

Новіков П.В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бунке О.С.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛОАГРЕГАТУ НА БАЗІ ДВОКАНАЛЬНОГО НЕЧІТКОГО КОНТРОЛЕРА

У статті розглянуто синтез адаптивної системи автоматичного керування контуром температурного режиму прямооточного котлоагрегату. Мета статті полягає в аналізі динамічних властивостей пилувугільного прямооточного котлоагрегату при різних значеннях навантаження, розробці моделі об'єкту керування, що враховує зміни параметрів залежно від зовнішніх факторів в режимі реального часу, а також синтезі адаптивної системи автоматичного керування.

На основі отриманих експериментальних даних розроблено математичні моделі контурів регулювання температурного режиму водо-парового тракту Трипільської ТЕС у вигляді функцій передачі для двох крайніх значень навантаження енергоблоку. Проведено аналіз динамічних характеристик пилувугільного прямооточного котлоагрегату при різних значеннях навантаження. Спостерігається суттєва відмінність моделей для різних режимів роботи, що не дозволяє використовувати єдині налаштування системи керування для всього діапазону режимів роботи енергоблоку. Описано статичні характеристики блоків нечіткої логіки двоканального нечіткого контролера. Визначені аналітичні залежності параметрів моделі від поточного навантаження котлоагрегату. Розроблена модель об'єкту керування, яка враховує зміни параметрів залежно від зовнішніх факторів в режимі реального часу.

Для моделювання роботи систем зі змінними параметрами моделі об'єкту керування запропоновано замінити програмні блоки з фіксованими коефіцієнтами послідовністю ввімкнень елементарних ланок з можливістю зміни параметрів моделі безпосередньо під час моделювання. Наведені моделі розроблених функціональних блоків. Проведено імітаційне моделювання САР температурного режиму в усьому діапазоні зміни режимів роботи об'єкта керування з урахуванням залежності параметрів моделі від навантаження. Отримані результати свідчать про ефективність використання сигналу за навантаженням енергоблоку в нечіткому регуляторі, що дало змогу реалізувати систему керування, яка охоплює всі режими роботи котлоагрегату без додаткового ускладнення структури системи керування. Розроблений двоканальний нечіткий контролер демонструє необхідну якість роботи і стійкість системи автоматичного регулювання в усьому робочому діапазоні навантажень котлоагрегату.

Ключові слова: динамічні характеристики, температурний режим, нечітка логіка, simulink, моделювання, система керування.

Постановка проблеми. За даними Міністерства енергетики та захисту довкілля України доля вироблення електроенергії на ТЕС за останні 5 років впала на 10% (з 40% до 30%). Незважаючи на це, їх роль у відпрацюванні графіків електричних навантажень залишається провідною. Доля альтернативних джерел енергії при зростанні на 110% за 2019 рік складає лише 3,6%. Енергоблоки ТЕС потужністю 100-150 МВт, які можуть ефективно використовуватися 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 [1].

Енергетичний блок теплової електростанції є дуже складним комплексом агрегатів і механізмів, які мають працювати узгоджено між собою. До проблем автоматизації пилувугільних блоків середньої потужності, які вимушені працювати в маневрових режимах, додається ще одна важлива

проблема – невизначеність складу і якості палива. Котлоагрегатам ТЕС притаманні зміни динамічних характеристик як в межах доби (маневрові режими), так і під час тривалої експлуатації (перевоснащення основного обладнання, утворення накипу). 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. Тому актуальною є модернізація пилувугільних енергоблоків діючих ТЕС із метою підвищення їх ефективності, введення більш точного регулювання навантаження енергоблоків, зниження витрат на обслуговування обладнання і зменшення шкідливих викидів в атмосферу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання вдосконалення і модернізації систем керування складними теплоенергетичними об'єктами вирішувалися в роботах М.А. Коновалова [2, 3, 4], Г.Т. Кулакова [5], Ю.М. Ковриго [4, 6, 7], Т.Г. Багана [6], О.С. Бунке [7, 14], В.П. Свириденко [8], В.А. Біленко [9, 10]. Досвід налагоджувальних і експериментальних робіт, проведених низкою організацій як в нашій країні, так і за кордоном, виявив принципові проблеми, які знижують ефективність використання найбільш розповсюджених промислових регуляторів, зокрема ПП- та ППД-регуляторів [2].

Як показують дослідження фірми Honeywell, всережимні налаштування стандартних регуляторів шляхом «загрублення» коефіцієнтів забезпечують робастність системи регулювання [11]. 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 [12, 13, 14].

Постановка завдання. Метою статті є аналіз динамічних характеристик пилувугільного прямо-

точного котлоагрегату Трипільської ТЕС при різних значеннях навантаження; розробка моделі об'єкту керування, що враховує зміни параметрів залежно від зовнішніх факторів в режимі реального часу; синтез адаптивної системи автоматичного керування контуром температурного режиму котлоагрегату.

Виклад основного матеріалу дослідження. 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). Використовуючи метод додаткових членів [15], були отримані параметри функцій передачі.

В загальному випадку модель температурного об'єкта описується багатоємнісною ланкою самовирівнювання:

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

Спостерігається суттєва відмінність моделей для різних режимів роботи. При зменшенні навантаження коефіцієнти підсилення моделей збільшуються, а інерційність контурів – зменшується. 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 у динаміці пояснюється зміщенням зони максимальної теплоємності по водопаровому 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.

Система автоматичного регулювання (САР) температурного режиму пароводяного тракту є системою із введенням похідних від випереджаючих сигналів, тому для налаштування регулятора спочатку потрібно отримати налаштування диференціаторів [8].

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

Грунтуючись на параметрах моделі, були розраховані диференціатори температур НРЧ і ВРЧ. Параметри диференціаторів розраховані за методом РАФХ на квадратичний критерій якості $m = 0.485$, що приблизно відповідає коефіцієнту затухання перехідного процесу ($\psi = 0.95$).

Функція передачі диференціатора для ділянки НРЧ має такий вигляд:

$$W_D^{НРЧ} = \frac{64.5s}{25.2s + 1} \quad (2)$$

Функція передачі диференціатора для ділянки ВРЧ має такий вигляд:

$$W_D^{ВРЧ} = \frac{145.6s}{70s + 1}, \quad (3)$$

На Рис. 2 наведено порівняння реакції об'єкта керування на одиничне ступінчате збурення з урахуванням сигналів від диференціаторів при різних значеннях навантаження.

Для охоплення всього діапазону робочого навантаження енергоблоку запропоновано використовувати як регулятор у системі керування температурним режимом двоканальний нечіткий контролер [16]. Синтез системи керування, лінг-

вістичні змінні та функції належності наведені в роботах [16, 17].

Для вхідного параметру сигналу неузгодженості заданий діапазон від -20°C до $+20^\circ\text{C}$. Такі межі зумовлені вимогами до точності підтримання температури перегрітої пари з урахуванням можливих технологічних відхилень. Для вхідного параметру de/dt заданий діапазон від $-0,3^\circ\text{C}/\text{c}$ до $+0,3^\circ\text{C}/\text{c}$. Межі швидкості зміни сигналу помилки визначаються динамічними властивостями об'єкту керування та величиною збурень. Третьою вхідною змінною є поточне навантаження енергоблоку. Межі роботи пилувугільного котлоагрегату становлять від 75% до 100%.

Вихідним параметром блоку формування імпульсів є тривалість імпульсів. Діапазон зміни вихідного параметра визначений від $-4,2$ секунд до $+4,2$ секунд. Вихідним параметром блоку формування пауз 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. При максимальному навантаженні ця тривалість складає 210 с.

На Рис. 3 і Рис. 4 наведені поверхні «вхід-вихід» нечітких блоків при різних значеннях навантаження. Фактично ці поверхні є статичними характеристиками нечіткого контролера. За допомогою поверхні в тривимірному просторі яскраво виражено характер роботи такого нелінійного елемента як блок із нечітким логічним виводом. Наглядно видно зміну статичної характеристики залежно від поточного навантаження. Таким чином відбувається адаптація налаштувань двоканального нечіткого контролера до зміни динаміки об'єкта керування.

Імітаційне моделювання САР. Особливістю дослідження розробленої системи керування на базі двоканального нечіткого контролера є те, що керуючий блок є нелінійним елементом. Це робить всю систему керування нелінійною. В цьому випадку для дослідження, наприклад робастності системи, недосить проварювати параметри моделі в діапазоні $\pm 20-30\%$, оскільки в нелінійних системах

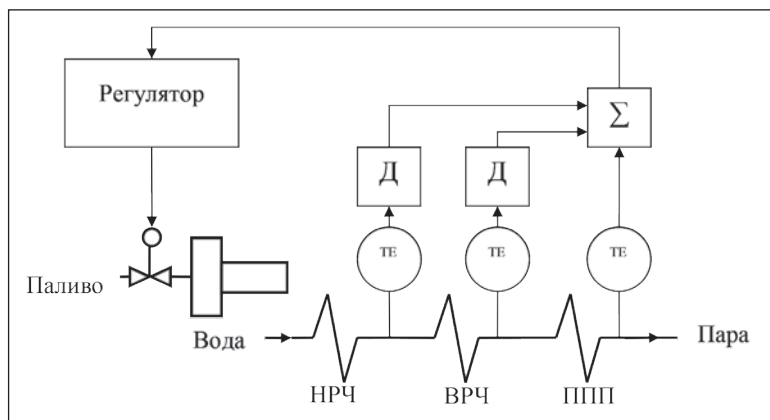


Рис. 1. Структурна схема САР температурного режиму

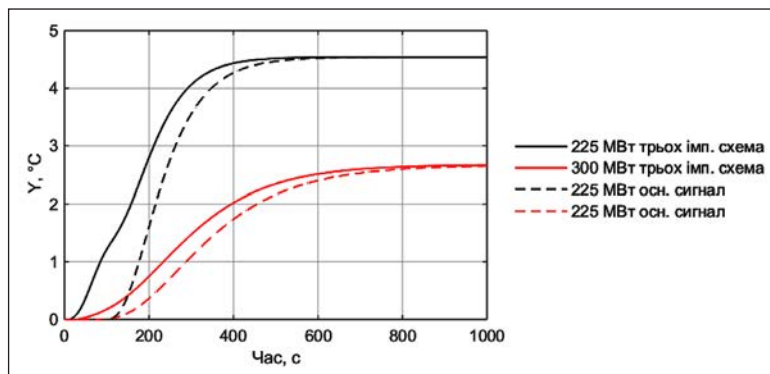


Рис. 2. Порівняння перехідних характеристик об'єкта

не виконується принцип суперпозиції і не можна гарантувати, що в проміжному положенні нелінійна система буде забезпечувати задану якість керування. Вирішенням цієї задачі може бути використання моделі об'єкта керування, яка враховує зміну параметрів залежно від зовнішніх факторів, наприклад навантаження енергоблоку. В Matlab / Simulink побудована модель парового тракту до проміжної точки (Рис. 7). Ця модель враховує зміни динамічних характеристик ділянок водопарового тракту котла (НРЧ, ВРЧ, ППП) залежно від навантаження енергоблоку. Зміна навантаження є зовнішнім збуренням для САР температурного режиму.

Зміна в реальному часі параметрів моделі, що в загальному випадку описується функцією передачі (1), досягається таким чином. Коефіцієнт передачі $K_{об}$ залежить від навантаження і змінюється від 2,67 до 4,54 при максимальному і мінімальному навантаженні. В найпростішому випадку цей зв'язок можна представити у вигляді формули:

$$K_{об} = K_{об}^{MIN} + \frac{N - 75}{100 - 75} (K_{об}^{MAX} - K_{об}^{MIN}), \quad (4)$$

де $K_{об}$ – коефіцієнт передачі об'єкту, $K_{об}^{MIN}$, $K_{об}^{MAX}$ – мінімальне і максимальне значення коефіцієнту передачі об'єкту, N – поточне значення навантаження енергоблоку.

Модель підмаски змінного коефіцієнту підсилення $K_{об}$ в Simulink матиме такий вигляд:

Сталі моделі об'єкту також залежать від навантаження, але в блоці Transfer function пакету Simulink напряму параметри змінювати не можна. Запропоновано аперіодичну ланку представити у вигляді інтегрувальної ланки, охопленої зворотним зв'язком:

$$\frac{1}{T_i s + 1} = \frac{\frac{K_i}{s}}{1 + \frac{K_i}{s}} = \frac{K_i}{s + K_i} = \frac{1}{\frac{1}{K_i} s + 1}, \quad (5)$$

$$T_i = T_i^{MIN} + \frac{N - 75}{100 - 75} (T_i^{MAX} - T_i^{MIN}), \quad (6)$$

де T_i – i -та стала часу аперіодичної ланки, T_i^{MIN} , T_i^{MAX} – значення i -ї сталої часу аперіодичної ланки при мінімальному і максимальному значеннях навантаження, N – поточне значення навантаження енергоблоку

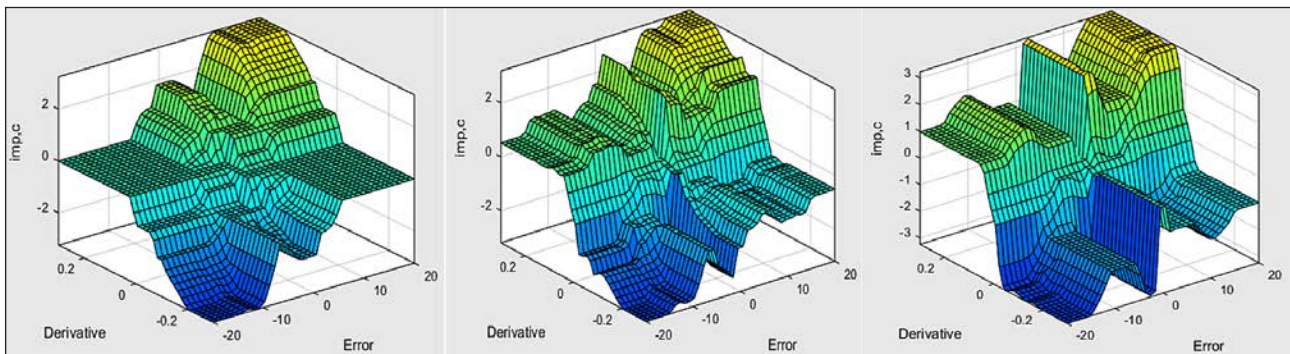


Рис. 3. Поверхня «вхід-вихід» FIS-блоку імпульсів: а – $N = 225\text{MWt}$, б – $N = 265\text{MWt}$, в – $N = 300\text{MWt}$

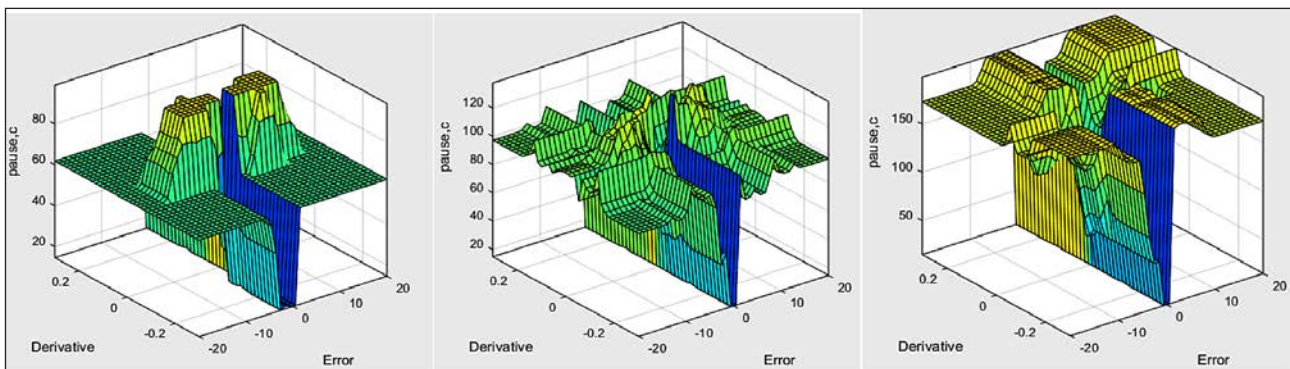


Рис. 4. Поверхня «вхід-вихід» FIS-блоку пауз: а – $N = 225\text{MWt}$, б – $N = 265\text{MWt}$, в – $N = 300\text{MWt}$

Модель підмаски змінної сталої часу T_i в Simulink матиме такий вигляд:

Часову затримку моделі об'єкту, яка реалізується блоком Transport delay пакету Simulink, також напряму змінювати не можна. Запропоновано транспортну затримку апроксимувати послідовним включенням аперіодичних ланок в кількості від 2 до 5 залежно від величини транспортної затримки. Для транспортної затримки τ_{ob} до 20 с використовується дві аперіодичні ланки, а для $\tau_{ob} = 80 \div 95$ – шість аперіодичних ланок.

На Рис. 8 наведені перехідні процеси, отримані в результаті імітаційного моделювання. На систему регулювання здійснювалися різного роду зовнішні збурення: по завданню, зі сторони регульованого органа (відповідає збуренню за паливом), а також по зміні навантаження. Навантаження змінювалося 5 разів в усьому робочому діапазоні від 225 МВт (75% від номінального) до 300 МВт.

Система регулювання з двоканальним нечітким контролером забезпечує задану якість керування в усьому діапазоні навантажень енерго-

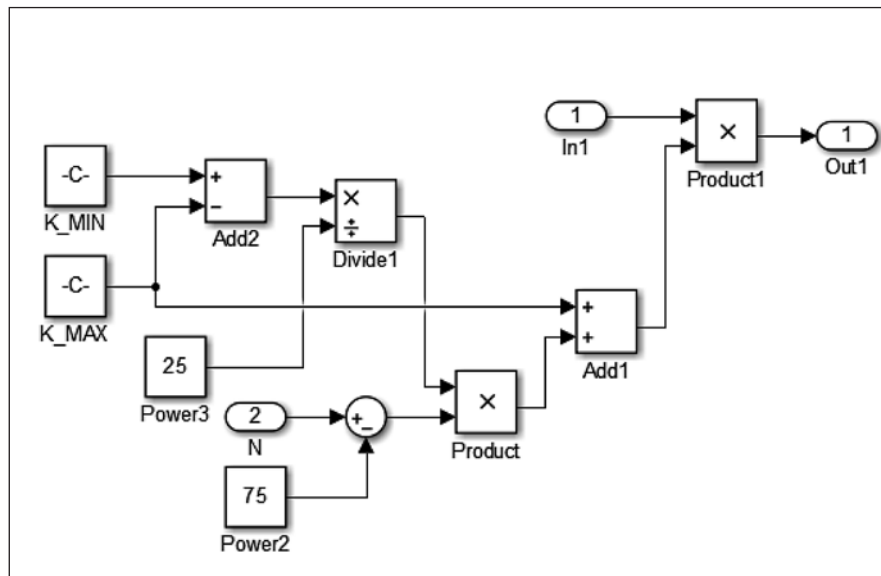


Рис. 5. Модель змінного коефіцієнта підсилення

де N – вхідний сигнал поточного навантаження енергоблоку, K_{MIN} , K_{MAX} – мінімальне і максимальне значення коефіцієнту підсилення, $In1$, $Out1$ – вхідний і вихідний сигнали ланки

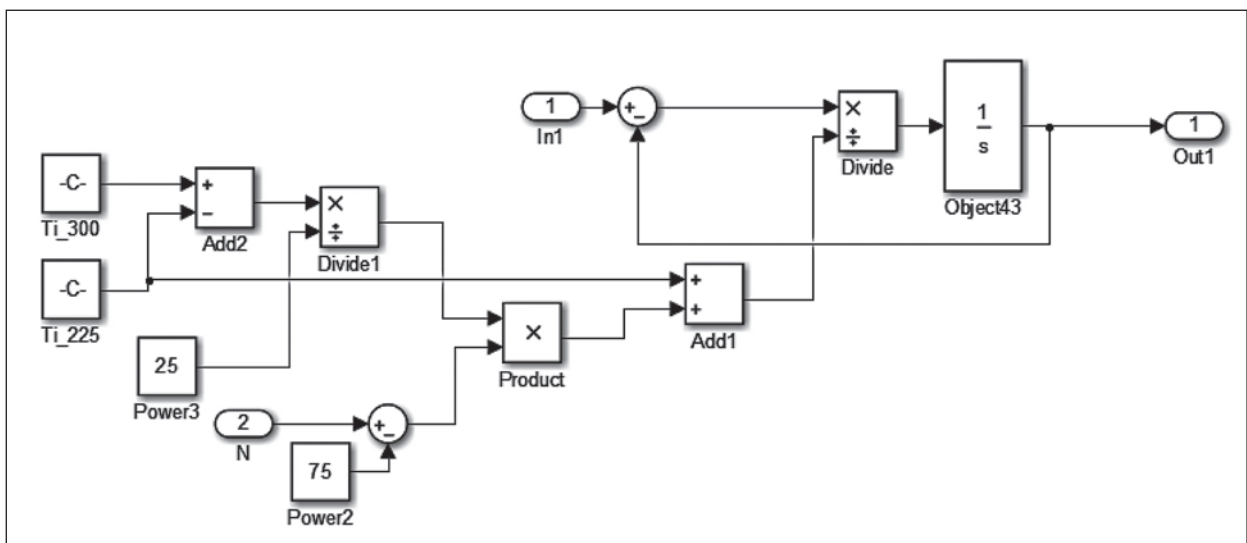


Рис. 6. Модель аперіодичної ланки зі змінною сталою часу

де N – вхідний сигнал поточного навантаження енергоблоку, Ti_{225} , Ti_{300} – значення сталої часу аперіодичної ланки при мінімальному і максимальному значеннях навантаження, $In1$, $Out1$ – вхідний і вихідний сигнали ланки

блоку, максимальне динамічне відхилення менше 13°C при мінімальному навантаженні, при максимальному навантаженні динамічне відхилення не перевищує 6°C . В перехідних режимах кількість включень ВМ не перевищувала 5 разів. Отримані результати свідчать про ефективність використання сигналу за навантаженням енергоблоку в нечіткому регуляторі, що дало змогу реалізувати систему керування, яка охоплює всі режими роботи котлоагрегату без додаткового ускладнення структури системи керування.

Висновки. Проведено синтез двоканального нечіткого контролера для керування температурою в проміжній точці прямооточного котлоагрегату на основі отриманих математичних моделей. Визначені необхідні вхідні змінні, їх діапазони. Розроблено базу правил для обох блоків нечіткої логіки двоканального fuzzy-контролера.

На основі отриманих експериментальних даних розроблено математичні моделі контурів регулювання температурного режиму

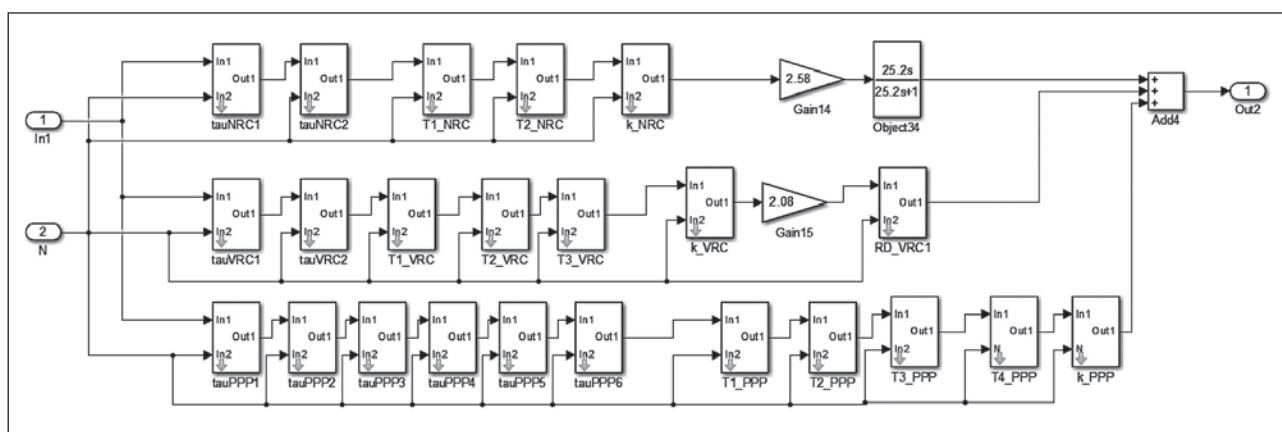


Рис. 7. Модель парового тракту до проміжної точки

де N – вхідний сигнал поточного навантаження енергоблоку, τ_{NRC1} , τ_{NRC2} – аперіодичні ланки для апроксимації затримки сигналу після НРЧ, $T1_NRC$, $T2_NRC$ – аперіодичні ланки об'єкту по температурі після НРЧ, k_NRC – коефіцієнт підсилення об'єкту по температурі після НРЧ, τ_{VRC1} , τ_{VRC2} – аперіодичні ланки для апроксимації затримки сигналу після ВРЧ, $T1_VRC$, $T2_VRC$, $T3_VRC$ – аперіодичні ланки об'єкту по температурі після ВРЧ, k_VRC – коефіцієнт підсилення об'єкту по температурі після ВРЧ, τ_{PPP1} - τ_{PPP6} – аперіодичні ланки для апроксимації затримки сигналу після ППП, $T1_PPP$ - $T4_PPP$ – аперіодичні ланки об'єкту по температурі після ППП, k_PPP – коефіцієнт підсилення об'єкту по температурі після ППП, Gain14 і Object34 – диференціатор сигналу по температурі НРЧ, Gain15 і RD_VRC1 – диференціатор сигналу по температурі ВРЧ, In1 , Out1 – вхідний і вихідний сигнали об'єкту керування з урахування сигналів від диференціаторів

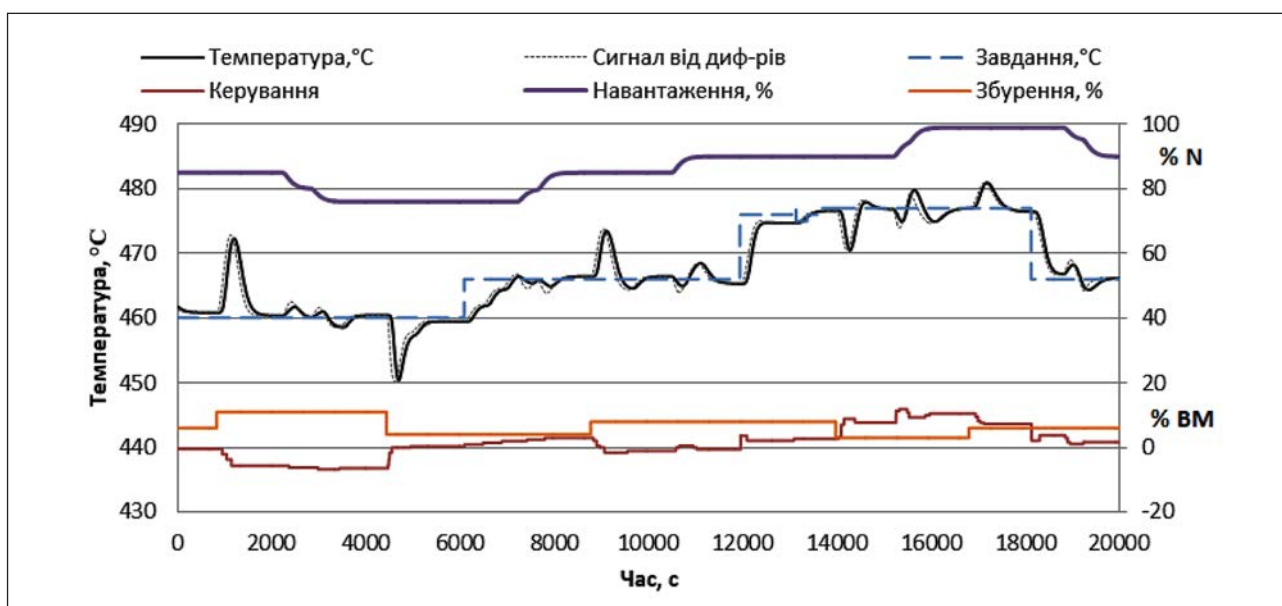


Рис. 8. Результати моделювання роботи АСР температурного режиму

водопарового тракту у вигляді функцій передачі для двох крайніх значень навантаження енергоблоку – 225МВт і 300 МВт.

Для моделювання роботи нелінійної системи керування розроблена комп'ютерна модель, яка враховує зміни параметрів об'єкту керування

залежно від навантаження енергоблоку. На основі імітаційного моделювання можна стверджувати, що двоканальний нечіткий контролер забезпечує необхідну якість роботи і стійкість системи автоматичного керування в усьому діапазоні зміни навантажень енергоблоку ТЕС.

Список літератури:

1. Черноусенко О. Стан енергетики України та результати модернізації енергоблоків ТЕС. *Проблеми загальної енергетики*. 2018. Т. 4 (39). С. 20–28.
2. Коновалов М.А. Проблемы автоматизации инерционных теплоэнергетических объектов. Киев, 2009. 309 с.
3. Коновалов М.А., Бунке А.С. Основы новой стратегии синтеза систем оптимального управления. Киев, 2014. 280 с.
4. Ковриго Ю., Коновалов М., Бунке А. Модернизация системы управления тепловой нагрузкой прямоточного котлоагрегата ТЭС с использованием динамического корректора. *Теплоэнергетика*. 2012. № 10. С. 1–8.
5. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами : учебное пособие / Г.Т. Кулаков, А.Т. Кулаков, В.В. Кравченко и др.; под ред. Кулакова Г.Т. Минск : Вышэйшая школа, 2017. 238 с.
6. Ковриго Ю., Баган Т. Методика налаштування H_∞ -ПІД регулятора для об'єктів із запізненням. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. Київ, 2013. № 1. С. 27–33.
7. Ковриго Ю., Баган Т., Бунке А. Обеспечение робастного управления в системах регулирования инерционными теплоэнергетическими объектами. *Теплоэнергетика*. 2014. № 3. С. 9–14.
8. Свириденко В. Способ настройки двухконтурной автоматической системы регулирования (ДАСР) с дифференциатором по опережающему сигналу. *Энергетика и электрофикация*. 2018. № 3. С. 27–37.
9. Биленко В., Шавочкин И. Анализ эффективности введения сложных законов преобразования дополнительных сигналов в многоконтурных автоматических системах регулирования энергоблоков. *Теплоэнергетика*. 2006. № 4. С. 57–65.
10. Биленко В. Многоконтурные автоматические системы регулирования с несколькими регулирующими воздействиями и их применение для поддержания температуры пара прямоточных котлов. *Теплоэнергетика*. 2011. № 10. С. 51–59.
11. Штейнберг Ш., Серёжин Л., Залуцкий И., Варламов И. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования. *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2004. № 7. С. 1–7.
12. Бунке О., Саков Р., Новіков П. Проблеми та передумови вдосконалення автоматизації процесів управління ТЕЦ. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. 2018. № 61. С. 20–25.
13. Кулаков Г., Кравченко В., Макошко Ю. Методика расчета экономической эффективности внедрения инновационных систем автоматического регулирования ТЭС (Часть первая). *Наука и техника : международный научно-технический журнал*. 2012. № 5. С. 92–97.
14. Кулаков Г., Кравченко В., Макошко Ю. Методика расчета экономической эффективности внедрения инновационных систем автоматического регулирования ТЭС (Часть вторая). *Наука и техника : международный научно-технический журнал*. 2013. № 2. С. 77–82.
15. Radtke M. Zur Approximation linearer aperiodischer Übergangsfunktionen. *Zeitschrift messen, steuern, regeln*. 1966. № 9. S. 192–196.
16. Ковриго Ю., Новіков П. Алгоритм роботи двоканального нечіткого контролера для керування теплоенергетичними об'єктами. *Наукові вісті КПІ ім. Ігоря Сікорського*. 2019. № 3. С. 24–32.
17. Ковриго Ю., Новіков П. Двоканальний нечіткий контролер для регулювання технологічних параметрів в умовах нестационарності динамічних характеристик об'єкта керування. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2019. Т. 11 № 1. С. 4–13.

Novikov P.V., Bunke A.S. MODELING OF CONTROL SYSTEM OF TEMPERATURE MODE OF DIRECT-FLOW STEAM BOILER BASED ON TWO-CHANNEL FUZZY CONTROLLER

The article deals with the synthesis of an adaptive system of the control system of the temperature mode of the direct-flow steam boiler unit. The purpose of the article is to analyze the dynamic properties of coal direct-flow boiler at different loads, to develop a model of a control object that takes into account changes of parameters depending on external factors in real time, as well as the synthesis of an adaptive control system. Based on obtained experimental data, mathematical models of contours of regulation of the temperature mode

of the water-steam tract of Trypillia TPP in the form of transfer functions for two extreme values of load of the power unit were developed.

The dynamic characteristics of the coal-fired boiler unit at different load values are analyzed. There is a significant difference between models for different modes of operation, which does not allow the use single control system settings for the whole range of modes of the unit. Static characteristics of blocks of fuzzy logic of a two-channel fuzzy controller are described. The analytical dependences of the model parameters on the current load of the boiler are determined. The operating model has been developed that considers change of parameters depending on external factors in real-time.

In order to model the operation of systems with variable parameters of the control object model, it is proposed to replace the fixed-ratio program blocks with a sequence of elementary links, with the possibility of changing the model parameters directly during the simulation. Models of functional blocks developed are presented. A simulation of the temperature mode control system was performed over the entire range of modes of operation of the control object, considering the dependence of the model parameters on the load.

The results indicate the efficiency of using the signal of unit load in the fuzzy controller, is allowed to implement a control system that covers all modes without additional complications boiler control system structure. The developed two-channel fuzzy controller demonstrates the satisfactory quality of operation and stability of the automatic control system in the whole operating range of loads of the boiler unit.

Key words: *dynamic characteristics, temperature control, fuzzy logic, fuzzy control, simulink, modeling, control system.*