

Батюк С.Г.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Воронюк М.В.**

Київський національний університет будівництва та архітектури

ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ І СИСТЕМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Стаття присвячена використанню цифрових двійників в класичних задачах автоматизації теплоенергетичних процесів.

Сформульовані робочі поняття цифрових двійників і систем штучного інтелекту для задач автоматизації. Продемонстровано, що технології цифрових двійників і систем штучного інтелекту широко використовувались і використовуються в автоматизації технологічних процесів взагалі і автоматизації теплоенергетичних процесів зокрема.

Проаналізовані класичні приклади використання цифрових двійників і систем штучного інтелекту в автоматизації теплоенергетичних процесів: 1) цифрові двійники в задачах верхнього (супервізорного) рівня автоматизації методичних печей прокатних станів – розрахунок в реальному часі температурних епюр металевих слябів; 2) системи штучного інтелекту в задачах нижнього (контролерного) рівня автоматизації промислових топків – градієнтний пошук оптимального значення коефіцієнту надлишку повітря; 3) цифрові двійники в задачах верхнього (супервізорного) рівня автоматизації енергоблоку електростанції – технічна діагностика тепло-механічного стану електрогенератору; 4) цифрові двійники в задачах нижнього (контролерного) рівня автоматизації енергоблоку електростанції – фільтрація виміряних температур корпусу електрогенератору; 5) цифрові двійники в задачах верхнього (супервізорного) рівня автоматизації скловарної печі – розрахунок температури і рівня скломаси в басейні печі; 6) цифрові двійники в задачах нижнього (контролерного) рівня автоматизації скловарної печі – формування команди на перекидання факелу в регенеративній топці; 7) системи штучного інтелекту в задачах верхнього (супервізорного) рівня автоматизації лінії формування скляних труб методом горизонтального витягування – градієнтний пошук мінімуму собівартості виробів; 8) цифрові двійники в задачах нижнього (контролерного) рівня автоматизації лінії формування скляних труб методом горизонтального витягування – формування уставки регулятора аеродинамічного режиму формування склотрубок; 9) системи штучного інтелекту в задачах нижнього (контролерного) рівня автоматизації теплоенергетичних процесів – автотюнінг ПДД-регуляторів; 10) системи штучного інтелекту в задачах комплексної автоматизації інженерних систем – екстремальне управління позиціонуванням панелей батарей сонячних електростанцій і лопатей турбін вітряних електростанцій.

Ключові слова: четверта промислова революція, кібер-фзична система, інтернет речей, граничний девайс, інтелектуальні системи управління, цифровий двійник, штучний інтелект, агент штучного інтелекту, система штучного інтелекту, комплексна автоматизація, автоматизація теплоенергетичних процесів, автоматизація інженерних систем, автоматизована система управління, система автоматичного регулювання, контролерна функціональність, супервізорна функціональність, адаптивні системи управління, експертні системи управління, системи екстремального управління, автотюнінг ПДД-регуляторів, системи з навчанням, системи з самонавчанням, моделювання в реальному часі.

Постановка проблеми. Цифрові двійники (ЦД) і системи штучного інтелекту (СШІ; наприклад, ШІ-агенти) активно використовуються в промисловості і будівництві. Основні напрями застосування ЦД – технічна діагностика і попереджувальне обслуговування технологічних агрега-

тів. Основні напрями використання ШІ-агентів – сервісні функції для побутових і промислових гаджетів. Актуальним є питання – яким чином ЦД і СШІ можуть бути використані в автоматизації технологічних об'єктів управління (ТОУ) взагалі і в автоматизації інженерних систем зокрема?

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ЦД і СШІ – надновітні цифрові технології (особливо ШІ-агенти). Традиційно ЦД і СШІ відносять до інформаційних технологій (ІТ). Використання ЦД і СШІ як операційних технологій (ОТ), тобто як технологій автоматизації, є дискусійним. Виникають наступні питання.

1. Чи були раніше вже реалізовані ЦД і СШІ в автоматизації технологічних процесів?

2. Якщо були, то що це були за рішення і чи були вони ефективними? І чи не є терміни «ЦД» і «СШІ» новими назвами відомих і ефективних (чи неефективних) рішень з автоматизації? Як, наприклад, новітній термін «кібер-фізична система (КФС)» замість класичного терміну «автоматизований технологічний комплекс (АТК)».

3. Якщо ЦД і СШІ вже імпліцитно використовувались в класичних системах автоматичного регулювання (САР), то які перспективи їх використання в сучасних автоматизованих системах управління технологічними процесами (АСУ ТП) ТОУ, зокрема АСУ технологічними процесами?

Постановка завдання. Для змістовних відповідей на перераховані вище актуальні питання щодо використання ЦД і СШІ в промисловій автоматизації потрібно проаналізувати і визначити наступне.

1. Дати робочі визначення ЦД і СШІ для ОТ.

2. Вказати аналоги ЦД і СШІ в задачах класичної промислової автоматизації, проаналізувати їх ефективність і перспективність їх застосування в автоматизації технологічних процесів технологічних агрегатів.

3. Надати приклади застосування ЦД і СШІ в автоматизації теплоенергетичних процесів.

Виклад основного матеріалу. ЦД – це «дитина» 4-ої промислової революції. Промислова революція почалась приблизно від 1800-го року і неперервно продовжується вже понад 200 років, докорінно змінюючи умови життя і праці людства. Класична теорія автоматичного управління (ТАУ) [1] і, відповідно, класична промислова автоматизація [2] – це «діти» попередніх етапів (1-го, 2-го і 3-го) перманентної промислової революції. ШІ і СШІ разом з роботизацією – вже «діти» 5-ої промислової революції (яка, власне, і розпочалось з впровадження СШІ в ІТ).

Що спільного у ЦД/СШІ з класичною автоматизацією і чи, взагалі, релевантні аналогії між сучасними ЦД/СШІ і класичними рішеннями з автоматизації кінця 20-го століття? Аналіз показує, що так і що деякі добре відомі кла-

сичні ОТ [3] є аналогами сучасних ЦД і СШІ. Більше того, відносна рідкість застосування цих рішень в промисловій автоматизації ретроспективно демонструє, що вони випередили свій час, бо не могли бути реалізовані тоді з причини обчислювальних обмежень тогочасних програмно-технічних засобів автоматизації.

Визначення ЦД для ОТ

ЦД – це цифрова копія (імітаційна модель) ТОУ, яка керується вимірними параметрами і використовується для обчислення параметрів, які не вимірюються. Модель може бути точною або приблизною, динамічною або статичною, формульною, табличною або алгоритмічною. ЦД не визначається способом свого застосування; засадничим для визначення моделі ТОУ як ЦД ТОУ є використання в моделі вимірних параметрів для обчислення невимірних параметрів. Обчислені параметри можуть бути як технологічні (температури, тиски, рівні, витрати, тощо) так і техніко-економічні (ТЕП; КПЕ – ключові показники ефективності; собівартість, випрацювання ресурсу, надійність функціонування, показники якості перехідних процесів). Класичне застосування ЦД ТОУ – технічна діагностика обладнання ТОУ з метою попереджувального обслуговування (predictive maintenance). Як правило, ЦД має свою цифрову тінь (історію, тобто історичні дані в архіваторах), але наявність цифрової тіні не є засадничою для дефініції ЦД ТОУ.

Визначення СШІ для ОТ

СШІ – це система машинного навчання (СМН). Взагалі, ШІ – це не пристрій, не програма і не алгоритм. ШІ – це галузь кібернетики, яка вивчає (аналізує і синтезує) системи, здатні до навчання. Термін «штучний інтелект» є неточним перекладом з англійського «artificial intelligence (AI)» (порівняння: CIA – Central Intelligence Agency – ЦРУ). Intelligence – це здатність досліджувати, здобувати знання та навички. Intellect – це здатність міркувати та об'єктивно розуміти. Відповідно, англійський термін AI точніше перекласти як «штучне дослідження / штучний дослідник». Алгоритми ШІ не імітують роботу людського мозку (хоча нейронні мережі, на основі яких працює людський мозок, є найбільш поширеним механізмом реалізації алгоритмів ШІ, це не єдиний такий алгоритм). Алгоритми ШІ імітують процес навчання.

СШІ – це пристрій або програма для реалізації алгоритмів ШІ. Інакше, СШІ – це пристрій або програма, які можуть навчатись. Терміни

ШІ і «машинне навчання» (МН) практично тотожні за значенням (хоча МН в ШІ розглядається як одна з технологій ШІ). Вирізняють дедуктивне машинне навчання (ДМН) та індуктивне машинне навчання (ІМН). ДМН – формалізація знань експертів у вигляді баз знань (БЗ). ІМН – пошук емпіричних залежностей в експериментальних даних. Алгоритми ДМН реалізуються експертними системами управління (ЕСУ). Алгоритми ІМН реалізуються пошуковими системами управління (ПСУ). ЕСУ і ПСУ відомі як інтелектуальні системи управління (ІСУ). ПСУ, за визначенням і фактично, є адаптивними системами управління – системами адаптації параметрів (САП) САР режимних параметрів ТОУ.

Застосування ЦД в промисловій автоматизації

Можна виділити всього п'ять застосувань ЦД в промисловій автоматизації, які і перераховані нижче.

1. Технічна діагностика ТОУ [4]. Це класичне і актуальне застосування для попереджувального обслуговування ТОУ.

2. Розрахунок оптимальних значень уставок режимних параметрів САР. Це все ж таки більш високорівнева функція інтегрованої АСУ масштабу підприємства; відповідно, реалізується в АСУ виробництвом (АСУВ), а не в АСУ ТП.

3. Компенсація вимірних сигнальних збурень розрахованими компенсаторами в прямому зв'язку комбінованих САР. Проте розраховані компенсатори (з виходом як на вхід, так і на вихід регулятора) є фізично нереалізованими, так як мають містити ланки ідеального або реального диференціювання.

4. Розрахунок невиміряного параметру з проміжної точки або невиміряного вихідного параметру каскадної САР. Це класичне і актуальне застосування ЦД в САР реального часу.

5. Розрахунок параметрів ТОУ і компенсація дрейфу параметрів ТОУ (добовий; сезонний; віковий) в САП. Адаптація САР під розраховані параметричні збурення є класичним і актуальним застосуванням ЦД в САР реального часу.

З п'яти вказаних застосувань ЦД в промисловій автоматизації реально актуальні тільки три застосування, а саме 1), 4) і 5). Застосування 2) і 3) – неактуальні.

Застосування СШІ в промисловій автоматизації

Можна виділити всього три застосування СШІ (інакше – ІСУ) в промисловій автоматизації, які і перераховані нижче.

1. ЕСУ і ЦД ТОУ в складі системи технічної діагностики (СТД) ТОУ. Реалізується

режим порадника з метою попереджувального обслуговування. Це класичний і актуальний приклад сумісного використання ЦД і СШІ в автоматизації.

2. В САП як системи екстремального управління (СЕУ). СЕУ реалізують алгоритми градієнтного пошуку екстремальних значень техніко-економічних параметрів (ТЕП; ключових показників ефективності КПЕ).

3. В САП як системи автотюнінгу (САТ) регуляторів САР. САТ реалізують алгоритми автоматичного пошуку оптимальних параметрів регуляторів пробними діями на ОУ в розімкненій САР.

З трьох вказаних застосувань СШІ в промисловій автоматизації реально актуальні усі три застосування.

Висновки щодо застосування ЦД/СШІ в промисловій автоматизації

Всього, як вказано вище, актуальними є три застосування ЦД і три застосування СШІ в промисловій автоматизації (всього разом шість). Застосування 1-СШІ є сумісним з застосуванням 1-ЦД. Застосування 2-3-СШІ замінюють застосування 5-ЦД, як більш ефективні, бо є активною адаптацією, а не пасивною (як застосування 5-ЦД).

Таким чином, можна виділити всього чотири застосування ЦД/СШІ в промисловій автоматизації, які і перераховані нижче.

1. Розрахунок невиміряного параметру з проміжної точки або невиміряного вихідного параметру каскадної САР. Це класичне і актуальне застосування ЦД в САР реального часу.

2. ЕСУ з ЦД ТОУ в складі системи технічної діагностики (СТД) ТОУ. Реалізується режим порадника з метою попереджувального обслуговування. Це класичний і актуальний приклад сумісного використання ЦД і СШІ в автоматизації інженерних систем.

3. В САП як СЕУ. Реалізація СЕУ електропостачання в сонячній електростанції (поворотом мобільної електростанції за сонцем) і у вітряній електростанції (позиціонуванням кута атаки лопастей вітряку).

4. В САП як САТ регуляторів САР. САТ реалізують алгоритми автоматичного пошуку оптимальних параметрів регуляторів температури в приміщеннях пробними діями на ОУ в розімкнених САР.

Застосування ЦД/СШІ в автоматизації інженерних систем

В автономних системах електропостачання і життєзабезпечення [5] внутрішні збурення зі

сторони регулюючого органу (РО) застabilізовані в процесі підготовки інженерних систем до автоматизації, тому вони виключені. Це означає, що в автономних автоматизованих інженерних системах [6] використовуються переважно одноконтурні САР, а каскадні САР переважно не використовуються (основна перевага каскадних САР над одноконтурними – кращий перехідний процес при збуреннях зі сторони РО – нівелюється принциповою відсутністю збурень зі сторони РО).

Таким чином, в автоматизації автономних інженерних систем з перерахованих вище чотирьох застосувань ЦД/СШ використовуються тільки три застосування, які перераховані нижче.

1. ЕСУ з ЦД ТОУ в складі системи технічної діагностики (СТД) ТОУ. Реалізується режим порадики з метою попереджувального обслуговування. Це класичний і актуальний приклад сумісного використання ЦД і СШ в автоматизації інженерних систем.

2. В САП як СЕУ. Реалізація СЕУ електропостачанням в сонячній електростанції (поворотом мобільної електростанції за сонцем) і у вітряній електростанції (позиціонуванням кута атаки лопастей вітряку).

3. В САП як САТ регуляторів САР. САТ реалізують алгоритми автоматичного пошуку оптимальних параметрів регуляторів температури в приміщеннях пробними діями на ОУ в розмірених САР.

Всі ці вказані три застосування ЦД/СШ є застосуваннями СШ. Застосування ЦД для технічної діагностики інженерних систем входить в застосування СШ в якості ЕСУ, що є яскравим прикладом сумісного застосування ЦД і СШ в автоматизації інженерних систем.

Примітка. Стандартна класифікація адаптивних САР [1]

1. САР з жорсткою (малочутливі і робастні) і гнучкою адаптацією (активні і пасивні). Малочутлива (груба або робастна) САР є лінійною.

2. САР з активною адаптацією – СЕУ і САТ. Такі САР є лінійними.

3. САР з пасивною адаптацією – обчислення параметрів ОУ шляхом пасивного спостереження за входами і виходами ОУ. Якщо обчислення параметрів ОУ і коригування оптимальних параметрів регулятора здійснюється в реальному часі – така пасивна адаптивна САР є нелінійною.

Приклади застосувань ЦД і СШ в автоматизації теплоенергетичних процесів

ЦД і СШ активно використовуються в класичній промисловій автоматизації. Різноманіт-

ність і нестандартність класичних рішень з ЦД і СШ достатньо вражаючі. Нижче наведені приклади застосувань ЦД і СШ в різних класичних задачах автоматизації теплоенергетичних процесів.

Автоматизація печей – класичний полігон промислової автоматизації. Автоматизація методичних печей, які прогрівують металеві сляби перед прокаткою на прокатних станах, – класичний полігон ЦД, які тоді (до появи терміну ЦД) називались «моделями реального часу» (МРЧ). ЦД (= МРЧ) використовувались також як в автоматизації енергоблоків теплових і атомних електростанцій, так і в автоматизації сталоварних печей. СШ використовувались в автоматизації теплоенергетичних процесів в якості СЕУ і САТ, які раніше (до появи термінів Ш і ШІ-агент) називались «системами з навчанням (або з самонавчанням)».

Нижче в табл. 1 перераховані типові задачі нижнього (контролерного) рівня дворівневої (класична ієрархія автоматизації) АСУТП методичної печі. Виділені типові задачі регулювання теплового режиму промислової топки (регулювання температурного режиму, режиму економичності згоряння палива, аеродинамічного режиму), актуальні задачі регулювання продуктивності теплоенергетичного агрегатів і спеціальні задачі регулювання перегріву пари.

Задачі контролерного рівня автоматизації є типовими для теплоенергетичних ТОУ (промислові печі; енергетичні котли; інженерні системи малої енергетики), які містять топки з пальниками для спалення палива і системи нагрівання робочих тіл (води, пари, повітря, поверхонь тощо). Ці задачі реалізуються типовими САР – одноконтурними (більшість) і двоконтурними (здебільшого – каскадними з двома регуляторами, значно рідше – з одним двоімпульсним регулятором). ПІД-регулятори в САР розрховуються, як правило, на аперіодичний або з 20%-им перерегулюванням перехідні процеси. Використання таких відносно «повільних» регуляторів (відносно малий коефіцієнт передачі і відносно велика стала часу інтегрування) синтезує САР з високим запасом сталості. Такі САР є малочутливими до параметричних збурень ОУ. Інакше кажучи, вони є САР з жорсткою адаптацією (тобто заздалегідь адаптовані під параметричні збурення ОУ своєю функціональною малочутливістю до цих збурень).

Нижче в табл. 2 перераховані типові задачі верхнього (супервізорного) рівня дворівневої

Таблиця 1

Типові задачі регулювання нижнього (контролерного) рівня теплоенергетичної АСУТП

№ п/п	Функція	Задача	САР режимного параметру	Тип САР
1	2	3	4	5
1	Регулювання температурного режиму	1.1. Стабілізація температури газового середовища вздовж прохідної топки (позонна стабілізація температури). 1.2. Програмне регулювання (в часі) температури газового середовища в камерній топці	САР температури газового середовища (димових газів)	Одноконтурна САР «температура – випрата палива». Каскадна САР «температура – задана витрата палива – переміщення РО»
2	Регулювання економічності згоряння палива	2.1. Стабілізація витрати повітря на значенні $\alpha^* \cdot L_0 \cdot B_n$, де B_n – поточна витрата палива, α^* – заданий коефіцієнт надлишку (витрати) повітря, L_0 – стехіометричне співвідношення "повітря/паливо" (для газу – $\sim 10 \text{ м}^3/\text{м}^3$). 2.2. Стабілізація вмісту кисню в димових газах	2.1. САР співвідношення повітря/паливо (= економічності згоряння палива = коефіцієнту надлишку повітря). 2.2. САР вмісту кисню в димових газах	2.1. Одноконтурна САР «витрата палива – витрата повітря». 2.2. Каскадна САР «вміст кисню в димових газах – заданий тиск повітря – переміщення РО».
3	Регулювання аеродинамічного (гідравлічного) режиму топки	Стабілізація розрідження в топці	САР розрідження в топці	Одноконтурна САР. Комбінована САР (з компенсацією збурення витратою повітря)
4	Регулювання продуктивності	4.1. Стабілізація рівня рідини в баці (барабані котла). 4.2. Стабілізація швидкості обертання ротору турбіни. 4.3. Стабілізація тиску в колекторі	4.1. САР рівня. 4.2. САР частоти обертів ротору турбіни 4.3. САР тиску в колекторі	4.1. Одноконтурна САР. САР з тримпульсним регулятором. 4.2. Каскадна САР «частота змінного струму – електрична потужність – частота обертів ротору турбіни» 4.3. Одноконтурна САР. Система зв'язаного регулювання
5	Регулювання перегріву пари	5.1. Стабілізація температури первинної пари. 5.2. Стабілізація температури вторинної пари	5.1. САР температури первинної пари. 5.2. САР температури вторинної пари	Двоїмпульсна САР (з корекцією за температурою з проміжної точки пароперегрівача)

(класична ієрархія автоматизації) АСУТП методичної печі. Задачі supervisory рівня автоматизації включають 1) задачі SCADA-автоматизації (задачі HMI-Standard і MES-Lite) і 2) задачі моделювання і оптимізації реального часу (які, як вказано вище, і є ЕСУ з ЦД).

Типова HMI/SCADA-функціональність:

- Обмін даними з контролерами.
- Передача уставок в контролери.
- Архівування даних від контролерів.
- Візуалізація даних мнемосхем (mimics).

- Ідентифікація і відображення алармів (нештатних ситуацій).

- Побудова і відображення трендів (реального часу та історичних).

- Реалізація систем звітності (локальної і консолідованої аналітичної).

Сучасна SCADA-система не реалізує оптимізацію технологічного процесу в реальному часі, вона в реальному часі реалізує людино-машинний інтерфейс HMI (мнемосхеми, аларми, тренди тощо). Задачі моделювання і оптимізації реаль-

ного часу (тобто, функціональність ЕСУ і ЦД) є додатковими до HMI/SCADA-функціональності і реалізуються спеціальними програмними продуктами, як правило, пропрієтарними.

Реалізація промислової АСУТП «великих» ТОУ без онлайн-ових задач моделювання і оптимізації додатково до стандартної SCADA-функціональності є практично неможливою, відповідно, обов'язковою.

Вказані в табл. 2 супервізорні функції управління з використанням ЕСУ і ЦД, хоча і сформульовані для АСУТП методичної печі, є типовими для теплоенергетичних ТОУ, так як включають типові генеалогію, інформаційне супроводження і модельні розрахунки в реальному часі невимірюваних параметрів на основі вимірюваних параметрів.

Приклад № 1. ЦД в задачах верхнього (супервізорного) рівня автоматизації методичних печей прокатних станів – розрахунок в реальному часі температурних епюр металевих слябів

Нижче на рис. 1 наведені діаграми режимів нагрівання слябів в методичній печі.

Виділяють режим нагрівання слябів (з різних партій, які одночасно знаходяться в печі) за балансовим методом і за середньо-інтегральною температурою слябу (по його висоті).

Нижче на рис. 2 наведений графік гарантованого нагрівання слябів в методичній печі. Гарантований режим нагрівання слябів є компромісним режимом нагрівання слябів в умовах неконтрольованого змінного темпу роботи прокатного стану (темпу прокатки).

Таблиця 2

Типові задачі управління верхнього (супервізорного) рівня АСУТП методичної печі

№ п/п	Функція / задача	Система автоматичного управління (САУ) / комплекс задач
1	Інформаційне супроводження слябів в методичних печах	САУ транспортуванням слябів
2	Прогноз темпу прокатки прокатного стану (тривалості нагріву слябів в печах)	Комплекс задач прогнозування темпу прокатки прокатного стану
3	Цифровий двійник топки печі (моделювання внутрішнього і зовнішнього теплообмінів топки в реальному часі і розрахунок додаткових технологічних параметрів, які неможливо виміряти сенсорами – температури печі (?), температури поверхні кожного слябу, температури центру кожного слябу, середньомасової (середньоінтегральної) температури по висоті кожного слябу)	Комплекс задач розрахунку теплообміну
4	Реалізація гарантованого режиму нагріву слябів з фіксуванням моменту виходу в режим витомлення	САУ нагріванням слябів
5	Реалізація режиму нагріву слябів за середньомасовою (середньоінтегральною) температурою слябів	САУ нагріванням слябів
6	Реалізація режиму нагріву слябів за балансовим методом	САУ нагріванням слябів
7	Діагностування стану автоматизованого технологічного комплексу, розрахунок техніко-економічних показників (КПЕ/КРІ)	Комплекс задач діагностики і розрахунку техніко-економічних показників (КПЕ/КРІ)

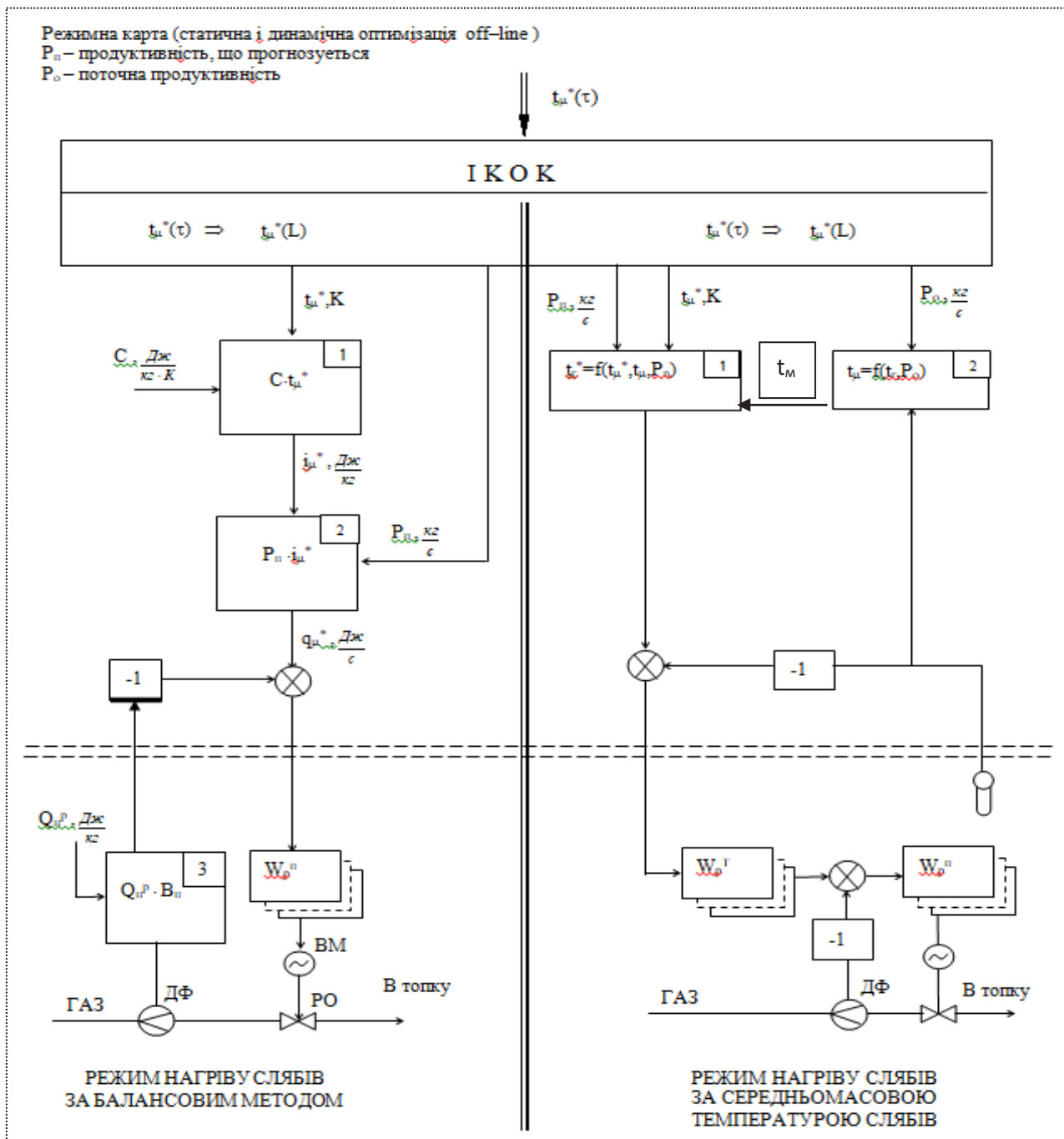
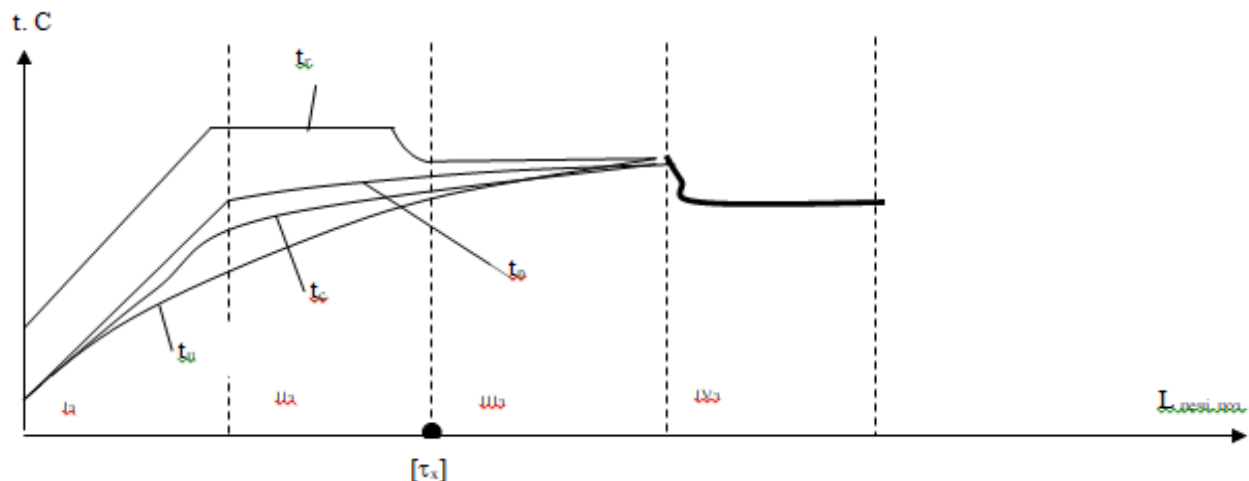


Рис. 1. Діаграми нагрівання слябів в методичній печі

Загальним збуренням для АСУТП методичної печі є зміна темпу прокатки металевих слябів на прокатному стані. Це є класичне сигнальне зовнішнє збурення для ТОУ – збурення за навантаженням. Головна задача методичної печі – прогріти великий металевий сляб (розміром десь $2 \text{ м} \times 2 \text{ м} \times 2 \text{ м}$) до температури приблизно 723 К по ширині, довжині і висоті. В ідеальному випадку – температури поверхонь слябів і центру слябу є однаковими. Така рівномірна внутрішня температурна епіюра слябу забезпе-

чує його легку, штатну і безаварійну прокатку валками прокатного стану (стискання слябу висотою 2 метри в профілі або в листи товщиною 2 мм). Від темпу прокатки залежить час нагрівання (перебування) слябів в методичній печі – звідси мають бути різні швидкості нагрівання, витримки і охолодження слябів на позиціях зон методичної печі. Ситуація ускладнюється тим фактом, що в методичній печі можуть одночасно нагріватись (перебувати) сляби з різних партій. Партія слябів – це сляби однакового



- I_3 – зона швидкого нагріву при $q = \text{const}$
 II_3 – зона витрати при $t_r'' = \text{const}$
 III_3 – зона витомлення при $t_r''' = \text{const}, t_r''' \leq t_r''$
 IV_3 – зона охолодження при $t_r'''' = \text{const}, t_r'''' \leq t_r'''$

t_r – температура газового середовища

t_n – температура поверхні слябу

t_c – температура центру слябу

t_s – середньомасова температура слябу

τ_k – момент фіксації виходу слябів в режим витомлення (момент τ_k кореспондується з відповідної позицією нагріву в печі. Вірогідність правильної фіксації

$$P = \prod_{i=1}^n (1 - p_i),$$

де p_i – вірогідність правильної фіксації моменту виходу в режим витомлення за окремою ознакою, n – кількість вибраних ознак, при цьому $P > \min\{P_i\}$.

Рис. 2. Графік гарантованого нагрівання слябів в методичній печі

типорозміру (однакових теплофізичних характеристик), відлиті з металу в ливарних печах за однаковою технологією. Сляби різних партій, як сляби різних типорозмірів, потребують різних режимів нагрівання слябів в методичних печах. Режим нагрівання слябів в печі – це температурний режим печі, тобто температурний графік по довжині печі (тобто в часі).

В загальному випадку важливим є температурний графік як графік температури центру слябу, яка в кінці процесу нагрівання має вирівнятися з температурою поверхні сляба і ці температури мають дорівнювати заданій температурі прокатки – ідеальний варіант. На практиці, температура центру слябу ніколи не досягає температури поверхні слябу, тому кажуть про середньо-інтегральну температуру слябу (по перерізу слябу). Є дві проблеми управління нагріванням слябів. Перша – температуру центру слябу фізично виміряти неможливо (можливе тільки періодичне вимірювання температури

поверхні слябу пірометром у фурмі). Рішення проблеми – замість температурного графіку центру слябу (графіку середньо-інтегральної температури слябу) використовувати графік температури димових газів по довжині печі. Але виникає друга проблема – температури димових газів вимірюються термопарами, але що насправді вимірює термопара? В теплотехніці замість температури димових газів використовується термін «температура печі» – термопара на позиції в печі вимірює як температуру самих димових газів, так і факелу, і слябу, і кладки печі. Рішення проблеми – на основі вимірюваних «температур печі» в зонах печі розрахувати як температури димових газів, так і середньо-інтегральні температури слябів. Виміряні температури печі (або розраховані температури димових газів) є параметрами з проміжної точки для ОУ як каналу передачі регулювальної дії «зміна витрати палива – зміна температури печі – зміна середньо-інтегральної температури слябу». Відпо-

відно, САР температури в табл. 1 (задачі контролерної автоматизації) можуть бути побудовані або як одноконтурні САР температур печі (які вимірюються), або як одноконтурні САР температур димових газів (які розраховуються), або як одноконтурні САР середньо-інтегральних температур слябів (які розраховуються), або як каскадні САР середньо-інтегральних температур слябів (головні праметри – середньо-інтегральні температури слябів – розраховуються для кожного слябу; проміжні параметри – це або виміряні термопарами температури печі, або розраховані температури димових газів).

Таким чином, для оптимального вирішення задач контролерного рівня автоматизації (табл. 1) в задачах супервізорної автоматизації (табл. 2) виникає комплексна задача онлайнового (тобто, в режимі реального часу) моделювання процесів тепломасообміну в печі, яка наразі вирішує дві задачі: 1) на основі виміряних температур печі розраховуються невимірювані температури поверхні і центру слябу (середньо-інтегральної температури слябу); 2) на основі розрахованих середньо-інтегральних температур слябів розраховуються задані значення температур димових газів (температур печі) в зонах печі або задані значення витрат палива в зонах печі такі, які забезпечують своєю стабілізацією стабілізацію заданого графіку середньо-інтегральної температури слябів.

Відповідно, можуть бути реалізовані три режими нагрівання слябів в методичній печі (рисунки 1 і 2):

1. режим нагрівання за середньо-інтегральною температурою слябів (справа на рис. 1):

1) онлайн прогноз темпу прокатки слябів; 2) онлайн розрахунок заданого графіку середньо-інтегральної температури слябів по довжині печі на основі темпу прокатки; 3) одноконтурна або каскадна стабілізація зміною зональних витрат палива розрахованих в реальному часі середньо-інтегральних температур слябів в зонах печі (задані і поточні середньо-інтегральні температури різних слябів в одній зоні печі усереднюються) температури;

2. режим нагрівання за балансовим методом (зліва на рис. 1): 1) онлайн прогноз темпу прокатки слябів; 2) офлайн розрахунок заданого графіку зональних витрат палива по довжині печі на основі теплового балансу печі з урахуванням темпу прокатки; 3) одноконтурна або каскадна стабілізація виміряних зональних витрат палива переміщенням РО на зональних газопроводах;

3. гарантований режим нагрівання (рис. 2):

1) офлайн розрахунок заданого графіку зональних температур печі по довжині печі, який гарантує нагрівання і прогрівання слябів за найшвидшого темпу прокатки, тобто за найменший час нагрівання (пербування) слябів в печі (режим не оптимальний – сляб спочатку швидко нагрівається, а потім довго витомлюється (прогрівається), за рахунок чого є перевитрата палива); 2) одноконтурна або каскадна стабілізація виміряних зональних температур печі зміною зональних витрат палива (газу).

Основним режимом нагрівання слябів в методичній печі є режим нагрівання за середньо-інтегральною температурою слябів. Режим нагрівання за балансовим методом використовується як альтернативний, якщо темп прокатки змінюється епізодично і заздалегідь відомо. Гарантований режим нагрівання слябів використовується у випадках неможливості прогнозу темпу прокатки слябів або неможливості розрахунку поточних середньо-інтегральних температур слябів в печі.

Для реалізації вказаних режимів нагрівання слябів в методичній печі потрібно знати генеалогію слябів (з якої партії сляби – тобто з якими типорозмірами, тобто теплофізичними характеристиками), потрібно знати місцезнаходження кожного слябу від ливарної печі до подачі на прокатний стан після методичної печі (інформаційне супроводження слябів), потрібно знати історію нагрівання слябів (архівування виміряних і розрахованих температур). Вказані задачі, які є задачами ЦД, реалізуються САУ в складі супервізорного рівня АСУТП методичної печі.

ЦД (онлайн моделі, тобто моделі в реальному часі, теплообміну в промислових топках) в АСУТП методичної печі використовуються як в автоматичному режимі, так і в складі ЕСУ в режимі порадника. Саме АСУТП методичної печі є класичним і найбільш ефективним прикладом використання ЦД в промисловій автоматизації.

Приклад № 2. СШІ в задачах нижнього (контролерного) рівня автоматизації промислових топко – градієнтний пошук оптимального значення коефіцієнту надлишку повітря

Класична задача контролерної автоматизації – СЕУ коефіцієнтом надлишку повітря в топці печі. Газ, який подається в пальники печі, в залежності від своїх температури, тиску і хімічного складу має різну теплотворну здатність. Крім того, якість спалення газу (кількість

виділеного при спаленні газу тепла) залежить від конструкції пальників, температури і вологості повітря, яке подається в пальники. З цих причин заздалегідь визначити і оперативно (в реальному часі) розрахувати оптимальне значення коефіцієнту надлишку повітря практично неможливо. Значення коефіцієнту надлишку повітря, яке забезпечує заданий виїст кисню в димових газах (тобто, потрібну якість згоряння палива), може бути знайдено активним експериментом – екстремальним управлінням. Пробна дія – зміна коефіцієнту надлишку повітря (для постійного стехіометричного співвідношення повітря/паливо – фактично, зміна витрати повітря). Регульований параметр – вміст кисню в димових газах (вимірюється оксиметром). Відсутність хибних локальних екстремумів.

Приклад № 3. ЦД в задачах верхнього (супервізорного) рівня автоматизації енергоблоку електростанції – технічна діагностика тепло-механічного стану електрогенератору [7]

Класична задача автоматизації – технічна діагностика тепломеханічного стану електрогенератору енергоблоку. ЦД – тепломеханічна модель електрогенератору, керована виміряними температурами різних елементів електрогенератору (всього 128 параметрів). ЦД розраховує механічні навантаження електрогенератору і прогнозує його ресурс роботи.

Приклад № 4. ЦД в задачах нижнього (контрольного) рівня автоматизації енергоблоку електростанції – фільтрація вимірянних температур корпусу електрогенератору [7]

Класична задача автоматизації – фільтрація вимірюваних контрольних параметрів. Некласичний фільтр – реалізується двоступенева фільтрація. ЦД – модель двоступеневого фільтру з нелінійним видаленням граничних амплітуд викидів і лінійним фільтром ковзаючого середнього. Виміряні температури імпортуються в реальному часі в модель фільтру. Модель розраховує нові параметри реального двоступеневого фільтру.

Приклад № 5. ЦД в задачах верхнього (супервізорного) рівня автоматизації скловарної печі – розрахунок температури і рівня скломаси в басейні печі

Класична задача автоматизації – регулювання температури скломаси і рівня скломаси в басейні скловарної печі. Температуру скломаси в басейні виміряти фізично неможливо, а рівень – проблематично. ЦД – модель тепломасообміну в скловарній печі. ЦД розраховує температуру скломаси в басейні і рівень скломаси в басейні.

Реалізується каскадна САР температури скломаси в басейні зі стабілізуючим регулятором температури печі (димових газів). Реалізується каскадна САР рівня скломаси зі стабілізуючим регулятором витрати шихти (регулятором рівня шихти в бункері шихти).

Приклад № 6. ЦД в задачах нижнього (контрольного) рівня автоматизації скловарної печі – формування команди на перекидання факелу в регенеративній топці

Класична задача автоматизації – реалізація перекидання факелу в регенеративній скловарній печі. Реалізується СПЛУ перекиданням факелу. Нестандартною є задача формування команди на перекидання факелу (після чого послідовність перекидання факелу реалізується відповідною СПЛУ).

Формування команди на перекидання факелу виконується за такими ознаками:

1) за максимальним інтервалом часу між перекиданнями:

$$\tau \geq \tau^*,$$

де τ^* – заданий – максимальний інтервал часу між перекиданнями;

2) за максимальною температурою верхніх частин регенераторів, які гріються (через які під час поточного інтервалу між перекиданнями проходять димові гази):

$$t_{ep} \geq t_{ep}^*,$$

де t_{ep}^* – задана максимальна температура;

t_{ep} – середня поточна температура верхніх частин регенераторів;

3) за максимальним теплом, яке передається димовими газами до верхніх частин регенераторів, які гріються:

$$\int_0^{\tau} [t_{ep}(\tau) - t_o] d\tau \geq q^*,$$

де q^* – задане максимальне значення інтегралу;

t_{ep} – середня поточна температура регенераторів після закінчення перекидання (див. п. 2);

t_o – середня початкова температура регенераторів після закінчення перекидання;

4) за мінімальною температурою нижніх частин регенераторів, які охолоджуються (через які під час поточного інтервалу між перекиданнями проходить повітря):

$$t_{np} < t_{np}^*,$$

де t_{np}^* – задана мінімальна температура;

t_{np} – середня поточна температура нижніх частин регенераторів;

5) за максимальним теплом, яке відбирається повітрям від нижніх частин регенераторів, які охолоджуються:

$$\int_0^{\tau} [t_o - t_{np}(\tau)] d\tau \geq q^*,$$

де q^* – задане максимальне значення інтегралу;

t_{np} – середня поточна температура регенераторів після закінчення перекидання (див. п. 4);

t_o – середня початкова температура регенераторів після закінчення перекидання.

Вимірювання температури насадок рекупера-торів є складною технічною задачею. Одноточкові вимірювання температур насадок не є репрезентативними. Рішення проблеми – розрахувати температурні епюри регенераторів або кількість підведеного до холодного регенератора чи відведеного від гарячого регенератора тепла.

ЦД – модель теплообміну системи регенераторів скловарної печі. На основі вимірювань температур печі і одноточкових вимірювань температури насадок регенераторів розраховуються температурні епюри регенераторів, кідькість підведеного чи відведеного тепла і формується команда на перекидання факелу.

Нижче на рис. 3 наведений графік перекидання факелу в регенеративній скловарній печі.

Перекидання факелу зліва направо (вихідна позиція – факел зліва; кінцева позиція – факел зправа) реалізується в послідовності: 1) зупин подачі палива зліва; 2) вентилювання печі повітрям зліва; 3) зупин подачі повітря зліва; 4) пере-направлення засувками потоків енергоносіїв зліва направо; 5) подача повітря зправа і вентилювання печі; 6) подача палива зправа.

Аналогічно реалізується перекидання факелу зправа наліво (вихідна позиція – факел зправа; кінцева позиція – факел зліва).

Наведена циклограма є типовою і багаторазово реалізована як для скловарних печей, так і для інших регенеративних печей.

Графік перекидання факелу реалізується типовою СПЛУ перекиданням факелу. Таким чином, ЦД системи регенераторів печі (модель реального часу теплообміну в системі регенераторів печі) фактично є складовою частиною типової СПЛУ, навіть не САР!

Приклад № 7. СШІ в задачах верхнього (супервізорного) рівня автоматизації лінії фор-

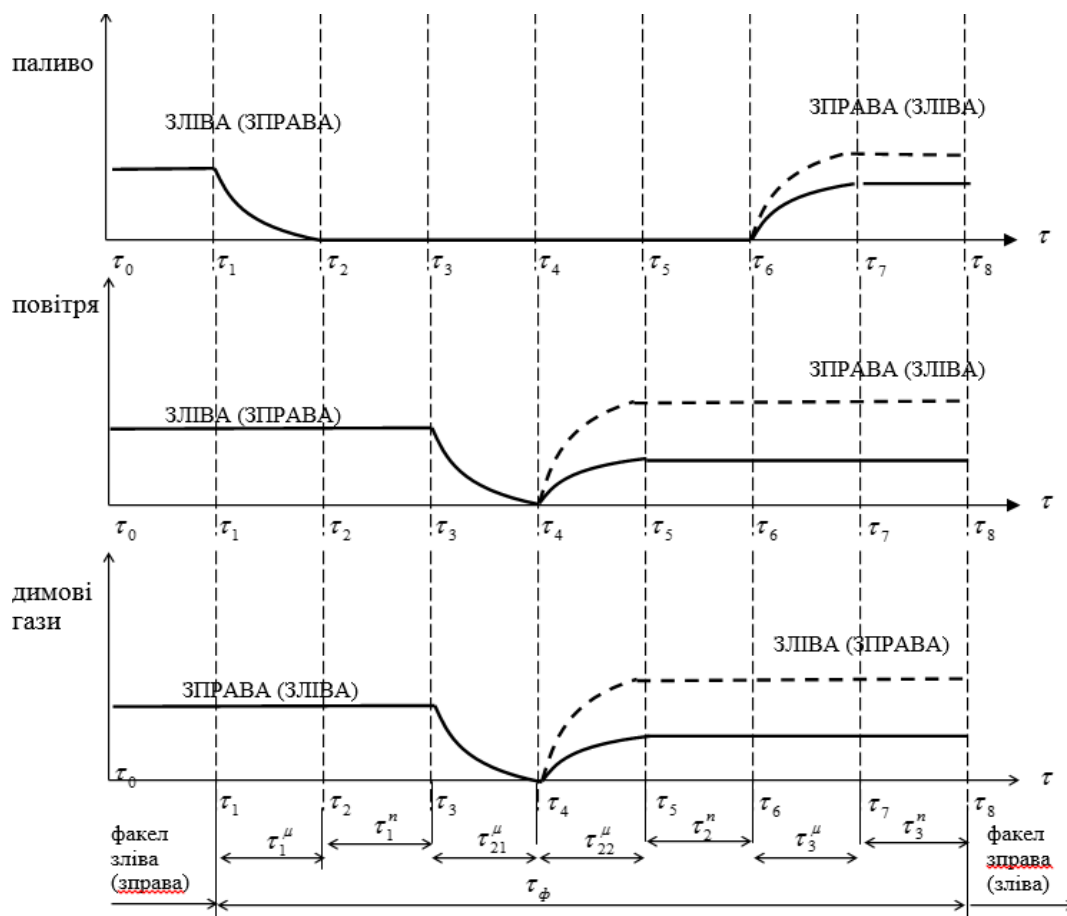


Рис. 3. Циклограма перекидання факелу в топці скловарної печі

мування скляних труб методом горизонтального витягування – градієнтний пошук мінімуму собівартості виробів [8]

Класична задача автоматизації – екстремальне управління продуктивністю технологічного агрегату. Лінія горизонтального витягування скляних труб (лінія ГВТ) – технологічна лінія для виробництва ламп денного світла. Нетривіальним і характерним є той факт, що екстремізація різних техніко-економічних показників роботи (в сучасних термінах – ключових показників ефективності КПЕ – КРІ – Key Production Indicator) лінії ГВТ досягається для різних значень продуктивності лінії ГВТ. Розташування екстремумів КПЕ на осі продуктивності лінії ГВТ (загальної кількості вироблених скляних труб для ламп денного світла) наступне (в напрямку зростання оптимального значення продуктивності): максимум коефіцієнту виходу придатних виробів – мінімум собівартості виробів – максимум прибутку від реалізації придатних виробів – максимум кількості придатних виробів. СЕУ продуктивністю лінії ГВТ здійснює градієнтний пошук глобального екстремуму заданого КПЕ (хибні локальні екстремуми відсутні). Задача екстремального управління продуктивністю лінії ГВТ може бути ускладнена – наприклад, реалізована як градієнтний пошук мінімуму собівартості виробів при обмеженні знизу на кількість виробленої продукції (обмеження вводиться, так як мінімум собівартості вироблених скляних труб досягається при відносно малих значеннях кількості придатних вироблених скляних труб, яких тоді просто не вистачатиме для виробництва кінцевої продукції – ламп денного світла).

Приклад № 8. ЦД в задачах нижнього (контрольного) рівня автоматизації лінії формування скляних труб методом горизонтального витягування – формування уставки регулятора аеродинамічного режиму формування склотрубок [8]

Використання теорії подібності (пі-теорема Бекінгема; степеневе рівняння розмірностей; критерії інваріантності) для аналізу реологічних моделей – класична (хоча непоширена і нетривіальна) задача автоматизації. Лінія ГВТ (горизонтального витягування скляних труб для ламп денного світла) – класичний приклад застосування реологічних моделей (при математичному моделювання процесу витягування) і, відповідно, елементів теорії подібності. Типовим є наступний приклад застосування критеріїв інваріантності (подібності). ЦД – реологічна модель витягування склотрубки. На основі вимірюваних

поточних діаметрів склотрубок обчислюється дисперсія відхилень діаметрів від заданого значення і через реологічну модель на основі критеріїв подібності розраховується уставка регулятора аеродинамічного режиму формування (сума з ваговими коефіцієнтами тиску повітря в «цибуліні» скла на мундштуку робочої камери і витрати повітря на роздування «цибуліни»). В загальному випадку критерії подібності можуть бути використані (так як вони завжди однакові для реального фізичного процесу і його моделі) для обчислення невимірюваних параметрів (які входять в критерії подібності) на основі вимірюваних параметрів (які входять в ті ж самі критерії подібності).

Приклад № 9. СШІ в задачах нижнього (контрольного) рівня автоматизації теплоенергетичних процесів – автотюнінг ПІД-регуляторів

Класична задача автоматизації – адаптація САР під параметричні збурення ОУ. Адаптивна САР – це САР з адаптивним ПІД-регулятором. Якщо регулятор розраховується як малочутливий до параметричних збурень – така САР є САР з жорсткою (наперед сформованою за рахунок відносно «повільного» регулятора) адаптацією (тобто САР з наперед сформованим великим запасом сталості по модулю і фазі). Гнучка адаптація ПІД-регулятора до параметричних збурень – це САР з пасивною адаптацією [9] (обчислення параметрів ОУ шляхом пасивного спостереження за входами і виходами ОУ і періодичне коригування оптимальних параметрів регулятора) чи активною адаптацією (обчислення параметрів ОУ періодично реалізується шляхом активного експерименту, на основі якого коригуються оптимальні параметри регулятора) під параметричні збурення ОУ. Недоліки пасивної адаптації: 1) неможливість врахувати всі параметричні збурення ОУ; 2) нелінійність САР (якщо обчислення параметрів ОУ і коригування оптимальних параметрів регулятора здійснюється в реальному часі). Переваги активної адаптації: 1) активний експеримент сигнальним збуренням «автоматично» враховує всі параметричні збурення ОУ; 2) лінійність САР, що забезпечує відтворюваність результатів розрахунку і моделювання для усіх сигнальних збурень САР і параметричних збурень ОУ. Активний експеримент для лінійної САР – це отримання перехідної характеристики ОУ. Для апроксимації динаміки ОУ можуть бути використані інваріантні моделі об'єктів управління і універсальні структури ПІД-регуляторів [10]. Активна адап-

тація САР з ПД-регуляторами відома як автотюнінг ПД-регуляторів. Реалізована в багатьох ПЛК на рівні бібліотечних функціональних блоків від виробника ПЛК. Можлива реалізація користувачем власного функціонального макроблоку (на основі бібліотечних функціональних блоків від виробника) автотюнінгу. Автотюнінг ПД-регуляторів – класичний і ефективний спосіб активної адаптації САР під параметричні збурення (і практично безальтернативний).

Приклад № 10. СШІ в задачах комплексної автоматизації інженерних систем – екстремальне управління позиціонуванням панелей батарей сонячних електростанцій і лопатей турбін вітряних електростанцій

Сучасна задача автоматизації системи автономного електропостачання житлового будинку – екстремальне управління продуктивністю сонячної електростанції і вітряної електростанції.

СЕУ продуктивністю сонячної електростанції реалізує градієнтний пошук максимуму сонячного споживання позиціонуванням кута повороту панелей сонячних батарей за сонцем.

СЕУ продуктивністю вітряної електростанції реалізує градієнтний пошук максимуму споживання сили вітру позиціонуванням кута атаки лопатей вітряної турбіни вітром. Особливість екстремального управління сонячною батареєю і вітряною турбіною – наявність хибних локальних максимумів сонячної і вітряної активностей.

Пошук глобальних максимумів сонячного і вітряного енергопостачання потребує реалізації в СЕУ спеціальних алгоритмів ігнорування локальних максимумів, що суттєво ускладнює практичну реалізацію вказаних СЕУ. Тим не менше, СЕУ можуть бути реалізовані і реалізуються стандартними (штатними) програмно-технічними засобами – в сучасних ПЛК.

СЕУ продуктивністю сонячних і вітряних електростанцій є актуальними. Можуть функціонувати в безлюдному режимі 24/7 впродовж всього терміну функціонування самих цих електростанцій.

Примітка. Моделювання теплоенергетичних СЕУ і САТ

СЕУ (градієнтний пошук екстремумів регульованих параметрів) і САТ (автотюнінг ПД-регуляторів) можуть бути ефективно змодельовані методами функціонального і структурного імітаційного моделювання [11].

Висновки. 1. Використання ЦД і СШІ в автоматизації теплоенергетичних процесів є традиційними і класичними способами підвищення

якості автоматизованого і автоматичного управління ТОУ. Широко використовувались і використовуються в АСУТП теплоенергетичними агрегатами.

2. ЦД в АСУТП теплоенергетичних агрегатів були відомі як «моделі реального часу», бо вони використовувались для розрахунків в реальному часі невимірюваних параметрів ОУ на основі вимірюваних параметрів ОУ. ВАЖЛИВО! Класичні «моделі реального часу» – історично перші ЦД, а не навпаки.

3. СШІ в АСУТП теплоенергетичних агрегатів були відомі як СЕУ (бо використовувались для градієнтного пошуку глобальних екстремумів регульованих параметрів) і САТ (бо використовувались для автотюнінгу класичних ПД-регуляторів активними експериментами з сигнальним збуренням регулюючою дією). ВАЖЛИВО! Класичні СЕУ і САТ – історично перші СШІ, а не навпаки. Класичні екстремальне управління і автотюнінг – історично перші алгоритми навчання СШІ, а не навпаки.

4. Порівняння генеративного ШІ (ГШІ) і автотюнінгового СШІ-ПД-регулятору

1. ГШІ і СШІ-ПД мають алгоритми роботи. В ГШІ – це LLM-алгоритм генерації тексту. В СШІ-ПД – це ПД-закон регулювання.

2. ГШІ і СШІ-ПД мають вбудовані алгоритми навчання. В ГШІ – це якийсь алгоритм з підкріпленням для навчання LLM-алгоритму (= генерації тексту-відповіді на промпт). В СШІ-ПД – це алгоритм автотюнінгу (= пошуку оптимальних параметрів ПД-регулятору під параметричні збурення від ОУ). ВАЖЛИВО! Тут ми чітко бачимо, що ознакою СШІ є не алгоритм роботи (LLM в ГШІ і ПД в СШІ-ПД), а саме алгоритм навчання (підкріплення в ГШІ і автотюнінг в СШІ-ПД).

3. Аналогом промпту для ГШІ+Людина від людини є сигнальне збурення в САР з СШІ-ПД від ОУ. ГШІ навчено реагує на промпт (тобто, ефективно реалізує LLM-генерацію) і генерує відповідь. СШІ-ПД має навчені параметри ПД-регулятору (тобто, нові, знайдені пошуком автотюнінгу, оптимальні ПД-параметри під нові ОУ-параметри) і реалізує стабілізацію регульованого параметру з заданими показниками якості перехідного процесу.

4. ГШІ поки що система з навчанням. СШІ-ПД з автотюнінгом – це система з самонавчанням. Тобто, зараз автотюнінговий СШІ-ПД – більш потужний СШІ, ніж ГШІ (не з точки зору алгоритмічної складності і обчислювальної

потужності, а принципово, з точки зору самого визначення СШІ). Але ця перевага тимчасова, тому що ГШІ з самонавчанням вже якщо не працюють, то стукають у двері (а в роботах це взагалі буде основний режим роботи).

5. Принципової технічної різниці між ГШІ і СШІ-ПД немає, бо вони обидва мають класифікаційну рису ШІ – навчання. Між ГШІ і СШІ-ПД є принципові технологічна і соціальна різниці. Технологічна різниця – для реалізації ГШІ потрібна принципово більша обчислювальна потужність (СШІ-ПД реалізується стандартними обчислювачами – промисловими ПЛК); тому генеративний інтелект точніше називати обчислювальним інтелектом (Computational Intelligence). Соціальна різниця – соціальні наслідки впровадження ГШІ в соціум є непередбачуваними (використання СШІ-ПД є повністю контрольованим).

5. Порівняння перспектив використання ЦД і СШІ в автоматизації теплоенергетичних процесів

1. Питання пасивного спостереження чи активного експерименту – це водорозділ між просто теорією управління як «про управління взагалі» і ТАУ як практичною дисципліною. Активний експеримент – це засадниче питання для ТАУ. В ТАУ нас цікавить не фізика ОУ (наприклад, як впливають теплоємності на тепломасообмін), а динаміка і саме (це дуже важливо!) динаміка через канал регулювальної дії (тобто, як наша регулювальна дія впливає на регульований параметр). Якщо у нас немає регулювальної дії або динаміка її погана, то все інше нас не цікавить і потрібно або взагалі відмовитись від регулювання, або шукати іншу регулювальну дію (і це буде вже інша динаміка, хоча, можливо, та сама фізика). Саме тому в ТАУ ідентифікація

ОУ розуміється не як математичне моделювання (пасивне спостереження «вхід-вихід» чорної скрині або складання диференціальних рівнянь), а як активний експеримент (зняття кривої розгону через регулювальний канал з перебудовою її в перехідну характеристику). Так само і щодо пасивної і активної адаптації. Активна адаптація краща за пасивну. Тому, наприклад, автотюнінг-овий СШІ-ПД-регулятор кращий за пасивну адаптивну САР (з ЦД ОУ, який пасивно розраховує нові параметри ОУ на основі вимірних технологічних параметрів).

2. ЦД ефективний не як ЦД ОУ (тобто, не з точки зору управління замкненого чи розімкненого), а як ЦД ТОУ (тобто, з точки зору технології і стану самого технологічного агрегату). Тому роль ЦД в реальній автоматизації обмежена. ЦД не має сенсу використовувати в оперативному управлінні. ЦД – це, передусім, нативна для нього технічна діагностика. ЦД ефективні в різного роду ЕСУ в режимах порадики (попереджувальне обслуговування). Є тільки один виняток для ЦД – це розрахунок невимірюваного параметру з проміжної точки або невимірюваного вихідного параметру каскадної САР. Приклади: розрахунок температури поверхні і центра слябу в методичній печі; розрахунок вмісту вуглецю в розплавленому металі в конверторах; розрахунок температури розплавленої скломаси; тощо. Чим краще офлайн спроектований і відналагоджений технологічний процес або агрегат, тим менша потреба в ЦД (бо в ОУ «все схоплено», тобто все виміряно, а всі невимірювані сигнальні збурення «застабілізовані» і не «проходять» на ОУ) і тим більша потреба в СШІ (бо ПД-регулятори мають періодично в реальному часі адаптуватись під параметричні збурення самого ОУ, які неможливо «застабілізувати»).

Список літератури:

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування : підручник. Київ : Либідь, 2007. 656 с.
2. Баранов С.А., Ковальов Д.О. Автоматизовані системи управління: принципи побудови та приклади реалізації. Київ : Наукова думка, 2021. 312 с.
3. Батюк С.Г., Ковриго Ю.М., Бунь В.П. Порівняльний аналіз класичного і некласичного підходів до створення АСУ ТП в енергетиці на основі сучасних ПТК. Наукові вісті НТУУ КПІ. 1999. № 2. С. 40–48.
4. Пастухов А.В., Литвиненко В.С. Системи технічної діагностики в енергетиці. Дніпро : НГУ, 2021. 245 с.
5. Ткаченко П.М., Іванов Ю.В. Енергетичні системи з відновлюваними джерелами енергії. Харків : ХНУРЕ, 2020. 278 с.
6. Ковтун В.І. Системи автоматизації житлових будинків: сучасні рішення та перспективи розвитку. Львів : ЛНУ, 2022. 198 с.
7. Батюк С.Г., Олійник М.Ю. Методика оптимальної фільтрації даних температурного контролю турбогенераторів в умовах значних промислових перешкод. Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. 2009. № 1 (23). С. 147–151.

8. Батюк С.Г. Синтез технічно оптимальної системи управління формуванням скляних труб методом горизонтального витягування: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : спеціальність 05.13.07 «Автоматизація технологічних процесів і виробництв в склоробній промисловості». Київ : Київський інститут автоматики, 1991. 278 с.

9. Novikov, P., Shtifzon, O., Bunke, O., & Batiuk, S. Selecting a method for the parametric adaptation of pi-controller in the control systems of boiler assemblies at thermal power stations with supercritical parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 2, 2 (116). P. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254116>.

10. Батюк С.Г., Васянович В.М., Воронюк М.В., Ворошилов А.І. Інваріантні моделі об'єктів управління і універсальні структури ПІД-регуляторів в імітаційному моделюванні теплоенергетичних систем автоматичного регулювання. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Том 35 (74). № 6. Частина 2. С. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/01>.

11. Batiuk S.G. Simulation modeling and digital twinning of energy cyber-physical systems (cyber-energy systems). *Achievements of Ukraine and EU countries in technological innovations and invention : collective monograph*. Riga : Baltija Publishing, 2022. P. 44–109. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8>. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8-2>.

Batiuk S.G., Voroniuk M.V. APPLICATION OF DIGITAL TWINS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS IN THE AUTOMATION OF THERMAL ENERGY PROCESSES

The article is devoted to the use of digital twins in classical tasks of automation of thermal energy processes.

The working concepts of digital twins and artificial intelligence systems for automation tasks are defined. It is demonstrated that the technologies of digital twins and artificial intelligence systems have been widely used and are used in the automation of technological processes in general and the automation of thermal energy processes in particular.

The classical examples of the use of digital twins and artificial intelligence systems in the automation of thermal energy processes are analyzed: 1) digital twins in tasks of the upper (supervisory) level of automation of methodical furnaces of rolling mills – real-time calculation of temperature diagrams of metal slabs; 2) artificial intelligence systems in tasks of the lower (controller) level of automation of industrial furnaces – gradient search for the optimal value of the excess air coefficient; 3) digital twins in the tasks of the upper (supervisory) level of automation of the power unit of the power plant – technical diagnostics of the thermal and mechanical state of the electric generator; 4) digital twins in the tasks of the lower (controller) level of automation of the power unit of the power plant – filtering of measured temperatures of the electric generator housing; 5) digital twins in the tasks of the upper (supervisory) level of automation of the glass melting furnace – calculation of the temperature and level of the glass mass in the furnace pool; 6) digital twins in the tasks of the lower (controller) level of automation of the glass melting furnace – formation of a command to flip the torch in the regenerative furnace; 7) artificial intelligence systems in the tasks of the upper (supervisory) level of automation of the glass tube forming line by the horizontal drawing method – gradient search for the minimum cost of products; 8) digital twins in the tasks of the lower (controller) level of automation of the glass tube forming line using the horizontal drawing method – forming the set-point of the regulator of the aerodynamic mode of glass tube forming; 9) artificial intelligence systems in the tasks of the lower (controller) level of automation of heat and power processes – auto-tuning of PID controllers; 10) artificial intelligence systems in the tasks of complex automation of engineering systems – extreme positioning control of solar power plants batteries panels and wind power plants turbines blades.

Key words: fourth industrial revolution, cyber-physical system, internet of things, edge device, intelligent control systems, digital twin, artificial intelligence, artificial intelligence agent, artificial intelligence system, complex automation, automation of thermal energy processes, automation of engineering systems, automated control system, automatic regulation system, controller functionality, supervisory functionality, adaptive control systems, expert control systems, extreme control systems, auto-tuning of PID-controllers, learning systems, self-learning systems, real-time modeling.