

**Я.О. Довгополий, С.Д. Блонський, канд. техн. наук**

(Україна, Дніпропетровськ, ДВНЗ “Український державний хіміко-технологічний університет”)

**В.І. Корсун, д-р техн. наук**

(Україна, Дніпропетровськ, Державний ВНЗ “Національний гірничий університет”)

## РОЗРАХУНКИ ПАРАМЕТРІВ НАСТРОЮВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА З ДОДАТКОВОЮ КЕРУЮЧОЮ ДІЄЮ

### Вступ

Підвищення якості автоматичного регулювання – це одне із актуальних завдань, для виконання його використовують різні способи і напрямки досліджень, зокрема, автоматичне корегування настроювання регулятора та зміна його структури в процесі регулювання, удосконалення з використанням додаткових елементів та ускладнення законів регулювання. Усе це удосконалення в автоматичних системах регулювання (АСР) призводить до виникнення іншої важливої проблеми – визначення настроювання регуляторів залежно від того, на яких об’єктах автоматизації вони застосовані. Якщо ж оптимальні настроювання регулятора не визначені, то досягти якісного процесу регулювання практично неможливо.

Наявність удосконаленої мікропроцесорної обчислювальної техніки та різнопланових пакетів прикладних програм дозволить проводити моделювання АСР будь-якої складності, і таким чином вирішувати більшість проблемних завдань, але для цього, залежно від складності, потрібні кваліфіковані фахівці і робочого часу, залежно від складності завдань.

### Аналіз досліджень та публікацій

Заслужують уваги розробки пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів з додатковою керуючою дією диференціатора [1, 2, 3]. У структурі таких регуляторів додатково використовують блок диференціювання, на вхід якого подають вихідний сигнал пропорційної складової [1] або суму вихідних сигналів пропорційної та диференційної складових [3] стандартного ПІД-регулятора. Вихідний сигнал додаткового блока диференціювання додають до вихідного керуючого сигналу стандартного ПІД-регулятора і використовують як додаткову керуючу дію. Особливістю такої структури регулятора є те, що за відсутності розбіжності між плинним та заданим значеннями регульованого параметра додатковий керуючий вплив буде відсутній, тобто у цей момент він дорівнює нулю. Як виявили дослідження, ПІД-регулятори з додатковою керуючою дією забезпечують зменшення максимального динамічного відхилення та часу регулювання в перехідних режимах, тобто суттєво покращують якість автоматичного регулювання, але все це може бути досягнуто тільки у разі забезпечення оптимального настроювання регулятора. Отже, завдання розробки методики аналітичного розрахунку оптимальних параметрів настроювання ПІД-регулятора з додатковою керуючою дією диференціатора, які залежать від динамічних характеристик об’єкта автоматизації, є актуальним.

Тут зазначимо, що для стандартного ПІД-регулятора завдання щодо розрахунку його параметрів настроювання успішно вирішується [4] шляхом використання регуляторів з двоємнісними об’єктами із запізнюванням.

### Мета роботи

Мета роботи – розробка експрес-методу розрахунку оптимальних параметрів настроювання ПІД-регулятора з додатковою керуючою дією диференціатора для двоємнісних об’єктів із запізнюванням, що забезпечило б отримання перехідних процесів регулювання, які відповідають типовому процесу з перерегулюванням в межах від 5 до 15%, а це означає, що АСР знаходиться в більш усталеній (рабастній) області.

### Розгляд етапів дослідження

Усвідомлюючи те, що дослідження будуть достатньо складними, оскільки в структурі регулятора є додатковий елемент і відповідно з’явився четвертий параметр настроювання  $K_0$  – коефіцієнт диференціювання, тому був проведений детальний аналіз роботи [4]. Як бачимо, для розрахунку настроювання регулятора використовують параметри динамічної характеристики двоємнісного об’єкта з такими межами їх зміни:

$K_0$  – коефіцієнт передачі об’єкта, 0,4–4;

$\tau$  – час повного запізнювання, хв;

$T_0$  – загальна стала часу об’єкта, 4–50 хв;

$T_1$  – стала часу першої ланки, хв;

$T_2$  – стала часу другої ланки, хв.

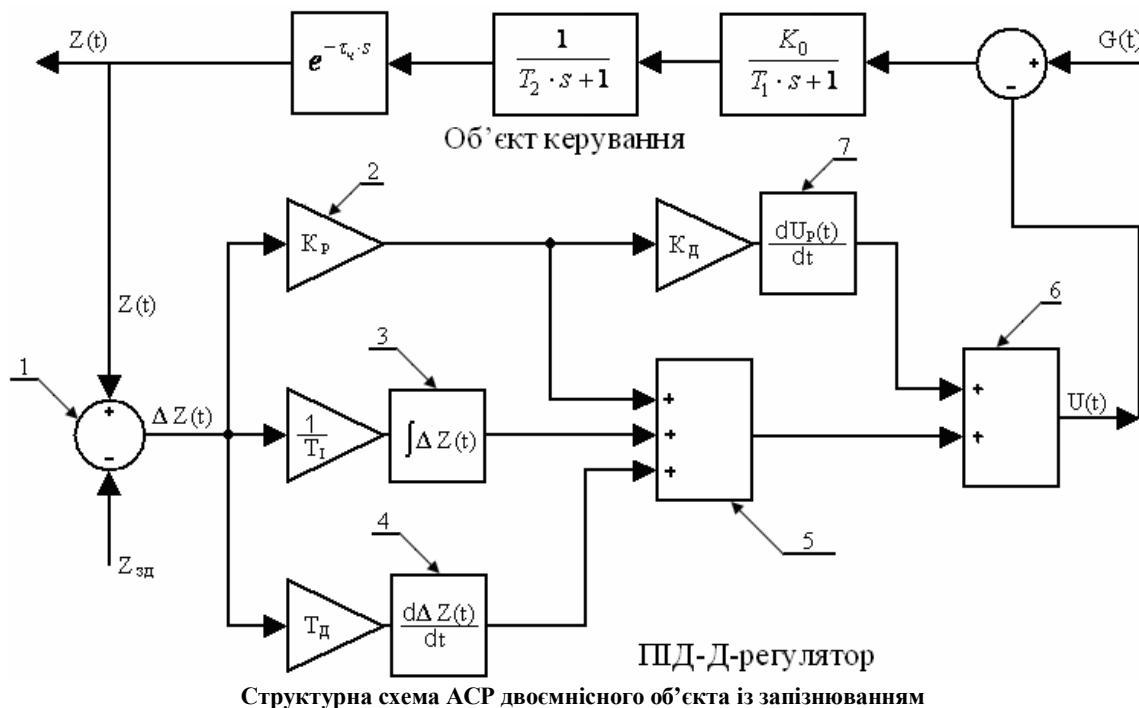
З метою зменшення кількості вхідних змінних факторів і використання їх як безрозмірні величини були взяті відношення і встановлені межі їх змін:  $\tau/T_0=0,1-0,8$ ;  $T_1/T_2=0,1-0,9$ .

Звертаємо увагу, що при використанні моделей динаміки двоємнісних об'єктів індекси сталих часу  $T_1$  та  $T_2$  без будь-яких наслідків можна міняти місцями, а тому в наших розрахунках прийнята умова, що завжди  $T_1 < T_2$ .

Для проведення моделювання на ПЕОМ була побудована структурна схема АСР двоємнісного об'єкта із запізнюванням, яка наведена на рисунку. Об'єкт керування представляється двома аперіодичними ланками першого порядку зі сталими часу  $T_1$  та  $T_2$  і ланкою чистого запізнювання  $\tau_v$ .

Використаний ПІД-регулятор з додатковою керуючою дією диференціатора (рисунок) має передатну функцію вигляду

$$W(s) = K_p + \frac{1}{T_i s} + T_d s + K_p K_d s, \quad (1)$$



Структурна схема АСР двоємнісного об'єкта із запізнюванням

Згідно з його передатною функцією регулятор має

$K_p$  – коефіцієнт передачі регулятора;

$K_d$  – коефіцієнт диференціювання додаткового диференціатора, хв;

$T_i$  – час інтегрування (ізодрому), хв;

$T_d$  – час диференціювання (попередження), хв.

Оскільки визначення часу диференціювання  $T_d$  стандартного ПІД-регулятора детально обґрунтовано в роботі [4], то при дослідженні ПІД-регулятора з додатковою керуючою дією було прийнято, що

$$T_d = \frac{0,4}{K_0} t, \quad (2)$$

де  $\tau$  – час повного запізнювання, хв.

Завдяки використанню залежності (2) із чотирьох параметрів настроювання регулятора для пошуку оптимальних значень залишилось три, а це в деякій мірі спростило сам процес. Для подальшого виконання завдання використали класичний однофакторний експеримент, тобто з параметрів моделі динаміки досліджуваного об'єкта змінювали тільки один, а всі інші залишали незмінними. Спочатку визначали вплив зміни співвідношення часу повного запізнювання  $\tau$  до загальної сталої часу об'єкта  $T_0$ , тобто  $\tau/T_0$ . Для цього за базове значення сталої часу взяли  $T_0=18,64$  хв, що відповідає моделі динаміки об'єкта з передатною функцією

$$W(s) = \frac{1e^{-4s}}{(4s+1)(10s+1)}. \quad (3)$$

Отже, за рахунок зміни часу чистого запізнювання  $\tau$ , змінювали співвідношення  $\tau/T_0$  в межах від 0,1 до 0,8 і шляхом багаторазового розв'язання системи диференціальних рівнянь вели пошук оптимальних параметрів настроювання ПД-Д-регулятора. При подальших дослідженнях було виявлено, що на оптимальні настроювання регулятора суттєво впливає не тільки співвідношення  $\tau/T_0$ , але і сама величина сталої часу  $T_0$ .

Друга серія дослідів була проведена шляхом зміни загальної сталої часу досліджуваних об'єктів  $T_0$  в межах від 4 до 50 хв, а це означає, що отримані результати можуть бути застосовані для об'єктів, у яких часові характеристики виражені або в хвилинах, або в секундах. Відзначимо, що у цій серії дослідів точно дотримувалися співвідношення  $T_1/T_2=0,4$  за рахунок зміни сталих часу в межах від  $T_1/T_2=1/2,5$  до  $T_1/T_2=10/25$ .

При опрацюванні отриманих статистичних даних з метою досягнення більш точних розрахунків застосували метод кусково-нелінійної апроксимації, тобто досліджувані об'єкти поділили на дві групи за співвідношеннями  $\tau/T_0 \leq 0,3$  та  $\tau/T_0 > 0,3$  і для кожної групи одержували свої рівняння регресії.

Для об'єктів зі співвідношенням  $\tau/T_0 \leq 0,3$  отримані такі рівняння регресії:

- коефіцієнт підсилення регулятора

$$K_{p1} = \frac{-7,1742 - 26,9352(t/T_0)}{1,0 - 22,2649(t/T_0)}; \quad (4)$$

- час інтегрування

$$T_{i1} = \frac{0,5622 + 2,2248(t/T_0)}{1,0 - 2,2671(t/T_0)} (T_0 / 18,64); \quad (5)$$

- коефіцієнт диференціювання

$$K_{d1} = [3,792 + 9,3486(t/T_0) + 2,9296(t/T_0)^2] (T_0 / 18,64). \quad (6)$$

Рівняння регресії для співвідношення  $\tau/T_0 > 0,3$  такі:

$$K_{p1} = \frac{-2,5682 - 4,3441(t/T_0)}{1,0 - 8,1132(t/T_0)}; \quad (7)$$

$$T_{i1} = [-5,008 + 32,0995(t/T_0) - 8,814(t/T_0)^2] (T_0 / 18,64); \quad (8)$$

$$K_{d1} = [3,4798 - 6,2025(t/T_0) + 2,9296(t/T_0)^2] (T_0 / 18,64). \quad (9)$$

З наведених залежностей видно, що коефіцієнт підсилення регулятора  $K_{p1}$  не залежить від зміни величини загальної сталої часу об'єкта  $T_0$ , а час інтегрування  $T_{i1}$  та коефіцієнт диференціювання  $K_{d1}$  мають точно пропорційну залежність від співвідношення сталої часу  $T_0$  до її базового значення. Розрахункові формули (4)–(9), які мають в позначеннях параметрів настроювання індекс "1", є проміжними і відображають залежність параметрів настроювання тільки від співвідношення  $\tau/T_0$  та величини загальної сталої часу об'єкта  $T_0$ .

У третій серії дослідів змінювали співвідношення  $T_1/T_2$ , при цьому за базову була взята модель динаміки об'єкта, яка має вигляд передатної функції (2) і базові співвідношення  $T_1/T_2=0,4$  та  $\tau/T_0=0,3$ . Отримані рівняння регресії відображають залежність коректуючих коефіцієнтів від зміни співвідношення  $T_1/T_2$ . У цій серії дослідів моделі об'єктів були поділені теж на дві групи за співвідношеннями  $T_1/T_2 \leq 0,4$  та  $T_1/T_2 > 0,4$ , а загальна зміна цього співвідношення здійснювалася в межах від 0,1 до 0,9.

У кінцевому вигляді отримані розрахункові формули для співвідношення  $T_1/T_2 \leq 0,4$ :

- коефіцієнт передачі регулятора

$$K_p = K_{p1} (1,497 - 1,26(T_1/T_2)) / K_0; \quad (10)$$

- час інтегрування

$$T_i = T_{i1}(0,4305 + 1,4326(T_1 / T_2))K_0. \quad (11)$$

Розрахункові формули для співвідношення  $T_1/T_2 > 0,4$  такі:

$$K_p = K_{p1} / K_0; \quad (12)$$

$$T_i = T_{i1}(0,91 + 0,2277(T_1 / T_2))K_0. \quad (13)$$

Коефіцієнт диференціювання додаткового диференціатора  $K_\delta$  не залежить від зміни співвідношення  $T_1/T_2$ , а тому  $K_\delta = K_{\delta 1}$ .

Зауважимо, що при проведенні дослідів у всіх серіях коефіцієнт передачі об'єкта прийнятий  $K_0 = 1$ . Коефіцієнт передачі регулятора  $K_p$  та час інтегрування  $T_i$  мають точно пропорційну залежність від коефіцієнта передачі об'єкта  $K_0$ , що і відображено в розрахункових формулах (10)–(13), а також відзначено в попередніх наукових працях [4, 5].

Загальний час диференціювання  $T_{\delta 0}$  ПД-Д-регулятора з урахуванням обох диференціаторів розраховують, як це визначено його передатною функцією (1), за формулою

$$T_{\delta 0} = K_p K_\delta + T_\delta. \quad (14)$$

Згідно з розглянутими залежностями складена програма розрахунку оптимальних параметрів настроювання ПД-Д-регулятора на алгоритмічній мові TURBO PASCAL, яка наведена нижче.

#### Програма розрахунку оптимального настроювання ПД-Д-регулятора

```

program nastroiika;
uses crt;
var tau,T0,K0,Kp,Kp1,Ti,Ti1,Td,Td2,Kd,Kp2,Ti2,T1,T2,
Kd1,Kd2,Td0:real;
begin
writeln ('Vvesti tau,T0,K0,T1,T2');
readln (tau,T0,K0,T1,T2);
Td:=(0.4/K0)*tau;
IF tau/T0<=0.3 then begin
Kp1:=(-7.1742-26.9352*(tau/T0))/(1.0-22.2649*(tau/T0));
Ti1:=((0.5622+2.2248*(tau/T0))/(1.0-2.2671*(tau/T0)))*(T0/18.64);
Kd1:=(3.792+9.3486*(tau/T0)-52.5714*(tau/T0)*(tau/T0))*(T0/18.64);
end;
IF tau/T0>0.3 then begin
Kp1:=(-2.5682-4.3441*(tau/T0))/(1.0-8.1132*(tau/T0));
Ti1:=(-5.008+32.0995*(tau/T0)-8.814*(tau/T0)*(tau/T0))*(T0/18.64);
Kd1:=(3.4798-6.2025*(tau/T0)+2.9296*(tau/T0)*(tau/T0))*(T0/18.64);
end;
IF T1/T2<=0.4 then begin
Kp:=Kp1*(1.497-1.26*(T1/T2))/K0;
Ti:=Ti1*(0.4305+1.4326*(T1/T2))*K0;
Kd:=Kd1;
end;
IF T1/T2>0.4 then begin
Kp:=Kp1/K0;
Ti:=Ti1*(0.91+0.2277*(T1/T2))*K0;
Kd:=Kd1;
end;
Tp0:=Kp*Kd+Td;
Kp2:=(0.978+8.694*exp(-(tau/T0)/0.1097))/K0;
IF tau/T0<=0.35 then
Ti2:=((-0.0898+0.1875*T1/T2-0.0265*T0+0.0112*T2)+(0.3369-

```

```

0.1736*T1/T2+0.5986*T0-0.2121*T2)*(tau/T0))*K0/0.4;
IF tau/T0>0.35 then
Ti2:=((-0.728+2.3602*T1/T2+0.0058*T0+0.0554*T2)+(1.59-4.6989*T1/T2+
0.4353*T0-0.1935*T2)*(tau/T0))*K0/0.4;
Td2:=Td;
writeln (' Kp= ',Kp:6:3);
writeln (' Ti= ',Ti:6:3);
writeln (' Td= ',Td:6:3);
writeln (' Kd= ',Kd:6:3);
writeln (' Kp2= ',Kp2:6:3);
writeln (' Ti2= ',Ti2:6:3);
writeln (' Td2= ',Td2:6:3);
writeln (' Tp0= ',Tp0:6:3);
end.

```

Позначення ідентифікаторів:

- tau – час повного запізнювання об'єкта  $\tau$ , хв;
- T0 – загальна стала часу об'єкта  $T_0$ , хв;
- K0 – коефіцієнт передачі об'єкта  $K_0$ ;
- Td – час диференціювання  $T_d$ , хв;
- Kd – коефіцієнт диференціювання  $K_d$ , хв.

У програму включені розрахункові формули з роботи [4] для визначення параметрів настроювання стандартного ПД-регулятора, які позначені індексом "2". Ці параметри настроювання можуть бути використані при проведенні порівняльного моделювання АСР з іншими структурними схемами регуляторів.

## Висновки

1. Запропонований новий метод розрахунку параметрів настроювання ПД-регулятора з додатковою керуючою дією диференціатора в комплексі з двоємнісними об'єктами.
2. Межі зміни параметрів настроювання в оптимальній області усталеності для ПД-Д-регулятора значно звужені в порівнянні зі стандартним ПД-регулятором, але якість регулювання при використанні такої структури регулятора є найкращою.
3. Метод розрахунку представлений у вигляді, придатному повністю до практичного використання.

## Список літератури

1. Пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор з додатковою керуючою дією [Текст]: пат. 95197 Україна: МПК6 G 05 B 11/36 / С.Д. Блонський, Н.С. Петрова, О.Ф. Шуть; заявник і патентоволодар Укр. хім.-технол. ун-т. - №а 201007914; заявл. 24.06.10; опубл. 11.07.11, Бюл. №13. – 3 с.
2. Дослідження ПД-регуляторів з додатковою керуючою дією [Текст] / С.Д. Блонський, Н.С. Петрова, Н.О. Мінакова, В.І. Корсун // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2010. – Вип. 85. – С. 90-96.
3. Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор з додатковою керуючою дією [Текст]: заявка а 201106467 Україна: МПК6 G 05 B 11/48 / Н.С. Петрова, С.Д. Булонський; заявник і патентоволодар Укр. хім.-технол. ун-т. - заявл. 23.05.11. – 6 с.
4. Визначення залежностей настроювання ПІ- та ПД-регуляторів від динамічних характеристик двоємнісних об'єктів [Текст] / О.Ф. Шуть, С.Д. Блонський, В.Я. Тришкін, В.І. Корсун // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2010. – Вип. 85. – С.62-70.
5. Шуть, О.Ф. Визначення залежностей настроювання ПД-регулятора від динамічних характеристик статичних та астатичних об'єктів [Текст] / О.Ф. Шуть, С.Д. Блонський, В.Я. Тришкін // Вопросы химии и химической технологии. – 2011. - № 1. – С. 175 - 178.

*Рекомендовано до друку: проф. Слесаревим В.В.*