

УДК 681.515.8

П.С. Шолом, к.т.н., Н.В. Здолбіцька

Луцький національний технічний університет

## ПРОПОРЦІЙНО-ІНТЕГРАЛЬНО-ДИФЕРЕНЦІАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ СТАБІЛЬНІСТЮ РУХУ МОБІЛЬНОГО АГЕНТА ЗРІ ПО ЗАДАНІЙ ТРАЄКТОРІЇ

*Здійснено практичну реалізацію програмного ПДД-регулятора для роботи Зрі з метою підвищення швидкості та якості руху по траєкторії довільного типу.*

**Ключові слова:** ПДД-контролер, пропорційна складова, інтегральна складова, диференціальна складова, стабільність руху.

**Постановка проблеми.** При розробці автоматизованих систем, таких як система прямування по заданій траєкторії мобільного робота, виникає необхідність підтримки будь-якого параметра відповідно до заданого значення. Це задане значення може досить швидко змінюватися в часі. Теорія автоматичного керування для розв'язання даної проблеми пропонує використовувати регулятори.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Незважаючи на величезну кількість алгоритмів і методів управління [1], які існують, багато проблем у реалізації керуючих циклів у програмному забезпеченні для різних пристроїв вирішується найпростішими контролерами [2]. До таких контролерів відносять ПДД-регулятор, що може бути використаним для управління будь-якою змінною, яку можна виміряти. Реалізація та налаштування регулятора здійснюється досить просто та не вимагає залучення складного математичного апарату чи тривалого вивчення теорії управління [3].

ПДД-регулятор був винайдений ще в 1910 році [4]. У 1942 р. Зіглер і Нікольс розробили методику його налаштування [5], а починаючи з 1980-х років (після появи мікропроцесорів) розвиток ПДД-регуляторів відбувається наростаючими темпами [7, 8].

ПДД-регулятор відноситься до найпоширенішого типу регуляторів. Близько 90-95 % [4, 6] регуляторів, що знаходяться в даний час в експлуатації, використовують ПДД-алгоритм. Причиною такої високої популярності є простота побудови та промислового використання, ясність функціонування, придатність для вирішення більшості практичних завдань і низька вартість. Контролери зі зворотним зв'язком охоплюють 85 % всіх програм, контролери з прямим зв'язком – 6 %, а з'єднані каскадно – 9 % [9].

**Метою роботи** є практична реалізація програмного ПДД-регулятора на базі мобільного агента Зрі фірми Pololu, що дає можливість підвищити швидкість руху робота по прямій траєкторії та скоректувати цю швидкість під час виявлення поворотів, таким чином забезпечивши більш високу якість керування, високий рівень контролю та швидшу реакцію. Вхідними даними, що приймаються регулятором, є цифрові дані від п'яти датчиків відбиття, а вихідними – відрегульовані цифрові значення, що передаються у функцію управління металевими двигунами-редукторами постійного струму роботизованої системи.

**Виклад основного матеріалу.** Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПДД) контролер – загальний пристрій управління механізмом зворотного зв'язку, що використовується в системах автоматизованого управління для формування керуючого сигналу. ПДД-регулятор формує керуючий сигнал, який є сумою трьох складових, перша з яких пропорційна вхідному сигналу, друга – інтеграл вхідного сигналу, третя – похідна вхідного сигналу.

ПДД-регулятор розраховує певне значення, яке включає в себе три окремих сталих параметра, що потребують налаштування, і три складові управління: пропорційна, інтегральна та похідна величини, що позначаються P (від англ. Proportional), I (Integral) та D (Derivative) відповідно (рис. 1). Евристично ці значення можуть бути інтерпретовані в залежності від часу: P залежить від відхилення на даний момент, I – від накопичення минулих відхилень, D є передбаченням майбутніх відхилень на основі поточних темпів зміни. Зважена сума цих трьох дій використовується для регулювання процесу через елемент керування.

ПДД-регулятори особливі тим, що для їх налаштування не потрібно досконалого розуміння формальної теорії управління системами. При цьому вони дозволяють вирішити близько 90 % всіх завдань управління простими системами замкнутого циклу. За допомогою налаштування трьох параметрів в алгоритмі ПДД-контролера можна забезпечити контроль дій, спрямованих на специфічні вимоги процесу.

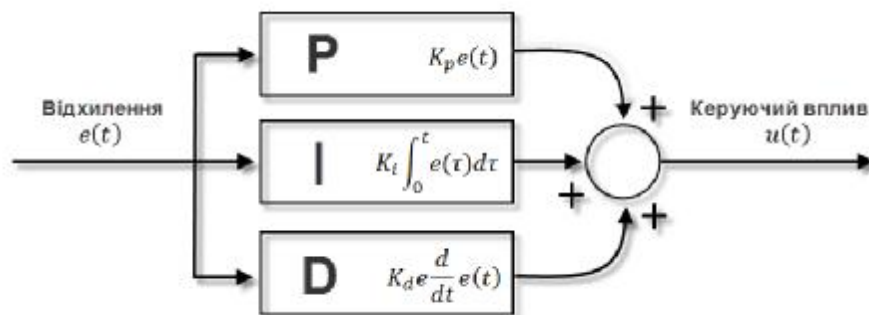


Рис. 1. Принцип роботи ПІД-контролера

Сума трьох коректуючих складових ПІД-схеми управління визначає керуючий вплив ( $MV$ , manipulated variable).

Пропорційна складова виробляє вихідний сигнал, який протидіє відхиленню регульованої величини від заданого значення, що спостерігається в даний момент часу. Він тим більший, чим більше це відхилення. Якщо вхідний сигнал дорівнює заданому значенню, то вихідний рівний нулю.

Однак при використанні тільки пропорційного регулятора значення регульованої величини ніколи не стабілізується на заданому значенні. Існує так звана статична похибка, яка дорівнює такому відхиленню регульованої величини, яке забезпечує вихідний сигнал, що стабілізує вихідну величину саме на цьому значенні.

Чим більший коефіцієнт пропорційності між вхідним і вихідним сигналом (коефіцієнт підсилення), тим меншою є статичне відхилення, проте при дуже великому коефіцієнті підсилення можуть виникнути автоколивання, а при подальшому його збільшенні система може втратити стійкість. Для усунення статичного відхилення використовують інтегральну складову, яка дозволяє регулятору «вчитися» на попередньому досвіді. Якщо система не зазнає зовнішніх збурень, то через деякий час регульована величина стабілізується на заданому значенні, сигнал пропорційної складової дорівнюватиме нулю, а вихідний сигнал буде повністю забезпечувати інтегральна складова.

Диференціальна складова пропорційна темпу зміни регульованої величини і призначена для протидії відхилень від цільового значення, які прогнозуються в майбутньому. Відхилення можуть бути викликані зовнішніми збуреннями або запізненням впливу регулятора на систему.

Формула керуючої схеми має наступний вигляд [2]:

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t), \quad (1)$$

де

$K_p$  – коефіцієнт пропорційного підсилення,

$K_i$  – коефіцієнт інтегрального підсилення,

$K_d$  – коефіцієнт диференціального підсилення,

$e(t)$  – відхилення (похибка),

$t$  – час або миттєвий час (поточний).

Відхилення  $e(t)$  є результатом різниці заданого (setpoint) та змінного (поточного) значень (process variable). Принцип розрахунку відхилення зображений на рисунку 2.

В якості мобільного агента, для якого розробляється ПІД-контролер, взято робот Pololu 3pi (рис. 3). Він є повною, високоефективною мобільною платформою, яка включає в себе два металевих двигуна-редуктора, п'ять давачів відбиття, LCD 8x2, зумер, три кнопки. Все це керується C/C++ програмованим мікроконтролером ATmega168 фірми Atmel, що працює на тактовій частоті 20 МГц і має вбудовану пам'ять: 16 кБ flash, 1 кБ RAM, 512 байт EEPROM. Швидкість руху робота може досягати 1 м/с. Робот має невеликий розмір: діаметр 9,5 см, вага 83 г (без батарей). В якості батарей використовуються лише чотири елементи ААА. Унікальна система

живлення видає на двигуни постійний струм величиною в 9,25 В незалежно від рівня заряду батареї [10].

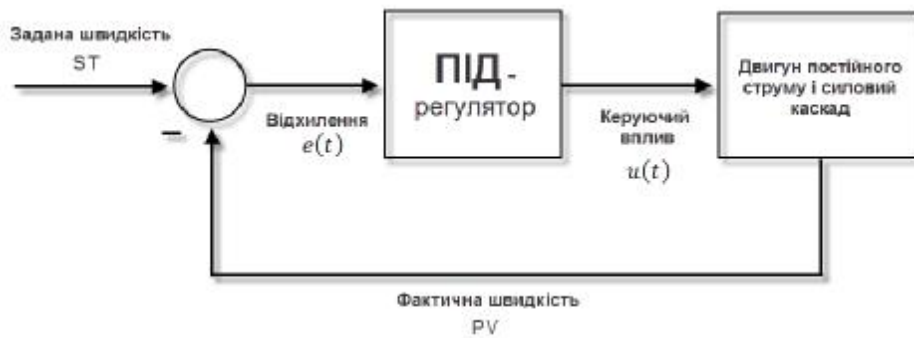


Рис. 2. Принцип розрахунку відхилення  $e(t)$



Рис. 3. Роботехнічна система Зрі

Перед тим як почати рух, значення від п'яти датчиків відбиття робота калібруються. Спочатку визначаються мінімальне та максимальне значення кожного з датчиків (здійснюються повороти ліворуч та праворуч на  $90^\circ$  відносно чорної лінії, що знаходиться на білому треку). Потім відбувається калібрування зчитаних даних із датчиків в межах від 0 до 1000, де 0 відповідає мінімальному значенню, а 1000 – максимальному. Відкалібровані дані зберігаються окремо для кожного датчика (нумерація датчиків починається з нуля і проводиться зліва-направо), тому відмінності між датчиками враховуються автоматично.

Оцінка розташування робота відносно лінії здійснюється шляхом використання середньозважених індексів датчиків, помножених на 1000. Тоді повернене значення 0 означає, що лінія знаходиться безпосередньо під датчиком 0, а повернене значення 1000 означає, що лінія розташована безпосередньо під датчиком 1 і т.д. Проміжні значення вказують, що лінія знаходиться між двома датчиками. Для оцінки використовується наступна формула:

$$Result = \frac{0 \cdot value0 + 1000 \cdot value1 + 2000 \cdot value2 + \dots}{value0 + value1 + value2 + \dots} \quad (2)$$

Відстань між датчиками робота Зрі менша в порівнянні з шириною лінії треку, тому повернене середньозважене значення буде монотонним, що найкраще підходить для використання цих даних у замкненому ПІД-контурі. Максимальне значення, що може повертатися за даною формулою, дорівнює 4000 і означає, що 4-ий датчик розташовано над лінією або ж ліворуч від неї, а мінімальне – 0, тобто 0-ий датчик є над лінією чи праворуч від неї.

Використовуючи дані, отримані від датчиків, ПІД-регулятор допомагає позбутися деяких проблем під час руху мобільного агента по кривій траєкторії (наприклад, смикання робота) і значно збільшити швидкість руху в процесі слідування по лінії. Обраховане за допомогою ПІД-регулятора значення дозволяє обчислити різницю між двома параметрами потужностей двигунів. Якщо це число додатне – робот поверне праворуч, а інакше – ліворуч. Величина даного числа визначає різкість повороту.

Пропорційна складова ПІД-регулятора залежить від позиції робота відносно лінії. Тому, якщо робот знаходиться точно по центру лінії, пропорційна складова повинна дорівнювати нулю. Якщо ж він знаходиться ліворуч лінії, то пропорційна складова буде додатнім числом, якщо ж праворуч – від'ємним. Ця складова обчислюється за допомогою функції, яка подає середньозважене значення (2). Оскільки функція повертає значення в діапазоні від 0 до 4000, то від цього значення необхідно відняти число 2000.

Інтегральна складова зберігає історію руху робота. Це сума усіх значень пропорційних складових, що були збережені до того, як робот почав рухатися. Диференціальна змінна є частотою зміни пропорційної складової. Ця складова реалізована як різниця останніх двох пропорційних складових.

Нижче подано частина коду, яка обчислює вхідні значення ПІД-регулятора:

```
// Отримуємо позицію робота на лінії.
unsigned int pos = read_line(sensors,IR_EMITTERS_ON);
// Пропорційна складова повинна дорівнювати нулю, якщо робот на лінії.
int p = ((int)pos) - 2000;
// Обчислюємо диференціальну та інтегральну складові.
int d = p - last_p;
i += p;
// Запам'ятовуємо останню позицію.
last_p = p;
```

Кожне із вхідних значень забезпечує різні види інформації. Наступним кроком є реалізація формули (1), яка об'єднує всі значення в одне (це значення потім використовується для визначення швидкості двигунів):

```
int motor_speed = p/20 + i/10000 + d*3/2;
// Обчислюємо поточні налаштування двигуна.
const int max = 60;
if(motor_speed > max)
    motor_speed = max;
if(motor_speed < -max)
    motor_speed = -max;
if(motor_speed < 0)
    set_motors(max+ motor_speed, max);
else
    set_motors(max, max- motor_speed);
```

Значення 1/20, 1/1000 та 3/2 представляють собою регульовані параметри  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ . Вони визначають як саме робот зрі реагуватиме на лінію. Ці значення були вибрані довільно. Вцілому, збільшення цих ПІД-параметрів зробить значення змінної motor\_speed більшим, що призведе до більших відхилень, в той час як зменшення зробить реакцію робота повільнішою. Застосовані параметри є оптимальними для забезпечення стабільності руху при максимальній швидкості, величина якої дорівнює 100. А щоб досягти максимально можливої швидкості двигунів мобільного агента, яка становить 255, необхідно провести додаткові дослідження з пошуку оптимальних параметрів ПІД-регулятора.

Саме підбір регульованих значень дає можливість забезпечити стабільність руху мобільного агента на максимальних швидкостях.

Розрахунок параметрів по формулах не може дати оптимального налаштування регулятора, оскільки аналітично отримані результати ґрунтуються на дуже спрощених моделях об'єкту. Зокрема, в них не враховується завжди присутня нелінійність типу «обмеження» для керуючого впливу [3]. Крім того, моделі використовують параметри, що визначені з деякою похибкою. Тому після розрахунку параметрів ПІД-регулятора необхідно зробити його коректування на основі наступних правил: збільшення пропорційного коефіцієнта збільшує швидкодю і знижує запас стійкості, зі зменшенням інтегральної складової помилка регулювання з часом зменшується

швидше; зменшення сталої інтегрування зменшує запас стійкості; збільшення диференціальної складової збільшує запас стійкості і швидкодію.

Ручне налаштування регульованих параметрів за допомогою цих правил зручно виконувати із застосуванням інтерактивного програмного забезпечення на комп'ютері, підключеному до пристрою, а після виконання налаштування значення цих коефіцієнтів регулятора записують в пам'ять ПІД-контролера, а комп'ютер від'єднують.

**Висновки.** У теорії автоматичного керування у сфері застосування їх до управління рухом мобільних агентів і, незважаючи на величезну кількість алгоритмів та методів управління, велика частина проблем у реалізації керуючих циклів у програмному забезпеченні для різних пристроїв вирішується з використанням найпростіших контролерів. Серед них обрано ПІД-контролер, що може бути використаним для управління будь-якою змінною, яку можна виміряти. Реалізація та налаштування даного контролера здійснюється досить просто та не вимагає залучення складного математичного апарату чи тривалого вивчення теорії управління.

Здійснено практичну реалізацію програмного ПІД-регулятора, що дало можливість підвищити швидкість руху робота по заданій траєкторії та скоректувати цю швидкість під час виявлення та виконання поворотів. Це дозволило підвищити якість керування, рівень контролю, швидшу реакцію та забезпечити плавність руху робота.

**Перспективи подальших досліджень.** Хоча програмно реалізований ПІД-регулятор і дозволяє покращити якість та швидкість руху робототехнічної системи Зрі, проте використані регульовані ПІД-параметри дозволяють розвивати лише швидкість, що не перевищує 100. Максимально можлива швидкість руху робота становить 255. Тому метою подальших досліджень є вивчення особливостей налаштування ПІД-регулятора та підбір найоптимальніших параметрів з метою наближення швидкості Зрі робота до максимальної.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления: Учеб. пособ. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 616 с.
2. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 616 с.
3. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.
4. Ang K. H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology. IEEE Trans. on Control Syst. Tech., vol.13, No. 4, July 2005. – p. 559-576.
5. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers. Trans. ASME, vol. 64, 1942. – p. 759-768.
6. Astrorn K.J. and Hagglund T. Advanced PID control. - ISA - The Instrumentation, Sysytem, and Automation Society, 2006. – 460 p.
7. «Digital control: past, present and future of PID control», in Proc. IFAC Workshop, J. Quevedo and T. Escobet, Eds., Terrassa, Spain, Apr. 5–7, 2000.
8. O' Dwyer A. PID compensation of time delayed processes 1998-2002: a survey. Proceedings of the American Control Conference. Denver, Colorado June 4-6, 2003. – p. 1494-1499.
9. LI Y., ANG K.H, and CHONG G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art. IEEE Control Systems Magazine, Feb. 2006. – p. 41-54.
10. <http://www.pololu.com/catalog/product/975>