

Батюк С.Г.

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

Семенов А.Д.

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

КАСКАДНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ ПРОМИСЛОВОЇ ТОПКИ

Практична реалізація каскадних САР теплового режиму топок промислових печей є актуальною задачею промислової автоматизації. Особливо актуальним є аналіз можливостей практичного застосування каскадних САР теплового режиму топки з паралельною роботою регуляторів температури, розрідження і співвідношення повітря/паливо для забезпечення ефективного згоряння палива в топці. Для досягнення практичного результату дослідження має бути виконане для конкретного типу промислової печі. Була вибрана скловарна піч як типовий і поширений теплоенергетичний агрегат.

Виконані дослідження одноконтурної САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами, класичної каскадної САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами і запропонованої каскадної САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами. Зроблено порівняльний аналіз цих САР. Розроблені рекомендації з використання цих САР для регулювання теплового режиму промислових топок. Зроблено огляд промислових витратомірів природного газу і розроблені рекомендації з їх застосування в САР теплового режиму промислової топки. Зроблено огляд калориметрів природного газу і розроблені рекомендації з їх застосування в САР теплового режиму промислової топки.

Розроблений полігон імітаційного моделювання каскадної системи автоматичного регулювання теплового режиму промислової топки призначений для: 1) використання в навчальному процесі кафедри автоматизації енергетичних процесів НТУУ КПІ; 2) використання в якості програмно-технічного симулятора при проектуванні, модернізації і тиражуванні АСУТП пічних систем. Програмно-модельним інструментарієм розробки полігону імітаційного моделювання каскадної системи автоматичного регулювання теплового режиму промислової топки є програмно-технічний симулятор автоматизованого технологічного комплексу на платформі Matlab Simulink – CoDeSys – WebStudio.

Ключові слова: автоматизована система управління, каскадна система автоматичного регулювання, автоматизація технологічних процесів, програмно-технічні засоби автоматизації, імітаційне моделювання, скловарна піч, тепловий режим топки печі, регулювання температури, регулювання розрідження, регулювання економічності згоряння палива.

Постановка проблеми. Практична реалізація каскадних САР теплового режиму топок промислових печей є актуальною задачею промислової автоматизації. Особливо актуальним є аналіз можливостей практичного застосування каскадних САР теплового режиму топки з паралельною роботою регуляторів температури, розрідження і співвідношення повітря/паливо для забезпечення ефективного згоряння палива в топці. Для досягнення практичного результату дослідження має бути виконане для конкретного типу промислової печі. Була вибрана скловарна піч як типовий і поширений теплоенергетичний агрегат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як зазначено і продемонстровано в [1], надзвичайно ефективним методом покращення функціону-

вання каскадної САР температури промислових топок є використання внутрішньої моделі ОУ (моделі ОУ в замкненому контурі регулювання). Концепція внутрішньої моделі об'єкту управління призводить до використання ПД-регуляторів з паралельними протилежними регулювальними діями в каскадній САР теплового режиму (яка включає САР температурного режиму, САР співвідношення повітря/паливо, САР розрідження) промислової топки.

Скловарна піч – це спеціальний тип печі, який використовується у виробництві скла. Ці печі призначені для плавлення скляних сировинних матеріалів і створення високих температур, необхідних для формування та обробки скла. Скловарні печі можуть мати різні конструкції та способи

опалювання, такі як газові, електричні або комбіновані, для досягнення потрібних температурних режимів. Скловарні печі зазвичай мають спеціальні зони для різних етапів обробки скла, таких як плавлення, формування, охолодження та закріплення. Ці печі використовуються у скловарних заводах та підприємствах для виробництва різноманітних скляних виробів, від пляшок та посуду до віконних склопакетів та скловолокна. Вони є ключовою складовою частиною виробничого процесу створення скляних продуктів і забезпечують необхідні умови для формування та обробки різних типів скла. Робота скловарної печі характеризується технологічним і тепловим режимами.

Тепловий режим промислової топки включає температурний режим, режим згоряння палива, гідравлічний (аеродинамічний) режим:

1. Температурний режим топки. Заданий графік температур димових газів за довжиною топки. Для багатозонної топки – уставки температур димових газів в зонах топки. Для однозонної топки – уставка температури димових газів. Регулююча дія для кожної зони печі – зміна витрати палива через пальник зони печі. ОУ для кожної зони печі – канал передачі дії «зміна витрати палива через пальник зони печі – зміна температури димових газів в зоні печі»;

2. Режим економічності згоряння палива. Заданий графік значень співвідношення повітря/паливо або коефіцієнтів надлишку повітря за довжиною печі. Для багатозонної топки – уставки співвідношень повітря/паливо або коефіцієнтів надлишку повітря в зонах топки. Для однозонної топки – уставка співвідношення повітря/паливо або коефіцієнту надлишку повітря в зоні печі. Регулююча дія для кожної зони печі – зміна витрати повітря через пальник зони печі. ОУ для кожної зони печі – канал передачі дії «зміна витрати повітря через пальник зони печі – зміна співвідношення повітря/паливо або коефіцієнту надлишку повітря в зоні печі»;

3. Гідравлічний режим топки. Задане значення (уставка) розрідження в топці печі (у димовому боріві печі). Регулююча дія (загальна для усієї печі) – зміна витрати димових газів з печі (зміна частоти обертання димососу). ОУ – канал передачі дії «зміна частоти обертання димососу – зміна розрідження в димовому боріві печі». Основним збуренням (за навантаженням) є зміна витрати повітря, так як його витрата приблизно в 10 разів більше за витрату палива. Типовою САР теплового режиму промислової топки є класична одноконтурна САР теплового режиму

(САР з 3-ма регуляторами). В умовах збурень зі сторони РО ефективною є коасична каскадна САР теплового режиму (САР з 4-ма регуляторами). Сучасні засоби автоматизації (а саме ПЛК) дають можливість реалізувати каскадну САР теплового режиму з паралельною роботою регуляторів (САР з 6-ма регуляторами). САР з 6-ма регуляторами реалізує принцип регулювання «один регульований параметр – декілька (дві плюс) регульованих дій», що дозволяє синхронізувати перехідні процеси стабілізації регульованих параметрів, що поєднує якість стабілізації критичних параметрів (для САР теплового режиму таким є співвідношення повітря/паливо, яке визначає якість згоряння палива в топці).

Постановка завдання. Розробити полігон функціонального імітаційного моделювання каскадної САР теплового режиму промислової топки. Змоделювати і дослідити САР теплового режиму. Виконати функціональне імітаційне моделювання і дослідити одноконтурну САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами, каскадну САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами і каскадну САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами. Зробити порівняльний аналіз цих САР. Розробити рекомендації з використання цих САР для регулювання теплового режиму промислових топок. Зробити огляд промислових витратомірів природного газу і розробити рекомендації з їх застосування в САР теплового режиму промислової топки. Зробити огляд калориметрів природного газу і розробити рекомендації з їх застосування в САР теплового режиму промислової топки; Виконати структурне імітаційне моделювання САР теплового режиму промислової топки в програмно-технічному симуляторі на платформі Simulink – CoDeSys – WebStudio.

Виклад основного матеріалу. Розроблений полігон функціонального імітаційного моделювання каскадної САР теплового режиму промислової топки реалізований у вигляді альбому моделей в середовищі СКМ Matlab Simulink як функціональна частина полігону імітаційного SIL-моделювання промислових АТК [2].

Одноконтурна САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами

Модель одноконтурної САР теплового режиму топки наведена на рис. 1. Ця САР має один ТОУ, що складається з чотирьох ОУ і має три регулятори.

Одноконтурна САР теплового режиму промислової топки складається з трьох одноконтурних САР – температурного режиму, режиму згоряння

Функціональне імітаційне моделювання одоконтурної САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами

19.1. Одоконтурна САР теплового режиму промислової топки / Схема з 3-ма регуляторами / 1*ТОУ = 4*ОУ

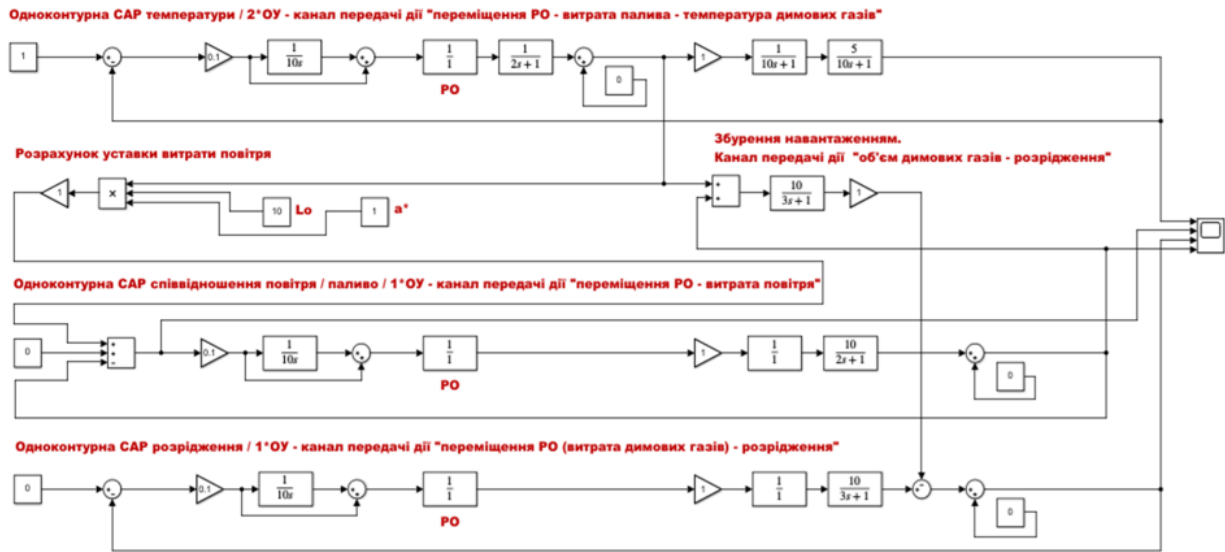


Рис. 1. Модель одоконтурної САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами

палива і гідравлічного режиму. Одоконтурна САР температурного режиму стабілізує температуру димових газів в зоні печі на заданому значенні. ОУ – канал передачі дії «зміна витрати палива – зміна температури». Одоконтурна САР режиму згоряння палива стабілізує співвідношення повітря/паливо на заданому значенні, яке обчислюється за поточною витратою палива, яка вимірюється. Поточна витрата палива домножається на стехіометричний коефіцієнт і заданий коефіцієнт надлишку повітря – це і є завдання регулятору співвідношення. ОУ – канал передачі регульовальної дії «переміщення РО на повітропроводі – витрата повітря». Одоконтурна САР розрідження стабілізує розрідження в топці печі. ОУ є канал передачі дії «зміна витрати димових газів переміщенням РО – розрідження». Основним збуренням САР розрідження є зміна витрати повітря, яка приблизно в 10 разів більша ніж витрата палива, це збурення змодельовано як збурення за навантаженням. Основним регульовальним процесом є стабілізація температури. В ході регулювання температури змінюється завдання регулятору співвідношення паливо/повітря і виникає збурення для САР розрідження.

Графіки перехідних процесів в одоконтурній САР теплового режиму топки наведені на рис. 2. Основними збуреннями для одоконтурної САР є зміна регулятору температури і збурення зі сторони РО витратою палива. Перевагою цієї САР є її простота, надійність і легка реалізація в ПЛК. Осно-

вним недоліком є те, що вона не парирує збурення зі сторони РО, а реагує тільки тоді, коли це збурення змінить температуру димових газів в топці.

Каскадна САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами (класична)

Модель каскадної САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами наведена на рис. 3. Ця САР має один ТОУ, що складається з чотирьох ОУ і має чотири регулятора: один коригуючий і три стабілізуючих.

Каскадна САР теплового режиму топки складається з каскадної САР температури і одноконтурних САР співвідношення паливо/повітря і розрідження в топці печі. Модель каскадної САР аналогічна моделі одоконтурної САР теплового режиму промислової топки в частині формування поточного завдання регулятору співвідношення паливо/повітря і збурення за навантаженням для САР розрідження. В каскадній САР температури коригуючий регулятор температури змінює завдання стабілізуючому регулятору витрати палива. ОУ – канал передачі дії «переміщення РО – витрата палива – зміна температури димових газів».

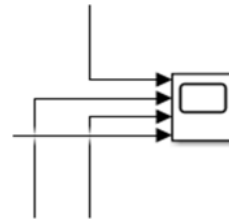
Графіки перехідних процесів в каскадній САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами наведені на рис. 4.

Принциповою і величезною перевагою цієї каскадної САР є той факт, що вона встигає, за рахунок вимірювання витрати палива і каскадного регулювання, парирувати збурення зі сторони РО

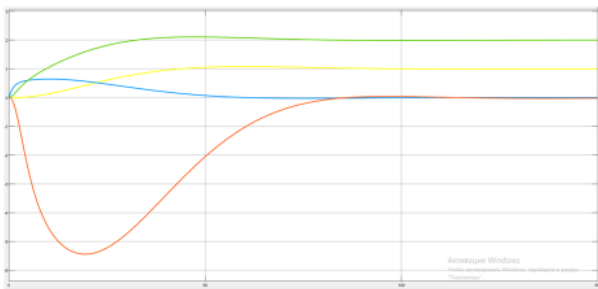
Функціональне імітаційне моделювання одоконтурної САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами

Осцилограф має чотири вхідні сигнали:

- Поточна температура – перший вхід
- Розбаланс на вході регулятора витрати повітря – другий вхід
- Розрідження в топці печі – третій вхід
- Поточна витрата повітря – четвертий вхід



Дані з осцилографа при збуренні зі сторони завдання



Дані з осцилографа при збуренні зі сторони витрати палива

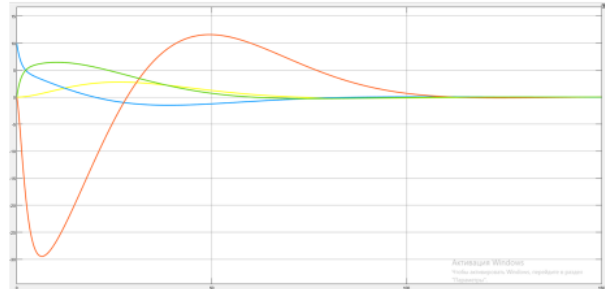


Рис. 2. Графіки переходних процесів в одоконтурній САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами

Функціональне імітаційне моделювання каскадної САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами

19.2. Каскадна (двокаскадна) САР теплового режиму промислової топки / Схема з 4-ма регуляторами (1-ий коригуючий, 3-ри стабілізуючі) / 1*ТОУ = 4*ОУ

Каскадна САР температури / 2*ОУ - канали передачі дії "переміщення РО - витрата палива - температура димових газів"

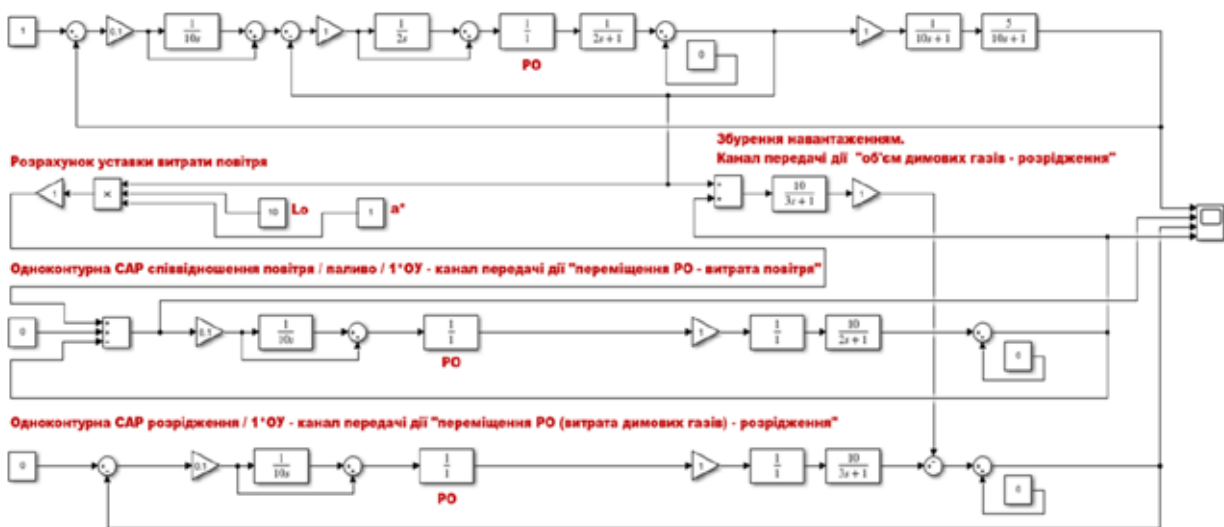


Рис. 3. Модель каскадної САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами

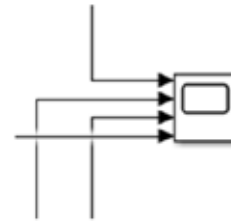
витратою палива ще до того, як це збурення суттєво змінить температуру димових газів в топці. За збуренням зі сторони РО каскадна САР теплового режиму топки має незаперечну і принципову перевагу над одоконтурною САР теплового режиму топки. За збуренням зміною завдання (як і за збуренням навантаженням) каскадна САР теплового режиму топки працює так само, як і одоконтурна САР теплового режиму топки. Для

реалізації принципової переваги каскадної САР теплового режиму топки потрібно вимірювати витрату палива. Звідси виникає проблема правильного вимірювання витрати і вибору правильного витратомірюю. Недостатньо вимірювати просто об'ємну витрату газу, так як, в залежності від тиску і температури газу, та сама об'ємна витрата може бути іншою масовою витратою. Тому потрібно або приводити виміряну об'ємну витрату

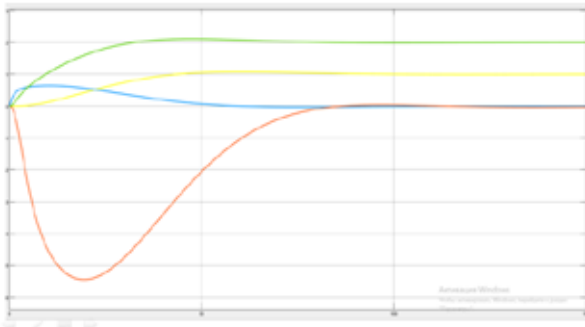
Функціональне імітаційне моделювання каскадної САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами

Осцилограф має чотири вхідні сигнали:

- Поточна температура – перший вхід
- Розбаланс на вході регулятора витрати повітря – другий вхід
- Розрідження в топці печі – третій вхід
- Поточна витрата повітря – четвертий вхід



Дані з осцилографа при збуренні зі сторони завдання



Дані з осцилографа при збуренні зі сторони витрати палива

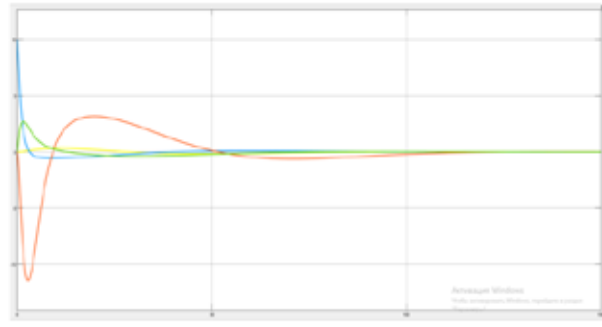


Рис. 4. Графіки перехідних процесів в каскадній САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами

до нормальних умов (датчики тиску і температури можуть бути або вбудовані в об'ємний витратомір, або змонтовані окремо), або використовувати масовий витратомір. Але і цього, взагалі-то, недостатньо. При одній і тій самій масовій витраті, в залежності від хімічного складу газу, може змінюватись теплотворна здатність палива. В ідеалі, витратомір палива має бути калориметром палива і вимірювати витрату палива у ватах. Питання вибору витратоміру палива досліджувалось для з'ясування техніко-економічної доцільності використання дорогих витратомірів замість бюджетних об'ємних витратомірів без корекції (без приведення до нормальних умов).

Каскадна САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами (запропонована)

Модель каскадної САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами наведена на рис. 5. Ця САР має один ТОУ, що складається з чотирьох ОУ і має шість регуляторів: три коригуючі і три стабілізуючі. Ці ОУ мають таку ж структуру як і ОУ в моделі каскадної САР теплового режиму промислової топки з 4-ма регуляторами.

Вище були змодельовані класичні одноконтурна САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами і каскадна САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами. Ці змодельовані САР є типовими для пічних систем і коректно працюють. Але для скловарних печей швидкість регулювання температури не є важливим аспектом,

на відміну від регулювання співвідношення повітря/паливо і розрідження в топці печі. Ба більше, швидка зміна температури в скловарній печі є дуже поганим впливом на якість виготовленої продукції, адже скломаса у варочному басейні печі нагрівається нерівномірно, що спричиняє виготовлення бракованої склотари. В скловарній печі температура має регулюватись повільно, щоб запобігти тепловим збуренням в рідкій скломасі в басейні печі (тим самим зменшити можливий брак). Так як процес регулювання температури в топці скловарної печі є довгий (десятки хвилин і навіть години), то неперервно змінюється витрата палива, як наслідок, неперервно змінюється поточне значення співвідношення повітря/паливо і розрідження. Тому актуальним є таке регулювання теплового режиму, коли співвідношення повітря/паливо і розрідження будуть витримуватись на уставках весь час регулювання температури. Інакше кажучи, САР теплового режиму топки скловарної печі має «пригальмувати» швидкість стабілізації температури димових газів в топці і «пришвидшити» стабілізації співвідношення повітря/паливо і розрідження в топці. Запропонована каскадна САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами якраз і покликана реалізувати цю функціональність. Інструментарій такої реалізації – паралельні протнаправлені регулювальні дії коригуючих регуляторів (принцип «один регульований параметр – дві регулювальні дії»).

Функціональне імітаційне моделювання каскадної САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами

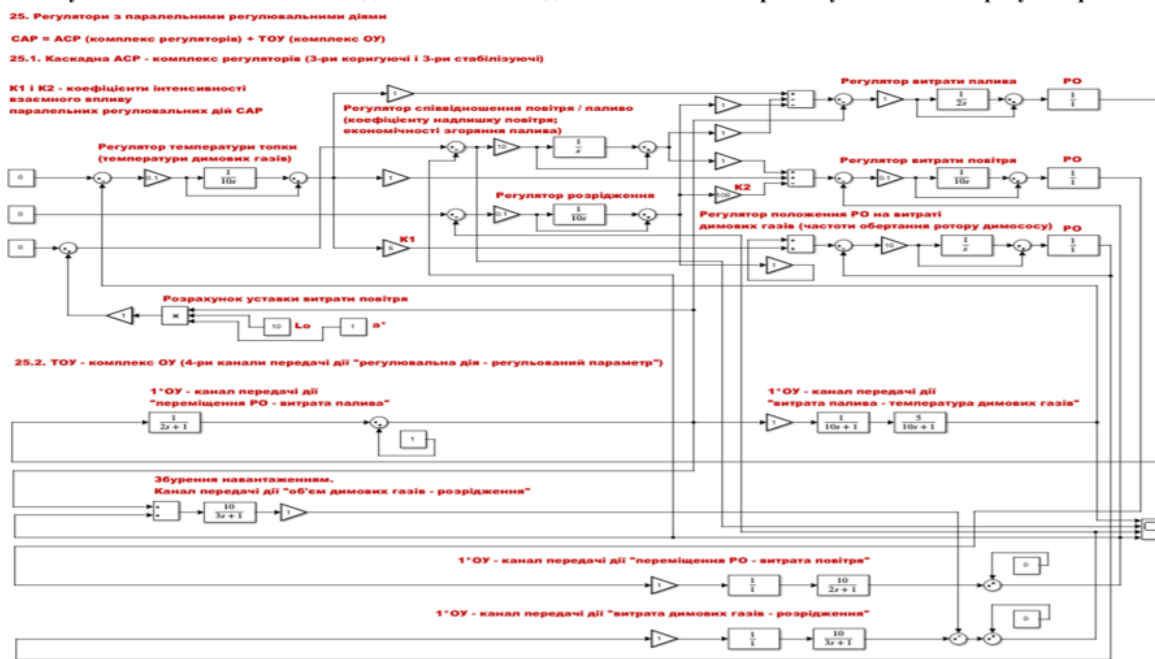


Рис. 5. Модель каскадної САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами

Каскадна САР теплового режиму з 6-ма регуляторами складається з каскадної САР температури, каскадної САР співвідношення паливо/повітря і каскадної САР розрідження в топці печі. Поточне задане значення витрати повітря і збурення за навантаженням для САР розрідження реалізовані аналогічно, як в наведених раніше моделях одноконтурної (з 3-ма регуляторами) і каскадної (з 4-ма регуляторами) САР теплового режиму. Особливістю каскадної САР з 6-ма регуляторами є той факт, що коригуючі регулятори паралельно формують завдання різним стабілізуючим регуляторам і з різними знаками. Стабілізуючі регулятори положення РО на повітропроводі і положення РО на димоході (регулятор частоти обертання димососу) введені в схему штучно, саме для того, щоб програмно (або апаратно) реалізувати вказані вище паралельні коригувальні дії з різними знаками. Така структура призводить до сповільнення і погіршення перехідного процесу регулювання температури, але значно пришвидшує і покращує перехідні процеси регулювання співвідношення повітря/паливо і розрідження в процесі регулювання температури. Головним регулятором в цій каскадній САР є коригуючий регулятор температури топки. Такий підхід до регулювання температури є актуальним саме для скловарних печей, в яких сама технологія скловаріння вимагає повільного регулювання температури димових

газів в топці (тим більше, температури скламаси в басейні печі).

В каскадній САР теплового режиму топки з'являються два додаткових параметри налагодження, яких не було в одноконтурній (з 3-ма регуляторами) і каскадній (з 4-ма регуляторами) САР теплового режиму топки (додаткові параметри налагодження додаткових регуляторів не враховуються, так як це не принципово). Коефіцієнти $K1$ і $K2$ – це додаткові параметри налагодження каскадної САР з 6-ма регуляторами. Моделюванням виявлено, що саме ці два коефіцієнти є найбільш дієвими. $K1$ – це коефіцієнт корекції від регулятора температури на регулятор положення РО на витраті газів. $K2$ – це коефіцієнт корекції від регулятора розрідження на регулятор витрати повітря. Обидва ці коефіцієнти пов'язані з розрідженням. Моделюванням встановлено, що перехідні процеси даної каскадної САР є малочутливими до варіацій параметрів $K1$ і $K2$.

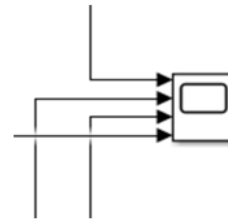
Графіки перехідних процесів в каскадній САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами наведені на рис. 6.

Каскадна САР теплового режиму з 6-ма регуляторами, як і попередня каскадна САР теплового режиму з 6-ма регуляторами, парирує збурення зі сторони РО ще до того, як ця зміна зміни витрати палива викличе суттєву зміну температури димових газів в топці. На додаток до попередньої каскадної САР з 4-ма регуляторами ця каскадна САР

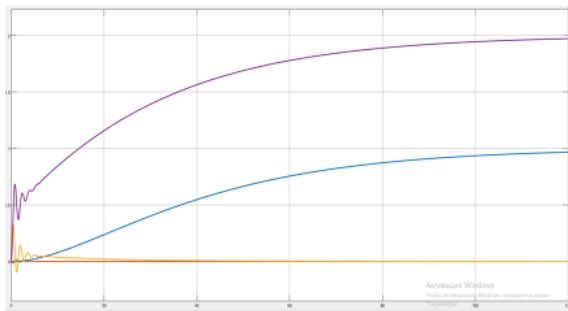
Функціональне імітаційне моделювання каскадної САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами

Осцилограф має чотири вхідні сигнали:

- Поточна температура – перший вхід
- Розбаланс на вході регулятора витрати повітря – другий вхід
- Розрідження в топці печі – третій вхід
- Поточна витрата повітря – четвертий вхід



Дані з осцилографа при збуренні зі сторони завдання



Дані з осцилографа при збуренні зі сторони витрати палива

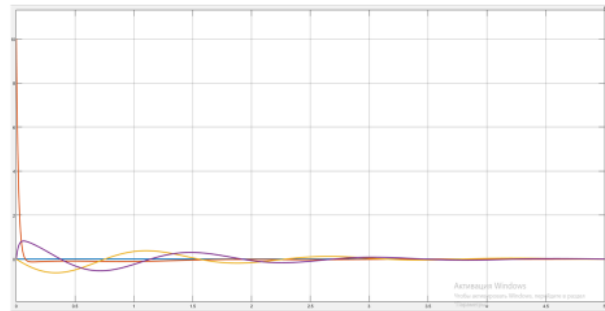


Рис. 6. Графіки перехідних процесів каскадної САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами

з 6-ма регуляторами забезпечує практично ідеальну стабілізацію співвідношення і розрідження в процесі повільного регулювання температури без її перерегулювань і коливань. Співвідношення повітря/паливо краще стабілізується, ніж в попередніх САР, тому що воно регулюється як зміною витрати повітря, так і зміною витрати палива (в попередніх САР – тільки витратою повітря). Розрідження краще стабілізується, ніж в попередніх САР, тому що воно регулюється як зміною частоти обертання димососу, так і зміною витрати повітря (в попередніх САР – тільки частотою обертання димососу). За рахунок такого взаємносповільнюючого регулювання перехідний процес САР температури суттєво сповільнюється і є аперіодичним і дуже затягнутим. Для скловарних печей, внаслідок особливості технологічного процесу варки скла, саме такий повільний процес регулювання температури є кращим, ніж швидкісний з перерегулюваннями і коливаннями.

Структурне імітаційне моделювання каскадної САР теплового режиму топки

Скриншоти вікон програмних застосунків полігону структурного імітаційного моделювання каскадної САР теплового режиму наведені на рис. 7.

ТОУ змодельований в СКМ Matlab Simulink як універсальний ОУ; тобто, як ОУ з випереджальною та інерційною частинами і вимірюванням параметру з проміжної точки (між виперед-

жальною і вимірювальною частинами). В якості такого параметру з проміжної точки в різних стабілізуючих САР каскадних САР теплового режиму топки з 4-ма і 6-ма регуляторами виступають витрата палива, положення РО на повітропроводі і положення РО на димоході (регулятор частоти обертання димососу). Так як змодельований ТОУ у вказаному вище сенсі є універсальним, а кожна САР є автономною (немає ніяких компенсаційних зв'язків між САР; а взаємовплив САР є шкідливим збуренням, на які САР штатно реагують), він може бути використаний для моделювання будь-якого ОУ як в каскадній САР, так і в одноконтурній САР.

Контролерна функціональність реалізована в софтПЛК CoDeSys 3.5. АСР в ПЛК реалізована як універсальна АСР; тобто, як каскад коригуючого і стабілізуючого регуляторів. Так як реалізована АСР у вказаному вище сенсі є універсальна, вона може бути використана для реалізації як каскадної, так і одноконтурної САР (в останньому випадку АСР редукується користувачем до одного регулятора – коригуючого, який виступає вже в якості стабілізуючого і вже сам напряму переміщує РО, а не змінює завдання стабілізуючому регулятору параметру з проміжної точки ОУ).

Супервізорна функціональність реалізована в НМІ/SCADA-системі AVEVA WebStudio.

Так як всі САР є принципово автономні (тобто принципово не мають взаємних компенсаційних

Структурне імітаційне моделювання САР теплового режиму промислової топки

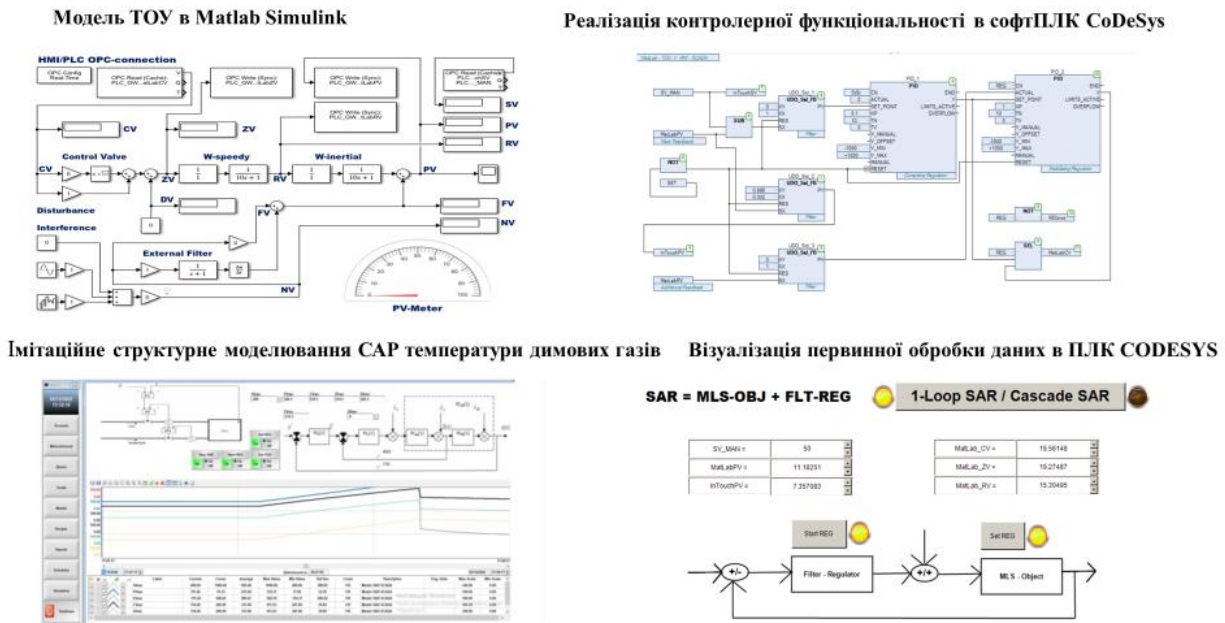


Рис. 7. Скриншоти полігону структурного імітаційного моделювання каскадної САР теплового режиму промислової топки

зв'язків для «покращення» регулювання), немає сенсу в структурному моделюванні TOU так, як це було зроблено в функціональному моделюванні. В функціональному моделюванні досліджувались зв'язки між САР через ОУ, які виступали як збурення для сторонніх САР; досліджувались і визначались переваги запропонованої структури САР теплового режиму топки (каскадна САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами) над класичними структурами САР теплового режиму топки (одноконтурна САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами і каскадна САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами). В структурному моделюванні моделюються не функції САР (це робить функціональне моделювання), а структура кожної локальної САР в структурі глобальної САР теплового режиму топки (тобто, взаємодія оператора HMI/SCADA-системи з ПЛК і «фізичним» TOU, змодельованим в СКМ); також моделюється налагодження кожної локальної САР як автономної від інших локальних САР.

Функціональне і структурне моделювання – це два принципово різні різновиди імітаційного моделювання, які доповнюють один одного і використовуються моделістом в послідовності «постановка задачі – функціональне моделювання – структурне моделювання».

Окремим питанням є питання про можливість і доцільність використання цифрового твінінгу в структурному імітаційному моделюванні про-

мислових САР взагалі і в каскадній САР теплового режиму топки окремо.

Цифровий твінінг – це розробка і впровадження цифрових двійників (ЦД). ЦД – керована реальними вимірними сигналами цифрова копія фізичного активу для оптимізації активу в реальному часі впродовж всього циклу життя активу.

З позицій імітаційного моделювання, ЦД – це емулятор фізичного активу; тобто симулятор фізичного активу (імітаційна модель), зв'язаний з цим фізичним активом через реальні (тобто вимірювані в реальному часі) технологічні і параметричні збурення на цей фізичний актив. Прототипом ЦД називають імітаційну модель ОУ, в якій збурення на ОУ програмно імітуються (а не вимірюються). Екземпляром ЦД називають імітаційну модель ОУ, в якій збурення на ОУ вимірюються (а не програмно імітуються) і враховуються в моделі в реальному часі, тобто в темпі з роботою ОУ.

Структурно САР з ЦД є класичними комбінованими САР, в яких ЦД використовуються як компенсатори збурень – внутрішніх і зовнішніх. Розуміння цього факту накладає чіткі категоричні обмеження на застосування ЦД в САР. Комбіновані САР є практично неефективними САР і використовуються дуже обмежено. Використання ЦД (компенсаторів) зовнішніх збурень неефективне з причини необхідності мати реальний диференціатор в ЦД, що практично неможливо реалізувати. Використання ЦД (компенсаторів) внутріш-

ніх збурень (збурень зі сторони РО) поступаються ефективністю каскадним САР, які розроблені саме для компенсації внутрішніх збурень і є ідеальними для цього. В запропонованій каскадній САР теплового режиму з 6-ма регуляторами використовуються три саме каскадні САР, тому використання ЦД є недоцільним з причини їх низької ефективності для регулювання в замкненому і розімкненому контурах.

ЦД (імітаційні моделі з підключенням до сенсорів) має сенс використовувати в системах технічної діагностики для задач предиктивного обслуговування технологічного обладнання на основі інформації від кількісних і якісних давачів. Не має сенсу використовувати в контурах регулювання (замкнених) і компенсації (розімкнених) САР. Стандартні імітаційні моделі (імітаційні моделі без підключення до сенсорів) має сенс використовувати для налагодження і тестування АСУ. Не має сенсу використовувати в системах технічної діагностики для задач предиктивного обслуговування.

Результати і висновки. Дослідження змодельованих комбінованих САР щодо сигнальних збурень і аналіз чутливості змодельованих комбінованих САР щодо параметричних збурень дає можливість сформулювати наступні результати і висновки (рекомендації):

1. Одноконтурна САР теплового режиму промислової топки з 3-ма регуляторами, каскадна САР теплового режиму промислової топки з 4-ма регуляторами і каскадна САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами при збуренні зі сторони завдання мають практично однакові перехідні характеристики. При збуренні зі сторони РО перехідні процеси в каскадній САР теплового режиму промислової топки з 4-ма регуляторами набагато кращі ніж в одноконтурній САР теплового режиму промислової топки з 3-ма регуляторами. В каскадній САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами перехідні процеси при збуренні зі сторони РО суттєво кращі навіть ніж в каскадній САР теплового режиму промислової топки з 4-ма регуляторами;

2. Основною промисловою САР теплового режиму топки, безумовно, є одноконтурна САР теплового режиму промислової топки з 3-ма регуляторами, яка включає в себе три одноконтурні САР температури, співвідношення паливо/повітря і розрідження. Вона надійно працює, легко реалізується, як в ПЛК, так і автономними регуляторами, але має недолік в тому, що не парює збурення зі сторони РО;

3. Каскадна САР теплового режиму промислової топки з 4-ма регуляторами в свою чергу рекомендується до використання, як найбільш оптимальна, тому що вона також легко реалізується як в ПЛК, так і автономними регуляторами і вона має суттєву перевагу над одноконтурною САР теплового режиму промислової топки з 3-ма регуляторами, адже вона парює збурення зі сторони РО. Вона складається з каскадної САР температури, одноконтурної САР співвідношення паливо/повітря і одноконтурної САР розрідження в топці в печі;

4. Каскадна САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами складається з трьох каскадних САР температури, співвідношення паливо/повітря і розрідження в топці печі. Ця САР має три коригуючі і три стабілізуючі регулятори (звідси і назва САР). Особливістю цієї каскадної САР є її одночасна робота стабілізуючих регуляторів за рахунок паралельної подачі коригуючих сигналів з різними знаками на входи цих стабілізуючих регуляторів. При збуренні зі сторони завдання каскадна САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами працює так само як одноконтурна САР теплового режиму промислової топки з 3-ма регуляторами і каскадна САР теплового режиму промислової топки з 4-ма регуляторами, а при збуренні зі сторони РО каскадна САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами працює найкраще з усіх. Але недоліком каскадної САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами є її практично неможлива реалізація за допомогою автономних регуляторів і складна реалізація в ПЛК;

5. Одноконтурна САР теплового режиму промислової топки з 3-ма регуляторами є прийнятною, але каскадна САР теплового режиму промислової топки з 4-ма регуляторами рекомендується, як найбільш оптимальна для роботи, а каскадна САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами рекомендується для роботи в сходових печах, де потрібно дуже повільно регулювати температуру;

6. Каскадна САР температури принципово і суттєво краще за одноконтурну САР з цієї причини вимірювання витрати палива є актуальним. Витрати палива можуть вимірюватися в об'ємних одиницях (наприклад в м³/сек), масових одиницях (кг/сек) і у ватах (Дж/сек). Об'ємні витратоміри не є ефективним рішенням, так як в одному кубічному метрі газу при різних тиску і температурі газу можуть бути різні кілограми. Тому об'ємний витратомір може фіксувати ту саму об'ємну

витрату, але масова витрата змінюється («спалюється не метри кубічні, а кілограми»). Можливі два варіанти. Перший варіант – використовувати масові витратоміри. Другий – використовувати об'ємні витратоміри з корекцією об'ємної витрати за вимірними самим витратоміром температурою і тиском газу. Такі об'ємні витратоміри з корекцією приводять вимірну об'ємну витрату до нормальних умов (0.1 МПа і 273 К), що фактично еквівалентно вимірюванню масової витрати. Рекомендується використовувати як масові, так і об'ємні витратоміри з корекцією, так як їх вартість приблизно однакова;

7. Ідеальним варіантом є використання калориметрів, які вимірюють витрату палива в ватах, Калорійність палива залежить від його хімічного складу і повністю характеризує тепловіддачу від

димових газів. Аналіз показав, що такі калориметри існують, але використовуються тільки для лабораторних аналізів і поки що не можуть бути використані в реальному часі в замкненому контурі регулювання. Використання калориметрів в САР наразі не є можливим, через їхню надмірну вартість (в середньому 2000000 грн), габаритність, не пристосованість калориметрів до агресивного середовища, вибухонебезпечність і додаткову витрату палива для спалювання в камері калориметра. Також причиною відсутності потреби у калориметрах є той факт, що підприємство при купівлі газу отримує від постачальника протокол аналізу цього газу. В протоколі міститься інформація про калорійність постачаемого газу. Тому використання калориметрів не виходить за межі лабораторних аналізів.

Список літератури:

1. Y.V. Panvan Kumar, Arvapalli Rajesh, SadhuYugandhar and Viswaraju Srikant, "Cascaded PID Controller Design For Heating Furnace Temperature Control," IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE) e-ISSN: 2278-2834, p-ISSN:2278-8735. Volume 5, Issue 3 (Mar. -Apr. 2013), PP 76-83.

2. Батюк С.Г. Імітаційне моделювання і цифровий твінінг енергетичних кібер-фізичних систем (кібер-енергетичних систем) // Досягнення України та країн ЄС у сфері інновацій і винахідництва в галузі техніки : колективна монографія. С. 44-109. Рига, Латвія : Izdevniecība "Baltija Publishing", 2022. 544 с. 65 с.

Batiuk S.G., Semenov A.D. CASCADE SYSTEM OF AUTOMATIC REGULATION OF INDUSTRIAL FURNACE HEAT REGIME

The practical implementation of cascade system of automatic regulation of the heat regime of industrial furnaces is an urgent task of industrial automation. The analysis of the possibilities of practical application of cascade systems of automatic regulation of the furnace heat regime with parallel operation of temperature, rarefaction and air/fuel ratio regulators to ensure efficient combustion of fuel in the furnace is especially relevant. To achieve a practical result, the study should be performed for a specific type of industrial furnace. A glass furnace was chosen as a typical and common heat energy unit.

Functional imitation modeling and investigate a single-loop system of automatic regulation (SAR) of a furnace heat regime with 3 regulators, a cascade SAR of a furnace heat regime with 4 regulators and a cascade SAR of a furnace heat regime with 6 regulators were performed. Comparative analysis of these SARs were performed. Recommendations for the use of these SARs to regulate the heat regime of industrial furnaces were performed. The inspection of industrial natural gas flowmeters and recommendations for their use in the SAR of the heat regime of an industrial furnace were performed. The inspection of natural gas calorimeters and recommendations for their use in the SAR of the heat regime of an industrial furnace were performed.

The developed test site for imitation modeling of the cascade system of automatic regulation of the thermal regime of an industrial furnace is intended for: 1) use in the educational process of the department of automation of energy processes of NTUU KPI; 2) use as a software-technical simulator in the design, modernization and replication of the automated control systems of technological processes of furnace systems. The program-modeling toolkit for the development of a training ground for simulation modeling of a cascade system of automatic regulation of the thermal regime of an industrial furnace is the software-technical simulator of an automated technological complex on the Matlab Simulink – CoDeSys – WebStudio platform.

Key words: *automated control system, cascade system of automatic regulation, automation of technological processes, software-technical means of automation, imitation modeling, glass furnace, heat regime of the furnace, temperature regulation, rarefaction regulation, fuel combustion efficiency regulation.*