

щих етапах, допустиме відхилення ранга $g^{S_3}(P_{i_k})$, $P_{i_k} \in \Pi^2$ визначено на «удовлетворительном уровне», тоді результати вибору проектних ініціатив по відповідності стрем стратегічним цілям будуть мати вигляд:

Таблиця 10

Обрані проектні ініціативи по рівню відповідності цілі S_1, S_2, S_3

№	Проектна ініціатива	S_1	S_2	S_3
3.	Ініціатива P_{i_3}	7	6	4
8.	Ініціатива P_{i_8}	5	5	4
4.	Ініціатива P_{i_4}	6	4	5

Описана структура і принцип роботи рекуперативного нагрівального колодязя. Наведені результати його функціонування із класичною САР. Показано переваги управління із застосуванням адаптивної САР

Ключові слова: рекуперативний нагрівальний колодязь, адаптивна САР, температурний режим

Описана структура і принцип дійства рекуперативного нагрівального колодязя. Приведені результати його функціонування з класичною САР. Показані переваги управління з використанням адаптивної САР

Ключевые слова: рекуперативный нагревательный колодец, адаптивная САР, температурный режим

The structure and principle of operation of recuperative heating pit is described. The results of its operations with classical SAR are given. The benefits of control using adaptive SAR is shown

Keywords: recuperative heating pit, adaptive SAR, temperature mode

1. Вступ

Умови безпечної та надійної роботи рекуперативного колодязя вимагають, щоб витрата палива в рекуператорі підтримувалася у визначених межах. Недотримання цих вимог може призвести до перевитрати палива та перегріву злитку металу, що стане причиною виходу з ладу колодязя.

За мету створення САР рекуперативного колодязя поставлено підвищення надійності та якості роботи як рекуператору так і колодязя вцілому, яка повинна підтримувати значення необхідних технологічних параметрів в допустимих межах, тим самим забезпечуючи якісну, ефективну та економічну роботу агрегатів.

4. Выводы

В результаті реалізації процедури багатоцільового вибору із вихідного множини проектних ініціатив отримуються найбільш відповідні стратегічним цілям розвитку енергоінфраструктури підприємства, які паралельно розкладаються в дві групи: «обязательные» - відповідні такому стратегічному напрямку як підвищення надійності енергоінфраструктури во зовнішній середі; «основные» і «вспомогательные» - які мають направленість в удосконаленні внутрішніх параметрів енергоефективності і енергобезпеки енергоінфраструктури.

УДК 621.311:681.5

**АДАПТИВНЕ
УПРАВЛІННЯ
ТЕМПЕРАТУРНИМ
РЕЖИМОМ В
РЕКУПЕРАТИВНОМУ
НАГРІВАЛЬНОМУ
КОЛОДЯЗІ**

А. П. Мовчан

Кандидат технічних наук, доцент*
Контактний тел.: 050-382-76-96

В. О. Левченко*

Контактний тел.: 096-766-14-52, 099-552-69-03
E-mail: LevchenkoVO@ukr.net

*Кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут»
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

При проектуванні були використані сучасні рішення по автоматизації. Вихідні дані для дослідження отримані з літературних джерел.

2. Структура та принцип роботи нагрівального колодязя [1]

Злитки металу перед плавкою їх на блюмінгу або слябінгу нагрівають в нагрівальних колодязях. На металургійних заводах поширені колодязі різних конструкцій, що працюють з регенеративним принципом підігріву газу і повітря або з рекуперативним принципом підігріву повітря. У даному проекті розглядається

рекуперативний нагрівальний колодязь з подачею тепла одним нижнім пальником.

Час нагріву злитків ділиться на два етапи. На першому етапі відбувається підвищення температури поверхні злитка до температури, близької до заданої. У цей період в колодязь подається максимальна кількість тепла. На другому (витримки) відбувається прогрівання і вирівнювання температури внутрішніх шарів злитка при приблизно постійній температурі поверхні. У цей період у міру прогрівання злитків витрата палива поступово знижується.

Загальне завдання управління процесом нагріву полягає у виборі і забезпеченні теплового режиму роботи колодязя, необхідного для отримання металу із заданою температурою поверхні і допустимим перепадом температур по перетину злитка при максимальній продуктивності і мінімальних питомій витраті палива і чаді металу.

Великі труднощі в автоматизації колодязів викликає відсутність засобів вимірювання температури поверхні злитка і розподілу її по перетину. Застосування пірометрів не дає добрих результатів із-за впливу газів, що оточують злиток, і шару окалини на поверхні злитка. Додаткові ускладнення викликають різні умови нагріву окремих злитків, пов'язані з їх розташуванням в робочому просторі.

Рекуперативні колодязі опалюють змішаним газом (коксоодонним) з теплою згорання 7,5-10,0 Мдж/м³ (калорійністю 1800-2000 ккал/м³). Змішаний газ для колодязів поступає із спеціальних станцій газозмішувачів.

Технологічно передбачена підтримка температури в робочому просторі 1400°C. Рух продуктів згорання по газоповітряному тракту здійснюється за допомогою димососів. Газоповітряний тракт нагрівального колодязя має зв'язок з атмосферою.

Технологічно передбачена підтримка тиску в робочому просторі колодязя 10-30 Па.

Регулювання горіння з корекцією здійснюється по аналізу продуктів згорання, що відбираються в просторі над рекуператорами.

Основні характеристики колодязя:

- Тепло згорання палива – 7,5-10 Мдж/м³.
- температура повітря в рекуператорі – 300°C.
- температура в робочому просторі – 1400°C.
- тиск в робочому просторі – 10-30 Па.
- температура димових газів до рекуператора – 700-900°C.
- температура димових газів після рекуператора – 400-800°C.

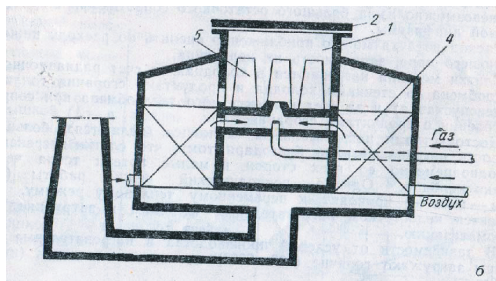


Рис. 1. Принципова схема рекуперативного нагрівального колодязя: 1-робочий простір комірки, 2-кришка комірки, 4-рекуператори, 5-метал

На рис. 1 показана схема осередку рекуперативного колодязя з пальником в центрі. Повітря для горіння, вентилятором, що нагнітається, заздалегідь підігрівається в керамічному рекуператорі; газ поступає до пальника холодним. Газоподібні продукти згорання видаляють з робочого простору осередки через полум'яні вікна, розташовані внизу стінок камери, звідки вони проходять в рекуператор і потім викидаються в атмосферу за рахунок тяги димової труби або димососа.

Перевагами нагрівальних колодязів є: велика швидкість нагріву металу завдяки тому, що злитки нагріваються одночасно зі всіх сторін, і малі втрати тепла через стінки колодязя. Проте періодичний режим роботи приводить до змінного теплового режиму, що є недоліком нагрівальних колодязів і утрудняє їх автоматизацію. Залежно від умов виробництва в нагрівальні колодязі завантажують гарячі (600-900°) або холодні злитки (нижче 500°).

3. Аналіз нагрівального колодязя як об'єкта управління

Теплову обробку злитків металу в рекуперативних колодязях проводять за заданим технологічним режимом (крива випалювання, рис. 2), порушення якого призводить до браку виробів.

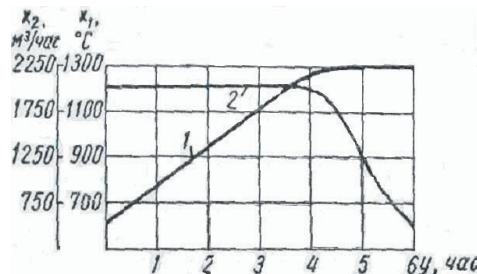


Рис. 2. Температура в камері 1 та витрата палива 2 відповідно

Для попередження відхилень від встановлених режимів рекуперативних колодязів необхідний постійний контроль параметрів за допомогою технічних засобів автоматизації.

Одна із основних умов нормального нагрівання металевих злитків – підтримка встановлених температур в колодязі. На підставі практичної роботи рекуперативних колодязів встановлені технологічні режими, до яких існують чіткі вимоги. Так наприклад, в робочій зоні температура теплоносія повинна підтримуватися з точністю ±10°C. Отже, температура найбільш важливий параметр колодязя, що контролюється. Для рекуперативних колодязів в найбільш відповідальних точках робочого простору підтримуються постійні температури. Температура в колодязі змінюється з ряду причин, наприклад, в результаті зміни режиму навантаження колодязя, зміни витрати палива та умов його горіння, аеродинамічного режиму колодязя і т.д. Всі збурення призводять до порушення режиму нагрівання і, як наслідок, виходу продукції низької якості або браку. Підтримка температури по довжині колодязя нерозривно пов'язана з регулюванням інших параметрів колодязя. Для безперервно діючих рекуператив-

них колодязів завантаження здійснюється кліщовим краном через верх в робочій простір колодязя, подача злитків є автоматизована. Впровадження цього крану дозволяє автоматизувати завантаження злитків в робочій простір та вивільнити від тяжкої ручної праці робітників, що покращує умови праці.

4. Дослідження динамічних та статичних характеристик об'єкта управління

В процесі нагріву злитків динамічна характеристика об'єкта змінюється в залежності від режиму нагріву. Температура в колодязі змінюється в результаті зміни режиму навантаження колодязя, зміни витрати палива та умов його горіння, аеродинамічного режиму колодязя.

Передавальні функції об'єкта при першому, другому та n-му нагріві відповідно мають такий вигляд:

$$1) W_{об1}(p) = \frac{2.4 \cdot e^{-60p}}{230 \cdot p + 1},$$

$$2) W_{об2}(p) = \frac{1.4 \cdot e^{-60p}}{230 \cdot p + 1},$$

$$3) W_{обn}(p) = \frac{1 \cdot e^{-60p}}{230 \cdot p + 1}$$

З моделі об'єкта побудованої в середовищі Simulink (MATLAB) отримано перехідні характеристики відповідно до передавальних функцій.

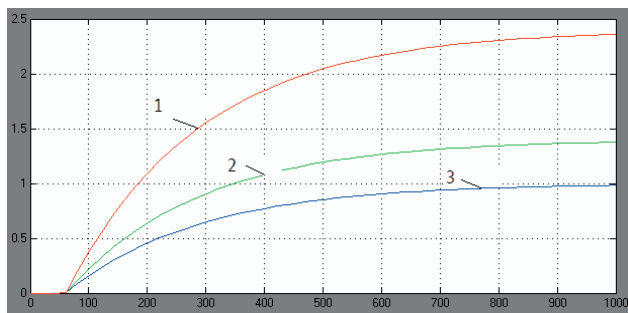


Рис. 3. Перехідні характеристики об'єкта управління

Отримано перехідний процес в замкненій САР для розрахованих інженерними методами параметрів налаштування ПІ регулятора [2] з використанням пакету Matlab та розраховано показники якості перехідного процесу.

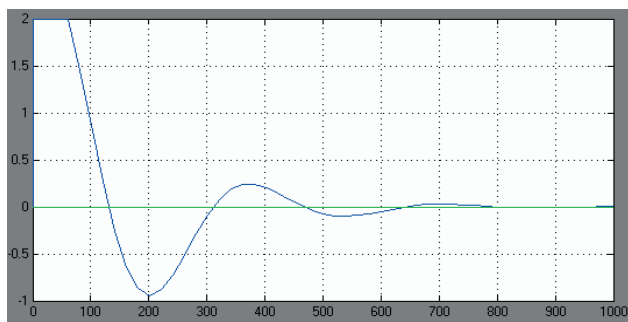


Рис. 4. Перехідний процес в замкнутому контурі

Таблиця 1

Показники якості	$K_p=1,21, T_u=161$
Макс. дин. викід	0,48
Час регулювання	450

5. Перевірка САР на грубість

Під грубістю одноконтурної САР розуміють малу чутливість критерію функціонування до варіацій параметрів розімкненої САР.

Для дослідження системи були зняті 2 перехідні характеристики: при змінному $K_{об}$ та при оптимальних параметрах налаштування регулятора. Варіації параметру проводились в діапазоні 1-2.4°C/%х.РО. Дослідження було проведено по каналу збурення – вихід. Отримані передні процеси приведені нижче на рисунку:

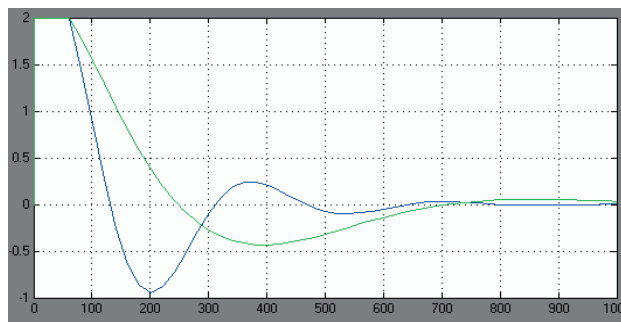


Рис. 5. Перехідні процеси у замкненій АСР при оптимальних параметрах настроювання регулятора, але при різних значеннях $K_{об}$

При дослідженні системи на грубість було встановлено, що система є грубою відносно $u_{дин}$ та $T_{рег}$ до зміни параметра $K_{об}$, і малі зміни якого викличуть зміни критерію якості функціонування САР більше ніж в 2 рази. Таким чином, застосування звичайних САР не дає достатньої якості регулювання так, як даний об'єкт має властивості змінювати свої параметри в відповідності до різних факторів. Тому такий об'єкт потребує застосування адаптивних систем регулювання для забезпечення високої якості регулювання та ефективності нагріву злитків.

6. Теоретичні основи методу адаптації

Промислові об'єкти управління описуються моделями, які відрізняються від ідеальних нестационарністю характеристик. Тому для здійснення якісного управління такими об'єктами необхідно ідентифікувати в процесі їх нормального функціонування, а потім використовувати їх для підстроювання регуляторів.

Об'єкти управління можуть бути описані моделями:

$$W_o(s) = \frac{k_o}{(T_o \cdot s + 1)^m} \tag{1}$$

або

$$W_o(s) = \frac{k_o \cdot \exp(-\tau \cdot s)}{T_o \cdot s + 1} \tag{2}$$

Причому, якщо для моделі (2) виконується співвідношення $\frac{\tau}{T_o} \leq 1$, то з нею може бути порівняна модель (1).

При побудові адаптивних систем управління необхідна ідентифікація параметрів моделей (1) або (2), причому ідентифікація, наприклад, параметрів m, T_o, k_o моделі (1) дозволяє при необхідності перейти до моделі (2).

Нижче розглядається метод ідентифікації, заснований на аналізі поведінки похідної перехідної характеристики об'єкта в точці перегину перехідної характеристики. Точка перегину має місце при $m \geq 2$ або $\frac{\tau}{T_o} \geq 0.1$.

Характеристичне рівняння для моделі (1) може бути записано в вигляді:

$$\sum_{i=1}^m a_i \cdot \lambda^i + 1 = 0 \tag{3}$$

Для випадку зміни в часі динамічних параметрів об'єкта, наприклад, постійної часу T_o , можна ввести параметр a_i , який враховує ці зміни. Тоді (3) запишемо в вигляді:

$$\sum_{i=1}^m a_i(t) \cdot \lambda^i(t) + 1 = (a \cdot T_o \cdot \lambda + 1)^m = 0, \tag{4}$$

$$0 < a_{\min} < a < a_{\max}.$$

Для регульованої координати $x(t)$ введем позначення $x_{k_o, a}(t)$, яке в загальному вигляді показує її залежність від k_o і динамічного a_i параметрів об'єкта.

Тоді диференціальне рівняння, відповідне до (1), для випадку подачі на вхід об'єкта одиничного ступінчатого збурення можна записати наступним чином:

$$\sum_{i=1}^m a_i(t) \cdot x_{k_o, a}^{(i)}(t) + x_{k_o, a}(t) = k_o(t) \cdot 1(t). \tag{5}$$

Позначимо через $t_1 = f(a)$ момент часу, в який перша похідна рівняння (5) приймає максимальне значення $x_{k_o, a}(t)|_{t_1} = \max x_{k_o, a}(t)$, а друга похідна $x_{k_o, a}(t)|_{t_1} = x_{k_o, a}(t_1) = 0$, що ілюструється рис. 6.

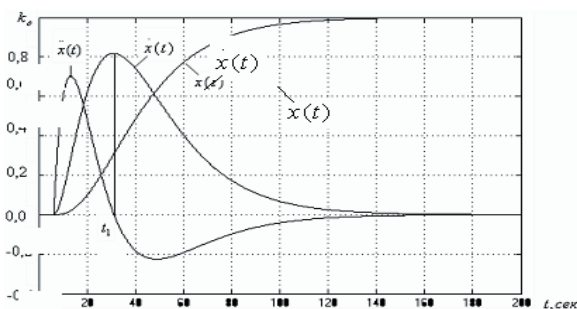


Рис. 6. Перехідна характеристика, похідна і друга похідна від неї

На рис. 1 $\dot{x}(t), \ddot{x}(t)$ показані у збільшеному масштабі: $x(t) \cdot 1000, \dot{x}(t) \cdot 10000$.

Рішення рівняння (5) при умові (4) являється функцією статичного k_o і динамічного a_i параметрів об'єкта управління $x_{k_o, a} = f(k_o, a, t)$, причому момент часу t_1 , в який $x_{k_o, a}(t_1) = 0$, залежить тільки від a_i (динамічних властивостей об'єкта):

$$t_1 = f(a) = a \cdot t_2, \quad t_2 = \text{const}, \tag{6}$$

а добуток $\dot{x}_{k_o, a}(t_1) \cdot t_1$ залежить тільки від k_o (статичних властивостей об'єкта).

При нульових початкових умовах рівняння (5) і при від'ємних корнях характеристичного рівняння (3) характер рішення $x_{k_o, a}(t)$, як це видно із рис. 1, такий, що перша похідна має одно екстремальне значення при $t > 0$ в точці $t = t_1$, причому в цій точці друга похідна $x_{k_o, a}(t_1)$ рівна нулю незалежно від значення k_o .

Алгоритм ПІД-регулятора вибраний в наступній формі:

$$u = k_p(e(t) + k_u \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}). \tag{7}$$

При $k_d = 0$, маємо ПІ-регулятор. При використанні ПІД закону регулювання, k_d і k_u зв'язані між собою алгебраїчною залежністю.

Відомо, що при невеликому діапазоні зміни параметрів об'єкта в 1.5–2 рази однопараметрична настройка регулятора в достатній мірі забезпечує якість управління при збереженні співвідношення між складниками закону управління.

Виходячи із вище указаних властивостей рішення рівнянь об'єкта, запропонований наступний алгоритм адаптації [3]:

$$K_p^{n+1} = \alpha \cdot K_p^n \cdot \frac{|\epsilon(t_1)|}{t_1 \cdot \max |\epsilon(t_1)|} \tag{8}$$

де K_p^n - значення загального коефіцієнта підсилення регулятора перед адаптацією. K_p^{n+1} - нове значення загального коефіцієнта підсилення регулятора. $\epsilon(t)$ - сигнал розузгодження. t_1 - момент досягнення максимуму модуля першої похідної від модуля сигнала розузгодження. n - номер кроку адаптації. Коефіцієнт вибирається із ряду $\alpha = 1...1.8$. Рекомендоване значення $\alpha = 1.44$.

Цей алгоритм базується на використанні вище приведених залежностей при збуренні по вихідній величині об'єкта і проведенні аналізу початкової стадії перехідного процесу в замкнутій системі регулювання. В цьому випадку величина $t_1 \cdot e(t_1)$ залежить від $k_p = k_p(k_o)$. Експериментально доказано справедливості цієї залежності.

На рис. 7 показана структурна схема САР з адаптивним регулятором.

В аналізаторі реалізується наступний алгоритм:

$$|\epsilon(t_1)| = \max \epsilon(t),$$

$$t_1 = t, \quad \text{при } \epsilon(t) = \max \epsilon(t),$$

$$\epsilon(t_1) = \epsilon(t), \quad \text{при } t = t_1.$$

$k_p^{(0)}, T_u^{(0)}, T_d^{(0)} = k_d \cdot T_u^{(0)}$ - визначаємо по апріорним даним про об'єкті на основі інженерних формул розрахунку налаштувань.

Фільтр $W_\phi(s)$ вводиться для того, щоб гарантовано забезпечити $m \geq 2$, а також зменшити вплив шумів.

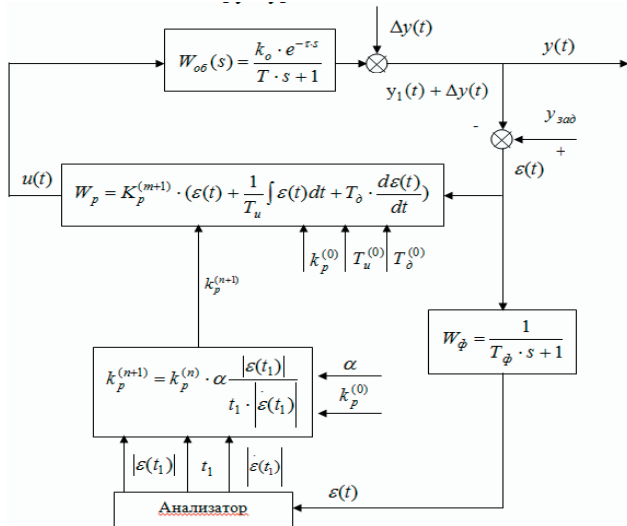


Рис. 7. Структурна схема АСП

7. Дослідження об'єкта управління із застосуванням адаптивної САР

При параметрах об'єкта $W_{oo}(p) = \frac{2.4 \cdot e^{-60p}}{230 \cdot p + 1}$ і розрахованих параметрах налаштування регулятора $K_p=1,21, T_u=161$, отримали перехідний процес зображений на рис. 4.

Виконано дослідження САР з адаптивним регулятором критерієм якої $|K_p^{(m+1)} - K_p^{(m)}| < \epsilon$, де $\epsilon=0.005$.

Для виконання умови $|K_p^{(m+1)} - K_p^{(m)}| < \epsilon$, де $\epsilon=0.005$ знадобилось 5 ітерацій.

Проведено дослідження САР з адаптивним регулятором для змінених параметрів об'єкта.

При

$$1) W_{oo}(p) = \frac{1.4 \cdot e^{-60p}}{230 \cdot p + 1}$$

При

$$3) W_{oo}(p) = \frac{1 \cdot e^{-60p}}{230 \cdot p + 1}$$

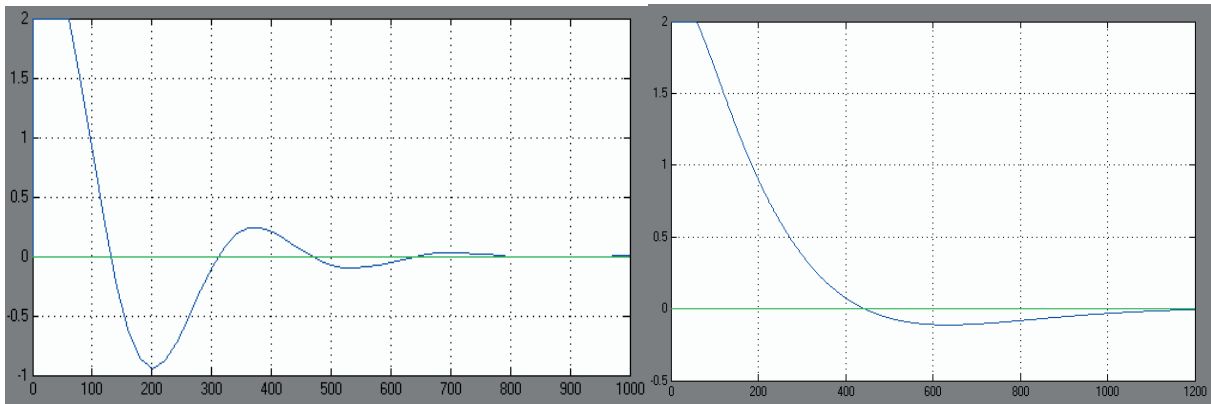


Рис. 8. Перехідні процеси до та після адаптації 5-ітерацій

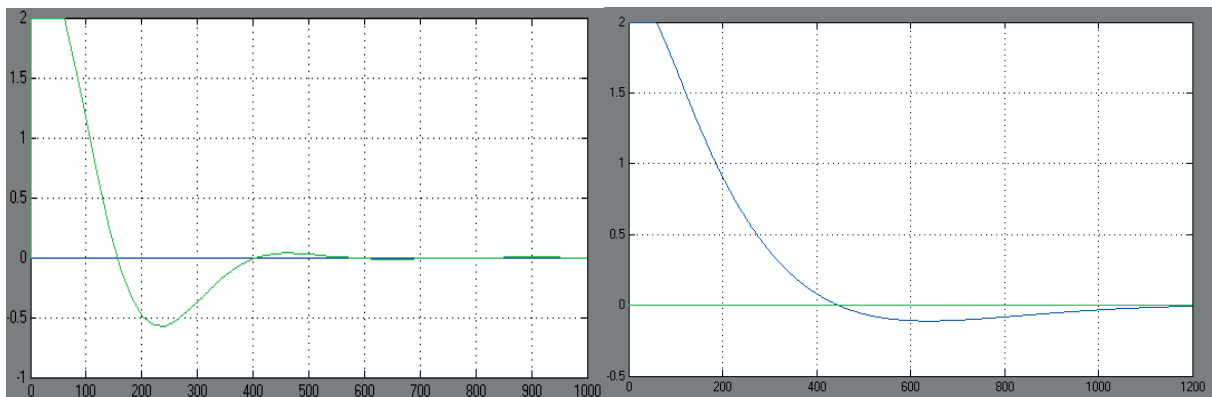


Рис. 9. Перехідні процеси до та після адаптації відповідно -5 ітерацій

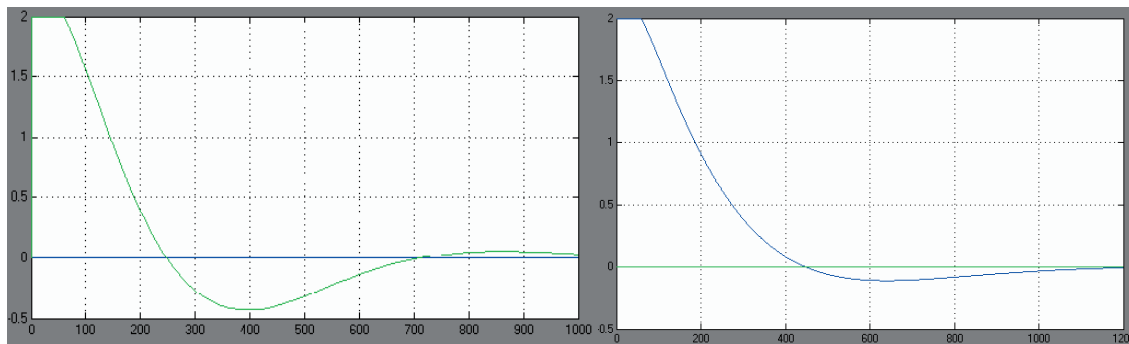


Рис. 10. Перехідні процеси до та після адаптації відповідно -5 ітерацій

Висновки

Показано, що застосування класичних САР температурним режимом рекуперативного нагрівального колодязя не дає бажаних результатів, і потребує застосування адаптивних регуляторів.

Під час проведення дослідження був знайдений загальний коефіцієнт передачі адаптивного ПІ регулятора. Так як початкові налаштування знаходилися за допомогою інженерних методів, то кількість ітерацій була не менше чотирьох.

Із отриманих графіків перехідних процесів видно, що після адаптації динамічне відхилення зменшується в 4 рази.

Також показано, що при цьому алгоритмі параметри об'єкта можуть змінюватись біль ніж в два рази і при цьому досягаються необхідні показники якості регулювання без значного збільшення кількості ітерацій.

Наведена адаптивна САР рекомендується для управління об'єктами зі змінними режимами, де висуюються високі вимоги до пере регулювання.

Література

1. Кривандін В.А. Металургійні печі/ В.А. Кривандін, Б.Л. Марков// Металургія - 1977.
2. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування/ Ковальчук О. В.// Либідь, 1997. - 544с.
3. Полищук И.А. Самонастрающийся регулятор для теплоэнергетических процессов /Полищук И.А., Мовчан А.П.// Промышленная теплотехника, 2007, т.29, №1.