

АВТОМАТИЗОВАНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ РЕГУЛЮВАННЯ ЗА ЇХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ІМПУЛЬСНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

© Ковела І.М., Вітер О.С., Стахів Р.І., Яцук Ю.В., 2014

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 to obtain the transfer functions of the objects based on their experimental impulse response is presented. The identification problem is reduced to a mathematical problem of approximation of experimental data by the analytic expressions and to solving it using information technologies.

Automatic processing of experimental impulse response in order to obtain the mathematical model of control object can be done in various ways. In certain studies the problem of identification using impulse response is solved by means of mathematical optimization techniques and by means of specialized software that is complicated and is restricted for practical use.

In order to address these shortcomings a new more versatile method of automated identification of objects by experimental impulse response is proposed in the paper.

The proposed method can effectively solve the vast majority of practical problems of identification of industrial facilities. The use of the impulse response has a number of advantages.

Key words: transfer function, approximations, information technologies.

Вступ

Вибір структури і визначення параметрів математичної моделі об'єкта регулювання (ММ ОР) є одним з основних завдань, які потребують першочергового виконання під час розроблення автоматичних систем. Доволі розповсюдженим способом отримання ММ ОР є активний експеримент у розімкненому або замкненому контурі, за допомогою якого визначаються імпульсні характеристики (ІХ), які описують реакцію об'єкта на імпульсний вхідний сигнал. Цей процес складний і трудомісткий, тому його автоматизація є актуальною.

Постановка завдання

Промислові об'єкти як динамічні ланки автоматичних систем регулювання (АСР) дуже різноманітні за своїми динамічними властивостями і в найзагальнішому випадку можуть бути описані передавальною функцією (ПФ) такого вигляду:

$$W_o(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = K_o \frac{\prod_{j=0}^m (T_j s + 1)}{s^{n_o} \prod_{i=1}^n (T_i s + 1)} e^{-t s}, \quad m \leq n, \quad (1)$$

де $Y(s)$ – вихідна (регульована) величина; $U(s)$ – регулювальний сигнал; K_o , n_o – коефіцієнт підсилення та порядок астатизму об'єкта; T_i, T_j – сталі часу; t – час запізнення, яке може складатися з перехідного t_{π} і транспортного t_m запізнення.

Оператор (1) дає змогу відобразити властивості широкого класу об'єктів, як з S -подібними перехідними характеристиками (ПХ), так і з ПХ, що мають екстремум. Найпоширенішими є об'єкти, які описуються передавальними функціями виду (1), але "без чисельника", і тому їхні перехідні характеристики мають монотонний характер. Крім того, об'єкти можуть мати або не мати властивості самовирівнювання, тобто $r \geq 0$. Зазначені особливості об'єктів зумовлюють складність задачі їх ідентифікації за експериментальними імпульсними або перехідними характеристиками.

Імпульсні характеристики застосовуються для експериментального дослідження об'єктів, які за умовами технології не допускають тривалих відхилень регульованої величини або містять інтегральні ланки. Імпульсну характеристику називають також ваговою функцією і переважно позначають як $w(s)$. Істотна перевага ІХ порівняно з ПХ полягає також у зменшенні тривалості тестового сигналу та відхилення регульованої величини під час експериментального дослідження динаміки об'єктів як з самовирівнюванням r , так і без нього (рис. 1).

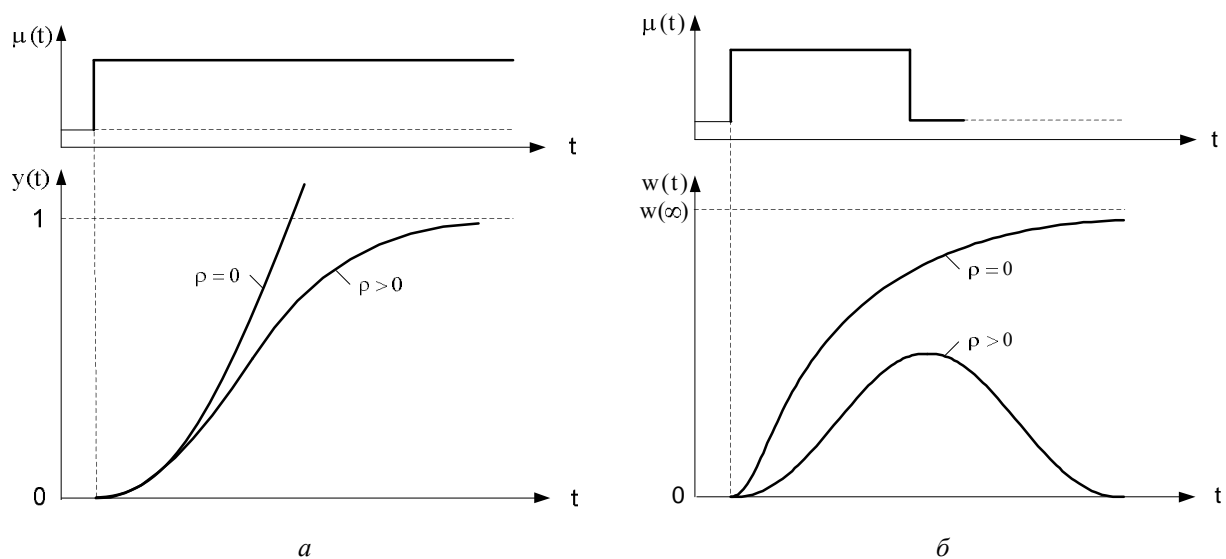


Рис. 1. Перехідні (а) та імпульсні (б) характеристики об'єктів регулювання

Проте імпульсні характеристики доволі важко використати безпосередньо у процесі синтезу АСР, оскільки переважна більшість відомих методів синтезу систем з типовими регуляторами [4] орієнтовані на використання ММ ОР у вигляді передавальних функцій. Отже, виникає задача апроксимації експериментальних імпульсних характеристик передавальними функціями, які адекватно відображали б динамічні властивості об'єкта з достатньою точністю і були б придатними для застосування обраного методу параметричного синтезу системи, що функціонує за відповідним алгоритмом.

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

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

Основний зміст

Методика проведення і обробки результатів експерименту з визначення імпульсних характеристик об'єкта у загальних рисах майже така сама, як і під час визначення кривих розгону [1–3].

Амплітуда тестового імпульсу на практиці завжди обмежена. Для теплових об'єктів переважно такою межею є потужність нагрівача. За обмеженої амплітуди імпульсу його тривалість залежить від співвідношення сигнал/шум на виході об'єкта, тому її вибирають, по можливості, більшою. Проте вона повинна бути меншою, ніж p/w_p , щоб найважливіша частина АЧХ об'єкта була зумовлена рівномірною частиною тестового сигналу.

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

У [2] звертається увага на велику різницю в реакції об'єктів першого та вищих порядків на імпульсний сигнал порівняно з реакцією на одиничний стрибок, що дає можливість підвищити точність ідентифікації об'єктів високого порядку. Це позитивна обставина, з огляду на те, що рівняння ІХ об'єктів високого порядку набагато простіші, ніж рівняння ПХ. Завдяки цьому апроксимація імпульсних характеристик теж спрощується.

Зазвичай експериментальну ІХ графічним способом чи за допомогою її числового диференціювання перебудовують у криву розгону, яку потім використовують для розрахунків АСР. Проте отримати ПХ 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, мають несиметричні перехідні характеристики (наприклад, під час нагрівання та охолодження). Тому бажано визначати структуру і параметри моделі об'єкта безпосередньо за його імпульсною характеристикою.

Запропонований 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 назвемо умовно: експериментально-математична ідентифікація 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 ММ ОР, тому що це пов'язано з подальшим вибором алгоритму регулювання і методу параметричного синтезу системи.

Найширші можливості у плані автоматизації обробки результатів активного експерименту з дослідження динаміки об'єктів відкриваються під час використання 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 цього критерію. Крім того, треба враховувати ще й візуальну оцінку якості апроксимації. Для детальнішої оцінки точності апроксимації доцільно обчислити відносні похибки d_i у кожній вузловій точці апроксимуючої імпульсної характеристики $w_a(t)$.

Згадані 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 передбачена можливість самостійного конструювання апроксимуючої функції бажаного вигляду. Це і є головною передумовою для нетривіального використання цих технологій, наприклад, для отримання математичних моделей об'єкта за його

експериментальними імпульсними чи перехідними характеристиками. У цій роботі досліджується перший 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 (з числом невідомих коефіцієнтів ≤ 6 , що цілком достатньо для практики). Перехід у часову область здійснюється за допомогою рівняння імпульсної характеристики, що відповідає обраній ММ ОР. Під час використання згаданих програм рівняння імпульсної характеристики $w(t)$ задається і розглядається як апроксимуюча функція, коефіцієнти якої, що залежать від параметрів моделі ОР, 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 рівнянні імпульсної характеристики розглядається, як аргумент x апроксимуючої функції, тобто $f(x) \equiv w(t)$. Власне для розв'язання таких задач і розроблені згадані програмні засоби.

Проте під час оброблення 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 ММ ОР. Остання вимога диктується необхідністю створення можливостей використання для синтезу автоматичних систем вже відомих або спрощення розробки нових методів.

Під час практичного застосування описаного способу апроксимації експериментальних ІХ об'єкта потрібно користуватися таблицями зворотних перетворень Лапласа, наведеними, зокрема, в [9], що значно спрощує розв'язок задачі ідентифікації. При цьому необхідно брати до уваги відсутність чи наявність самовирівнювання, а також перехідного і(або) транспортного запізнення в об'єкті. У такому разі під час вибору структури ММ ОР, тобто його ПФ, необхідно керуватися відомими з теорії керування залежностями, які описують взаємозв'язок між ваговою $w(t)$, перехідною $h(t)$ та передавальною $W(s)$ функціями:

$$L[w(t)] = W(s); \quad w(t) = L^{-1}[W(s)]; \quad s \cdot L[h(t)] = L[w(t)]; \quad w(t) = dh(t)/dt. \quad (2)$$

Отже, користуючись таблицями структури моделей об'єктів з самовирівнюванням, на підставі (2) повинні вибиратися за імпульсними характеристиками, яким відповідають ПФ, у яких відсутня вільна комплексна змінна s у знаменнику, а для ОР без самовирівнювання вибір апроксимуючих залежностей необхідно здійснювати відповідно до виразів:

$$w(t) = L^{-1}\left[W_o(s)/s^{n-1}\right]; \quad w(t) = e \cdot L^{-1}\left[W_o(s)/s^{n-1}\right]. \quad (3)$$

Вирази (2) і (3) показують, що ідентифікацію об'єкта за методом ЕМІО можна здійснити безпосередньо за його експериментальною імпульсною характеристикою без її перебудови у криву розгону.

Параметри моделі об'єкта на основі імпульсної характеристики можуть бути знайдені за методом площ безпосередньо або з її перебудовою у криву розгону за допомогою відомих графоаналітичних методів, але похибки при цьому можуть досягати 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 імпульсна $w_e(t)$ та перехідна $y_e(t)$ характеристики якого наведені у табл. 1.

Після уведення експериментальних даних і виконання програми визначаються невідомі коефіцієнти апроксимуючої функції (отже, й параметри ММ ОР), подається її рівняння і вигляд порівняно з експериментальною кривою вказується досягнута точність апроксимації за критерієм

RMSE, а також похибки визначення коефіцієнтів моделі. В такий спосіб легко реалізуються різні варіанти апроксимації експериментальної імпульсної характеристики, з яких можна обрати найкращий за прийнятим критерієм точності та візуальною оцінкою.

Таблиця 1

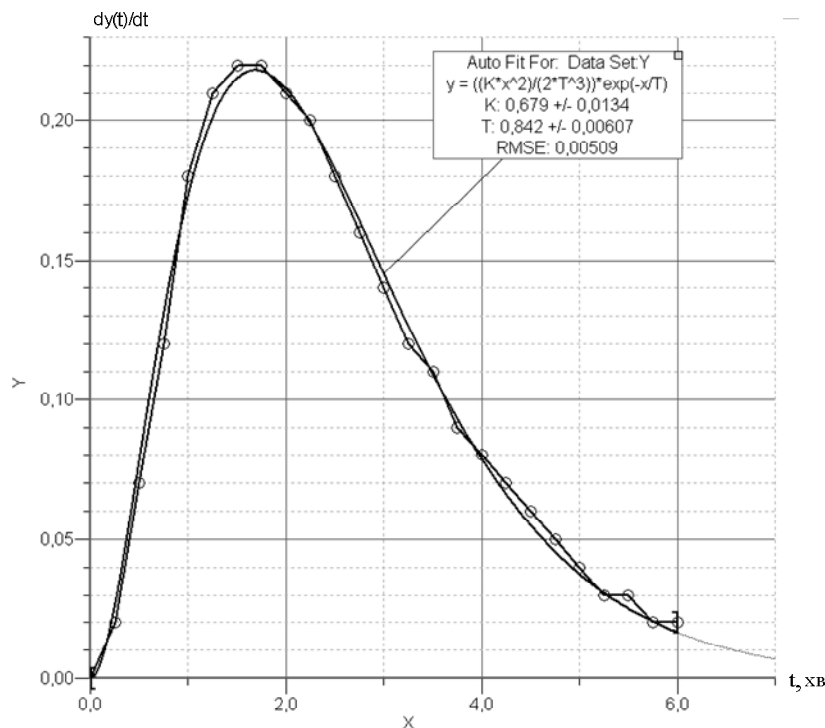
Експериментальні перехідні та імпульсні характеристики об'єкта

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	-	-	-

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

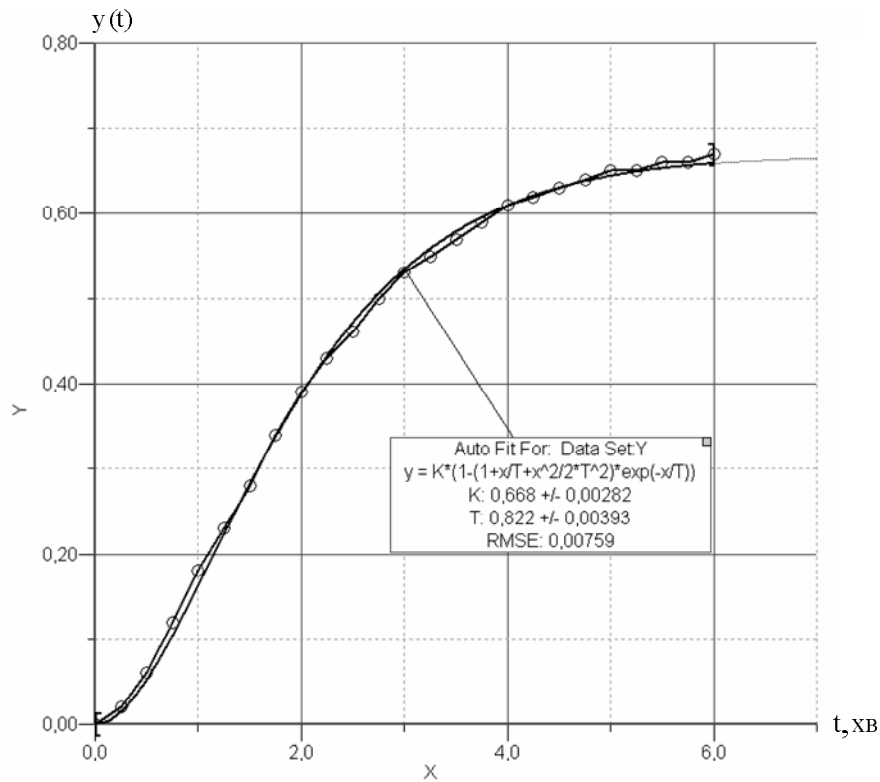
$$w(t) = K_o \frac{t^2}{2T^3} \exp\left(-\frac{t}{T}\right); \quad y(t) = K_o \left[1 - \left(1 + \frac{t}{T} + \frac{t^2}{2T^2} \right) e^{-\frac{t}{T}} \right]. \quad (4)$$

Результати апроксимації експериментальних характеристик, наведених у табл. 1, в такому вигляді, як вони надаються користувачу, показані на рис. 2.



а

Рис. 2. Експериментальні імпульсна (а) та перехідна (б) характеристики об'єкта та їх апроксимація моделлю $W_o(s) = K_o / (Ts + 1)^3$



б

Рис. 2. (продовження). 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 за апроксимації імпульсних характеристик за методом ЕМІО одночасно можуть бути визначені усі параметри моделі об'єкта, у тому числі і його коефіцієнт підсилення. По-друге, існує доволі тісна кореляція між параметрами моделі об'єкта, визначеними за імпульсною та перехідною характеристиками, а деякі розбіжності, зумовлені переважно недостатньою точністю експериментальних даних, з практичного погляду несуттєві. Отже, коректність та ефективність методу ЕМІО підтверджується повністю.

Цей метод так само успішно може бути використаний 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. 2 [10]. Там же подається імпульсна характеристика цього об'єкта $w(t)$, обчислена для його моделі $W_o(s) = e / (Ts + 1)s$, якій відповідають рівняння перехідної та імпульсної характеристик:

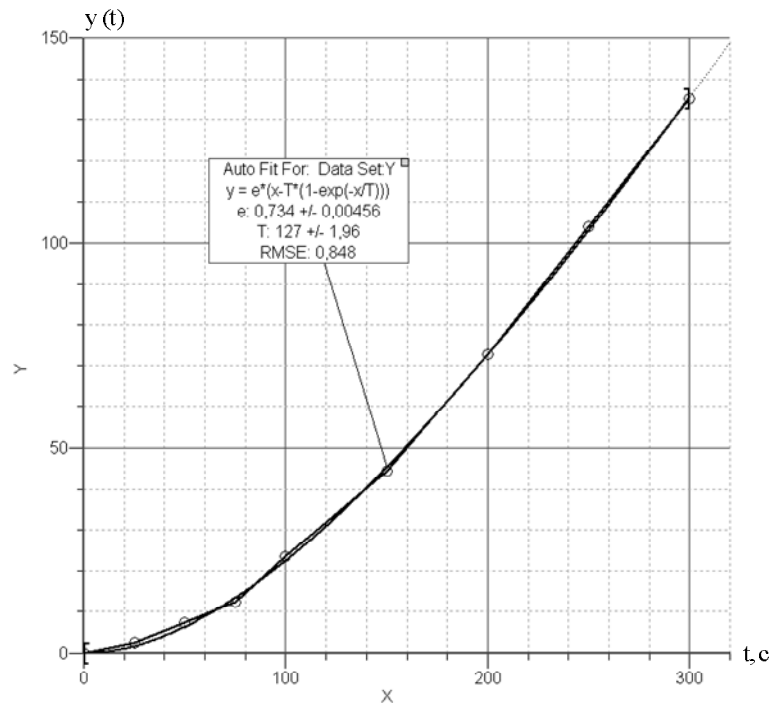
$$y(t) = e \left[t - T \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \right], \frac{\text{мм}}{(\text{т/год}) \cdot \text{с}}; \quad w(t) = e \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right], \frac{\text{мм}}{(\text{т/год}) \cdot \text{с}},$$

де e – швидкість розгону, яка для об'єктів без самовирівнювання розглядається як його коефіцієнт підсилення, і у цьому прикладі розмірність $\text{мм}/(\text{т/год}) \cdot \text{с}$.

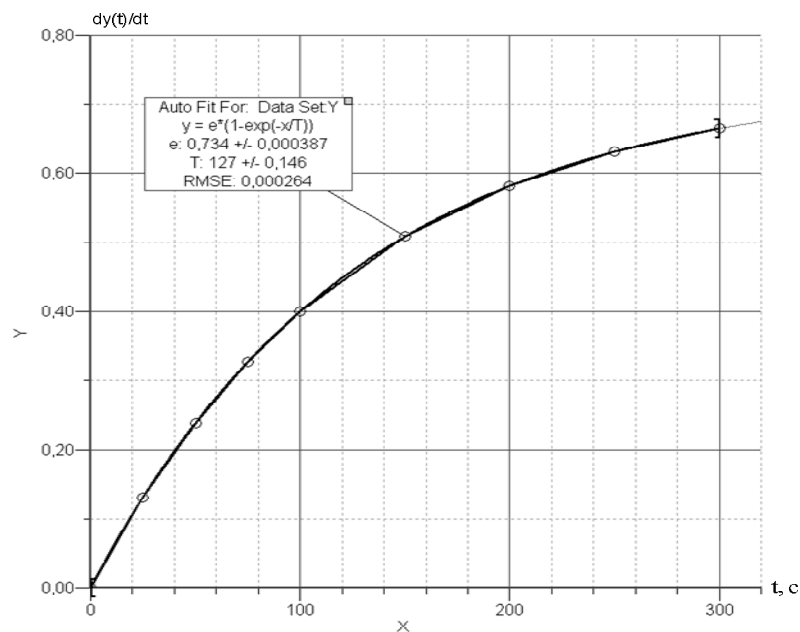
Результати апроксимації цих характеристик за методом ЕМІО відображені на рис. 3, з якого зрозуміло, що вони збігаються абсолютно. Ідеальний збіг результатів у цьому випадку пояснюється тим, що була апроксимована не експериментальна імпульсна характеристика, а характеристика, обчислена за параметрів, 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.

**Експериментальна крива розгону об'єкта без самовирівнювання
(зміна рівня в барабані котлоагрегата 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



а



б

Рис. 3. Перехідна (а) та імпульсна (б) характеристики об'єкта без самовирівнювання $W_o(s) = e / (Ts + 1) s$

Отже, згадані переваги і отримані результати дають підстави стверджувати, що саме імпульсні характеристики найдоцільніше використовувати під час експериментального дослідження динаміки об'єктів.

Висновки

Запропонований метод дає змогу ефективно розв'язати переважну більшість практичних задач ідентифікації промислових об'єктів. Під час використання їх імпульсних характеристик він 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, зумовлена мінімізацією методичної похибки, причому забезпечується максимально можливе наближення апроксимуючої функції до експериментальної в усіх вузлових (а не лише в кількох обраних) точках, а похибка апроксимації у часовому діапазоні апроксимуючої функції розподілена доволі рівномірно;
- універсальність, зумовлена можливістю апроксимації експериментальних імпульсних характеристик об'єктів з різними динамічними властивостями ($r \geq 0$; $t \geq 0$);
- завдяки можливості ідентифікації об'єкта лише за рахунок короткочасного впливу на нього (тобто за імпульсною характеристикою) відкриваються добрі перспективи щодо удосконалення процесів автоматичного налаштування 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 потрібно надавати автоматизованій ідентифікації, зокрема, за методом ЕМІО.

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. Компьютерное моделирование та ідентифікація автоматичних систем: навч. посіб. – К.: Політехніка, 2004. – 424 с.
6. Голінко І.М., Ковриго Ю.М. Аналіз гібридної системи керування за імпульсною характеристикою об'єкта // Наукові вісті НТТУ "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. – СПб.: БХВ - Петербург, 2004. – 640 с.
10. Стефани Е.П. Сборник задач по основам автоматического регулирования теплоэнергетических процессов. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.