

6. Справочник по обогащению руд. Специальные и вспомогательные процессы, испытания обогатимости, контроль и автоматика / Под ред. О.С. Богданова, В.И. Ревнивцева. – М.: Недра, 1983. – 376 с.
7. Ткалич С.А. Идентификация состояния стохастических систем / С.А. Ткалич, Е.М. Васильев // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2008. – № 1. – С. 44-46.
8. Сычев В. Фрактальный анализ. Программа Fractan 4.4. – <http://impb.ru/~sychyov/>

УДК 681.515.8

*С.Д. Блонський, канд. техн. наук, Н.С. Петрова, Н.О. Мінакова  
(Україна, Дніпропетровськ, ДВНЗ „Український державний хіміко-технологічний університет”)*

*В.І. Корсун, д-р техн. наук  
(Україна, Дніпропетровськ, ДВНЗ „Національний гірничий університет”)*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРІВ З ДОДАТКОВОЮ КЕРУЮЧОЮ ДІЄЮ**

### *Вступ*

За останні десятиліття опубліковано багато винаходів [1, 2, 3], в яких є спроби удосконалити ПІД-регулятори, котрі зараз знайшли найбільше поширення в практичному застосуванні, особливо в алгоритмах і програмах мікропроцесорних керуючих пристроїв.

З метою покращення якості автоматичного регулювання ускладнюються структури ПІД-регуляторів за рахунок використання додаткових функціональних елементів: інтеграторів, диференціаторів і таке інше, використовуються різні зворотні зв'язки, що суттєво ускладнює закон регулювання, а також з'являються декілька нових параметрів налаштування таких регуляторів. Наприклад, ПІД-регулятор з додатковою керуючою дією зворотних зв'язків, який описано в патенті Російської Федерації [3], має передаточну функцію наступного вигляду:

$$W_{(s)} = \left( K_P + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_D \cdot s \right) \cdot \frac{1}{1 + \frac{1 - e^{-(\tau_1 + \tau_2) \cdot s}}{T_c \cdot s}}, \quad (1)$$

де  $K_P$ ,  $T_i$ ,  $T_D$  – параметри налаштування ПІД-регулятора;  $\tau_1$  – час запізнювання об'єкта керування;  $\tau_2$  – час запізнювання ланцюга зворотного зв'язку;  $T_c$  – стала часу замкнутої системи.

В періодичній технічній літературі є публікації [4, 5], в яких проводиться детальний аналіз принципів побудови ПІД-регуляторів та перспективи їх пода-

льшого удосконалення, а також викладені нові методики розрахунку оптимальних параметрів налаштувань.

Узагальнюючи основні вади запропонованих структурних схем ПД-регуляторів з додатковою керуючою дією, необхідно звернути увагу на наступне. Більшість структурних схем таких регуляторів відрізняються значною складністю, присутністю багатьох додаткових елементів, які потребують індивідуальних налаштувань в залежності від динамічних характеристик об'єктів, на яких ці регулятори використовуються. Що стосується визначення оптимальних налаштувань, то для стандартних ПД-регуляторів ця задача, можна вважати, більш-менш вирішена, але в складних структурних схемах регуляторів визначення параметрів налаштувань додаткових елементів є проблемою надзвичайно складною, адже без оптимальних налаштувань регулятора досягти якісного процесу регулювання неможливо.

### *Мета роботи*

Нами запропонована структурна схема ПД-регулятора з додатковою керуючою дією [6], в якій додатково використовуються диференціатор та суматор. Удосконалення такого регулятора було здійснено з метою зменшення величини максимального динамічного відхилення в перехідних режимах автоматичного регулювання та підвищення запасу усталеності систем регулювання за рахунок додаткової керуючої дії диференціатора, а також суттєвого спрощення структури регулятора.

### *Матеріал та результати досліджень*

Функціональна схема пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора з додатковою керуючою дією диференціатора представлена на рис.1.

Він включає блок порівняння 1, вихід якого з'єднано з блоком пропорційного перетворювання 2, блоком інтегрування 3 та першим блоком диференціювання 4, виходи котрих підключені відповідно до трьох входів першого суматора 5, а його вихід підключено до одного з входів другого суматора 6. До другого входу суматора 6 підключено вихід другого блоку диференціювання 7, вхід якого з'єднано з виходом блоку пропорційного перетворювання 2, а вихід другого суматора 6 являється виходом цього регулятора.

Запропонований ПД-регулятор працює наступним чином.

На вхід блоку порівняння 1 подається вимірювальний сигнал регульованого параметра  $Y(t)$ . До другого входу цього блоку підключено сигнал від за-

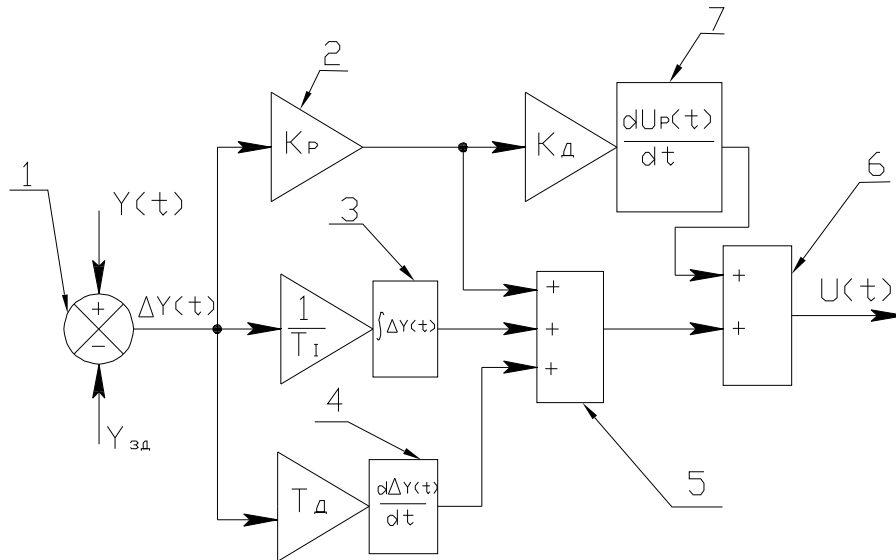


Рис.1. Функціональна схема пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора з додатковою керуючою дією диференціатора

датчика  $Y_{зд}$ . Блок порівняння фактично виконує операцію віднімання та обчислює сигнал розбіжності

$$\Delta Y(t) = Y(t) - Y_{зд}. \quad (2)$$

Входом блоків пропорційного 2, інтегрального 3 та диференціального перетворення 4 регулятора є сигнал розбіжності  $\Delta Y(t)$ . Вихідні сигнали цих блоків підсумовуються у суматорі 5, вихід якого є сигналом керування стандартного ПІД-регулятора. Цей вихідний сигнал подається на один із входів другого суматора 6. На інший вхід суматора 6 подається додатковий керуючий сигнал від другого диференціатора 7, який диференціює вихідний сигнал блоку пропорційного перетворення 2. Вихідний сигнал другого суматора 6 є керуючим сигналом  $U(t)$  цього регулятора.

Передаточна функція такого регулятора має вид:

$$W_{(s)} = K_P + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_D \cdot s + K_P \cdot K_D \cdot s, \quad (3)$$

де  $K_D$  – час диференціювання другого диференціатора – четвертий параметр настройки цього регулятора.

Виходячи з закону регулювання, цей регулятор можна назвати «пропорційно-інтегрально-диференціально-диференціальний» або скорочено ПІД-Д-регулятор, що відповідає назвам чотирьох основних функціональних блоків цього регулятора. Запропонований регулятор може бути побудований з пневма-

тичних елементів та блоків, а також реалізований у вигляді алгоритму керування, який відповідає його закону регулювання у мікропроцесорних контролерах.

Оптимальні настройки  $K_P$ ,  $T_i$ ,  $T_D$  ПІД-Д-регулятора розраховують аналогічно визначенню настройок стандартного ПІД-регулятора, а значення часу диференціювання другого диференціатора  $K_D$  повинно дорівнювати загальному часу запізнювання об'єкту керування.

Для виявлення позитивних характеристик запропонованого ПІД-Д-регулятора за допомогою ПЕОМ було проведено порівняльні моделювання автоматичних систем регулювання технологічного об'єкту з запізнюванням з використанням різних видів регуляторів. В якості об'єкта регулювання використано теплообмінний апарат, який має по каналу керування передаточну функцію

$$W(s) = \frac{1,2 \cdot e^{-4s}}{(4 \cdot s + 1)(10 \cdot s + 1)}. \quad (4)$$

Враховуючи, що ПІД-регулятор має найбільш поширене практичне використання, в першу чергу провели порівняння перехідних процесів регулювання ПІД-Д регулятора зі стандартним ПІД-регулятором та з ПІД-регулятором з додатковою дією зворотних зв'язків при їх оптимальних параметрах настройки.

На рис. 2 представлені перехідні процеси регулювання. Час перехідного процесу регулювання всі регулятори дають практично однаковий, а максимальне динамічне відхилення  $\Delta Y_{1\max}$ , що є основним показником якості автоматичного регулювання, у випадках використання відповідно стандартного ПІД-регулятора, ПІД-регулятора з додатковою дією зворотних зв'язків та запропонованого ПІД-Д регулятора становить 5,21 %; 4,85 % та 3,92 % при нанесенні на об'єкт ступеневої збурюючої дії величиною 10 % .

Відзначимо також, що значення  $\Delta Y_{1\max}$  ПІД-Д регулятор дає на 24,8 % менше, ніж стандартний ПІД-регулятор, та на 19,1 % менше, ніж значення максимального динамічного відхилення ПІД-регулятора з додатковою дією зворотних зв'язків, що слід вважати суттєвим покращенням якості автоматичного регулювання.

Проведено також моделювання процесу регулювання з використанням пропорційно-інтегрального регулятора з додатковою керуючою дією диференціатора (ПІ-Д регулятора). В порівнянні зі стандартним ПІД регулятором при настройках обох регуляторів на перехідний процес з 20%-вим перерегулюванням ПІ-Д регулятор дає на 19,5 % менше максимальне динамічне відхилення  $\Delta Y_1$ , хоча за конструктивною складністю ці регулятори однакові.

Отже, із проведеного порівняльного моделювання маємо висновок, що найкращу якість автоматичного регулювання дає ПІД-Д регулятор, тобто цей регулятор дає найменше максимальне динамічне відхилення  $\Delta Y_1$  в порівнянні з іншими різновидами регуляторів.

Оскільки запропонований ПІД-Д регулятор дає мінімальне динамічне відхилення, то з метою покращення якості процесу регулювання можна запропо-

нувати у випадках використання стандартного ПД-регулятора замінити останній ПД-Д регулятором.

Промислова придатність ПД-Д регулятора дуже широка. Він може бути використаним на хімічних та металургійних виробництвах, на виробництвах будівельних матеріалів, а також в багатьох галузях харчового виробництва і на інших виробництвах, де є об'єкти керування зі значним часом запізнювання та де використовуються стандартні ПД-регулятори.

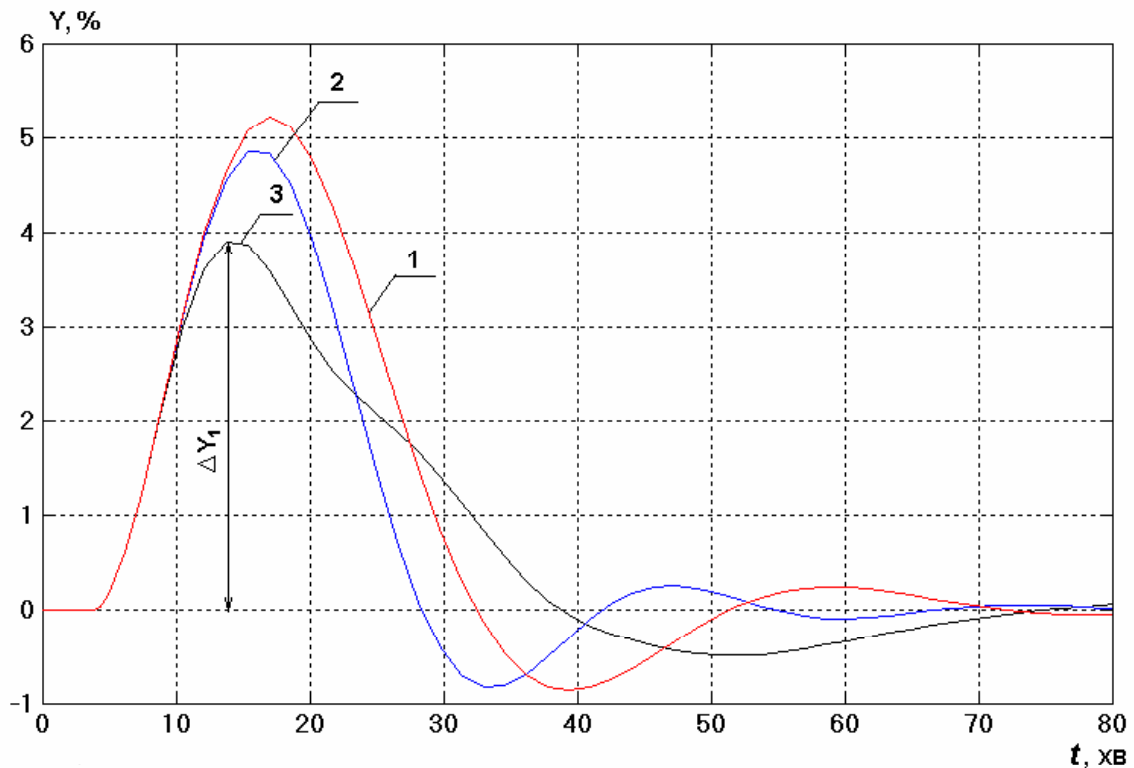


Рис. 2. Криві переходного процесу регулювання: 1 – стандартний ПД-регулятор; 2 – ПД-регулятор з додатковою керуючою дією зворотних зв'язків; 3 – ПД-Д регулятор

На рис. 3 представлена зміна в часі керуючих впливів на об'єкт керування для регуляторів, моделювання яких проводилось. Крива 1 представляє керуючий вплив стандартного ПД-регулятора, крива 2 – керуючий вплив ПД-регулятора з додатковою керуючою дією зворотних зв'язків і крива 3 – керуючий вплив ПД-Д-регулятора з додатковою керуючою дією диференціатора. Ці керуючі дії відповідають кривим переходного процесу регулювання, які представлені на рис. 2. Як видно, керуюча дія ПД-Д-регулятора є найбільш сприятливою для об'єкта керування. В початковий момент швидкість переміщення регулюючого органу є максимальною, поки він не досягне компенсуючої величини нанесеного збурювання 10 % і максимальне переміщення регулюючого органу досягає 10,75 %, а в той же час стандартний ПД-регулятор дає максимальне переміщення 13,8 %.

Величина переміщення регулюючого органу має суттєве значення в тому випадку, коли об'єкт керування має обмежений запас зміни навантаження для

здійснення керуючого впливу, що є властивим для більшості технологічних об'єктів.

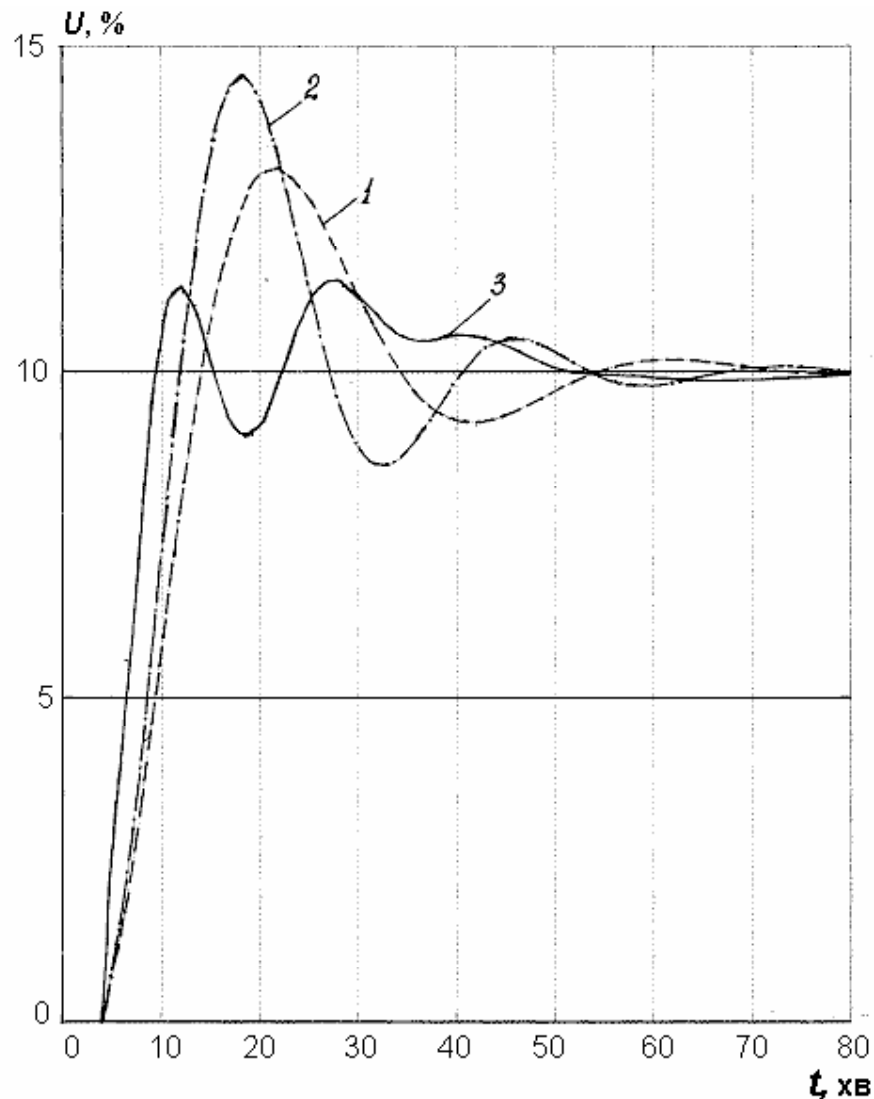


Рис. 3 – Криві зміни керуючого впливу:

1 – стандартного ПД-регулятора, 2 – ПД-регулятора з додатковою керуючою дією зворотних зв'язків, 3 – ПД-Д-регулятора з додатковою керуючою дією диференціатора

### **Висновки**

1. Запропонований пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор з додатковою керуючою дією диференціатора, що забезпечує при регулюванні зменшення максимального динамічного відхилення, збільшує запас усталеності системи регулювання та суттєво спрощує структурну схему регулятора.

2. За рахунок додаткової керуючої дії диференціатора, який диференціює вихідний сигнал пропорційної складової регулятора, пришвидшується переміщення регулюючого органу і, таким чином, забезпечується потрібна якість регулювання.

3. Запропонований ПІД-Д регулятор здійснює керуючу дію, не допускаючи значних переміщень регулюючого органу, що має суттєве значення для об'єктів з обмеженим запасом зміни керуючого навантаження.

#### Список літератури

1. Пат. 2157558 RU МПК 6 G05B11/36. Супервизорний пропорціонально-інтегрально-дифференціальний регулятор // Говоров А.А., Кузьмичев Е.В., Говоров С.А. – № 99125533/094; Заявл. 06.12.99; Опубл. 10.10.00. – 5с.
2. Пат. № 2234116 С1 RU МПК 6 G05B11/36. Пропорціонально-інтегрально-дифференціальний регулятор // Лубенцова Е.В. – № 2002135205/09; Заявл. 24.12.02; Опубл. 10.08.04. – 4с.
3. Пат. 1835215 RU МКИ 6 G05B11/36. Пропорціонально-інтегрально-дифференціальний регулятор // Авдеев И.О., Авдеев О.Н., Башкиров В.И. – № 4943229/24; Заявл. 05.05.91; Опубл. 20.02.96. Бюл. № 5. – 3с.
4. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. Часть 1. – 2006. – № 4. – С. 66-74; Часть 2. – 2007. – № 1. – С. 78-88.
5. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 400 с.
6. Заявка № 201007914, Україна, МКИ 7 G05B 11/48. Пропорціонально-інтегрально-дифференціальний регулятор з додатковою керуючою дією / Блонський С.Д., Петрова Н.С., Шуть О.Ф. – Заявл. 24.06.10.

**Державного вищого навчального закладу Національний гірничий університет  
Директор науки, професор Корсун В.А.**

УДК 622.685: 531.8

**С.Д. Приходченко**

(Україна, Дніпропетровськ, ДВНЗ "Національний гірничий університет")

### **ЗАСТОСУВАННЯ СУМАТОРА, ЗДАТНОГО ДО НАВЧАННЯ, В СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ВНУТРІФАБРИЧНОГО ГІДРОТРАНСПОРТУ**

В сучасних умовах велика увага приділяється проблемам підвищення продуктивності устаткування гірничо-збагачувальних підприємств, в світлі чого на більшості ГЗК проводяться комплексні заходи щодо підвищення ККД обладнання. Такого роду заходи включають в себе автоматизацію технологічних процесів і агрегатів. Разом з тим, хоча автоматизація за вже існуючими схемами приносить певний ефект, сучасні умови вимагають збільшення продуктивності одночасно із зменшенням енергоспоживання. Для досягнення цієї мети необхідна розробка нових більш досконалих методів автоматизації, які, у свою чергу, вимагають побудови більш достовірних моделей гірничого обладнання, за рахунок застосування яких можна досягти більшого ефекту підвищення продуктивності з одночасним підвищенням економії енергії.

У тих випадках, коли повністю автоматична робота устаткування неможлива з тих чи інших причин, на виробництві впроваджують автоматизовану си-