

УДК 681.5.015.8:519

І.М. Голінко, А.І. Кубрак

## ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТА ЗА ДИНАМІКОЮ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

In this paper, we consider the algorithm for calculating the object dynamic characteristics in the automatic control system. Specifically, the algorithm allows obtaining numerically pulse and transitive characteristics of the process relying on the reaction of a control system on the task change. The algorithm of this problem solving can be numerically applied by employing the Duhamel integral. Moreover, we consider the sample of this algorithm program implementation when modeling transients in the control system.

### Вступ

Розвиток комп'ютерної техніки за останні десятиріччя істотно вплинув на підходи та методи проектування автоматичних систем керування (АСК). Перспективним напрямом для налагодження АСК є використання імпульсної або перехідної характеристики об'єкта керування (ОК) [1, 2] як вхідної інформації, оскільки такий підхід виключає суб'єктивність етапу апроксимації динамічних властивостей ОК. Це прийнятно, якщо дослідник має у своєму розпорядженні масив ординат імпульсної або перехідної характеристики ОК.

Методи активного експерименту з курсу ідентифікації [3] дають можливість пошуку цих характеристик, але для діючого технологічного процесу це неприйнятно.

### Постановка задачі

Мета дослідження – розробити числовий метод пасивної ідентифікації для визначення імпульсної або перехідної характеристики ОК для одноконтурної АСК.

### Числове визначення імпульсної характеристики ОК

Структура одноконтурної АСК подана на рис. 1. АСК складається з ОК, суматора і регулятора, що в загальному вигляді реалізує лінійний закон ПІД-регулювання:

$$W_p(p) = K_R \left( 1 + \frac{1}{T_I p} + T_D p \right), \quad (1)$$

де  $K_R$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  – параметри настроювання ПІД-регулятора.

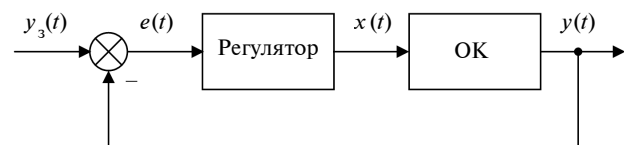


Рис. 1. Структура одноконтурної АСК:  $y_3(t)$  – сигнал завдання;  $e(t)$  – сигнал розузгодження;  $x(t)$  – сигнал керування;  $y(t)$  – вихідний сигнал ОК

Вважатимемо, що АСК вже функціонує. Регулятор певним чином налагоджений, тобто параметри  $K_R$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  відомі. З часом ОК може змінити свої динамічні властивості, тому будемо вважати що вони невизначені та ідентифікуються в ході роботи системи керування.

Поточна ідентифікація реалізується на промисловому контролері. У процесі роботи контролер вимірює регульований параметр  $y(t)$  і з кроком дискретизації  $d\tau$  формує масив даних вихідного сигналу. Будемо позначати елементи цього масиву так:

$$y_z = Hs[z]. \quad (2)$$

Завдання полягає у визначенні імпульсної характеристики ОК з тим самим кроком  $d\tau$

$$g_z = G[z]. \quad (3)$$

Вихід ОК, тобто сигнал  $y(t)$ , – це згортка сигналу  $x(t)$  з  $g(t)$ -імпульсною характеристикою ОК [4]:

$$y(t) = \int_0^t g(t-\tau)x(\tau) d\tau. \quad (4)$$

Алгоритм визначення ординат імпульсної характеристики полягає у послідовному (з кроком  $d\tau$ ) зіставленні  $y_z$  з сумою реакцій

об'єкта на послідовність імпульсів його вхідного сигналу  $x_z$ , помножених на  $d\tau$  (площа відповідного імпульсу) (див. рис. 2).

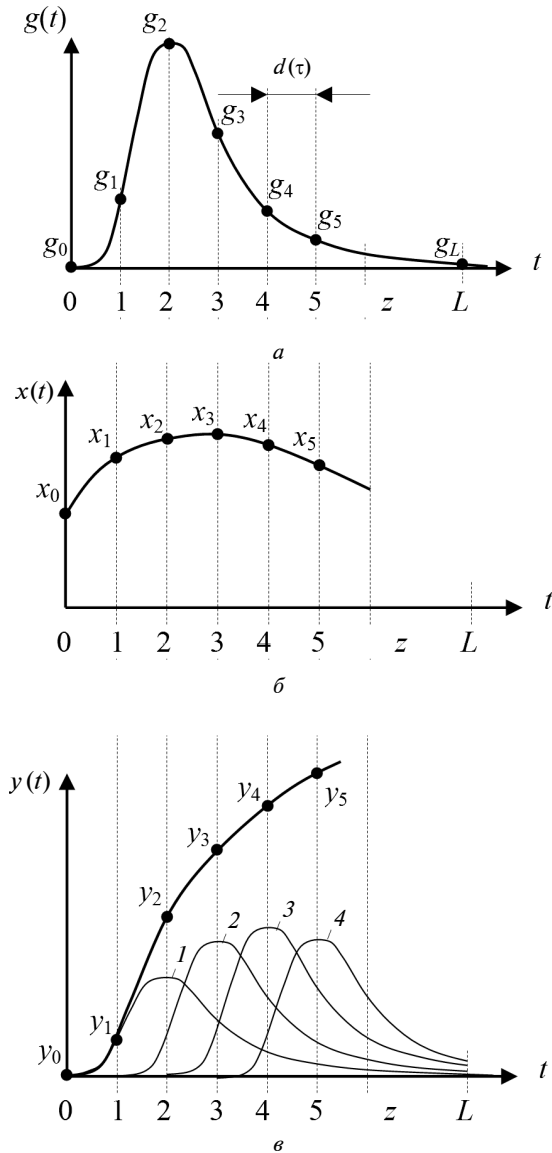


Рис. 2. Послідовне визначення ординат  $g_z$  імпульсної характеристики ОК: а – шукана імпульсна характеристика ОК; б – вхідний сигнал ОК; в – формування  $y(t)$  як суми реакцій на імпульси, на які розкладається вхідний сигнал: крива 1 –  $g(t)x_0 d\tau$ ; 2 –  $g(t-d\tau)x_1 d\tau$ ; 3 –  $g(t-2d\tau)x_2 d\tau$ ; 4 –  $g(t-3d\tau)x_3 d\tau$  і т.д.;  $y(t)$  – сума кривих 1, 2, 3, ...

Розглянемо формування імпульсної характеристики ОК для АСК із ПІД-регулятором при нульових початкових умовах  $y_0 = 0$ .

Для  $t = 0$  маємо

$$\begin{cases} e_{-1} = 0, \\ e_0 = y_3 - y_0 = y_3, \\ I_0 = 0, \\ x_0 = K_R \left( e_0 + \frac{I_0}{T_I} + T_D \frac{e_0 - e_{-1}}{d\tau} \right). \end{cases}$$

Вихід ОК становить  $y_1 = x_0 g_1 d\tau$ , звідки  $g_1 = (y_1/d\tau)/x_0$ .

Для  $t = d\tau$  маємо таку систему:

$$\begin{cases} e_1 = y_3 - y_1, \\ I_1 = I_0 + e_1 d\tau, \\ x_1 = K_R \left( e_1 + \frac{I_1}{T_I} + T_D \frac{e_1 - e_0}{d\tau} \right). \end{cases} \quad (6)$$

Вихід ОК становить  $y_2 = (x_0 g_2 + x_1 g_1)/d\tau$ , звідки  $g_2 = (y_2/d\tau - x_1 g_1)/x_0$ .

У загальному випадку імпульсна характеристика обчислюється як

$$g_z = \frac{\left( y_z/d\tau - \sum_{s=1}^z x_s g_{z-s} \right)}{x_0}, \quad 1 \leq z \leq L. \quad (7)$$

Взаємозв'язок між перехідною та імпульсною характеристикою [4]

$$h(t) = \int_0^{\infty} g(t) dt$$

дає можливість чисельно визначити перехідну характеристику ОК, якщо відомий масив імпульсної характеристики  $g_z$  за рекурентною залежністю:

$$h_z = h_{z-1} + g_z d\tau. \quad (8)$$

Розглянуті залежності (5)–(8) програмно реалізовані на мові Паскаль у процедурі GtaHta.

```

procedure GtaHta (Y:CoefL; varGa, Ha:CoefL);
var z,s: integer;
    Is,Es,Esp,Sum: real;
    X: CoefL;
begin
  L:=round(Y[-1]); Ga[-1]:=L;
  t:=0; dt:=Y[L+1]; Ga[L+1]:=dt;
  Is:=0; Es:=0;
  X[0]:=Kr*(Zd(0)-Y[0]);
  Ga[0]:=Y[0]/X[0];
  for z:=1 to L-1 do
    begin

```

```

t:=t+dt;
Esp:=Es; Es:=Zd(t)-Y[z];
Is:=Is+Es*dt;
X[z]:=Kr*(Esp+Is/Ti+Td*(Es-Esp)/dt);
Sum:=0;
for s=1 to z do Sum:=Sum+X[s]*Ga[z-s];
Ga[z]:=(Y[z]/dt-Sum)/X[0];
end;
Ha[-1]:=L; Ha[0]:=0; Ha[L+1]:=dt; Ga[L]:=0;
for z=1 to L do Ha[z]:=Ha[z-1]+Ga[z]*dt;
end;

```

Тут використовуються глобальні ідентифікатори параметрів настроювання регулятора  $K_r$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ . Процедурі передається масив вихідного сигналу системи керування  $Y$ , за яким вона розраховує масиви імпульсної  $G_a$  та перехідної  $H_a$  характеристик ОК. Крок дискретизації в часі  $dt$  також є глобальним ідентифікатором, який визначається в основній програмі відповідно до оператора  $dt:=D/L$ , де  $D$  – час спостереження перехідного процесу в АСК, а  $L$  – кількість точок спостереження ( $0 < L < 601$ ). Тип для масивів  $X$ ,  $Y$ ,  $G_a$ ,  $H_a$  вибирався із врахуванням кроку дискретизації  $dt$  (type CoefL = array [-1..601] of real).

У процедурі `GtaHta` використовується функція `Zd`, яка задає закон зміни в часі завдання регулятора.

```

function Zd(t:real):real;
begin
  case Nz of
    1: Zd:=Az;
    2: Zd:=Az*cos(Wz*t);
    3: if t<=Dz then Zd:=Az
       else Zd:=0;
    4: if sin(Wz*t)>0 then Zd:=Az
       else Zd:=-Az;
  end;
end;

```

Функція `Zd` дає змогу задавати ступеневий, гармонічний, імпульсний або пульсуючий сигнали завдання з амплітудою  $A_z$ . З урахуванням завдання і масиву вихідного сигналу  $Y$  для системи керування визначається масив сигналу керування  $X$ , що використовується у (7). Таким чином, для діючої АСК на основі контролю зміни в часі завдання та вихідного параметра за залежністю (7) або (8) можна визначити імпульсну або перехідну характеристику ОК відповідно.

Як приклад застосування методу розраховано імпульсну та перехідну характеристики ОК при одиничній ступеневій зміні завдання АСК (див. рис. 3). Отриманий перехідний процес забезпечується такими характеристиками

динамічних ланок у системі керування:  $W_p(p) = 0,8 \left( 1 + \frac{1}{15p} \right)$ ,  $W_{ок}(p) = \frac{1}{25p^2 + 10p + 1} e^{-10p}$ . За

цим процесом при ступеневому одиничному збуренні завдання проводилося моделювання ідентифікації перехідної характеристики ОК. Результати моделювання подано на рис. 4.

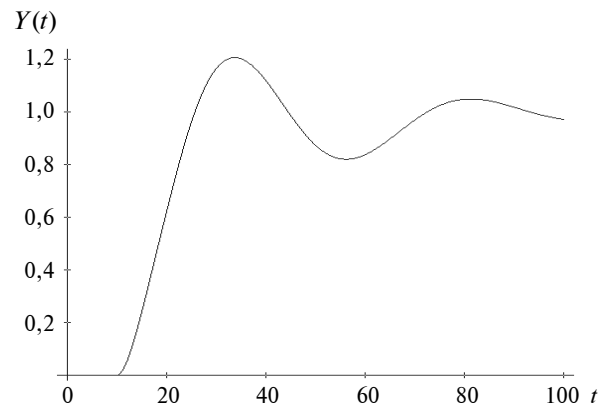


Рис. 3. Перехідний процес в АСК при одиничній ступеневій зміні завдання

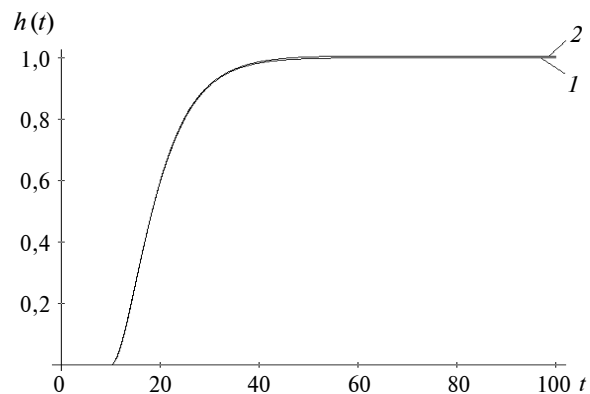


Рис. 4. Перехідна характеристика ОК: 1 – визначена для  $W_{ок}(p)$ , 2 – розрахована за залежністю (8) при ступеневій зміні завдання

Графік, наведений на рис. 5, демонструє перехідний процес в АСК (динамічні властивості системи керування не змінювалися) при імпульсній зміні завдання одиничної амплітуди тривалістю 30 одиниць ( $N_z=3$ ,  $A_z=1$ ,  $D_z=30$ ). Результати ідентифікації подано на рис. 6.

Далі проводилася група моделювальних тестів для гармонічної зміни завдання АСК. На рис. 7 зображено один із перехідних процесів у системі керування (динамічні властивості АСК залишалися без зміни) при гармонічній зміні завдання ( $N_z=2$ ,  $A_z=1$ ,  $W_z=0.2$ ). Результати ідентифікації подано на рис. 8 і 9.

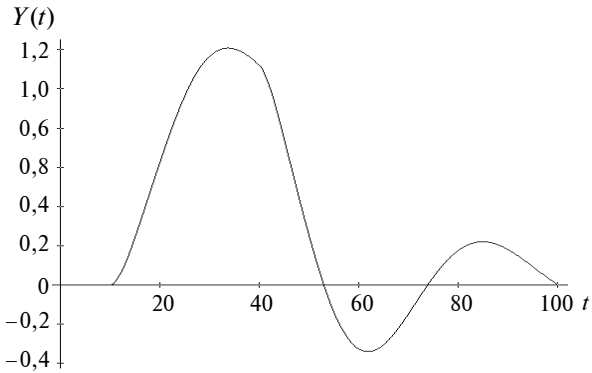


Рис. 5. Перехідний процес в АСК при імпульсній зміні завдання

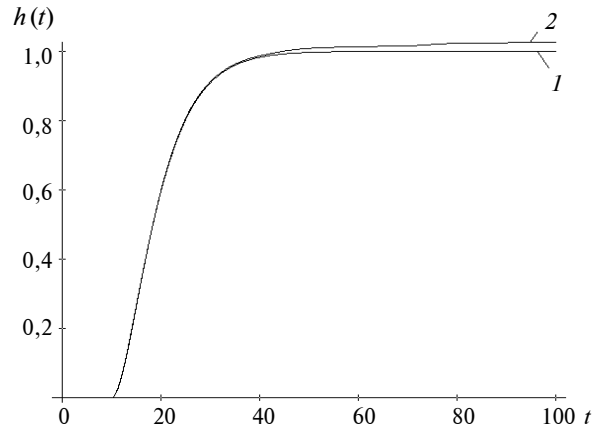


Рис. 6. Перехідна характеристика ОК: 1 – визначена для  $W_{OK}(p)$ , 2 – розрахована за залежністю (8) при імпульсній зміні завдання

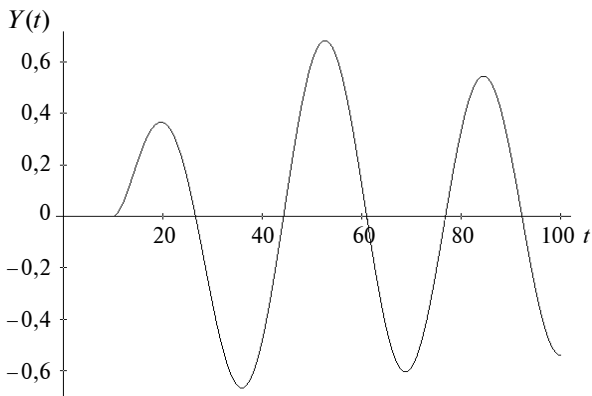


Рис. 7. Перехідний процес в АСК при гармонічній зміні завдання

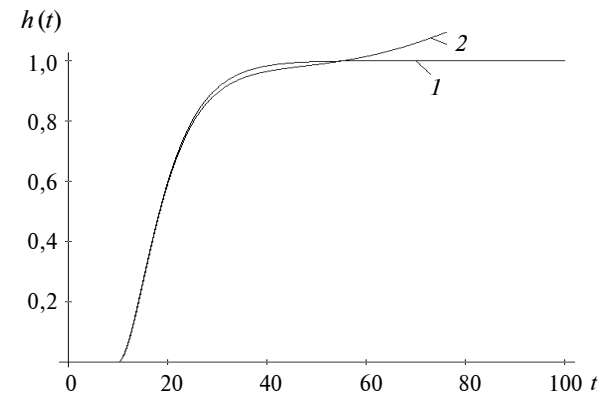


Рис. 8. Перехідна характеристика ОК: 1 – визначена для  $W_{OK}(p)$ , 2 – розрахована за залежністю (8) при гармонічній зміні завдання

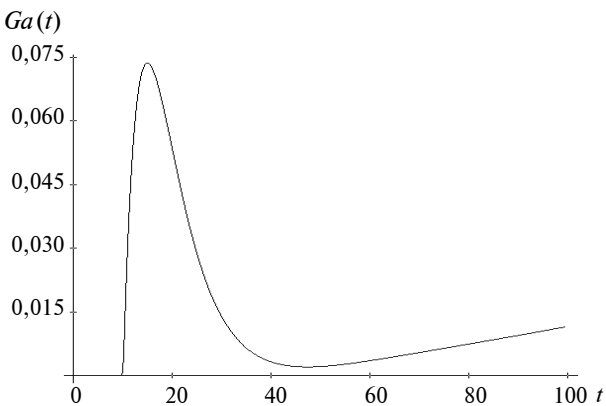


Рис. 9. Імпульсна характеристика ОК, визначена за залежністю (7) при гармонічній зміні завдання АСК

Слід звернути увагу на одну суттєву особливість розглянутого алгоритму. Як видно з (5), значення  $x_0$  при  $T_D \neq 0$  істотно залежить від

точності апроксимації похідної  $(T_D(e_0 - e_{-1})/d\tau)$ . Теоретично при  $t = 0$  має місце стрибкоподібне збільшення сигналу розузгодження  $e$  від  $e_{-1} = 0$  до  $e_0 = y_3$ . Отже, похідна від  $e$  при  $t = 0$  дорівнює нескінченності, внаслідок чого  $x_0 = \infty$ , а ми оцінюємо її як  $(e_0 - e_{-1})/d\tau$ . У той же час значення  $x_0$  фігурує в результуючій формулі (7), причому так, що похибка у визначенні  $x_0$  обернено пропорційно позначається на всіх значеннях  $g_z$ . Тому при постановці експерименту (отриманні перехідної характеристики АСК) диференціальну складову в законі регулювання треба усунути ( $T_D = 0$ ). Це також доцільно з міркувань зменшення впливу високочастотних завад, які може підсилити диференціальна складова під час експерименту, що небажано.

Для підвищення точності ідентифікації величину стрибка завдання при  $t=0$  бажано мати відносно великою, бо навіть невелика абсолютна похибка при визначенні малого  $x_0$  буде істотно спотворювати  $g_z$  (залежність (7)).

Повністю усунути накопичення похибок при реалізації алгоритму (7), очевидно, неможливо. Про це, зокрема, свідчить "сповзання" імпульсної характеристики об'єкта зі зростанням часу спостереження – часу, для якого розраховується імпульсна характеристика об'єкта (див. рис. 9). Даний ефект можна послабити чи навіть усунути, якщо врахувати апріорно відомі властивості об'єкта, наприклад має ОК самовирівнювання чи ні. Якщо має, то з часом імпульсна характеристика має затухати до нуля (імпульсна характеристика, таку, як показано на рис. 9, треба "довести до нуля" десь на відрізку часу від  $t=50$  до  $t=60$ ). Невелика точність, що може бути допущена при "штучному онуленні", буде менш негативно впливати на якість ідентифікації, ніж зростання  $g(t)$  при  $t > 50$ , що очевидно не відповідає фізиці поведінки об'єкта.

Не слід також забувати, що коли ми маємо намір використовувати отриману імпульсну характеристику для розрахунку перехідних процесів у замкненій системі керування [1, 2], то в режимі, коли настройка системи близька до оптимальної, тривалість самого перехідного про-

цесу буде мінімальною. За цих умов похибки у "хвостовій" частині імпульсної характеристики ОК не встигнуть істотно проявитися. Отже, вплив цих похибок на результат моделювання системи в цілому буде мінімальним.

## Висновки

Отриманий алгоритм ідентифікації ОК дає змогу проводити дослідження при різних сигналах зміни завдання. За результатами досліджень можна зробити висновок, що даний алгоритм є ефективним при будь-якому законі зміни завдання, при цьому тривалість ідентифікації має бути не меншою за час перехідного процесу ОК.

Алгоритм може використовуватися розробниками систем автоматичного керування для ідентифікації об'єкта та адаптивної настройки системи керування.

У подальшому планується модифікація алгоритму ідентифікації, який дає можливість отримання перехідної характеристики за входним і вихідним сигналами ОК. Це дасть змогу виключити з алгоритму ідентифікації регулятор, параметри якого можуть бути відомі з похибкою. Крім того, апаратна реалізація реального регулятора може відрізнитися від (1). Також перспективним є розроблення алгоритму адаптації системи керування з використанням запропонованого алгоритму ідентифікації.

1. *Голінко І.М., Ковриго Ю.М.* Аналіз гібридної системи керування за імпульсною характеристикою об'єкта // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2010. – № 2. – С. 30–33.
2. *Кубрак А.І., Голінко І.М., Ковриго Ю.М.* Комп'ютерний аналіз АСР за імпульсною характеристикою об'єкта // Нові рішення в сучасних технологіях: 36. наук. пр. НТУ "ХПІ". – 2010. – Вип. 57. – С. 128–132.
3. *Кубрак А.І., Жученко А.І., Кваско М.З.* Комп'ютерне моделювання та ідентифікація автоматичних систем: Навч. посіб. – К.: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2004. – 424 с.
4. *Дорф Р., Бішоп Р.* Современные системы управления / Пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.

Рекомендована Радою  
теплоенергетичного факультету  
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції  
19 січня 2011 року