

УДК 536.58; 681.536.5

І. В. Косяк

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Прецизійна система термостабілізації підвищеної потужності

Проведено аналіз принципів побудови систем температурної стабілізації та експериментальні дослідження з розробки системи термостабілізації. Розглянуто особливості розробки та побудови систем автоматичного регулювання температури. Запропоновано реалізацію високоефективного регулятора температури.

Ключові слова: термостабілізація, пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор, високоефективний регулятор температури, модуль Пельтьє.

Вступ

У будь-якому складному геофізичному приладі, зокрема сейсмографі, існує деякий неконтрольований зсув точки опори та закріплення пружини маятника відносно корпусу, який виникає через вплив температури. Зміна температури навколишнього середовища або розігрів самої конструкції сейсмографа під час його роботи є основними джерелами нестабільності. Нерівномірне розширення або стиснення деталей пристрою кріплення маятника призводить до того, що маятник з плином часу зміщується відносно нульового положення. Зміна температури твердого тіла призводить до виникнення термопружних деформацій. Унаслідок цього явища може зростати похибка у вимірюваних значеннях коливань. Для зменшення цього ефекту можливо термостабілізувати корпус сейсмометра за допомогою спеціальної системи температурної стабілізації.

Останнім часом відбувається очевидне пожвавлення в області термоелектричного охолодження. Недавні дослідження зі створення та пошуку матеріалів для термоелектриків дають підставу в найближчому майбутньому очікувати істотного збільшення ефективності термоелектричних модулів [1, 2]. Термоелектричні перетворювачі енергії мають наступні переваги:

- можливість не тільки охолодження, але й нагріву;
- виняткову надійність компонентів;

- можливість дуже швидкого охолодження;
- високу точність регулювання температури і можливість терморегуляції шляхом зміни струму живлення;
- відсутність необхідності в технічному обслуговуванні;
- можливість роботи у широкому діапазоні оточуючих температур, тисків, прискорень і вібрацій.

Роботу присвячено побудові високостабільного регулятора температури з використанням термоелектричних модулів охолодження Пельтьє, які привертаять увагу завдяки своїм невеликим габаритам і вазі, незначною потужністю споживання та можливості роботи в широкому діапазоні оточуючих температур, тисків, прискорень і вібрацій.

Актуальність розробки обумовлена тим, що відомі регулятори температури [3–8], які забезпечують високу точність підтримки заданого рівня температури в усталених режимах і добру якість перехідних процесів, мають складну технічну реалізацію із застосуванням програмованих контролерів, або керування комп'ютером. Їхнім недоліком вважається зависока вартість і подекуди низька точність стабілізації температури в межах 0,01–0,1 °С. Регулятори, які мають просту технічну реалізацію та низьку ціну, підтримують точність стабілізації температури $\gg 0,1$ °С в усталених режимах зі значною похибкою та не забезпечують стійкість системи стабілізації в умовах зміни у широких межах температури оточуючого середовища.

Запропонований у статті високостабільний регулятор температури при відносно простій технічній реалізації розв'язує вказане протиріччя.

У регуляторі використано одноконтурну систему автоматичного регулювання температури. Контур регулювання містить пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (ПІД-регулятор), який в умовах збурюючих впливів на стабільність підтримки заданої температури об'єкта забезпечує необхідну зміну сигналу керування на вході контуру регулювання.

Метою даної роботи є побудова високостабільної потужної та ефективної системи термостабілізації з вихідною потужністю 50–100 Вт, яка забезпечує точність стабілізації температури $\ll 0,1$ °С.

Структурна схема автоматичного регулювання температури

На рис. 1 представлено наочне графічне зображення математичної моделі системи автоматичного регулювання (САР) температури корпусу геофізичного приладу — сейсмометра.

Передатна функція розімкненої САР записується у вигляді:

$$W(p) = W_{РЕГ}(p) \cdot W_K(p) \cdot W_{ТЕМ}(p) \cdot W_O(p) \cdot W_D(p). \quad (1)$$

Передатна функція замкненої САР знаходиться з виразу:

$$W_3(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p)}. \quad (2)$$

Розглянемо окремо передатні функції усіх елементів системи.

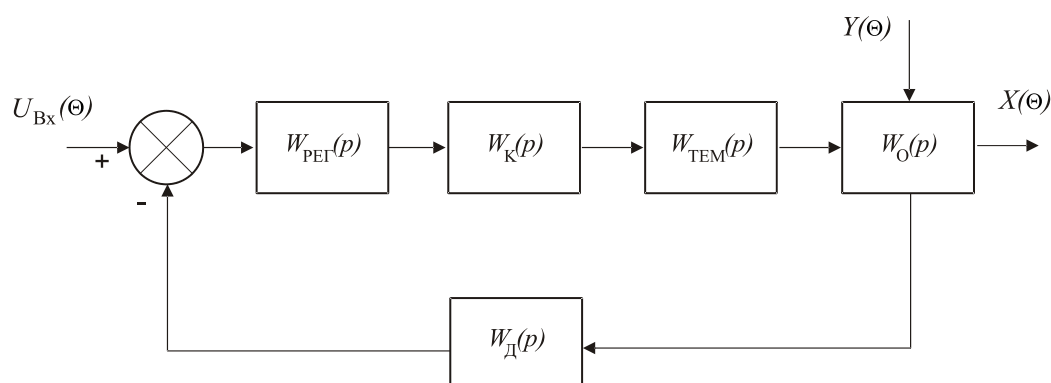


Рис. 1. Структурна схема САР температури корпусу сейсмометра: $U_{Bx}(\Theta)$ — задане значення керуючого впливу; $Y(\Theta)$ — збурюючий вплив; $X(\Theta)$ — регульований параметр

Передатна функція ПІД-регулятора визначається рівнянням

$$W_{PEF}(p) = K \cdot \left(1 + \frac{1}{T_I p} + T_d p \right), \quad (3)$$

де T_I — постійна інтегрування; T_d — постійна диференціювання.

Передатна функція термоелектричного модуля (ТЕМ) Пельтьє виражається аперіодичною ланкою 2-го порядку:

$$W_{TEM}(p) = \frac{1}{(1 + T_{T1}(p)) \cdot (1 + T_{T2}(p))}, \quad (4)$$

де $T_{T1}(p)$ та $T_{T2}(p)$ — постійні часу ТЕМ Пельтьє.

Передатна функція об'єкта регулювання — корпусу сейсмометра — виражається аперіодичною ланкою 1-го порядку:

$$W_O(p) = \frac{1}{(1 + T_{OP}(p))}, \quad (5)$$

де $T_{OP}(p)$ — постійна часу для корпусу з дюралюмінію, 30 сек.

Передатна функція датчика, яким слугує терморезистор, виражається аперіодичною ланкою 1-го порядку:

$$W_D(p) = \frac{1}{(1 + T_D(p))}, \quad (6)$$

де $T_D(p)$ — постійна часу терморезистора, 2 сек.

Передатна функція підсилювача:

$$W_K(p) = K, \quad (7)$$

де K — коефіцієнт підсилення підсилювача, що лежить у межах 1–3.

САР працює наступним чином: у задавачі формується сигнал $U_{Bx}(\Theta)$, який відповідає незалежній від об'єкта заданій величині температури, а під дією збурюючого впливу $Y(\Theta)$ змінюється значення температури в корпусі сейсмометра $X(\Theta)$, що сприймається чутливим елементом — терморезистором, який формує

пропорційний вихідний сигнал $U_{Вих}(\Theta)$. На виході елемента порівняння формується сигнал розузгодження $\Delta U(\Theta)$ між заданим $U_{Вх}(\Theta)$ і реальним значеннями температури, яка подається на регулятор. Регулятор перетворює сигнал розузгодження $\Delta U(\Theta)$ на керуючий вплив і своїм вихідним сигналом змінює режим роботи виконавчого пристрою — елемента Пельтьє, який збільшує або зменшує подачу теплоносія до об'єкта регулювання корпусу геофізичного приладу — сейсмометра, і таким чином компенсує дію збуджуючого впливу.

Реалізація пристрою регулятора температури

Спираючись на проведені дослідження, що були зазначені в роботі [9], нагадаємо, що існують декілька термоелектричних контролерів, які забезпечують різну точність підтримки температури. Огляд і критичний аналіз розглянутих літературних джерел дозволив сформулювати декілька основних вимог щодо проектування високоефективної схеми термостабілізації, зокрема:

- імпульсний режим керування струмом драйвера мінімізує розміри, більш ефективний порівняно з лінійним режимом;
- однополярне живлення, що спрощує конструкцію;
- двонаправлений струм живлення термоелемента, що дозволяє як нагрівати, так і охолоджувати об'єкт термостабілізації.

Найбільш придатним для проектування високостабільної системи термостабілізації виявився інтегрований контролер температури для модулів Пельтьє МАХ1978 фірми Maxim, який представляє собою мініатюрний, прецизійний, повний за схемотехнікою однокристальний контролер, що не потребує зовнішніх підсилювачів [10].

У технічній документації на контролер температури МАХ1978 зазначено, що він забезпечує здатність навантаження струмом до 3 А. Але експериментальні дослідження показали, що контролер МАХ1978 підтримує значення вихідного струму навантаження на термоелектричних модулях охолодження Пельтьє до 2 А при максимальній напрузі живлення 5 В. Звідси випливає, що максимальна потужність у термоелементах Пельтьє може сягати 8–10 Вт, що недостатньо при використанні контролера МАХ1978 у системах термостабілізації корпусів прецизійних електронних приладів.

Контролер МАХ1978 є закінченим і повним за схемотехнікою однокристальним контролером, який унеможливує підключення зовнішніх підсилювачів.

У зв'язку з цим виникає необхідність у розробці та створенні більш потужної ефективної системи термостабілізації з вихідною потужністю 50–100 Вт, яка забезпечує точність стабілізації температури $\ll 0,1$ °С.

На рис. 2 представлено структурну схему розробленої системи температурної стабілізації корпусу геофізичного приладу — сейсмометра. До складу системи термостабілізації входять: датчик (терморезистор), який розміщується в корпусі сейсмометра, задавач температури, вузол порівняння, ПД-регулятор, регулятор з широтно-імпульсною регуляцією (ШІМ-регулятор), підсилювач, термоелектричний модуль Пельтьє. Як задавач температури використовується змінний резистор. Для досягнення високої якості регулювання важливо підібрати відповідний датчик. Таким є прецизійний терморезистор із негативним температурним коефіцієнтом опору Epsoc NTC B57861 на 10 кОм.

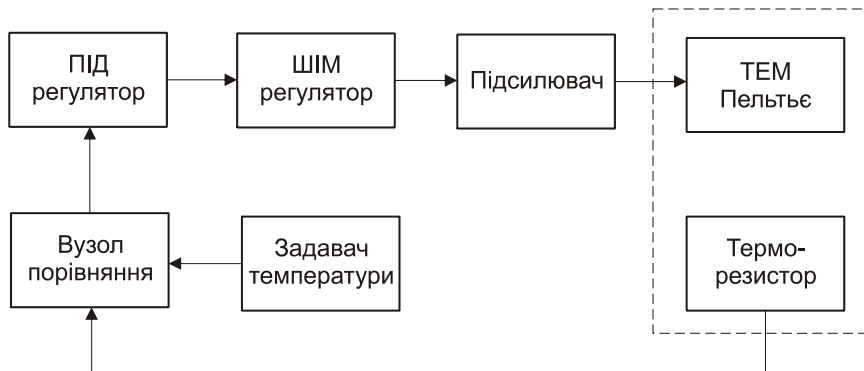


Рис. 2. Структурна схема системи термостабілізації корпусу сейсмометра

Реалізація вузла порівняння

На рис. 3 представлено електричну схему вузла порівняння, який формує сигнал розузгодження $\Delta U(\Theta)$ пропорційний відхиленню температури. Задане значення температури задається змінним резистором $R1$ і подається на неінвертований вхід операційного підсилювача (ОП) $DA1$. Реальне значення температури вимірюється терморезистором $R4$, який підключений до одного із плечей вимірювального моста Уінстона. Змінний резистор $R1$ у схемі моста Уінстона замінює два резистори верхнього та нижнього плечей $R1 = R1_B + R1_H$. Тоді вихідна напруга на виході вузла порівняння запишеться у вигляді:

$$U_{ВИХ} = \frac{R1_H \cdot R3 - R1_B \cdot R4}{(R1_H + R1_B) \cdot (R3 + R4)} \cdot \frac{R6}{R5} \cdot U_{REF} \quad (8)$$

Резистори $R1$, $R2$ та $R3$ вибрані так, щоб збалансувати міст, коли $R4$ має в якийсь час значення $R4 + \Delta$. Нехай $R1_B = R1_H = R1/2$, тоді вираз (8) зводиться до

$$U_{ВИХ} = 1,25 \cdot \Delta \cdot U_{REF} \quad (9)$$

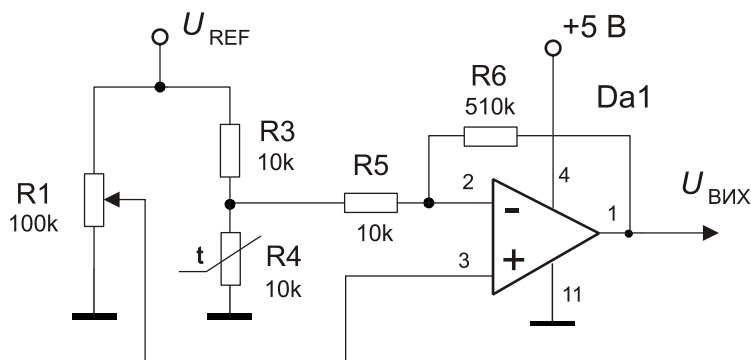


Рис. 3. Електрична схема вузла порівняння

Як ОП $DA1$ використовується прецизійний чотириканальний операційний підсилювач MAX4478 з низькими рівнем шуму та зміщенням напруги ± 70 мкВ.

Реалізація ПІД-регулятора

ПІД-регулятор реалізовано на операційному підсилювачі, практична реалізація якого зазначена роботі [9]. Передатна функція такого ПІД-регулятора $W_{PEF}(p) = U_{out}/U_{in}$ має три полюси та два нулі і записується у вигляді:

$$W_{PEF}(p) = -\frac{1}{pR2 \cdot (C2 + C3)} \cdot \frac{(1 + pC2 \cdot R3)[1 + pC1 \cdot (R1 + R2)]}{(1 + pC1 \cdot R1) \cdot \left[1 + pR3 \cdot \left(\frac{C2 \cdot C3}{C2 + C3}\right)\right]}. \quad (10)$$

Для розрахунку компенсації теплового контуру регулювання, тобто знаходження значення елементів ПІД-регулятора, необхідно знати теплову характеристику термоелектричного модуля. Більшість модулів ТЕМ можливо моделювати як двополосні системи. Модуль ТЕМ має два полюси: $f1 = 0,02$ Гц і $f2 = 1$ Гц [10].

На рис. 4 представлено графіки логарифмічної АЧХ і ФЧХ передатної функції (10) відповідно до електричної схеми [9] з реалізованим ПІД-регулятором у контурі компенсації. Відмінність графіків полягає в різних значеннях конденсатора $C1$, що відповідає за диференційну складову.

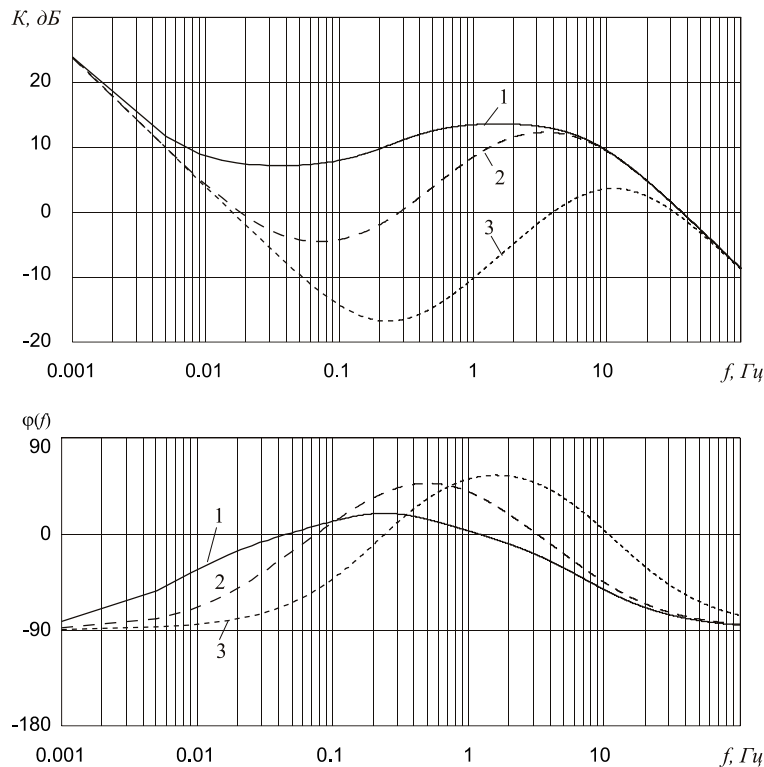


Рис. 4. АЧХ і ФЧХ ПІД-регулятора: 1 — $C1 = 6,8$ мкФ; 2 — $C1 = 3,3$ мкФ; 3 — $C1 = 1,0$ мкФ

Оцінка якості управління САР температури корпусу сейсмометра

Якість перехідних процесів зазвичай оцінюють за перехідними функціями, що представляють графік зміни в часі регульованої величини системи при подачі на систему одиничного керуючого впливу. Показники якості управління можна визначити безпосередньо за графіками перехідних функцій.

У загальному випадку автоматичне регулювання температури характеризується затяжними перехідними процесами та великим амплітудним перерегулюванням унаслідок великої інерційності теплових об'єктів і носить наступний характер, який зображено на рис. 5. Графіки перехідних процесів побудовані на основі передатної функції замкнутого контуру САР (2) з урахуванням передатної функції ПІД-регулятора (10) за допомогою функції оберненого перетворення Лапласа з програмного пакету *MathCad*. Результат оберненого перетворення Лапласа передатної функції для графіка 1 (рис. 5) представлено виразом:

$$hm(t) := Nm(p) \text{ invlaplace, } p \rightarrow 2.501 \times 10^{-4} \cdot e^{-5.653 \cdot t} - 2.059 \times 10^{-3} \cdot e^{-2.505 \cdot t} - 0 \cdot e^{-22.277 \cdot t} - 6.945 \times 10^{-7} \cdot e^{-22.277 \cdot t} - 0 \cdot e^{-2.5 \cdot t} + 0 \cdot e^{-5.655 \cdot t} + 0.105 e^{-0.053 \cdot t} + 0 \cdot e^{-0.5 \cdot t} - 0 \cdot e^{-0.126 \cdot t} - 0.042 e^{-0.526 \cdot t} + 0 \cdot e^{-0.033 \cdot t} - 1.061 \cos(0.113 \cdot t) \cdot e^{-0.038 \cdot t} - 0.539 \sin(0.113 \cdot t) \cdot e^{-0.038 \cdot t} + 1$$

Завдання синтезу САР на основі ПІД-регулятора полягає у визначенні значень пропорційного, інтегрального та диференціального коефіцієнтів, за яких забезпечується необхідна якість регулювання САР. Основною проблемою при реалізації ПІД-регулятора є налаштування його параметрів.

При аналізі передатної функції замкнутого контуру САР температури корпусу сейсмометра було отримано графіки перехідних процесів (рис. 5), які відрізняються різними значеннями конденсатора $C1$.

Аналіз графіка 1 на рис. 5 показує, що максимальне перерегулювання σ_{max} не перевищує 35 %. Час регулювання перехідного процесу, при допустимому відхиленні в 1 % від сталого значення, склав >150 сек. Аналіз графіка 2 показує, що система все ще стійка, але максимальне перерегулювання σ_{max} перевищує 50 %, і час регулювання перехідного процесу, при допустимому відхиленні в 1 % від сталого значення, склав >400 сек. Аналіз графіка 3 показує, що система нестійка і має частоту коливань 0,011 Гц.

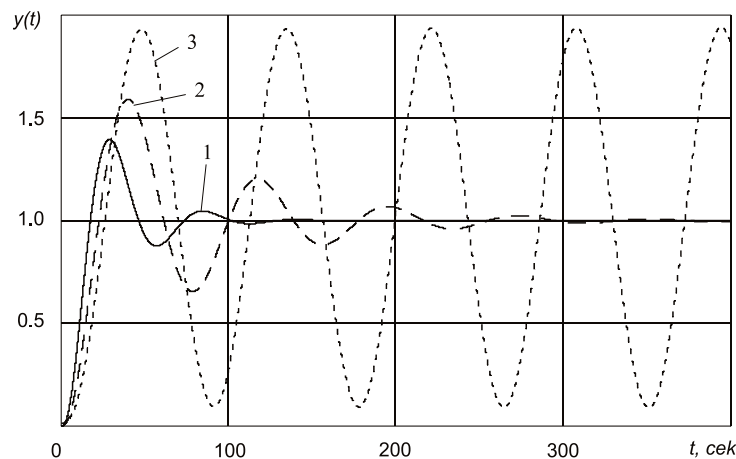


Рис. 5. Перехідні процеси при управлінні тепловим об'єктом ПІД-регулятором при різних значеннях конденсатора $C1$: 1 — $C1 = 6,8$ мкФ; 2 — $C1 = 3,3$ мкФ; 3 — $C1 = 1,0$ мкФ

Реалізація ШІМ-регулятора

Існує багато інтегральних ШІМ-контролерів, які відрізняються за багатьма електричними показниками і умовами використання. Аналіз технічної документації останніх показав, що для використання у системі термостабілізації корпусу сейсмометра, що розробляється, найбільш оптимально застосувати маловартісний (<1\$) ШІМ-контролер TL494 фірми *Texas Instruments*, який забезпечує розробнику розширені можливості при конструюванні схем управління широтно-імпульсною модуляцією (рис. 6).

ШІМ-контролер TL494 [11] включає в себе підсилювачі похибки, вбудований регульований генератор, компаратор регулювання «мертвого часу», тригер управління, прецизійний ІОН на 5 В і схему управління вихідним каскадом. Підсилювач похибки видає синфазну напругу в діапазоні від $0,3 \dots V_{CC}$ В (де V_{CC} — напруга живлення). Компаратор регулювання «мертвого часу» має постійне зміщення напруги, що обмежує мінімальну тривалість «мертвого часу» величиною 4 %.

Мікросхема TL494 представляє ШІМ-контролер, що працює на фіксованій частоті, і включає в себе всі необхідні для цього блоки (рис. 6). Вбудований генератор пилоподібної напруги вимагає для установки частоти тільки двох зовнішніх компонентів R і C . Частота генератора визначається:

$$f = \frac{1}{R_T \cdot C_T} \quad (11)$$

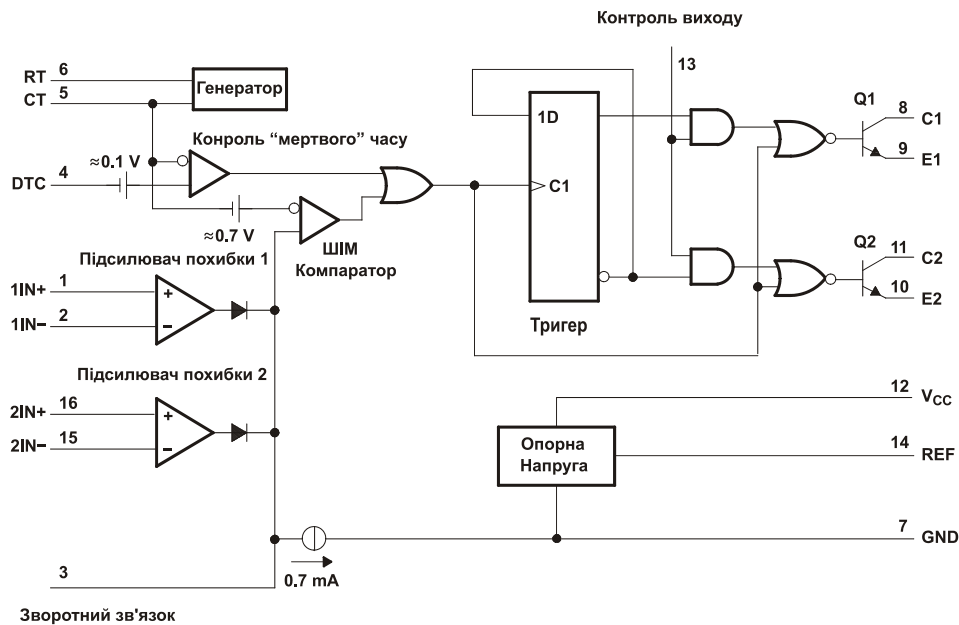


Рис. 6. ШІМ-контролер TL494

Модуляція ширини вихідних імпульсів досягається порівнянням позитивної пилоподібної напруги, що одержується на конденсаторі C , з двома керуючими сигналами, які утворюються на виході підсилювачів похибки. Логічні елементи

«АБО-НЕ» відкривають вихідні транзистори $Q1$ і $Q2$ тільки тоді, коли вхідний (тактовий) і вихідний сигнали вбудованого тригера знаходяться в низькому логічному стані «0». Це відбувається тільки протягом того часу, коли амплітуда пилоподібної напруги вище амплітуди керуючих сигналів. Отже підвищення амплітуди керуючих сигналів викликає відповідне лінійне зменшення ширини вихідних імпульсів (рис. 7).

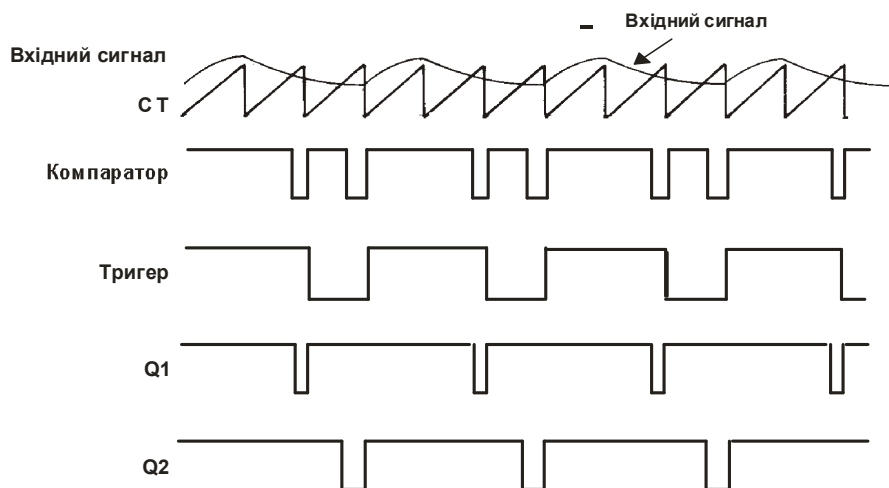


Рис. 7. Часові діаграми роботи ШІМ-контролера TL494

Вхід компаратора регулювання «мертвого часу» DTC має зсув 120 мВ, що обмежує мінімальний «мертвий час» на виході на початкові 4 % від загальної тривалості циклу пилообразної напруги. В результаті максимальна тривалість робочого циклу складає 96 % у тому випадку, якщо вивід мікросхеми 13 заземлений, і 48 % у тому випадку, якщо на вивід 13 подано опорну напругу.

Збільшити тривалість «мертвого часу» на виході, можна подаючи на вхід регулювання «мертвого часу» DTC постійну напругу в діапазоні 0...3,3 В. Компаратор ШІМ регулює ширину вихідних імпульсів від максимального значення, що визначається входом регулювання «мертвого часу», до нуля, коли напруга зворотного зв'язку змінюється від 0,5 до 3,5 В. Обидва підсилювачі помилки мають вхідний діапазон синфазного сигналу від $-0,3$ до $(V_{CC} - 2,0)$ В.

Наявність у мікросхемі TL494 такого запобіжного заходу як обмеження мінімальної тривалості «мертвого часу» до 4 % від тривалості циклу (рис. 8,а) необхідне для недопущення наскрізного струму в наступних силових каскадах. Але в нашому випадку підсилювач потужності з ШІМ повинен забезпечувати тривалість робочого циклу 100 % для зменшення тривалості настроювання системи температурної стабілізації на задану температуру (рис. 8,б).

Експериментальні дослідження роботи ШІМ-контролера TL494 допомогли встановити режим його роботи без наявності обмеження мінімальної тривалості «мертвого часу». Після доробки типової схеми включення ШІМ-контролера TL494 (рис. 9,а) тривалість робочого циклу зросла до 100 % (рис. 9,б).

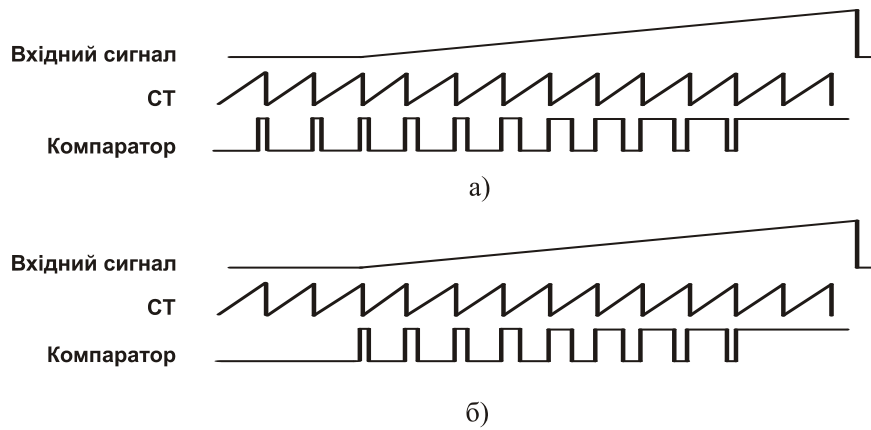


Рис. 8. Регулювання «мертвого часу» ШІМ

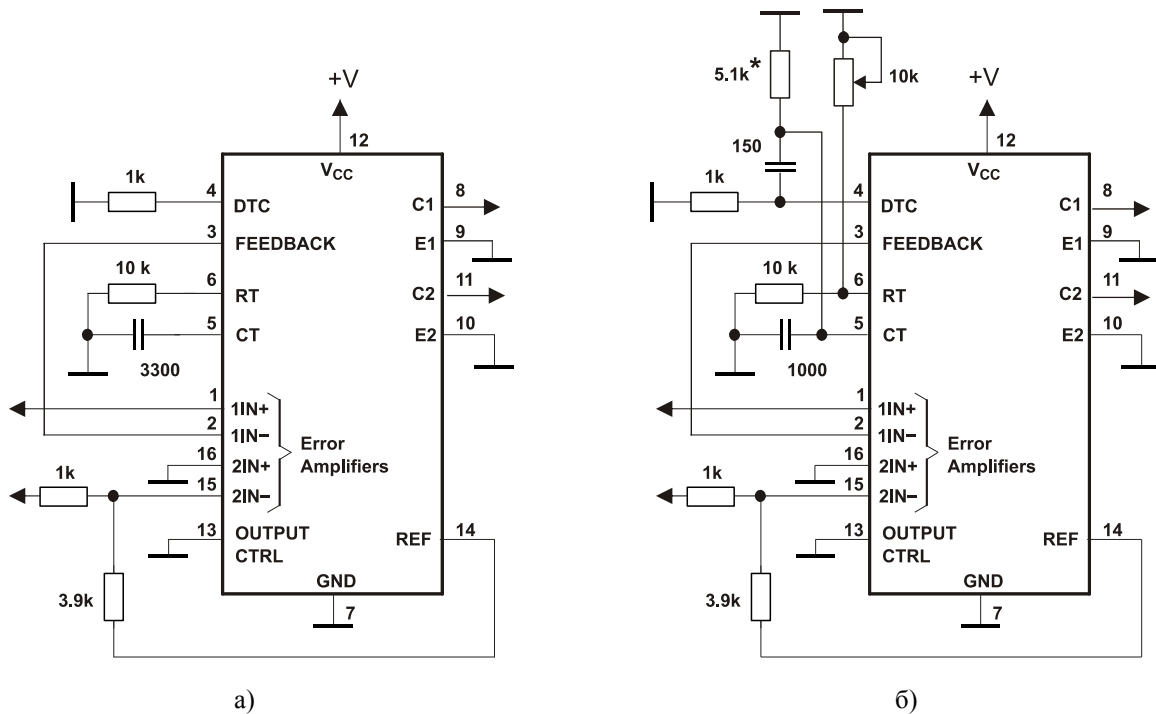


Рис. 9. Модернізація включення ШІМ-контролера TL494

Реалізація підсилювача з широтно-імпульсною модуляцією

У розробленій системі термостабілізації корпусу сейсмометра виконавчим пристроєм є ТЕМ Пельтьє, який відповідно до полярності поданої напруги може або розігрівати корпус, або охолоджувати його, тим самим стабілізуючи його температуру. Для потужних модулів Пельтьє напруга живлення складає 5–15 В, струм споживання до 13 А. Для управління такими пристроями як модулі Пельтьє застосовують підсилювачі потужності двох типів: лінійний (рис. 10) і з широтно-імпульсною модуляцією.

Недоліком лінійного підсилювача є наявність «мертвих зон» та інших нелінійних проявів при малих струмах навантаження. Тобто, такий випадок можливий

у режимі виходу роботи системи термостабілізації на задану температуру, при цьому струм споживання модулем Пельтьє різко зменшується.

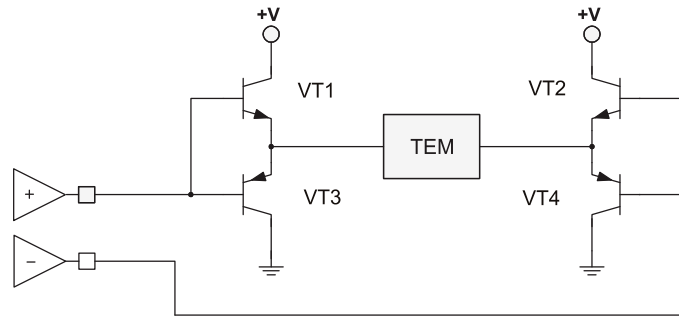


Рис. 10. Типовий вихідний каскад лінійного підсилювача

Аналіз і дослідження роботи підсилювачів для системи термостабілізації корпусу сейсмографа показав, що ефективним у використанні є ШІМ-підсилювач, який дозволяє збільшити точність стабілізації температури до рівня $\ll 0,1$ °C при застосуванні в управлінні модулем Пельтьє. Аналогова схема управління ШІМ-регулятором, якою є ПІД-регулятор і вузол порівняння, прецизійно встановлює величину струму модуля TEM. Сигнал з ШІМ-регулятора подається на підсилювач.

На рис. 11 показано розроблений підсилювач ШІМ з мостовим включенням вихідних каскадів. Така схема підсилювача дозволяє при низькій напрузі живлення підсилювача отримати велику потужність. Міст має два плеча, що видають імпульси протилежної полярності на LC-фільтр, який складається з двох індуктивностей і двох ємностей. Кожне плече моста містить два вихідних транзистори, в якості яких використані потужні ключові (перемикаючі) транзистори AOD609. Транзистори AOD609 являють собою здвоєну в одному корпусі комплементарну пару польових транзисторів МДН структури (MOSFET) з ізольованим затвором з каналами різної провідності та низькими втратами внаслідок меншої відстані між елементами.

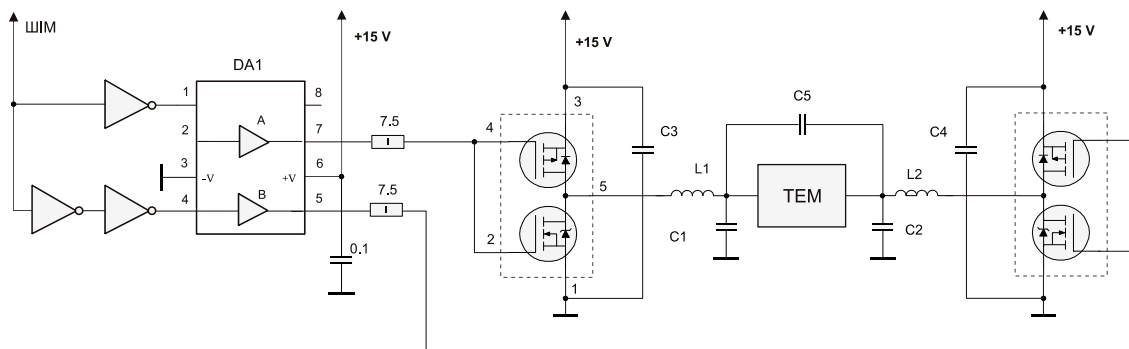


Рис. 11. Розроблений вихідний каскад підсилювача ШІМ

Архітектура підсилювача з мостовим включенням забезпечує двонаправлений потік струму через TEM Пельтьє. Напрямок струму визначає, чи система тер-

мостабілізації нагрівається або охолоджується. Середнє значення напруги на ТЕМ Пельтьє можна визначити приблизно за формулою:

$$U_{ТЕМ} = V_{CC} \cdot (D_A - D_B), \quad (12)$$

де V_{CC} — напруга живлення підсилювача; D_A та D_B — коефіцієнти заповнення імпульсів відповідно лівого та правого плечей мосту.

Для запобігання надмірних пульсацій струму на ТЕМ Пельтьє, останній підключається до вихідних каскадів через фільтр LC , який перетворює сигнал прямокутної форми, що надходить від вихідного каскаду підсилювача ШІМ, на сигнал постійного струму з низьким рівнем пульсацій. Фільтр видаляє всі гармоніки, крім компоненти постійної складової струму, при цьому амплітуда компоненти постійної складової струму прямо пропорційна коефіцієнту заповнення сигналу ШІМ. Фільтри необхідні для того, щоб теплові напруги, що виникають у матеріалі ТЕМ Пельтьє при швидких перехідних процесах, не скорочували їхній термін служби. Виробники ТЕМ Пельтьє рекомендують рівень пульсацій не більше 10 % [12]. Також цей фільтр зменшує кількість електричних перешкод. Для більшості випадків достатньо використання ФНЧ другого порядку з частотою зрізу, щонайменше на один порядок нижче, ніж тактова частота ШІМ.

Обов'язковою умовою для досягнення високої ефективності системи термостабілізації є вибір тактової частоти ШІМ, яка зазвичай лежить у межах 100–1000 кГц. Використання високої частоти (1 МГц) знижує витрати на котушку індуктивності та конденсатор вихідного фільтра, однак призводить до підвищення рівня електромагнітних перешкод. У розробленій системі термостабілізації застосовано тактову частоту f_T ШІМ 300 кГц. Резонансна частота фільтра f_0 за даної тактової частоти та номіналів фільтра $L = 10$ мкГ і $C = 22$ мкФ дорівнює 10,7 кГц. Тоді ступінь придушення частоти ШІМ LC -фільтром дорівнює:

$$|H_{ФНЧ}| = -40 \cdot \log \left(\frac{f_T}{f_0} \right) = -57,8 \text{ дБ}. \quad (13)$$

Особливістю розробленого підсилювача ШІМ є широке використання інтегральних схем, що загалом забезпечує його підвищений коефіцієнт корисної дії завдяки малим розмірам пристрою і малим тепловим утратам.

Експериментальні результати

У результаті виконання завдання з розробки потужної ефективної системи термостабілізації з вихідною потужністю 50–100 Вт створено нову конструкцію термоконтролера. За розробленою електричною схемою проведено розрахунки основних номіналів компонентів схеми, з урахуванням необхідності досягнення найбільшої точності та надійності розроблюваного пристрою.

На точність стабілізації температури, окрім особливостей електронної елементної бази, впливають багато зовнішніх чинників, таких як нелінійність теплової характеристики елемента Пельтьє, конструктивні елементи радіатора та їхнього закріплення, площинність прилягання елемента Пельтьє до корпусів сейсмографа та радіатора.

Температура на об'єкті регулювання, яким є корпус геофізичного приладу — сейсмометр, підтримується за допомогою пропорційно-інтегрально-диференціального алгоритму підтримки зворотного зв'язку.

Головна складність у регулюванні системи температурної стабілізації полягає в знаходженні необхідних коефіцієнтів ПІД-регулятора. Тому, як правило, через нелінійність і нестационарність системи розрахунки коефіцієнтів мають наближені значення. Остаточні значення коефіцієнтів визначаються після виконання експериментальних методів настроювання.

На рис. 12 наведено осцилограми сигналів, що пояснюють принцип роботи підсилювача ШІМ. На нижніх графіках осцилограм показано сигнали на виходах відповідно 1-го (рис. 12,а) та 2-го (рис. 12,б) каскадів мостового підсилювача, а на верхніх — сигнали після LC-фільтра. Пульсації вихідної напруги не перевищують 50 мВ.

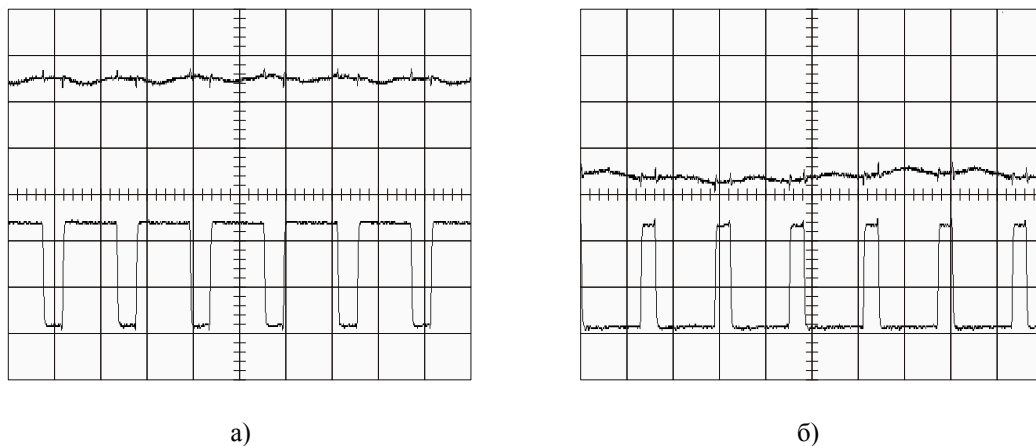


Рис. 12. Осцилограми сигналів. Значення горизонтальної розгортки — 2 мкс/діл; значення вертикальної розгортки — 100 мВ/діл для верхніх сигналів; значення вертикальної розгортки — 5 В/діл для нижніх сигналів

На рис. 13,а представлено осцилограми перехідних процесів сигналу напруги на терморезисторі (верхній графік: значення горизонтальної розгортки — 20 сек/діл; значення вертикальної розгортки — 100 мВ/діл) та сигналу з виходу ПІД-регулятора (нижній графік: значення горизонтальної розгортки — 20 сек/діл; значення вертикальної розгортки — 1 В/діл). На рис. 13,б (значення вертикальної розгортки — 2 мВ/діл) показано, як система регулятора температури в усталеному режимі відслідковує коливання температури оточуючого середовища. На верхньому графіку (рис. 13,б) сигнал напруги на терморезисторі показує, що температура об'єкта регулювання не змінюється, але при цьому сигнал з виходу ПІД-регулятора постійно змінюється в невеликих межах усталеного сигналу.

На основі розробленої конструкції високоефективної системи термостабілізації проведено дослідження стабільності вимірюваної температури. Виявлено фактори, що вносять помилку в сигнал, який отримується від вимірювального датчика (терморезистора). Таким чином, після удосконалення пристрою результати експериментальних досліджень показали, що система термостабілізації підтримує температуру на проміжку часу 6 год. з точністю $<0,01$ °С.

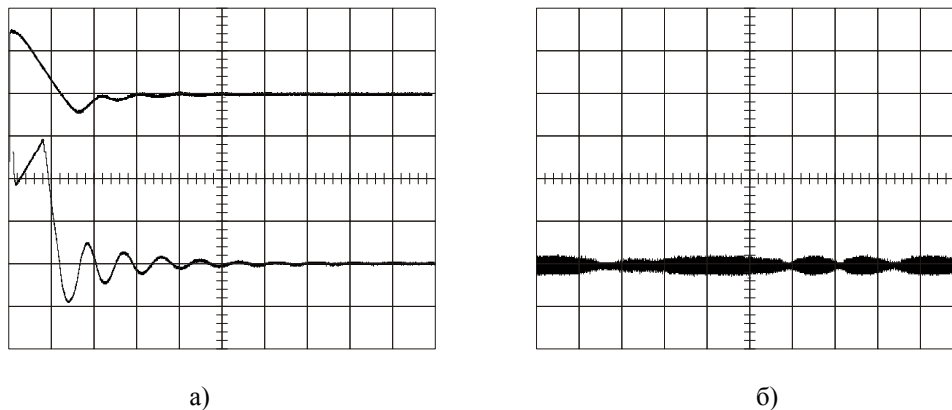


Рис. 13. Осцилограми сигналів

Висновки

Досліджено принципи побудови систем температурної стабілізації з використанням термоелектричних модулів Пельтьє. Розроблено високоефективну систему термостабілізації для модулів Пельтьє з вихідною потужністю >50 Вт без використання дороговартісних контролерів. Показано, що створена система термостабілізації забезпечує стабільність підтримки температури $<0,01$ °С.

Розроблена високоефективна система термостабілізації оптимально поєднує у собі основні специфікації: високу стабільність температури, високу енергетичну ефективність, низькі пульсації струму ТЕМ і низьку вартість.

1. Terry M.Tritt., Subramanian M.A. Thermoelectric Materials, Phenomena, and Applications: A Bird's Eye View. MRS bulletin. March 2006. Vol. 31.
2. Thermoelectric Materials — New Directions and Approaches. MRS, Pittsburgh, 1998. Vol. 478. 348 p.
3. Контроллер термостабилизации SP 100. URL: <http://www.fedalel.com/catalog/dopolnitelnoeoborudovanie/SP100.html>
4. Advanced TEC Controller — 54100. URL: <http://www.chromausa.com/product/advanced-tec-controller-54100/>
5. Precision Temperature Controller / Peltier Controller TEC-1089-SV. URL: <http://www.meerstetter.ch/products/tec-controllers/tec-1089>
6. Laser Diode Temperature Controllers TED200C. URL: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=307
7. DX5100 Table Top Thermoelectric Controller. URL: <http://www.rmtltd.ru/products/devices/controllers/dx5100tabletop/>
8. Laser Diode Thermoelectric Temperature Controller 350 В. URL: <https://www.newport.com/Laser-Diode-Temperature-Controller-350B/358814/1033/info.aspx>
9. Косяк І.В. Високостабільний регулятор температури напівпровідникового лазера для інтерферометрії. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2016. Т. 18. № 4. С. 55–66.
10. Integrated Temperature Controllers for Peltier Modules MAX1978. Technical description. Maxim Integrated Products. 2010. Rev 3; 3/10.
11. TL494 Pulse-Width-Modulation Control Circuits. Technical description. Texas Instruments Incorporated. — Revised January 2015.
12. Thermoelectric Cooling Systems. Design Guide. Marlow Industries, Inc., 1998.

Надійшла до редакції 13.03.2018