDE := ( -0.01 , 0) ( 0 , 1) ( 0.01 , 0 ) ;
TERM LPDE := ( 0 , 0) ( 0.015 , 1) ( 0.03 , 0 ) ;
TERM MPDE := ( 0.015 , 0) ( 0.03 , 1 ) ( 0.045 , 0 ) ;
TERM HPDE := ( 0.03 , 0) ( 0.045 , 1 ) ( 0.06 , 1 ) ( 0.08 , 0
);
TERM HMPDE := ( 0.06 , 0) ( 0.13 , 1 ) ( 0.2 , 0);
TERM HHPDE := ( 0.1 , 0) ( 0.2 , 1 ) ( 0.3 , 1 ) ;
```

```

END_FUZZIFY
FUZZIFY N
TERM 75P := (75, 1) (85, 1) (95, 0) (100, 0);
TERM 100P := (75, 0) (85, 0) (95, 1) (100, 1) ;
END_FUZZIFY
DEFUZZIFY pause
TERM LP225 := ( 10, 1) ( 25, 0);
TERM MP225 := ( 10, 0) ( 30 , 1) ( 50 , 0 ) ;
TERM VLP := ( 25, 0) ( 60 , 1) ( 100 , 0 ) ;
TERM LP := ( 60, 0) ( 100 , 1) ( 135 , 0 ) ;
TERM MP := ( 100, 0) ( 135 , 1) ( 175 , 0 ) ;
TERM HP := ( 135, 0) ( 175 , 1) ( 210 , 0 ) ;
TERM VHP := ( 175, 0) ( 210 , 1);
ACCU: MAX;
METHOD : COG
DEFAULT := 0
END_DEFUZZIFY
RULEBLOCK Num_1
AND : MIN;
RULE 1: IF e IS HNE AND de IS HNDE AND N IS 100P THEN imp IS
VHP;
RULE 2: IF e IS MNE AND de IS HNDE AND N IS 100P THEN imp IS MP;
RULE 3: IF e IS LNE AND de IS HNDE AND N IS 100P THEN imp IS
VLP;
RULE 4: IF e IS ZE AND de IS HNDE AND N IS 100P THEN imp IS
LP225;
RULE 5: IF e IS HNE AND de IS MNDE AND N IS 100P THEN imp IS HP;
RULE 6: IF e IS MNE AND de IS MNDE AND N IS 100P THEN imp IS MP;
RULE 7: IF e IS LNE AND de IS MNDE AND N IS 100P THEN imp IS
MP225;
//Інші правила блоку формування пауз
END_RULEBLOCK
END_FUNCTION_BLOCK

```

## 4.2. Методика налаштування

Зважаючи на кількість лінгвістичних змінних, вигляд їх функцій належності і розмір бази правил, доцільно розробити рекомендації для налаштування блоків нечіткої логіки двоканальної схеми у вигляді методики налаштування.

Межі зміни вхідної змінної за сигналом неузгодженості  $e$  визначаються з огляду на вимоги до динамічного відхилення в перехідних режимах, наприклад при зміні навантаження. На рис. 4.1 наведено визначення числових значень функцій належності. Зона нечутливості  $\Delta_{\text{нч}}$  визначається з технічних або технологічних вимог і умов експлуатації. Перетин ФН ZE з LPE зумовлений плавним виходом змінної  $e$  із зони нечутливості. Значення

ФН MPE і HPE в значенні 1 відповідають рівням спрацювання відповідно попереджувальної і критичної сигналізації. В англійській літературі і SCADA системах ці значення ще позначають як LO (low – низько), LOLO (low-low – занадто низько), HI (high – високо) і HHI (high-high – занадто високо).

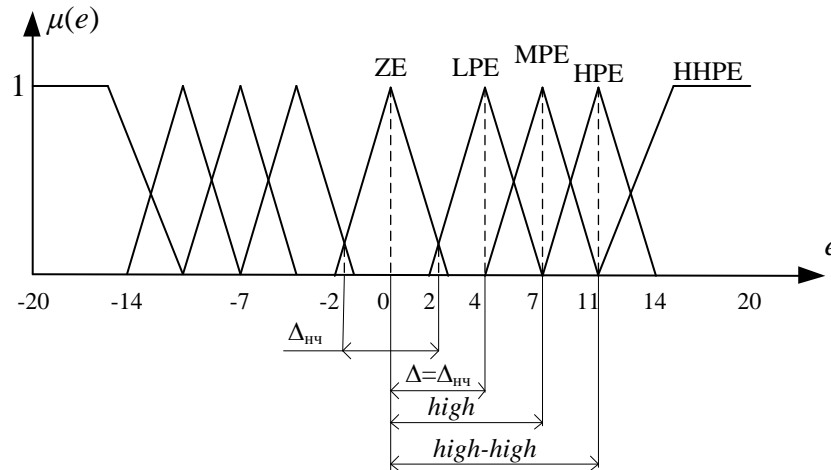


Рис. 4.1. Визначення функцій належності сигналу незгодженості

Межі зміни вхідної змінної за сигналом по швидкості зміни незгодженості  $de/dt$  визначаються з динамічних властивостей об'єкта керування.

Наприклад, максимальну швидкість зміни цього сигналу можна визначити експериментально при нанесенні максимально допустимого ступінчатого впливу на об'єкт, з математичної моделі або шляхом дослідження перехідних процесів в режимі нормальної експлуатації, а також під час пусків чи зупинок (див. рис. 4.3).

Значення швидкості зміни параметра, менше якого можна вважати, що технологічний процес перейшов в усталений режим і параметр не змінюється, визначається емпіричним шляхом, або з технологічних документів для конкретного типу обладнання. Наприклад, для теплоенергетичного обладнання при проведенні процедури ідентифікації вважається, що температура знаходиться в усталеному значенні, якщо її значення не змінюється більше ніж на  $1^{\circ}\text{C}$  протягом 2 хвилин. В цьому

випадку швидкість зміни складає  $0.0083 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$ . Якщо швидкість зміни менше цього значення, то вважається, що швидкість зміни відповідає лінгвістичній змінній ZDE (zero derivative error – нульова похідна від сигналу неузгодженості).

Вихідними змінними контролера є тривалість імпульсів і тривалість пауз.

Для тривалості імпульсу основними кількісними значеннями є максимальна необхідна тривалість імпульсу  $\tau_{imp}^{MAX}$  і мінімально допустима тривалість імпульсу  $\tau_{imp}^{MIN}$ . ФН ZI визначає діапазон нечутливості регулятора, який визначається обмеженнями на мінімальну тривалість включення ВМ  $\tau_{min}^{BM}$  (див. рис. 4.2). ФН LLNI і LLPI необхідні для точного регулювання параметра поблизу зони нечутливості. Мінімальна тривалість імпульсу, необхідна для спрямування значення технологічного параметра в межі зони нечутливості  $\Delta_{нч}$  визначається формулою:

$$\tau_{imp}^{min} = \frac{\Delta_{нч} T_{BM}}{2K_{OB} 100} \quad (4.1)$$

де  $\Delta_{нч}$  – ширина зони нечутливості регулятора;

$T_{BM}$  – постійна часу ВМ;

$K_{OB}$  – коефіцієнт передачі об'єкта керування.

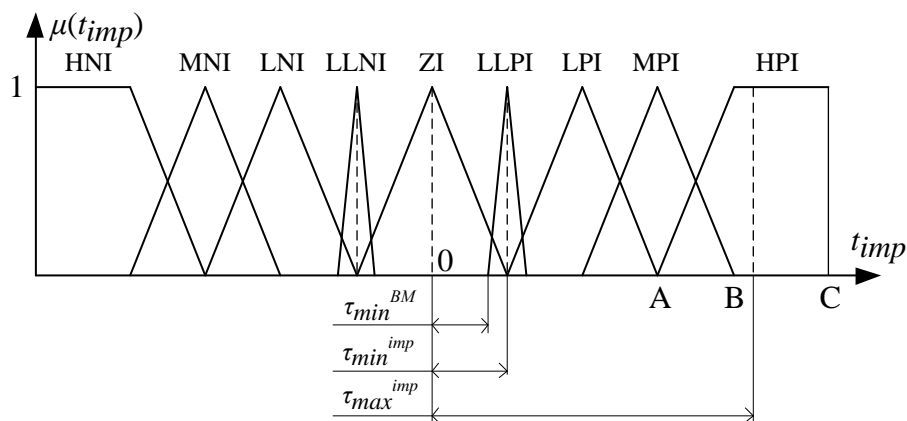


Рис. 4.2. Визначення тривалості імпульсів

Максимальна тривалість визначається формою крайньої ФН, на рис. 4.2 це HNI і HPI. Якщо задатися точками, що визначають вигляд цієї ФН, як

змінними величинами, і позначити їх відповідно  $A$ ,  $B$  і  $C$ , то визначити числове значення максимальної тривалості імпульсу  $\tau_{imp}^{MAX}$  можна наступним чином. ФН лінгвістичної змінної НРІ визначається системою:

$$\mu^{HPI}(\tau_{imp}^{max}) = \begin{cases} \frac{q}{B-A} - \frac{A}{B-A}, & q \in [A; B] \\ 1, & q \in [B; C] \end{cases} \quad (4.2)$$

За формулою для методу цента ваги числове значення вихідної величини (за умови повної відповідності за базою правил логічному висновку НРІ, тобто без її усічення за висотою) буде розраховуватися як:

$$\tau_{imp}^{max} = \frac{\frac{1}{B-A} \int_A^B (q-A)q dq + \int_B^C q dq}{\frac{1}{B-A} \int_A^B (q-A) dq + \int_B^C dq} \quad (4.3)$$

Після інтегрування (4.3) формула для визначення  $\tau_{imp}^{MAX}$  матиме вигляд:

$$\tau_{imp}^{max} = \frac{1}{3} \cdot \frac{A^2 + AB + B^2 - 3C^2}{3 + B - 2C} \quad (4.4)$$

Так як функції належності для вихідної змінної тривалості імпульсів є симетричними відносно нульового значення, то значення для ФН НРІ буде мати те саме значення за модулем, але протилежне за знаком.

Для тривалості пауз основними кількісними значеннями є максимальна тривалість паузи  $\tau_{pause}^{MAX}$ , більше якої немає сенсу вичікувати реакції зміни технологічного параметра, і мінімальна тривалість паузи  $\tau_{pause}^{MIN}$ , яка може бути визначена на основі значення чистого транспортного запізнення об'єкта керування.

Слід відзначити, що мінімальна тривалість паузи  $\tau_{pause}^{MIN}$  може бути підібрана з інших міркувань. При надто великих значеннях часової затримки (більше 40 с) може виникнути ситуація, коли відхилення параметра відбудеться на початку паузи. Щоб не допустити несвоєчасність реакції регулятора на відхилення параметра, тривалість паузи  $\tau_{pause}^{MIN}$  може бути зменшена. В цьому випадку доцільно встановити значення, що відповідає максимальному періоду дискретизації  $T_d$  для конкретного об'єкта керування.

Ця тривалість паузи буде задіяна лише в тих правилах бази знань, що визначають вихідний сигнал регулятора в межах зони нечутливості, щоб "не прогавити" момент виходу параметра за допустимі межі.

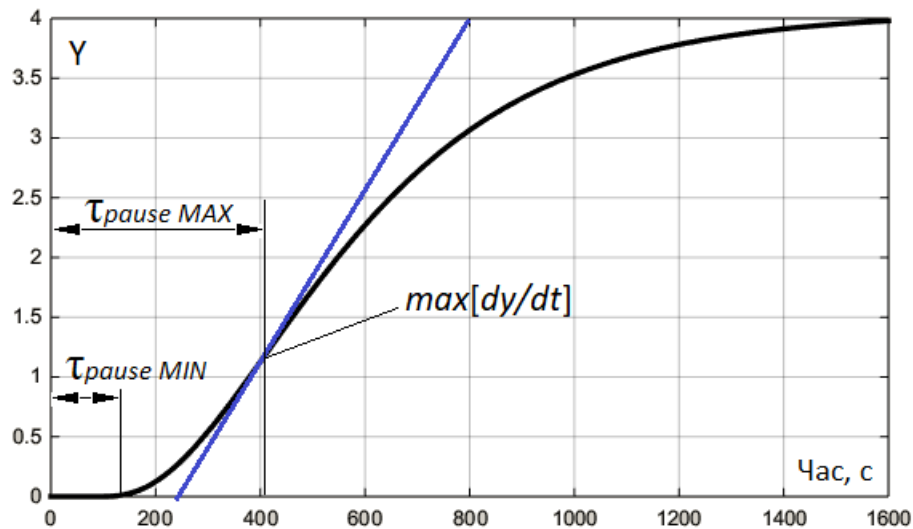


Рис. 4.3. Визначення діапазонів тривалості пауз

Варто зауважити, що дана методика визначає точні рекомендації у вигляді формул, графіків і правил для крайніх значень діапазонів зміни вхідних і вихідних змінних (максимальних і мінімальних). Кількість ФН, їх форма і перетин визначаються емпіричним шляхом, з досвіду експлуатації або опитуванням групи експертів. Таким чином запропонована методика налаштування двоканального нечіткого контролера може забезпечити опорні, відправні точки для синтезу у вигляді деякого набору числових значень змінних, а далі необхідно використовувати процедуру ітеративного процесу розробки нечітких контролерів або відомі методи розробки експертних систем.

### 4.3. Програмно-технічні рішення системи керування температурним режимом

Огляд програмного забезпечення промислових контролерів провідних світових виробників показав, що стандарт ІЕС 61131-7 не реалізований в такій мірі, як, наприклад, стандарт ІЕС 61131-3. Найбільшого успіху в програмуванні контролерів з використанням нечіткої логіки досягла фірма Siemens з її продуктом S7 Fuzzy Control. Нажаль він не досяг широкого

розповсюдження і на сьогоднішній день не підтримується. Для реалізації двоканального нечіткого контролера на промислових засобах автоматизації прийнято рішення розробити власне програмне забезпечення, яке реалізує алгоритм нечіткого виводу Мамдані. Для написання коду обрано мову ST стандарту ІЕС 61131-3. Мова ST (Structured Text) – текстова високорівнева мова загального призначення, за синтаксисом схожа на Паскаль. До її переваг варто віднести широке розповсюдження серед промислових виробників, гнучкість в реалізації алгоритмів, легкість перенесення на інші програмні платформи. Фрагменти коду, які можуть бути винесені в окремі блоки, необхідно інкапсулювати у функціональні блоки для можливості формування програми мовою FBD.

Для реалізації двоканального нечіткого контролера і алгоритму його роботи обраний контролер АХС F 2152 покоління PLCnext Technology фірми Phoenix Contact (рис. 4.4). Для програмування використане програмне забезпечення PC Works Engineer 7.2.3.

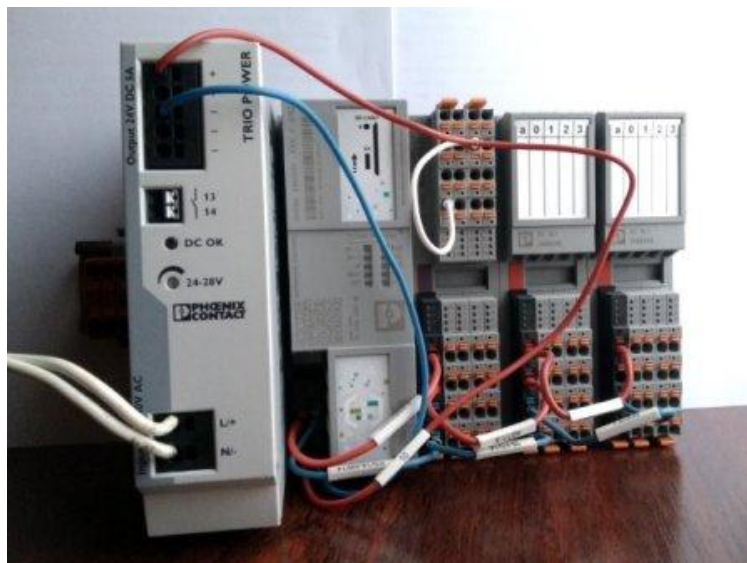


Рис. 4.4. Контролер PLCnext, зліва-направо: блок живлення, контролер АХС F 2152, модуль вхідних/вихідних дискретних сигналів, два модуля вихідних дискретних сигналів

Для реалізації схеми з двоканальним нечітким контролером розроблено 7 функцій і 3 функціональних блоки за стандартом ІЕС 61131-3 (рис. 4.5).

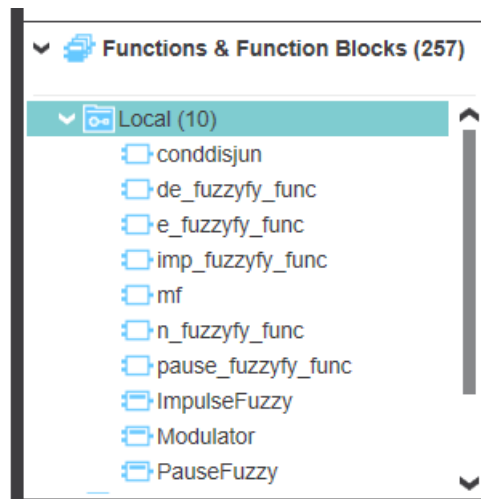


Рис. 4.5. Розроблені програмні компоненти в середовищі PC Works Engineer

Функція `conddisjun` (condition disjunction) виконує операцію перетину множин, що відповідає мінімуму ФН лінгвістичних термів, які входять в логічне правило за умови, що це правило виконується (всі ФН більше нуля). Функція має чотири параметри: три вхідних параметра двоканального нечіткого контролера і поточне значення ФН вихідної лінгвістичної змінної. Четвертий параметр необхідний для того, щоб виконувати максимізацію ФН вихідної змінної відповідно до алгоритму Мамдані. Код функції `conddisjun` наведений нижче.

```
//Disjunction + Accumulation IF Condition
if (e_param > 0) AND (de_param > 0) AND (N_param > 0) THEN
    mf_res := min(min(e_param, de_param), N_param);
    conddisjun := max(mf_res, curMF);
else
    conddisjun := curMF;
end_if;
```

Функція `mf` (member function) є функцією належності і виконує операцію перетворення числового значення вхідної змінної в значення істинності відповідному лінгвістичному терму. Якщо значення вхідної змінної не потрапляє в діапазон лінгвістичної змінної, то функція повертає нуль. Дана функція виконує кусково-лінійне перетворення, яке може бути використане для z-подібних, трикутних і трапецієвидних ФН. Код функції `mf` наведений нижче.

```
if (x >= x1 AND x <= x2) THEN
```



```

mf := (x*(y2-y1)+x2*y1-x1*y2)/(x2-x1);
else
mf := 0;
end_if;

```

Функції `e_fuzzyfy_func`, `de_fuzzyfy_func`, `n_fuzzyfy_func` використовуються в процедурі фазифікації відповідно для вхідного сигналу неузгодженості, вхідного сигналу за похідною від сигналу неузгодженості і вхідного сигналу поточної потужності енергоблоку.

Код функції `e_fuzzyfy_func` наведений нижче.

```

CASE lingvo_term_index OF
1: //HHNE
  y1 := mf(x, -20, 1, -15, 1);
  y2 := mf(x, -15, 1, -11, 0);
  e_fuzzyfy_func := max(y1, y2);
2: //HNE
  y1 := mf(x, -15, 0, -11, 1);
  y2 := mf(x, -11, 1, -7, 0);
  e_fuzzyfy_func := max(y1, y2);
3: //MNE
  y1 := mf(x, -10, 0, -6.5, 1);
  y2 := mf(x, -6.5, 1, -3, 0);
  e_fuzzyfy_func := max(y1, y2);
4: //LNE
  y1 := mf(x, -5, 0, -3, 1);
  y2 := mf(x, -3, 1, -1, 0);
  e_fuzzyfy_func := max(y1, y2);
5: //ZE
  y1 := mf(x, -1.5, 0, 0, 1);
  y2 := mf(x, 0, 1, 1.5, 0);
  e_fuzzyfy_func := max(y1, y2);
6: //LPE
  y1 := mf(x, 1, 0, 3, 1);
  y2 := mf(x, 3, 1, 5, 0);
  e_fuzzyfy_func := max(y1, y2);
7: //MPE
  y1 := mf(x, 3, 0, 6.5, 1);
  y2 := mf(x, 6.5, 1, 10, 0);
  e_fuzzyfy_func := max(y1, y2);
8: //HPE
  y1 := mf(x, 7, 0, 11, 1);
  y2 := mf(x, 11, 1, 15, 0);
  e_fuzzyfy_func := max(y1, y2);
9: //HHPE
  y1 := mf(x, 11, 0, 15, 1);
  y2 := mf(x, 15, 1, 20, 1);
  e_fuzzyfy_func := max(y1, y2);
ELSE
  e_fuzzyfy_func := 0;

```

END\_CASE

Дана функція послідовно викликається в циклі, де кожній лінгвістичній змінній співставляється значення функції належності, що відповідає поточному числовому значенню вхідної змінної. Цикл розрахунку ФН для кожної змінної знаходиться в функціональних блоках `ImpulseFuzzy` і `PauseFuzzy`. Код функцій `e_fuzzyfy_func`, `de_fuzzyfy_func`, `n_fuzzyfy_func` структурно дуже схожий на блок FUZZIFY змінної "e" в нотації мови FCL стандарту ІЕС 61131-7.

Функції `de_fuzzyfy_func` і `n_fuzzyfy_func` розроблені аналогічно до функції `e_fuzzyfy_func`. Код цих функцій наведений в додатках Б і В відповідно.

Функції `imp_fuzzyfy_func` і `pause_fuzzyfy_func` використовуються в процедурі акумуляції для формування результуючої вихідної ФН. Функції `imp_fuzzyfy_func` і `pause_fuzzyfy_func` розроблені аналогічно до функції `e_fuzzyfy_func`. Код цих функцій наведений в додатках Г і Д відповідно.

В процедурі дефазифікації використовується модифікований метод центру ваги, який полягає в тому, що замість інтегралу результуючої ФН розраховується сума  $N$  точок, рівномірно розподілених по діапазону вихідної змінної. Чим більша кількість точок  $N$ , тим точнішим є результат модифікованого методу центру ваги. При  $N \rightarrow \infty$  модифікований метод центру ваги вироджується в звичайних метод центру ваги.

Для побудови результуючої функції належності послідовно в циклі за допомогою функцій `imp_fuzzyfy_func` і `pause_fuzzyfy_func` розраховуються ФН для вихідних лінгвістичних змінних. Результуюча ФН формується шляхом усічення розрахованих значень ФН для кожної точки з діапазону вихідної змінної до відповідних значень, отриманих після процедури прийняття логічного висновку на основі бази правил. Усічення ФН кожної вихідної лінгвістичної змінної виконується шляхом порівняння

максимального значення ФН, отриманого після прийняття логічного висновку, з значеннями ФН з діапазону вихідної змінної. Всі значення ФН в циклі, які є більшими за максимальне значення ФН, отримане після процедури прийняття логічного висновку, відкидаються, а замість їх в масив записується максимальне значення ФН для даної лінгвістичної змінної.

Процедури акумуляції і дефазифікації знаходяться в функціональних блоках `ImpulseFuzzy` і `PauseFuzzy`. Код процедури акумуляції і дефазифікації для вихідної змінної `impulse` наведений нижче і знаходиться в функціональну блоці `ImpulseFuzzy`.

```
(* accumulation procedure *)
for i := 1 TO 121 BY 1 DO
  for j := 1 TO 9 BY 1 DO
    imp_x_val := ar_imp_range[i];
    imp_cur_mf := imp_fuzzyfy_func(imp_x_val,j);
    if imp_cur_mf <= ar_imp[j] THEN
      ar_res_mf[i] := max(imp_cur_mf,ar_res_mf[i]);
    ELSE
      ar_res_mf[i] := max(ar_imp[j],ar_res_mf[i]);
    END_IF;
  end_for;
end_for;

(* Defuzzyfy procedure *)
up:=0;
down:=1; // Not NULL (0) to avoid divide on zero
for i := 1 TO 121 BY 1 DO
  up := up + ar_res_mf[i]*ar_imp_range[i];
  down := down + ar_res_mf[i];
end_for;

Out:=up/down;
```

Код процедури акумуляції і дефазифікації для вихідної змінної `pause` аналогічний до коду для змінної `impulse` і знаходиться в функціональну блоці `PauseFuzzy`.

В функціональних блоках `ImpulseFuzzy` і `PauseFuzzy` інкапсульовані три основних етапи роботи нечіткого логічного виводу: процедури фазифікації вхідних змінних, нечіткий логічний висновок на основі лінгвістичної бази правил і дефазифікація вихідної змінної. В

додатках E і Є наведені повні програмні коди блоків ImpulseFuzzy і PauseFuzzy відповідно, включно з базою правил.

Блоком, що узгоджує роботу двох описаних вище функціональних блоків, є Modulator. В цьому блоці реалізований основний алгоритм функціонування двоканального нечіткого контролера. Незважаючи на назву, цей блок не є класичним модулятором, адже не здійснює модуляцію деякого аналогового сигналу. Цей блок більше нагадує генератор прямокутних імпульсів. Тем не менш, тривалість цих імпульсів і час пауз між імпульсами є змінними залежно від вхідних сигналів цього блоку, що де в чому нагадує часо-імпульсну або широтно-імпульсну модуляції, тому він отримав таку назву.

Код ФБ Modulator наведений нижче.

```

IF timer_tp.Q = FALSE AND flag_timer_on = FALSE THEN
  out := 0;
  flag_timer_on := TRUE;
  flag_is_need_read := TRUE;
  if flag_imp_on = TRUE THEN
    flag_imp_on := FALSE;
    flag_pause_on := TRUE;
  ELSE
    flag_imp_on := TRUE;
    flag_pause_on := FALSE;
  END_IF;
END_IF;

if flag_imp_on = TRUE AND flag_is_need_read = TRUE THEN
  var_duration := TO_ULINT(ABS(in_impulse)*1000);
  if in_impulse >= 0 THEN
    var_imp_direction := 1;
  ELSE
    var_imp_direction := -1;
  END_IF;
  duration_time := STRING_TO_TIME(TO_STRING(var_duration, 'T#{0:d}'));
  // d - is integer
END_IF;

if flag_pause_on = TRUE AND flag_is_need_read = TRUE THEN
  var_duration := TO_ULINT(in_pause*1000);
  duration_time := STRING_TO_TIME(TO_STRING(var_duration, 'T#{0:d}'));
  // d - is integer
END_IF;

if flag_is_need_read = TRUE THEN

```

```

        flag_is_need_read := FALSE;
    END_IF;

    if var_duration > 200 THEN
        timer_tp( IN := flag_timer_on, PT := duration_time);
    END_IF;

    out_et_timer := timer_tp.ET;

    IF timer_tp.Q = TRUE THEN
        flag_timer_on := FALSE;
    ELSE
        flag_is_need_read := TRUE;
    END_IF;

    IF flag_imp_on = TRUE AND timer_tp.Q = TRUE THEN
        out := var_imp_direction;
    END_IF;

```

Вхідними змінними ФБ є тривалість імпульсу `in_impulse` і паузи `in_pause`, вихідними – стан виходу контролера `out`, що подається на ВМ: "1" означає фіксацію виходу для формування імпульсу додатної полярності, "-1" означає фіксацію виходу для формування імпульсу від'ємної полярності, "0" означає вимкнений стан виходу контролера, тобто відсутність керуючого впливу; інший вихідний сигнал `out_et_timer` є інформаційним і показує час, який пройшов після останньої зміни стану вихідної змінної `out`. Загальний вигляд з'єднання блоків `ImpulseFuzzy`, `PauseFuzzy` і `Modulator` наведений на рис. 4.6.

В розробленому програмному забезпеченні активно використовуються масиви, тому окремо наведемо код створення всіх необхідних додаткових типів даних, необхідних для функціонування програми. Код декларації користувачьких типів даних наведений нижче.

```

TYPE
    ARRAY_e : ARRAY [1..9] OF REAL;
    ARRAY_de : ARRAY [1..11] OF REAL;
    ARRAY_N : ARRAY [1..2] OF REAL;
    ARRAY_res_mf : ARRAY [1..121] OF REAL;
    ARRAY_imp_range : ARRAY [1..121] OF REAL;
    ARRAY_imp : ARRAY [1..9] OF REAL;
    ARRAY_pause_res_mf : ARRAY [1..271] OF REAL;
    ARRAY_pause_range : ARRAY [1..271] OF REAL;
    ARRAY_pause : ARRAY [1..7] OF REAL;

```

END\_TYPE

Розміри масивів ARRAY\_e, ARRAY\_de, ARRAY\_N, ARRAY\_imp, ARRAY\_pause відповідають кількості лінгвістичних змінних для кожного параметра.

Розміри масивів ARRAY\_res\_mf, ARRAY\_imp\_range, ARRAY\_pause\_res\_mf, ARRAY\_pause\_range відповідають кількості точок, на яку розбиті діапазони вихідних змінних при проведенні процедури дефазифікації модифікованим методом центру ваги.

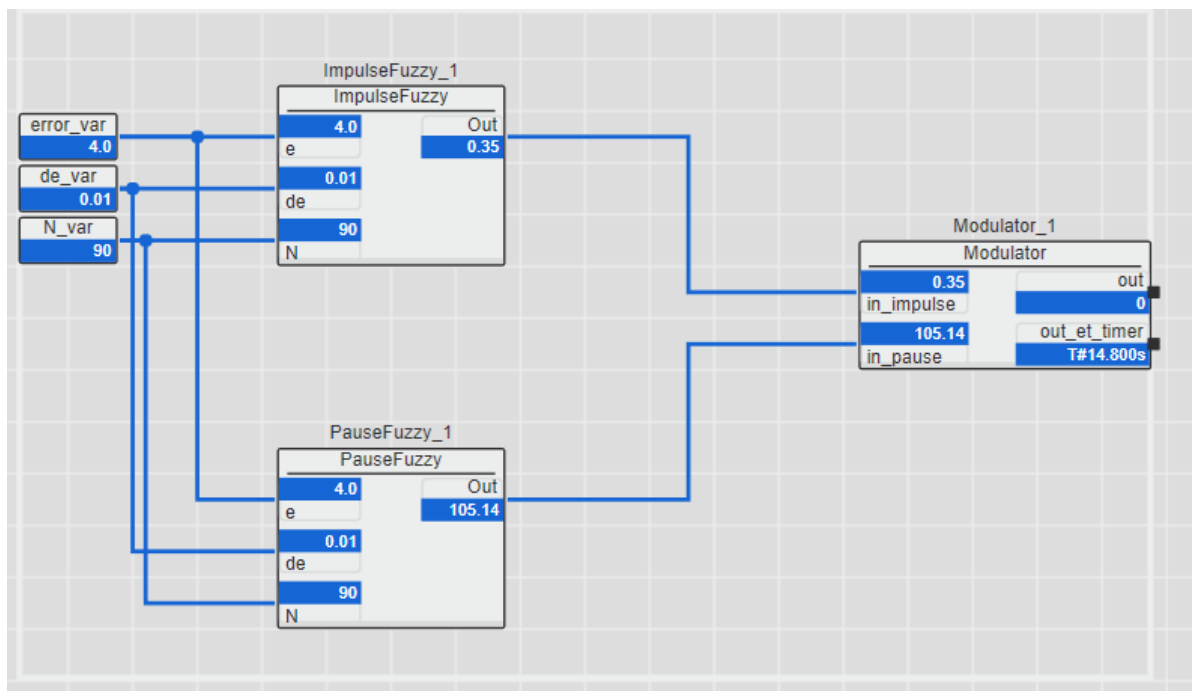


Рис. 4.6. Схема двоканального нечіткого контролера в середовищі PC Works Engineer

На рис. 4.7 наведена завантаженість ПЛК при роботі програми, тривалість скану становить 100 мс. При пустому проекті завантаженість CPU становить в середньому 24%. При виконанні вище описаного ПЗ завантаженість склала в середньому 38%, тобто розроблений алгоритм нечіткого виводу збільшив завантаженість CPU на 14%.

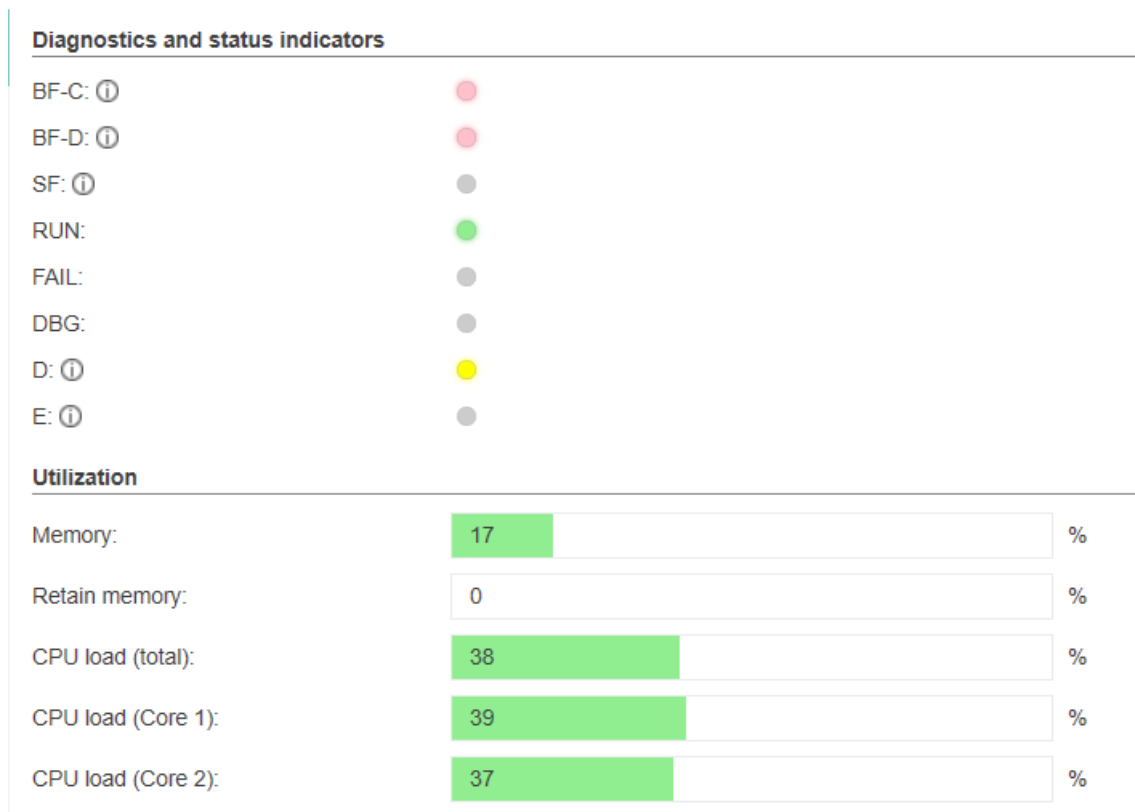


Рис. 4.7. Завантаженість ПЛК АХС F 2152 при роботі з розробленою програмою

#### 4.4. Імітаційне моделювання АСР температурного режиму пароводяного тракту прямооточного котлоагрегату

В попередніх розділах проведений синтез двоканального нечіткого контролера для АСР температурного режиму пароводяного тракту котлоагрегату ТПП-210А. В контролері АХС F 2152 реалізований двоканальний нечіткий контролера, а також функціонує сервер OPC UA для обміну даними з системами верхнього рівня. В Matlab/Simulink побудована модель парового тракту до проміжної точки (рис. 4.8). Дана модель враховує зміни динамічних характеристик ділянок водопарового тракту котла (НРЧ, ВРЧ, ППП) залежно від навантаження енергоблоку. Зміна навантаження є зовнішнім збуренням для системи регулювання температури за ППП. Структурна схема імітаційного моделювання наведена на рис. 4.9.

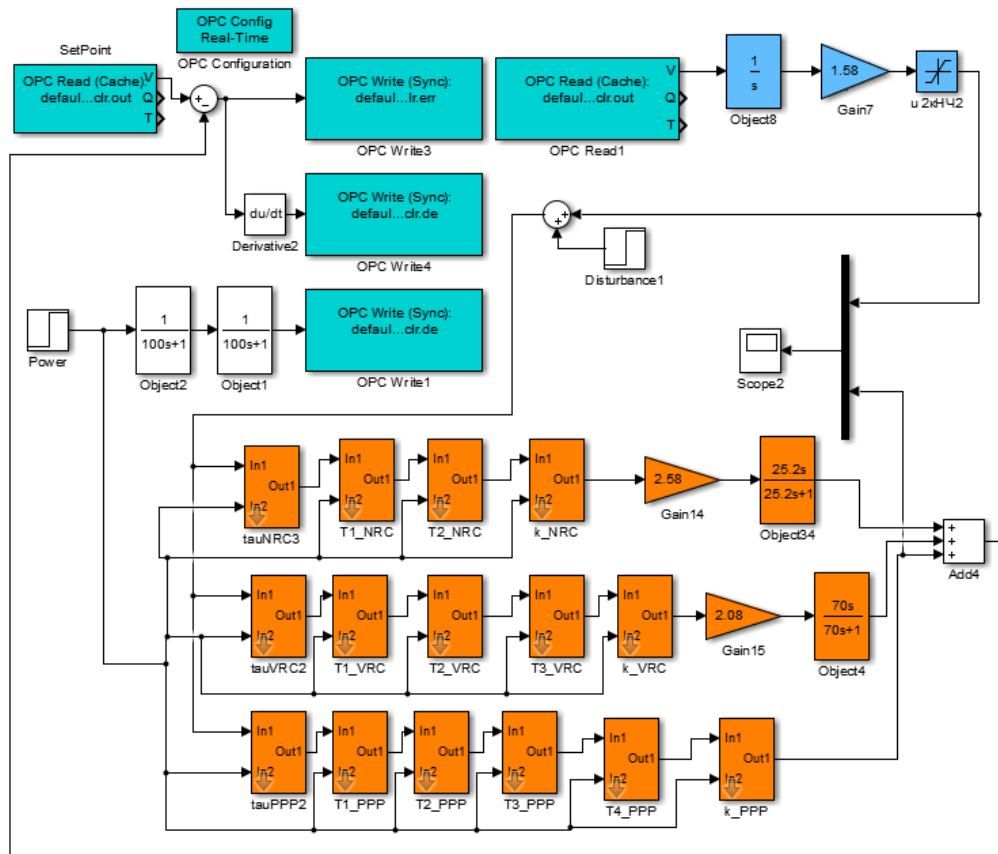


Рис. 4.8. Модель імітаційного моделювання АСР температурного режиму

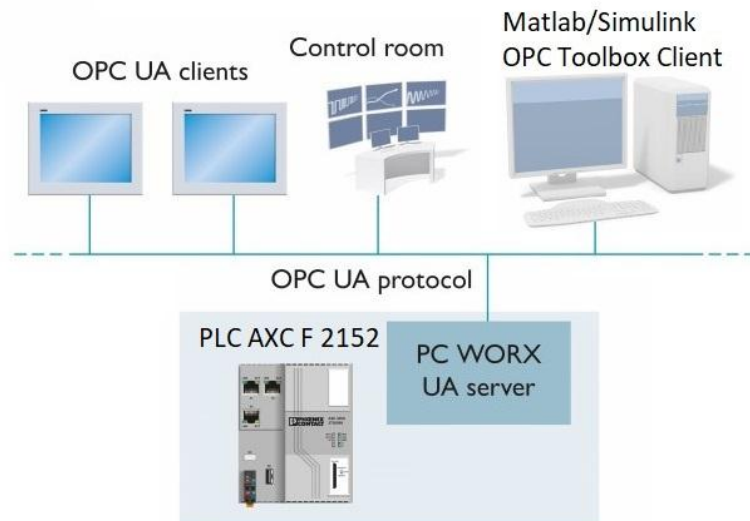


Рис. 4.9. Схема імітаційного моделювання роботи системи автоматизації

На рис. 4.10 наведені перехідні процеси, отримані в результаті імітаційного НІЛ-моделювання. Впродовж 5 годин 30 хвилин на систему регулювання здійснювалися різного роду зовнішні збурення: по завданню, зі сторони регульовального органа (відповідає збуренню за паливом), а також



по зміні навантаження. Навантаження змінювалося 5 разів у всьому робочому діапазоні від 225 МВт (75% від номінального) до 300 МВт.

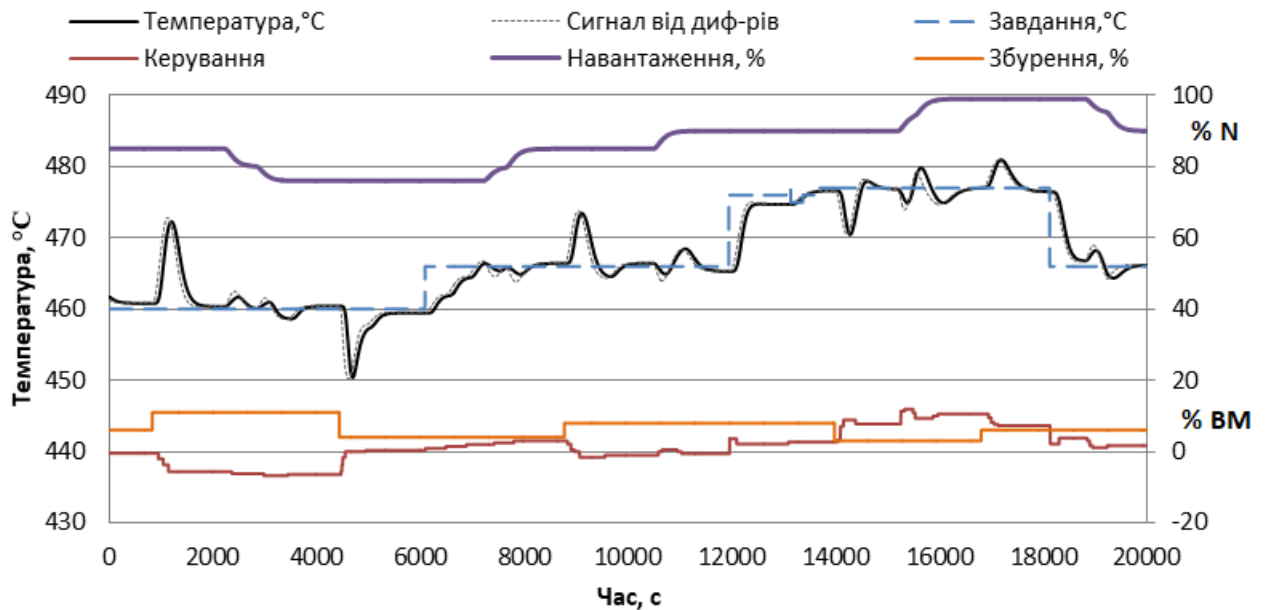


Рис. 4.10. Результати моделювання роботи АСР температурного режиму

Система регулювання з двоканальним нечітким контролером забезпечує задану якість керування у всьому діапазоні навантажень енергоблоку, максимальне динамічне відхилення менше  $13^{\circ}\text{C}$  при мінімальному навантаженні, при максимальному навантаженні динамічне відхилення не перевищує  $6^{\circ}\text{C}$ . В перехідних режимах кількість включень ВМ не перевищувала 5 разів. Отримані результати свідчать про ефективність використання сигналу за навантаженням енергоблоку в нечіткому регуляторі, це дало змогу реалізувати систему керування, яка охоплює всі режими роботи котлоагрегату без додаткового ускладнення структури системи керування.

#### 4.5. Імітаційне моделювання АСР температури первинної пари

Одним із технологічних параметрів, який показує якість роботи котлоагрегату, є температура первинної ("гострої") пари на виході із котла. Цей параметр відноситься до найважливіших, що визначає надійність і економічність роботи парової турбіни і енергоблоку в цілому. За підтримання температури "гострої" пари відповідає система автоматичного регулювання

первинного перегріву. Найбільш надійним і простим способом точного регулювання є підтримання температури пари за допомогою пароохолоджувачів.

В загальноприйнятій схемі АСР температури первинної пари регулятор отримує основний сигнал за відхиленням температури на виході КПП II і впливає на витрату води на впорскування. Додатковий сигнал є пропорційним швидкості зміни температури в проміжній точці (безпосередньо після впорскування). Як диференціатор використовується реально-диференціююча ланка. В усталеному режимі додатковий сигнал зникає.

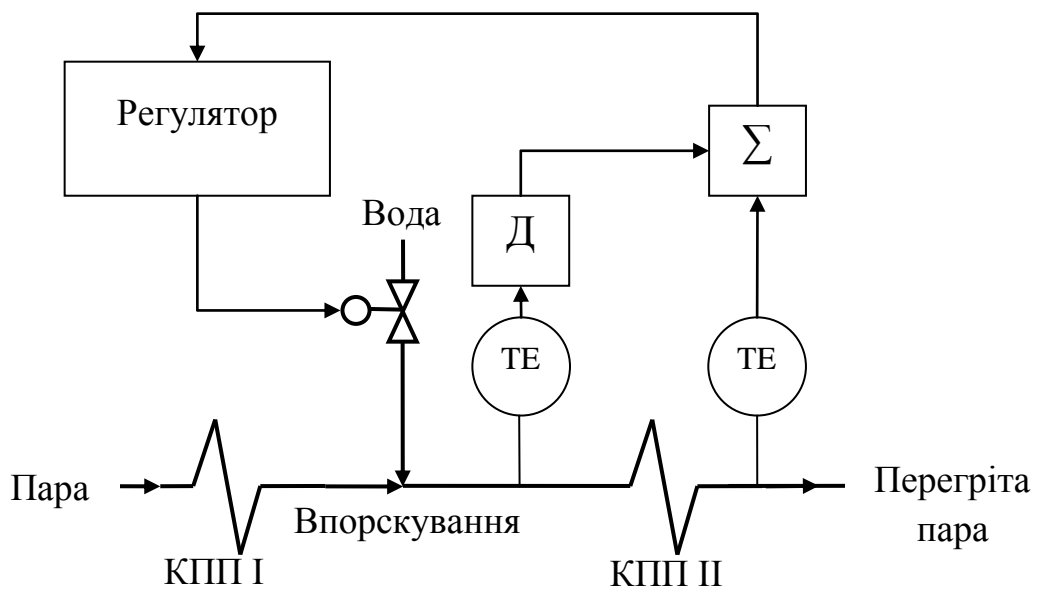


Рис. 4.11. Узагальнена двохімпульсна схема регулювання первинного перегріву пари

Вимоги до регулювання температури первинної пари дуже високі: при температурі в  $545^{\circ}\text{C}$  дозволяється відхилення не більше  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ . Динамічні характеристики пароперегрівачів різні за каналами збурення і регулювання, але мають спільну властивість – значну інерційність. На основі [11, 102, 103] нижче наведені моделі ділянок парового тракту первинного перегріву у вигляді функцій передачі. Для температури в проміжній точці (випереджаючий сигнал):

$$W_{sun}(s) = \frac{0.45e^{-7s}}{(11s+1)(5.4s+1)} \quad (4.5)$$

Для температури після пароперегрівача (інерційний сигнал):

$$W_{in}(s) = \frac{0.61e^{-20s}}{(96s+1)(48s+1)} \quad (4.6)$$

Функція передачі диференціатора для випереджаючої ділянки має вигляд:

$$W_{Д} = \frac{0.26 \cdot 13.9s}{13.9s+1} = \frac{3.62s}{13.9s+1} \quad (4.7)$$

Налаштування двоканального нечіткого контролера наступні:

1.  $e \in [-15;15]$ ;
2.  $de/dt \in [-0.4;0.4]$ ;
3.  $imp \in [-8;8]$ ;
4.  $pause \in [7;100]$ ;
5. стала часу ВМ 63 с.

База правил і лінгвістичні терми є аналогічними до контролера АСР температурним режимом.

Проведене порівняння (рис. 4.13) НІЛ-моделювання з системою на базі двоканального нечіткого контролера, побудованого за допомогою програмного пакету Fuzzy Logic Toolbox в Matlab. Структурна схема імітаційного моделювання аналогічна до попереднього підрозділу (див рис. 4.9).

Як видно з рис. 4.13, перехідні процеси за обом каналами практично співпадають, похибка не перевищує 3.7%. Це свідчить про точність реалізації алгоритму нечіткого виводу в промисловому контролері. Відмінність в сигналах керування пояснюється методом дефазифікації – в контролері використовується наближення методу центру ваги, яке характеризується обмеженою кількістю точок на діапазоні вихідної змінної. В даному прикладі діапазон тривалості імпульсу розбитий на 120 проміжків, а діапазон тривалості пауз розбитий на 270 проміжків.

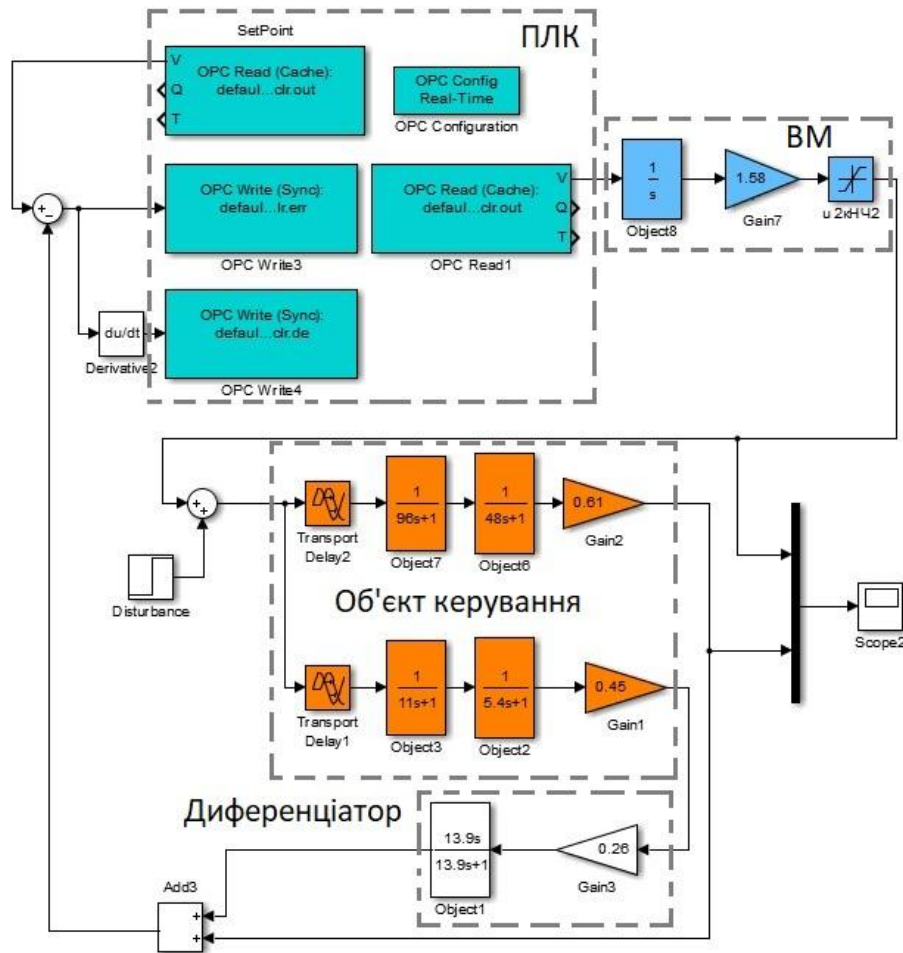


Рис. 4.12. Модель імітаційного моделювання в Matlab/Simulink

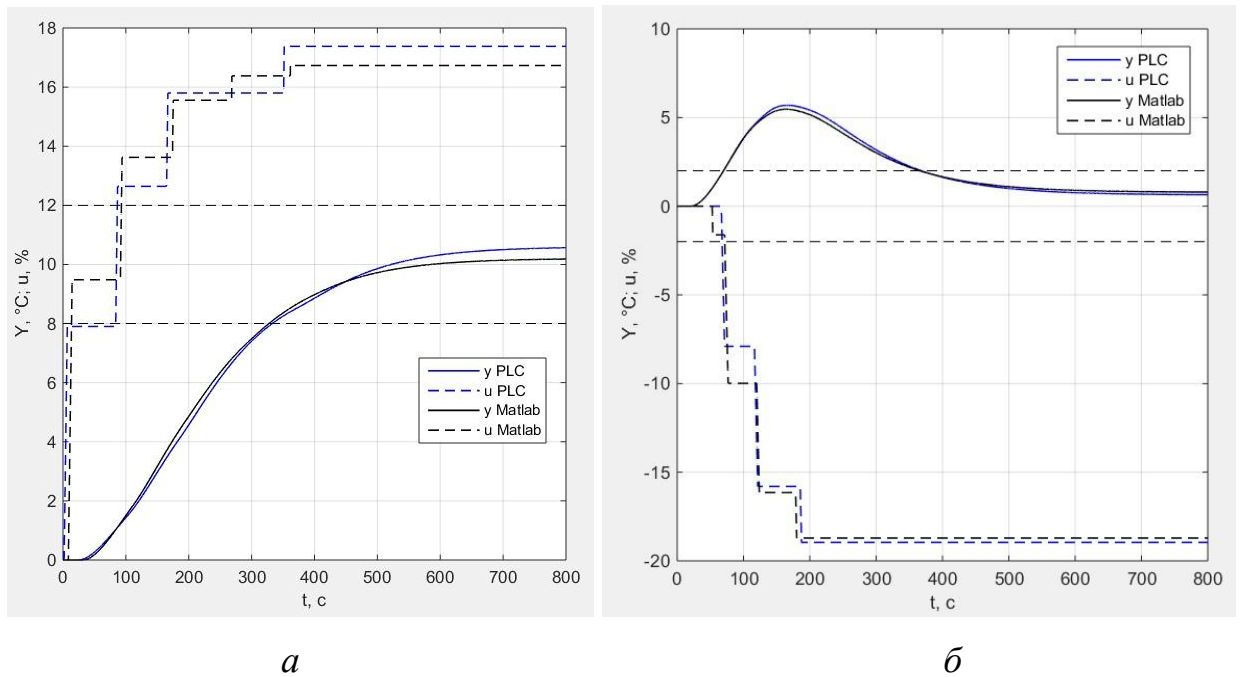


Рис. 4.13. Порівняння роботи апаратного ПЛК з моделлю в Matlab,  
*a* – завдання, *б* – збурення, *y* – змінна, що регулюється, *u* – сигнал керування

Таблиця 4.1

## Показники якості АСР температури первинної пари

Показник якості	Завдання	Збурення
Динам. похиб., °С	0	5.6
Час рег., с	404	353
Кількість включень ВМ	4	3

При синтезі промислових систем керування не достатньо забезпечити задані показники якості, акцент також робиться на робастності систем, тобто здатності систем володіти заданими якостями при неточності моделі керування [100].

Оцінку робастності системи будемо проводити ґрунтуючись на припущенні, що параметри і характеристики контролера і ВМ не змінюються в процесі експлуатації котлоагрегату, тоді як динамічні характеристики пароперегрівачів можуть змінюватись [100]. Змінюючи параметри моделі на  $\pm 20\%$  [104] при фіксованих налаштуваннях контролера отримаємо перехідні процеси в системі керування (див. рис. 4.14 -рис. 4.16) і розрахуємо їх прями показники якості.

Для числового вираження робастності системи скористаємося відносним показником чутливості  $\delta$ :

$$\delta = \frac{\frac{|X - X_{opt}|}{X_{opt}}}{\frac{|Y - Y_{opt}|}{Y_{opt}}}, \quad (4.8)$$

де  $X_{opt}$  – значення обраного показника якості в номінальному режимі,

$X$  – значення показника якості при невизначеностях (наприклад, при зміні параметра об'єкта),

$Y_{opt}$  – оптимальне значення параметра об'єкта,

$Y$  – змінене значення параметра об'єкта.

Система вважається робастною, якщо відносний коефіцієнт чутливості (4.8) не перевищує значення одиниці.

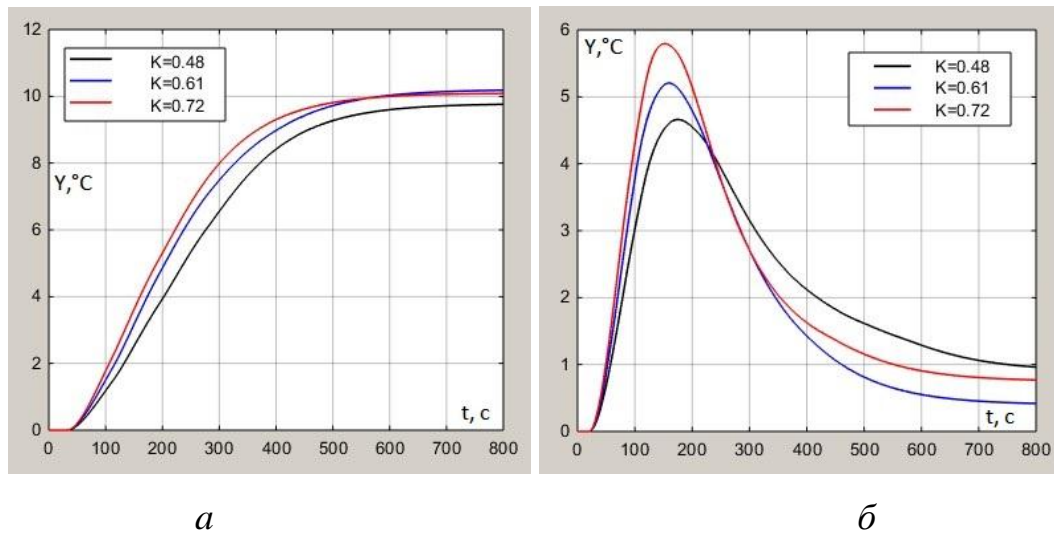


Рис. 4.14. Дослідження на робастність при зміні коефіцієнту підсилення об'єкта: *a* – завдання, *б* – збурення

В Таблиця 4.2 зведені розраховані значення відносно показника чутливості  $\delta$ . Для всіх випадків його значення є меншим одиниці, тому можна констатувати, що спроектована АСР температури первинної пари є робастною.

Таблиця 4.2

Значення показника чутливості  $\delta$

Показник якості	+20%						-20%					
	Завдання			Збурення			Завдання			Збурення		
	k	T	tau	k	T	tau	k	T	tau	k	T	tau
Динам. похиб., $^\circ\text{C}$	-	-	-	0.64	0.05	0.32	-	-	-	0.5	0.18	0.05
Час рег., c	0.49	0.32	0.03	0.19	0.82	0.19	0.62	0.3	0.09	0.89	0.2	0.82
IAE	0.42	0.89	0.18	0.88	0.78	0.62	0.76	0.13	0.03	0.86	0.65	0.98

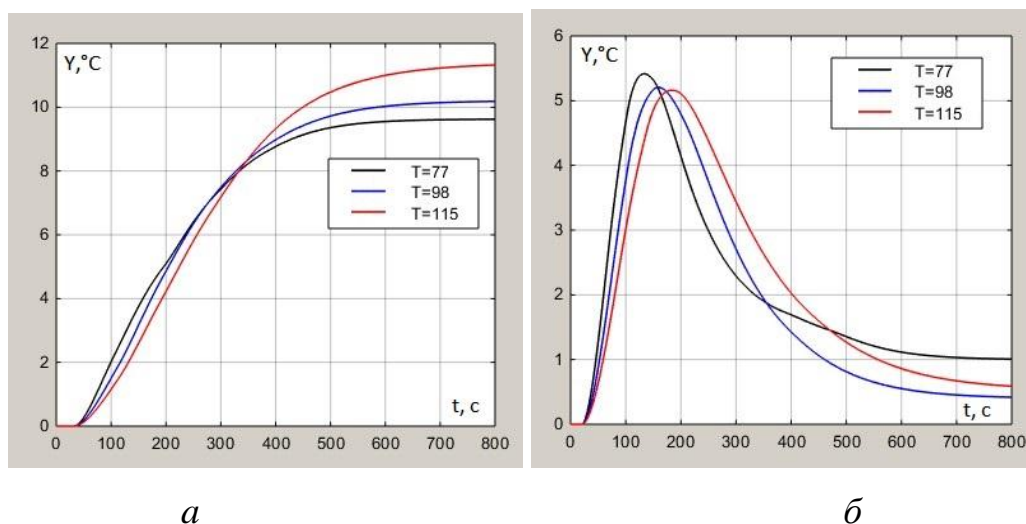


Рис. 4.15. Дослідження на робастність при зміні сталої часу:  
*a* – завдання, *б* – збурення

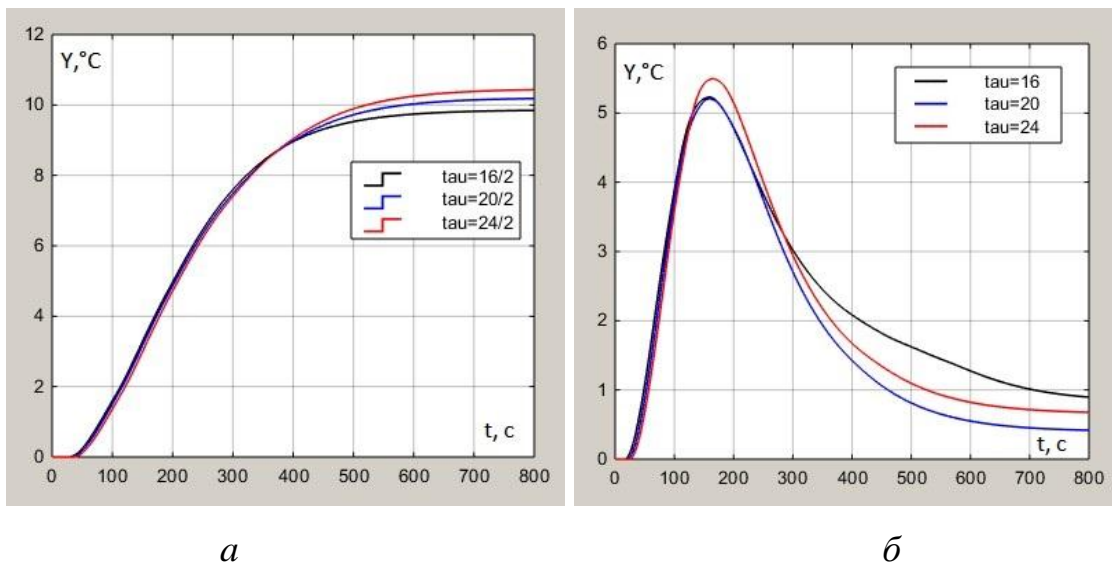


Рис. 4.16. Дослідження на робастність при зміні коефіцієнту підсилення об'єкта: *a* – завдання, *б* – збурення

#### 4.6. Висновки за розділом 4

Розглянуто реалізацію програмно-апаратної системи керування з використанням відомостей про характеристики об'єкта керування на базі програмованого логічного контролеру. Наведено методіку налаштування запропонованої системи. Для керування температурним режимом котлоагрегату ТЕС розроблена програма мовою FCL стандарту ІЕС 61131-7 для фази блоків двоканального нечіткого контролера. З метою переносимості рішень на платформи різних виробників ПЛК мовою ST стандарту ІЕС 61131-3 реалізовано алгоритм нечіткого виводу Мамдані, за яким розраховуються значення тривалості імпульсів і пауз, а також програмно реалізована структура двоканального нечіткого контролера. Виконано порівняльне моделювання у реальному масштабі часу стандартного і нового контуру регулювання з двоканальним нечітким контролером. Обробка записів даних підтвердила точність реалізації алгоритму нечіткого виводу в промисловому контролері а також збільшення ефективності регулювання за критерієм зменшення включень регулюючої апаратури.

Досліджено систему на робастність. При варіації параметрів моделі  $\pm 20\%$  відносний показник чутливості не перевищував значення одиниці, що свідчить про наявність робастних властивостей у системи керування.

Додатковим результатом виконаної роботи (окрім покращення динаміки регулювання) є підвищення економічності роботи даного технологічного об'єкту за рахунок кращого регулювання теплового навантаження, а саме точної підтримки заданого значення температури первинної пари на виході з котла. Підвищена ефективність роботи системи регулювання первинного перегріву пари, так як були усунені небажані максимальні викиди температури водопарової суміші у проміжних точках котла, що можуть привести до ушкодження найбільш термічно напружених поверхонь нагрівання, паропроводу та турбіни. Також були усунені можливі зниження температури пари від заданого значення, які становлять небезпеку для останніх ступенів турбіни внаслідок підвищення вологості пари.

Поряд із покращенням динаміки регулювання, досягається також додатковий позитивний ефект у вигляді зменшення зносу елементів обладнання виконуючих пристроїв (клапанів, приводів та ін.). Технічна реалізація пропонованого двоканального контролера не потребує додаткових датчиків, а канали регулювання реалізовані програмними засобами АСУТП.



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ЗА РОБОТОЮ

У роботі вирішена важлива наукова і технічна задача – підвищення якості регулювання параметрів інерційних контурів котлоагрегата теплової електростанції, що функціонує в маневрових режимах зміни навантаження, шляхом вдосконалення структури алгоритму регулювання і реалізації двоканальної структури контролера на базі нечіткої логіки з введенням додаткового інформаційного сигналу за навантаженням.

1. Застосування двоканального нечіткого контролера в інерційних контурах регулювання котлоагрегату забезпечує зменшення динамічного відхилення на 12%, зменшення часу регулювання при компенсації збурення в середньому на 30%, покращує інтегральні показники якості на 20-50% в умовах зміни навантаження та зменшує сумарне переміщення виконавчого механізму в порівнянні з класичними рішеннями на базі ПІД-регуляторів, що забезпечує збільшення терміну служби основного обладнання і економію енергоресурсів.

2. Порівняльне дослідження роботи двоканального нечіткого контролера і ПІД- регулятора показало, що по каналу завдання при номінальному навантаженні нечіткий контролер має менший час регулювання – 560 с, що на 12% менше в порівнянні з ПІД, при цьому кількість включень регулятора є мінімальною і складає 2, відтворюючи сигнал керування, близький до оптимального. За каналом збурення динамічна похибка в схемі з двоканальним нечітким контролером складає 5.8°C, що на 22% менше ніж в схемі ІМС, час регулювання становить 536 с, на 31% менше ніж з ІМС-регулятором.

3. Проведено аналіз відомих підходів та структур систем керування для інерційних об'єктів, показані недоліки відомих рішень для практичного застосування на теплоенергетичному обладнанні, що полягають у чутливості систем до зміни динамічних властивостей агрегатів та складності проведення адаптації.

4. На основі отриманих експериментальних даних розроблено математичні моделі контурів регулювання температурного режиму пароводяного тракту у вигляді функцій передачі для двох крайніх значень навантаження енергоблоку – 225МВт 300 МВт. Виявлено значну нелінійність динамічних характеристик об'єкта керування залежно від навантаження.

5. Проведено порівняльний аналіз функціонування класичного fuzzy ПД регулятора і діями оператора-технолога при керуванні процесом в ручному режимі на прикладі типового температурного об'єкту. Виявлені принципові відмінності в алгоритмах керування. Дій оператора формують більш досконалий, близький до оптимального сигнал керування.

6. Запропоновано двоканальну структуру контролера. Описана структура двоканального fuzzy-контролера може використовуватися для зниження коливальності і організації процесу керування, близького до ручного керування досвідченого оператора-технолога. Дана двоканальна структура дозволяє органічно реалізувати такий спосіб керування, при якому всі значення керуючого впливу відповідають певним етапам перехідного процесу (розгону, гальмування, корекції).

7. Двоканальна структура нечіткого контролера збільшує гнучкість при формуванні сигналу керування на об'єкт. Завдяки наявності двох окремих блоків розмежовуються задачі форсованого керування на початковій стадії перехідного процесу і стабілізації вихідної величини на завершальній стадії. В першому випадку досягаються бажані показники якості перехідного процесу, а в другому – забезпечується необхідний запас стійкості системи автоматичного керування.

8. Розроблена методика оцінки стійкості системи керування з двоканальним нечітким контролером. Дана методика надає зручний спосіб оцінки стійкості нелінійної системи керування шляхом приведення її до еквівалентної схеми з адаптивним інтегральним регулятором.

9. Проведено синтез двоканального нечіткого контролера для керування температурою в проміжній точці прямого котлоагрегату на

основі отриманий математичних моделей. Визначені необхідні вхідні змінні, їх діапазони, кількість і вид лінгвістичних термів. Отримані аналітичні залежності функцій належності вхідних і вихідних змінних. Розроблено базу правил для обох блоків нечіткої логіки двоканального fuzzy контролера.

**ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Халатов А.А. Энергетика України: сучасний стан і найближчі перспективи [Текст]/ А.А. Халатов // Вісник НАН України – ISSN 1027-3239. – 2016. – №6. – С.53–61.
2. Черноусенко О.Ю. Стан енергетики України та результати модернізації енергоблоків ТЕС [Текст]/ О.Ю. Черноусенко // Проблеми загальної енергетики – ISSN 1562-8965. – 2014. – 4 (39). – С.20–28.
3. Коновалов, М.А. Проблемы автоматизации инерционных теплоэнергетических объектов. — Киев, «Феникс», 2009г. — 309 с.
4. Принципиальные схемы паровых котлов и топливоподачи: учебное пособие/ А.В. Волощенко, В.В. Медведев, И.П. Озерова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 100 с.
5. Ключев А. С. Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов [Текст] / Ключев А. С., Товарнов А. Г. – М. : Энергия, 1970. – 280 с.
6. Теория автоматического управления: учебник для вузов / В.Я. Ротач. – 5-е изд., перереб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с., ил.
7. Таламанов С.А. Совершенствование методологии автоматизации настройки систем регулирования в составе АСУТП тепловых электростанций [Текст] : Автореферат дисс. д-ра техн. наук: 05.13.06 / С.А. Таламанов. – Иваново. – 2006. - 38 с.
8. Ковриго Ю.М. Модернизация системы управления тепловой нагрузкой прямоточного котлоагрегата ТЭС с использованием динамического корректора / Ю. М. Ковриго, М. А. Коновалов, А. С. Бунке // ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, 2012, № 10, с. 1–8.
9. Емельянов С.В. Новые типы обратной связи. Управление при неопределенности [Текст] / С.В. Емельянов, С.К. Коровин. – М. : Наука; Физматлит, 1997. - 352 с.

10. Shorokhov V.A. Development of a mathematical model simulating the multiply connected automatic control system of a coal-fired power unit equipped with a direct-injection dust feed system [Текст] / A.P. Smol'nikov, D.A. Kurochkin, et al. // Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 56. - № 10. – P. 868-874.
11. Плетнев Г. П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учебник для студентов вузов. – 4-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 352 с., ил.
12. Баган Т. Г. Робастне керування інерційними контурами котлоагрегату зі змінними параметрами на базі внутрішньої моделі : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". Київ, 2016. 152 с.
13. Артюх С. Ф. Основы автоматизированных систем управления энергогенерирующими установками электростанций [Текст] / Артюх С. Ф., Дуэль М. А., Шелепов И. Г. – Х. : Знание, 1998. – 324 с.
14. Деякі напрямки заощадження енергоресурсів котельними агрегатами [Текст] / Л. І. Янко, Й. С. Мисак, М. О. Гут, Є. М. Якимів, Т. Ю. Кравець // Энергетика и электрификация. – 1999. – №9. – С. 9–12.
15. Дуэль М. А. О технико-экономической эффективности АСУ энергоблоками [Текст] / Дуэль М. А., Дуэль Т. Л. // Энергетика и электрификация. – 2001. – №1. – С. 21–28.
16. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology //IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4. P. 5599-576.
17. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID control. – ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006. — 460 p.
18. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID controller tuning rules. 3<sup>rd</sup> ed. ICP, 2010.
19. Ю.М. Ковриго, А.С.Бунке, П.В. Новіков / Применение метода динамической коррекции в системах регулирования инерционными

- технологическими объектами // – Scientific Science Rise №1/2(18)2016 – с. 21-27.
20. Денисенко В.В. ПИД–регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 1. [Текст] / В.В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2007. – №1. – С.66–74.
21. Фоменко Б.В. Підвищення ефективності систем автоматичного регулювання за рахунок врахування обмежень керованого сигналу [Текст] / Б.В. Фоменко, О.В. Степанець, О.С. Бунке // Вестник национального технического университета "ХПИ", Тематический выпуск "Новые решения в современных технологиях". - 2010. - № 57. - С. 177-183.
22. Фоменко Б.В. Учет ограничений на выходную переменную в системе регулирования температуры перегрева пара [Текст] / Б.В. Фоменко, Д.Р. Корниенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. - №3/4 (39). - С. 21-24.
23. Li Y., Ang K.H, Chong G.C.Y. Patents, software, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art // IEEE Control Systems Magazine. Feb.2006. P. 41-54.
24. Åström K.J., Hägglund T. PID controllers: Theory, design, and tuning. NC: Instrument Society of America, Research Triangle Park, 1995.
25. Astrom K.J. Advanced PID Control [Текст] / Astrom K.J., Hagglund T. - Instrumentation, Systems, and Automation Society, USA, 2006. – 250 p.
26. Astrom K.J. Control System Design. Lecture notes for ME 155A [Текст] / Astrom K.J. - Department of Automatic Control Lund Institute of Technology, Sweden, 2002. – 168 p.
27. Astrom K.J. Feedback Systems: An introduction for scientists and engineers [Текст] / Astrom K.J., Murray R.M. - Princeton University Press, USA, 2008. – 285 p.

28. Åström K.J. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margin [Текст] / K.J. Åström, T. Hägglund // *Automatica*. – №20. – 1984. – P. 645-651.
29. Szentannai P. Power Plant Applications of Advanced Control Techniques [Текст] / Szentannai P., Hannig N. (Eds.) - Verlag Process Engineering, 2010. - 500 p.
30. Shamsuzzoha M. IMC-PID controller design for improved disturbance rejection of time-delayed processes [Текст] / M. Shamsuzzoha, M. Lee // *Ind Eng Chem Res*. – №46(7). – 2007. – P. 2077–2091.
31. Ш.Е. Штейнберг Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования / Штейнберг Ш.Е., Серёжин Л.П., Залуцкий И.Е., Варламов И.Г. // *Промышленные АСУ и контроллеры*. - 2004. - № 7. - С. 1-7.
32. N. Abe and K. Yamanaka, , SICE Annual Conference in Fukui, pp. 1383-1387, 2003.
33. Денисенко В.В. ПИД–регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 2. [Текст]/ В.В. Денисенко // *Современные технологии автоматизации*. – 2007. – №1. – С.78–88.
34. Zhuang M. Automatic tuning of optimum PID controllers [Текст] / M. Zhuang, D.P. Atherton // *IEE Proc. Part D. Control Theory Appl*. – №140(3). – 1993. – P. 216-224.
35. Ермолович Д.А. Управление объектами с большим запаздыванием [Электронный ресурс] / Д.А. Ермолович, А.П. Мовчан. - Режим доступа : [http://www.rusnauka.com/12\\_ENXXI\\_2010/Tecnic/64945.doc.htm](http://www.rusnauka.com/12_ENXXI_2010/Tecnic/64945.doc.htm) 10.09.2014.
36. Astrom K.J. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time [Текст] / Astrom K.J., Hang C.C., Lim B.C. // - *IEEE Transactions on Automatic Control*. — vol. 39, Issue 2. — Feb 1994. — P. 343 - 345.

37. Åström K. J. Advanced PID Control [Текст] / K. J. Åström, T. Hägglund. – USA: Instrument Society of America, Research Triangle Park, 2006. – 460 p.
38. Foley M. W. A comparison of PID controller tuning methods [Текст] / M. W. Foley, R. H. Julien, B. R. Copeland. // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2005. – №4. – P. 712-722.
39. Foley M. W. Comparison of PI controller tuning methods [Текст] / M. W. Foley, N.R. Ramharack, B. R. Copeland. // Ind. Eng. Chem. Res. – 2005. – №44 (17). – P. 6741-6750.
40. Lin M.G. A comparative study of recent/popular PID tuning rules for stable, First-Order Plus Dead Time, Single-Input Single-Output processes [Текст] / M.G. Lin, S. Lakshminarayanan, G.P. Rangaiah. // Ind. Eng. Chem. Res. – 2008. – №47(2). – P. 344-368.
41. Taiwo O. Comparison of four methods of on-line identification and controller tuning [Текст] / O. Taiwo // IEE Proc., Control Theory Appl. – 2006. – №140(5). – P. 323-327.
42. Comparison of some well-known PID tuning formulas. Wen Tan, Jizhen Liua, Tongwen Chenb, Horacio J. Marquez - Computers and Chemical Engineering 30 (2006) 1416–1423.
43. Ротач В. Я. Инженерные методы теории автоматического управления технологическими процессами [Текст] / В.Я. Ротач // Теплоэнергетика. – 1991. – №9. – С. 12–16.
44. Кулаков Г.Т. Экспресс–методы расчёта параметров настройки АСР теплоэнергетических объектов [Текст] / Г.Т. Кулаков, Ю.В. Мелаек // Изв. вузов. Энергетика. – 1994. – №5–6. – С. 18-21.
45. Leva A. On the IMC-based synthesis of the feedback block of ISA-PID regulators [Текст] / A. Leva, A.M. Colombo // Trans. Inst. Meas. Control. – 2004. – №26(5). P. 417-440.



- 46.Ковриго Ю.М. Методика налаштування  $H_{\infty}$ -ПІД регулятора для об'єктів із запізнюванням [Текст] / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – Київ. – 2013. – № 1. – С. 27-33.
- 47.Ковриго Ю.М. Обеспечение робастности в АСУ теплоэнергетическими объектами [Текст] / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган, А.С. Бунке // Теплоэнергетика – Москва. – 2014. – № 3. – С. 9-14.
- 48.Ковриго Ю.М. Обеспечение робастного управления в системах регулирования инерционными теплоэнергетическими объектами [Текст] / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган, А.С. Бунке // Теплоэнергетика.- 2014. - № 3. - С. 9-14.
- 49.Изерман Р. Цифровые системы управления. — М. : Мир, 1984. — 541 с.
- 50.Ковриго Ю.М. Система регулювання тепловим навантаженням котла ТПП-210А з використанням регулятора з внутрішньою моделлю [Текст] / Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко, О.В. Степанець // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2010. – № 3/10 (45). – С. 4-7.
- 51.Ковриго Ю.М. Модернізація АСР теплового навантаження з використанням методу динамічної корекції [Текст] / Ю.М. Ковриго, А.С. Бунке // Наукові праці Національного університету харчових технологій (НУХТ). - 2013. - № 48. – С. 29-36.
- 52.Ковриго Ю.М. Методи забезпечення стійкості систем регулювання на базі ПІ та ПІД регуляторів [Текст] / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган, О.С. Бунке // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2013. - №3/3 (63). - С. 58-63.
- 53.Новіков П.В. Застосування методу динамічної корекції для керування інерційними теплоенергетичними об'єктами / П.В.Новіков, Ю.М.Ковриго // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: XIV міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ. : мат. конф.– К., 2016.
- 54.Новіков П.В. Застосування динамічного коректора в каскадних системах при керуванні інерційними об'єктами / П.В.Новіков,

- Ю.М.Ковриго // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: XII міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ. : тези доп. – К., 2014.– С. 123.
- 55.Новіков П.В. Method of tuning of regulator with using dynamic corrector / П.В.Новіков, Ю.М.Ковриго // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: XI міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ. : тези доп. – К., 2013.
- 56.Новіков П.В. Застосування інтегро-диференціюючої ланки в схемі з динамічною корекцією вихідного сигналу регулятора / П.В. Новіков, Є.В. Васильченко, В.А. Бондарева // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: XVI міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ. : мат. конф. – К., 2018.
- 57.Коновалов М.А., Бунке А.С. Основы новой стратегии синтеза систем оптимального управления. — Киев, «Феникс», 2014. — 280 с.
- 58.Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учебное пособие / Кулаков Г.Т. [и др.]; под ред. Кулакова Г.Т. — Минск: Вышэйшая школа, 2017. — 238 с.: ил. — ISBN 978-985-06-2800-8.
- 59.Пат. 44799 UA. Регулирующий микропроцессорный контроллер / Ю.М. Ковриго, М.А. Коновалов, И.М. Голинко, А.С. Бунке // Промышленная собственность. 2009. № 19.
- 60.Патент України на корисну модель №107383UA. Регулятор з динамічним коректором для об'єктів з часовою затримкою/ Ю.М. Ковриго, П.В. Новіков.— № u201506730; заявл. 07.07.2015; опубл. 10.06.2016. – Бюл. № 11/2016.
- 61.Shinsky F.G. PID-deadtime control of distributed processes // Control Engng Practice. 2001. V. 9. P. 1177—1183.
- 62.Мовчан А.П. Система регулювання теплової навантажувальної котла з використанням регулятора з перемінною структурою [Текст] / А.П.

- Мовчан, К.Ю. Удовиченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/8(56). - С. 68–71.
63. Бунке О.С. Проблемы та передумови вдосконалення автоматизації процесів управління ТЕЦ [Текст] / О.С. Бунке, Р.П. Саков, П.В. Новіков // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки", Луцьк, 2018, Випуск № 61.– С. 20-25.
64. Кулаков, Г. Т. Методика расчета экономической эффективности внедрения инновационных систем автоматического регулирования ТЭС (Часть первая) [Текст] / Г. Т. Кулаков, В. В. Кравченко, Ю. В. Макошко // Наука и техника : международный научно-технический журнал. – 2012. – № 5. – С. 92– 97.
65. Кулаков, Г. Т. Методика расчета экономической эффективности внедрения инновационных систем автоматического регулирования ТЭС (Часть вторая) [Текст] / Г. Т. Кулаков, В. В. Кравченко, Ю. В. Макошко // Наука и техника : международный научно-технический журнал. – 2013. – № 2. – С. 77– 82.
66. Ковриго Ю.М. Адаптивное управление теплоэнергетическими процессами [Текст] / Ю.М. Ковриго, А.П. Мовчан, И.А. Полищук, Б.В. Фоменко // Автоматика. Автоматизация. Электротехнічні комплекси та системи. Херсонський національний технічний університет. - №2(20). - 2007. – С. 147-156.
67. Ковриго Ю.М. Повышение эффективности регулирования котлов путем учета технологических ограничений [Текст] / Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко, А.С. Бунке // Теплоэнергетика. - 2012. - №2. - С. 58–63.
68. Silva R.N. Adaptive regulation of super-heated steam temperature: a case study in an industrial boiler [Текст] / R.N. Silva et al. // Control Engineering Practice. – 2000. – Vol. 8. - Issue 12. – P. 1405-1415.
69. Tao Liu. Industrial Process Identification and Control Design: Using a Step/Relay Test [Текст] / Tao Liu, Furong Gao // UK, London: Springer (in AIC series). – Ch. 7. – 2011. – P. 243-276.

70. Лубенцов В.Ф. Интеллектуальная система управления с переменной структурой на основе нечеткой логики [Текст] / В.Ф. Лубенцов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12 (часть 2) – С. 252-257.
71. Масютина Г.В. Структурно-параметрический синтез адаптивной системы управления на основе нечеткой логики [Текст] / Г.В. Масютина, В.Ф. Лубенцов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2010. – №5(106). – С. 165-170.
72. Методы робастного, нейро-нечёткого и адаптивного управления: Учебник / Под ред. Н.Д. Егупова, 22е изд. — М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. — 744 с.
73. Новиков С. И. Методы нечеткой логики в задачах автоматизации тепловых процессов электростанций [Текст] / С. И. Новиков, В. Р. Шахнович, А. В. Сафронов // Вестник ИГЭУ. - ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2010. - № 4. - С. 72-75. - ISSN 2072-2672.
74. Vova, S., Codara, P., Maccari, D., Marra, V. A., Logical analysis of Mamdani-type fuzzy inference, I theoretical bases, IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona, pp. 1-8, 2010.
75. Архангельский В. И. Системы функции-управления / В.И. Архангельский, И.М. Богаенко, Г.Г. Грабовский, Н.А. Рюмшин. — К.: Техника, 1997. — 208 с.
76. Ковриго Ю.М. Fuzzy-регулятор для керування інерційними технологічними параметрами котлоагрегату ТЕС / Ю.М. Ковриго, О.С.Бунке, П.В. Новіков / Nauka i Studia NR 8 (169) 2017 – с. 76-84.
77. Harpreet Singh, Madan M. Gupta, Thomas Meitzler, et al., “Real-Life Applications of Fuzzy Logic,” Advances in Fuzzy Systems, vol. 2013, Article ID 581879, 3 pages, 2013.
78. Kosko B. Fuzzy Systems as Universal Approximators // IEEE Trans. on Computers. 1994. Vol. 43. №11. P.1329-1333.

79. Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide, Version 2.1 The MathWorks, Inc., 2001.
80. Штіфзон О.Й. Розробка адаптуючого fuzzy-logic пристрою для керування в умовах параметричної нестационарності / О.Й. Штіфзон, П.В. Новіков, Т.Г. Баган / Східно-європейський журнал передових технологій – Харків, 2018. – Том 1 № 2.
81. Штіфзон О.Й. Использование алгоритмов нечеткой логики для управления объектом с параметрической непостоянностью [Текст] / О.Й. Штіфзон, А.С. Бабич // Материали за 10-а международна научна практична конференция, «Найновитне научни постижения». – 2014. – Том 34. Технологии. София. – С. 46–52.
82. Стефани Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов [Текст] / Е. П. Стефани – М. : Энергия, 1972. – 377 с.
83. Radtke M. Zum Approximation linearer aperiodischer Übergangsfunktion. Zmsr. 1966. 6.
84. Бунке О.С. Дослідження методів апроксимації кривих розгону для синтезу АСР [Текст] / О.С. Бунке, А.В. Полюхович // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2012. - №2/10(56). - С. 39–41.
85. Свириденко В.П. Опыт модернизации схемы регулятора тепловой нагрузки котла ТПП-210А при работе на угольной пыли [Текст] / В.П. Свириденко, А.Б. Попутников // Энергетика и электрофикация. - 2001. – №4. – С. 20-23.
86. Гостев В. И. Проектирование нечетких регуляторов. – Санкт-Петербург: Изд. «БХВ-Петербург», 2011. – 416 с.
87. Свириденко В.П. Способ настройки двухконтурной автоматической системы регулирования (ДАСР) с дифференциатором по опережающему сигналу [Текст] / В.П. Свириденко // Энергетика и электрофикация. - 2018. – №3. – С. 27-37.

- 88.Биленко В.А. Анализ эффективности введения сложных законов преобразования дополнительных сигналов в многоконтурных автоматических системах регулирования энергоблоков [Текст] / В.А. Биленко, И.А. Шавочкин // Теплоэнергетика. – 2006. – № 4. - С. 57–65.
- 89.Биленко В.А. Многоконтурные автоматические системы регулирования с несколькими регулирующими воздействиями и их применение для поддержания температуры пара прямоточных котлов [Текст] / В.А. Биленко // Теплоэнергетика. – 2011. – № 10. - С. 51–59.
- 90.Новиков, С.И. Оптимизация автоматических систем регулирования теплоэнергетического оборудования [Текст]: учеб. пособие / С.И. Новиков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. Ч. 1.–108 с.– ISBN 5-7782-0637-2.
- 91.Ковриго Ю.М. Двоканальний нечіткий контролер для регулювання технологічних параметрів в умовах нестаціонарності динамічних характеристик об'єкта керування [Текст] / Ю.М. Ковриго, П.В. Новіков // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів.– Одеса, 2019. Том 11 № 1.– С. 4-13.
- 92.Новіков П.В. Fuzzy-контролер підтримання мікроклімату в приміщенні за значеннями індексу дискомфорту [Текст] / П.В. Новіков, О.В. Степанець, Р.П. Саков // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів.– Одеса, 2017. Том 10 № 4.– С. 76-83.
- 93.Новіков П.В. Контролер на базі системи нечіткого виводу для регулювання інерційних теплоенергетичних параметрів / П.В.Новіков, О.С.Бунке // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2017: IV міжнар. наук.-прак. конф. мол. уч, асп., і студ.: мат. конф.– К., 2017.– .С. 31-32.
- 94.Новіков П.В. Інтелектуальна система керування інерційними технологічними параметрами на базі fuzzy-регулятора / П.В.Новіков, О.С.Бунке // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: XV міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ. : мат. конф.– К., 2017.

95. Ion Iancu (2012). A Mamdani Type Fuzzy Logic Controller, Fuzzy Logic - Controls, Concepts, Theories and Applications, Prof. Elmer Dadios (Ed.), ISBN: 978-953-51-0396-7.
96. Штовба, С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику [Текст]: Монография / С.Д. Штовба. – Винница: Континент-Прим, 2013. – 198 с.
97. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH.– СПб.: БХВ-Петербург, 2005.– 736.
98. Белоглазов Д.А. Анализ методов устойчивости нечетких систем управления [Текст] / Д.А. Белоглазов, Е.Ю. Косенко – Известия ЮФУ. Технические науки – 2013. – С. 127-132.
99. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем автоматического управления. – М.: Энергия, 1969. – 208 с.
100. Гостев В. И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. – К.: Радиоаматор, 2008. – 972 с.
101. Деменков Н.П. Язык нечеткого управления / Н.П. Деменков // Промышленные АСУ и контроллеры. - 2005. - № 5. - С. 30-37.
102. Фонд экспериментальных динамических характеристик паровых котлов тепловых электрических станций [Текст] / Д.Ю. Тверской, И.Е. Харитонов, С.А. Таламанов, Ю.С. Тверской // Теплоэнергетика. – 2005. - № 10. – С. 32-35.
103. Бунке О. С. Автоматизація процесів керування інерційними контурами котлоагрегата теплової електростанції з використанням методу динамічної корекції : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". Київ, 2014. 174 с.
104. Klán P., R. Gorez, PI Controller Design for Actuator Preservation., IFAC Proceedings Volumes, Volume 41, Issue 2 (2008), pp. 5820-5824.

## ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

Таблиця А.1

База правил блоку нечіткої логіки F1 для навантаження  $N=75\%$ 

		Сигнал помилки $e$								
		HHNE	HNE	MNE	LNE	ZE	LPE	MP	HPE	HHPE
Швидкість зміни помилки $de/dt$	HHNDE	HNI	HNI	LNI	MNI	MNI	LNI	ZI	ZI	ZI
	HMNDE	MNI	MNI	LNI	LNI	LNI	LLNI	ZI	ZI	ZI
	HNDE	LNI	LNI	LNI	LNI	ZI	ZI	ZI	ZI	ZI
	MNDE	LNI	LNI	LLNI	LLNI	ZI	ZI	ZI	ZI	ZI
	LNDE	LNI	LNI	LLNI	LLNI	ZI	ZI	ZI	ZI	ZI
	ZDE	LNI	LNI	LLNI	LLNI	ZI	LLPI	LLPI	LPI	LPI
	LPDE	ZI	ZI	ZI	ZI	ZI	LLPI	LLPI	LPI	LPI
	MPDE	ZI	ZI	ZI	ZI	ZI	LLPI	LLPI	LPI	LPI
	HPDE	ZI	ZI	ZI	ZI	ZI	LPI	LPI	LPI	LPI
	HMPDE	ZI	ZI	ZI	LLPI	LPI	LPI	LPI	MPI	MPI
HHPDE	ZI	ZI	ZI	LPI	MPI	MPI	LPI	HPI	HPI	

Таблиця А.2

База правил блоку нечіткої логіки F2 для навантаження  $N=75\%$ 

		Сигнал $e$								
		HHNE	HNE	MNE	LNE	ZE	LPE	MP	HPE	HHPE
Сиг- нал $de/dt$	HHNDE	VLP	VLP	VLP	LP225	LP225	VLP	VLP	VLP	VLP
	HMNDE	VLP	VLP	VLP	LP225	LP225	VLP	VLP	VLP	VLP
	HNDE	VLP	LP	LP	MP225	LP225	VLP	VLP	VLP	VLP
	MNDE	VLP	LP	LP	LP	LP225	LP	LP	LP	VLP
	LNDE	VLP	LP	LP	LP	LP225	LP	LP	LP	VLP
	ZDE	VLP	LP	LP	LP	LP225	LP	LP	LP	VLP
	LPDE	VLP	LP	LP	LP	LP225	LP	LP	LP	VLP
	MPDE	VLP	LP	LP	LP	LP225	LP	LP	LP	VLP
	HPDE	VLP	VLP	VLP	VLP	LP225	MP225	LP	LP	VLP
	HMPDE	VLP	VLP	VLP	VLP	LP225	LP225	VLP	VLP	VLP
HHPDE	VLP	VLP	VLP	VLP	LP225	LP225	VLP	VLP	VLP	



## ДОДАТОК Б

Функція фазифікації сигналу  $de/dt$ 

```

CASE lingvo_term_index OF
  1 : //HHNDE
    y1 := mf(x,-0.3,1,-0.2,1);
    y2 := mf(x,-0.2,1,-0.1,0);
    de_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  2 : //HMNDE
    y1 := mf(x,-0.2,0,-0.13,1);
    y2 := mf(x,-0.13,1,-0.06,1);
    de_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  3 : //HNDE
    y1 := mf(x,-0.08,0,-0.06,1);
    y2 := mf(x,-0.06,1,-0.045,1);
    y3 := mf(x,-0.045,1,-0.03,0);
    de_fuzzyfy_func := max(max(y1,y2),y3);
  4 : //MNDE
    y1 := mf(x,-0.045,0,-0.03,1);
    y2 := mf(x,-0.03,1,-0.015,0);
    de_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  5 : //LNDE
    y1 := mf(x,-0.03,0,-0.015,1);
    y2 := mf(x,-0.015,1,0,0);
    de_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  6 : //ZDE
    y1 := mf(x,-0.01,0,0,1);
    y2 := mf(x,0,1,0.01,0);
    de_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  7 : //LPDE
    y1 := mf(x,0,0,0.015,1);
    y2 := mf(x,0.015,1,0.03,0);
    de_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  8 : //MPDE
    y1 := mf(x,0.015,0,0.03,1);
    y2 := mf(x,0.03,1,0.045,0);
    de_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  9 : //HPDE
    y1 := mf(x,0.03,0,0.045,1);
    y2 := mf(x,0.045,1,0.06,1);
    y3 := mf(x,0.06,1,0.08,0);
    de_fuzzyfy_func := max(max(y1,y2),y3);
  10 : //HMPDE
    y1 := mf(x,0.06,0,0.13,1);
    y2 := mf(x,0.13,1,0.2,1);
    de_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  11 : //HHPDE
    y1 := mf(x,0.1,0,0.2,1);
    y2 := mf(x,0.2,1,0.3,1);
    de_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
ELSE
  de_fuzzyfy_func := 0;
END_CASE

```

## ДОДАТОК В

### Функція фазифікації сигналу $N$

```
CASE lingvo_term_index OF
  1 : //P75
    y1 := mf(x,75,1,85,1);
    y2 := mf(x,85,1,95,0);
    n_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  2 : //P100
    y1 := mf(x,85,0,95,1);
    y2 := mf(x,95,1,100,1);
    n_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
ELSE
  n_fuzzyfy_func := 0;
END_CASE
```

## ДОДАТОК Г

Функція фазифікації вихідного сигналу блоку формування імпульсів F1

```

CASE lingvo_term_index OF
  1 : //HNI
    y1 := mf(x,-4.2,1,-2.8,1);
    y2 := mf(x,-2.8,1,-1.75,0);
    imp_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  2 : //MNI
    y1 := mf(x,-2.8,0,-1.75,1);
    y2 := mf(x,-1.75,1,-0.9,0);
    imp_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  3 : //LNI
    y1 := mf(x,-1.75,0,-0.9,1);
    y2 := mf(x,-0.9,1,-0.3,0);
    imp_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  4 : //LLNI
    y1 := mf(x,-0.6,0,-0.3,1);
    y2 := mf(x,-0.3,1,-0.2,0);
    imp_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  5 : //ZI
    y1 := mf(x,-0.3,0,0,1);
    y2 := mf(x,0,1,0.3,0);
    imp_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  6 : //LLPI
    y1 := mf(x,0.2,0,0.3,1);
    y2 := mf(x,0.3,1,0.6,0);
    imp_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  7 : //LPI
    y1 := mf(x,0.3,0,0.9,1);
    y2 := mf(x,0.9,1,1.75,0);
    imp_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  8 : //MPI
    y1 := mf(x,0.9,0,1.75,1);
    y2 := mf(x,1.75,1,2.8,0);
    imp_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  9 : //HPI
    y1 := mf(x,1.75,0,2.8,1);
    y2 := mf(x,2.8,1,4.2,1);
    imp_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
ELSE
  imp_fuzzyfy_func := 0;
END_CASE

```

## ДОДАТОК Д

### Функція фазифікації вихідного сигналу блоку формування пауз F2

```
CASE lingvo_term_index OF
  1 : //LP225
    y1 := mf(x,10,1,25,0);
    pause_fuzzyfy_func := y1;
  2 : //MP225
    y1 := mf(x,10,0,30,1);
    y2 := mf(x,30,1,50,0);
    pause_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  3 : //VLP
    y1 := mf(x,25,0,60,1);
    y2 := mf(x,60,1,100,0);
    pause_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  4 : //LP
    y1 := mf(x,60,0,100,1);
    y2 := mf(x,100,1,135,0);
    pause_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  5 : //MP
    y1 := mf(x,100,0,135,1);
    y2 := mf(x,135,1,175,0);
    pause_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  6 : //HP
    y1 := mf(x,135,0,175,1);
    y2 := mf(x,175,1,210,0);
    pause_fuzzyfy_func := max(y1,y2);
  7 : //VHP
    y1 := mf(x,175,0,210,1);
    pause_fuzzyfy_func := y1;
ELSE
  pause_fuzzyfy_func := 0;
END_CASE
```

## ДОДАТОК Е

### КОД ФБ F1

```

for i := 1 TO 9 BY 1 DO
  ar_e[i] := 0;
  ar_e[i] := e_fuzzyfy_func(e,i);
end_for;

for i := 1 TO 11 BY 1 DO
  ar_de[i] := 0;
  ar_de[i] := de_fuzzyfy_func(de,i);
end_for;

for i := 1 TO 2 BY 1 DO
  ar_N[i] := 0;
  ar_N[i] := n_fuzzyfy_func(N,i);
end_for;

```

```

//// Error ////
HHNE := ar_e[1];
HNE := ar_e[2];
MNE := ar_e[3];
LNE := ar_e[4];
ZE := ar_e[5];
LPE := ar_e[6];
MPE := ar_e[7];
HPE := ar_e[8];
HHPE := ar_e[9];

```

```

//// Derivative Error ////
HHNDE := ar_de[1];
HMNDE := ar_de[2];
HNDE := ar_de[3];
MNDE := ar_de[4];
LNDE := ar_de[5];
ZDE := ar_de[6];
LPDE := ar_de[7];
MPDE := ar_de[8];
HPDE := ar_de[9];
HMPDE := ar_de[10];
HHPDE := ar_de[11];

```

```

//// Power ////
P75 := ar_N[1];
P100 := ar_N[2];
//// Out Impulse ////
HNI:=0;
MNI:=0;
LNI:=0;
LLNI:=0;
ZI:=0;
LLPI:=0;
LPI:=0;
MPI:=0;
HPI:=0;

```

```

(* RuleBase *)
//// HHNE P100 ////
HNI := conddisjun(HHNE,HNDE,P100,HNI);
HNI := conddisjun(HHNE,MNDE,P100,HNI);
LNI := conddisjun(HHNE,LNDE,P100,LNI);

```

```

LNI := conddisjun(HHNE,ZDE,P100,LNI);
ZI := conddisjun(HHNE,LPDE,P100,ZI);
ZI := conddisjun(HHNE,MPDE,P100,ZI);
LPI := conddisjun(HHNE,HPDE,P100,LPI);
//// HNE P75 ////
HNI := conddisjun(HNE,HHNDE,P75,HNI);
HNI := conddisjun(HNE,HMNDE,P75,HNI);
HNI := conddisjun(HNE,HNDE,P75,HNI);
HNI := conddisjun(HNE,MNDE,P75,HNI);
HNI := conddisjun(HNE,LNDE,P75,HNI);
HNI := conddisjun(HNE,ZDE,P75,HNI);
HNI := conddisjun(HNE,LPDE,P75,HNI);
ZI := conddisjun(HNE,MPDE,P75,ZI);
ZI := conddisjun(HNE,HPDE,P75,ZI);
ZI := conddisjun(HNE,HMPDE,P75,ZI);
ZI := conddisjun(HNE,HHPDE,P75,ZI);
//// HNE P100 ////
HNI := conddisjun(HNE,HNDE,P100,HNI);
MNI := conddisjun(HNE,MNDE,P100,MNI);
LNI := conddisjun(HNE,LNDE,P100,LNI);
LNI := conddisjun(HNE,ZDE,P100,LNI);
ZI := conddisjun(HNE,LPDE,P100,ZI);
LPI := conddisjun(HNE,MPDE,P100,LPI);
LPI := conddisjun(HNE,HPDE,P100,LPI);
//// MNE P75 ////
HNI := conddisjun(MNE,HHNDE,P75,HNI);
HNI := conddisjun(MNE,HMNDE,P75,HNI);
MNI := conddisjun(MNE,HNDE,P75,MNI);
MNI := conddisjun(MNE,MNDE,P75,MNI);
MNI := conddisjun(MNE,LNDE,P75,MNI);
MNI := conddisjun(MNE,ZDE,P75,MNI);
MNI := conddisjun(MNE,LPDE,P75,MNI);
ZI := conddisjun(MNE,MPDE,P75,ZI);
LLPI := conddisjun(MNE,HPDE,P75,LLPI);
MPI := conddisjun(MNE,HMPDE,P75,MPI);
MPI := conddisjun(MNE,HHPDE,P75,MPI);
//// MNE P100 ////
HNI := conddisjun(MNE,HNDE,P100,HNI);
LNI := conddisjun(MNE,MNDE,P100,LNI);
LNI := conddisjun(MNE,LNDE,P100,LNI);
LNI := conddisjun(MNE,ZDE,P100,LNI);
ZI := conddisjun(MNE,LPDE,P100,ZI);
LLPI := conddisjun(MNE,MPDE,P100,LLPI);
LLPI := conddisjun(MNE,HPDE,P100,LLPI);
//// LNE P75 ////
HNI := conddisjun(LNE,HHNDE,P75,HNI);
HNI := conddisjun(LNE,HMNDE,P75,HNI);
MNI := conddisjun(LNE,HNDE,P75,MNI);
LLNI := conddisjun(LNE,MNDE,P75,LLNI);
LLNI := conddisjun(LNE,LNDE,P75,LLNI);
LLNI := conddisjun(LNE,ZDE,P75,LLNI);
LLNI := conddisjun(LNE,LPDE,P75,LLNI);
ZI := conddisjun(LNE,MPDE,P75,ZI);
LPI := conddisjun(LNE,HPDE,P75,LPI);
LPI := conddisjun(LNE,HMPDE,P75,LPI);
MPI := conddisjun(LNE,HHPDE,P75,MPI);
//// LNE P100 ////
HNI := conddisjun(LNE,HNDE,P100,HNI);
LNI := conddisjun(LNE,MNDE,P100,LNI);
LLNI := conddisjun(LNE,LNDE,P100,LLNI);
LLNI := conddisjun(LNE,ZDE,P100,LLNI);
ZI := conddisjun(LNE,LPDE,P100,ZI);

```

```

LLPI := conddisjun(LNE,MPDE,P100,LLPI);
LPI := conddisjun(LNE,HPDE,P100,LPI);
//// ZE P75 ////
ZI := conddisjun(ZE,HHNDE,P75,ZI);
ZI := conddisjun(ZE,HMNDE,P75,ZI);
ZI := conddisjun(ZE,HNDE,P75,ZI);
ZI := conddisjun(ZE,MNDE,P75,ZI);
ZI := conddisjun(ZE,LNDE,P75,ZI);
ZI := conddisjun(ZE,ZDE,P75,ZI);
ZI := conddisjun(ZE,LPDE,P75,ZI);
ZI := conddisjun(ZE,MPDE,P75,ZI);
ZI := conddisjun(ZE,HPDE,P75,ZI);
ZI := conddisjun(ZE,HMPDE,P75,ZI);
ZI := conddisjun(ZE,HHPDE,P75,ZI);
//// ZE P100 ////
ZI := conddisjun(ZE,HNDE,P100,ZI);
ZI := conddisjun(ZE,MNDE,P100,ZI);
ZI := conddisjun(ZE,LNDE,P100,ZI);
ZI := conddisjun(ZE,ZDE,P100,ZI);
ZI := conddisjun(ZE,LPDE,P100,ZI);
ZI := conddisjun(ZE,MPDE,P100,ZI);
ZI := conddisjun(ZE,HPDE,P100,ZI);
//// LPE P75 ////
MNI := conddisjun(LPE,HHNDE,P75,MNI);
LNI := conddisjun(LPE,HMNDE,P75,LNI);
LNI := conddisjun(LPE,HNDE,P75,LNI);
ZI := conddisjun(LPE,MNDE,P75,ZI);
LLPI := conddisjun(LPE,LNDE,P75,LLPI);
LLPI := conddisjun(LPE,ZDE,P75,LLPI);
LLPI := conddisjun(LPE,LPDE,P75,LLPI);
LLPI := conddisjun(LPE,MPDE,P75,LLPI);
MPI := conddisjun(LPE,HPDE,P75,MPI);
HPI := conddisjun(LPE,HMPDE,P75,HPI);
HPI := conddisjun(LPE,HHPDE,P75,HPI);
//// LPE P100 ////
LNI := conddisjun(LPE,HNDE,P100,LNI);
LLNI := conddisjun(LPE,MNDE,P100,LLNI);
ZI := conddisjun(LPE,LNDE,P100,ZI);
LLPI := conddisjun(LPE,ZDE,P100,LLPI);
LLPI := conddisjun(LPE,LPDE,P100,LLPI);
LPI := conddisjun(LPE,MPDE,P100,LPI);
HPI := conddisjun(LPE,HPDE,P100,HPI);
//// MPE P75 ////
MNI := conddisjun(MPE,HHNDE,P75,MNI);
MNI := conddisjun(MPE,HMNDE,P75,MNI);
LLNI := conddisjun(MPE,HNDE,P75,LLNI);
ZI := conddisjun(MPE,MNDE,P75,ZI);
ZI := conddisjun(MPE,LNDE,P75,ZI);
LPI := conddisjun(MPE,ZDE,P75,LPI);
LPI := conddisjun(MPE,LPDE,P75,LPI);
MPI := conddisjun(MPE,MPDE,P75,MPI);
MPI := conddisjun(MPE,HPDE,P75,MPI);
HPI := conddisjun(MPE,HMPDE,P75,HPI);
HPI := conddisjun(MPE,HHPDE,P75,HPI);
//// MPE P100 ////
LLNI := conddisjun(MPE,HNDE,P100,LLNI);
LLNI := conddisjun(MPE,MNDE,P100,LLNI);
ZI := conddisjun(MPE,LNDE,P100,ZI);
MPI := conddisjun(MPE,ZDE,P100,MPI);
MPI := conddisjun(MPE,LPDE,P100,MPI);
MPI := conddisjun(MPE,MPDE,P100,MPI);
HPI := conddisjun(MPE,HPDE,P100,HPI);

```

```

//// HPE P75 ////
ZI := conddisjun(HPE,HHNDE,P75,ZI);
ZI := conddisjun(HPE,HMNDE,P75,ZI);
ZI := conddisjun(HPE,HNDE,P75,ZI);
ZI := conddisjun(HPE,MNDE,P75,ZI);
HPI := conddisjun(HPE,LNDE,P75,HPI);
HPI := conddisjun(HPE,ZDE,P75,HPI);
HPI := conddisjun(HPE,LPDE,P75,HPI);
HPI := conddisjun(HPE,MPDE,P75,HPI);
HPI := conddisjun(HPE,HPDE,P75,HPI);
HPI := conddisjun(HPE,HMPDE,P75,HPI);
HPI := conddisjun(HPE,HHPDE,P75,HPI);
//// HPE P100 ////
LNI := conddisjun(HPE,HNDE,P100,LNI);
LNI := conddisjun(HPE,MNDE,P100,LNI);
ZI := conddisjun(HPE,LNDE,P100,ZI);
LPI := conddisjun(HPE,ZDE,P100,LPI);
LPI := conddisjun(HPE,LPDE,P100,LPI);
MPI := conddisjun(HPE,MPDE,P100,MPI);
HPI := conddisjun(HPE,HPDE,P100,HPI);
//// HHPE P100 ////
LNI := conddisjun(HHPE,HNDE,P100,LNI);
ZI := conddisjun(HHPE,MNDE,P100,ZI);
ZI := conddisjun(HHPE,LNDE,P100,ZI);
LPI := conddisjun(HHPE,ZDE,P100,LPI);
LPI := conddisjun(HHPE,LPDE,P100,LPI);
HPI := conddisjun(HHPE,MPDE,P100,HPI);
HPI := conddisjun(HHPE,HPDE,P100,HPI);

ar_imp[1]:=HNI;
ar_imp[2]:=MNI;
ar_imp[3]:=LNI;
ar_imp[4]:=LLNI;
ar_imp[5]:=ZI;
ar_imp[6]:=LLPI;
ar_imp[7]:=LPI;
ar_imp[8]:=MPI;
ar_imp[9]:=HPI;

(* Init impulse range *)
for i := 1 TO 121 BY 1 DO
  ar_imp_range[i] := -6 + 0.1*(i-1);
end_for;

for i := 1 TO 121 BY 1 DO
  ar_res_mf[i] := 0;
end_for;

(* accumulation procedure *)
for i := 1 TO 121 BY 1 DO
  for j := 1 TO 9 BY 1 DO
    imp_x_val := ar_imp_range[i];
    imp_cur_mf := imp_fuzzyfy_func(imp_x_val,i);
    if imp_cur_mf <= ar_imp[j] THEN
      ar_res_mf[i] := max(imp_cur_mf,ar_res_mf[i]);
    ELSE
      ar_res_mf[i] := max(ar_imp[j],ar_res_mf[i]);
    END_IF;
  end_for;
end_for;

(* Defuzzyfy procedure *)

```



```
up:=0;
down:=1; // Not NULL (0) to avoid divide on zero
for i := 1 TO 121 BY 1 DO
  up := up + ar_res_mf[i]*ar_imp_range[i];
  down := down + ar_res_mf[i];
end_for;
Out:=up/down;
```

## ДОДАТОК Є

## КОД ФБ F2

```

for i := 1 TO 9 BY 1 DO
  ar_e[i] := 0;
  ar_e[i] := e_fuzzyfy_func(e,i);
end_for;
for i := 1 TO 11 BY 1 DO
  ar_de[i] := 0;
  ar_de[i] := de_fuzzyfy_func(de,i);
end_for;
for i := 1 TO 2 BY 1 DO
  ar_N[i] := 0;
  ar_N[i] := n_fuzzyfy_func(N,i);
end_for;
//// Error ////
HHNE := ar_e[1];
HNE := ar_e[2];
MNE := ar_e[3];
LNE := ar_e[4];
ZE := ar_e[5];
LPE := ar_e[6];
MPE := ar_e[7];
HPE := ar_e[8];
HHPE := ar_e[9];
//// Derivative Error ////
HHNDE := ar_de[1];
HMNDE := ar_de[2];
HNDE := ar_de[3];
MNDE := ar_de[4];
LNDE := ar_de[5];
ZDE := ar_de[6];
LPDE := ar_de[7];
MPDE := ar_de[8];
HPDE := ar_de[9];
HMPDE := ar_de[10];
HHPDE := ar_de[11];
//// Power ////
P75 := ar_N[1];
P100 := ar_N[2];

//// Out Impulse ////
LP225:=0;
MP225:=0;
VLP:=0;
LP:=0;
MP:=0;
HP:=0;
VHP:=0;

(* RuleBase *)
VHP := conddisjun(HHNE,HHNDE,P100,VHP);
VHP := conddisjun(HHNE,HMNDE,P100,VHP);
VHP := conddisjun(HHNE,HNDE,P100,VHP);
HP := conddisjun(HHNE,MNDE,P100,HP);
HP := conddisjun(HHNE,LNDE,P100,HP);
HP := conddisjun(HHNE,ZDE,P100,HP);
HP := conddisjun(HHNE,LPDE,P100,HP);
HP := conddisjun(HHNE,MPDE,P100,HP);
HP := conddisjun(HHNE,HPDE,P100,HP);
HP := conddisjun(HHNE,HMPDE,P100,HP);

```

HP := conddisjun(HHNE,HHPDE,P100,HP);  
 VHP := conddisjun(HNE,HHNDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(HNE,HMNDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(HNE,HNDE,P100,VHP);  
 HP := conddisjun(HNE,MNDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HNE,LNDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HNE,ZDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HNE,LPDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HNE,MPDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HNE,HPDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HNE,HMPDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HNE,HHPDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(MNE,HHNDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(MNE,HMNDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(MNE,HNDE,P100,HP);  
 MP := conddisjun(MNE,MNDE,P100,MP);  
 MP := conddisjun(MNE,LNDE,P100,MP);  
 VHP := conddisjun(MNE,ZDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(MNE,LPDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(MNE,MPDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(MNE,HPDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(MNE,HMPDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(MNE,HHPDE,P100,VHP);  
 VLP := conddisjun(LNE,HHNDE,P100,VLP);  
 VLP := conddisjun(LNE,HMNDE,P100,VLP);  
 LP := conddisjun(LNE,HNDE,P100,LP);  
 LP := conddisjun(LNE,MNDE,P100,LP);  
 LP := conddisjun(LNE,LNDE,P100,LP);  
 VHP := conddisjun(LNE,ZDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(LNE,LPDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(LNE,MPDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(LNE,HPDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(LNE,HMPDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(LNE,HHPDE,P100,VHP);  
 LP225 := conddisjun(ZE,HHNDE,P100,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,HMNDE,P100,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,HNDE,P100,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,MNDE,P100,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,LNDE,P100,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,ZDE,P100,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,LPDE,P100,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,MPDE,P100,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,HPDE,P100,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,HMPDE,P100,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,HHPDE,P100,LP225);  
 VHP := conddisjun(LPE,HHNDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(LPE,HMNDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(LPE,HNDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(LPE,MNDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(LPE,LNDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(LPE,ZDE,P100,VHP);  
 LP := conddisjun(LPE,LPDE,P100,LP);  
 LP := conddisjun(LPE,MPDE,P100,LP);  
 LP := conddisjun(LPE,HPDE,P100,LP);  
 VLP := conddisjun(LPE,HMPDE,P100,VLP);  
 VLP := conddisjun(LPE,HHPDE,P100,VLP);  
 VHP := conddisjun(MPE,HHNDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(MPE,HMNDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(MPE,HNDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(MPE,MNDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(MPE,LNDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(MPE,ZDE,P100,VHP);

MP := conddisjun(MPE,LPDE,P100,MP);  
 MP := conddisjun(MPE,MPDE,P100,MP);  
 HP := conddisjun(MPE,HPDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(MPE,HMPDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(MPE,HHPDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HPE,HHNDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HPE,HMNDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HPE,HNDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HPE,MNDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HPE,LNDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HPE,ZDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HPE,LPDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HPE,MPDE,P100,HP);  
 VHP := conddisjun(HPE,HPDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(HPE,HMPDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(HPE,HHPDE,P100,VHP);  
 HP := conddisjun(HHPE,HHNDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HHPE,HMNDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HHPE,HNDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HHPE,MNDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HHPE,LNDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HHPE,ZDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HHPE,LPDE,P100,HP);  
 HP := conddisjun(HHPE,MPDE,P100,HP);  
 VHP := conddisjun(HHPE,HPDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(HHPE,HMPDE,P100,VHP);  
 VHP := conddisjun(HHPE,HHPDE,P100,VHP);  
 VLP := conddisjun(HHNE,HHNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HHNE,HMPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HHNE,HNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HHNE,MNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HHNE,LNDE,P75,VLP);  
 MP225 := conddisjun(HHNE,ZDE,P75,MP225);  
 MP225 := conddisjun(HHNE,LPDE,P75,MP225);  
 MP225 := conddisjun(HHNE,MPDE,P75,MP225);  
 MP225 := conddisjun(HHNE,HPDE,P75,MP225);  
 VLP := conddisjun(HHNE,HMPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HHNE,HHPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HNE,HHNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HNE,HMPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HNE,HNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HNE,MNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HNE,LNDE,P75,VLP);  
 MP225 := conddisjun(HNE,ZDE,P75,MP225);  
 MP225 := conddisjun(HNE,LPDE,P75,MP225);  
 MP225 := conddisjun(HNE,MPDE,P75,MP225);  
 MP225 := conddisjun(HNE,HPDE,P75,MP225);  
 VLP := conddisjun(HNE,HMPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HNE,HHPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MNE,HHNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MNE,HMNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MNE,HNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MNE,MNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MNE,LNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MNE,ZDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MNE,LPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MNE,MPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MNE,HPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MNE,HMPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MNE,HHPDE,P75,VLP);  
 LP225 := conddisjun(LNE,HHNDE,P75,LP225);  
 LP225 := conddisjun(LNE,HMNDE,P75,LP225);

LP225 := conddisjun(LNE,HNDE,P75,LP225);  
 VLP := conddisjun(LNE,MNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(LNE,LNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(LNE,ZDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(LNE,LPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(LNE,MPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(LNE,HPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(LNE,HMPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(LNE,HHPDE,P75,VLP);  
 LP225 := conddisjun(ZE,HHNDE,P75,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,HMNDE,P75,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,HNDE,P75,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,MNDE,P75,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,LNDE,P75,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,ZDE,P75,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,LPDE,P75,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,MPDE,P75,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,HPDE,P75,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,HMPDE,P75,LP225);  
 LP225 := conddisjun(ZE,HHPDE,P75,LP225);  
 VLP := conddisjun(LPE,HHNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(LPE,HMNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(LPE,HNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(LPE,MNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(LPE,LNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(LPE,ZDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(LPE,LPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(LPE,MPDE,P75,VLP);  
 MP225 := conddisjun(LPE,HPDE,P75,MP225);  
 LP225 := conddisjun(LPE,HMPDE,P75,LP225);  
 LP225 := conddisjun(LPE,HHPDE,P75,LP225);  
 VLP := conddisjun(MPE,HHNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MPE,HMNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MPE,HNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MPE,MNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MPE,LNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MPE,ZDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MPE,LPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MPE,MPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MPE,HPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MPE,HMPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(MPE,HHPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HPE,HHNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HPE,HMNDE,P75,VLP);  
 MP225 := conddisjun(HPE,HNDE,P75,MP225);  
 MP225 := conddisjun(HPE,MNDE,P75,MP225);  
 MP225 := conddisjun(HPE,LNDE,P75,MP225);  
 MP225 := conddisjun(HPE,ZDE,P75,MP225);  
 VLP := conddisjun(HPE,LPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HPE,MPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HPE,HPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HPE,HMPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HPE,HHPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HHPE,HHNDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HHPE,HMNDE,P75,VLP);  
 MP225 := conddisjun(HHPE,HNDE,P75,MP225);  
 MP225 := conddisjun(HHPE,MNDE,P75,MP225);  
 MP225 := conddisjun(HHPE,LNDE,P75,MP225);  
 MP225 := conddisjun(HHPE,ZDE,P75,MP225);  
 VLP := conddisjun(HHPE,LPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HHPE,MPDE,P75,VLP);  
 VLP := conddisjun(HHPE,HPDE,P75,VLP);

```

VLP := conddisjun(HHPE,HMPDE,P75,VLP);
VLP := conddisjun(HHPE,HHPDE,P75,VLP);

ar_pause[1]:=LP225;
ar_pause[2]:=MP225;
ar_pause[3]:=VLP;
ar_pause[4]:=LP;
ar_pause[5]:=MP;
ar_pause[6]:=HP;
ar_pause[7]:=VHP;

(* Init pause range *)
for i := 1 TO 271 BY 1 DO
  ar_pause_range[i] := (i-1)+10;
end_for;

for i := 1 TO 271 BY 1 DO
  ar_res_mf[i] := 0;
end_for;

(* accumulation procedure *)
for i := 1 TO 271 BY 1 DO
  for j := 1 TO 7 BY 1 DO
    pause_x_val := ar_pause_range[i];
    pause_cur_mf := pause_fuzzyfy_func(pause_x_val,j);
    if pause_cur_mf <= ar_pause[j] THEN
      ar_res_mf[i] := max(pause_cur_mf,ar_res_mf[i]);
    ELSE
      ar_res_mf[i] := max(ar_pause[j],ar_res_mf[i]);
    END_IF;
  end_for;
end_for;

(* Defuzzyfy procedure *)
up:=0;
down:=1; // Not NULL (0) to avoid divide on zero
for i := 1 TO 271 BY 1 DO
  up := up + ar_res_mf[i]*ar_pause_range[i];
  down := down + ar_res_mf[i];
end_for;

Out:=up/down;

```

## ДОДАТОК Ж

"Затверджую"  
 Декан ТЕФ  
 КПШ ім. Ігоря Сікорського

Письменний Є.М.

"Затверджую"  
 Начальник цеху автоматики  
 Трипільської ГРЕС

Махиня М.М.

**АКТ**

**Про впровадження рішень з автоматизації прямооточного котлоагрегату на базі двоканального нечіткого контролера**

**Комісія** в складі:

Начальник цеху автоматики Трипільської ГРЕС Махиня М.М., в. о. завідувача кафедрою АТЕП КПШ ім. Ігоря Сікорського проф., д.т.н. Волощук В.А., проф. кафедри АТЕП КПШ ім. Ігоря Сікорського Ковриго Ю.М., асистент кафедри АТЕП КПШ ім. Ігоря Сікорського Новіков П.В.

1. Розглянула рішення з врахуванням обмежень з використанням двоканального нечіткого контролера для автоматизації підсистем регулювання прямооточного котлоагрегату.
2. По отриманих реальних характеристиках об'єкта регулювання проведена перевірка роботи алгоритмів на моделі, у порівнянні зі стандартно реалізованими, при використанні ПІ алгоритму з коректором і при використанні двоканального нечіткого контролера. Отримано перехідні процеси для трьох варіантів систем. Система автоматичного регулювання з двоканальним нечітким контролером забезпечує показники якості, які встановлені технічними умовами в діапазоні навантажень енергоблоку від 225 МВт до 300 МВт при зміні навантаження на 10%: час перехідного процесу до 1000 с, динамічне відхилення менше в проміжній точці 13 °С, коефіцієнт затухання  $\psi=1$ .

Розробка пройшла випробування в системі регулювання температурним режимом прямооточного котлоагрегату ТПП-210А та прийнята для реалізації.

Від "ЗАМОВНИКА"

Махиня М.М.

Від "ВИКОНАВЦЯ"

Волощук В.А.  
 Ковриго Ю.М.  
 Новіков П.В.