

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ПАРОГЕНЕРАТОРАХ

Для енергетичного обладнання котельних характерний перемінний, в умовах безперервної зміни навантаження, режим роботи, у відповідності з графіком теплоспоживання. Зміна режимів роботи супроводжується складними явищами перехідних процесів.

Актуальність роботи полягає у дослідженні перехідних процесів парогенераторів, з метою розробити ефективні схеми автоматизації, що дозволить оптимізувати технологічний процес.

Динамічні характеристики парогенераторів (котлів) та їх елементів визначаються шляхом вирішення системи диференціальних рівнянь з різною степінню повноти, описуючих складний комплекс взаємопов'язаних теплових, гідромеханічних характеристик, фізико-хімічних та інших процесів, котрі протікають в об'єкті регулювання.

Працюючи над цим завданням мною були розглянуті наукові роботи д.т.н. Меренкова А.П. [2], Мінєєва Р.В. [4], Русанова А.В. [1] Робакова Р.Р.[3] та інших авторів. Важливу роль у них приділено проблемам оптимального управління, шляхом математичного моделювання технологічних процесів на ЕОМ. Але у науковій літературі недостатньо уваги приділяють питанням автоматизації виробництва будівельних матеріалів. Автоматизоване управління роботою парогенераторів, реалізоване на сучасних засобах автоматики та мікропроцесорної техніки дозволить зменшити питому вагу енергетичних затрат на виготовлення будівельних матеріалів. Моделювання динаміки перехідних процесів дозволить прискорити зміну режимів роботи парогенератора при неритмічному споживанні теплової енергії множиною споживачів.

Мета і задачі дослідження: розробка математичних моделей динаміки перехідних процесів і вибір регуляторів за встановленими критеріями.

Для найпростіших моделей рішення можуть бути отримані в аналітичній формі. Найпростіша модель динамічних процесів в парогенераторі представляється системою звичайних диференціальних рівнянь або всієї установки, або кожного з входящих до її складу елементів. В такій моделі не враховується реальна протяжність елементів парогенератора і пов'язана з нею залежність параметрів від координат (модель із зосередженими параметрами)

Розподіленість параметрів парогенератора у більшості випадків аналітично врахувати неможливо. Для чого використовуємо численні рішення вихідних рівнянь на ЕОМ.

Парогенератори працюють в різних режимах. Зрозуміло, що перевагу надаємо режиму з найвищим ККД, котрий і буде оптимальним. Коефіцієнт корисної дії парогенератора, нелінійним чином, залежить від навантаження, надлишку палива, степені забруднення поверхнів нагріву та інших факторів.

Стационарний режим парогенератора визначають наступні основні параметри: витрата, тиск, і температура теплоносія по водопаровому тракту; витрата, ентальпія і склад продукту згоряння по газовому тракту; значення топочних втрат та ін. Якщо відомий зв'язок між параметрами стационарного режиму, то можна вибрати умови, що забезпечують роботу окремих елементів з оптимальним ККД. Ці ж параметри є вихідними при розрахунку динаміки перехідних процесів в парогенераторах, оскільки динамічні розрахунки, як правило, проводяться при відхиленні параметрів від стационарного режиму.

Статичні характеристики в загальному нелінійні. З метою спрощення аналітичних розрахунків їх ліанеризують. Зовнішні збурення в парогенераторі в загальному випадку носять випадковий характер. Але при аналізі динамічних якостей систем зручніше розглядати разові збурення.

Якісну інформацію про протікання динамічних процесів можна отримати із аналізу стаціонарного розподілення акумулюючих ємностей у напрямку шляху потоків енергії і речовини. У парогенераторах на органічному паливі енергію переносять два середовища: гріючий газ і теплоносій (вода, пароводяна суміш, пара). Енергія в парогенераторі акумулюється в об'ємах теплоносія і гріючого газу, метали поверхонь нагріву, топливі, ізоляційних матеріалах.

В динамічному процесі одночасно змінюється кількість речовини і енергії. Звичайно акумуляційні явища речовини і енергії розглядаються роздільно, що спрощує проведення кількісного аналізу.

Розглянемо парогенератор барабанного типу, як такий, що найчастіше використовується на підприємствах будіндустрії, зокрема на ВАТ "комбінат будіндустрії".

В барабанних котлах наявна фіксована границя між паростворюючими і перегріваючими поверхнями. Ця поверхня знаходиться в барабані, рівень води в котрому розділяє перегріваючі поверхні від паростворюючих. При любых режимах (окрім аварійних) в перегрівач поступає практично суха насичена пара.

Витрата живильної води завжди відповідає витраті пари і являє відгук на зміни, що проходять у пароводяному тракті. Зміною витрати живильної води у барабані підтримується визначений рівень, при цьому виробіток пари парогенератором майже не змінюється, оскільки він визначається в основному тепловим навантаженням.

У свою чергу, характер зміни температури пари визначається співвідношенням теплосприйняття поверхонь нагріву, розташованих по барабану (пароутворюючих) і після нього (перегрівуючих). Якщо відносно збільшення теплосприйняття пароутворюючих поверхонь нагріву з ростом навантаження менше ніж збільшення перегріваючих поверхонь, то температура пари підвищується. При цьому зміна температури відносно невелика, що пов'язано з постійністю границі між пароутворюючими і перегріваючими поверхнями нагріву. Не дивлячись на відносно невеликий діапазон зміни температури пари, регулювання її необхідно.

Приблизний графік зміни параметрів барабанного котла при підвищенні тепловиділення у топці показаний на рис. 1.

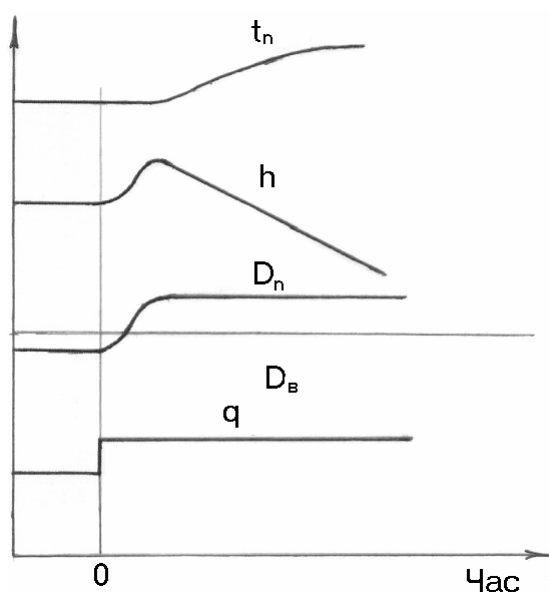


Рис. 1.

На рис. 1 введені позначення: $D_{\text{П}}$ – витрата пари, $D_{\text{В}}$ – витрата води, q – відносне теплове навантаження, h – рівень води в барабані котла, $t_{\text{П}}$ – температура пари.

Як бачимо при збільшенні теплового навантаження зростає і паровиробіток. При відсутності регулювання, рівень води в барабані парогенератора спочатку підвищується, а потім знижується. Тимчасове підвищення рівня води пов'язано з витісненням частини води з пароутворюючих труб в результаті збільшення їх парового об'єму. Наступне зниження рівня проходить до тих пір, поки не буде відновлений баланс між витратою води і паровиробітком. Якщо в прямоточному парогенераторі зміни масового заповнення парогенеруючих труб відображаються на ступені відхилення витрати пари, від витрати живильної води, то в барабанному парогенераторі при зміні масової ємності, змінюється положення рівня води в барабані.

Температура пари регулюється шляхом штучного перерозподілу теплосприйняття між пароутворюючими поверхнями нагріву (газове нагрівання), або шляхом переносу частини пароутворюючої (впорскування), або водогрійної (поверхневий пароохолоджувач) поверхні, у перегрівачу в обхід барабану.

Розглянемо акумуляцію теплової енергії в парогенеруючих каналах. Теплова енергія акумулюється в об'ємі теплоносія і в металі поверхонь нагріву:

$$Q = \int_0^{l_e} f c_p \rho(z) t(z) dz + \int_{l_e}^{l_n} f \rho(z) i(z) dz + \int_{l_e}^{l_n} f c_n \rho(z) t(z) dz + \int_0^l q_m c_m \theta(z) dz. \quad (1)$$

Кількість теплоти, що міститься в об'ємі теплоносія, визначається масою останнього, розподіленням температури і тиском. При переході від одного стаціонарного режиму до іншого виділяється (поглинається) теплота у кількості $\Delta Q = Q - Q_0$, значення Q і Q_0 обчислюємо по рівнянню (1) у відповідності з характеристиками стаціонарного режиму.

Маса перегрітої пари у порівнянні з масою металу перегрівача мала і ми нею можемо знехтувати. У відповідності з цим і кількість теплоти, що міститься у парі, невелика, тому у розрахунках її звичайно не враховуємо. По цій же причині нехтуємо акумуляцією теплоти в насиченій парі. Таким чином, теплова енергія зосереджена в основному у воді і в металі усіх поверхонь нагріву.

Акумульована теплова енергія реалізовується по різному, в залежності від виду поверхні нагріву і характеристик стаціонарних режимів. Так, якщо два стаціонарних режиму відрізняються тільки тиском, то в динамічному процесі виділиться лише теплота, акумульована в металі і воді на випаровувальній ділянці. В той же час вміст теплоти в економайзері і перегрівачі зміниться мало, оскільки температура води і пари незначною мірою залежить від тиску. Навпаки, при порушенні співвідношення між витратою живильної води і теплопідводом значно зміниться вміст теплоти у підігрівачі і перегрівачі, а вміст теплоти у випаровувачі зміниться мало і лише внаслідок скорочення площі поверхні (прямоточний парогенератор).

Ми створюємо аналітичну модель динаміки прогріву об'єкта регулювання. Для цього використовуємо відому універсальну модель прогріву будь-яких теплових об'єктів і підбираємо параметри цієї моделі так, щоб вони відповідали експериментальним даним. Підбір параметрів реалізується автоматично, в процесі вирішення оптимізаційної задачі. Конкретніше, ми підбираємо параметри моделі, які мінімізують розходження між експериментальним та теоретичним варіантами перехідної функції.

Вихідними даними для розрахунку є експериментальна перехідна функція об'єкта - реакція на включення нагріву.

Модель об'єкта пов'язує потужність витрати повітря (вхідний вплив) та тиску (вихідна реакція). Точна модель об'єкта занадто складна для реальних розрахунків на мікроконтролері. Практично ж зручніше використовувати наближену типову модель.



Підбір параметрів реалізується автоматично, в процесі вирішення оптимізаційної задачі. Конкретніше, ми підбираємо параметри моделі, які мінімізують розходження між експериментальним та теоретичним варіантами перехідної функції.

Вихідними даними для розрахунку є експериментальна перехідна функція об'єкта - реакція на включення.

Модель об'єкта пов'язує потужність витрати повітря (вхідний вплив) та тиску (вихідна реакція). Точна модель об'єкта занадто складна для реальних розрахунків на мікроконтролері. Практично ж зручніше використовувати наближену типову модель.

Під час розрахунку витрат повітря об'єкта використовувалась типова модель об'єкту з передавальною функцією:

$$W(p) = \frac{K \cdot e^{-T_3 \cdot p}}{(T_1 \cdot p + 1)(T_2 \cdot p + 1)}, \quad (2)$$

де K - статичний коефіцієнт передачі об'єкту, T_1 - перша стала часу, T_2 - друга стала часу, T_3 - запізнення.

Ця модель приблизно описує динаміку практично будь-яких об'єктів. Погрішність для нашого випадку складає долі проценту (якщо правильно вибрані чисельні значення параметрів K , T_1 , T_2 , T_3). Визначення цих значень і є нашою задачею.

Перехідна функція такої моделі має наступний стандартний аналітичний вираз:

$$h(t) = K_1 \cdot (1 - e^{-(t-T_3)/T_1}) + K_2 \cdot (1 - e^{-(t-T_3)/T_2}), \quad (3)$$

$$\text{де } K_1 = \frac{K}{1 - T_2/T_1}, \quad K_2 = \frac{K}{1 - T_1/T_2}$$

Мета розрахунку - підібрати числові значення параметрів моделі так, щоб теоретична перехідна функція мінімально відрізнялась від експериментальної

Параметри моделі K , T_1 , T_2 , T_3 підбираються так, щоб середньоквадратичне відхилення (критерій мінімізації) теоретичної перехідної функції від експериментальних даних було мінімальне. Це виконується автоматично за допомогою інструмента "Пошук рішення", який допомагає вирішувати оптимізаційні задачі.

Процедура вирішення оптимізаційних задач в електронних таблицях Excel розроблена.

Тепер зробимо опис використання цієї процедури для вирішення нашої конкретної задачі. Починаємо виконання задачі створенням необхідної для розрахунку моделі в електронних таблицях.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		Ідентифікація аперіодичного об'єкта регулювання по перехідній функції та її екстраполяція									
2	Час	Експеримент	Формула	Помилка							
3				0,003011	CKO - цільова комірка мінімізації				Tools->Solver		
4	0	0	0								
5	2	0	0								
6	4	0,002	0,001								
7	6	0,0052	0,005								
8	8	0,0089	0,009								
9	10	0,012	0,013								
10	12	0,0152	0,017								
11	14	0,0183	0,02								
12	16	0,0222	0,022								
13	18	0,0248	0,024								
14	20	0,0262	0,025								
15	22	0,0275	0,027								
16	24	0,0282	0,027								
17	26	0,0287	0,028								
18	28	0,0292	0,029								
19	30	0,0295	0,029								
20	32	0,0297	0,029								
21	34	0,0298	0,029								
22	36	0,0299	0,3								
23	38	0,03	0,3								
24	40	0,03	0,3								
25	50	0,03	0,3								

В стовпчику вводимо експериментальну перехідну функцію. Значення аргументу (часу) вводимо в стовпчик А. В стовпчику С розраховуємо теоретичну перехідну функцію. Для цього в кожній комірці стовпчика С задаємо вищенаведену формулу перехідної функції.

=IP(Время>T3;K1*(1-EXP(-(Время-T3)/T1))+K2*(1-EXP(-(Время-T3)/T2));0)

Проміжні змінні K1 і K2 вираховуються в комірках G12:G13 за формулами

=K/(1-T2/T1)

=K/(1-T1/T2)

Параметри моделі K, T1, T2, T3, що входять у формули, задані в комірках G6:G9 (поки-що довільні). Оптимізатор буде автоматично підбирати ці параметри.

В комірці D3 вираховується середньоквадратичне відхилення теоретичної перехідної функції від експериментальної за формулою

=SQRT(SUMXY2(B5:B37;C5:C37))

Цей результат автоматично мінімізується за рахунок автоматичного підбору параметрів моделі в комірках G6:G9

Оптимізація виконується за допомогою інструмента "Пошук рішення", який допомагає вирішувати оптимізаційні задачі.

В результаті оптимізації одержані наступні оптимальні значення параметрів моделі:

K = 0,03	безрозм.	Статичний коефіцієнт
T1=5,44	хвилин	Стала часу №1
T2=5,25	хвилин	Стала часу №2
T3=2,11	хвилин	Запізнення

При таких параметрах теоретична та експериментальна перехідні функції співпадають майже ідеально. Середньоквадратична похибка складає усього 0,003 (рисунок 2).

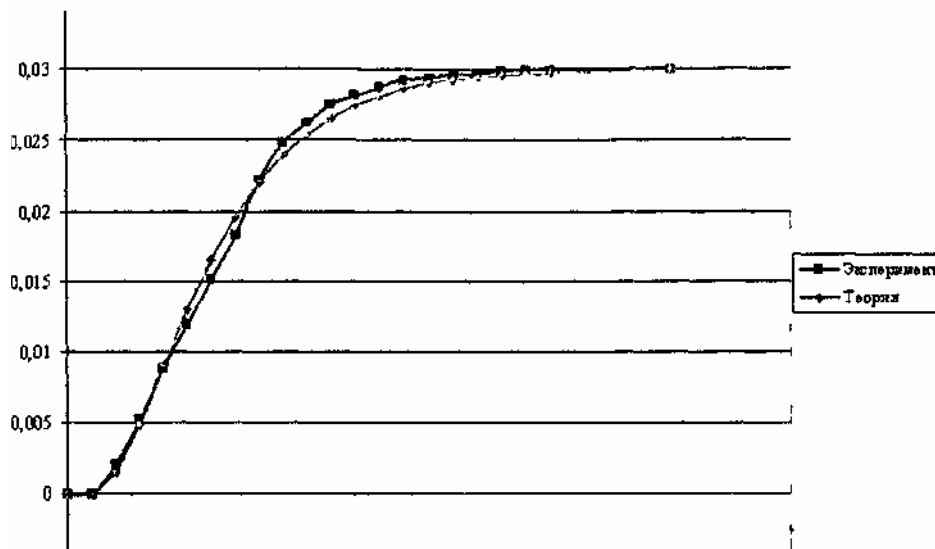


Рис. 2.

Результат: ми одержали модель витрат повітря об'єкта у вигляді передавальної функції.

$$W(p) = \frac{K \cdot e^{-T_3 \cdot p}}{(T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2 \cdot p + 1)}, \quad (4)$$

де K=0,03 T1=5,44 T2=5,25 T3=2,11.

Ця модель буде використана для синтезу регулятора.

Висновки. Дія теплової акумуляції обумовлює велику інерцію змін основних технологічних параметрів парогенератора у перехідному процесі і, зокрема температури, що висуває специфічні вимоги до системи автоматичного регулювання. Розробка і



дослідження математичної моделі перехідного процесу дає можливість визначення критеріїв для вибору регулятора.

Література

1. *Русанов А.В.* О критерии оптимально возможной работы системы автоматического регулирования и методе разработки оптимально возможных алгоритмов их работы. – К.: Энергетика и электрификация, 1996.
2. *Меренков А.П.* Математическое моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте- и газоснабжения. – Новосибирск: Наука, 1992.
3. *Рыбаков Р. Р.* Автоматизация газифицированных агрегатов. – Л.: Недра, 1984.
4. *Мінєєв Р.В.* Комплекс заходів для визначення резервів економії електричної енергії в промисловості. – М.: Промислова енергетика, 1992. - №11.
5. СНиП 3.05.07-85. Системы автоматизации.

УДК 792-50: 673

Ю.В. Білявський, аспірант КНУБА

ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ РОЗРАХУНКУ ГІДРАВЛІЧНОГО УДАРУ В СИСТЕМАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ

Явище гідравлічного удару незмінно привертало увагу вчених і інженерів у багатьох країнах в зв'язку з науковим і практичним аспектами. До початку шістдесятих років минулого сторіччя основні фізичні і гідродинамічні процеси, що протікають в елементах трубопровідних систем при гідравлічному ударі, були в основному вивчені. У той же час було встановлено, що в реальних (складних) гідросистемах специфіка перехідних процесів в основному обумовлюється багаторазовим накладенням відбитих від конструктивних неоднорідностей системи хвиль тиску і трансформацією цих хвиль при їхньому проходженні по довжині трубопроводів. В складних гідросистемах, як і в багатьох інших інженерних задачах, рішенню перешкоджає "прокляін багатомірності", який погіршується не лінійністю процесів. На перехідні процеси впливають велика кількість факторів, наприклад, наявність у трубах розчиненого в рідині повітря, деформаційна піддатливість стінок труб і інші явища. Зокрема, було встановлено, що на характер нестационарних процесів у трубопровідних системах кардинальний вплив здійснюють кавітаційні розриви суцільності, які можуть виникати в будь-якій точці системи при падінні тиску там нижче величини тиску насичених парів рідини. Тому не дивно, що наприкінці шістдесятих років минулого століття система, що складається з двох труб різного діаметра, вважалася у фахівців "складною" і важкою для розрахунку.

Тому саме використання при розрахунках гідравлічного удару сучасних інформаційних технологій, тобто відмова від аналітичних і графічних методів на користь чисельних, дозволило зробити початок масового використання електронно-обчислювальних машин. Їхнє впровадження і масове використання дозволило проводити розрахунки практично без обмеження складності мереж.

Історія вивчення нестационарних гідродинамічних процесів, що включають, зокрема, гідравлічний удар, нараховує вже більше ста років і починається з вже класичної в даний час роботи М.Є.Жуковського [1]. Важливим внеском у методику розрахунку гідравлічного удару було створення "графічного" методу, викладеного найкраще в монографії Л. Бержерона [2]. Однак, навіть фахівцями в області гідравлічного удару,