

УДК 681.324

*А.П. Ладанюк, д-р техн. наук,
проф.
Д.О. Кроніковський, асп.
Національний університет
харчових технологій*

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕПЛОБМІННИКІВ

В статті розглянуто практичні проблеми автоматизації теплообмінників. Наведено найпоширеніші мотиваційні причини необхідності використання сучасних методик діагностики функціонування теплообмінників. Чітко виокремлено поломки при функціонуванні теплообмінників. Розглянуто варіанти виявлення та попередження відхилення функціонування від заданого (оптимального) режиму. Запропоновано використання комбінації методів параметричної ідентифікації та контрольних карт Шухарта, причому обґрунтовано та наведено схему побудови та функціонування даного алгоритму. Серед можливих варіантів комбінацій точок контрольних карт Шухарта ідентифіковано ситуаційну відповідність роботи теплообмінника та можливість настання поломки. Наведено методику виявлення за допомогою параметричної ідентифікації товщини відкладень на поверхні трубок δ , середню швидкість їх росту ω , час t_s досягнення небезпечної величини відкладень та ступінь засмічення трубок B .

Ключові слова: автоматизація, тренди, теплообмінник, параметрична ідентифікація, карти Шухарта.

У сучасних технологічних об'єктах значну роль відіграють теплообмінні процеси. Теплообмін між двома теплоносіями, розділеними твердою стінкою, містить у собі всі відомі способи передачі тепла. Знання механізму протікання процесів теплообміну і вміння, зокрема, надійно розраховувати теплообмін і гідравлічні втрати необхідно як для проектування енергетичних пристроїв, так і для розробки надійної системи автоматичного керування [1]. Тому дослідження процесу теплообміну й гідродинаміки у теплообмінниках, розробка методики їх розрахунку, діагностики та автоматизації представляють актуальне для інженерної практики завдання. Широке застосування теплообмінників різних конструкцій та призначень ставить додаткові умови щодо якості систем автоматизації, зокрема з огляду на необхідність економії енергоресурсів.

Теплообмінники, як і всі технологічні апарати, працюють за певним регламентом і забезпечують задану якість вихідного продукту. Проте одноразове налаштування системи автоматизації та об'єкта не забезпечує постійну необхідну якість процесу управління. Саме тому доцільно впроваджувати додаткові підсистеми підтримки прийняття рішень, які б, наприклад, слідували за динамікою процесу і за певними алгоритмами діагностували стан та необхідність людського втручання. Цій тематичі присвячені праці Прядко М.О., Маслікова М.О., Петренко В.П., Павелко В.І., Філоненко В.М., Химмельблау Д., Шарифуліна В.Н. та інших провідних науковців.

Метою статті є розкриття ряду проблем, що виникають при створенні систем автоматизації теплообмінників, які варто враховувати при проектуванні надійної системи, що забезпечить задані якісні показники та виявить чи передбачить поломки.

Стійкість та якість в будь-якій системі автоматичного регулювання в першу чергу визначається співвідношенням характеристик об'єкта регулювання та регулятора. Тому іноді якість системи автоматизації можна поліпшити за допомогою порівняно невеликих удосконалень у частині системи керування, використовуючи

спостерігачі, предиктори, адаптивні та екстремальні алгоритми. Проте часом в теплообмінниках виникають проблеми на фізичному рівні, розвиток яких доцільно відслідковувати, а краще передбачати. Нами розглянуто два сучасні методи виявлення та передбачення можливих поломок теплообмінника. Це методи контрольних карт Шухарта та параметричної ідентифікації. Контрольна карта Шухарта — це графічний спосіб застосування статистичних методів для управління виробничими процесами. Метою контрольних карт є пошук нехарактерних змін в трендах процесів функціонування технологічних об'єктів. Зазначимо, що параметрична ідентифікація є складним обчислювальним алгоритмом, який потребує значних операційних ресурсів, на відміну від методу карт Шухарта. Тому пропонується використання карт Шухарта для поточного аналізу та ідентифікації неполадки, а для глибокого аналізу та встановлення якісних та кількісних показників застосовувати метод параметричної ідентифікації.

У випадку виходу процесу за допустимі межі та ідентифікації позиції контрольних точок відбувається активація процедур параметричної ідентифікації того параметру, негативний вплив якого виявить карта Шухарта. Потім, в залежності від специфіки функціонування об'єкта та природи відхилення, відбувається продуційний процес виведення можливого рішення щодо управління (рис. 1.). Ціль цієї методики — дати орієнтир для правильних дій. Дана методика дає можливість як відслідковувати трендові повільноплинні позитивні чи негативні зміни, так і миттєві зміни, що можуть бути викликані поломками чи значними відхиленнями від технологічного

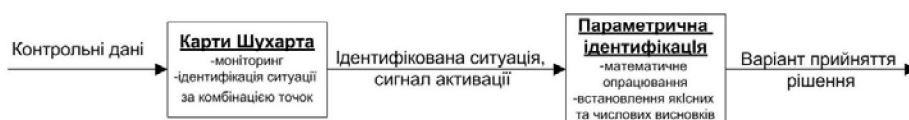


Рис. 1. Комбінація методів Шухарта та параметричної ідентифікації для діагностики поломок теплообмінників

регламенту.

Шухарт розглядав контрольну карту як «голос процесу». Контрольна карта може використовуватися для розуміння поведінки процесу. Діагностування дозволяє відповісти на ключове запитання — хто повинен діяти (якщо треба) і в якому напрямку. Отже, в даній підсистемі використання карти Шухарта відбувається з метою отримання інформації, необхідної для прийняття рішень на основі фактів. Найважливіші дані — це комбінація точок, в яких містяться відомості про значення вимірюваних величин і також інформація про їх часову послідовність. Розглядаючи контрольні карти Шухарта необхідно відслідковувати наступні комбінації точок, що у відповідності до даного об'єкта свідчать про наявні поломки (рис. 2.).

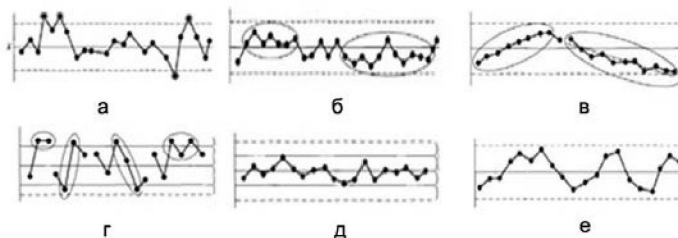


Рис. 2. Комбінації точок трендів карт Шухарта

а — вихід точок за контрольні межі, б — серія, в — тренд (дрейф), г — наближення до контрольних меж, д — наближення до центральної лінії, е — періодичність.

АВТОМАТИЗАЦІЯ

Розглянемо значення даних ситуації для аналізу функціонування теплообмінника.

Можливі комбінації точок для ідентифікації поломки за картами Шухарта

№ п/п	Комбінація точок	Опис комбінації на контрольних картах	Висновок щодо функціонування теплообмінника
1	Вихід точок за контрольні межі (рис. 2. а)	Перетин 3-ох сігмових ліній	Вказує на граничне погіршення процесу функціонування. Без історичної статистики не містить причинно-наслідкового зв'язку
2	Серія (рис. 2. б)	Точки незмінно виявляються по одну сторону від середньої лінії	Вказує на наявність віддалення від оптимального функціонування. При стабільності математичного сподівання вказує на необхідність внесення змін у систему автоматизації
3	Тренд (дрейф) (рис. 2. в)	Точки являють безупинний ріст чи спад	В залежності від швидкоплинності тренду можна розпізнати засмічення чи утворення відкладень на трубках
4	Наближення до контрольних меж (рис. 2. г)	Точки наближаються до 3-сігмових контрольних меж	Є показником різкого погіршення якості. За статистичними даними можна сказати про наявність критичного засмічення чи протікання трубок
5	Наближення до центральної лінії (рис. 2. д)	Більшість точок концентрується в просторі, обмеженому 1,5-сігмовими лініями	При нормальному законі розподілення вказують на допустимий стан функціонування системи
6	Періодичність (рис. 2. е)	Крива має періодичну структуру із приблизно однаковими інтервалами часу	Вказує на необхідність перевірки наявності змін якості вхідних продуктів чи можливості наявності людського фактору

В залежності від специфіки комбінації точок за допомогою параметричної ідентифікації можна зробити уточнення причин та характеру їх розвитку, встановити можливість та необхідність втручання.

Для даної моделі теплообмінника доцільно відслідковувати такі несправності [3]: збільшення товщини відкладень на поверхні трубок; наявність протікання трубок; засмічення трубок.

Після спрацювання алгоритму карт Шухарта на певну поломку відбувається активація алгоритму параметричної ідентифікації. За даною методикою можна провести більш ґрунтовне дослідження. Так, для діагностування товщини відкладень на поверхні трубок d , за умови збереження поверхні теплопередачі на проектному рівні, здійснюється через поточне значення коефіцієнта теплопередачі K_T [2].

$$\frac{1}{K_T} = \frac{1}{K_T^0} + \frac{\delta}{\lambda}, \quad (1)$$

де K_T , K_T^0 — коефіцієнти теплопередачі в початковий і поточний момент часу; λ — коефіцієнт теплопровідності відкладень.

Поточне значення коефіцієнта теплопередачі визначається з умови мінімізації відхилень експериментальних і розрахункових температур. Як критерій розузгодження S найбільше поширення одержали: сума квадратів відхилень (метод найменших квадратів) і максимальний модуль (метод мінімакса) відхилень розрахунку T_i^p від експерименту T_i^E .

АВТОМАТИЗАЦІЯ

$$S = S(K_T) = \sum_{i=1}^n (T_i^P - T_i^E)^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

$$S = S(K_T) = \max |T_i^P - T_i^E| \rightarrow \min \quad (3)$$

Число експериментальних точок n повинне бути значно більше числа параметрів, які визначаються. Такий підхід мінімізує вплив випадкових помилок вимірювання на точність діагностики. Розрахункові температури в умовах (2), (3) визначаються зі статичних або динамічних математичних моделей теплообмінника, що складаються з рівнянь теплового балансу з врахуванням кінетики теплопередачі й структури потоків. При цьому можна використати моделі будь-якої складності. Найбільш простою з моделей теплообмінників є модель ідеального змішування трубчастого теплообмінника, при якій визначається усереднення всіх його параметрів. Динамічна модель цього теплообмінника буде мати такий вигляд:

$$V c_p \rho \frac{dT}{dt} = \vartheta c_p \rho (T^0 - T) - K_T F (T - T_X), \quad (4)$$

$$V_X c_{pX} \rho_X \frac{dT_X}{dt} = \vartheta_X c_{pX} \rho_X (T_X^0 - T_X) + K_T F (T - T_X) \quad (5)$$

де c_p , c_{pX} , ρ , ρ_X — теплоємність і густина гарячого й холодного потоків; T^0 , T , T_X^0 , T_X — температури гарячого й холодного потоків на вході й виході теплообмінника; F — поверхня теплопередачі; K_T — коефіцієнт теплопередачі; V , V_X — об'єми гарячої й холодної зон апарата; J , J_X — величини потоків теплоносіїв.

У підсумку за допомогою математичної моделі вихідне завдання діагностики перетворюється в математичне завдання оптимізації, що успішно вирішується сучасними засобами. Для визначення значення поточного коефіцієнта теплопередачі за допомогою завдання (2—5) необхідно виміряти величини потоків J , J_X , початкові їхні температури T^0 , T_X^0 та одну з їх вихідних температур T .

За допомогою моделі (4), (5) розраховується тільки середня товщина відкладень. У дійсності ж відкладення в трубчастих теплообмінниках можуть бути розподіленими по довжині $d = d(L)$, це стосується найчастіше парових підігрівників і конденсаторів. Для ідентифікації такої функції необхідні експериментальні й розрахункові температури, розподілені за довжиною й часом $T = T(L, t)$. Одержати такі експериментальні дані для трубчастих апаратів дуже важко, оскільки в багатьох конструкціях кожухотрубчастих теплообмінників не передбачені розподілені точки виміру температури в міжтрубному просторі. Проте у деяких секційних теплообмінниках типу «труба в трубі» є такі точки виміру температур у кожній секції й з'являється можливість визначення розподілу відкладень по секціях. У результаті перетворень завдання діагностики зводиться до багатомірної оптимізації, методи й алгоритми рішення якої відомі. Рішення поставленого завдання дозволяє визначити не тільки поточну товщину відкладень d , але також середню швидкість їх росту w , ділянку труби й час t_s досягнення небезпечної величини відкладень d^* .

$$\frac{\Delta \delta}{\Delta t} = w, t_s = \frac{\delta^* - \delta}{w} \quad (10)$$

Другою важливою й розповсюдженою неполадкою кожухотрубних апаратів є розриви трубок. Для діагностики цієї неполадки методом параметричної ідентифікації побудуємо динамічну математичну модель теплообмінника з протіканням гарячого

АВТОМАТИЗАЦІЯ

потоків із трубок у міжтрубний простір. Якщо знехтувати накопиченою теплою стінок апарата й скласти рівняння теплового балансу по обох потоках для нестационарного режиму роботи апарата з врахуванням протікання з гарячої зони в холодну, то динамічна модель теплообмінника типу змішування-змішування буде мати такий вигляд.

$$Vc_p\rho \frac{dT}{dt} = \mathfrak{G}c_p\rho(T^0 - T) - K_T F(T - T_X) \quad (11)$$

$$V_X c_{pX} \rho_X \frac{dT_X}{dt} = \mathfrak{G}_X c_{pX} \rho_X (T_X^0 - T_X) + K_T F(T - T_X) + \mathfrak{G}_p c_{pX} \rho_X (T - T_X) \quad (12)$$

де J_p — протікання з гарячої в холодну зону апарата. Математичну модель теплообмінника із протіканням (11), (12), що представляє собою систему звичайних диференціальних рівнянь, можна використати для ідентифікації декількох невідомих параметрів, наприклад, величини протікання й поточного значення коефіцієнта теплопередачі. При використанні методу найменших квадратів, функція неузгодженості буде мати такий вигляд:

$$S = \sum_{i=1}^n (T_{Xi}^P - T_{Xi}^E) = S(\mathfrak{G}_p, K_T) \rightarrow \min \quad (13)$$

де T_X^P , T_X^E — розрахункові й експериментальні температури холодного потоку на виході апарата.

Третю неполадку — засмічення трубок можна встановити по двох показниках: різкому збільшенню втрат напору в теплообміннику або зниженню швидкості теплопередачі. Другий показник можна використати для визначення ступеня засмічення трубок методом параметричної ідентифікації на підставі того, що наслідком засмічення трубок є зменшення активної поверхні теплопередачі. Методом параметричної ідентифікації, аналогічно першому випадку, визначається поточне значення комплексу $K_T F$, що прирівнюється з початковим його значенням $\frac{K_T F}{(K_T F)_0} = B$.

При відсутності відкладень на поверхні й незмінності коефіцієнта теплопередачі одержимо значення активної поверхні теплопередачі $F = BF_0$, при цьому величина B характеризує ступінь засмічення трубок.

Висновки. У роботі на основі методу параметричної ідентифікації та карт Шухарта розроблена методика комплексної діагностики неполадок теплообмінників. Запропоновано розподіл неполадок в залежності від комбінації контрольних точок на карті Шухарта. Наведено рекомендації щодо комбінації даних методів для поточного моніторингу, прогнозування неполадок та їх ґрунтового аналізу з оптимальним навантаженням на обчислювальну техніку. Зважаючи на велику різноманітність теплообмінників, необхідно адаптувати запропоновану методика для кожного класу. Доцільне використання даної методики на виробництві для попередження аварійних ситуацій та економії енергоресурсів.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Основи теплотехнології цукрового виробництва*: посібник / Прядко М.О., Масліков М.О., Петренко В.П., Павелко В.І., Філоненко В.М. // Вінниця: Нова Книга, 2007. — 297 с.
2. *Химмельблау Д.* Обнаружение и диагностика неполадок в химических и нефтехимических процессах / Д. Химмельблау // Л.: Химия. — 1983. — 410 с.

З. Шарифулин В.Н. Комплексная диагностика неполадок теплообменника методом параметрической идентификации/ В.Н. Шарифулин // Приборы и системы. — 2010. — №9. — С. 45 — 50.

А.П. Ладанюк,
Д.О. Крониковский

Современные подходы к проблеме автоматизации теплообменников

В статье рассмотрены практические проблемы автоматизации теплообменников. Приведены распространенные мотивационные причины необходимости использования современных методик диагностики функционирования теплообменников. Четко выделены поломки при функционировании теплообменников. Рассмотрены варианты выявления и предупреждения отклонения функционирования от заданного (оптимального) режима. Предложено использование комбинации методов параметрической идентификации и контрольных карт Шухарта, причем обоснованно и приведено схему построения и функционирования данного алгоритма. Среди возможных вариантов комбинаций точек контрольных карт Шухарта идентифицированы ситуационные соответствия работы теплообменника и возможности возникновения поломки. Приведена методика выявления с помощью параметрической идентификации толщины отложений на поверхности трубок, среднюю скорость их роста, при достижении опасной величины отложений и степень засорения трубок.

Ключевые слова: автоматизация, тренды, теплообменник, параметрическая идентификация, карты Шухарта.

A. Ladanuk,
D. Kronikovskiy

New approaches of the problem of heat exchanger's automatization

In modern technological objects significant role play heat processes. Heat transfer between the coolant separated by a solid wall, contains all known methods of heat transfer. Knowledge of the mechanism of flow, heat transfer and skills, in particular, reliably calculate heat transfer and hydraulic losses is necessary for the design of power devices and to develop a reliable system of automatic control. Therefore, research of heat transfer and hydrodynamics in heat exchangers, the development of methods of calculation, diagnostics and automation represent actual engineering practice nowadays. Widespread use of heat exchangers of various designs and purposes puts additional conditions on the quality of automation systems, in particular with a view to saving energy. The article deals with practical problems of automation of heat exchangers. Most common reason given motivational need for modern methods of functional diagnostics of heat exchangers. Clearly distinguished damage in operation of the heat exchangers. We examined the detection and prevention of deviation from the set operation (optimal) functionality. Proposed using a combination of parametric identification and control Shuharts cards. Was described reason and structure of functioning of the algorithm. Among the possible choices of points combinations Shuharts cards identified situational compliance of the heat exchanger and the possibility of breakage. The method show the way of parametrical identification of the thickness of deposits on the surface of the tubes, the average rate of growth, rising of a dangerous amount of deposits and the degree of clogging pipes.

Key words: automation, trends, heat exchanger, parametrical identification, maps of Shuhart.

e-mail: jimp@ukr.net

Стаття надійшла в редакцію 3.12.2011 р.