

АВТОМАТИЗОВАНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ РЕГУЛЮВАННЯ ЗА ЇХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ІМПУЛЬСНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

© Ковела І., Вітер О., Яцук Ю., 2013

Пропонується новий метод отримання передавальних функцій об'єктів регулювання за їх експериментальними імпульсними характеристиками, який полягає у 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

A new method of transfer functions regulated objects for their experimental impulse response, 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.

Key words: transfer functions, approximation, information technology

Вступ

Вибір структури і визначення параметрів математичної моделі об'єкта регулювання (ММ ОР) є однією з основних задач, які потребують першочергового розв'язання під час розроблення автоматичних систем. Структура моделі ОР переважно 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 факторів, наприклад, зміни навантаження, звести до зміни параметрів моделі.

Постановка задачі

Доволі поширеним способом отримання ММ ОР є активний експеримент у розімкненому або замкненому контурі, за допомогою якого визначаються імпульсні характеристики, які описують реакцію об'єкта на імпульсний вхідний сигнал. Методика проведення і обробки результатів такого експерименту в загальних рисах майже така сама, як і при визначенні кривих розгону [1–3], варто лише зауважити, що сучасні апаратні та програмні засоби дають змогу істотно підвищити точність фіксації експериментальних даних в автоматичному режимі. Імпульсну характеристику називають також ваговою функцією і зазвичай позначають як $w(s)$.

Проте імпульсні характеристики доволі важко використати безпосередньо в процесі синтезу автоматичних систем, оскільки переважна більшість відомих методів синтезу систем з типовими регуляторами [4] орієнтована на використання ММ ОР у вигляді передавальних функцій. Отже, виникає задача апроксимації експериментальних імпульсних характеристик 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.

Цей етап ідентифікації об'єкта неоднозначний і дуже трудомісткий, отже, його автоматизація є актуальною.

Автоматизація обробки експериментальних імпульсних характеристик з метою отримання ММ ОР може здійснюватися різними способами, проте у доступних джерелах таких прикладів небагато. Зокрема, в роботах [5, 6] задача ідентифікації з використанням імпульсних характеристик розв'язується за допомогою математичних методів оптимізації та спеціалізованого програмного забезпечення, що ускладнює практичне використання і обумовлює деяку функціональну обмеженість такого підходу.

З метою усунення згаданих недоліків у цій статті пропонується новий, універсальніший спосіб автоматизованої ідентифікації об'єктів за експериментальною імпульсною характеристикою.

Основний зміст

Імпульсною характеристикою називають реакцію об'єкта на імпульсний вхідний сигнал, математичний опис якого можна подати у вигляді

$$x(t) = 0 \text{ при } t < 0 \text{ і } t > \tau_i; \quad x(t) = A \text{ при } 0 \leq t < \tau_i.$$

Прямокутний імпульс є наближеним аналогом одиничного імпульсу (дельта-функції Дірака), який має рівномірну за частотою спектральну густину. Оскільки одиничний імпульс фізично не може бути реалізований, використовують його наближений аналог – прямокутний імпульс максимально можливої амплітуди і мінімальної тривалості. Нормованим імпульсом вважається одиничний імпульс, у якого добуток амплітуди на тривалість τ_i дорівнює одиниці (рис. 1).

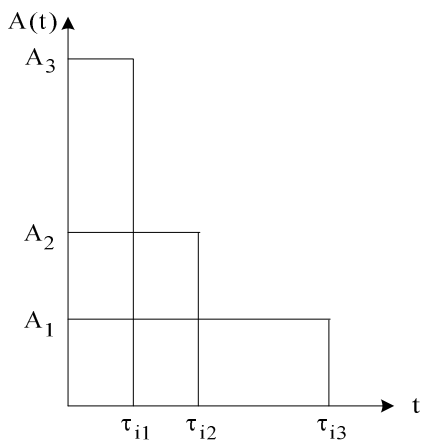


Рис. 1. Графіки одиничних імпульсів

$$A_1 \tau_{i1} = A_2 \tau_{i2} = A_3 \tau_{i3} = 1$$

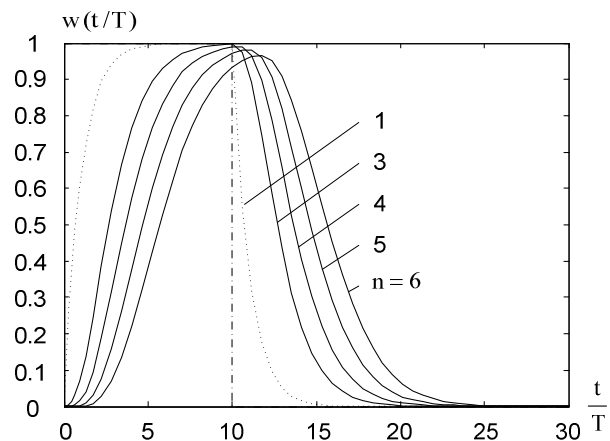


Рис. 2. Реакція об'єктів першого (1)

і третього–шостого порядку на прямокутний імпульс;
 $W_o(s) = 1/(Ts + 1)^n \rightarrow W_o(p) = 1/(p + 1)^n$; $\tau/T = 0.1$

Імпульсні характеристики можна визначити експериментально, причому постановка цього експерименту загалом не відрізняється від постановки експерименту з визначення перехідних характеристик, тільки замість ступінчастої створюється вхідна дія у вигляді імпульсу відносно малої тривалості і достатньо великої амплітуди. Результат експерименту – графік реакції об'єкта на таку дію – повинен бути приведений до імпульсу одиничної інтенсивності, тобто кожен ординату графіка необхідно поділити на площу вхідного імпульсу.

Амплітуда тестового імпульсу на практиці завжди обмежена. Для теплових об'єктів зазвичай такою межею є потужність нагрівача. За обмеженої амплітуди імпульсу його тривалість визначає відношення сигнал/шум на виході об'єкта. Тому тривалість імпульсу вибирають якомога більшою, проте вона повинна бути меншою, ніж π/ω_π , щоб найважливіша частина АЧХ об'єкта була викликана рівномірною частиною тестового сигналу.

Прямокутний імпульс має більшу спектральну густину в області високих частот, ніж ступінчастий. Це означає, що при обмеженні на енергію тестового сигналу він дає змогу підвищити точність ідентифікації у найважливішій високочастотній області.

У роботі [2] звертається увага на велику різницю в реакції об'єктів першого та вищих порядків на імпульсний сигнал (рис. 2) порівняно з реакцією на одиничний стрибок, що дає можливість підвищити точність ідентифікації об'єктів високого порядку. Це позитивна обставина з огляду на те, що (як буде показано нижче) вирази для імпульсної характеристики об'єктів високого порядку значно простіші, ніж рівняння перехідних характеристик. Завдяки цьому апроксимація імпульсних характеристик теж спрощується.

Імпульсні характеристики застосовують для експериментального дослідження об'єктів, які за технологією не допускають тривалих відхилень вихідних величин, або містять інтегральні ланки. Істотна перевага імпульсних характеристик полягає також у зменшенні амплітуди і тривалості відхилення регульованої величини в процесі експериментального дослідження динаміки об'єктів – як з самовирівнюванням ρ , так і без нього (рис. 3).

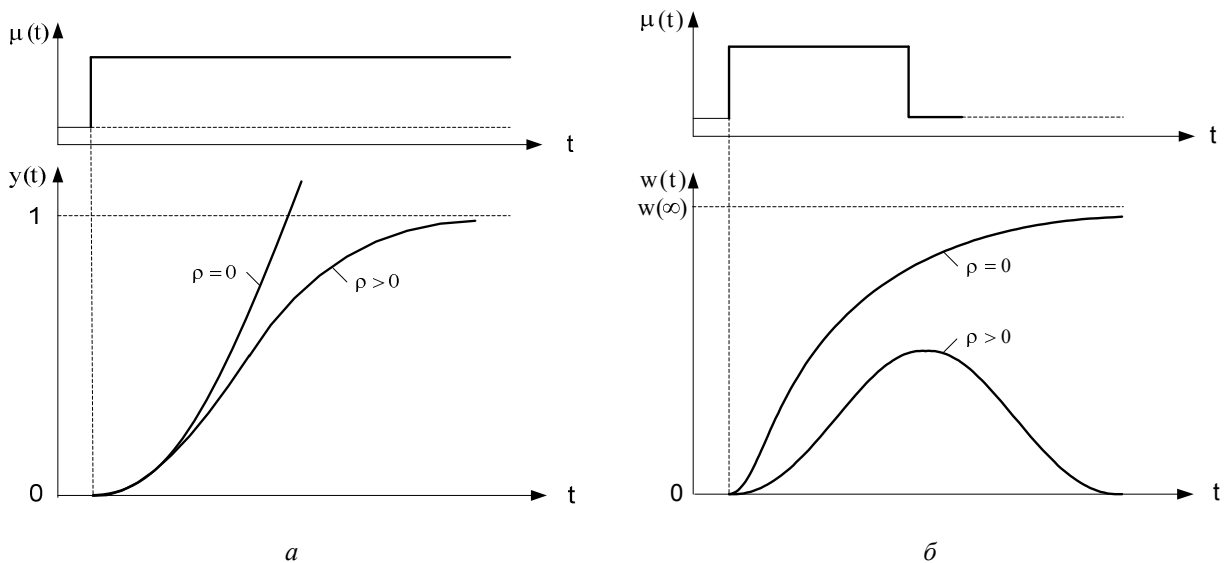


Рис. 3. Перехідні (а) та імпульсні (б) динамічні характеристики об'єктів регулювання

Зазвичай експериментальну імпульсну характеристику графічним способом чи за допомогою її числового диференціювання перебудовують у криву розгону, яку потім використовують для розрахунків АСР.

Проте отримати перехідну характеристику з імпульсної шляхом її перебудови з достатньою точністю можна лише для об'єктів, у яких параметри не залежать від знака вхідної величини. Водночас багато реальних об'єктів, особливо теплових, характеризуються динамічною асиметрією, тобто мають несиметричні перехідні характеристики (наприклад, при нагріванні та охолодженні). Тому бажано визначати структуру і параметри моделі об'єкта безпосередньо за його імпульсною характеристикою.

Пропонований спосіб автоматизованого розв'язання задачі ідентифікації може бути реалізований, якщо її розглядати як класичну математичну задачу апроксимації експериментальних даних аналітичними виразами $y = f(x)$. Цей підхід назвемо 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 в плані автоматизації обробки результатів активного експерименту з дослідження динаміки об'єктів відкриваються при використанні пакета розширення *Curve Fitting Toolbox (Matlab)*, який дає змогу здійснити попереднє згладжування експериментальних даних і за допомогою різних методів наближення розв'язати нелінійну задачу підбору параметрів моделі об'єкта, апроксимуючи табличні залежності аналітичними виразами, оптимальними за критеріями *SSE*, *SSR*, *RMSE*, [7] тощо.

Існують також інші програмні засоби аналогічного призначення, наприклад, *Graphical Analysis 3* [8]. Функціональні можливості цього пакета менші, проте 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 зауважити, що значення *RMSE* залежить від абсолютних значень експериментальних даних: що вони більші, то більше значення критерію і навпаки. Крім того, треба враховувати ще й візуальну оцінку якості апроксимації. Наведені нижче приклади розв'язано за допомогою саме цієї програми. Для детальнішого оцінювання точності апроксимації доцільно обчислити ординати апроксимуючої імпульсної характеристики $w_a(t)$ і визначити відносну похибку апроксимації δ_i у кожній вузловій точці.

Згадані вище інформаційні технології містять набори різноманітних математичних функцій, за допомогою яких може бути розв'язана апроксимаційна задача. Зокрема, так можна отримати математичний опис експериментальних статичних характеристик об'єктів регулювання, тобто у такому разі технології використовуються за їх прямим призначенням.

Водночас у них для користувача передбачено можливість самостійного конструювання апроксимуючої функції бажаного вигляду. Це і є головною передумовою нетривіального використання цих технологій, наприклад, для отримання математичних моделей об'єкта за його експериментальними перехідними або імпульсними характеристиками. У цій статті досліджується другий з названих варіантів як такий, що має істотні переваги.

За такого підходу задача ідентифікації розв'язується так. Спочатку обирається вид апроксимуючої передавальної функції об'єкта у формі зображення Лапласа (з числом невідомих коефіцієнтів ≤ 6 , що цілком достатньо для практики). Перехід у часову область здійснюється за допомогою рівняння імпульсної характеристики, що відповідає обраній математичній моделі об'єкта. перехідної характеристики. З використанням згаданих програм рівняння імпульсної характеристики $w(t)$ задається і розглядається як апроксимуюча функція, коефіцієнти якої, що залежать від параметрів моделі об'єкта, необхідно підібрати так, щоб забезпечувалася достатня точність апроксимації.

Отже, знаходження математичної моделі об'єкта перетворюється на відому математичну задачу апроксимації табличних даних аналітичними виразами з максимально можливою точністю. При цьому час t у рівнянні імпульсної характеристики розглядається як аргумент x апроксимуючої функції, тобто $f(x) \equiv w(t)$. Власне для розв'язання таких задач і розроблено згадані програмні засоби.

Проте при обробці 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 імпульсним характеристикам найчастіше використовуваних математичних моделей об'єкта. Остання вимога диктується необхідністю створення можливостей використання для синтезу автоматичних систем вже відомих або спрощення розроблення нових методів.

При практичному застосуванні описаного способу апроксимації експериментальних імпульсних характеристик об'єкта потрібно користуватися таблицями зворотних перетворень Лапласа дробово-раціональних функцій, наведеними, зокрема в роботі [9], що значно спрощує розв'язання задачі ідентифікації. У такому разі при виборі структури моделі об'єкта, тобто його передавальної функції, необхідно керуватися відомими з теорії керування залежностями, які описують взаємозв'язок між імпульсною $w(t)$, перехідною $h(t)$ та передавальною $W(s)$ функціями:

$$L[w(t)] = W(s); w(t) = L^{-1}[W(s)]; s \cdot L[h(t)] = L[w(t)]; w(t) = dh(t)/dt. \quad (1)$$

Отже, при користуванні таблицями структури моделей об'єктів із самовирівнюванням на підставі залежностей (1) повинні вибиратися за імпульсними характеристиками, яким відповідають

передавальні функції, у яких відсутня вільна комплексна змінна s у знаменнику, а для об'єктів без самовирівнювання вибирати апроксимуючі залежності необхідно відповідно до виразів

$$w(t) = L^{-1}\left[W_o(s)/s^{\nu-1}\right]; \quad w(t) = \varepsilon \cdot L^{-1}\left[W_o(s)/s^{\nu-1}\right]. \quad (2)$$

Вирази (1) і (2) показують, що ідентифікувати об'єкт за методом ЕМІО можна безпосередньо за його експериментальною імпульсною характеристикою без перебудови на криву розгону.

Необхідно зауважити, що із застосуванням методу ЕМІО для отримання математичної моделі об'єкта шляхом апроксимації його імпульсної характеристики жодними проблем не виникає, оскільки в уже згадуваних таблицях, крім перехідних, подаються також імпульсні характеристики, які відповідають різним дробово-раціональним передавальним функціям. Найуживаніші математичні моделі об'єктів та їхні імпульсні характеристики подано в табл. 1 і 2, а для знаходження складніших моделей необхідно використовувати таблиці зворотних перетворень Лапласа, які подано в [9].

Таблиця 1

Передавальні функції та імпульсні характеристики об'єктів із самовирівнюванням

№ з/п	Передавальна функція	Апроксимуюча функція $w(t) = d y(t) / dt$	Параметри
1	$W_o(s) = \frac{K_o}{Ts + 1} e^{-\tau s}$	$w(t) = \frac{K_o}{T} \exp\left(-\frac{t-\tau}{T}\right), t > \tau$	K_o, T, τ
2	$W_o(s) = \frac{K_o}{(Ts + 1)^2} e^{-\tau s}$	$w(t) = \frac{K_o(t-\tau)}{T^2} \exp\left(-\frac{t-\tau}{T}\right), t > \tau$	K_o, T, τ
3	$W_o(s) = \frac{K_o e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$ $T_1 \neq T_2$	$w(t) = \frac{K_o}{T_1 - T_2} \left[\exp\left(-\frac{t-\tau}{T_1}\right) - \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_2}\right) \right],$ $t > \tau,$	$K_o, \tau, T_1,$ T_2
4	$W_o(s) = \frac{K_o}{(Ts + 1)^2}$	$w(t) = \frac{K_o t}{T^2} \exp\left(-\frac{t}{T}\right)$	K_o, T
5	$W_o(s) = \frac{K_o}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$ $T_1 \neq T_2$	$w(t) = \frac{K_o}{T_1 - T_2} \left[\exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) - \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right]$	$K_o,$ T_1, T_2
6	$W_o(s) = \frac{K_o}{(Ts + 1)^n}$	$w(t) = \frac{K_o t^{n-1}}{(n-1)! \cdot T^n} \exp\left(-\frac{t}{T}\right)$	K_o, T

Таблиця 2

Передавальні функції та імпульсні характеристики об'єктів без самовирівнювання

	Передавальна функція	Апроксимуюча функція $w(t) = d y(t) / dt$	Парам. об'єкта
1	$W_o(s) = \frac{\varepsilon}{s(Ts + 1)}$	$w(t) = \varepsilon \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right]$	ε, T
2	$W_o(s) = \frac{\varepsilon}{s(Ts + 1)} e^{-\tau s}$	$w(t) = \varepsilon \left[1 - \exp\left(-\frac{t-\tau}{T}\right) \right]$	ε, τ, T
3	$W_o(s) = \frac{\varepsilon \cdot e^{-\tau s}}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$	$w(t) = \varepsilon \left[1 + \frac{T_1}{T_2 - T_1} \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_1}\right) - \frac{T_2}{T_2 - T_1} \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_2}\right) \right]$	$\varepsilon, \tau,$ T_1, T_2

У табл. 2. ε – це швидкість розгону об’єкта, тобто максимальна ustalена швидкість зміни його вихідної величини за ступінчастою зміною вхідної величини. Розмірність ε визначається як (розмірність вихідної величини/розмірність вхідної величини), помножена на c^{-1} , і для об’єкта без самовирівнювання ε розглядається як його коефіцієнт підсилення.

Для об’єктів високого порядку в процесі апроксимації необхідно задавати рівняння імпульсної характеристики у розгорненому вигляді з урахуванням прийнятого значення показника n . Наприклад, при $n = 6$ імпульсна характеристика описується рівнянням

$$w(t) = \frac{K_o t^5}{120T^6} \exp\left(-\frac{t}{T}\right). \quad (3)$$

Параметри моделі об’єкта на основі імпульсної характеристики можна знайти за методом площ безпосередньо або з її перебудовою у криву розгону за допомогою відомих графоаналітичних методів, але похибки при цьому можуть сягати 10 % і більше.

Набагато краще цю задачу можна розв’язати, застосовуючи метод ЕМІО, якщо використати рівняння апроксимуючої імпульсної характеристики з урахуванням коефіцієнта підсилення об’єкта, розглядаючи його як одну із змінних, що підлягають визначенню.

Приклад 1. Візьмемо за основу об’єкт, експериментальні імпульсну $w_e(t)$ та перехідну $y_e(t)$ характеристики якого наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Експериментальні перехідні та імпульсні характеристики об’єкта

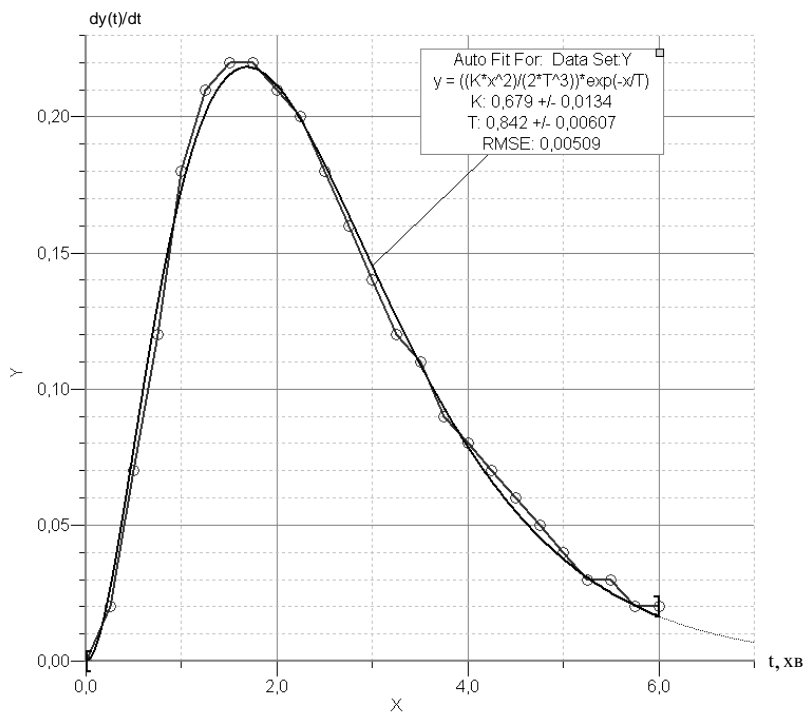
Час, хв	$w_e(t)$	$y_e(t)$	Час, хв	$w_e(t)$	$y_e(t)$	Час, хв	$w_e(t)$	$y_e(t)$
0	0	0,0	2,25	0,20	0,43	4,5	0,06	0,63
0,25	0,02	0,02	2,5	0,18	0,46	4,75	0,05	0,64
0,5	0,06	0,06	2,75	0,16	0,50	5,0	0,04	0,65
0,75	0,12	0,12	3,0	0,14	0,53	5,25	0,03	0,65
1,0	0,18	0,18	3,25	0,12	0,55	5,5	0,03	0,66
1,25	0,21	0,23	3,5	0,11	0,57	5,75	0,02	0,66
1,5	0,22	0,28	3,75	0,09	0,59	6,0	0,02	0,67
1,75	0,22	0,34	4,0	0,08	0,61	–	–	–
2,0	0,21	0,39	4,25	0,07	0,62	–	–	–

Після уведення експериментальних даних і виконання програми визначаються невідомі коефіцієнти апроксимуючої функції (отже, й параметри моделі об’єкта), подаються її рівняння і вигляд порівняно з експериментальною кривою, вказується досягнута точність апроксимації за критерієм $RMSE$, а також похибки визначення коефіцієнтів моделі. Отже, легко реалізуються різні варіанти апроксимації експериментальної імпульсної характеристики, з яких можна обрати найкращий за прийнятим критерієм точності та візуальною оцінкою.

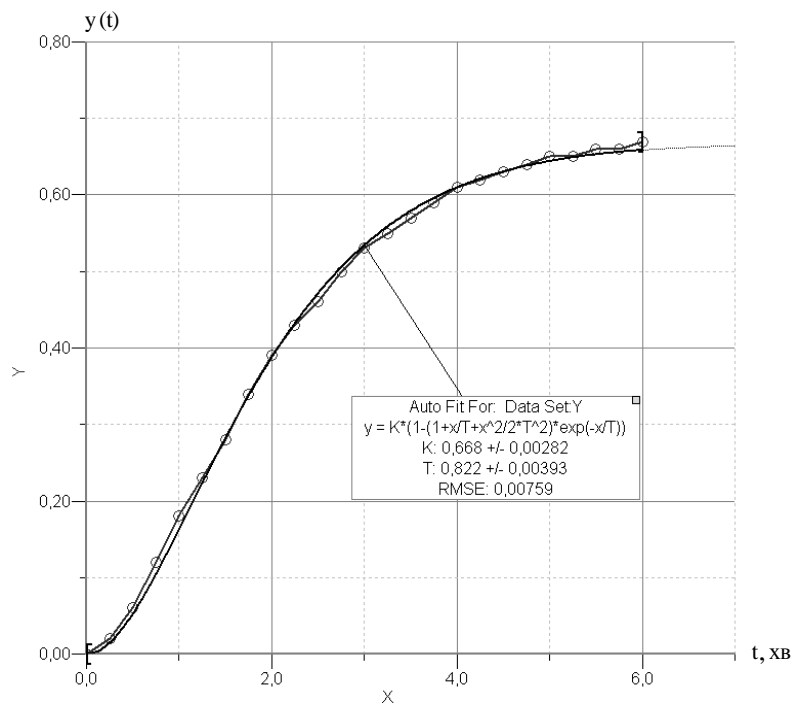
Дослідження різних можливих варіантів апроксимації характеристик (табл. 3) за методом ЕМІО показали, що найкращих результатів отримують, коли заданий об’єкт апроксимується моделлю $W_o(s) = K_o / (Ts + 1)^3$, якій відповідають рівняння імпульсної та перехідної характеристик

$$w(t) = K_o \frac{t^2}{2T^3} \exp\left(-\frac{t}{T}\right); \quad y(t) = K_o \left[1 - \left(1 + \frac{t}{T} + \frac{t^2}{2T^2} \right) e^{-\frac{t}{T}} \right]. \quad (4)$$

Результати апроксимації експериментальних характеристик, наведених у табл. 3, у такому вигляді, як вони надаються користувачу, показано на рис. 4.



a



б

Рис. 4. Експериментальні імпульсна (а) та перехідна (б) характеристики об'єкта та їх апроксимація моделлю $W_o(s) = K_o / (Ts + 1)^3$

Розглянутий приклад переконливо доводить, по-перше, що при апроксимації імпульсних характеристик за методом ЕМІО одночасно можуть бути визначені усі параметри моделі об'єкта, у тому числі, його коефіцієнт підсилення. По-друге, існує досить тісна кореляція між параметрами моделі об'єкта, визначеними за імпульсною та перехідною характеристиками, а деякі розбіжності, обумовлені переважно недостатньою точністю експериментальних даних, з практичного погляду несуттєві. Отже, коректність та ефективність методу ЕМІО підтверджується повністю.

Цей метод так само успішно може бути використано і для знаходження за експериментальною імпульсною характеристикою моделей об'єктів без самовирівнювання.

Приклад 2. Виконаємо апроксимацію експериментальної кривої розгону $y_e(t)$ об'єкта без самовирівнювання, заданої у табл. 4 [10]. Там же подано імпульсну характеристику цього об'єкта $w(t)$, обчислену для його моделі $W_o(s) = \varepsilon / (Ts + 1)s$, якій відповідають рівняння перехідної та імпульсної характеристик

$$y(t) = \varepsilon \left[t - T \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \right], \frac{MM}{(m/\text{год}) \cdot c}; \quad w(t) = \varepsilon \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right], \frac{MM}{(m/\text{год}) \cdot c}.$$

Таблиця 4

**Експериментальна крива розгону об'єкта без самовирівнювання
(зміна рівня в барабані котлоагрегату за зміни витрати живильної води)**

Час, с	$y_e(t)$	$w(t)$	Час, с	$y_e(t)$	$w(t)$	Час, с	$y_e(t)$	$w(t)$
0	0	0	75	12,5	0,327	200	72,8	0,582
25	2,46	0,131	100	23,5	0,400	250	104	0,631
50	7,21	0,239	150	44,5	0,509	300	135	0,665

Результати апроксимації цих характеристик за методом ЕМІО відображено на рис. 5 та 6, з якого видно, що вони збігаються абсолютно. Ідеальний збіг результатів у цьому випадку пояснюється тим, що була апроксимована не експериментальна імпульсна характеристика, а характеристика, обчислена при параметрах, знайдених за кривою розгону. Проте це ще раз підтверджує, що метод ЕМІО дає можливість визначити модель об'єкта та її параметри як за експериментальною перехідною, так і за експериментальною імпульсною характеристиками.

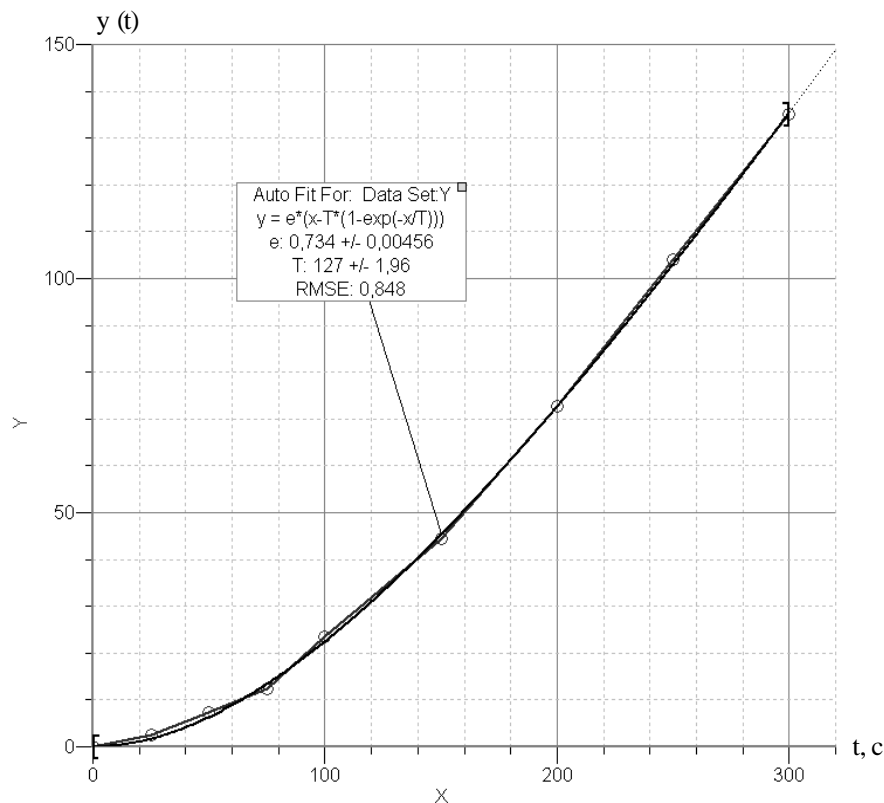


Рис. 5. Перехідна (а) та імпульсна (б) характеристики об'єкта без самовирівнювання $W_o(s) = \varepsilon / (Ts + 1)s$

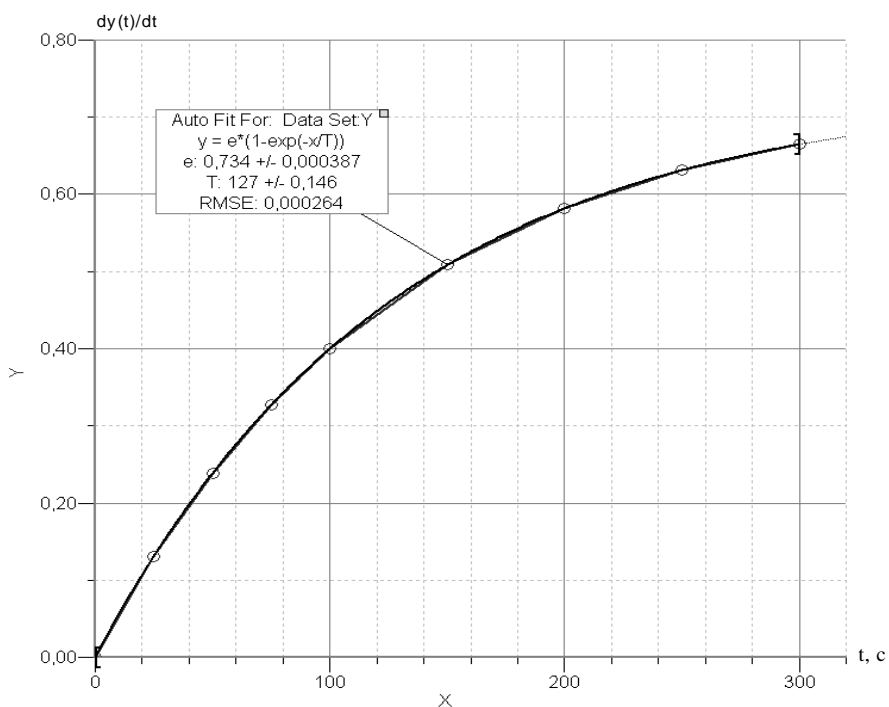


Рис. 6. Імпульсна характеристики об'єкта без самовирівнювання $W_o(s) = \varepsilon / (Ts + 1) s$

Отже, згадані переваги і отримані результати дають підстави стверджувати, що саме імпульсні характеристики найдоцільніше використовувати при експериментальному дослідженні динаміки об'єктів.

Висновки

Запропонований метод дає змогу ефективно розв'язати переважну більшість практичних задач ідентифікації промислових об'єктів і при використанні їх імпульсних характеристик має низку переваг:

- апроксимація експериментальних даних здійснюється за допомогою вже існуючих інформаційних технологій і відомих математичних залежностей, що значно спрощує цей процес;
- передавальна функція об'єкта та її параметри можуть бути визначені безпосередньо за експериментальною імпульсною характеристикою без її перебудови у криву розгону;
- простота апроксимації, завдяки чому користувач має можливість зосередити більшу увагу на виборі адекватної структури моделі об'єкта;
- висока точність апроксимації, обумовлена 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 достатньо рівномірно;
- універсальність, обумовлена можливістю апроксимації експериментальних імпульсних характеристик об'єктів з різними динамічними властивостями ($\rho \geq 0$; $\tau \geq 0$);
- завдяки можливості ідентифікації об'єкта лише за рахунок короткочасного впливу на нього (тобто за імпульсною характеристикою) відкриваються добрі перспективи щодо удосконалення процесів автоматичного налагодження параметрів регуляторів в АСР.

Отже, внаслідок низької точності та трудомісткості традиційних графічних і графоаналітичних методів обробки результатів активного експерименту з визначення динамічних властивостей промислових об'єктів регулювання перевагу слід надавати автоматизованій ідентифікації, зокрема за методом ЕМЮ.

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. Наладка средств автоматизации и

автоматических систем регулирования / Под ред. А.С. Ключева. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с. 4. A. O'Dwyer. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules (2nd Edition), Dublin Inst. Technol., 2006, 545 p. 5. Кубрак А. И., Жученко А.И., Кваско М.З. Комп'ютерне моделювання та ідентифікація автоматичних систем: навч. посібник. – К.: Політехніка, 2004. – 424 с. 6. Голінко І.М., Ковриго Ю.М. Аналіз гібридної системи керування за імпульсною характеристикою об'єкта // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2010. – № 2(49). – С. 30–33. 7. Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MATLAB 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с. 8. Graphical Analysis 3 [<http://www.vernier.com/soft/ga.html> (“International” page)]. 9. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем. – СПб.: БХВ – Петербург, 2004.- 640 с. 10. Стефани Е.П. и др. Сборник задач по основам автоматического регулирования теплоэнергетических процессов. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.

УДК 621.317.7

Р. Кочан¹, О. Нечай²

¹Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем,

²Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного,
кафедра електромеханіки та електроніки

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОЇ НЕЛІНІЙНОСТІ ОДНОБІТНОГО СИГМА-ДЕЛЬТА МОДУЛЯТОРА ТРЕТЬОГО ПОРЯДКУ

© Кочан Р., Нечай О., 2013

Розроблено імітаційну модель однобітного сигма-дельта модулятора третього порядку, що дає змогу дослідити вплив параметрів компонентів модулятора на функцію перетворення модулятора загалом. За допомогою розробленої моделі досліджено вплив нелінійності інтеграторів на нелінійність модуляторів третього порядку з різними параметрами. Отримані результати дають змогу оптимізувати параметри інтеграторів для мінімізації нелінійності функції перетворення сигма-дельта модуляторів третього порядку, а також цілеспрямовано вибирати коригувальну функцію при корекції нелінійної складової похибки аналого-цифрових перетворювачів на основі таких модуляторів.

Ключові слова: сигма-дельта модулятор, інтегральна нелінійність, імітаційне моделювання.

There is developed the simulation model of single bit third order sigma-delta modulator. This model provides investigation the influence of components' parameters on whole modulator's parameters. There was investigated the modulator's nonlinearity dependence of integrators' nonlinearity for single bit third order sigma-delta modulators with different parameters. The obtained results allow to make optimization of integrators' parameters for minimization the nonlinearity of third order sigma-delta modulator and rationally select the correction function for correction the nonlinear error of analog to digital converters based on these modulators.

Key words: sigma-delta modulator, integral nonlinearity, simulation.

Вступ

Поширення засобів обчислювальної техніки та алгоритмів цифрового опрацювання сигналів призвело до того, що аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) стали необхідним компонентом практично всіх вимірювальних систем. В системах вимірювання електричних величин власне метрологічні характеристики АЦП визначають характеристики системи загалом, тому покращення параметрів АЦП є актуальною задачею.