

ОБРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

УДК 62-501.72

І. М. Ковела, А. Й. Наконечний, Ю. В. Яцук

АВТОМАТИЗОВАНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ РЕГУЛЮВАННЯ ЗА ЇХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ПЕРЕХІДНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

A new method of transfer functions regulated objects for their experimental curves of acceleration, which is that the identification problem is reduced to the mathematical problem of approximation of experimental data analytic expressions and solve it by using information technology.

Keywords: *transfer functions, approximation, information technology.*

Запропоновано новий метод отримання передавальних функцій об'єктів регулювання за їх експериментальними кривими розгону, який полягає в тому, що задача ідентифікації зводиться до математичної задачі апроксимації експериментальних даних аналітичними виразами і розв'язання її за допомогою інформаційних технологій.

Ключові слова: *передавальна функція, апроксимація, інформаційні технології.*

У процесі розроблення автоматичних систем у переважній більшості випадків найперше виникає проблема вибору структури і визначення параметрів математичної моделі об'єкта регулювання (ММ ОР). Структура моделі ОР в основному визначається фізичним змістом технологічних процесів, що відбуваються в ньому, і її з достатньою точністю можна вважати незмінною для всіх режимів роботи ОР, а залежність його динамічних властивостей від інших чинників (найчастіше це зміна навантаження) можна звести до зміни параметрів моделі.

Постановка задачі. Найпоширенішим способом отримання ММ ОР є активний експеримент в розімкненому або замкненому контурі, за допомогою якого визначають криві розгону, які описують реакцію об'єкта на одноразову ступінчасту зміну його вхідної величини. Особливості проведення і обробки результатів такого експерименту описані в багатьох джерелах, наприклад, в [1–3], необхідно лише зауважити, що сучасні апаратні та програмні засоби дають змогу суттєво підвищити точність фіксації експериментальних даних в автоматичному режимі.

За виглядом реакції на ступінчасту зміну вхідної величини (рис. 1) розрізняють об'єкти із самовирівнюванням (*статичні* стійкі об'єкти), без самовирівнювання (*астатичні* нейтральні об'єкти), і об'єкти з від'ємним самовирівнюванням (нестійкі). Самовирівнювання об'єкта – це його здатність самостійно досягати нового усталеного стану під час ступінчастих вхідних дій, що оцінюється коефіцієнтом самовирівнювання $\rho = 1/K_o$, де K_o – коефіцієнт підсилення об'єкта.

Проте криві розгону досить складно використати безпосередньо в процесі синтезу автоматичних систем, оскільки переважна більшість відомих на цей час методів синтезу систем з типовими регуляторами [4] орієнтовані на використання ММ ОР у вигляді передавальних функцій.

Отже, постає задача апроксимації експериментальних кривих розгону передавальними функціями, які, по-перше, адекватно відображали б динамічні властивості об'єкта з достатньою точністю, а по-друге, були б придатними для застосування обраного методу параметричного синтезу системи, що функціонує за відповідним алгоритмом.

© І. М. Ковела, А. Й. Наконечний, Ю. В. Яцук, 2013

Цей етап ідентифікації об'єкта неоднозначний і дуже трудомісткий, отже, його автоматизація є актуальною. Автоматизація обробки експериментальних даних з метою отримання ММ ОР може здійснюватися різними способами. Наприклад, в роботах [1, 5] ця задача вирішується за допомогою програмної реалізації раніше розроблених графоаналітичних методів. Це дещо підвищує точність апроксимації експериментальних характеристик, але методичні похибки, властиві методам, прийнятим за основу, при цьому залишаються. В роботах [6, 7] задачу ідентифікації розв'язано за допомогою математичних методів оптимізації та спеціалізованого програмного забезпечення, що ускладнює практичне використання і зумовлює деяку функціональну обмеженість такого підходу.

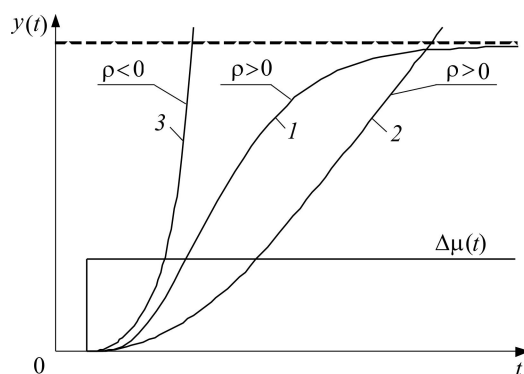


Рис. 1. Реакція статичного (1), астатичного (2) і нестійкого (3) об'єктів на ступінчасту зміну вхідної величини.

Можливості автоматизованої ідентифікації об'єктів за експериментальними даними передбачені, зокрема, у пакеті *Control System Toolbox (Matlab)* [8]. Для цього необхідно створити спеціальну програму, за допомогою якої отримують дискретні моделі, які можуть бути перетворені до неперервного вигляду (що для реальних об'єктів є більш природним описом) у формі відношення поліномів, порядок яких непередбачуваний. Така модель об'єкта непридатна для більшості відомих методів розрахунку АСР. Крім того, такий підхід може вважатися коректним лише при малій часовій дискретності експериментальних даних. Тому для ідентифікації промислових об'єктів, внаслідок їх великої інерційності, використовувати цей пакет недоцільно.

З метою усунення зазначених недоліків у цій статті пропонуємо новий, універсальніший спосіб автоматизованої ідентифікації об'єктів.

Основний зміст. Пропонований спосіб автоматизованого розв'язання задачі ідентифікації може бути реалізований, коли її розглядати як класичну математичну задачу апроксимації експериментальних даних аналітичними виразами $y = f(x)$. Цей підхід назовемо умовно експериментально-математичною ідентифікацією об'єкта (ЕМІО). У такій постановці задача ідентифікації відрізняється від математичної лише тим, що її розв'язок знаходять не у класі довільних функцій, а у класі функцій, що відповідають вибраним структурам математичних моделей об'єктів, оскільки це пов'язане з подальшим вибором алгоритму регулювання і методу параметричного синтезу системи.

Найширші можливості щодо автоматизації обробки результатів активного експерименту з дослідження динаміки об'єктів створюються у процесі використання пакету розширення *Curve Fitting Toolbox (Matlab 7)*, який дає змогу здійснити попереднє згладжування експериментальних даних, вибрати метод апроксимації табличних функцій, а також критерій точності наближення і розв'язати не-

лінійну задачу підбору параметрів моделі об'єкта, апроксимуючи табличні залежності аналітичними виразами, оптимальними за критеріями SSE , SSR , $RMSE$ [8], тощо.

Є також інші програмні засоби аналогічного призначення, наприклад, *Graphical Analysis 3* [9]. Функціональні можливості цього пакету менші, зате він має гранично простий і зручний інтерфейс користувача. Цей пакет дає змогу здійснити за методом найменших квадратів апроксимацію табличних залежностей аналітичними виразами, що містять до шести змінних, які підлягають визначенню. За критерій точності наближення прийнято мінімум $RMSE$ (*Root Mean Squared Error*), який дає узагальнену оцінку якості наближення. При цьому треба мати на увазі, що значення цього критерію залежить від абсолютних значень експериментальних даних, чим вони більші, тим більше його значення, і навпаки. Крім того, треба враховувати ще й візуальну оцінку якості апроксимації. Наведені нижче приклади розв'язані за допомогою саме цієї програми.

Для більш детальної оцінки точності апроксимації необхідно обчислити ординати апроксимуючої перехідної характеристики $h_a(t)$ або кривої розгону $y_a(t)$ і визначити приведену відносну похибку апроксимації δ_i у кожній вузловій точці за виразами:

$$\delta_i = \frac{[h_e(t_i) - h_a(t_i)]}{h_e(\infty)} 100\%, \quad \delta_i = \frac{[y_e(t_i) - y_a(t_i)]}{y_e(\infty)} 100\%, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Для статичних об'єктів $h_e(\infty) = K_o$, а для об'єктів без самовирівнювання, як $h_e(\infty)$, слід прийняти максимальне значення перехідної характеристики, отримане в результаті експерименту. Вважають, що точність апроксимації задовольняє вимоги інженерних розрахунків, якщо $\delta_{i\max} < (3\dots 5)\%$.

Вищезазначені інформаційні технології містять набори різноманітних математичних функцій, за допомогою яких може бути розв'язана апроксимаційна задача. Зокрема, таким чином можна отримати математичний опис експериментальних статичних характеристик об'єктів регулювання. У такому випадку технології використовують за їх прямим призначенням.

Водночас у них для користувача передбачена можливість самостійного конструювання апроксимуючої функції бажаного вигляду. Це і є головною передумовою для нетривіального використання цих технологій, наприклад, з метою отримання математичних моделей об'єкта за його експериментальними перехідними або імпульсними характеристиками. У цій статті досліджуємо перший з названих варіантів як такий, що найчастіше реалізується на практиці.

У такому разі задача ідентифікації розв'язується таким чином. Спочатку обирається вид апроксимуючої передавальної функції об'єкта (з числом невідомих коефіцієнтів ≤ 6). Перехід у часову область здійснюється за допомогою рівнянь перехідної характеристики або кривої розгону, що відповідають обраній математичній моделі об'єкта. При використанні зазначених програм рівняння перехідної характеристики $h(t)$ задаємо і розглядаємо як апроксимуючу функцію, коефіцієнти якої, що залежать від параметрів моделі об'єкта, необхідно підібрати так, щоб забезпечувалася достатня точність апроксимації.

Отже, знаходження математичної моделі об'єкта зводиться до відомої математичної задачі апроксимації табличних даних аналітичними виразами з максимально можливою точністю. При цьому час t у рівняннях часових характеристик розглядаю як аргумент x апроксимуючої функції, тобто $y(x) \equiv h(t)$. Власне для розв'язання таких задач і розроблені вищезазначені програмні засоби.

Проте у процесі обробки даних експерименту з дослідження динаміки об'єктів класична математична задача набуває особливого характеру, оскільки вибір виду апроксимуючих функцій не є довільним, а умова забезпечення необхідної точності апроксимації не є достатньою. Цей вибір повинен здійснюватися лише з обмеженого класу функцій, які відповідають часовим характеристикам найчастіше використовуваних математичних моделей об'єкта. Остання вимога зумовлена необхідністю створення можливостей використання для синтезу автоматичних систем вже відомих або спрощення розробки нових методів.

Під час практичного застосування описаного способу апроксимації експериментальних перехідних характеристик об'єкта потрібно користуватися таблицями зворотних перетворень Лапласа дробово-раціональних функцій, наведеними, зокрема, в роботі [10], що значно спрощує розв'язок задачі ідентифікації. У такому разі при виборі структури моделі об'єкта, тобто його передавальної функції, необхідно керуватися залежностями, які описують взаємозв'язок між перехідною характеристикою $h(t)$ (оригінал) та її зображенням за Лапласом $W(s)$. Тоді перехідну характеристику $h(t)$ і криву розгону $y(t)$ об'єкта із самовирівнюванням описую виразами

$$h(t) = L^{-1} [W_o(s) / s]; \quad y(t) = K_o L^{-1} [W_o(s) / s]. \quad (2)$$

Для об'єктів без самовирівнювання аналогічні залежності набувають вигляду

$$h(t) = L^{-1} [W_o(s) / s^{v+1}]; \quad y(t) = K_o L^{-1} [W_o(s) / s^{v+1}], \quad (3)$$

де v – порядок астатизму моделі об'єкта.

Отже, під час використання вищезазначених таблиць необхідно орієнтуватися на рівняння перехідних характеристик, які відповідають шуканій передавальній функції об'єкта $W_o(s)$ з урахуванням множника $1/s$ у відповідному степені.

Криві розгону промислових об'єктів мають, як правило, вигляд кривих 2 і 3 (рис. 2).

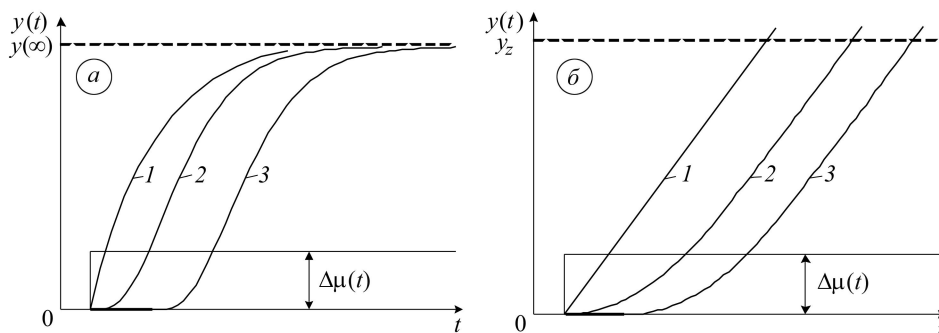


Рис. 2. Криві розгону об'єктів із самовирівнюванням (а) і без самовирівнювання (б):

- 1 – першого порядку без запізнення; 2 – з перехідним запізненням;
3 – з перехідним і транспортним запізненням.

Попередній вибір виду апроксимуючої передавальної функції здійснюється за виглядом початкової частини експериментальної перехідної характеристики. Якщо, наприклад, об'єкту властиве тільки перехідне запізнення, то необхідно вибирати апроксимуючу передавальну функцію другого та вищого порядку з однаковими чи різними сталими часу. Коли ж експериментальна крива розгону об'єкта має "горб", необхідно вибирати апроксимуючу передавальну функцію з числа тих, які мають похідні в чисельнику. Крім того, потрібно враховувати алгоритм функціонування регулятора і обраний метод розрахунку його параметрів наст-

роювання, оскільки більшість методів розроблені з урахуванням цілком визначеної передавальної функції об'єкта [4].

Таблиця 1. Динамічні характеристики об'єктів із самовирівнюванням

	Передавальна функція	Апроксимуюча функція $y(t)$	Параметри
1	$W_o(s) = \frac{K_o}{Ts+1} e^{-\tau s}$	$y(t) = K_o \left(1 - e^{-\frac{t-\tau}{T}} \right), \quad t > \tau$	K_o, T, τ
2	$W_o(s) = \frac{K_o}{(Ts+1)^2} e^{-\tau s}$	$y(t) = K_o \left(1 - \left(1 + \frac{t-\tau}{T} \right) e^{-\frac{t-\tau}{T}} \right), \quad t > \tau$	K_o, T, τ
3	$W_o(s) = \frac{K_o e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$ $T_1 \neq T_2$	$y(t) = K_o \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t-\tau}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t-\tau}{T_2}} \right),$ $t > \tau$	$K_o, \tau, T_1,$ $T_2,$
4	$W_o(s) = \frac{K_o}{(Ts+1)^2}$	$y(t) = K_o \left(1 - \left(1 + \frac{t}{T} \right) e^{-\frac{t}{T}} \right)$	K_o, T
5	$W_o(s) = \frac{K_o}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$ $T_1 \neq T_2$	$y(t) = K_o \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right)$	$K_o, T_1,$ T_2
6	$W_o(s) = \frac{K_o}{(Ts+1)^n}$	$y(t) = K_o \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{t^k}{k! T^k} \right)$	K_o, T

Використовувані найчастіше математичні моделі промислових об'єктів та відповідні перехідні характеристики подано у табл. 1 і 2, а для отримання моделей об'єктів зі складнішою структурою необхідно звертатися до таблиць зворотних перетворень Лапласа, наведених у роботі [10].

Якщо в процесі апроксимації за основу беруть експериментальну перехідну характеристику об'єкта, то у табл. 1 треба прийняти $K_o = 1$.

Для об'єктів високого порядку в процесі апроксимації необхідно задавати рівняння перехідної характеристики у розгорненому вигляді з урахуванням прийнятого значення показника n . Наприклад, якщо $n = 6$, перехідну характеристику описують рівнянням

$$y(t) = K_o \left[1 - \left(1 + \frac{t}{T} + \frac{t^2}{2T^2} + \frac{t^3}{6T^3} + \frac{t^4}{24T^4} + \frac{t^5}{120T^5} \right) e^{-\frac{t}{T}} \right]. \quad (4)$$

У табл. 2 ε – швидкість розгону об'єкта, тобто максимальна усталена швидкість зміни його вихідної величини при ступінчастій зміні вхідної величини. Розмірність ε визначаємо як (розмірність вихідної величини/розмірність вхідної величини), помножену на s^{-1} , для об'єкта без самовирівнювання ε розглядаємо як його коефіцієнт підсилення.

Таблиця 2. Динамічні характеристики об'єктів без самовирівнювання

	Передавальна функція	Апроксимуюча функція $y(t)$	Параметри об'єкта
1	$W_o(s) = \frac{\varepsilon}{s} e^{-\tau s}$	$y(t) = \varepsilon \cdot (t - \tau), \quad t > \tau$	ε, τ
2	$W_o(s) = \frac{\varepsilon}{s(Ts + 1)} e^{-\tau s}$	$y(t) = \varepsilon \cdot \left[t - \tau - T \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-\tau}{T}} \right) \right], \quad t > \tau$	ε, τ, T
3	$W_o(s) = \frac{\varepsilon}{s(Ts + 1)}$	$y(t) = \varepsilon \cdot \left[t - T \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \right]$	ε, T

Після введення експериментальних даних і виконання програми визначають невідомі коефіцієнти апроксимуючої функції (отже, й параметри моделі об'єкта), подають її рівняння і вигляд порівняно з експериментальною кривою, зазначають досягнуту точність апроксимації за критерієм *RMSE*, а також похибки визначення коефіцієнтів моделі. Таким чином легко реалізуються різні варіанти апроксимації експериментальної кривої розгону чи перехідної функції, з яких можна обрати найкращий за прийнятим критерієм точності та візуальною оцінкою.

Розглянемо приклади застосування описаного способу апроксимації (ЕМІО) з використанням програми *Graphical Analysis*.

Приклад 1. Дослідження різних варіантів апроксимації, експериментальної кривої розгону $y_e(t)$ статичного об'єкта, наведеної у табл. 3.

Таблиця 3. Експериментальна крива розгону об'єкта із самовирівнюванням

t, min	$y_e(t)$	t, min	$y_e(t)$	t, min	$y_e(t)$	t, min	$y_e(t)$
0,0	0,0	1,75	0,34	3,5	0,58	5,25	0,65
0,25	0,02	2,0	0,38	3,75	0,59	5,5	0,66
0,5	0,060	2,25	0,44	4,0	0,6	5,75	0,67
0,75	0,12	2,5	0,48	4,25	0,6	6,0	0,67
1,0	0,17	2,75	0,51	4,5	0,61	6,25	0,67
1,25	0,23	3,0	0,53	4,75	0,62	–	–
1,5	0,29	3,25	0,56	5,0	0,63	–	–

У результаті апроксимації заданої кривої розгону було отримано декілька прийнятних моделей досліджуваного об'єкта. Результат апроксимації моделлю $W_o(s) = K_o / (Ts + 1)^2$ у тому вигляді, як він подається користувачеві (з деякими необов'язковими доповненнями), зображений на рис. 3.

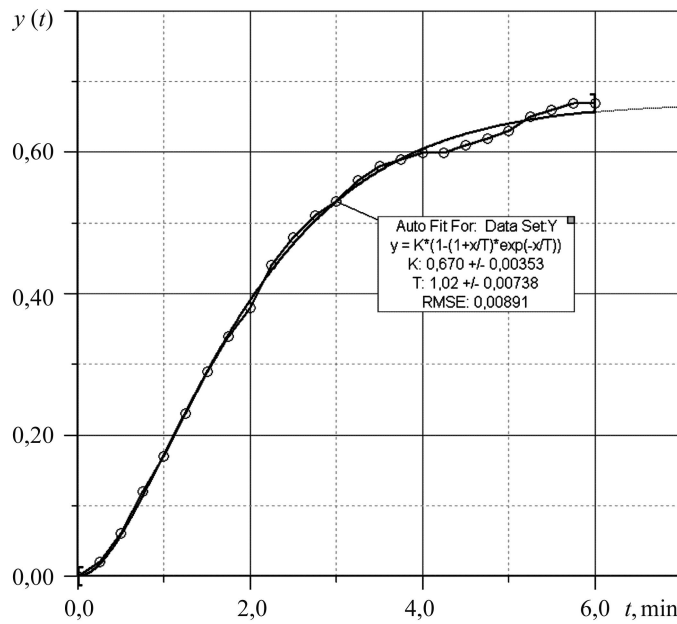


Рис. 3. Експериментальна і апроксимуюча криві розгону об'єкта у процесі використання його моделі $W_o(s) = K_o / (Ts + 1)^2$.

Характеристики двох найкращих моделей заданого об'єкта наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Порівняльна оцінка результатів ідентифікації об'єкта із самовирівнюванням

Модель об'єкта	Параметри моделі	Оцінки якості наближення
$W_o(s) = \frac{K_o}{(Ts + 1)^2}$	$K_o = 0,670 \text{ } ^\circ\text{C}/\% ; T = 1,02 \text{ min}$	$RMSE = 0,00891 ;$ $\delta_{i \text{ max}} = 2,625\%$
$W_o(s) = \frac{K_o e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$	$K_o = 0,685 \text{ } ^\circ\text{C}/\% ; T_1 = 1,51 \text{ min} ;$ $T_2 = 0,634 \text{ min} ; \tau = 0,0118 \text{ min}$	$RMSE = 0,00901 ;$ $\delta_{i \text{ max}} = 2,35\%$

Як видно з табл. 4, отримані моделі об'єкта характеризуються високою і практично однаковою якістю наближення, тому вибір конкретної моделі залежить тільки від прийнятого алгоритму регулювання та методу розрахунку системи.

Приклад 2. Виконаємо апроксимацію експериментальної кривої розгону $y_e(t)$ об'єкта без самовирівнювання (паровий котел як об'єкт регулювання рівня води в барабані при зміні витрати живильної води), заданої у табл. 5 [11]. Там же подають й значення апроксимуючих характеристик $y_a(t)$ і відносні похибки δ_i апроксимації у вузлових точках.

Апроксимація була виконана у двох варіантах. У результаті для моделі об'єкта $W_o(s) = \varepsilon / (Ts + 1) s$, якій відповідає апроксимуюча крива розгону $y(t) = \varepsilon \cdot [t - T(1 - \exp(-t/T))]$, $\text{mm}/(\text{t/h}) \cdot \text{s}$, (рис. 4, табл. 5) отримано: $\varepsilon = 0,734$; $T = 127 \text{ s}$; $RMSE = 0,848$; $\delta_{i \text{ max}} = -0,723$, а для моделі $W_o(s) = \varepsilon e^{-\tau s} / (Ts + 1) s - \varepsilon = 0,692$; $T = 108 \text{ s}$; $\tau = 3,95 \text{ s}$; $RMSE = 1,04$; $\delta_{i \text{ max}} = -0,859$.

Таблиця 5. Експериментальна крива розгону об'єкта та результати її апроксимації інерційною інтегральною ланкою $W_o(s) = \varepsilon / (Ts + 1)s$

t, s	$y_e(t)$	$y_a(t)$	$\delta_i, \%$	t, s	$y_e(t)$	$y_a(t)$	$\delta_i, \%$
0	0	0	0	150	44,5	45,494	-0,736
25	2,46	1,693	0,568	200	72,8	72,883	-0,061
50	7,21	6,363	0,627	250	104	103,301	0,517
75	12,5	13,477	-0,723	300	135	135,764	-0,566
100	23,5	22,598	0,678	-	-	-	-

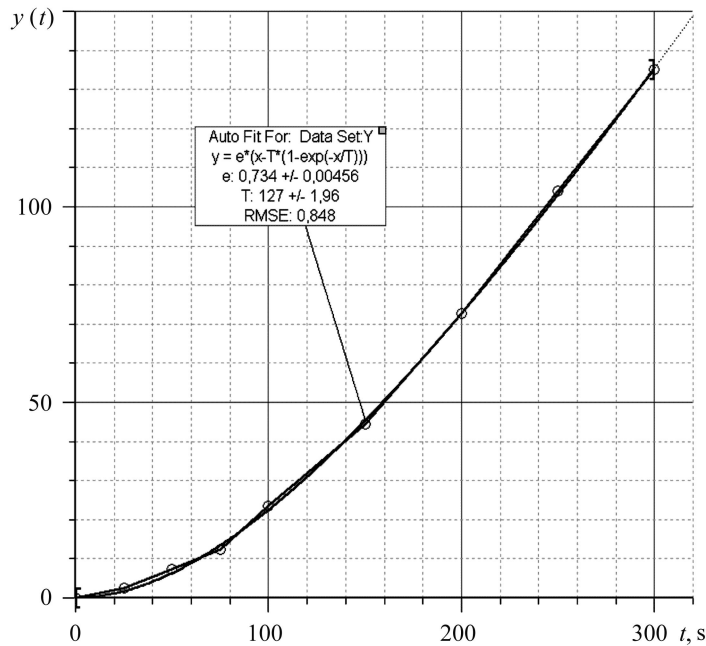


Рис. 4. Експериментальна та апроксимуюча перехідні характеристики об'єкта без самовирівнювання $W_o(s) = \varepsilon / (Ts + 1)s$.

Наведені результати свідчать, що якість апроксимації кривої розгону досліджуваного об'єкта для обох варіантів достатньо висока, причому для моделі без запізнення вона дещо краща. Отже, з цього погляду обидва варіанти практично рівноцінні. Тому вибір конкретної моделі об'єкта фактично залежить лише від обраного алгоритму регулювання та методу синтезу системи.

Перехідні характеристики, які розглядалися вище, є типовими для переважної більшості об'єктів. Проте на практиці нерідко трапляються також об'єкти, у яких відхилення регульованої величини залежать не тільки від змін регулюючої або збурюючої дії, а й від швидкості їх зміни. Диференціальні рівняння таких об'єктів містять похідні не лише в лівій, але й у правій частинах, що й зумовлює екстремальний характер їх перехідних характеристик.

Запропонований метод може бути успішно застосований також для об'єктів з перехідними характеристиками, що мають екстремум ("горб").

Приклад 3. За даними ВАТ "Львіворгрес" допоміжна частина пароперегрівника парового котла П50 має експериментальну перехідну характеристику з екстремумом (об'єкт із самовирівнюванням). Цю характеристику і два можливі варіанти її апроксимації зображено на рис. 5.

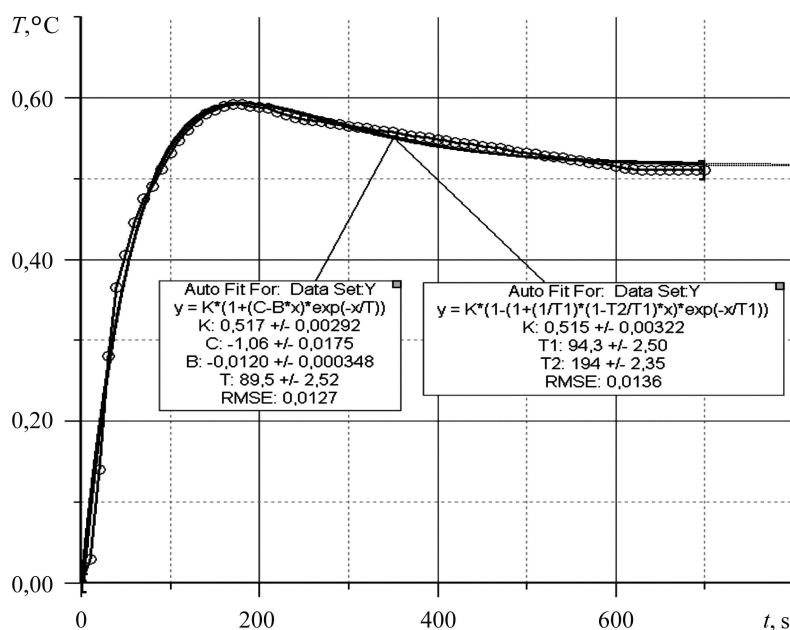


Рис. 5. Апроксимація експериментальної кривої розгону допоміжної (малоінерційної) частини пароперегрівника.

Апроксимуючі криві на рис. 5 відповідають моделям об'єкта, що описують передавальними функціями

$$W_{o1}(s) = K_o \frac{T_2 s + 1}{(T_1 s + 1)^2}; \quad (5)$$

$$W_{o2}(s) = K_o \frac{b_0 s^2 + b_1 s + 1}{(T s + 1)^2}, \quad (6)$$

де $C = (b_0 - T^2)/T^2$; $B = (b_0 - b_1 T + T^2)/T^3$. З рис. 5 видно, що якість обох варіантів апроксимації досить висока і приблизно однакова, проте модель $W_{o1}(s)$ простіша.

Приклад 4. У табл. 6 наведена експериментальна перехідна характеристика парового котла як об'єкта регулювання рівня по каналу “витрата пари – рівень в барабані”, [11]. Це об'єкт без самовирівнювання, а його диференціальне рівняння містить у правій частині збурення та похідну від нього, причому з протилежними знаками.

Таблиця 6. Експериментальна перехідна характеристика парового котла

t, s	$h_e(t)$	t, s	$h_e(t)$	t, s	$h_e(t)$	t, s	$h_e(t)$
0	0	30	2,20	90	1,82	210	0,27
5	0,78	45	2,26	120	1,44	240	-0,12
10	1,32	60	2,17	150	1,05	300	-0,90
15	1,70	75	2,0	180	0,66	1000	-10,0

Результат апроксимації цієї характеристики традиційним способом подано в роботі [11] у вигляді різниці двох передавальних функцій.

Застосування методу ЕМІО для розв'язання цієї задачі (рис. 6) дає змогу отримати результат з більшою точністю і у зручнішій для використання формі. Отриману передавальну функцію та відповідну їй перехідну характеристику цього об'єкта описують виразами:

$$W_o(s) = \varepsilon \cdot \left[\frac{T_1 s + 1}{s(Ts + 1)} \right]; \quad y(t) = \varepsilon \cdot \left[(T_1 - T) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + t \right], \quad \frac{\text{mm}}{(\text{t/h}) \times s}. \quad (7)$$

З рис. 6 видно, що стала часу T_1 від'ємна, отже, цей об'єкт слід розглядати як стійкий немінімально-фазовий, тобто несприятливий для регулювання.

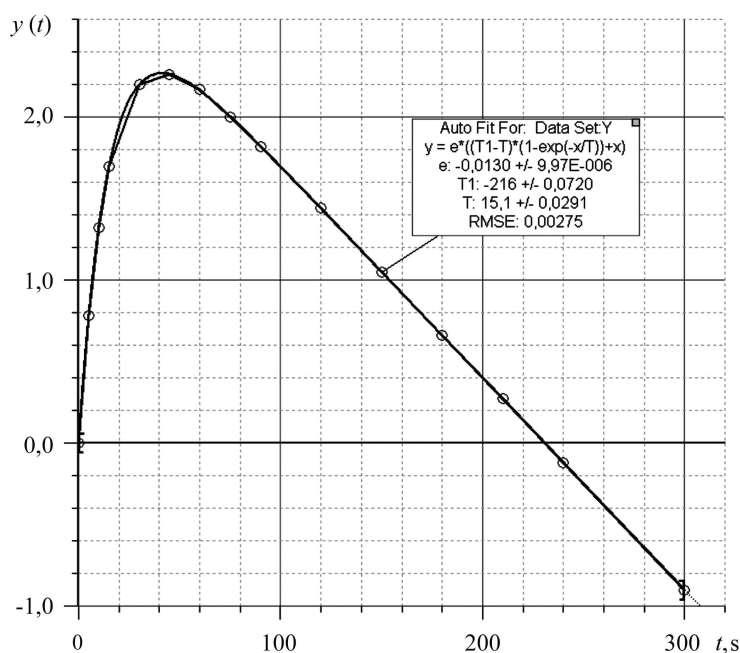


Рис. 6. Апроксимація кривої розгону парового котла (початкова частина кривої).

Фактично отримана математична модель об'єкта так само є різницею двох передавальних функцій, зведених до спільного знаменника. Але важливим у цьому прикладі є те, що він підтверджує можливість застосування методу ЕМІО і для немінімально-фазових об'єктів, навіть при тому, що необхідні вирази з відповідними знаками у вищенаведених таблицях відсутні.

ВИСНОВКИ

Запропонований метод дає змогу ефективно розв'язати переважну більшість практичних задач ідентифікації промислових об'єктів і при використанні їх перехідних характеристик має такі переваги:

- апроксимація експериментальних даних здійснюється за допомогою вже існуючих інформаційних технологій і відомих математичних залежностей, що значно спрощує цей процес;
- універсальність, зумовлена можливістю отримання математичних моделей об'єктів із S -подібними та екстремальними перехідними характеристиками і різними динамічними властивостями ($\rho \geq 0$; $\tau \geq 0$);
- нема необхідності у визначенні якихось додаткових величин, наприклад, координат точки перегину експериментальної кривої, завдяки чому користувач

має можливість зосередити більшу увагу на виборі адекватної структури моделі об'єкта;

- висока точність апроксимації, зумовлена мінімізацією методичної похибки, причому забезпечується максимально можливе наближення апроксимуючої функції до експериментальної в усіх вузлових (а не лише в декількох обраних) точках, а похибка апроксимації в часовому діапазоні апроксимуючої функції розподілена досить рівномірно.

Висока якість математичних моделей, отриманих за допомогою описаного методу, забезпечує розробку високоефективних промислових автоматичних систем регулювання.

1. *Ротач В. Я.* Теория автоматического управления. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.
2. *Денисенко В. В.* Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия–Телеком, 2009. – 608 с.
3. *Клюева А. С.* Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования / Под ред. А. С. Клюева. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.
4. *O'Dwyer A.* Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules (2nd Edition) // Dublin Inst. Technol. – 2006. – 545 p.
5. *Панько М. А.* Расчет и моделирование автоматических систем регулирования в среде Matcad. – М.: Изд-во МЭИ, 2004.
6. *Кубрак А. І., Жученко А. І., Кваско М. З.* Комп'ютерне моделювання та ідентифікація автоматичних систем. Навч. посібник. – К.: Політехніка, 2004. – 424 с.
7. *Кубрак А. І., Голінко І. М., Трегуб В. І.* Визначення динамічних характеристик об'єкта за його реакцією на вхідний сигнал довільної форми // Наукові вісті НТТУ “КПІ”. – 2011. – № 1 (49). – С. 103–107.
8. *Ануфриев И. Е., Смирнов А. Б., Смирнова Е. Н.* MATLAB 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
9. *Graphical Analysis 3* [<http://www.vernier.com/soft/ga.html> (“International” page)].
10. *Никулин Е. А.* Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем. – СПб.: БХВ–Петербург, 2004. – 640 с.
11. *Сборник задач по основам автоматического регулирования теплоэнергетических процессов* / Е. П. Стефани и др. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.