

## УНІВЕРСАЛЬНИЙ ПІД-ТЕРМОРЕГУЛЯТОР

© Кремень В.Т., Сметана А.С., 2004

Описується реалізація ПІД-регулятора температури на базі мікроконтролера PSoC. Розглядаються різноманітні конфігурації системи контролю температури і аспекти їх практичного виконання. Застосовуються два типи термодавачів: термопара і платиновий терморезистор. Для передачі потужності у навантаження також наводяться два методи: фазовий та імпульсно-числовий. Таке різноманіття конфігурацій системи дозволяє використовувати даний терморегулятор у різних виробничих і побутових системах, де необхідний контроль температури.

The digital temperature PID controller implementation is described. The various temperature control system configurations and aspects of their practical implementation are analyzed. Two types of temperature sensors are applied: they are thermocouple and platinum RTD sensor. The device supports two heater power control methods – phase and numeral-impulse methods. Such variety of system configurations allow us to use thermoregulator in different industry and home systems, which needs the temperature control.

Регулятори можна створювати на основі як аналогової, так і цифрової техніки. Відповідно, для аналізу і проектування аналогових і цифрових регуляторів необхідні різні математичні методи. Хоча цифрова технологія дає змогу добре моделювати роботу аналогової системи, її можливості значно ширші. Наприклад, можна будувати нелінійні і самонастроюючі регулятори, які важко створювати на основі тільки аналогових засобів. Головна проблема цифрового управління – знайти відповідну структуру регулятора і його параметри. Після визначення цих параметрів, реалізація алгоритмів управління звичайно являє собою просту задачу.

Структурну схему найпростішого регулятора зображено на рис. 1.

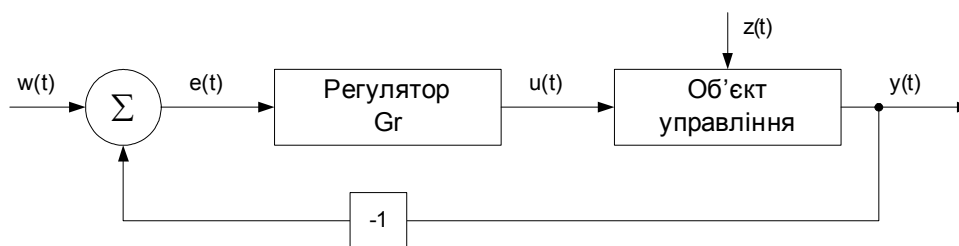


Рис. 1. Структура найпростішого регулятора

Ця структура являє собою систему автоматичного управління із зворотним зв'язком. На рис. 1 використано такі позначення:  $w(t)$  – алгоритм функціонування системи;  $u(t)$  – керуючі дії;  $z(t)$  – зовнішні збурення, вплив яких необхідно звести до мінімуму;  $y(t)$  – вихідна змінна;  $e(t) = w(t) - y(t)$  – відхилення вихідної змінної  $y(t)$  від бажаного значення  $w(t)$ .

Вихідною змінною може бути температура у печі, швидкість обертання вала двигуна, рівень рідини у баці і т. ін. Метою управління може бути зміна вихідної змінної за заданим законом  $w(t)$ . Для цього необхідно звести до мінімуму похибку управління  $e(t)$ .

Ця задача розв'язується автоматичним регулятором  $Gr$  (рис.1), який описується деяким законом регулювання  $u(t) = Gr[e(t)]$ . Для правильного вибору закону регулювання необхідно знати

математичну модель об'єкта управління  $y(t)=G_0[u(t)]$ . Математична модель звичайно являє собою систему звичайних нелінійних диференціальних рівнянь або диференціальних рівнянь у частинних похідних. Знаходження виду і коефіцієнтів цих рівнянь являє собою задачу ідентифікації об'єкта управління. Для традиційно використовуваних об'єктів управління математичні моделі часто відомі і тоді задача ідентифікації конкретного об'єкта зводиться до відшукування значень коефіцієнтів рівнянь. У багатьох випадках ці коефіцієнти можна підібрати дослідним шляхом під час налагодження системи.

Серед особливостей систем управління із зворотним зв'язком виділимо такі:

- контур зворотного зв'язку ініціює, коректуючи дії, як тільки керована змінна відхилиться від опорного значення, незалежно від причини відхилення.
- для управління на основі зворотного зв'язку достатньо мінімальних знань динаміки керованого процесу, тобто не вимагається детальна модель процесу.

Вибір закону регулювання  $u(t)=Gr[e(t)]$  є основною ланкою під час проектування системи автоматичного регулювання. Синтез оптимального регулятора, який дає максимальні показники якості регулювання, являє собою достатньо складну задачу. Крім того, реалізація оптимального регулятора може виявитися економічно неоправданою. Однак в багатьох випадках автоматизації виробничих процесів можуть бути використані найпростіші і найпоширеніші типи лінійних регуляторів П-, І-, та ПІД-регулятори.

Ідеалізоване рівняння ПІД-регулятора має вигляд:

$$u(t) = K \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (1)$$

де  $K$  – коефіцієнт передачі;  $T_I$  – постійна інтегрування;  $T_D$  – постійна диференціювання.

Ці три параметри підбираються під час налагодження регулятора таким чином, щоб максимально приблизити алгоритм функціонування системи до бажаного вигляду.

Описана система автоматичного регулювання є неперервною, тобто використовує не перервний час. Під час побудови регулятора на базі мікропроцесорної техніки вхідні та вихідні змінні регулятора необхідно квантувати у часі з деяким кроком і перетворювати у цифрову форму за допомогою АЦП. При цьому рівняння ПІД-регулятора повинно бути перетворене у різницеве за допомогою заміни похідних кінцевою різницею, а інтеграла – кінцевою сумою. При використанні методу прямокутників для заміни інтеграла кінцевою сумою отримаємо:

$$u(k) = K \left[ e(k) + \frac{T_0}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i-1) + \frac{T_D}{T_0} [e(k) - e(k-1)] \right],$$

де  $k = 0, 1, \dots, \frac{t}{T_0}$  – порядковий номер відліку дискретного часу.

Незважаючи на те, що цифрова технологія має багато переваг, аналоговий підхід зберігає свої позиції, оскільки він є основою для цифрових рішень. До очевидних переваг цифрових регуляторів належить можливість за допомогою каналів зв'язку з'єднувати їх один з одним, що дає змогу проводити обмін даними і застосовувати віддалене керування.

**Характеристики регулятора.** Розроблений терморегулятор реалізований за принципом цифрового ПІД-регулятора. Основним його завданням є підтримання заданого профілю температури об'єкта. При чому передбачено можливість управління як потужними, так і малопотужними навантаженнями. Як давачі температури об'єкта використовуються поширені в промисловості резистивний детектор температури і термоелемент (термопара). Для здійснення передачі потужності у навантаження також реалізовані два методи: фазовий та імпульсно-числовий. Другий метод використовується для управління інерційним навантаженням, який працює за принципом подачі у навантаження декількох півперіодів мереженої напруги з наступною паузою. У цій реалізації цей метод модифікований з метою зменшення пульсації температури.

Для того, щоб спростити налагодження терморегулятора, до нього був доданий інтерфейс RS-232 і розроблена командна мова. Таким чином можливим є використання стандартних термінальних програм для встановлення параметрів системи і отримання поточної інформації від неї. Щоб створити зручний інтерфейс користувача для управління регулятором і візуалізації процесу регулювання було розроблено Win32 аплікацію на базі C++Builder.

Таким чином отримується універсальний терморегулятор з різними типами датчиків, навантажень і методів управління потужністю. Потрібна комбінація можливостей системи вибирається, враховуючи технологічні умови експлуатації регулятора.

**Блок-схема регулятора.** Блок-схему регулятора зображено на рис. 2. Відмітимо, що затемненими блоками зображені зовнішні щодо PSoC-мікроконтролера блоки. Принцип роботи терморегулятора полягає у такому.

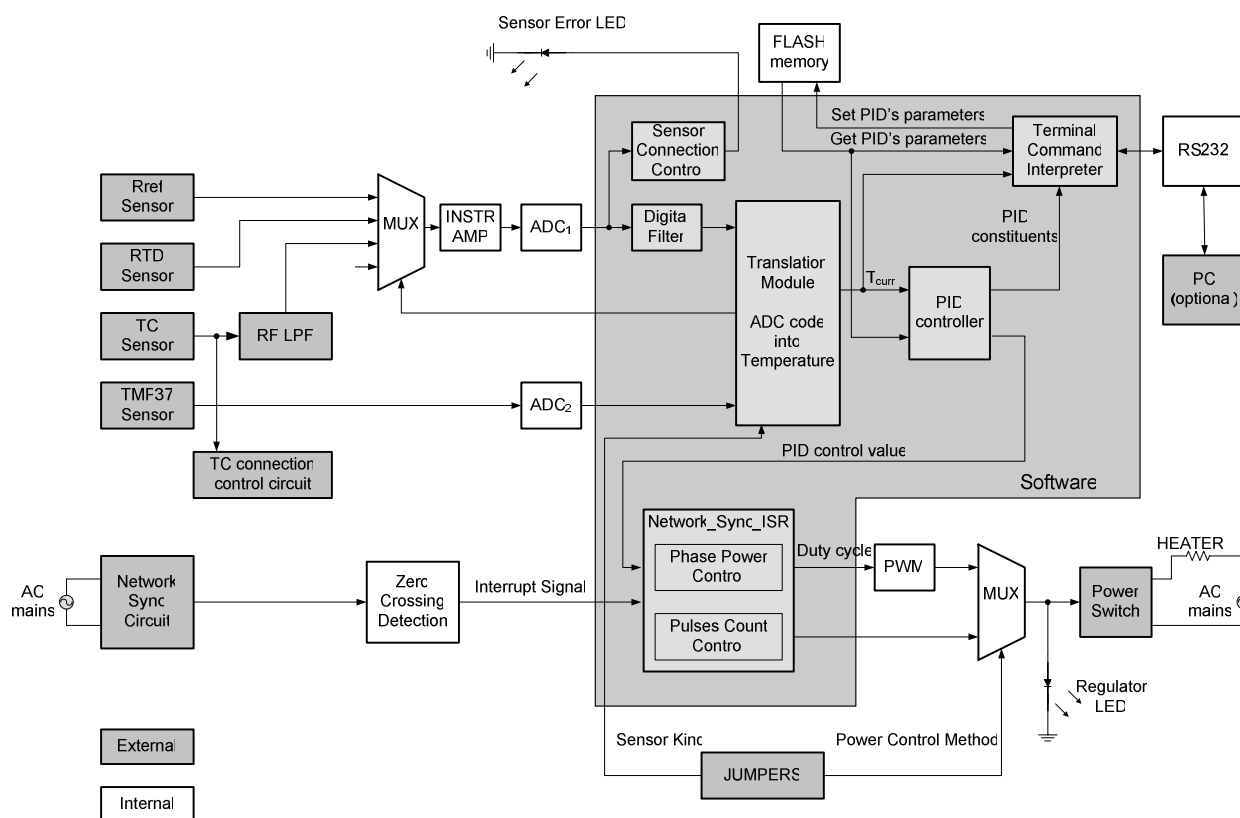


Рис. 2. Блок-схема регулятора

Структура регулятора складається із двох основних частин: системи синхронізації з вузлом управління потужністю та вимірювальною частиною з ПІД-регулятором. Дві ці підсистеми працюють незалежно і паралельно у часі. Центральним вузлом системи синхронізації є підпрограма обробки переривання (*Network\_Sync\_ISR*), яка викликається кожний раз, коли сигнал у мережі змінного струму перетинає нульовий потенціал. Далі ця підпрограма читає останнє значення керуючого сигналу (*PID control value*), яке сформував вузол ПІД-регулятора (*PID-controller*). Залежно від поточного методу управління потужністю запускається або фазовий, або імпульсно-числовий алгоритм генерації вихідного сигналу управління. Вибір методу управління потужністю визначається під час ініціалізації мікроконтролера після скиду опитуванням переминок (*JUMPERS*). Фазовий метод використовує широтно-імпульсний модулятор (PWM) для формування керуючого сигналу. Цей сигнал використовується для управління електронним ключем *Power Switch*.

Аналогова частина системи синхронізації частково реалізована зовнішнім вузлом (*Network Sync Circuit*), а також внутрішніми блоками мікроконтролера PSoC. Вузол детектування «переходу через нуль» (*Zero Crossing Detection*) виконаний за схемою тригера Шмітта, характеристика якого

має гістерезис. Такий підхід запобігає виробленню хибних сигналів синхронізації, особливо в моменти комутації навантаження. На виході цього блока формується цифровий сигнал, який генерує переривання.

Далі розглянемо принципи роботи вимірювальної частини регулятора. Координуючим блоком цієї підсистеми є модуль трансляції (*Translation Module*). Він вибирає давач для зняття його показів залежно від поточних установок перемичників *JUMPERS*. Вибір давача здійснюється засобами внутрішнього мультиплектора (*MUX*). Скомутований сигнал підсилюється блоком інструментального підсилювача (*INSTR AMP*), причому для термопар і терморезистора коефіцієнт підсилення різний. Далі аналоговий сигнал перетворюється у цифрову форму за допомогою АЦП<sub>1</sub> (*ADC<sub>1</sub>*). Для запобігання впливу на процес регулювання зовнішніх завад, оцифрований сигнал пропускається через нелінійний цифровий фільтр (*Digital Filter*), на виході якого встановлюється код, готовий до обробки. Модуль трансляції (*Translation Module*) перетворює код АЦП у відповідне значення температури, використовуючи таблиці характеристик давачів. Методи трансляції для термопар і терморезистора відрізняються, що викликано специфікою вимірювальних методів. Для вимірювання температури на основі терморезистора використовується 4-провідна схема вимірювання. Перевагою такого методу є те, що довжина проводів, які з'єднують давач з іншою частиною схеми на платі, не буде впливати на точність вимірів. Отже, для методу вимірювання на базі терморезистора необхідно по чергово виміряти поточні значення напруг на двох резисторах  $R_{REF}$  *Sensor* і *RTD Sensor*. Після чого обчислити опір давача *RTD* і знайти відповідне значення температури за таблицею. Метод вимірювання на основі термопар ще додатково використовує термодавач *TMP37*, який вимірює значення температури холодного спаю термопар. Для цього він використовує АЦП<sub>2</sub> (*ADC<sub>2</sub>*). Відмітимо, що АЦП<sub>1</sub> і АЦП<sub>2</sub> працюють паралельно. Щоб отримати абсолютну температуру об'єкта управління – додаються значення температур на давачі *TMP37* і термопарі. Отже, температура об'єкта передається на вузол ПД-регулятора, який порівнює його з опорним значенням і виробляє відповідні сигнали управління.

Для зменшення небажаного впливу наводок на провідники термопар, викликаних роботою оточуючої електротехніки та радіохвиль, її сигнал пропускається через фільтр нижніх частот (*RF LPF*). Також передбачено контроль обриву термодавачів двома вузлами *TC connection control* і *Sensor Connection Control*. Якщо детектується обрив давача – засвічується світлодіод *Sensor Error LED*, регулятор виставляє на виході нульовий сигнал (тобто відмикає навантаження) і переходить в режим очікування підімкнення давача.

**Управління потужністю.** Для передачі потужності у навантаження може використовуватися один із двох методів:

- фазовий метод, при якому потужність, що відводиться у навантаження, визначається зміною фазового кута запуску;
- імпульсно-числовий метод управління здійснюється цілими півперіодами. При цьому імпульси на керуючому електроді подаються безпосередньо відразу після того, як напруга від джерела перетинає нульовий рівень і упродовж заданого інтервалу часу навантаження підімкнене до джерела. За цей час через навантаження проходить декілька цілих півперіодів струму.

Імпульсно-числовий метод застосовується для управління подачею потужності у навантаження з великою постійною часу (інерційне навантаження), тобто, яке володіє усереднюючою дією на частоті джерела живлення. Перевагою такого методу є те, що моменти комутації навантаження збігаються з моментами переходу мережевої напруги через нуль, тому рівень випромінюваних радіозавад різко знижений. Мінімальна порція енергії, що надходить у навантаження, дорівнює енергії, що споживається навантаженням за один півперіод. Наприклад, щоб отримати крок у 10 % необхідна довжина повторюваної послідовності 10 півперіодів. На рис. 3, а показано послідовність імпульсів на керуючому електроді для потужності у навантаженні 30 %. Як видно, електронний ключ відкритий упродовж перших трьох півперіодів, а упродовж семи наступних закритий. Далі ця послідовність повторюється.

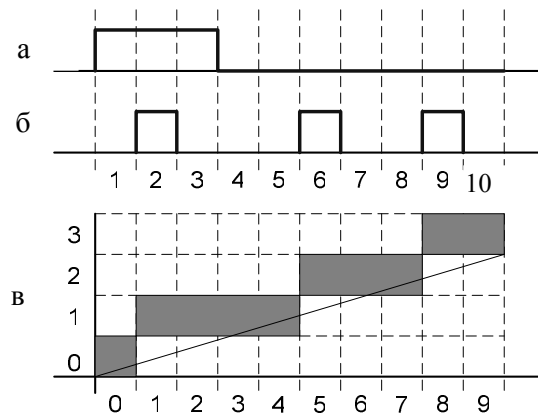


Рис. 3. Імпульсно-числовий метод

Значно логічніше було б розподілити півперіоди, упродовж яких ключ відкритий рівномірно по всій послідовності. У загальному випадку задачу рівномірного розподілу будь-якої кількості імпульсів  $N$  у послідовності завдовжки  $M$  ( $N \leq M$ ) розв'язує алгоритм Брезенхейма, який звичайно використовується у растровій графіці для побудови нахилених відрізків. Цей алгоритм реалізується за допомогою цілочисленої арифметики, що суттєво спрощує його програмування. На рис. 3, б показано розподілення імпульсів для тієї самої потужності в 30 %, але з використанням алгоритму Брезенхейма, а рис. 3, в відображає побудову растрового відрізка, застосовуючи цей самий алгоритм. У цьому проекті цей алгоритм дає змогу зменшити пульсації температури на періоді регулювання.

Далі на рис. 4 покажемо у порівнянні обидва методи управління потужністю. Звернемо увагу, що 30 % часу півперіода відкритого ключа при фазовому управлінні, не відповідає 30 % потужності, яка відводиться у навантаження. Для синусоїдального сигналу це зумовлено тим, що вихідна потужність нелінійно залежить від кута відкривання електронного ключа. Ця особливість не заважає проводити коректне регулювання температури, оскільки в системі реалізований зворотний зв'язок.

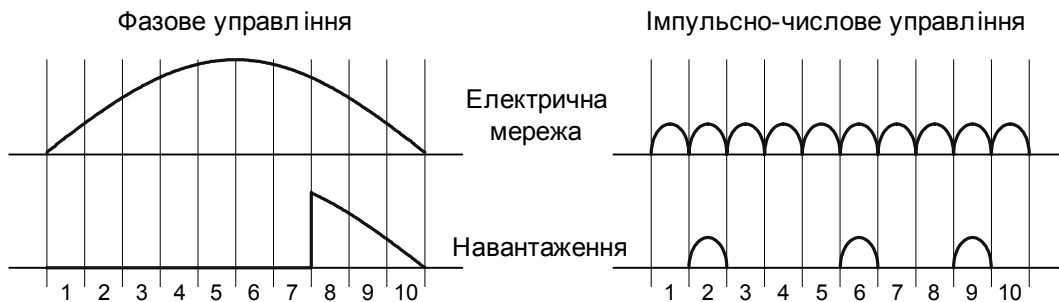


Рис. 4. Методи управління потужністю у порівнянні

**Програмна реалізація.** Програмне забезпечення терморегулятора складається з декількох основних модулів, реалізованих в окремих вихідних файлах. Кожний модуль має своє призначення і виконує свої функції. Отже, виділимо такі частини програми:

- код ініціалізації і основний цикл регулювання;
- підпрограма ПД-регулятора;
- модуль синхронізації представлений підпрограмою обробки переривання;
- підпрограми інтерполяції та пошуку в таблицях давачів;
- термінальний модуль, який забезпечує зв'язок з мікроконтролером по інтерфейсу RS232.

*Код ініціалізації та основний цикл регулювання*

Цей модуль є основною зв'язуючою ланкою програми. Він виконує дві основні функції – ініціалізацію мікроконтролера і власне регулювання. Під час ініціалізації, окрім запуску усіх апаратних

модулів PSoC, здійснюється опитування перемичок для визначення типу давача та метод управління потужністю. Якщо використовується фазовий метод управління потужністю, то під час ініціалізації пристрою визначається частота мережі змінного струму. Такий підхід робить регулятор не чутливим до коливань частоти у мережі та мережевих стандартів країни, де він використовується.

Після процедури ініціалізації розміщується код основного циклу регулювання. У цьому циклі, окрім головних завдань – зняття показів із здавачів, їх обробка і видачі результатів регулятора, виконується функція перевірки підімкнення давача. Якщо детектується обрив давача, то відбувається виключення нагрівача і засвічується червоний світлодіод. Також кожною ітерацією перевіряється наявність команди, що прийшла через інтерфейс RS232. Якщо команда виявляється, то викликається команда її обробки.

#### *Інтерполяція та пошук у таблицях*

Після зняття показів з давачів, необхідно знайти відповідні значення температури об'єкта. Для цього у Flash-пам'яті мікроконтролера зберігаються таблиці характеристик для кожного із давачів. У цьому проекті таблиці побудовані із кроком 1 °C у діапазоні температур -100...400 °C.

Для того, щоб отримати більш якісний процес регулювання, проводиться інтерполяція температури до чверті градуса. Це дає можливість ПІД-регулятору реагувати на невеликі зміни температури об'єкта і приймати відповідні міри для відновлення її опорного значення. Інтерполяція між двома сусідніми елементами таблиці проводиться з урахуванням того, що на цьому проміжку характеристика є лінійною.

Розглянемо способи побудови таблиць детальніше. У разі вимірювання температури за допомогою термопар, після оцифровки її показів отримуємо код АЦП, кому однозначно відповідає значення температури. Тому з метою економії процесорного часу будується таблиця, елементами якої є не напруги на термопарі, а відповідний код АЦП. Значення елемента таблиці вираховувалося згідно із такою формулою:

$$ADC\_code = U_{TC} \cdot 93.024 \cdot 2^{13} / 2.6 \quad (3)$$

У цій формулі напруги представляються у вольтах. Множник 93.024 – коефіцієнт підсилення інструментального підсилювача; 13 – розрядність АЦП; 2.6 – діапазон вимірювання АЦП у вольтах. Таким чином, отримавши код АЦП напруги на термопарі, проводиться пошук даного значення в таблиці і після його відшукування, поточний номер елемента таблиці відповідає температурі.

Для терморезистора елементами таблиці є опори давача при відповідних температурах. При чому для покращання якості інтерполяції кожний елемент таблиці помножався на 10. Таким чином використовувалася така формула:

$$R_T = R_0(1 + A \cdot T + B \cdot T^2 - 100 \cdot C \cdot T^3 + C \cdot T^4) \cdot 10 \quad (4)$$

де  $R_0$  – опір давача при давача при 0 °C;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – характеристичні коефіцієнти давача; 10 – коефіцієнт покращання інтерполяції.

Декілька слів про алгоритм пошуку. Враховуючи фізичну суть процесу нагрівання (охолодження), можна зробити висновок, що температура об'єкта не може змінюватися стрибкоподібно. Тобто температура є неперервною функцією від часу. Тому пошук здійснюється відносно останнього значення зафіксованого значення температури. Для цього знаходяться наступне і попереднє значення температур по таблиці з урахуванням інтерполяції. І далі визначається, в який бік необхідно рухатися, щоб досягти поточного значення температури.

#### *ПІД-регулятор*

Підпрограма ПІД-регулятора викликається після того, як було визначено поточне значення температури. Як параметр підпрограми виступає температура об'єкта. На виході регулятора встановлюється числовий код, за допомогою якого формуються керуючі сигнали.

Алгоритм регулювання реалізований згідно з дискретною моделлю ПІД-регулятора:

$$u(k) = K_P \cdot e(k) + K_I \cdot \sum_{i=0}^k e(i) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (5)$$

Оскільки диференціювання суттєво підсилює вплив шумів, то для точнішого обрахунку похідних використовуються формули з більш ніж двома точками. У цьому проекті обрахування

диференціальної складової використаний чисельний метод диференціювання за формулою лівих п'ятих різниць:

$$\frac{dy}{dt}_{t=t_0} \approx \frac{1}{12h} (25y_0 - 48y_{-1} + 36y_{-2} - 16y_{-3} + 3y_{-4}) . \quad (6)$$

Такий спосіб дає змогу зменшити вплив шумів на остаточний результат.

Програмна реалізація ПД-регулятора повинна обмежувати кожен складову в певному діапазоні. Серед параметрів регулятора виділимо такі:

- *Tref* – опорна температура, яку повинен підтримувати регулятор;
- *Prop\_Gain* – параметр пропорційної складової ( $K_P$ );
- *Intl\_Gain* – параметр інтегральної складової ( $K_I$ );
- *Deri\_Gain* – параметр диференціальної складової ( $K_D$ );
- *PROP\_REG\_LIMIT* – робочий діапазон пропорційної складової;
- *INTL\_REG\_LIMIT* – робочий діапазон інтегральної складової;
- *DERI\_REG\_LIMIT* – робочий діапазон диференціальної складової;
- *REG\_RANGE* – діапазон, в якому працює регулятор (задається в градусах);
- *PWM\_RESOLUTION* – визначає кількість кроків регулювання. Для фазового методу – це кількість сегментів, на яку розбивається півперіод; для імпульсно-числового – період регулювання в одиницях півперіодів мережі.

Всі ці параметри розміщуються у Flash-пам'яті мікроконтролера і вони можуть бути змінені, використовуючи термінальну програму.

Вихідна змінна регулятора знаходиться у діапазоні [*0..PWM\_Resolution*] і використовується для формування керуючих сигналів.

#### *Синхронізація з джерелом живлення*

Підпрограма синхронізації з мережею виконана як обробник переривання від компаратора. Її блок-схему наведено на рис. 5. Ця підпрограма реалізована у вигляді кінцевого автомату, тобто вона пам'ятає свій попередній стан. Цю особливість використовує алгоритм Брезенхейма для генерації керуючих сигналів упродовж декількох півперіодів мережі.

Як видно із блок-схеми алгоритму, підпрограма працює в 4-х режимах, які визначаються глобальною змінною *mode*. Режими 1 і 2 застосовуються для визначення півперіоду мережі змінного струму. В режимі 1 відбувається запуск ШИМ (*PWM*) і автоматично переключаємося в режим 2 – очікування наступного нульового потенціалу в мережі. Коли ця умова стає істинною, тоді зупиняємо ШИМ і змінній *mode* присвоюємо 0. Далі в основній програмі зчитується поточне значення ШИМ, яке розглядається як значення півперіоду мережі.

Режим 3 використовується фазовим методом для формування сигналу керування. Ця ділянка коду запускає ШИМ із заданою скважністю. У режимі 4 реалізований алгоритм Брезенхейма, який використовується в імпульсно-числовому методі управління потужністю.

#### *Термінальний інтерфейс*

Для зручності настроювання і конфігурації терморегулятора в його структуру був включений модуль UART. На його основі розроблена командна мова, за допомогою якої реалізується обмін інформацією з мікроконтролером, використовуючи стандартні термінальні програми (наприклад, *HyperTerminal*). Реалізовані команди дають змогу настроювати параметри регулятора і зберігати їх у Flash-пам'яті. Також присутні команди читання поточного стану регулятора.

Для автоматизації посилки команд, які керують, мікроконтролера і створення зручного інтерфейсу користувача було розроблено Win32 аплікацію на базі C++Builder. Програма надає користувачу візуальні засоби параметризації регулятора, а також дає можливість побудови графіків у режимі реального часу. Графіки будуються одночасно на двох формах. Перша форма відобража залежність температури об'єкта від часу. На другій формі виводяться поточні значення пропорційної, інтегральної і диференціальної складових. Такі можливості візуального вивчення процесу регулювання полегшують налагодження регулятора дослідним шляхом. Зовнішній вид цих форм програми під час роботи показаний на рис. 6.

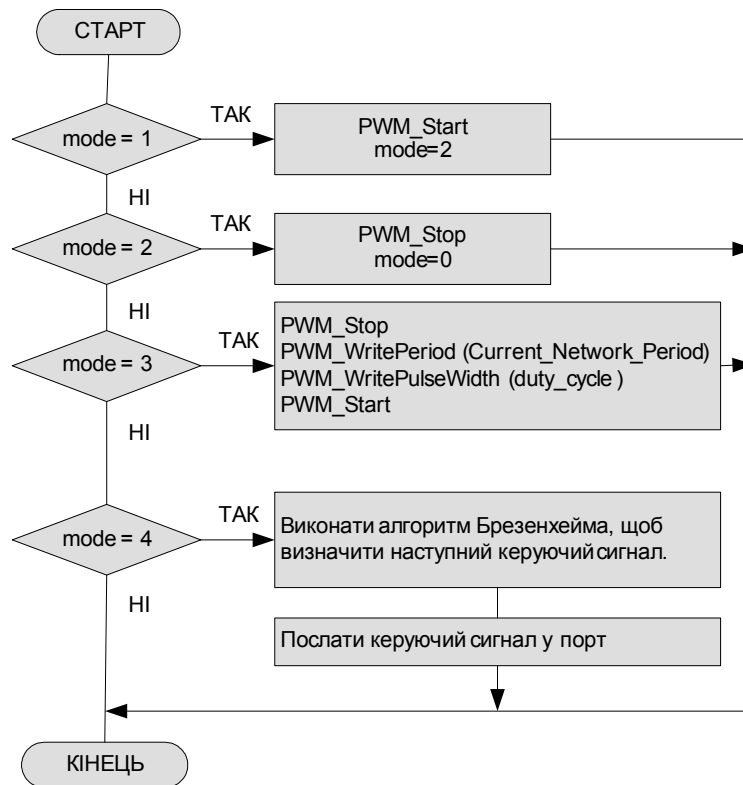


Рис. 5. Підпрограма синхронізації

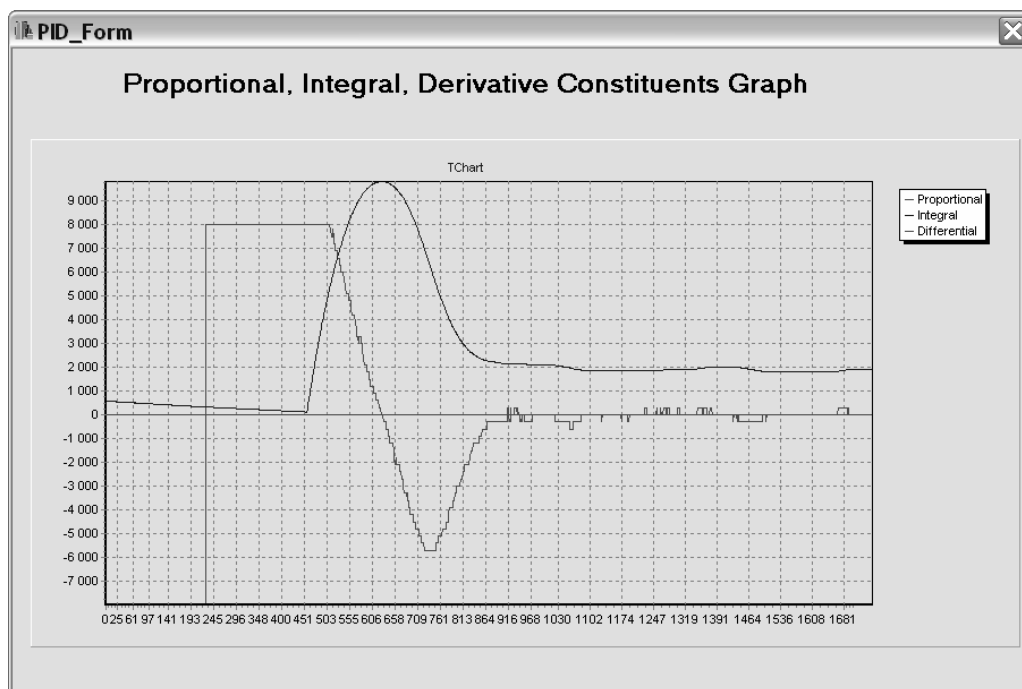


Рис. 6. Графіки, побудовані термінальною програмою

**Висновки.** Реалізований прототип ПІД-терморегулятора містив різні варіації систем контролю температури. Таким чином можливим є вибір виду навантаження, типу датчика температури (терморезистор або термопара), а також методу управління потужністю (фазовий або імпульсно-числовий). Таке різноманіття опцій спрощує проектування терморегулятора для конкретної прикладної області. Серед переваг запропонованого регулятора слід виділити можливість налаштування його



параметрів по інтерфейсу RS-232. Розроблена термінальна програма дозволяє візуально вивчати процес регулювання і робить більш легким відлагодження регулятора дослідним шляхом.

Для адаптації запропонованого терморегулятора під конкретні технологічні умови необхідно внести мінімальні зміни в програму. В основному вони будуть торкатися типу використовуваного термодавача. В такому випадку необхідно згенерувати характеристичну таблицю давача і вставити її в проект регулятора. А налагодження ПІД-параметрів буде здійснюватися засобами термінальної програми.

1. Густав Олссон, Джангуидо Пиани. *Цифровые системы автоматизации и управления*. – СПб.: Невский диалект, 2001. – 557 с. 2. Куо Б. *Теория и проектирование цифровых систем управления: Пер. с англ.* – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с. 3. Датчики для измерения температуры в промышленности / Г.В. Сасонов, А.И. Киц, О.А. Кюздени, В.И. Лах, И.Ф. Паляныця, Б.И. Стаднык. – К.: Наукова думка, 1972. 4. Фишер Дж.Э., Гетланд Х.Б. *Электроника – от теории к практике: Пер. на рус.* – М.: Энергия, 1980. 5. Бондарев В.Н., Трёстер Г., Чернега В.С. *Цифровая обработка сигналов: методы и средства: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд.* – Харьков: Конус, 2001. – 398 с. 6. Шуп Т. *Прикладные численные методы в физике и технике: Ш 96 / Пер. с англ. С.Ю.Славянова; Под ред. С.П. Меркурьева.* – М.: Высш. школа, 1990. – 255 с. 7. Borland C++ Builder 6. *Для профессионалов / В.А. Шамис.* – СПб.: ПитерЮ, 2004. – 798 с. 8. Шикин А.В., Боресков А.В. *Компьютерная графика. Полигональные модели.* – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. – 464 с. 9. CY27143, CY27243, CY27443, CY27543, CY27643 PSoC™ Mixed Signal Array Preliminary Data Sheet. – 2003.

УДК 621.3.049.77.017

М.В. Лобур, Т.В. Свірідова

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра систем автоматизованого проектування

## МЕХАНІЧНА МОДЕЛЬ РАДІОЧАСТОТНОГО ФІЛЬТРА

© Лобур М.В., Свірідова Т.В., 2004

**Наведено мікроелектромеханічні пристрої для радіочастотних систем (RF MEMS).  
Описано використання MEMS резонаторів. Наведені висновки та рекомендації.**

**In this paper mechanical model of micromechanical devices used in RF filters presented,  
modelling and simulation carried out in electrical and mechanical domains**

**Вступ.** Беспровідний зв'язок призвів до інтенсивного підвищення зацікавленості щодо розробок в цій галузі, а саме зростанню замовників з військової промисловості – це мікрохвильові та міліметрові схеми та системи тощо. Розроблені пристрої широко застосовуються у комунікаційних системах – мобільних телефонах, радіо. Одним із революційних напрямків у радіочастотних пристроях є використання мікроелектромеханічних (MEMS) компонентів, які за рахунок інтеграції в своїй структурі механічних складових та використання технології виготовлення інтегральних схем ІС дозволяють мініатюризувати кінцевий пристрій.

У свою чергу мікроелектромеханічні системи – це один із результатів прогресу цього десятиліття. Мета цієї технології полягає у проектуванні “систем”, розміри якої дорівнюють декілька мікрон. Такі пристрої можуть бути використані як у системах доставки товарів, так і в телекомунікаційних системах, що знаходяться на цей період часу в стадії розвитку. Їх невеликий розмір, високий фактор добротності надає унікальні переваги.