

УДК 536.58; 681.536.5

І. В. Косяк

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

Високостабільний регулятор температури напівпровідникового лазера для інтерферометрії

Проведено аналіз і дослідження систем температурної стабілізації. Розглянуто особливості розробки та побудови систем автоматичного регулювання температури. Запропоновано реалізацію високостабільного регулятора температури напівпровідникового лазера для інтерферометрії.

Ключові слова: термостабілізація, пропорційний інтегральний диференціальний регулятор, лазер, високостабільний регулятор температури.

Розвиток сучасної оптоелектроніки багато в чому пов'язаний з пошуком нових конструкцій і рішень, що дозволяють істотно поліпшити характеристики приладів. Відомо [1], що незначні коливання струму накачування лазера породжують зміни не тільки потужності, але і частоти, діаграми направленості та хвильового фронту випромінювання. Тому застосування зворотного зв'язку, який змінює тільки струм накачування залежно від інтенсивності випромінювання, покращує стабільність потужності, але погіршує довжину хвилі та викривляє хвильовий фронт випромінювання.

Також у напівпровідникових лазерах спостерігається сильна залежність потужності випромінювання та частоти випромінювання від температури приладу [2]. При різних температурах навколишнього середовища потужність випромінювання лазерного діода може значно змінюватися. При фіксованій потужності випромінювання струм накачування лазера в діапазоні від 0° до +50 °С змінюється майже в 2 рази. Типове значення температурного дрейфу частоти випромінювання напівпровідникового лазерного діода 0,2 нм/°С [3].

До створення метрологічного приладного комплексу із застосуванням лазерних вимірювальних систем у геофізичних приладах — сейсмометрах, дельта-гравіметрах і нахиломірах — пред'являються вимоги високої стабільності потужності та частоти випромінювання. Як джерело випромінювання у цих приладах застосовуватиметься напівпровідниковий лазер.

Проведені експериментальні дослідження показали, що для досягнення необхідної відносної стабільності довжини хвилі випромінювання напівпровідникового лазера температуру його корпусу необхідно стабілізувати з точністю не гірше $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4].

Таким чином, для нормального функціонування апаратури у системах цифрової лазерної інтерферометрії необхідно застосовувати методи активної температурної стабілізації. Найбільш зручними для здійснення активної термостабілізації електронної апаратури є термоелектричні перетворювачі, що використовують ефект Пельтьє, принцип дії якого базується на виникненні різниці температур при протіканні електричного струму.

Отже, завдання розробки ефективних і точних систем термостабілізації є актуальним у науковому відношенні та корисним у практичному застосуванні.

Аналіз досліджень і публікацій [5–15] свідчить про те, що висвітленню проблеми розробок засобів термостабілізації електронних приладів приділяється велика увага. Необхідно зауважити, що існують багато промислових пристроїв і систем з термостабілізації апаратури. Серед основних недоліків можна відзначити в переважній більшості невисоку точність стабілізації температури $>0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. Відомі промислові системи термостабілізації, які підтримують точність стабілізації температури $<0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$, мають високу вартість у межах $\$2\text{--}10$ тис.

Метою даної роботи є створення надійного малогабаритного високостабільного регулятора температури напівпровідникового лазера, що забезпечує точність стабілізації температури $<<0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Основною проблемою при дослідженні та розробці системи температурної стабілізації високої точності є як вибір електронних компонентів з яких складатиметься система, так і узгодження передатних характеристик системи автоматичного регулювання і термоелектричного модуля Пельтьє.

Аналіз існуючих інтегральних термоелектричних контролерів

Проведений пошук і аналіз літературних джерел на тему термостабілізації показав, що існують декілька термоелектричних контролерів, які забезпечують різну точність підтримки температури. Основні характеристики існуючих термоелектричних контролерів представлені далі в таблиці. Огляд і критичний аналіз розглянутих літературних джерел [11–15] дозволяє 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.

Таким чином, найбільш придатним для проектування системи високостабільної термостабілізації є інтегрований контролер температури для модулів Пельтьє MAX1978 фірми Maxim. MAX1978 представляє собою мініатюрний, прецизійний, повний за схемотехнікою однокристальний контролер (рис. 1), який не потребує зовнішніх підсилювачів [11].

Термоелектричні контролери

Назва контролера	Виробник	Точність підтримки температури	Особливості застосування
TMP01	Analog Devices	± 1 °C	Потребує зовнішнього підсилювача для термоелемента Пельтьє
LTC1923	Linear Technologi	0,1 °C	Потребує зовнішнього підсилювача для термоелемента Пельтьє
DRV594	Texas Instruments	Не зазначено	Потребує зовнішнього ОУ для підключення терморезистора
MAX1978	Maxim	0,001 °C	Струм навантаження до ± 3 А. Живлення 5 В
ADN8830	Analog Devices	0,01 °C	Потребує зовнішніх вихідних транзисторів

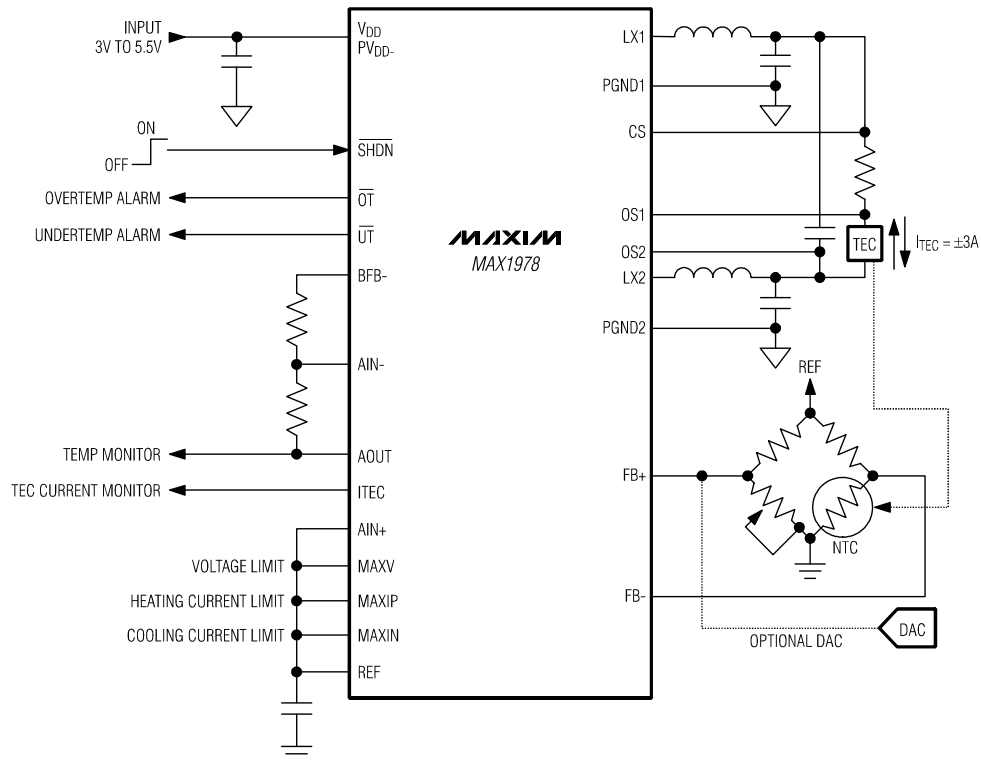


Рис. 1. Типова схема включення інтегрованого контролера MAX1978

Вбудовані силові польові транзистори та ланцюги управління температурним режимом мінімізують число зовнішніх компонентів, одночасно, забезпечуючи високу ефективність. Висока частота перетворення широтно-імпульсного модулятора 500 кГц / 1 МГц і унікальна схема придушення пульсацій дозволяє оптимізувати розміри компонентів і ефективність перетворення, одночасно знижуючи рівень шумів і випромінювання електромагнітних перешкод. Стабілізований підсилювач з ультранизьким дрейфом забезпечує стабільність температури до рівня 0,001°C. Для зниження пульсацій струму інтегрований контролер забезпечує безпосереднє

управління вихідним струмом, а не напругою. Окреме обмеження струмів нагрівання та охолодження, а також обмеження напруги, забезпечує високий рівень захисту модуля ТЕМ.

Інтегрований контролер MAX1978 має однополярну напругу живлення 3,3–5,5 В і забезпечує здатність навантаження 3 А шляхом включення модуля ТЕС між двома синхронними понижуючими перетворювачами напруги. Біполярний алгоритм роботи забезпечує управління температурним режимом без «мертвих зон», або інших нелінійних проявів при малих струмах навантаження. Аналогова схема управління прецизійно встановлює величину струму модуля ТЕМ.

Стабілізований вимірювальний підсилювач з переривачем і високопрецизійний інтегруючий підсилювач призначені для реалізації пропорційно-інтегрального (ПІ), або пропорційно-інтегрально-диференційного контролера. Вбудоване джерело опорної напруги забезпечує напругу зміщення для терморезисторного мосту [11].

Реалізація пристрою регулятора температури для напівпровідникового лазера

На рис. 2 представлена характеристика залежності довжини хвилі випромінювання напівпровідникового лазера HL6312G від температури його корпусу і, зрештою, *p-n*-переходу [3]. Як видно з графіка, існують окремі температурно-незалежні ділянки, які мають відрізки <1 °С. Експериментально було доведено, що при температурі корпусу лазера, близької до переходу з однієї температурно-незалежної ділянки до іншої, генерація випромінювання лазера переходить у режим збудження, що призводить до шумів у інтерферометричному сигналі та, зрештою, до похибки отриманих вимірів. З цього випливає, що температуру корпусу лазера необхідно підтримувати з дуже високою стабільністю, аби температура не наближалася до порогів температурно-незалежних ділянок.

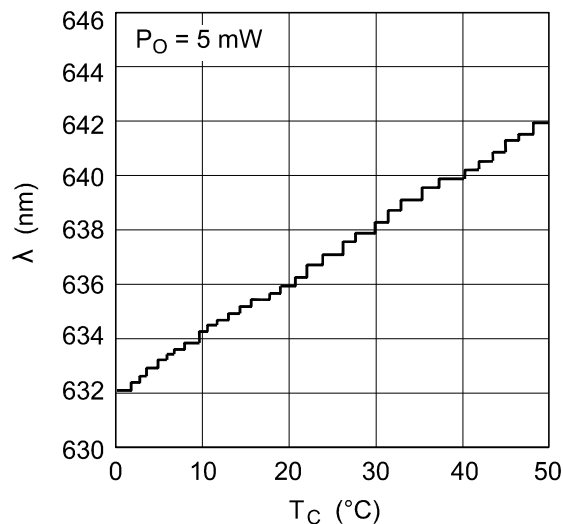


Рис. 2. Характеристика температурної залежності довжини хвилі випромінювання напівпровідникового лазера HL6312G

На рис. 3 представлено функціональну схему автоматичного регулювання температури напівпровідникового лазера для застосування у цифровій лазерній інтерферометрії. До контуру регулювання входять датчик (терморезистор), регулятор, вихідний підсилювач, виконавчий елемент-модуль Пельтьє, об'єкт регулювання.

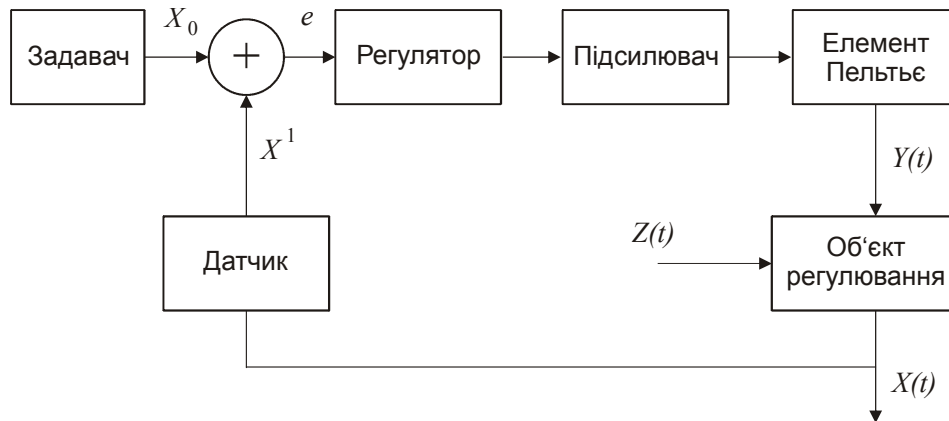


Рис. 3. Функціональна схема САР температури лазера: X_0 — задане значення керуючого впливу; X^1 — сигнал з виходу датчика; e — сигнал розузгодження; $Y(t)$ — сигнал керуючого впливу; $Z(t)$ — збурюючий вплив; $X(t)$ — регульований параметр

Регулятор виконує основні функції керування шляхом вироблення керуючого впливу в залежності від сигналу розузгодження. Через функціональність і придатність для вирішення більшості практичних задач обрано пропорційно-інтегрально-диференціальний закон регулювання (ПІД-регулятор), який представляється рівнянням у вигляді

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

де $e(t)$ — сигнал розузгодження; K_p — пропорційний коефіцієнт; K_I — інтегральний коефіцієнт; K_d — диференціальний коефіцієнт.

Сформований у ПІД-регуляторі керуючий вплив пропорційний відхиленню, інтегралу від відхилення і швидкості зміни відхилення.

Введемо дві нових постійних у часовій області: $T_I = \frac{K_p}{K_I}$ — постійну інтегрування; $T_d = \frac{K_d}{K_p}$ — постійну диференціювання. Тоді вираз (1) можна представити у більш зручному вигляді:

$$U(t) = K_p \cdot (e(t) + \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}). \quad (2)$$

Використовуючи перетворення Лапласа при нульових початкових умовах, визначаємо передатну функцію ПІД-регулятора для опису його динамічних властивостей:

$$W(p) = K \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right), \quad (3)$$

де p — комплексна частота $j\omega$.

На рис. 4 показано логарифмічні амплітудно-частотну (АЧХ) і фазо-частотну (ФЧХ) характеристики передатної функції (3). В області нижніх частот АЧХ і ФЧХ визначаються інтегральним членом, в області середніх частот — пропорційним, в області високих — диференціальним.

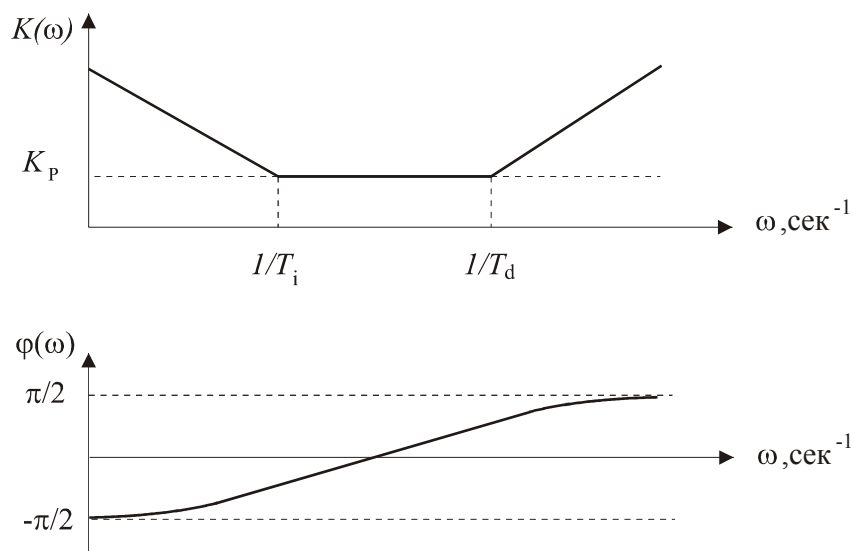


Рис. 4. АЧХ і ФЧХ ПІД-регулятора

Для вирішення практичних задач ПІД-регулятор, як правило, реалізують на операційному підсилювачі (ОП) або програмно. Основною проблемою при реалізації ПІД-регулятора є налаштування його параметрів. На рис. 5 зображено практичну реалізацію типового ПІД-регулятора на операційному підсилювачі (ОП) [11]. Для зниження рівня перешкод на виході регулятора та підвищення стійкості його роботи послідовно з конденсатором $C1$ включено додатковий резистор $R1$ з невеликим опором, який обмежує струми високочастотних перешкод. Також наявність конденсатора зворотного зв'язку $C3$ покращує стабільність роботи системи без збільшення часу встановлення, оскільки дозволяє відфільтрувати шуми поза смугою сигналу керування.

Передатну функцію такого ПІД-регулятора в контурі компенсації (або зворотного зв'язку) можна представити у вигляді

$$H(p) = -\frac{Z_2(p)}{Z_1(p)}, \quad (4)$$

де

$$Z_2(p) = \frac{\left(R3 + \frac{1}{pC2}\right) \cdot \frac{1}{pC3}}{R3 + \frac{1}{pC2} + \frac{1}{pC3}}, \quad Z_1(p) = \frac{R2 \cdot \left(R1 + \frac{1}{pC1}\right)}{R2 + R1 + \frac{1}{pC1}}. \quad (5)$$

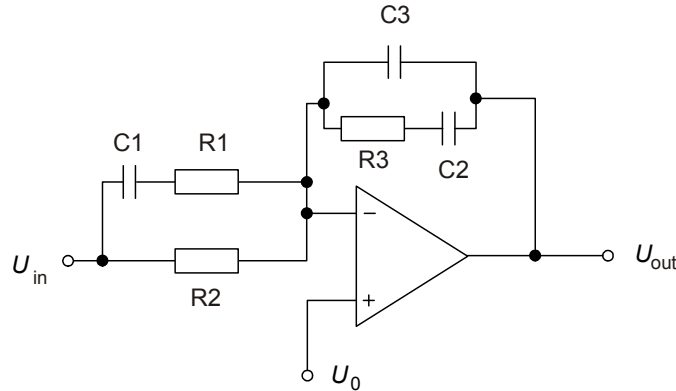


Рис. 5. Пропорційний інтегральний диференціальний регулятор

Після алгебраїчних перетворень передатна функція (4) запишеться у вигляді:

$$H(p) = -\frac{1}{pR2 \cdot (C2 + C3)} \cdot \frac{(1 + pC2 \cdot R3)[1 + pC1 \cdot (R1 + R2)]}{(1 + pC1 \cdot R1) \cdot \left[1 + pR3 \cdot \left(\frac{C2 \cdot C3}{C2 + C3}\right)\right]}. \quad (6)$$

На рис. 6 представлено графік діаграми Бode (логарифмічні АЧХ і ФЧХ) передатної функції (6) відповідно до електричної схеми (рис. 5) з реалізованим ПІД-регулятором у контурі компенсації, де зображено два полюси та два нулі передатної функції контуру компенсації.

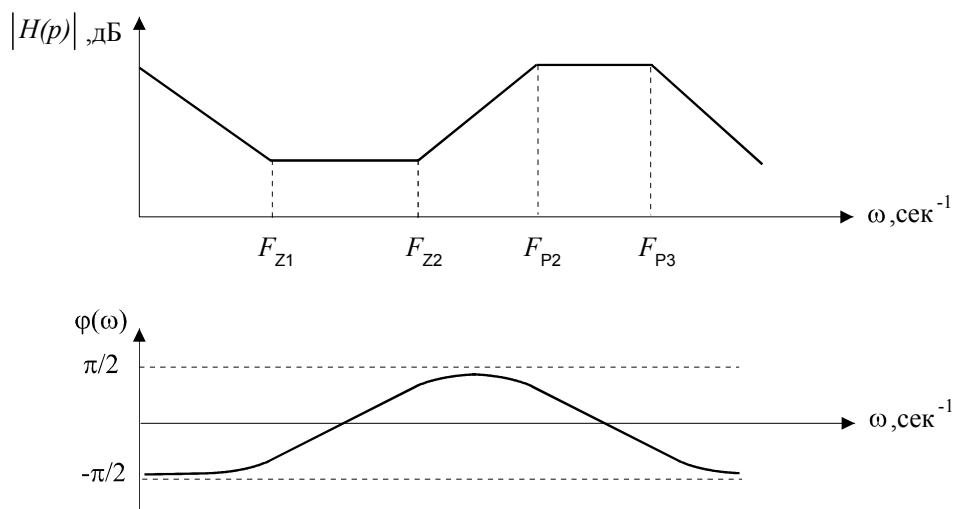


Рис. 6. АЧХ і ФЧХ ПІД-регулятора на операційному підсилювачі

Для досягнення найбільшої точності, перед тим як розраховувати компенсацію теплового контуру регулювання, необхідно знати теплову характеристику термоелектричного модуля (ТЕМ). Як правило ТЕМ має сильнішу нагріваючу здатність, чим охолоджуючу із-за ефекту відводу тепла.

Більшість модулів ТЕМ можливо моделювати як двополюсні системи. Другий полюс потенційно створює коливальний стан внаслідок відповідного зміщення фази на 180° . Передатна функція модуля ТЕМ може бути описана аперіодичною ланкою другого порядку:

$$K_{ТЕМ}(p) = \frac{1}{(1 + T_1 \cdot p) \cdot (1 + T_2 \cdot p)} \quad (7)$$

Розглянемо типову перехідну характеристику модуля ТЕМ [11], який має розміри $20 \times 20 \times 3$ мм, логарифмічні АЧХ і ФЧХ передатної функції якого зображено на рис. 7.

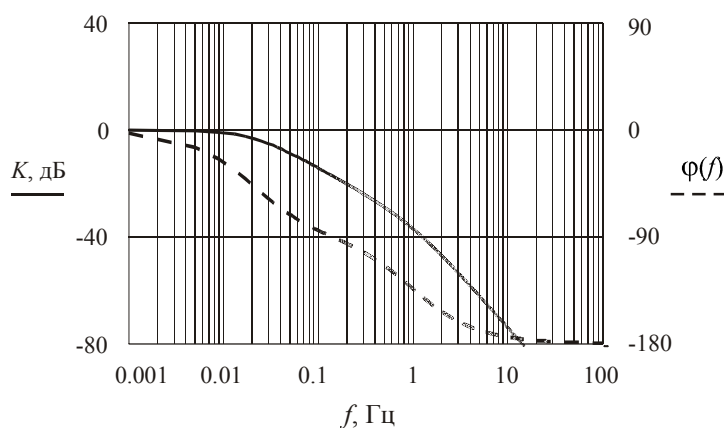


Рис. 7. АЧХ і ФЧХ модуля ТЕМ

Модуль ТЕМ має два полюси: $f_1 = 0,02$ Гц і $f_2 = 1$ Гц (рис. 7). Домінантний полюс (найнижчий за частотою) компенсувати недоцільно, тому що частота розділення (на графіку Бодє точка рівня 0 дБ) повинна бути нижче першого полюсу ТЕМ, тобто нижче 0,02 Гц. Це потребує конденсатора інтегратора занадто великої ємності, внаслідок чого відбувається повільна реакція в контурі регулювання. Кращий підхід полягає у використанні ПІД-регулятора, де два нулі F_{Z1} та F_{Z2} (рис. 6) компенсують полюси модуля ТЕМ. Для стабільної роботи схеми значення нулів F_{Z1} та F_{Z2} розташовуються між значеннями полюсів модуля ТЕМ f_1 та f_2 . На рис. 8 зображено результуючу АЧХ $K_{РЕЗ}$ для даного випадку. Достатній запас фази може бути досягнутим поблизу частоти другого полюса ТЕМ при використанні ПІД-регулятора.

Як і будь-який контур регулювання, точність стійкого стану пов'язана з підсиленням у ланцюзі постійного струму. Враховуючи велику термічну масу об'єкта регулювання, контроль температури може зайняти від декількох десятків секунд до декількох хвилин. Отже, щоб уникнути коливань і перерегулювання для компенсації у контурі регулювання для елемента Пельтьє та терморезистора,

потрібен повільний інтегратор. Конденсатор в інтегральному ланцюгу має бути з малими струмами витоку. Цим вимогам задовольняють тільки дорогі керамічні конденсатори великої ємності на десятки мкф.

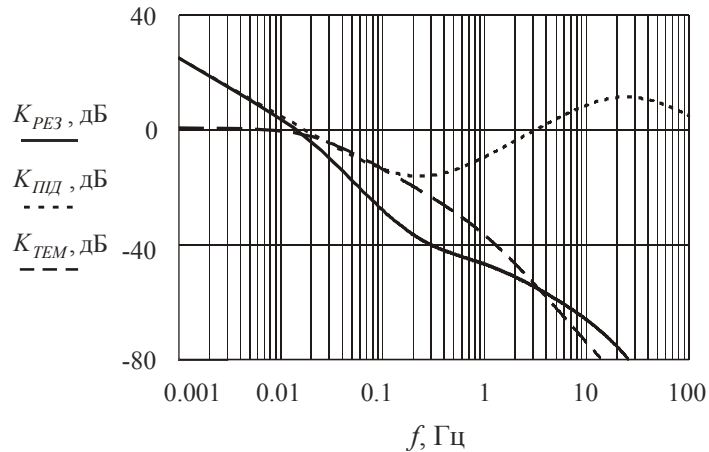


Рис. 8. Результуюча АЧХ модуля ТЕМ і ПІД-регулятора

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

Остаточні значення коефіцієнтів визначаються після виконання експериментальних методів налаштування.

На рис. 9 представлено лазерний модуль, де зображено розташування елементів конструкції високостабільного регулятора температури напівпровідникового лазера без електронної плати. Лазерний модуль складається з шести основних елементів: корпусу, напівпровідникового лазера, терморезистора, модуля ТЕМ, радіатора, коліматора. На роботу системи термостабілізації впливає якість відводу тепла від корпусу, в якому розташований напівпровідниковий лазер, тому всі частини лазерного модуля з'єднуються між собою з використанням спеціальної термопасти.

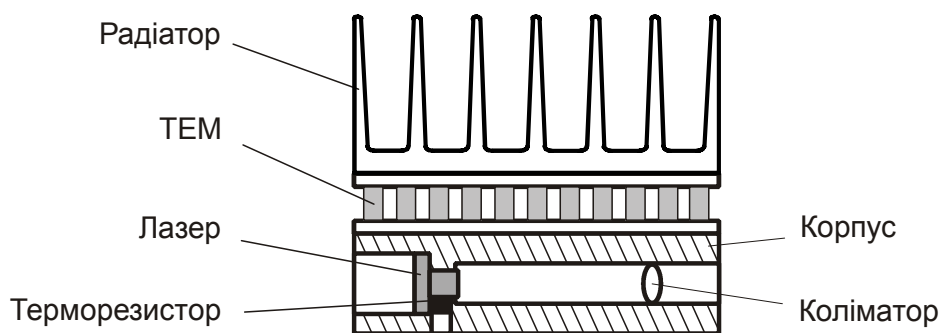


Рис. 9. Лазерний модуль

У ході виконання роботи був розроблений основний схемотехнічний блок, який у зборі з лазерним модулем складають єдиний пристрій — високостабільний регулятор температури напівпровідникового лазера для інтерферометрії, призначений для підтримки «сталості» довжини хвилі випромінювання напівпровідникового лазера. За розробленою електричною схемою проведено розрахунки основних номіналів компонентів схеми, з урахуванням необхідності досягнення найбільшої точності та надійності розроблюваного пристрою.

Експериментальні результати

Головна складність у регулюванні системи температурної стабілізації полягає у знаходженні необхідних коефіцієнтів. Тому, як правило, через нелінійність і нестационарність системи розрахунки коефіцієнтів мають наближені значення.

Аналіз експериментальних досліджень показав особливості роботи контролера МАХ1978 при застосуванні різних модулів ТЕМ. З'ясовано, що для надійної роботи системи температурної стабілізації розрахункові значення ПІД-регулятора в його диференційній складовій необхідно збільшити $\geq 4 K_d$ для усунення затухаючих коливань.

На основі розробленої конструкції регулятора температури проведено дослідження стабільності вимірюваної температури. Виявлені фактори, що вносять помилку в сигнал, одержуваний від вимірювального датчика — терморезистора.

На рис. 10,а представлено осцилограму сигналу з виходу ПІД-регулятора. Як видно з осцилограми, встановлення на задані точність і температуру 25 °С при оточуючій температурі 20 °С приблизно 4 хв. На рис. 10,б представлено осцилограми сигналів з виходу вимірювального моста (верхній сигнал) та ПІД-регулятора (нижній сигнал) зі збільшеною чутливістю вертикального каналу відхилення осцилографа. Система регулятора температури є надчутливою. Посередині осцилограми (рис. 10,б) видно сплеск (зрив) повільних коливань усталеного сигналу, які викликані рухом повітряної маси внаслідок проходження людини. При цьому температура об'єкта регулювання не змінюється.

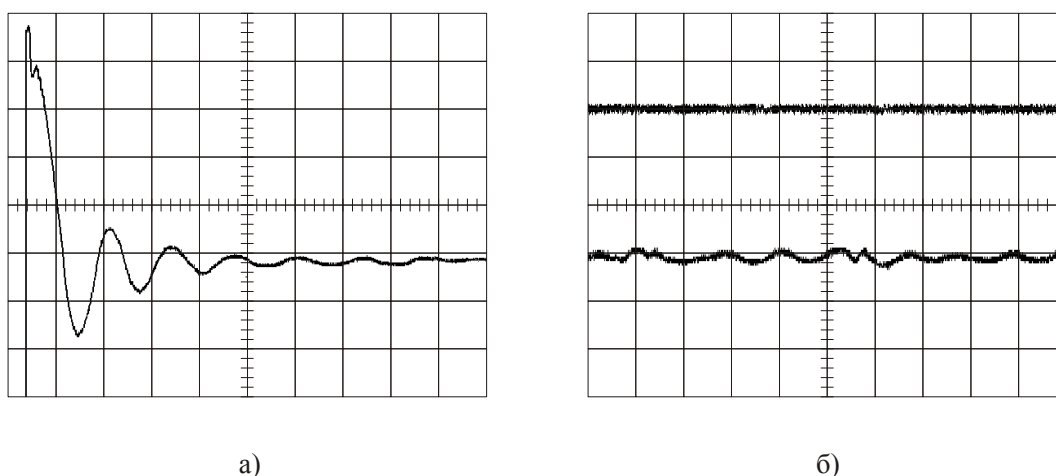


Рис. 10. Осцилограми сигналів. Значення горизонтальної розгортки — 20 с/діл; значення вертикальної розгортки: а) 500 мВ/діл; б) 2 мВ/діл

Система температурної стабілізації напівпровідникового лазера підтримує температуру з точністю 0,003 °С. Вимірювання на тривалому проміжку часу показали, що температура змінювалась у межах 0,003–0,006 °С за 2 години. Вимірювання значень температури проводилися непрямим способом. За допомогою високоточного мультиметра були виміряні значення напруги на терморезисторі. Відомо, що з даного терморезистора величиною 10 кОм, який включений у схему вимірювального моста, при заданому значенні опорної напруги 1,5 В, зміна температури на 1 °С призводить до зміни напруги на терморезисторі 16 мВ. Відповідно зміна температури на 0,001 °С дорівнює зміні напруги на 16 мкВ.

Експериментально доведено, що при температурі оточуючого середовища 22 °С температура напівпровідникового лазера із зазначеною точністю підтримувалася при зміні задавальної температури в межах 14–42 °С. Нижню межу підтримки стабільної температури можна знизити, застосувавши радіатор більшого розміру. Як зазначалося раніше, модуль ТЕМ має сильнішу нагрівальну здатність, чим охолоджуючу із-за ефекту відводу тепла.

Висновки

Проведено аналіз принципів побудови систем температурної стабілізації. Розроблено та виготовлено пристрій регулятора температури для напівпровідникових лазерів на основі інтегрованого контролера температури для модулів Пельтьє МАХ1978 для застосування у системах цифрової лазерної інтерферометрії. Показано, що створена система температурної стабілізації забезпечує необхідну точність підтримки температури напівпровідникового лазера $\approx 0,003$ °С.

1. William S., Chang C. Principles Of Lasers And Optics. Cambridge University Press, 2005. 262 p.
2. Takahiro Numai. Fundamentals of semiconductor lasers. Springer-Verlag New York, Inc, 2004. 259 p.
3. HL6312G/13G, AlGaInP Laser Diodes. Technical description. Opnext Japan, Inc., Jan. 2003. Rev. 8.
4. Брицкий А.И. Применение полупроводниковых цифровых интерферометров в сверхплотной оптической записи информации и геофизических измерениях. *Регистрация, зберігання і обробка даних*. 2012. Т. 14. № 2. С. 89–97.
5. Контроллер термостабилизации SP 100. URL: <http://www.fedalel.com/catalog/dopolnitelnoeoborudovanie/TECSP100.html>
6. Advanced TEC Controller — 54100. URL: <http://www.chromausa.com/product/advanced-tec-controller-54100/>
7. Miniature OEM Precision Peltier Temperature Controller TEC-1091. URL: <http://www.meerstetter.ch/products/tec-controllers/tec-1091>
8. Laser Diode Temperature Controllers TED200C. URL: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=307
9. DX5100 Table Top Thermoelectric Controller. URL: <http://www.rmtltd.ru/products/devices/controllers/dx5100tabletop/>

10. Laser Diode Thermoelectric Temperature Controller 350B. URL: <https://www.newport.com/Laser-Diode-Temperature-Controller,-350B/358814/1033/info.aspx>
11. Integrated Temperature Controllers for Peltier Modules MAX1978. Technical description. Maxim Integrated Products. 2010. Rev 3; 3/10.
12. Low Power Programmable Temperature Controller TMP01. Technical description. Analog Devices, Inc. 2009. Rev E.
13. LTC1923 — High Efficiency Thermoelectric Cooler Controller. Technical description. Linear Technology Corporation, 2001.
14. DRV594 High-Efficiency PWM Power Driver. Technical description. Texas Instruments, Inc., 2010. Rev C.
15. ADN8830 Thermoelectric Cooler (TEC) Controller. Technical description. Analog Devices. 2012. Rev A.

Надійшла до редакції 25.10.2016