

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Красніков Олександр Леонідович



УДК 681.53:519.71

ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ВПОРСКА
КОТЛОАГРЕГАТА ТПП-312

Спеціальність 05.13.07 – «Автоматизація процесів керування»

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Донецьк – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті прикладної математики і механіки Національної академії наук України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Ткаченко Валерій Миколайович,
Інститут прикладної математики і механіки
Національної академії наук України,
завідувач відділу теорії керуючих систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Каргін Анатолій Олексійович,
декан фізико-технічного факультету, завідувач
кафедри «Комп'ютерних технологій»,
Донецький національний університет
МОН України

доктор технічних наук, професор
Чепцов Михайло Миколайович
проректор з наукової роботи, завідувач кафедри
«Автоматика, телемеханіка, зв'язок та
обчислювальна техніка»,
Донецький інститут залізничного транспорту
Української державної академії залізничного
транспорту МОН України

Захист відбудеться «26» червня 2013 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д11.052.03 ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, VIII навч. корп., ауд. 704.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, II навч. корп.

Автореферат розісланий «23» травня 2013 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д11.052.03
кандидат технічних наук, доцент



Г.В. Мокрий

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Теплоенергетичний комплекс України включає 97 енергоблоків ТЕС. З них близько 60% – прямоточні котли надкритичного тиску (НКТ). Серед них варто відзначити енергоблоки НКТ з котлоагрегатами ТПП-312, загальна нормативна потужність яких складає 5400 МВт. Більшість енергоблоків уведений в експлуатацію в 60-80-х рр. ХХ століття і вже відпрацювали свій ресурс. Крім заходів, пов'язаних з модернізацією та заміною основного тепломеханічного обладнання, особливої актуальності набуває завдання модернізації систем керування, введення нових методів управління, які знизять навантаження на пароводяний тракт, підвищивши ресурс обладнання.

Серед факторів, які впливають на зношеність основних вузлів енергоблоку, слід відзначити вплив перегріву металу пароводяного тракту котлоагрегату: близько половини аварійних зупинок пов'язані з відмовою поверхонь нагріву. Також відзначається зниження ресурсу пароперегрівників: при перевищенні нормативної температури на 10 °С довговічність металу знижується в 1,7-2,5 рази. Наслідком того, що системи управління не витримують заданий температурний режим, є вимушений простій енергоблоку. Оцінка економії коштів за рахунок зниження простоїв енергоблоку НКТ 300 МВт оцінюється більше 700 тис. грн., з яких економія за рахунок зниження аварійності обладнання становить 80-92%.

Задачами автоматизації об'єктів теплоенергетики займалися Є.П. Стефані, А.С. Ключев, В.Я. Ротач, Г.П. Плетнев, М.А. Дуель, О.Х. Горелік та інші в рамках досліджень, виконуваних у ВТІ, ЦНДІКА, МЕІ, КІА, ХНДІКА та інших установах. Розробкою та впровадженням окремих систем контролю та керування в Україні займаються ЛьвівОРГРЕС та ДонОРГРЕС. Однак більша частина досліджень у галузі керування котлоагрегатами присвячена котлам барабанного типу, для яких існують добре перевірені математичні моделі динаміки основних параметрів. Більшість робіт орієнтовані на завдання керування потужністю котла шляхом зміни витрати живильної води. Алгоритми роботи існуючих систем керування, які розроблено за кордоном, відкрито не публікуються і є предметом комерційної таємниці. Крім того, поширенню зарубіжних систем перешкоджає висока їх вартість та відсутність можливості вільного тиражування в межах одного об'єкта.

Перераховані проблеми зумовлюють актуальність постановки та вирішення завдання керування охолоджуючими впорками енергоблоку НКТ. Розробка та реалізація сучасної системи керування дозволить підвищити надійність функціонування обладнання і уникнути різкого скорочення ресурсу пароперегрівників.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота відповідає розпорядженню № 145-р «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року» від 15 березня 2006 р. та виконана згідно з темами Інституту прикладної математики і механіки Національної

академії наук України № 0107U000462 «Розробка математичних моделей, методів ідентифікації і керування процесами тепло- та електроенергетики» та № 0112U000025 «Розробка математичних моделей і методів їх дослідження, ідентифікації та керування технологічними процесами з розподіленими параметрами для об'єктів нанотехнологій та енергетики», в яких автор дисертації брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення точності регулювання температури перегрітого пару котлоагрегату ТПП-312 за рахунок використання методів параметричного синтезу регуляторів впорска, який враховує діапазон змін параметрів об'єкту керування, що дозволить знизити зношення пароперегрівачів енергоблоку НКТ.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Дослідити процес генерації пару в котлоагрегаті ТПП-312 як об'єкт керування з урахуванням добової зміни навантаження.

2. Розробити модель нагріву пару в пароводяному тракті котла та запропонувати методи параметричної ідентифікації моделі.

3. Розробити і реалізувати методи параметричного синтезу стабілізуючого регулятора охолоджуючих впорсків, який дозволить знизити перегрів пару для широкого діапазону регулювання енергоблоку.

4. Запропонувати схему інтеграції синтезованого регулятора охолоджуючого впорска в існуючу інформаційно-керуючу систему.

Об'єкт дослідження – процес регулювання впорска в пароводяний тракт котлоагрегату ТПП-312.

Предмет дослідження – аналіз і параметричний синтез регулятора впорска котлоагрегату ТПП-312.

Методи дослідження. При побудові моделі сегмента пароводяного тракту використовувалися математичні моделі зміщення і теплопереносу, методи та алгоритми параметричної ідентифікації, методи сучасної теорії керування та статистичний аналіз якості керування.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Одержала подальший розвиток математична модель динаміки перегрівної частини пароводяного тракту, яка відображає взаємозв'язок основних вимірюваних показників, що дозволить формалізувати задачу аналізу та синтезу системи керування.

2. Набули подальшого розвитку методи ідентифікації параметрів математичної моделі на основі методу найменших квадратів, запропоновано та реалізовано робастний метод ідентифікації в реальному часі, який дозволяє знизити вплив похибки вимірювання на результат ідентифікації.

3. Уперше запропоновані методи синтезу ПІД-регуляторів для білінійних нестационарних систем, які спираються на прямий метод Ляпунова і враховують діапазон змін параметрів системи. Синтезовані регулятори дозволяють підвищити точність регулювання температури пару і, відповідно, знизити швидкість зношення основних елементів пароводяного тракту на 10–20%.

4. Уперше запропоновано метод виділення режимів функціонування енергоблоку на базі методу інкрементної кластеризації, який враховує форму розподілу вимірювань у кластері відповідно до систем вимірювання та керування, що дозволяє обґрунтувати вибір діапазону зміни параметрів системи у задачі параметричного синтезу регулятора впорску.

Головні наукові положення, винесені на захист:

1. Шляхом аналізу феноменологічної моделі та параметричної ідентифікації встановлено, що при зміні режиму роботи енергоблоку НКТ 300 МВт в нормативному діапазоні регулювання коефіцієнт тепловіддачі пароперегрівачів високого тиску змінюється в 4-5 разів, що призводить до зміни характеру перехідних процесів у системі керування і свідчить про необхідність налаштування коефіцієнтів регулятора з врахуванням інтенсивності теплообміну в тракці котлоагрегату.

2. Установлено, що застосування розробленого методу параметричного синтезу, заснованого на прямому методі Ляпунова, дозволяє отримати налаштування регулятора з врахуванням діапазону зміни параметрів системи в різних режимах. Шляхом математичного моделювання з використанням даних вимірювань енергоблоку НКТ встановлено, що синтезовані регулятори дозволяють знизити відхилення температури гострого пару від нормативного значення 545°C і, відповідно, знизити зношеність елементів вихідної частини пароводяного тракту котла.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблені і реалізовані алгоритми числового моделювання динаміки пароводяного тракту та оперативної ідентифікації коефіцієнта тепловіддачі пароперегрівачів пароводяного тракту котла, які дозволяють оцінити температуру пароводяної суміші в тракці високого тиску з точністю, яка відповідає точності вимірювальної техніки ($0,6\text{--}3,0^{\circ}\text{C}$).

2. Реалізовано алгоритми синтезу ПД-регуляторів охолоджуючого впорску. Побудовані регулятори дозволяють вирішити задачу стабілізації температури пару з врахуванням обмежень на швидкість перехідного процесу. Результати числового моделювання показали зниження середнього значення температури пару з 548°C до 545°C та середньоквадратичне відхилення з $2,5\text{--}3^{\circ}\text{C}$ до $1,5\text{--}2,5^{\circ}\text{C}$.

3. Розроблено і реалізовано систему автоматизованого виділення основних режимів функціонування енергоблоку на основі інкрементних методів кластеризації. Пропонована система виконує обробку даних у режимі реального часу і дозволяє виконувати оперативне налаштування регуляторів окремих режимів у разі зміни основних параметрів котлоагрегату (внаслідок модернізації або зміни нормативних вимог до експлуатації).

4. Пропоновані методи реалізовані в окремих модулях системи підтримки прийняття рішень. Структурна схема та основні модулі системи керування припускають реалізацію, як у складі існуючої інформаційно-керуючої системи, так і в складі сучасних комплексів, розроблених з урахуванням стандартів ІЕС (International Electrotechnical Commission, Міжнародної Електричної Комісії).

Реалізовано модуль синтезу системи керування з контуром налаштування коефіцієнтів регулятора з урахуванням особливостей реалізації операцій нечіткої логіки в контролерах SIMATIC S7-300H і OMRON C200H (FZ-001), що дозволить зробити систему апаратно незалежною.

5. Результати дисертаційного дослідження використано при розробці інформаційно-керуючої системи ОКУР, яку впроваджено на енергоблоках Зуївської ТЕС. Отримано документи, які підтверджують впровадження результатів роботи у дослідно-промислову і промислову експлуатацію. Модернізована стара інформаційно-керуюча система технологічних параметрів електростанції. Регулятор впорску апробовано в режимі рекомендацій оперативному персоналу.

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати роботи, що вносяться на захист, отримані автором самостійно.

Особистий внесок здобувача в публікаціях: [4] – запропоновано алгоритм ідентифікації параметрів лінійної регресії на основі робастного методу найменших квадратів та реалізовано його рекурентний варіант для оцінювання параметрів у режимі реального часу; [6] – запропоновано використання відстані Чебишева для оцінки відстані точки від кластера, обрано основні параметри алгоритму інкрементної кластеризації та виконано обчислювальний експеримент із застосуванням даних вимірювань енергоблоку НКТ 300 МВт; [7] – розроблено та реалізовано математичну модель пароперегівача високого тиску пароводяного тракту енергоблоку НКТ 300 МВт; [13] – реалізовано обраний метод, запропоновано основні параметри алгоритму кластеризації та виконано обчислювальний експеримент із застосуванням даних вимірювань енергоблоку НКТ 300 МВт.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи викладалися на 7 конференціях: V науково-практична конференція з міжнародною участю «Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС '2010», Київ, 21-25 червня 2010 р.; Чотирнадцята Міжнародна конференція «Моделювання, ідентифікація, синтез систем керування», Москва–Донецьк, 11–17 вересня 2011; 18 Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика / Automatics – 2011», Львів, 28-30 вересня 2011 р.; III Міжнародна науково-практична конференція «Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ–2012)», Запоріжжя, 28-30 березня 2012 р.; XII міжнародна наукова конференція імені Т. А. Таран "Інтелектуальний аналіз інформації ІАІ-2012", Київ, 16-18 травня 2012; Міжнародна конференція Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту, Херсон, 27-30 травня 2012; VII Міжнародна науково-практична конференція «Математичне та імітаційне моделювання систем (МОДС-2012)», Чернігів, 25-28 червня 2012.

Результати дисертаційних досліджень були обговорені та отримали схвалення у відділі Теорії керуючих систем Інституту прикладної математики і механіки (2010, 2013 рр.), кафедрі автоматики і телекомунікацій ДВНЗ Донецький національний технічний університет (2013 р.), кафедрі автоматики, телемеханіки, зв'язку та обчислювальної техніки Донецького інституту

залізничного транспорту (2013 р.), кафедрі комп'ютерних технологій Донецького національного університету (2013 р.).

Публікації. За результатами наукових досліджень опубліковано 13 друкованих праць, у тому числі 5 у наукових виданнях, затверджених МОН України та 7 в матеріалах та тезах доповідей на науково-технічних конференціях.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів і висновку, викладених на 224 сторінках машинописного тексту, з них 168 сторінок основного тексту, ілюстрованого 66 рисунками. Робота містить 21 таблицю, список використаної літератури зі 161 найменування і 7 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Перший розділ «Актуальні задачі побудови систем регулювання температури пару котлоагрегата ТЕС» містить постановку завдання та огляд існуючих систем керування охолоджуючими впорсками.

Згідно з даними статистики Міністерства енергетики та вугільної промисловості України, незважаючи на проведений ремонт, зберігаються темпи старіння обладнання. Основні елементи і вузли ТЕС (поверхні нагріву котла, пароохолодники, електродвигуни живильних насосів та ін.) досягли допустимого терміну експлуатації та потребують заміни.

З метою підвищення ресурсу енергоблоку, керівництво генеруючих підприємств проводить заходи щодо реконструкції існуючих блоків. Крім заміни основного обладнання виконується модернізація системи контролю та керування і реконструкція систем регулювання блоку з метою збільшення ресурсу енергоблоку, підвищення максимальної потужності та маневреності.

Серед факторів, які впливають на зношеність основних вузлів енергоблоку, слід відзначити вплив перегріву металу парогенераторів котла. Зокрема, в літературі наводиться статистика відмов, пов'язаних з перегрівом труб котла: 37-45% аварійних зупинок пов'язані з відмовою поверхонь нагріву. Також відзначається зниження ресурсу пароперегрівників: при перевищенні нормативної температури на 10 °С довговічність металу знижується в 1,7-2,5 рази; 61% випадків зниження ресурсу пароперегрівників пов'язані з перегрівом труб (із них 23% – вище гранично допустимої температури 585°C). Перевищення температури металу пароперегрівача викликає структурні зміни стінок труб і підвищує вірогідність розривів.

Таким чином, необхідно створення сучасної системи керування охолоджуючими впорсками котлоагрегату з метою зниження перегріву пару, що дозволить підвищити ресурс енергоблоку і знизити кількість аварійних зупинок.

Більшість котлів українських ТЕС вироблені підприємством «Красный котельщик» (Таганрозький котельний завод). З них близько 60% – прямооточні котли надкритичного тиску.

У роботі розглядається котел ТПП-312 Таганрозького котельного заводу. Котлоагрегат у нормативному режимі роботи виробляє 1000 тонн перегрітого пару за годину при температурі 545°C і тиску 255 кгс/см^2 . В Україні котлоагрегати ТПП-312 у поєднанні з турбіною К-300-240 (номінальна потужність 300 МВт) встановлені на 18 енергоблоках Запорізької, Зуївської, Ладжинської і Вуглегірської ТЕС загальною потужністю 5400 МВт.

Аналогічну компоновку і параметри пару мають котли ТПП-210 (енергоблоки Зміївської ТЕС, Трипільської ТЕС, Криворізької ТЕС), ТГМП-314 (енергоблоки Трипільської ТЕС) і ТГМП-344 (енергоблоки Харківської та Северодонецької ТЕЦ).

Конструктивно котел є газоповітряним трактом, який має П-подібну форму і складається з топкової камери і конвективної шахти, з'єднаних у верхній частині горизонтальним газоходом, де розташовано блоки пароперегрівачів та колектори впорску.

При зміні навантаження агрегату і відсутності регулюючих пристроїв змінюється і температура перегрітого пару. Завдання регулювання параметрів пару полягає в підтримці його температури згідно з вимогами технологічної інструкції в межах $-10\dots+5^{\circ}\text{C}$. Для регулювання температури пару у прямооточних котлах знайшли широке застосування впорскувальні парохолоджувачі. На досліджуваному типі котлів ТПП-312 встановлені два впорски.

Для аналізу об'єкту керування обрані дані двох котлоагрегатів ТПП-312 у нормативних режимах роботи при навантаженні від 150 до 300 МВт. Вибрано декілька наборів вимірювань, які включають дані по двох нитках, що функціонують незалежно одна від одної.

Якість регулювання температури гострого пару не відповідає вимогам технологічних інструкцій (рис. 1), що вказує на необхідність врахування інерційності та розподіленості процесів у енергоблоці.

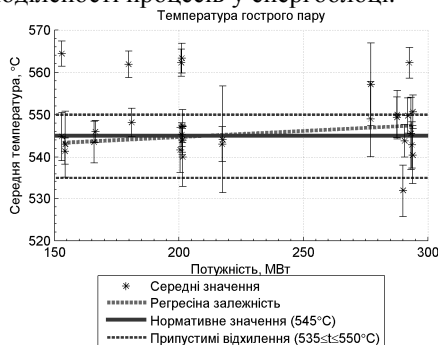


Рис.1. Середні відхилення температури пару у різних режимах роботи енергоблоку

Також при синтезі регулятора слід звернути особливу увагу на функціонування в граничних режимах при мінімальній і максимальній потужності (150 і 300 МВт відповідно). Так, у системі керування впорском при

навантаженні 150 МВт (рис. 2) виникають автоколивання, які обмежені тільки максимальною витратою на впорски. Позбутися від коливань можна тільки при плановому підвищенні потужності.

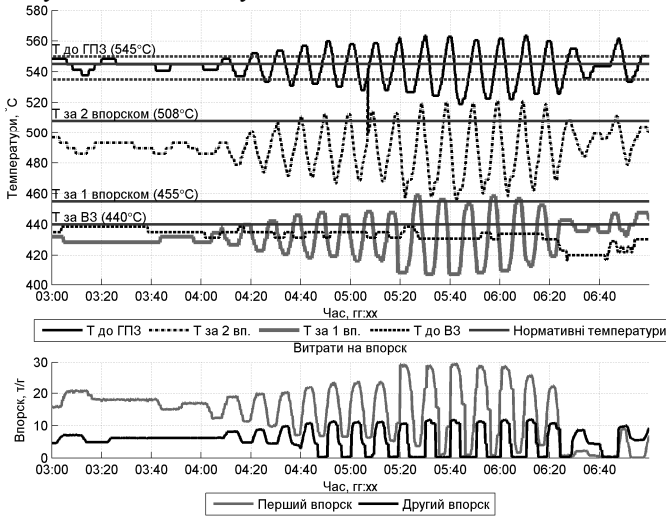


Рис. 2. Динаміка системи у граничному режимі (150 МВт)

Другий розділ «Математичне моделювання пароперегрівальної частини пароводяного тракту» присвячено задачам моделювання та ідентифікації параметрів пароводяного тракту. Процеси в окремих ділянках котлоагрегату описуються нелінійними диференціальними рівняннями в часткових похідних. Побудова точного рішення можлива лише в окремих випадках. Тому для практичної реалізації в системах керування будуються апроксимуючі моделі на основі звичайних диференціальних або різницьових рівнянь.

Логічним у цьому випадку буде побудова феноменологічної моделі на основі рівнянь теплофізики з урахуванням можливостей існуючої системи збору вимірювань. Результуюча модель повинна відображати динаміку системи в межах точності вимірювань у заданому діапазоні параметрів.

Процес змішування пару та охолоджуючої води в колекторі впорску описується рівнянням змішування, яке апроксимується виразом:

$$T_{cm} = T_{ex} - \frac{h(T_{ex}) - h_e}{c} \frac{G_e}{G_n + G_e} \quad (1)$$

де G_n, G_e – витрати пару і води на впорск, T_{ex}, T_{cm} – температури пару на вході в колектор впорску і на виході, $h(T_{ex}), h_e$ – ентальпії пару на вході і води на впорск, c – теплоємність пару.

Процес нагріву пару описано рівнянням теплопереносу:

$$c\rho S \frac{\partial T(t,l)}{\partial t} + cG \frac{\partial T(t,l)}{\partial l} = \alpha\pi d (T^m(t,l) - T(t,l)) \quad (2)$$

$$T(0,l) = T_n(l), T(t,0) = T_{cm}(t)$$

де T, T^M – температури пару і металу паропроводів (як функція часу і координати – довжини паропроводу); $G = G_n + G_e$ – поточна витрата пару за впорском; c, ρ – теплоємність та щільність пару, розраховані при поточній температурі та тиску; d, S – діаметр та площа перетину паропроводу; α – коефіцієнт тепловіддачі, який визначається поточним режимом функціонування. Для розрахунку параметрів пару (c, ρ) використані формули, подані «Міжнародною асоціацією з властивостей води і водяного пару» (IAPWS). Початкові і граничні умови задають розподіл температур за довжиною пароводяного тракту в початковий момент часу та температуру пару на вході у сегмент пароводяного тракту.

Для спрощення модель перетворена за методом прямих: введене розбиття по довжині пароводяного тракту на M точок і часткова похідна за координатою замінена кінцевою різницею. Отриманий набір звичайних диференціальних рівнянь сформовано у вигляді білінійної нестационарної системи:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Nxu + Bu + Dv \\ y = Cx \end{cases} \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{G}{\Delta\rho S^c} - \frac{\alpha\pi d}{c\rho S^c} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{G}{\Delta\rho S^c} & -\frac{G}{\Delta\rho S^c} - \frac{\alpha\pi d}{c\rho S^c} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{G}{\Delta\rho S^c} & -\frac{G}{\Delta\rho S^c} - \frac{\alpha\pi d}{c\rho S^c} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{h_2 - h_e}{c\Delta S^c} & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}^T, C = (0 \ \dots \ 0 \ 1)$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{G\Delta\tau}{\rho S\Delta x} & \frac{\pi d\Delta\tau}{c\rho S} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\pi d\Delta\tau}{c\rho S} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{\pi d\Delta\tau}{c\rho S} \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\Delta\rho S^c} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & -\frac{1}{\Delta\rho S^c} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\Delta\rho S^c} & -\frac{1}{\Delta\rho S^c} \end{bmatrix}$$

У завданні керування виділено такі величини: $x = (T_1 \ T_2 \ \dots \ T_M)^T$ – температура пару в окремих точках пароводяного тракту (вектор стану); $u = G_2$ – витрата на другий впорск (керування); $y = T_M$ – температура пару на виході з пароперегрівача (вихід); $v = (T_0 \ T_1^M \ \dots \ T_M^M)^T$ – температура пару на вході та температури металу в окремих точках пароводяного тракту (вектор збурення).

Для вирішення завдання розрахунку динаміки теплопереносу виконано перехід від математичної моделі до конкретного чисельного алгоритму. Найбільш поширеним методом є використання методу сіток, згідно з яким на просторі, утвореному незалежними змінними вводиться сітка з розбиттям на N

точок за часом та M точок за просторовою координатою, а диференціальні рівняння замінюються відповідними наближеними сітковими функціями, які пов'язують значення функцій у різних точках сітки.

У роботі реалізовано метод сіток, обрано схему "явний лівий кут" та оцінено умови стійкості обраної схеми. У розділі отримано і наведено перехідні процеси при різному кроці сітки та обрані граничні значення, при яких точність моделювання відповідає точності вимірювальної системи. Обрано розбиття на чотири точки за довжиною пароводяного тракту ($M=4$) і подальше моделювання динаміки виконано з шагом 0,1 с за часом. Збільшення кількості точок розбиття не надасть додаткової інформації про характер процесів і призведе до підвищення обчислювальних затрат.

У пропонованій моделі невідомим є коефіцієнт тепловіддачі, який залежить від багатьох факторів: матеріал, форма та компоновка труб пароперегрівачів; наявність відкладень на поверхні труб; поточні витрати пару та повітря в топці (при підвищенні витрат зростає інтенсивність тепловіддачі). Залежності, які наводяться в літературі для енергоблоків з котлами барабанного типу, не можуть бути використані для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі пароперегрівачів високого тиску котлоагрегату. Таким чином, виникає необхідність ідентифікації коефіцієнта тепловіддачі.

Постановка задачі ідентифікації полягає в наступному: необхідно знайти постійний коефіцієнт тепловіддачі ($\alpha=const$) за умови, що доступний набір вимірювань температур пара и метала паропроводів, а також витрати та тиску пару. На основі існуючої вимірювальної системи розв'язана задача ідентифікації коефіцієнта тепловіддачі методом найменших квадратів. Вихідна модель системи подана у вигляді:

$$\begin{cases} x(r+1) = \tilde{A}x(r) + \tilde{D}v(r), \\ y(r) = Cx(r) \end{cases} \quad (5)$$

Матриці коефіцієнтів системи записані у вигляді:

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= \tilde{A}_0 + \alpha \tilde{A}_1 \\ \tilde{D} &= \tilde{D}_0 + \alpha \tilde{D}_1 \\ \tilde{A}_0 &= \begin{bmatrix} 1 - \frac{G\Delta\tau}{\rho S \Delta l} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{G\Delta\tau}{\rho S \Delta l} & 1 - \frac{G\Delta\tau}{\rho S \Delta l} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{G\Delta\tau}{\rho S \Delta l} & 1 - \frac{G\Delta\tau}{\rho S \Delta l} \end{bmatrix}, \quad \tilde{D}_0 = \begin{bmatrix} \frac{G\Delta\tau}{\rho S \Delta l} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \\ \tilde{A}_1 &= \begin{bmatrix} -\frac{\pi l \Delta\tau}{c \rho S} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\pi l \Delta\tau}{c \rho S} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{\pi l \Delta\tau}{c \rho S} \end{bmatrix}, \quad \tilde{D}_1 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\pi l \Delta\tau}{c \rho S} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\pi l \Delta\tau}{c \rho S} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\pi l \Delta\tau}{c \rho S} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Модель (5) записана як лінійна регресія виду:

$$x(r+1) = w_0(r) + \alpha w_1(r), \quad (6)$$

де

$$w_0(r) = \tilde{A}_0(r)x(r) + \tilde{D}_0(r)v(r), \quad (7)$$

$$w_1(r) = \tilde{A}_1(r)x(r) + \tilde{D}_1(r)v(r).$$

Для отриманої системи (6) запропоновано алгоритм оперативної ідентифікації на основі рекурентного методу найменших квадратів. Для цього введена сумарна похибка оцінювання за r вимірюваннями з ваговими коефіцієнтами $\gamma(k)$:

$$S(r) = \sum_{k=1}^r \gamma(k)(x(k) - w_0(k) - \hat{\alpha}w_1(k))^T (x(k) - w_0(k) - \hat{\alpha}w_1(k)) \quad (8)$$

і отримані рекурентні співвідношення для оцінки коефіцієнта тепловіддачі в різних режимах роботи:

$$\hat{\alpha}(r) = \hat{\alpha}(r-1) + \gamma(r)P(r) \left[(x(r) - w_0(r) - \hat{\alpha}(r-1)w_1(r))^T w_1(r) \right] \quad (9)$$

$$P(r) = \left[P(r-1)^{-1} + \gamma(r)w_1(r)^T w_1(r) \right]^{-1} \quad (10)$$

У загальному випадку береться одиничний ваговий коефіцієнт. Отримані оцінки коефіцієнта тепловіддачі будуть незміщеними, конзистентними та ефективними у разі нормального розподілу похибки вимірювань.

Для зниження впливу похибки вимірювання вирішена задача робастної ідентифікації. До алгоритму введено вагові коефіцієнти, які оперативно розраховуються на основі оцінок зсуву і масштабу помилки ідентифікації. Для розрахунків застосована біквадратична вагова функція. Пропонований метод реалізовано програмно у середовищі MATLAB та використано для ідентифікації коефіцієнта тепловіддачі конвективного пароперегрівача високого тиску. Точність ідентифікації загалом досить висока і відповідає точності вимірювань: відхилення температури на виході з моделі від вимірюваної температури не перевищує 3°C і складає в середньому $0,8-1,9^\circ\text{C}$ (рис. 3).

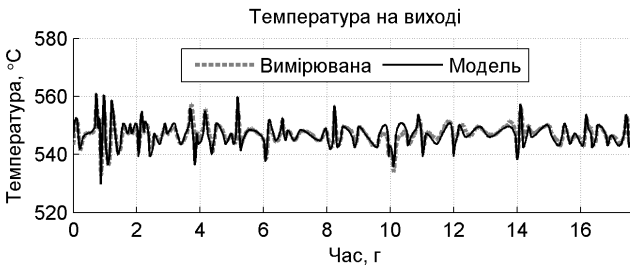


Рис. 3. Порівняння динаміки моделі з даними вимірювань

Проведено ідентифікацію коефіцієнту тепловіддачі для 12 наборів даних, які містять вимірювання основних параметрів енергоблоку при фіксованому навантаженні (коливання не більше 5 МВт) у діапазоні від 150 до 300 МВт протягом періоду від 3 до 8 годин.

У результаті ідентифікації коефіцієнта тепловіддачі отримана залежність, що характеризує зміну коефіцієнта при зміні поточного режиму роботи енергоблоку. На рис. 4 наведена залежність середніх значень коефіцієнта тепловіддачі, отриманого при різних показниках роботи енергоблоку.

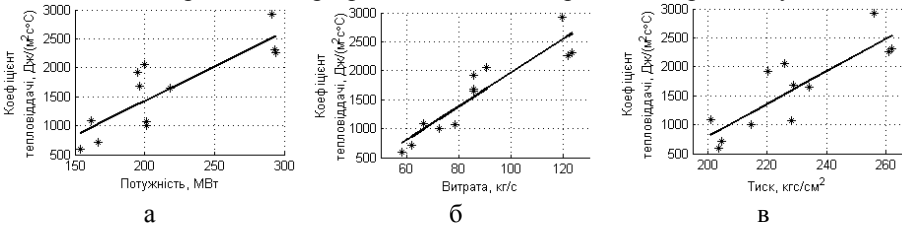


Рис.4. Залежність коефіцієнта тепловіддачі від параметрів енергоблоку

У **третьому розділі** «Синтез регулятора охолоджуючих впорсків котлоагрегата ТПП-312» вирішується завдання керування охолоджуючими впорсками на прикладі другого впорску енергоблоку.

Слід зазначити, що задача синтезу керування білінійними системами залишається невирішеною, тому що найчастіше розглядаються окремі випадки і практично відсутня загальна методика синтезу.

У роботі застосовується прямий метод Ляпунова в завданні параметричного синтезу регулятора. Цей метод полягає в побудові функцій Ляпунова, які дозволяють оцінити стійкість і деякі властивості системи. Також прямий метод Ляпунова знайшов своє застосування в завданнях синтезу стабілізуючих регуляторів систем: як лінійних, так і нелінійних.

Функцією Ляпунова є функція $V(x)$, яка позитивно визначена в деякому околі ε положення рівноваги $x = 0$:

$$\begin{cases} V(x) > 0, \forall x \in \varepsilon, x \neq 0; \\ V(0) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Друга теорема Ляпунова свідчить, що положення рівноваги системи асимптотично стійке, якщо в його околі ε існує функція Ляпунова, похідна якої негативно визначена:

$$\begin{cases} \dot{V}(x) < 0, \forall x \in \varepsilon, x \neq 0; \\ V(0) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Іноді нерівність (12) посилюється і розглядається проблема експоненційної стійкості: $\dot{V}(x) + 2\gamma V(x) < 0$, в такому разі коефіцієнт γ буде визначати максимальні значення власних чисел замкненої системи і, відповідно, задавати максимальний час перехідних процесів $t_{\Pi} \leq 3/\gamma$.

Задача параметричного синтезу регулятора для системи зі зворотнім зв'язком ставиться як задача пошуку коефіцієнтів, які задовольняють матричній нерівності (12), що визначає стійкість замкненої системи.

У 90-х роках XX століття методика розв'язання матричних нерівностей була викладена й адаптована для завдань керування лінійними нестационарними системами. У цьому разі визначається обмежена множина параметрів системи, яка задана вершинами n -мірного прямокутника допустимих параметрів $(A(x, \tau), B(x, \tau)) \in \text{conv}\{(A_1, B_1), (A_2, B_2), \dots, (A_L, B_L)\}$, де матриці $(A_i, B_i), i = 1..L$ задають вершини n -мірного прямокутника, а будь-який набір параметрів $(A(x, \tau), B(x, \tau))$ можна представити як лінійну комбінацію вершин. Для дослідження стійкості лінійної політопної моделі достатньо дослідити стійкість в окремих режимах.

У роботі білінійна система (3)-(4) розглядається як лінійна політопна.

$$\begin{cases} \dot{x} = \tilde{A}x + \tilde{B}u + Dv \\ y = Cx \end{cases} \quad (13)$$

Матриці відповідної системи задаються як $\tilde{A} = A + Nu, \tilde{B} = B$. При цьому на основі обмежень на керування ($u \leq u_i$ або $u \geq u_i$) формується множина параметрів як $\mathcal{X} = \text{conv}\{(A + Nu_1, B), (A + Nu_2, B), \dots, (A + Nu_p, B)\}$.

Для системи регулювання витрати на впорск запропоновано використання ПД-регулятора зі зворотнім зв'язком за виходом (при $y^* = 545^\circ\text{C}$):

$$u(t) = K_p (y(t) - y^*) + K_i \int_0^t (y(\tau) - y^*) d\tau + K_d \frac{d(y(t) - y^*)}{dt}. \quad (14)$$

У роботі запропоновано алгоритм параметричного синтезу регулятора виходу. Для цього виконано перехід від вихідної системи до розширеної у вигляді:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = A^* \xi + B^* u + Dw, \\ \eta = C^* \xi, \\ u = K^* \eta. \end{cases} \quad (15)$$

з вектором стану $\xi = (\xi_1 \quad \xi_2)^T = \left(x \quad \int_0^t (y(\tau) - y^*) d\tau \right)^T$ та вектором

виходу $\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & E \\ CA & 0 \end{bmatrix} \xi$, де E – одинична матриця. Матриці коефіцієнтів

перетвореної системи дорівнюють:

$$A^* = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix}, B^* = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, C^* = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & E \\ CA & 0 \end{bmatrix}, K^* = \begin{bmatrix} K_p \\ K_i \\ K_d \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Для вирішення задачі параметричного синтезу регулятора умови експоненційної стійкості нестационарної системи подано у вигляді системи нерівностей:

$$\begin{bmatrix} A_i^T P + PA_i - \gamma P - X^T B_i B_i^T P - P^T B_i B_i^T X + X^T B_i B_i^T P & (B_i^T P + KC)^T \\ (B_i^T P + KC) & -E \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

Для пошуку коефіцієнтів регулятора, який задовольняє системам матричних нерівностей (17) запропоновано та реалізовано ітеративний алгоритм, який на основі обраного діапазону показників, що визначають режим функціонування, виконує пошук коефіцієнта γ , що визначає обрану міру стійкості і відповідну швидкість перехідних процесів.

У роботі алгоритм використано для параметричного синтезу ПІД-регулятора виходу для трьох режимів функціонування, які відповідають потужності 150, 200 та 300 МВт. Для зазначених регуляторів внесено обмеження на швидкість перехідних процесів. Також побудовано регулятор, який гарантує стабілізацію температури пару для всіх трьох режимів, але має найгіршу швидкодню, порівняно з регулятором обраного режиму. Побудовано графіки переходного процесу при підвищенні температури пару на вході на 5°C (рис. 5). Згідно з отриманими даними використання регулятора, налаштованого в окремому режимі, недоцільне при зміні параметрів, що виходить за межі параметрів обраного режиму.

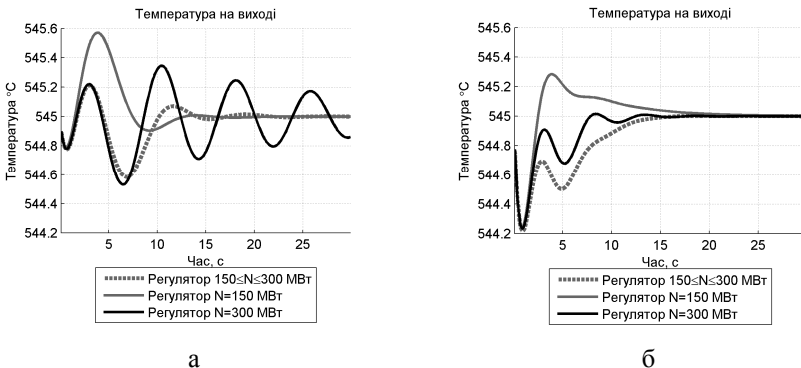


Рис.5. Перехідні процеси в системі регулювання температури на виході з пароводяного тракту при потужності 150 (а) і 300 МВт (б)

Також виконано обчислювальний експеримент з використанням даних вимірювань роботи енергоблоку при фіксованому навантаженні 150, 200 та 300 МВт, а також при зміні навантаження у діапазоні 150–300 МВт. Для

урахування особливостей виконуючих механізмів окремо вводилися обмеження на величину керуючого впливу та швидкість його зміни, а також на частоту перерахунку керуючого впливу.

Окремо для моделі прораховано швидкість зношення основного обладнання, виходячи з правила: кожні 10°C перегріву пару підвищують швидкість зношення вдвічі.

Обчислювальний експеримент показав підвищення якості регулювання: пропонується ПД-регулятор дозволяє витримувати середню температуру пару рівну 545°C (рис. 6), при цьому середньоквадратичне відхилення температури перегріву не перевищує $1,5\text{--}2,5^{\circ}\text{C}$ (для існуючої системи середня температура складає 548°C при середньоквадратичному відхиленні $2,5\text{--}3^{\circ}\text{C}$). Додатково прораховано зношення обладнання: для пропонуваного регулятора відзначається зниження зношення на $10\text{--}20\%$ у окремих режимах регулювання (з $17\text{--}20\%$ для існуючої системи до $4\text{--}9\%$ для запропонованої). Загалом, існуючий перегрів переважно пов'язаний з різкими коливаннями параметрів енергоблоку, або виходом окремих параметрів системи за передбачені межі.

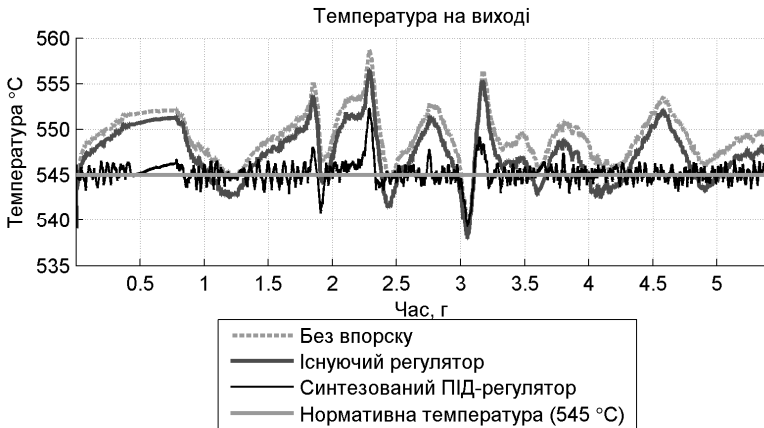


Рис. 6. Динаміка системи керування з синтезованим ПД-регулятором

У зв'язку з тим, що фактичні межі діапазону регулювання і відповідного діапазону параметрів енергоблоку можуть змінюватися, виникає завдання виділення режимів і адаптації системи автоматичного керування у разі зміни режиму функціонування.

Одним із варіантів побудови системи керування нестационарними і нелінійними об'єктами є реалізація окремого контуру налаштування коефіцієнтів регулятора. З огляду на те, що безпосередню адаптацію та перерахунок коефіцієнтів у реальному масштабі часу виконувати досить складно, то типовий підхід до побудови системи регулювання полягає в синтезі системи з налаштуванням коефіцієнтів регулятора (gain scheduling). Уведений контур налаштування коефіцієнтів на основі поточних вимірювань

потужності, витрати і тиску розраховує коефіцієнти регулятора, спираючись на набір коефіцієнтів, отриманих для виділених режимів. У роботі розглядається завдання поділу вихідної множини параметрів на кілька режимів за допомогою методів кластерного аналізу. Для цього обрано інкрементний метод кластеризації. Основною перевагою такого методу є можливість послідовної обробки вимірювань у режимі реального часу.

У роботі класичний інкрементний алгоритм модифіковано: особливу увагу приділено формі кластера – розподіл даних у кластері описано n -мірним прямокутником, який безпосередньо відповідає n -мірному прямокутнику параметрів системи, що використовується при параметричному синтезі регулятора. У роботі введено відстань Чебишева для оцінки близькості точки до кластера та інкрементні співвідношення, що дозволяють уточнювати параметри кластера при додаванні нового спостереження. Окремо додано обмеження на розмір кластера, які обрано з огляду на особливості системи вимірювання і керування.

Алгоритм кластеризації, який передбачає додавання, оновлення та редукцію кластерів, реалізовано програмно. На основі даних вимірювань за 35 годин (12,5 тис. вимірювань) функціонування енергоблоку виконано кластеризацію і виділено 12 режимів (4 основних і 8 перехідних). Відповідно до отриманих параметрів виділених кластерів виконується параметричний синтез регулятора, що стабілізує систему в окремому режимі функціонування.

Для реалізації системи настройки коефіцієнтів побудована нечітка система з механізмом виводу Такагі-Сугено. Пропонована система гарантує поступове переключення між регуляторами при зміні режиму, коли система одночасно близька до декількох окремих режимів функціонування.

Для системи з окремим контуром розрахунку коефіцієнтів регулятора виконано обчислювальний експеримент з використанням даних функціонування при зміні навантаження у діапазоні 150–300 МВт. Пропонована система показала достатньо високу якість регулювання і дозволила знизити швидкість зношення обладнання з 20,2% до 3,6% порівняно з існуючою системою.



Рис. 7. Динаміка системи при зміні навантаження в діапазоні від 150 до 300 МВт.

Четвертий розділ «Інтеграція регулятора впорска в існуючу інформаційно-керуючу систему енергоблоку НКТ 300 МВт» присвячено впровадженню запропонованих методів у існуючу інформаційно-керуючу систему. Наведені алгоритми запропоновано до впровадження в існуючу інформаційно-керуючу систему оперативного контролю та управління режимами (ІКС «ОКУР»), що розробляється в Інституті прикладної математики і механіки в рамках господарчого договору з Зуївською ТЕС.

У 2011 році виконувалися роботи з модернізації ІКС. У цьому ж році оновлена система введена в промислово-дослідну експлуатацію на 2-4 блоках Зуївської ТЕС, у 2012 р. – система введена у промислову експлуатацію. Частина робіт з модернізації та підтримки ІКС «ОКУР» виконана автором.

Розроблена система керування впорсками енергоблоку була реалізована як частина ІКС «ОКУР», що працює в режимі підтримки прийняття рішень оператором. Перевагою впровадження системи керування як частини ІКС є відсутність необхідності купівлі додаткового дорогого устаткування. Таке впровадження потрібно розглядати як проміжний, налагоджувальний крок, для апробації персоналом станції запропонованих алгоритмів керування.

В існуючій системі вхідними даними є дані датчиків, які послідовно обробляються, зберігаються в базі даних і відправляються на клієнтські додатки на ПК персоналу станції. Архітектура системи дозволяє включати додаткові модулі для розрахунку окремих показників та керуючих впливів.

Порядок обробки даних в ІКС ОКУР подано на рис.8.

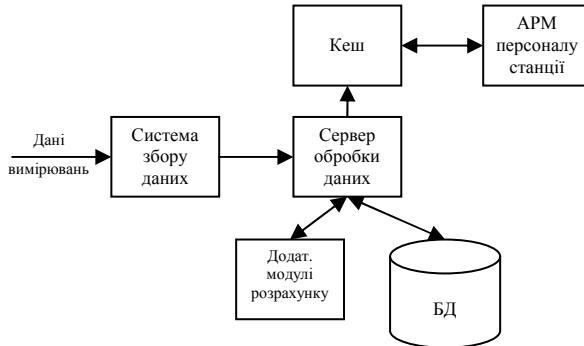


Рис. 8. Схема обробки даних ІКС ОКУР

Додаткові модулі обчислення розрахункових параметрів реалізовані як окремі dll-бібліотеки, що дозволяє оновлювати їх незалежно від сервера обробки даних. Набір бібліотек розширений бібліотекою ідентифікації та керування об'єктами перегрівальної частини пароводяного тракту. Вихідними значеннями модуля є: температура пару по довжині паропроводу, коефіцієнт тепловіддачі, рекомендовані витрати на впорск. Таким чином, у рамках існуючої системи збору даних реалізована оцінка стану пароводяного тракту і розрахунок керуючого впливу.

Також у розділі розглянуто задачу побудови системи керування на базі сучасних програмованих логічних контролерів (ПЛК). Застосування окремих регуляторів дозволить знизити транспортні затримки при обробці даних та реалізувати розрахунок керуючих впливів з періодом до 100 мс.

Реалізацію системи з контуром налаштування коефіцієнтів регулятора, яка передбачає побудову нечіткої системи, виконано з урахуванням стандарту ІЕС 61131-7, який формалізує задачу побудови нечітких систем з метою спрощення реалізації системи на обладнанні різних фірм. Наведено основні вимоги і обмеження існуючих ПЛК з системами нечіткої логіки. Розглянуто можливість реалізації нечіткої системи на базі мікроконтролера.

Схему технічної реалізації системи керування охолоджуючим впорском енергоблоку НКТ 300 МВт у складі інформаційно-управляючої системи подано на рис. 9.

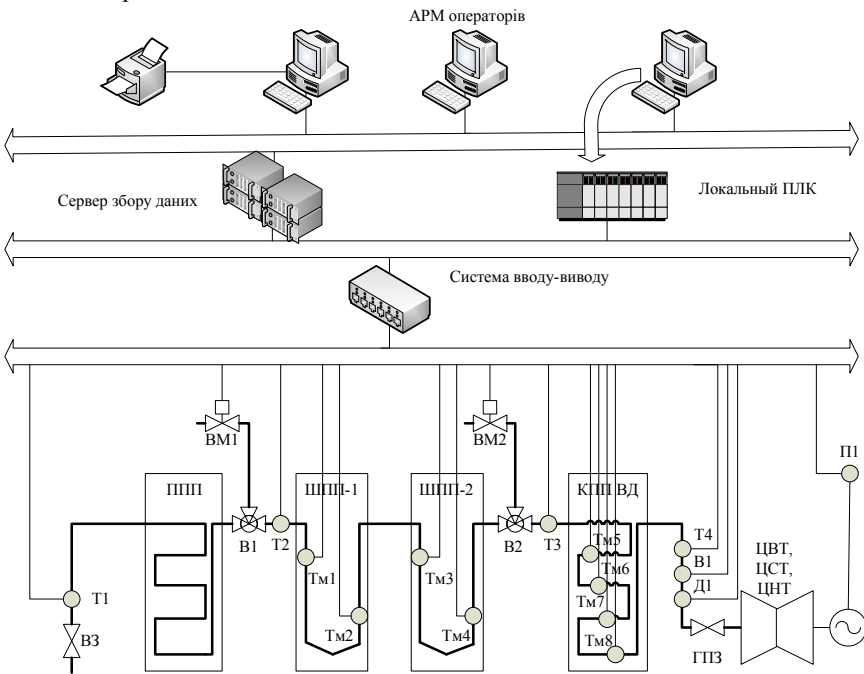


Рис. 9. Схема системи керування охолоджуючими впорсками

На схемі виділені такі пристрої: Т1, Т2, Т3, Т4 – датчики температури пару; Тм1, Тм2, Тм3, Тм4, Тм5, Тм6, Тм7, Тм8 – датчики температури металу ширмових та конвективного пароперегрівача високого тиску; Д1 – датчик тиску пари; В1 – датчик витрати острого пара; П1 – датчик потужності генератора; ВМ1, ВМ2 – виконуючі механізми – клапани впорскуючих пристроїв.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено нове рішення науково-практичної задачі, яка полягає в обґрунтуванні параметрів системи автоматичного керування впорском охолоджуючої води в пароводяний тракт котлоагрегату ТПП-312, що дозволяє знизити перегрів металу пароперегрівачів високого тиску та зношення основних елементів пароводяного тракту.

Проведені дослідження дозволили отримати такі наукові та практичні результати:

1. Виконано аналіз задачі керування впорсками з метою зниження перегріву металу пароперегрівачі високого тиску. Розглянуто конструкцію і вимоги до системи керування впорскуючого пароохолоджувача. Показано, що точність існуючої системи регулювання не відповідає вимогам технологічної інструкції. Зокрема, в граничних режимах при мінімальному навантаженні в системі виникають автоколивання обмежені лише максимальною витратою на впорск.

2. На основі законів теплопереносу і змішування розроблена модель сегмента пароводяного тракту, яка включає блок пароперегрівачів і охолоджуючий впорск. Запропонована модель дозволить промодельовати динаміку пароводяного тракту в задачі керування впорсками, найбільш повно використати можливості існуючої системи вимірювань.

3. На основі методу сіток вирішена задача чисельного моделювання пароводяного тракту, розглянута проблема стійкості алгоритму розрахунку. Виконано моделювання процесу теплопереносу в пароперегрівачах і на підставі отриманих даних вибрано граничний крок розбиття за часом і довжиною пароперегрівача. Отримана апроксимуюча модель дозволяє формалізувати задачі оцінювання стану пароводяного тракту та синтезу системи керування охолоджуючим впорском.

4. Розглянуто задачу параметричної ідентифікації коефіцієнта тепловіддачі пароперегрівачів на основі існуючої системи вимірів. Для запропонованої моделі вирішена задача оперативної ідентифікації коефіцієнта тепловіддачі на основі рекурентного методу найменших квадратів. Для зниження впливу помилок вимірів запропоновано робастний варіант РМНК. Робастний РМНК реалізований для ідентифікації коефіцієнта тепловіддачі конвективного пароперегрівача в різних режимах роботи при навантаженні від 150 до 300 МВт. Отримані оцінки коефіцієнта тепловіддачі дозволяють оцінити його залежність від параметрів, що визначають режим функціонування енергоблоку (потужність енергоблоку, витрата та тиск гострого пару).

5. Розглянуто і вирішено задачу параметричного синтезу ПД-регулятора виходу. Запропоновані процедури адаптовані до задачі синтезу регулятора нестационарної білінійної системи на обмеженій множині станів. Показано, що використання синтезованих регуляторів знижує температуру перегріву пару і

знижує швидкість зношення порівняно з існуючою системою керування, незважаючи на обмеження, які накладають виконуючі механізми.

6. Розглянуто задачу виділення режимів функціонування на основі даних вимірювань. Розглянуто алгоритм інкрементної кластеризації, запропонована його модифікація, яка враховує форму кластера і використовує відстань Чебишева для оцінки відстані між кластерами. Запропонована процедура застосована для набору вимірювань енергоблоку НКТ 300 МВт. Виділено 12 кластерів, які відповідають основним і перехідним режимам роботи енергоблоку. Згідно з отриманими даними синтезовані регулятори окремих режимів. Пропоновані програмні модулі дозволяють виконувати автоматизований синтез регуляторів у разі зміни умов функціонування енергоблоку.

7. Розглянуто можливість інтеграції системи керування впорсками в існуючу систему збору даних енергоблоку НКТ 300 МВт. Вирішена задача модернізації системи збору даних, яка передбачає використання сучасного ПК як бази збору та первинної обробки даних замість застарілої системи на базі СМ-2М. Внесені зміни в структуру інформаційно-керуючої системи дозволяють підвищити швидкість обробки даних та спростити задачу подальшої модернізації та обслуговування системи збору даних за рахунок використання широко розповсюджених ІВМ РС-сумісних компонентів.

8. Запропонована структура системи керування на базі сучасних промислових контролерів. Пропонована система здатна оперативно керувати технологічним процесом, розраховуючи керуючі впливи з періодом близько 100 мс. Розроблені модулі додатку налаштування системи керування впорском. Синтезована система спирається на стандарт мови FCL описаний в стандарті ІЕС 61131-7 і враховує вимоги до реалізації на ПЛК Siemens S7-400Н і OMRON C200Н з модулем FZ-001. Таким чином, запропонована система не буде апаратно залежною і може бути реалізована на будь-якому обладнанні, що підтримує стандарт ІЕС 61131-7.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Красников А.Л. Нейросетевое моделирование впрыскивающего устройства энергоблока ЗуТЭС / А.Л. Красников // Труды ИПММ НАН Украины. – Выпуск 16. – Донецьк, 2008. – С.112–116.
2. Красников А.Л. Моделирование впрыскивающего устройства энергоблока с помощью нейросетевых технологий / А.Л. Красников // Наукові праці ДонНТУ, Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація» – Выпуск 16 (147). – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – С.45–50.
3. Красников А.Л. Методы моделирования и параметрической идентификации пароперегревателей высокого давления на основе конечно-разностных аппроксимаций / А.Л. Красников // Наукові праці ДонНТУ.

Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Вып. 169. – Донецк, 2010. – С. 106–113.

4. Ткаченко В.Н. Применение робастных статистических методов для оперативной идентификации параметров моделей теплоэнергетики / В.Н. Ткаченко, А.Л. Красников // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Вып. 22 (200). – Донецк, 2011. – С. 41-47.
5. Красников А.Л. Решение задачи стабилизации билинейной системы / А.Л. Красников // Труды Института прикладной математики и механики НАН Украины. – Том 23. – Донецк: ИПММ НАНУ, 2011. – С. 136–144.
6. Красников А.Л. Применение инкрементных методов кластеризации в задаче выделения режимов функционирования пароводяного тракта энергоблока СКД / А.Л. Красников, К.К. Кадомский // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: «Технічні науки». – Чернігів: Черніг. держ.технол.ун-т, 2012. – № 4(61) – С. 231-241.
7. Ткаченко В.Н. Моделирование динамики перегревательной части пароводяного тракта в задаче управления параметрами острого пара / А.Л. Красников, В.Н. Ткаченко // П'ята науково-практична конференція з міжнародною участю “Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС '2010”. Тези доповідей. – Київ., 2010. — 21-25 червня 2010 р. – С. 159–161.
8. Красніков О.Л. Ідентифікація коефіцієнта теплообміну пароперегрівачів енергоблоку НКТ за умови неповного набору даних / А.Л. Красников // 18 Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика / Automatics – 2011». Тези доповідей. – Львів, 2011. – 28-30 вересня 2011 р. – С.104-105.
9. Красников А.Л. Синтез ПИ-регулятора билинейной системы / А.Л. Красников // XIV международная научно-практическая конференция «Моделирование, идентификация, синтез систем управления – 2011 (МИССУ-2011)». Тезисы докладов. – Москва-Донецк, 2011. – пос. Канака, 11-18 вересня 2011 р. – С. 167–168.
10. Красников А.Л. Синтез системы управления впрысками в пароводяной тракт высокого давления энергоблока СКД 300 МВт / А.Л. Красников // Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ–2012): матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції, Запоріжжя, 28-30 вересня 2011 р. – Запоріжжя: КПІ, 2012. – С. 164–166.
11. Красников А.Л. Нечеткая система управления охлаждающими впрысками энергоблока СКД 300 МВт / А.Л. Красников // XII международная научная конференция имени Г. А. Таран "Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2012", Киев, 16-18 мая 2012 г.: сб. тр. – К. : Просвіта, 2012. – С. 219–225.
12. Красников А.Л. Разработка системы настройки коэффициентов регулятора охлаждающего впрыска энергоблока СКД 300 МВт. / А.Л. Красников // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального

інтелекту: Матеріали міжнародної конференції. – Херсон: ХНТУ, 2012. – С. 105–107.

13. Красников А.Л. Применение итеративных методов кластеризации в задаче выделения режимов функционирования пароводяного тракта энергоблока СКД / А.Л. Красников, К.К. Кадомский // VII Міжнародна науково-практична конференція Математичне та імітаційне моделювання систем (МОДС-2012): тези доповідей. – Чернігів-Жукін, 2012. – С. 106-110.

АНОТАЦІЯ

Красніков О.Л. ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ВПОРСКУ КОТЛОАГРЕГАТУ ТПП-312. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2013.

У дисертаційній роботі запропоновано нове рішення науково-практичної задачі автоматичного керування нестационарним об'єктом – процесом охолодження пароводяної суміші у пароводяному тракті котла НКТ 300 МВт.

Розроблено динамічну математичну модель сегменту пароводяного тракту, який включає колектор впорску та пароперегрівач високого тиску. Запропонована модель є білінійною нестационарною. На основі методу найменших квадратів отримано оперативну оцінку коефіцієнта теплопередачі запропонованої моделі.

Запропоновано алгоритм синтезу ПД-регулятора системи зі зворотнім зв'язком за виходом, який засновано на прямому методі Ляпунова. Отриманий регулятор гарантує стабілізацію виходу системи з обмеженням на час перехідного процесу у обраному діапазоні параметрів. Реалізовано алгоритм інкрементної кластеризації, який за даними вимірювань виділяє основні та перехідні режими функціонування енергоблоку. Обчислювальний експеримент показав, що застосування запропонованих регуляторів дозволяє знизити перегрів та коливання температури пару та, відповідно, знизити зношення елементів пароводяного тракту високого тиску на 10–20%.

Ключові слова: котлоагрегат надкритичного тиску, впорскувальний охолоджувач, математична модель, параметрична ідентифікація, білінійна система, стабілізація, ПД-регулятор системи зі зворотнім зв'язком по виходу, інкрементна кластеризація, інформаційно-керуюча система.

АННОТАЦИЯ

Красников А.Л. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ВПРЫСКА КОТЛОАГРЕГАТА ТПП-312. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. –

Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2013.

В диссертационной работе предложено новое решение научно-практической задачи автоматического управления нестационарным объектом – процессом охлаждения пароводяной смеси в пароводяном тракте котла НКТ 300 МВт.

Для решения задачи синтеза регулятора построена математическая модель сегмента пароводяного тракта котлоагрегата ТПП-312, который включает коллектор впрыска и пароперегреватель высокого давления. Предложенная модель построена на основе уравнений теплопереноса и смешения и является билинейной нестационарной.

Рассмотрена задача идентификации коэффициента теплоотдачи пароперегревателей высокого давления, установленных в перегревательной части пароводяного тракта котла. Для оценки коэффициента теплоотдачи предложен метод идентификации основанный на робастном методе наименьших квадратов. Предложенный метод реализован программно и получены оценки коэффициента теплоотдачи для данных функционирования энергоблока в различных режимах при нагрузке от 150 до 300 МВт. Показано, что коэффициент теплоотдачи изменяется в широком диапазоне, что свидетельствует о необходимости настройки коэффициентов регулятора с учетом интенсивности теплообмена в тракте котлоагрегата

Для решения задачи управления впрыском предложено использование ПИД-регулятора. Предложен алгоритм синтеза ПИД-регулятора системы с обратной связью по выходу, который основан на прямом методе Ляпунова и гарантирует экспоненциальную устойчивость системы на выбранном диапазоне параметров, а, следовательно, и предельное время переходного процесса. На основе данных функционирования энергоблока выполнено моделирование работы системы управления впрысками с учетом ограничений исполнительных механизмов. Вычислительный эксперимент показал, что применение предложенных регуляторов позволяет снизить перегрев и колебания температуры пара и, соответственно, снизить износ элементов пароводяного тракта высокого давления на 10-20% в отдельных режимах функционирования энергоблока по сравнению с существующей системой управления.

Для выделения основных и переходных режимов функционирования энергоблока предложен алгоритм инкрементной кластеризации, который по данным измерений позволяет выделить диапазоны изменения основных параметров, определяющих функционирование пароводяного тракта. В работе введено расстояние Чебышева для оценки близости точки к кластеру и инкрементные соотношения, позволяющие уточнять параметры кластера при добавлении нового наблюдения. Предложенный алгоритм позволил на основе данных измерений выделить набор 12 режимов, для которых синтезированы ПИД-регуляторы. На основе полученных данных построена система выбора коэффициентов регулятора, соответствующего текущему режиму. Для

реализации системы настройки коэффициентов регулятора построена нечеткая система с механизмом вывода Такаги-Сугено. Предлагаемая система гарантирует плавное переключение между регуляторами при изменении режима, когда система одновременно близка к некоторым особым режимов функционирования.

Рассмотрена задача реализации предложенной системы регулирования впрысков в рамках существующей информационно-управляющей системы. Разработанная система управления впрыском энергоблока была реализована как часть информационно-управляющей системы, работающая в режиме поддержки принятия решений оператором. Предложена реализация системы управления охлаждающим впрыском в основных режимах функционирования энергоблока на базе современных промышленных технологий автоматизации.

Ключевые слова: котлоагрегат сверхкритического давления, впрыскивающий пароохладитель, математическая модель, параметрическая идентификация, билинейная система, стабилизация, ПИД-регулятор, системы с обратной связью по выходу, инкрементная кластеризация, информационно-управляющая система.

ABSTRACT

Krasnikov A.L. PARAMETRICAL SYNTHESIS OF SPRAY ATTEMPERATOR CONTROLLER OF ONCE-THROUGH BOILER TPP-312. – Manuscript.

Thesis for candidate's degree (Ph.D) in speciality 05.13.07 - control processes automation. – State higher education institution “Donetsk National Technical University”, Donetsk, 2013.

The thesis proposes a new solution of scientific and practical problems of automatic control time-variant object – temperature stabilization by spray attemperation in water-steam circuit of 300 MW power unit. A dynamic mathematical model of water-steam circuit, which includes collector spray attemperation and high pressure superheater proposed. Obtained model is a bilinear time-variant. Heat transfer coefficient for superheater obtained by procedure based on the least squares method. An algorithm based on Lyapunov's direct method is proposed for synthesis of PID regulator of system with output feedback. The resulting controller is ensuring the stabilization of system with given transient-process time within the selected range of parameters. Incremental clustering algorithm is proposed for finding basic and transient modes of the power unit based on measurement data. Computer experiment showed that use of the proposed controllers can reduce overheating and steam temperature fluctuations and thus reduce wear of water-steam circuit elements by 10-20%.

Keywords: supercritical pressure boiler, spray attemperation, mathematical model, parametrical identification, bilinear system, stabilization, PID control, output feedback, incremental clustering, management-information system.