

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**НОВІКОВ Павло Валерійович**

УДК 621.181.1:681.5

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ ІНЕРЦІЙНИМИ  
КАНАЛАМИ ЕНЕРГОБЛОКУ ТЕПЛОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З  
ВИКОРИСТАННЯМ ДВОКАНАЛЬНОГО НЕЧІТКОГО КОНТРОЛЕРА**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, професор  
**Ковриго Юрій Михайлович**,  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
професор кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Хобін Віктор Андрійович**,  
Одеська національна академія харчових технологій,  
завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем

кандидат технічних наук, доцент  
**Пупена Олександр Миколайович**,  
Національний університет харчових технологій,  
доцент кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління

Захист відбудеться «15» жовтня 2019 р. о 14<sup>30</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.04 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою 03056, м.Київ-56, проспект Перемоги, 37, корп. 19, ауд. 530.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «06» вересня 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.04  
кандидат технічних наук, доцент

Ковалюк Д.О.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** 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.

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.

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, додається ще одна важлива проблема – низька якість і непередбачуваність складу палива. Враховуючи вище зазначені факти, на сучасному етапі розвитку енергетики України є актуальною модернізація енергоблоків діючих ТЕС з метою підвищення їх ефективності та надійності функціонування, зменшення витрат на обслуговування обладнання, введення більш точного регулювання навантаження енергоблоків та частоти струму для покращення якості електроенергії та стійкості загальної енергосистеми.

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 ПП- та ППД-регуляторів. Разом з тим, об'єкти регулювання ТЕС у більшості випадків змінюють свої параметри як у межах доби (маневрові режими), так і під час тривалої експлуатації (утворення накипу, збільшення люфтів, переоснащення основного обладнання і т.д.). Результатом незадовільної якості функціонування стандартних регуляторів є збільшення випадків перегріву і витрати пального, зменшення ресурсу котлоагрегатів за рахунок термоциклічних напруг та зношування виконавчих пристроїв, що збільшує експлуатаційні витрати та посилює технологічну небезпеку ТЕС. Загальноживаною є практика, коли оператори ТЕС вимушені переходити на ручний режим керування, щоб уникнути великих динамічних викидів і тривалих низькочастотних коливань регулюємих змінних котлоагрегатів. 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.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана за тематикою держбюджетних НДР на кафедрі автоматизації теплоенергетичних процесів КПІ ім. Ігоря Сікорського №2009-п "Управління енергоспоживанням об'єктів комунальної енергетики" (номер держреєстрації 0117U000469) і №2539-п «Підвищення ефективності та надійності функціонування устаткування ТЕС та малої енергетики в змінних режимах експлуатації» (номер держреєстрації 0112U001751). У зазначених науково-дослідних роботах автор брав участь як виконавець.

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

Для досягнення поставленої мети виконано такі **завдання**:

- аналіз існуючих способів керування інерційними об'єктами з запізненням та змінними параметрами;
- дослідження динамічних властивостей водо-парового тракту прямооточного котлоагрегату як об'єкту керування, ідентифікація та створення математичних моделей;
- аналіз дій оператора-технолога при керуванні в ручному режимі інерційними контурами водо-парового тракту котлоагрегату;
- розробка інтелектуального контролера на основі двоканальної структури з використанням блоків нечіткої логіки;
- моделювання роботи системи керування з двоканальним нечітким контролером і порівняння ефективності її 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.

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

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

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

**Наукова новизна отриманих результатів.** У ході виконання поставлених завдань отримано нові наукові результати:

- 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 і при наявності збурень з боку системи горіння.

- 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.
- 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.

**Практичне значення одержаних результатів.** За результатами теоретичних та експериментальних досліджень розроблена система автоматичного регулювання температурного режиму водо-парового тракту, де застосування двоканального нечіткого контролера дозволило підвищити показники якості перехідних процесів. Розроблена методика налаштування двоканального нечіткого контролера.

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

Результати роботи використовуються у навчальному процесі кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів КПІ ім. Ігоря Сікорського в дисципліні «Сучасна теорія автоматичного управління» у вигляді лабораторних і розрахункових робіт.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення роботи висвітлено й обговорено на 6 наукових конференціях: Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології-2017» (Київ, 2017); XI, XII, XIV, XV, XVI міжнародній конференції «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (м. Київ, 2013, 2014, 2016, 2017, 2018), а також на наукових семінарах кафедри АТЕП Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» і кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління Національного університету харчових технологій.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні результати дисертаційної роботи, винесені на захист, автор отримав самостійно. Особистий внесок дисертанта в публікаціях, виконаних у співавторстві: розробка двоканальної схеми керування на базі нечіткої логіки для керування контурами теплоенергетичних об'єктів; обробка,

ідентифікація і аналіз математичних моделей інерційних контурів котлоагрегату; постановка та вирішення задач, пов'язаних з синтезом двоканального нечіткого контролера; застосування двоканального нечіткого контролера, розрахунок отриманих результатів; розробка методики оцінки стійкості нелінійної схеми керування з використанням блоків нечіткої логіки.

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 13 наукових праць, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданні іноземної держави, 1 у виданні України, яке включено до міжнародної наукометричної бази), 1 патент на корисну модель, 6 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел зі 104 найменувань, 8 додатків. Повний обсяг дисертації – 191 сторінка. Основний текст роботи викладено на 146 сторінках, враховуючи 90 рисунків та 14 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність і сформульована основна ідея роботи з точки зору важливості синтезу складних інтелектуальних алгоритмів для автоматичних систем регулювання теплоенергетичними об'єктами. Сформульована мета та завдання дослідження. Визначені наукова новизна та практичне значення одержаних результатів. Вказано на апробацію результатів дисертації та кількість публікацій.

**У першому розділі** розглянуто прямоточний котлоагрегат як технологічний об'єкт керування і виконано аналіз проблем керування 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.

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, що призводить до непередбачуваного відхилення від норми основних технологічних параметрів в процесі експлуатації.

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 котлоагрегату 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.

Зокрема адаптивні системи регулювання на подібних неперервних об'єктах історично не прижилися. З одного боку через несанкціоновані оперативним персоналом збурення, необхідні для проведення активної ідентифікації, а з іншої сторони намагання без спеціальних збурень використовувати для адаптації статистичну близькість записів за технологічними змінними і їх модельованих значень призводило до недопустимих помилок визначення параметрів моделі.

Практичне застосування схем з використанням моделей об'єкта, до яких відносяться схема з предиктором Сміта і регулятор з внутрішньою моделлю (ІМС), також ускладнене на об'єктах теплоенергетики. По-перше, належна 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. По-друге, зазначені схеми ефективно працюють при відпрацюванні завдання і не мають значних переваг перед звичайними одноконтурними схемами при компенсації збурення.

Для підтримки належного температурного режиму котла доцільно застосувати робастні системи, які забезпечують необхідну якість керування при невизначеності характеристик об'єкта керування. Існують рішення із застосуванням ІМС-регулятора з використанням методу  $H_\infty$ -норми замкненої системи, а також схем з динамічною корекцією вихідного сигналу регулятора. Але вони орієнтовані насамперед на непрямі показники якості функціонування системи керування (частотні, інтегральні), тоді як на практиці визначальними є прямі показники якості – динамічне відхилення, час регулювання, перерегулювання, кількість включень виконавчого механізму тощо. Також їх математична складність вимагає застосування спеціальних програмних пакетів для розрахунку налаштувань регулятора. І нарешті, в робастних системах задані показники якості забезпечуються в певному діапазоні зміни параметрів моделі, який не завжди охоплює можливі зміни динамічних характеристик об'єкта керування.

Можливим шляхом підвищення ефективності функціонування систем керування є використання інтелектуальних систем, до яких відносяться системи нечіткої логіки. Нечітке керування використовується при недостатньому знанні об'єкта управління, але наявності досвіду управління ним, в нелінійних системах, ідентифікація яких занадто трудомістка, а також у випадках, коли необхідно враховувати чинники, що важко піддаються формалізації. Прикладом може бути прямоточний котел, доменна піч, колона ректифікації, математична модель яких містить багато емпіричних коефіцієнтів, що змінюються в широкому діапазоні і викликають великі труднощі при ідентифікації. У той же час кваліфікований оператор досить добре управляє такими об'єктами, користуючись обмеженим набором технічних засобів і накопиченим досвідом. Знання, на які спирається оператор, реалізуються у формі правил "ЯКЩО-ТО", що мають нечіткий

інформаційний зміст. Цей принцип закладено в основу нового способу керування інерційними контурами ТЕС, який дозволяє збільшити швидкість реакції системи регулювання, при цьому зберігаючи стійкість системи керування і мінімізуючи кількість включень регулюючої апаратури.

На основі проведеного аналізу визначено завдання дослідження, які полягають у синтезі автоматичної системи керування інерційних контурів котлоагрегату з використанням двоканального нечіткого контролера та дослідженні її функціонування під час зміни динамічних характеристик об'єкта і при впливі неконтрольованих збурень.

У **другому розділі** 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.

При визначенні моделей технологічних параметрів ТЕС, зокрема котлоагрегату, структура моделей динаміки може бути різною. Складні об'єкти регулювання описуються диференційними рівняннями вищих порядків. В найпростішому випадку інерційний об'єкт з самовирівнюванням описується послідовно ввімкненими однозмінними ланками і однією ланкою чистої транспортної затримки.

Експериментальні дані для ідентифікації були отримані в результаті проведення активного експерименту на котлоагрегаті ТПП-210А Трипільської ТЕС при навантаженнях 300 МВт і 225 МВт для температур за нижньою радіаційною частиною (НРЧ), верхньою радіаційною частиною (ВРЧ) і поточним пароперегрівачем (ППП). Криві розгону отримані шляхом стрибкоподібної зміни витрати палива при сталій витраті живильної води.

Ідентифікацію об'єкта керування проведено за допомогою методу додаткових членів. Перевагою цього методу є те, що крім сталих часу об'єкта можна визначити також порядок диференційного рівняння. У результаті попередньої обробки даних, їх згладжування визначені моделі для досліджуваних контурів. В табл. 1 зведені параметри моделей по всім контурам.

Динаміка контурів регулювання описується моделями вищих порядків (до 4-го) з великими часовими затримками (до 94 с). Задача ускладнюється суттєвою нелінійністю об'єкта залежно від навантаження, зокрема по каналу НРЧ основна стала часу змінюється приблизно в 3.5 рази, а по каналу ВРЧ – в 2.2 рази. Для контуру НРЧ така велика розбіжність в динаміці пояснюється зміщенням зони максимальної теплоємності по водо-паровому тракту при зміні навантаження. Фактично, температура за НРЧ перестає реагувати на зміну витрати палива і випадає із схеми керування як випереджальний сигнал при максимальному навантаженні енергоблоку.

Описані властивості, на додачу до збурень, спричинених зміною якості палива або впливом інших контурів регулювання, визначають складність прямого котлоагрегату як об'єкту керування. Для автоматизації складних об'єктів повинні застосовуватися регулятори з більш досконалою функціональною структурою, які формують ефективніший закон регулювання в порівнянні з простими ПІД-регуляторами.



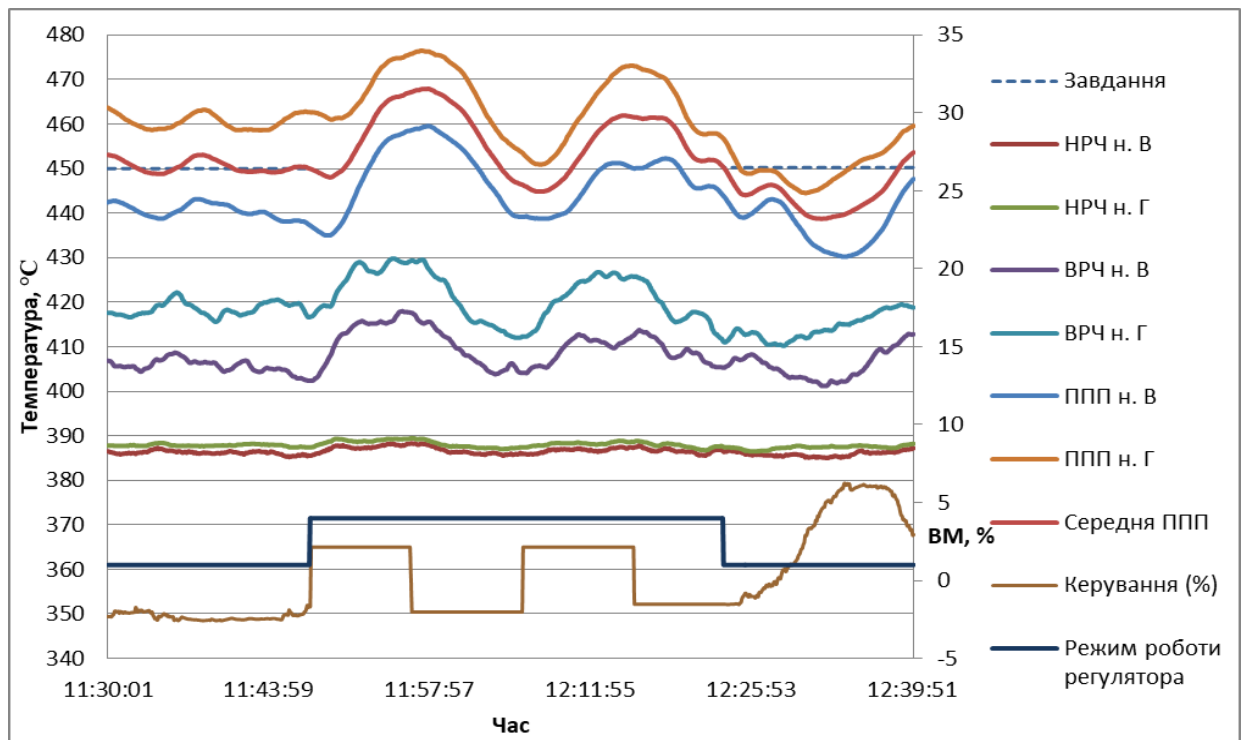


Рис.1. Графіки розгінних характеристик при навантаженні 225 МВт

Таблиця 1

## 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

Перевірку адекватності отриманих моделей об'єкта керування здійснено з використанням критерію Фішера для двох вибірок і ступеня значимості 0.95 (табл. 2). Для усіх моделей розраховане значення критерію Фішера менше табличного, відповідно розбіжності між моделями і експериментальними даними можна вважати несуттєвими.

Таблиця 2

## Основні статистичні показники перевірки моделей на адекватність

Коеф. / Модель	показник якості кореляції	коефіцієнт множинної детермінації	дисперсія експерименту	дисперсія моделі	критерій Фішера	табличне значення
$t_{НРЧ} 225$	0,9921	0,9819	0,0296	0,0307	1,036	2,33
$t_{ВРЧ} 225$	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
$t_{НРЧ} 300$	0,9888	0,9693	0,0254	0,0297	1,169	1,76
$t_{ВРЧ} 300$	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

При проведенні порівняльного аналізу алгоритму роботи класичного ПД-fuzzy-регулятора з діями досвідченого оператора-технолога при керуванні в ручному режимі виявлено, що в деяких аналогічних ситуаціях дії fuzzy-регулятора вступають в «протиріччя» з діями оператора-технолога. Для досягнення оптимального перехідного процесу, що має мінімальне динамічне відхилення і аперіодичний характер, алгоритм переміщення регулюючого органу повинен включати в себе наступні основні фази (рис. 2):

- ділянку розгону, тобто «форсованого» переміщення регулюючого органу в початковій фазі перехідного процесу (ділянка 3);
- ділянку інтенсивного «гальмування» переміщення регулюючого органу, незважаючи на початок швидкої зміни відхилення параметра при великій різниці (ділянки 4, 5);
- ділянку корекції на заключному етапі перехідного процесу, коли параметр повертається до свого заданого значення, але ще не досяг його.

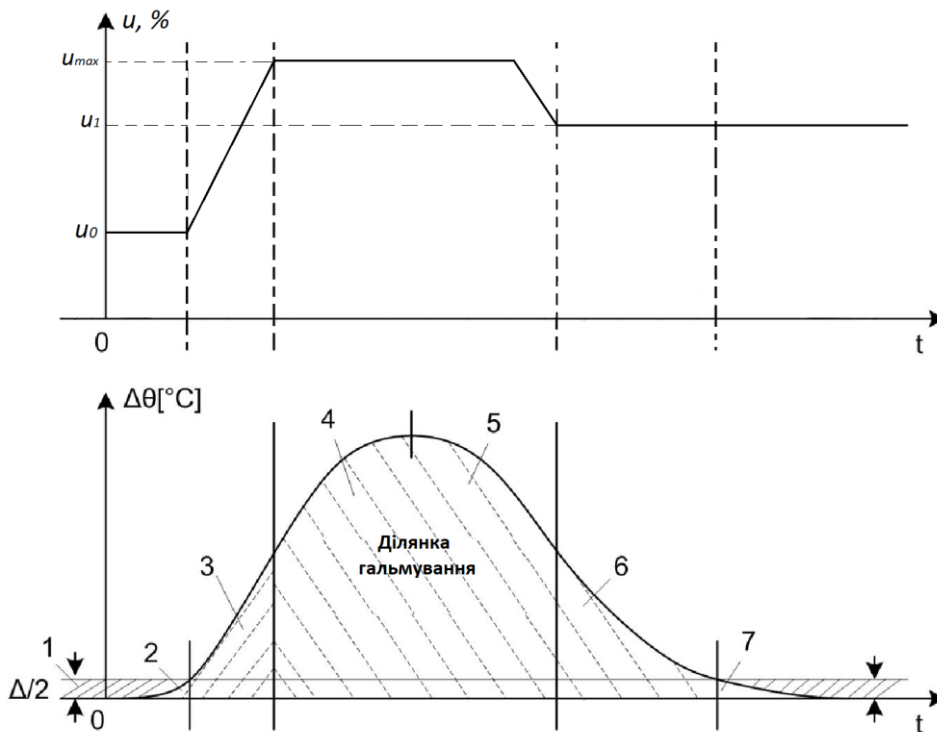


Рис. 2. Отримання оптимального перехідного процесу при керуванні в ручному режимі

Для керування процесом оператор користується обмеженим набором технічних засобів. При наявності виконавчих механізмів постійної швидкості органи керування складають кнопки «більше/менше» для формування імпульсів додатної і від'ємної полярності. При відхиленні параметра від заданого значення оператором здійснюється керуюча дія у вигляді імпульсу певної тривалості. Між нанесенням імпульсів оператор витримує паузу, яка для інерційних температурних об'єктів може вимірюватися хвилинами. Таким чином оператор-технолог при ручному керуванні перебігом технологічного процесу оперує двома основними параметрами – тривалістю керуючих імпульсів і тривалістю пауз. Описаний спосіб керування може бути реалізований за допомогою двоканальної структури керування (рис. 3).

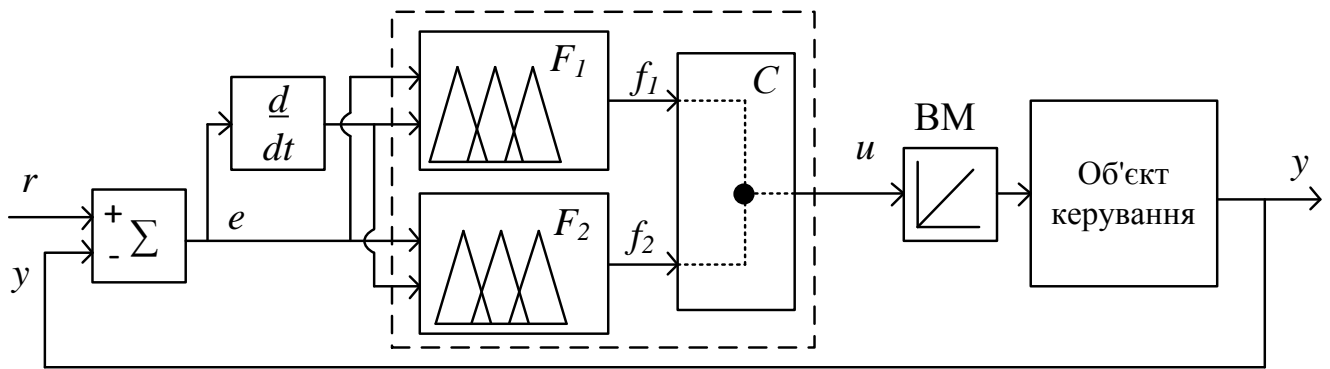


Рис. 3. Структурна схема двоканального нечіткого контролера

Природно, щоб для реалізації послідовностей цих імпульсів і пауз використовувалися два різних блоки нечіткої логіки  $F_1$  і  $F_2$ , при чому вони повинні бути включені в схему керування паралельно і працювати по чергову. Звідси впливає двоканальна структура fuzzy-контролера, перший канал якої відповідає за вироблення керуючої дії, тобто формування імпульсів, а другий канал працює як «заборона» на подачу керуючої дії, тобто формування пауз. Узгодження між роботою двох каналів відбувається в блоці комутації  $C$ . 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  $C$  опитує той чи інший канал, знімаючи числове значення з виходу опитуваного fuzzy-блоку. Це числове значення є тривалістю імпульсу або паузи (залежно від опитуваного каналу), після чого зв'язок між блоком комутації і fuzzy-блоками розривається. Блок комутації знову опитує інший fuzzy-блок після того, як сплине час, рівний знятому числовому значенню з попереднього блока.

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 знання досвідчених експертів у вигляді рекомендацій або заборон і є більш досконалою реалізацією регулятора змінної структури.

У третьому розділі розроблена багатоконтурна схема керування з введенням диференціаторів по випереджальним каналам і проведено синтез двоканального нечіткого контролера. За результатами комп'ютерного моделювання для різних навантажень енергоблоку наведені основні показники якості функціонування системи у порівнянні з іншими відомими схемами керування.

Система керування температурним режимом водо-парового тракту являє собою систему з введенням похідних від випереджаючих сигналів (рис. 4).

Налаштування диференціаторів для каналів НРЧ і ВРЧ розраховані як обернені параметрам ПІ-регуляторів, що синтезувалися для випереджальних ділянок. Для визначення параметрів використаний метод РАФХ, розрахований на кореневий критерій якості  $m=0.485$ , що приблизно відповідає коефіцієнту затухання

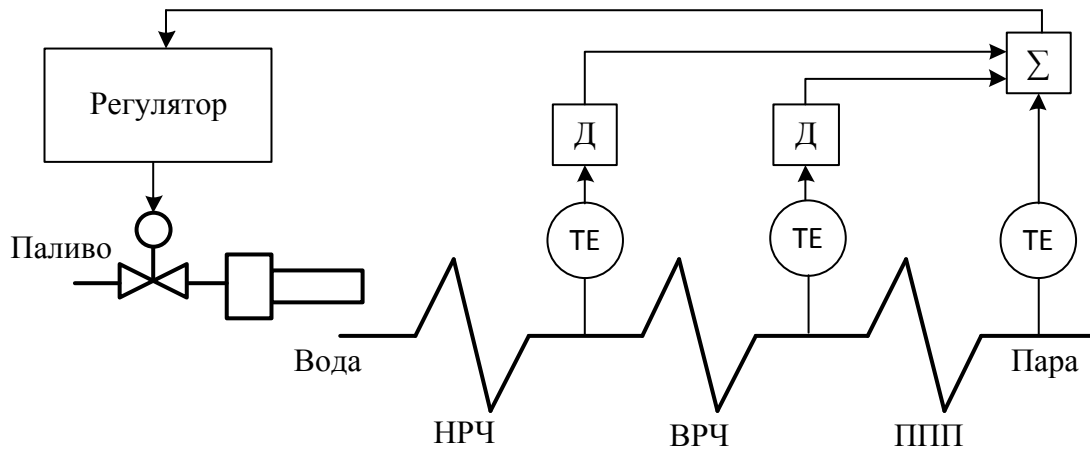


Рис. 4. Структурна схема САК температурного режиму

перехідного процесу  $\psi=0.95$ , при цьому обиралася така пара налаштувань, яка відповідає мінімальному квадратичному інтегральному критерію якості.

Функції передачі диференціаторів наступні:

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

$$W_D^{ВРЧ} = \frac{145.6s}{70s + 1} \quad (2)$$

Враховуючи сигнали від диференціаторів, здійснене моделювання сумарного сигналу від інерційного каналу за ППП і випереджаючих ділянок. На рис. 5 наведено порівняння реакції об'єкта керування на одиничне ступінчате збурення з урахуванням сигналів від диференціаторів при різних значеннях навантаження.

Розроблена схема керування, що ґрунтується на експертних знаннях та досвіді операторів-технологів при керуванні інерційними теплоенергетичними об'єктами, а також алгоритм керування на її основі. В даній схемі як входні змінні двоканального fuzzy-контролера розглядаються сигнал неузгодженості  $e$ , похідна сигналу неузгодженості за часом  $de/dt$  і сигнал по навантаженню  $N$ . Відповідно для кожного з блоків нечіткої логіки необхідно визначити діапазон змін входних параметрів і розбити кожен з діапазонів на лінгвістичні терми.

Для входного параметру  $e$  заданий діапазон від  $-20$  °С до  $+20$  °С. Такі межі зумовлені вимогами до точності підтримання температури перегрітої пари з урахуванням можливих технологічних відхилень.

Для входного параметру  $de/dt$  заданий діапазон від  $-0,3$  °С/с до  $+0,3$  °С/с. Межі швидкості зміни сигналу помилки визначаються динамічними властивостями об'єкту керування та величиною збурень. Крайні значення діапазону отримане на основі розроблених моделей як максимальна швидкість зміни технологічного параметра при ступінчастій зміні положення органу керування на 10%.

Вихідним параметром блоку F1 є тривалість імпульсів. Діапазон зміни вихідного параметра визначений від  $-4.2$  с до  $+4.2$  с. Від'ємні значення вихідного параметра свідчать про те, що імпульси керування повинні бути від'ємної полярності, щоб виконавчий механізм рухався в протилежному напрямку.

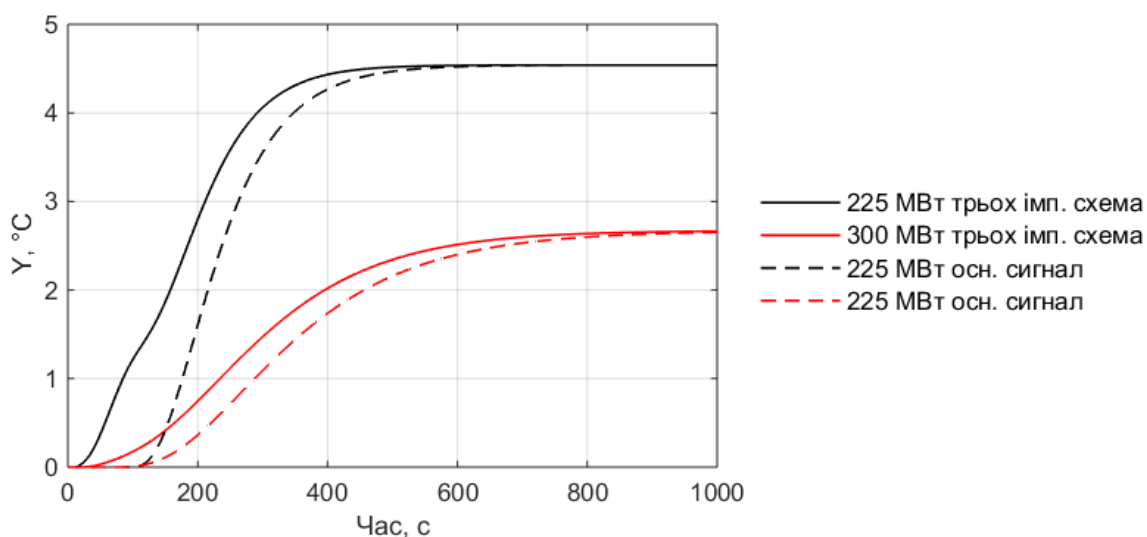


Рис. 5. Порівняння перехідних характеристик об'єкта

Для вхідного параметра  $e$  визначено дев'ять лінгвістичних термів. У відповідності до визначеного діапазону  $[-20^{\circ}\text{C}; +20^{\circ}\text{C}]$  ці терми у вигляді функцій належності наведено на рис. 6 а.

Аналогічним чином визначено одинадцять лінгвістичних термів для вхідного параметру  $de/dt$ . У відповідності до визначеного діапазону  $[-0,3^{\circ}\text{C}/\text{c}; 0,3^{\circ}\text{C}/\text{c}]$  ці терми у вигляді функцій належності наведено на рис. 6 б.

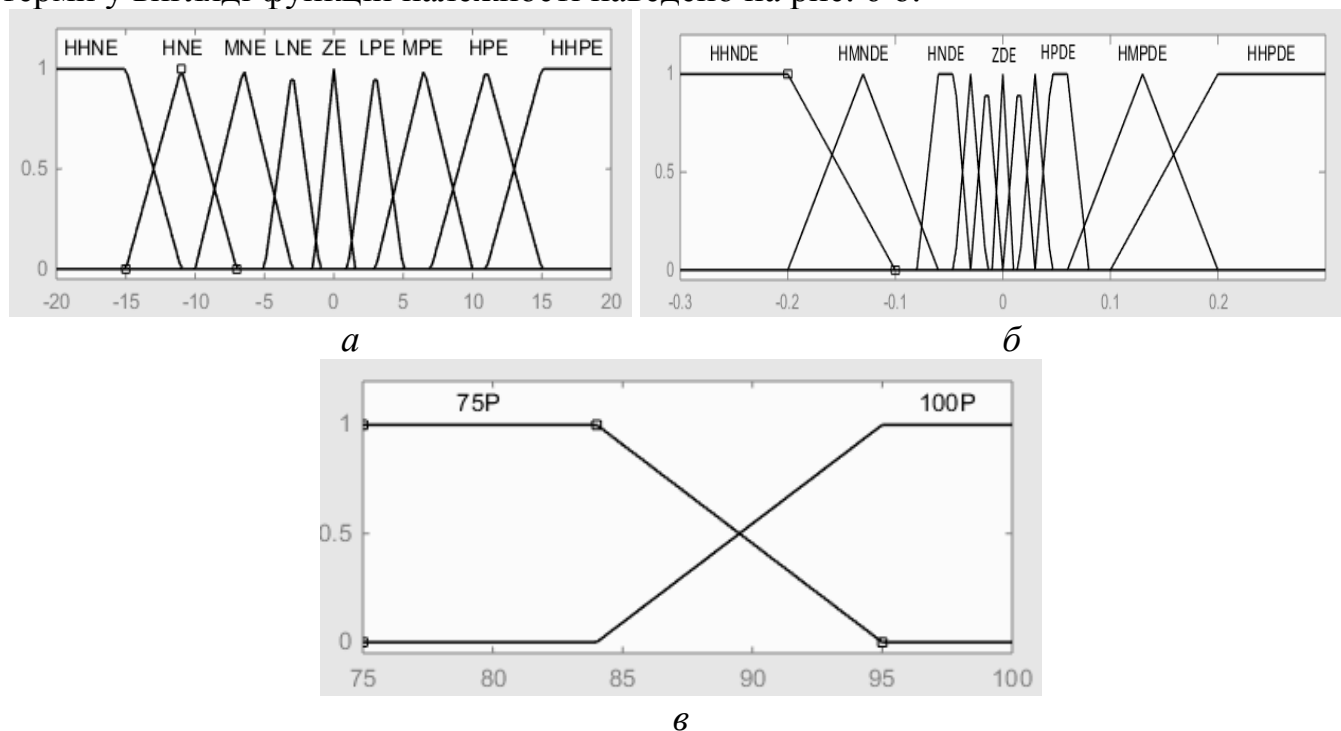


Рис. 6. Функції належності вхідних сигналів: а – сигналу помилки  $e$ , б – швидкості зміни сигналу  $e$ , в – поточного навантаження енергоблоку

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

Вихідний сигнал блоку F1 позначається як  $f_1$ . Для вихідного параметра  $f_1$  визначено дев'ять лінгвістичних термів. У відповідності до визначеного діапазону  $[-4.2 \text{ c}; +4.2 \text{ c}]$  ці терми у вигляді функцій належності наведено на рис. 7 а.

Блок формування пауз F2 має ідентичні вхідні сигнали, що і блок формування імпульсів F1. Відповідно, лінгвістичні терми сигналів  $e$  і  $de/dt$  є ідентичними, що і для блоку F1.

Вихідним параметром блоку F2 є тривалість пауз. Вихідний сигнал блоку F2 позначається як  $f_2$ . Для вихідного параметра  $f_2$  визначено сім лінгвістичних термів з наступними діапазонами: мала пауза при мінімальному навантаженні (VLP225), середня пауза при мінімальному навантаженні (MP225), дуже мала пауза (VLP), мала пауза (LP), середня пауза (MP), велика пауза (HP), дуже велика пауза (VHP).

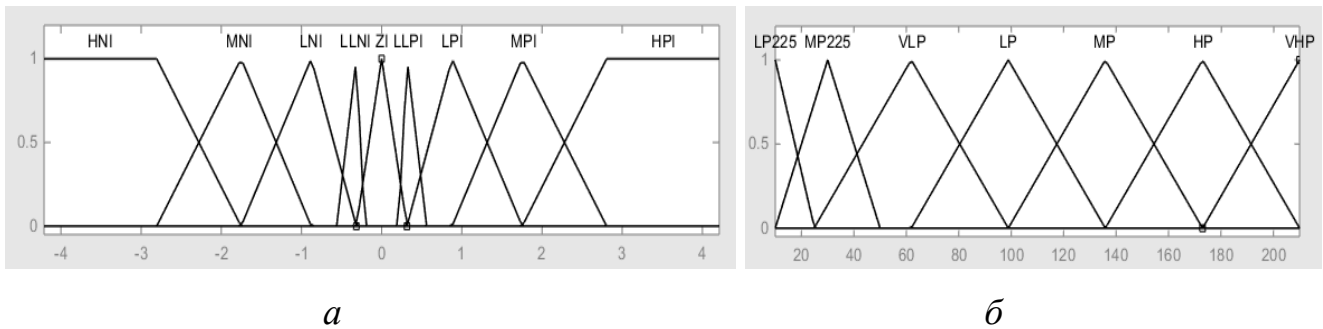


Рис. 7. Функції належності вихідних сигналів  $a$  – імпульсів,  $b$  – пауз

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. Дослідження і забезпечення стійкості систем fuzzy-керування таким чином є обов'язковою задачею. Звичайно, базою для перевірки стійкості системи є наявність достатньо точних математичних моделей замкненого контуру, особливо це стосується об'єкта керування.

Для нечітких регуляторів загальноприйнятих, універсальних методів перевірки стійкості на сьогоднішній день не існує. 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 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 ланки інтегрування.

При надходженні на входи двоканального нечіткого контролера сигналу неузгодженості  $e$  на виході блоку імпульсів F1 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  $\tau(t)$ . У схемі з двоканальним нечітким контролером в явному вигляді присутня ланка інтегрування. В такому випадку сигнал на виході інтегратора буде мати поступово наростаючий вигляд, як це показано на графіку  $u(t)$  рис. 8. Штрихова похила лінія відображає усереднення ступінчатого вихідного сигналу інтегратора. Зважаючи на це, сигнал керування двоканального нечіткого контролера можна розглядати як еквівалент сигналу керування ПІ-регулятора. Апроксимувати даний сигнал зручно

за допомогою методу найменших квадратів. На основі тривалості імпульсу і паузи однозначним чином визначаються параметри ПІ-регулятора  $K_{PI}$  і  $T_{PI}$ .

$$u = at + b \quad (3)$$

$$K_{PI} = \left| \frac{b}{e} \right|, \quad T_{PI} = \left| \frac{1}{\frac{a}{K_{PI}e}} \right| \quad (4)$$

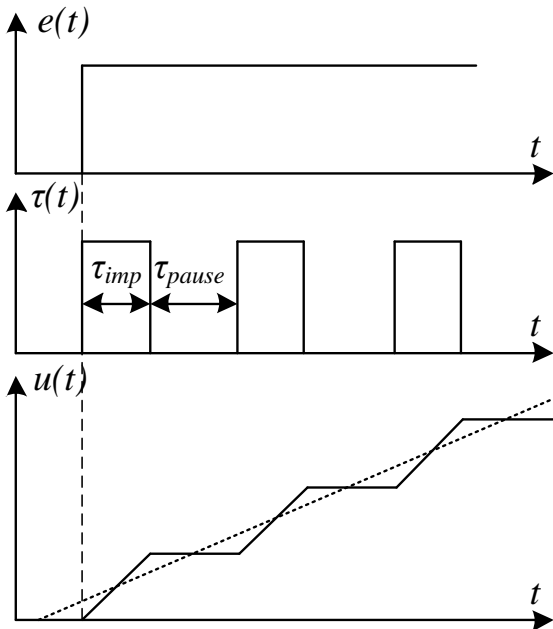


Рис. 8. Вихідний сигнал контролера

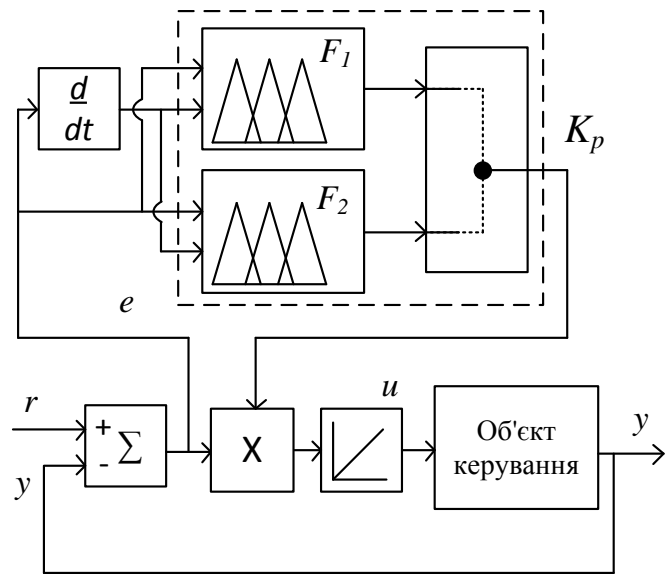


Рис. 9. Еквівалентна схема з адаптивним інтегральним регулятором

Менш точно сигнал керування двоканального нечіткого контролера може бути апроксимований як вихідний сигнал інтегрального регулятора. Структуру з двома паралельно ввімкненими блоками нечіткої логіки можна подати як пропорційну ланку зі змінним коефіцієнтом підсилення. 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. Еквівалентною до двоканальної схеми є схема з адаптацією коефіцієнта підсилення інтегрального регулятора (рис. 9). Аналогічним чином можна побудувати схему з адаптивним ПІ-регулятором. В структурі, наведеній на рис. 9, нелінійний блок виведений за межі замкненого контуру регулювання. Це дозволяє розглядати замкнену систему керування як лінійну для різних значень коефіцієнту підсилення  $K_p$ , або параметрів  $K_{PI}$  і  $T_{PI}$  у випадку адаптивного ПІ-регулятора.

Для досліджуваних ділянок водо-парового тракту котлоагрегату було проведено моделювання роботи систем керування при різних режимах теплового навантаження котлоагрегату. Схема моделювання в програмному пакеті Matlab Simulink наведена на рис. 10. Синтез блоків нечіткої логіки проведений з використанням програмного модулю Fuzzy Logic Toolbox. Для формування нечіткого виводу використаний алгоритм Mamdani.

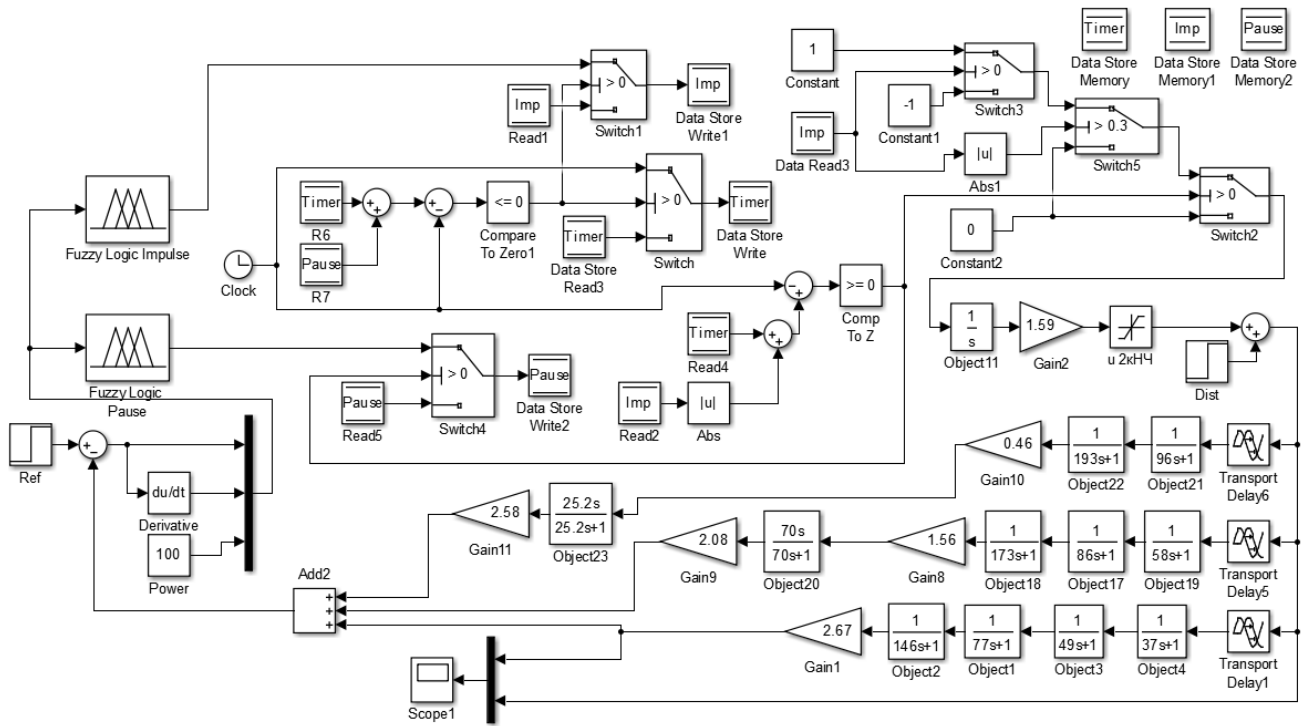


Рис. 10. Схема моделювання в Matlab Simulink

Для досліджуваних ділянок водо-парового тракту котлоагрегату з метою порівняння розраховані системи регулювання на базі ПІД-регулятора, ІМС і регулятора з динамічною корекцією (ПІ-К). Результати моделювання представлені на рис. 11.

У четвертому розділі розглянуто реалізацію програмно-апаратної системи керування з використанням відомостей про характеристики об'єкта керування на базі програмованого логічного контролера. Наведено методики налаштування запропонованої системи.

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.

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.



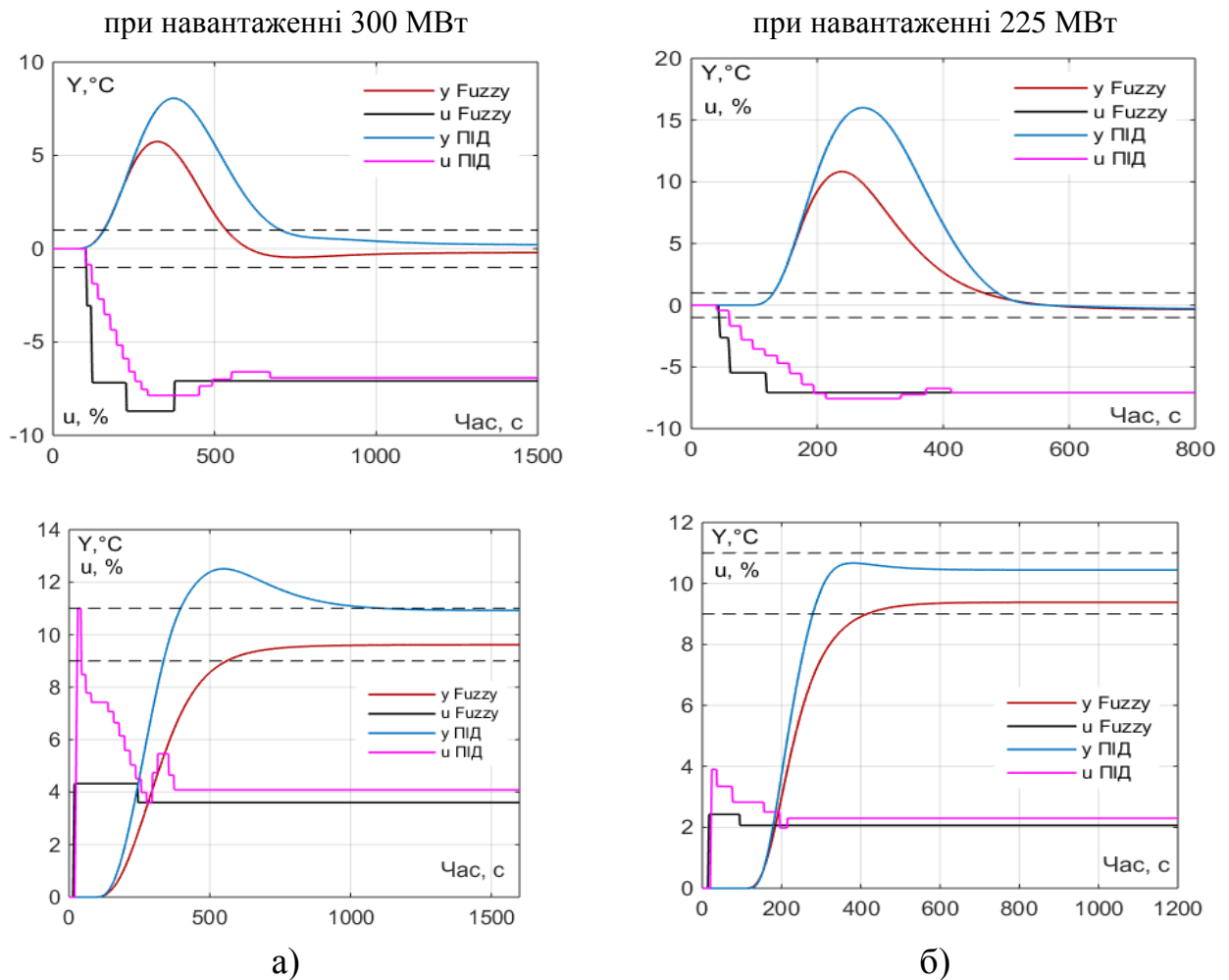


Рис. 11. Перехідні процеси по каналах завдання і збурення при ступінчастому впливі у двох режимах навантажень: а) максимальному 300 МВт; б) мінімальному 225 МВт

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.

## ВИСНОВКИ

У роботі вирішена важлива наукова і технічна задача – підвищення якості регулювання параметрів інерційних контурів котлоагрегату 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 ПД-регуляторів, що забезпечує збільшення терміну служби основного обладнання і економію енергоресурсів.

2. 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.

3. На основі отриманих експериментальних даних розроблено математичні моделі контурів регулювання температурного режиму водо-парового 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.

4. 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.

5. Проведено порівняльний аналіз функціонування класичного fuzzy ПД регулятора з діями оператора-технолога при керуванні процесом в ручному режимі на прикладі типового температурного об'єкту. Виявлені принципові відмінності в алгоритмах керування. Дії 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 або ПІ-регулятором.

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

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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. *Автору належать розробка структури двоканального нечіткого контролера і укладання баз правил для блоків нечіткої логіки.*

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) *Автору належать розробка системи автоматичного керування з нечітким адаптуючим пристроєм і математичне моделювання спроектованої системи.*

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. *Автору належить обґрунтування передумов вдосконалення автоматизації процесів управління тепловими електростанціями, що дозволить розвинути науково-методичний апарат управління складними організаційно-технічними системами з використанням експертних систем керування.*

4. 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. *Автору належить розробка структури нечіткого контролера для керування інерційними теплоенергетичними процесами.*

5. 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. *Автору належить розробка структурних рішень каналу динамічної корекції ПІ-регулятора.*

6. 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) *Автору належить розробка алгоритму роботи двоканального нечіткого контролера.*

7. 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. *Автору належить розробка регулятора з динамічним коректором для об'єктів з часовою затримкою, що містить в каналі корекції блок нечіткої логіки.*

8. 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. *Автору належить дослідження інтегро-диференціюючої ланки як ланки динамічної корекції вихідного сигналу ПІ-регулятора.*

9. 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. *Автору належить розробка структурної схеми системи керування з блоком нечіткої логіки для роботи в режимі стабілізації технологічних параметрів котлоагрегату ТЕС.*

10. 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. *Автору належить процедура синтезу системи керування на базі нечітких логічних регуляторів при регулюванні температури пари в прямоточному котлоагрегаті.*

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. – С. 457. *Автору належить аналіз застосування різноманітних структур динамічного коректора в схемі з ПІ-регулятором.*

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. *Автору належить аналіз застосування методу динамічної корекції в каскадних схемах керування.*

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. *Автору належить розробка аналітичної методики налаштування параметрів ланки динамічної корекції.*

## АНОТАЦІЯ

**Новіков П.В. Автоматизація процесів керування інерційними каналами енергоблоку теплової електростанції з використанням двоканального нечіткого контролера.** – Рукопис.

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.

У дисертаційній роботі виконано такі завдання: аналіз існуючих способів керування інерційними об'єктами з запізненням та змінними параметрами; дослідження динамічних властивостей водо-парового тракту прямоточного котлоагрегату як об'єкту керування, ідентифікація та створення математичних моделей; аналіз дій оператора-технолога при керуванні в ручному режимі

інерційними контурами водо-парового тракту котлоагрегату; 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.

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

### АННОТАЦИЯ

**Новиков П.В. Автоматизация процессов управления инерционными каналами энергоблока тепловой электростанции с использованием двухканального нечеткого контроллера.** - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – Автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2019.

Диссертация посвящена повышению эффективности работы систем автоматического управления инерционными контурами энергоблоков ТЭС, работающих в маневренных режимах.

В диссертационной работе выполнены следующие задачи: анализ существующих способов управления инерционными объектами с запаздыванием и переменными параметрами; исследование динамических свойств водопарового тракта прямоточного котлоагрегату как объекта управления, идентификация и получение математических моделей; анализ действий оператора-технолога при управлении в ручном режиме инерционными контурами водопарового тракта котлоагрегату; разработка интеллектуального контроллера на основе двухканальной структуры с использованием блоков нечеткой логики; моделирование работы системы управления с двухканальным нечетким контроллером и сравнение эффективности функционирования с известными решениями; разработка методики оценки устойчивости нелинейной системы управления с использованием блоков нечеткой логики; разработка методики настройки двухканального нечеткого контроллера; разработка автоматизированной системы управления температурным режимом котлоагрегату; техническая реализация АСУ на промышленных средствах автоматизации.

Ключевые слова: котлоагрегат, маневренные режимы, динамические характеристики, температурный режим, нечеткая логика, показатели качества функционирования, алгоритм управления, параллельная структура.

## SUMMARY

**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 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.

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 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.

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.

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.

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.