

УДК 681.5.015.8

Смолянкін О.О., Маркіна Л.М., Захарчук О.Б.  
Луцький НТУ

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ЗАМКНУТОМУ ОБ'ЄКТІ

**Смолянкін О.О., Маркіна Л.М., Захарчук О.Б.** Дослідження та регулювання теплових процесів в замкнутому об'єкті. В статті розглядається ідентифікація теплового процесу методом Сімою. Досліджено перехідну характеристику даного процесу та побудовано модель за допомогою пакету Matlab. Для отриманої моделі розраховано регулятор.

**Ключові слова:** тепловий процес, метод Сімою, перехідна характеристика, ПІД-регулятор, регулювання в Matlab.

**Смолянкин О.А., Маркина Л.М., Захарчук О.Б.** Исследования и регулирование тепловых процессов в замкнутом объекте. В статье рассматривается идентификация теплового процесса методом Симой. Исследована переходная характеристика данного процесса и построена модель с помощью пакета Matlab. Для полученной модели рассчитаны регулятор.

**Ключевые слова:** тепловой процесс, метод Симой, переходная характеристика, ПИД-регулятор, регулирование в Matlab.

**Smolyankin O., Markina L., Zaharchuk O.B.** The research and regulation of thermal processes in a closed facility. The paper considers identification of thermal process by Simoyu method. The transient response of the process was analyzed and the model was built in Matlab package. The regulator for the resulting model was calculated.

**Keywords:** thermal process, Simoyu method, transient response, PID controller, regulating in Matlab

Теплові процеси зустрічаються в усіх галузях виробництва. Найбільше їх використання припадає на харчову[10], хімічну та нафтопереробну галузі [3], де точність швидкість та якість регулювання теплових процесів відіграють ключову роль в якості готової продукції та її цінності категорії. Оскільки проводити як активні так і пасивні експерименти з технологічним обладнанням в таких галузях є затратним, тому доцільним є створення установок, котрі б імітували той чи інший тепловий процес, його дослідження та підбір необхідних параметрів регуляторів.

Необхідно зазначити, що дослідженням та створенням стендів [6] та установок [8] по вивченню даної проблеми займаються Голінко І. М., Мисак В.Ф., Проць Я. І. Та інші вчені.

Українськими вченими розглядаються різні аспекти даної проблеми та невирішеними залишаються можливості варіації параметрів контролерів для регулювання теплових процесів, використання інших контролерів та інших принципів регулювання. Також постає питання про ідентифікацією та дослідження теплових процесів, не охоплених наявними дослідженнями, а отже і їх регулювання.

Метою дослідження є ідентифікація теплового процесу в замкнутому контурі, створення його моделі та визначення оптимальних параметрів регулятора.

Розроблена установка (рис. 1) [1], [5] для зняття перехідних характеристик та підбору регулятора на основі контролю за технологічним процесом нагріву повітря.

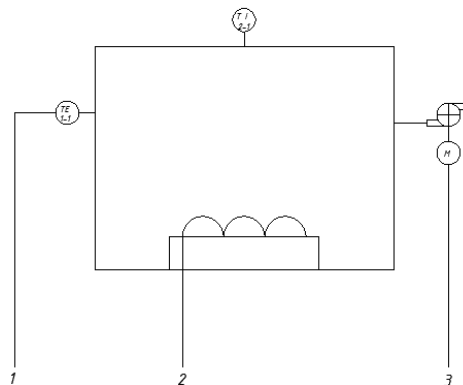


Рис. 1. Функціональна схема процесу нагріву повітря  
авторська розробка

Спроектовано прозорий корпус з акрилу, всередині якого знаходиться датчик температури для зняття показів 1-1. Для тарування датчика було застосовано додатковий еталонний термометр. Сигнал від датчика надходить на плату перетворення сигналів, а звідти на контролер. Нагрівання відбувається за допомогою тону з ніхромю 1-3. За необхідності створення збурення вмикається вентилятор 1-4.

Для ідентифікації об'єкту та визначення передаточної функції використано метод Сімою М. П. для об'єкту без самовирівнювання [9]. Всі розрахунки та розробка моделей проводила в програмі Matlab.

Першим етапом ідентифікації стала побудова кривої розгону [2]. Оскільки крива розгону є характеристикою інтегрального типу, то може бути описана моделлю наступного виду:

$$W_M(s) = \frac{K}{s} \cdot \overline{W}_M(s) \cdot e^{-s\tau} = \frac{K}{s} \cdot \frac{1+b_1s+b_2s^2+\dots+b_ms^m}{1+a_1s+a_2s^2+\dots+b_ns^n} \cdot e^{-s\tau} \quad (1)$$

де:

$K$  – коефіцієнт підсилення,

$\tau$  – час запізнення (запізнення),

$a_i, b_i$  – коефіцієнти передаточної функції.

Основною задачею є визначення коефіцієнтів  $a_i, b_i$  передаточної функції.

Після проведення ряду перетворень формулу (1) можна звести до вигляду:

$$W_M(s) = \left( \frac{k_1}{s} - K_2 \cdot \frac{1+b_1s+b_2s^2+\dots+b_ms^m}{1+a_1s+a_2s^2+\dots+b_ns^n} \right) e^{-\tau s} \quad (2)$$

Наступним етапом став розрахунок моментів і площ, які дали змогу побудувати основні найпоширеніші моделі об'єкту регулювання. Результат роботи яких показано на Рис. 2.

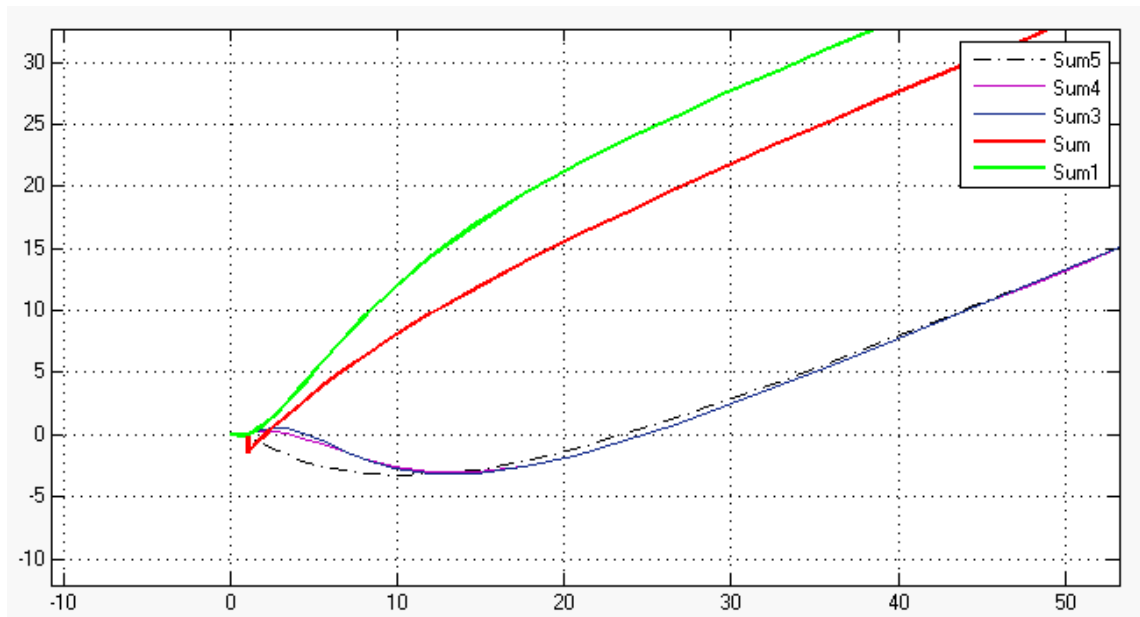


Рис. 2. Результат роботи моделей авторська розробка

Отже, з використаних моделей лише одна точно відображає перехідний процес. Ця модель представлена на рис. 3.

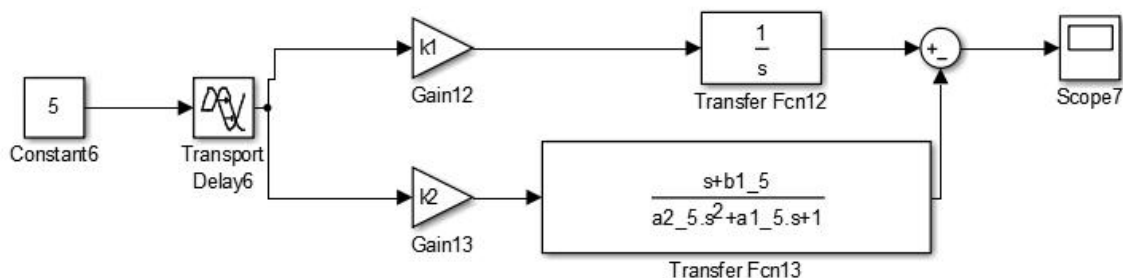


Рис. 3. Модель процесу нагріву повітря авторська розробка

Після отримання нової математичної моделі об'єкта регулювання постало питання підбору коефіцієнтів для ПІД-регулятора [4].

Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор[7] - найбільш ефективний і поширений вид регулятора, що забезпечує досить високу точність при управлінні різними процесами.

ПІД-регулятор виробляє вихідний сигнал, який розраховується за такою формулою:

$$u = K_1 \left( \varepsilon + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon dt + T_p \frac{d\varepsilon}{dt} \right) \quad (3)$$

Пропорційна складова залежить від неузгодженості  $\varepsilon$  і відповідає за реакцію на миттєву помилку регулювання.

Інтегральна складова містить в собі накопичену помилку регулювання, яка є додатковим джерелом вихідної потужності і дозволяє домогтися максимальної швидкості досягнення уставки при відсутності перерегулювання.

Диференціальна складова залежить від швидкості зміни регульованого параметра, що викликає реакцію регулятора на різку зміну вимірюваного параметра, що виникло, наприклад, в результаті зовнішнього збурюючого впливу.

Для ефективної роботи ПІД-регулятора необхідно підібрати значення коефіцієнтів. Це можна зробити вручну або скористатися автонастроюванням.

Було створено Simulink-модель процесу рис. 4.

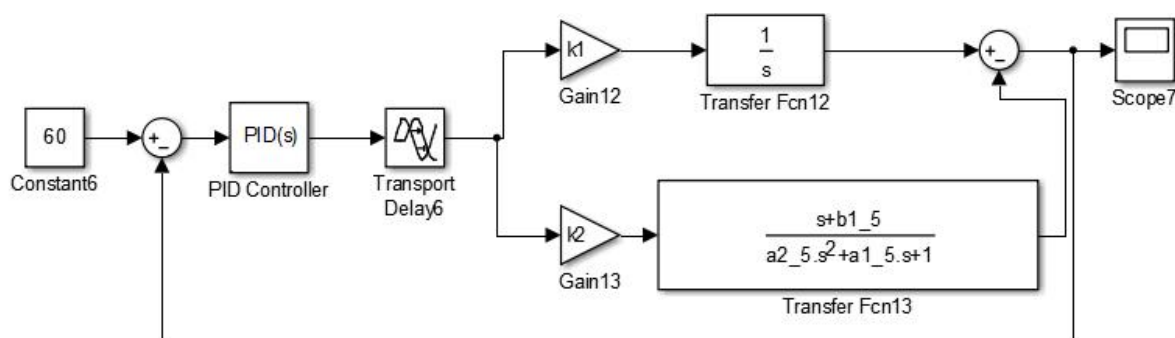


Рис. 4. Simulink-модель об'єкта регулювання з ПІД-регулятором авторська розробка

Для розрахунку коефіцієнтів було використано вбудовану функцію Tune.

Під час розрахунку були визначені такі оптимальні параметри регулятора рис. 5:

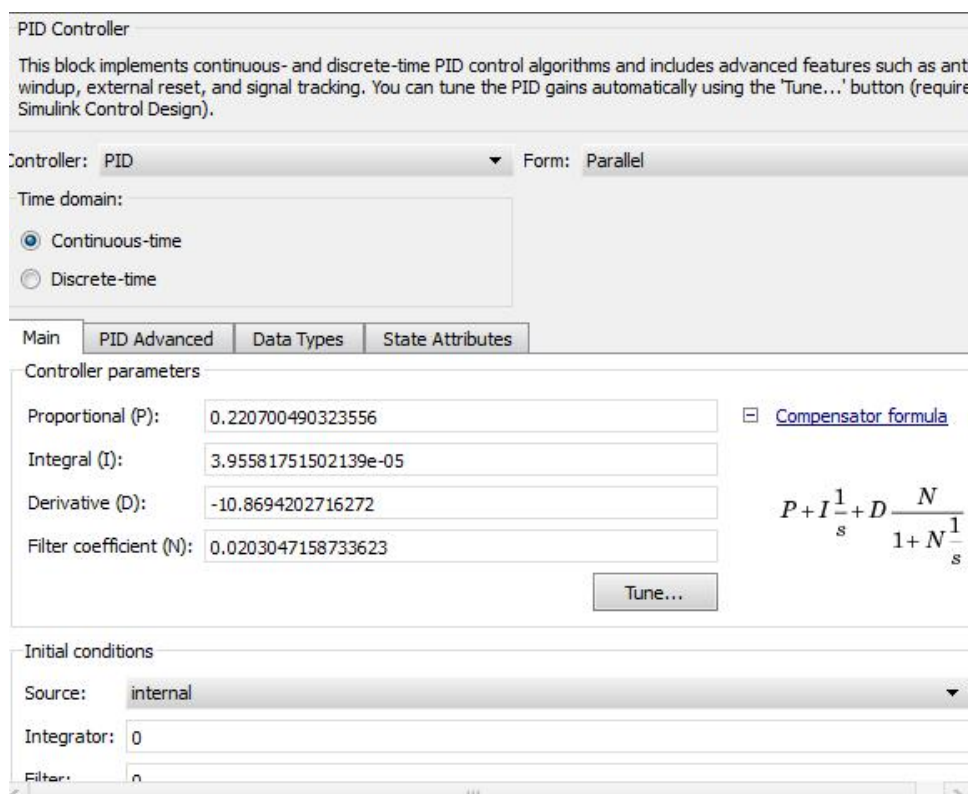


Рис. 5. Коефіцієнти ПІД-регулятора авторська розробка

Результат роботи моделі з ПІД-регулятором представлено на рис. 6.

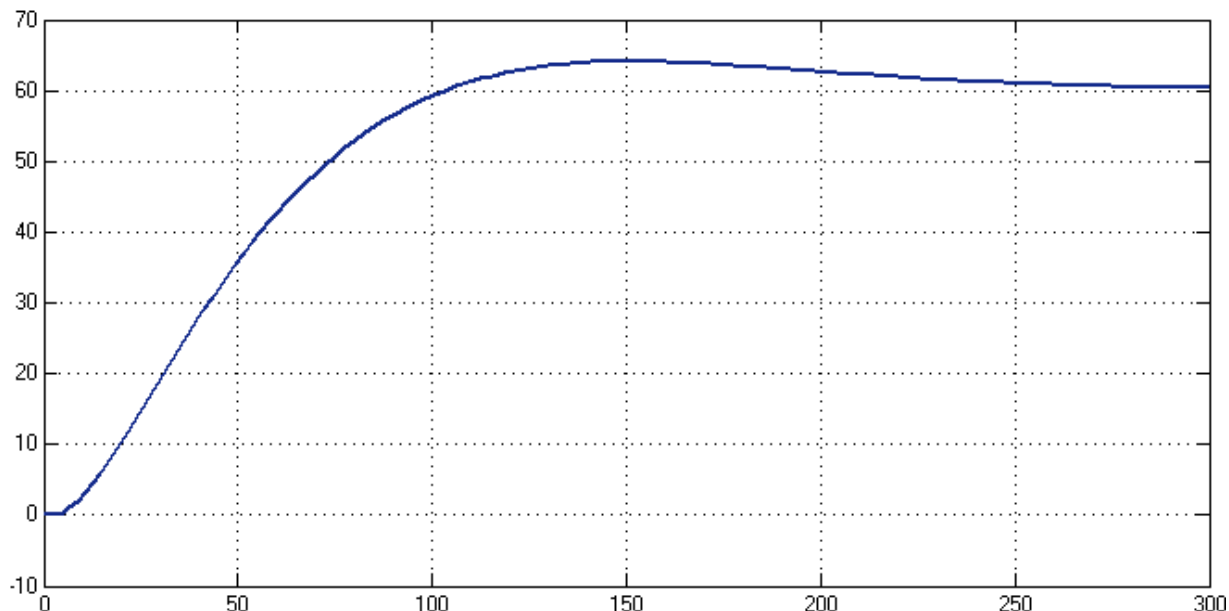


Рис. 6. Робота моделі з ПІД-регулятором авторська розробка

Після розробки моді та підбору параметрів регуляторів постало питання в їх реалізації до установки. В якості регулятора було вибрано плату Arduino Uno, яка має не тільки свою платформу для програмування, але й прекрасно працює на базі Matlab і Simulink. Також для даної плати розроблено бібліотеку для ПІД-регулювання, яка дає можливість застосувати знайдені параметри ПІД-регулятора. Оскільки скетч-програма для плат Arduino досить проста і програми в ній займають мало пам'яті тому доцільно скористатись саме нею.

Спочатку підключається необхідна бібліотека для роботи з ПІД регуляторами:

```
#include <PID_v1.h>
```

Далі описуються константи:

```
unsigned long time;
```

```
const int ledPin = 13; // лапка підключення діода
```

```
const int tenPin = 3; // лапка підключення тена
```

```
const int datchuk=0; // лапка підключення датчика температури
```

```
const int ventPin = 11; // лапка підключення вентилятора
```

```
const int knopPin = 2; // лапка підключення кнопки
```

Опис змінних і функцій:

```
double Setpoint, Input, Output;
```

```
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint,0.22,3.96,-10.87, DIRECT); // з перерегулюванням
```

Процедура запуску включає в себе ініціалізацію константи tenPin як «вихід», ledPin як «вихід» та константи datchuk як «вхід», ventPin як «вихід», knopPin як «вхід». Присвоєння змінній Setpoint значення 60 (значення необхідної температури), та прописується, що ПІД-регулятор буде ввімкнений під час створення.

```
void setup (void) {
```

```
pinMode(ledPin, OUTPUT);
```

```
pinMode(ventPin, OUTPUT);
```

```
pinMode(tenPin, OUTPUT);
```

```
pinMode(datchuk, INPUT);
```

```
pinMode(knopPin, INPUT);
```

```
Setpoint = 60;
```

```
myPID.SetMode(AUTOMATIC);
```

```
Serial.begin (9600);
```

```
}
```

В основному циклі програми спочатку прописуються змінні, потім за допомогою полінома 3 степеня прописується значення температури.

```
void loop (void) {
```

```
byte i;
```

```
int k;
```

```
float celsius;
```

```
float x,y;
```

```
y=(5.0/1023)*analogRead(datchuk);
```

```
x=analogRead(datchuk);
```

```
celsius=0.0000004786501*x*x*x-0.0007839772560*x*x+0.5698116814640*x-  
116.7036710064136;
```

```
k=digitalRead(knopPin);
```

Ініціалізується значення температури celsius як вхідне для регулятора, а значення tenPin як вихідне і розраховується вихідний сигнал.

```
Input=celsius;
```

```
Output=tenPin;
```

```
myPID.Compute();
```

Тепер значення вихідного сигналу подається на тен:

```
analogWrite(tenPin,Output);
```

А на термінал виводяться значення часу, напруги на датчику, температури.

```
Serial.print (celsius);
```

```
Serial.print ("\t");
```

```
time = millis()/1000;
```

```
Serial.println(time);
```

```
delay(2000);
```

У разі виникнення ситуації, коли температура перевищує 100 градусів автоматично вмикається тен і засвідчується 13діод на платі.

```
if (celsius < 100){
```

```
digitalWrite(ledPin, HIGH);
```

```
analogWrite(tenPin, 0); }
```

Якщо кнопка ввімкнена, то вмикається вентилятор.

```
if (k!=0)  
digitalWrite(ventPin, 30);  
else digitalWrite(ventPin, 0);}
```

Результат роботи програми можна побачити в терміналі в режимі реального часу з вказаним інтервалом.

Після проведення дослідів отримано наступні графіки регулювання рис. 7:

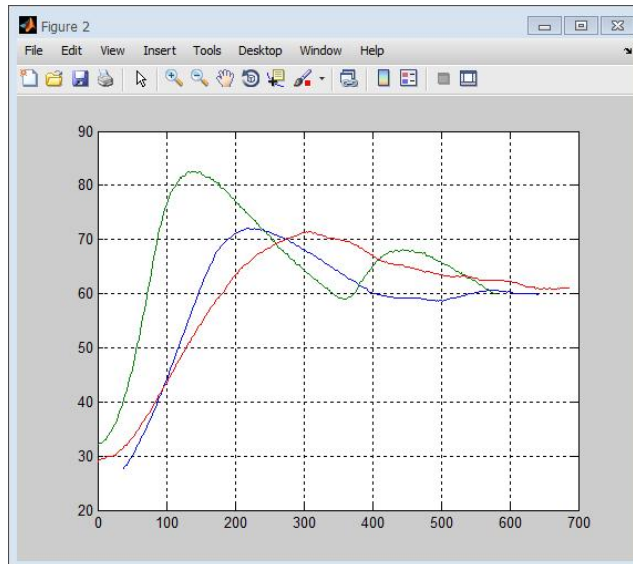


Рис. 7. Перехідні характеристики з Т-регулятором, ПД-регулятором і зі збуренням авторська розробка

Аналізуючи вище викладене можна зробити висновок, що ПД-регулювання можна застосовувати в теплових процесах, де необхідна точність, плавність і якість регулювання. В той же час побудова і настройка таких регуляторів не вимагає особливих затрат.

Проте на даний час існують більш точні та якісно нові регулятори, побудовані на основі нечіткої логіки та нейромодельовання. Можливість їх застосування до теплових процесів на даному етапі розвитку науки мало вивчена, тому перспектива подальших досліджень лежить саме в цьому напрямку.

1. НПАОП 40.1-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.
2. Волгин В.В. Методы расчета систем автоматического регулирования/ В.В. Волгин// Учебное пособие. – М.: Издательство МЭИ, 1972. – 192 с.
3. Врагов А.П. Теплообмінні процеси та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв/ А.П. Врагов // Навч. посібник. – Суми: Вид-во СумДУ, 2006. – 262с.
4. Говоров П. П. Конспект лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування» (для студентів денної і заочної форм навчання напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології») / П. П. Говоров, В. П. Говоров, В. О. Перепечений, О. В. Король //Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; авт. - Х.: ХНАМГ, 2012. - 221 с.
5. Клюев А.С. Проектирование систем автоматизации и ТП/ А.С. Клюев, Б.В. Глазов. - М: Рад. шк., 1990.-464с.
6. Мисак В.Ф. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Автоматизація і енергозбереження» для студентів спеціальності «Автоматизоване управління виробничими процесами»/Укл. В.Ф. Мисак, І.М. Голінко – Київ:НТУУ «КПІ», 2006.-31с.
7. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування/ М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. –К.:Либідь, 1997.-544с.
8. Проць Я.І. Автоматизація неперервних технологічних процесів/Я.І. Проць, О.А. Данилюк, Т.Б. Лобур // Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів – Тернопіль: ТДТУ ім. І.Пулля, 2008. –239с.
9. Симою М.П. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев систем регулирования/ М.П. Симою.// Автоматика и телемеханика. – 1957. - № 6. – С 514-527.
10. Товажнянський Л.Л.. Харчові технології у прикладах і задачах/ Л.Л. Товажнянський, С.І. Бухкало, П.О. Капустенко, О.П. Арсенєва, С.І. Орлова //Підручник. – К.: Центр учбової літератури, 2008. – 576 с.