

## ТЕХНОЛОГІЯ ЛЕГКОЇ ТА ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 658.5

<https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.2.5>

Н. О. ПОХЛЄБІНА

Одеський національний технологічний університет

ORCID: 0000-0002-9789-608X

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЛАЗЕРІВ,  
ЙОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ЯК ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ

Дана робота присвячена дослідженню напівпровідникових лазерів. Вивченню лазерного DFB-модуля, мети його функціонування, формалізації процесу як об'єкту керування. В роботі розглянуто особливості технологічного процесу формування інфрачервоного випромінювання напівпровідниковими DFB лазерними діодами, системи автоматичного керування лазерним DFB-модулями які використовуються, як в якості джерел оптичного сигналу для передачі даних та оптичних вимірювань. Виявлено основні недоліки та розглянуті можливі шляхи для удосконалення структури і функцій систем автоматичного керування процесом. Напівпровідникові DFB-лазери з розподіленим зворотнім зв'язком на відміну від лазерів з інтерферометром Фабрі – Перо працюють в одно частотному режимі генерації. Їх зручно використовувати в якості джерела із зміною частотою випромінювання, оскільки вони мають помітну температурну залежність частоти (довжини хвилі) генерації. Діодний лазер вимагає високоточної стабілізації температури внаслідок вельми істотної залежності параметрів його випромінювання від температури. Підтримка необхідної частоти та інтенсивності когерентного випромінювання на виході лазера та температури відкриває широке застосування у багатьох сферах та пристроях. Потужність випромінювання лазерного діода пропорційна струму який протікає крізь нього (струму накачки). При струмі накачки нижче порогового лазерний діод працює в режимі світлодіода випромінюючи некогерентне випромінювання з напівшириною спектру 20–25 нм, при струмі вище порогового діод переходить в режим генерації когерентного випромінювання, ширина спектру якого значно вужча і зазвичай становить одиниці нанометрів або менше. В списку джерел представлено огляд науково-технічної інформації по темі роботи, її компонентів та параметрів. Представлені структурна та параметрична схеми процесу формування випромінювання лазерним DFB-модулем як об'єкту керування, концептуальна структура САК підвищеної динамічної точності.

**Ключові слова:** лазерний DFB-модуль, напівпровідникові лазери, системи автоматичного керування, система управління, діодний лазер, напівпровідники, інфрачервоне випромінювання, частота випромінювання, частота.

N. O. POKHLEBINA

Odesa National Technological University

ORCID: 0000-0002-9789-608X

## STUDY OF SEMICONDUCTOR LASERS AND ITS FUNCTIONING AS A CONTROL OBJECT

This work is devoted to the study of semiconductor lasers. the study of the laser DFB module, the purpose of its operation, the formalization of the process as a control object. The paper considers the features of the technological process of generating infrared radiation by semiconductor DFB laser diodes, automatic control systems for laser DFB modules, which are used as an optical signal source for data transmission and optical measurements. The main shortcomings are revealed and possible ways of improving the structure and functions of automatic process control systems are considered. Semiconductor DFB lasers with distributed feedback, in contrast to lasers with a Fabry-Perot interferometer, operate in a single frequency generation mode. It is convenient to use them as a source with a change in the frequency of radiation, since they have a noticeable temperature dependence of the frequency (wavelength) of generation. A diode laser requires high-precision temperature stabilization as a result of a very significant dependence of its radiation parameters on temperature. Maintaining the required frequency and intensity of coherent radiation at the laser output and temperature will open wide application in many areas and devices. The radiation power of a laser diode is proportional to the current flowing through it (pump current). At a pump current below the threshold laser diode, it operates in the LED mode, emitting incoherent radiation with a spectral half-width of 20–25 nm, at a current above the threshold diode, it switches to the coherent radiation generation mode, the spectral width of which is much narrower and usually amounts to a few nanometers or less. The list of sources provides an overview of scientific and technical information on the topic of the work, its components and parameters. A structural and parametric diagram of the process of generating radiation by a laser DFB module as a control object, a conceptual structure of an SAC with increased dynamic accuracy, is presented.

**Key words:** laser DFB module, semiconductor lasers, automatic control systems, control system, diode laser, semiconductors, infrared radiation, radiation frequency, frequency.

### Постановка проблеми

Різноманітна кількість видів лазерів, що були створені, різняться досить широким спектром як фізичних так і робочих характеристик. Твердо тілі, газові або рідинні лазери, що зараз використовують класифікують більшою мірою за фізичним станом активного середовища. Також слід виділити особливий тип лазера, а саме лазери на вільних електронах, активне середовище яких складається з вільних електронів, що безпосередньо рухаються з релятивістськими швидкостями через просторово-періодичне магнітне поле. Усі лазери класифікують за довжиною хвилі генерації випромінювання, то їх поділяють за діапазонами на інфрачервоні, видимі, ультрафіолетові та рентгенівські.

В одночастотному режимі генерації працюють напівпровідникові DFB-лазери з розподіленим зворотнім зв'язком. Такі лазери зручно використовувати в якості джерела із зміною частотою випромінювання, бо вони мають помітну температурну залежність частоти (довжини хвилі) генерації. Широта діапазону фізичних або робочих характеристик лазерів є як перевагою, так і недоліком. Якщо говорити про застосування лазерів, то широкий спектр їх параметрів забезпечує величезний потенціал можливого використання в різних областях фундаментальних і прикладних досліджень. Основною проблемою лазерних діодів в цілому це залежність довжини хвилі від температури лазера, що потребує додаткової системи керування для утримання його на потрібній частоті.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

У своїй статті «Analytical procedure to obtain internal parameters from performance curves of commercial thermoelectric modules» автори використали метод заснований на основних рівняннях, що пов'язують теплову та електричну динаміку, в яких необхідно оцінити деякі параметри. В результаті можна передбачити поведінку модулів, якщо вони працюватимуть нестандартно. Одним із хороших прикладів є моделювання поведінки модуля, призначеного для охолодження, при використанні його як модуля Seebeck для виробництва електроенергії. Запропонована методологія була успішно застосована до комерційного модуля Пельтьє, для якого була змодельована поведінка як термоелектричний генератор, а потім перевірена експериментально, і були отримані дуже схожі результати [1].

У своїй статті «Mathematical Model of Thermoelectric Peltier Module» автори дали визначення ТЕМ (термоелектричний модуль Пельтьє), що це пристрої, які перетворюють електричну енергію в градієнт температури. Його дія заснована на ефекті Пельтьє. Пристрої відносно прості, маючи невеликі габарити, володіють хорошою конструкційною надійністю і тривалим терміном служби (понад 200 тис. годин). Вони не мають рухомих частин або шкідливих для навколишнього середовища холодоагентів. Сучасні ТЕМ високоефективні – потужністю до кількох сотень ват. В останні роки широкого застосування набули термоелектричні системи охолодження. Вони знайшли застосування в сучасних транспортних засобах для охолодження та збереження продуктів під час їх транспортування, у переносних сумках-холодильниках, комп'ютерній, військовій та медичній техніці [2].

У своїй статті автори наводять результати дослідження спектральних характеристик серійних напівпровідникових лазерів з використанням оптичного аналізатора спектру та блока живлення та управління для лазера. Отримані сімейства спектральних характеристик у широкому діапазоні струмів інжекції та температур. Визначено температурні струмові коефіцієнти для довжини хвилі випромінювання лазерів [3].

### Формування мети дослідження

Підвищення ефективності аналізу складу харчових продуктів, дослідження ІЧ DFB-лазерного модуля як об'єкту керування та одержання його характеристик.

### Викладання основного матеріалу дослідження

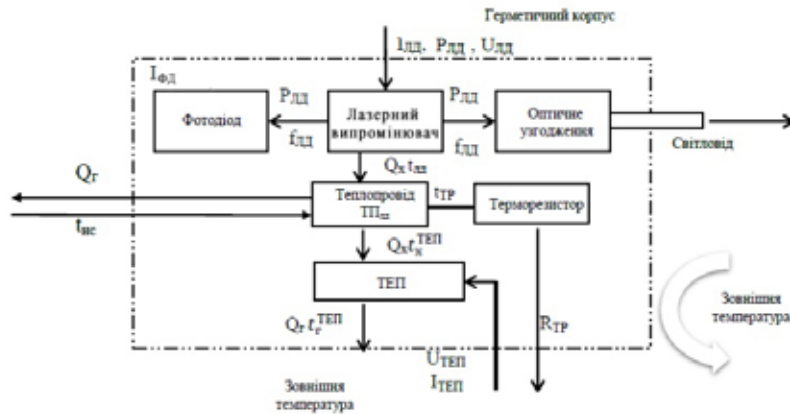
Метою функціонування будь-якого лазерного модуля є генерація когерентного електромагнітного випромінювання з заданими спектральними характеристиками: центральною довжиною хвилі спектра випромінювання, шириною цього спектра та його потужністю.

Таким чином лазерний модуль зазвичай розташовується в металокерамічному герметичному корпусі, який забезпечує відвід тепла у навколишнє середовище. Окрім лазерного діода в ньому можуть бути розташовані наступні елементи модуля:

- Контрольний фотодіод, який забезпечує вимірювання інтенсивності випромінювання лазерного діода;
- Терморезистор, який дозволяє контролювати температуру лазерного діода;
- Термоелектричний перетворювач на ефекті Пельтьє (ТЕП), який є виконавчим елементом схеми термостабілізації лазерного діода;
- Теплопровід, який забезпечує відвід теплового потоку від лазерного діода.

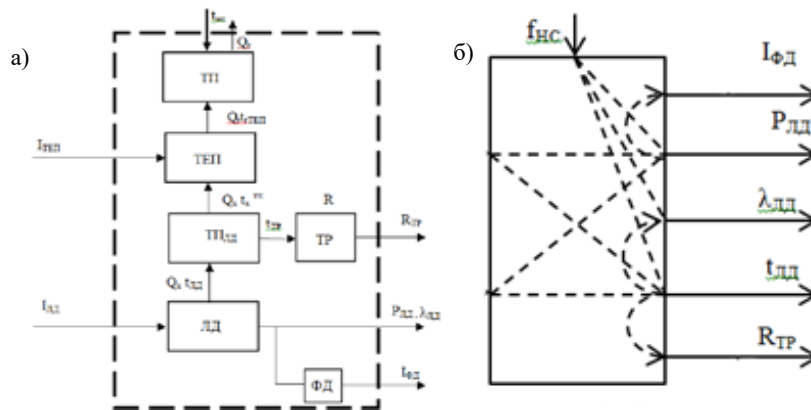
Згідно з аналізом, що був проведений, можна сказати, що потужність випромінювання лазерного діода пропорційна струму який протікає крізь нього (струму накачки). При струмі накачки нижче порогового лазерний діод працює в режимі світлодіода випромінюючи некогерентне випромінювання з напівшириною спектру 20–25 нм, при струмі вище порогового діод переходить в режим генерації когерентного випромінювання, ширина спектру якого значно вужча і зазвичай становить одиниці нанометрів або навітьдесяті долі нанометрів. Потужність випромінювання прямо пропорційна струму крізь лазерний діод(струму накачки лазера). Положення центральної довжини хвилі спектру випромінювання напівпровідникового лазерного діода має сильну залежність від його температури та струму накачки [4].

Параметризована схема технічної структури лазерного модуля представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Параметризована схема технічної структури лазерного модуля, де  $t_E^{TEP}$  – температура «холодної» поверхні ТЕП,  $t_3^{TEP}$  – температура «гарячої» поверхні ТЕП,  $I_{LD}$  – струм лазерного діода,  $I_{TEP}$  – струм термоелектричного перетворювача,  $R_{TP}$  – опір терморезистора,  $t_{nc}$  – температура навколишнього середовища,  $\lambda_{LD}$  – довжина хвилі лазерного випромінювання,  $R_{LD}$  – потужність випромінювання лазера,  $Q_x$  – «холодний» тепловий потік ТЕП,  $Q_r$  – «гарячий» тепловий потік ТЕП

На рис. 2 представлена структурна (а) та параметрична (б) схеми процесу формування випромінювання лазерним DFB-модулем як об'єкта керування.



**Рис. 2.** Структурна (а) та параметрична (б) схеми процесу формування випромінювання лазерним DFB-модулем як об'єкта керування, де ТП – теплопровід, ТЕП – термоелектричний перетворювач, ТПЛД – теплопровід лазерного діода, ТР – терморезистор, ЛД – лазерний діод, ФД – фотодіод,  $t_E^{TEP}$  – температура «холодної» поверхні ТЕП,  $t_3^{TEP}$  – температура «гарячої» поверхні ТЕП,  $I_{LD}$  – струм накачки лазерного діода (керуючий вплив зміни потужності випромінювання),  $I_{TEP}$  – струм термоелектричного перетворювача (керуючий вплив зміни довжини випромінювання),  $R_{TP}$  – опір терморезистора,  $t_{nc}$  – температура навколишнього середовища,  $t_{TP}$  – температура терморезистора,  $\lambda_{LD}$  – довжина хвилі лазерного випромінювання,  $P_{LD}$  – потужність випромінювання лазера,  $Q_x$  – «холодний» тепловий потік ТЕП  $Q_r$  – «гарячий» тепловий потік ТЕП

За результатами дослідження була розроблена модель роботи ТЕП згідно із наведеними матеріалами вище. Розробка та тестування комп'ютерної імітаційної моделі ОК.

У результаті моделювання отримали модель залежності сили струму та температури, а також напруги та струму.

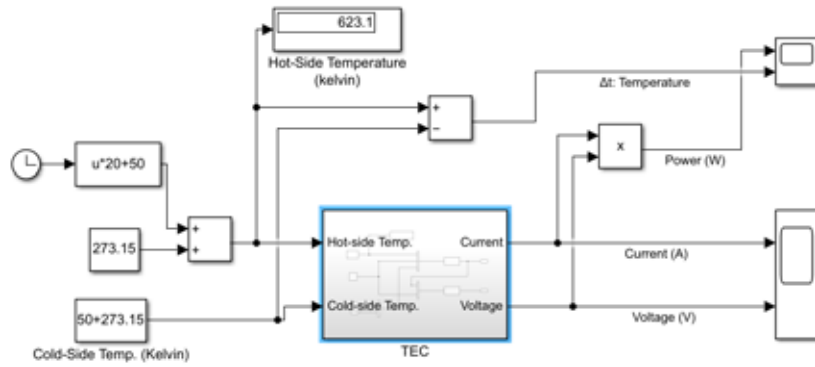


Рис. 3. Модель роботи ТЕП

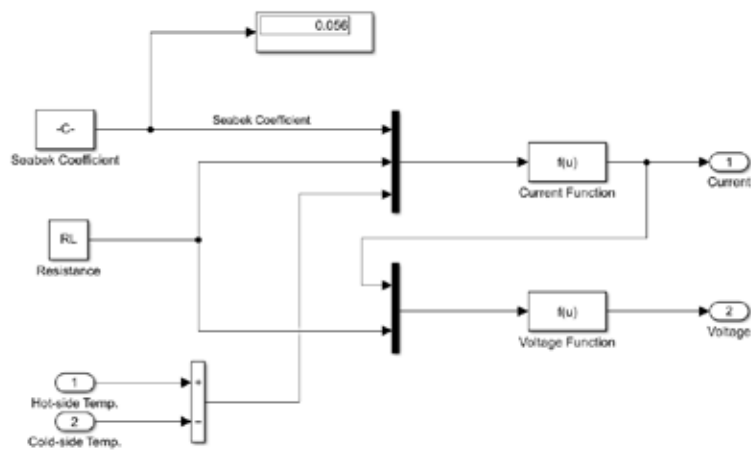


Рис. 4. Підсистема ТЕП

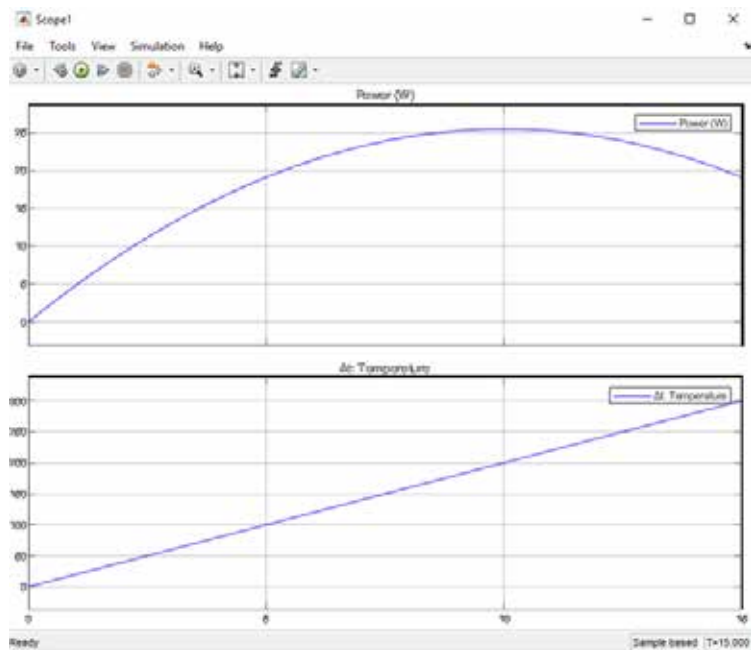


Рис. 5. Результати моделювання

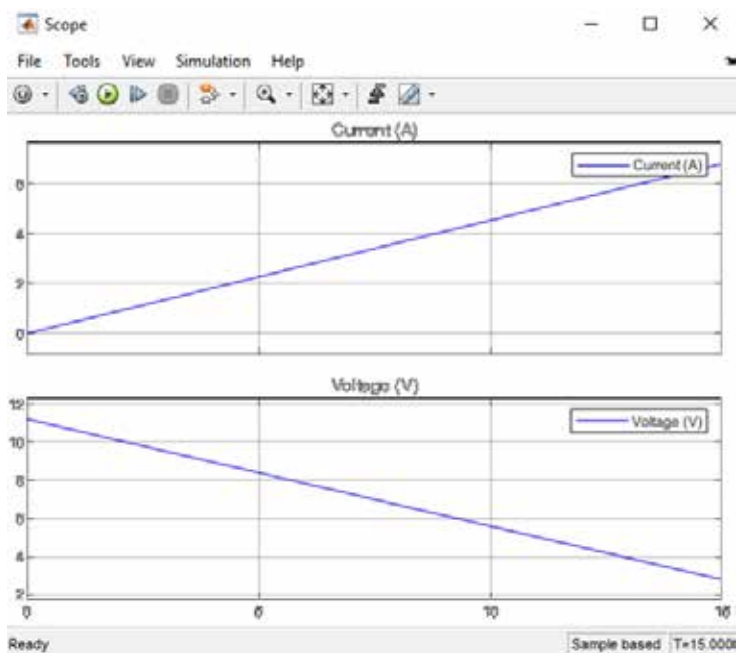


Рис. 6. Результати моделювання

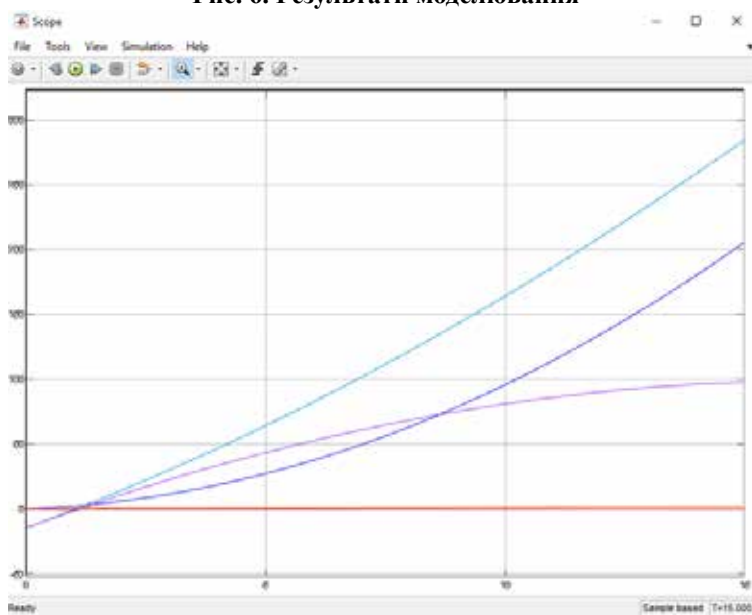


Рис. 7. Результати моделювання загальної характеристики залежності

Пристрій Пельтьє, що працює в режимі охолодження з температурою гарячої сторони 50°C у режимі охолодження ККД Пельтьє дорівнює теплу, що передається через термоелектричний охолоджувач (ТЕП), поділений на вхідну електричну потужність,  $COP = Q_c / P_{in}$ .

Після отримання характеристик роботи ТЕП, була створена модель, яка реалізована засобами середовища MATLAB Simulink для отримання перехідних характеристик лазерного випромінювача. Динамічна модель лазерного випромінювача може бути представлена наступним рівнянням:

$$\begin{cases} \frac{dP(t)}{dt} = a_{11}P(t) + f(\Delta t)T + f(I_a)I_a \\ \frac{dT(t)}{dt} = a_{22}T(t) + f(\Delta P)P(t) + f(I_{ТЕП})I_{ТЕП} \end{cases}$$

$$I_{\phi} = f(P)$$

$$R_t = f(I)$$

T – температура

P – потужність випромінювання

I<sub>теп</sub> – струм термоелектричного перетворювача

I<sub>д</sub> – струм діода

Вхідний «холодний» тепловий потік ТЕП розраховується із залежності

$$Q_x = -\frac{\Delta T}{\rho_{ТЕП}} + \pm m \cdot T_a \cdot I - \frac{I^2 R_{ТЕП}}{2},$$

де Q<sub>x</sub> – вхідний («холодний») тепловий потік ТЕП ; Q<sub>г</sub> – вихідний («гарячий») тепловий потік ТЕП ; R<sub>ТЕП</sub> – електричний опір ТЕП; ρ<sub>ТЕП</sub> – тепловий опір ТЕП; α<sub>m</sub> – коефіцієнт р-п переходу [V/K]; T<sub>e</sub> – абсолютна температура теплої сторони[K]; T<sub>a</sub> – абсолютна температура холодної сторони[K]; V – падіння напруги на ТЕП; I – струм крізь ТЕП.

Вихідний «гарячий» тепловий потік ТЕП визначається ефектом Пельть'є (α<sub>m</sub>·TI), теплопровідністю ТЕП (t / ρ<sub>m</sub>) і тепловим ефектом Джоуля (I<sup>2</sup> R<sub>ТЕП</sub>).

$$q_a = -\frac{\Delta T}{\rho_m} + \pm m \cdot T_a \cdot I + \frac{I^2 R_{ТЕП}}{2}$$

Потужність, що споживає ТЕП розраховується із залежності

$$P = V \cdot I = I \cdot (\pm m \cdot \Delta T \cdot I + R_{ТЕП} \cdot I),$$

де P – електрична потужність, яка споживається ТЕП

Коефіцієнт продуктивності COP характеризує ефективність роботи ТЕП

$$COP = q_a / P$$

Параметри α<sub>m</sub>, ρ<sub>ТЕП</sub> і R<sub>ТЕП</sub> можуть бути розраховані за даними технічного паспорту на ТЕП з використанням рівнянь.

$$R_m = \frac{V_{max}}{I_{max}} \cdot \frac{(T_e - \Delta T_{max})}{T_e},$$

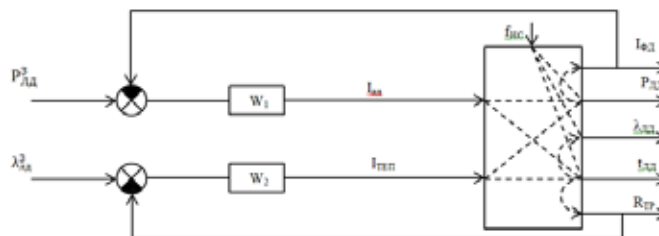
де I<sub>max</sub> – максимально допустимий струм; V<sub>max</sub> – напруга, яка виникає на термоелементі при I<sub>max</sub> ; ΔT<sub>max</sub> – максимально допустима різниця температур між холодною та гарячою стороною.

$$\dot{A}_{ТЕП} = \frac{\Delta T_{max}}{I_{max} \cdot V_{max}} \cdot \frac{2 \cdot T_e}{(T_e - \Delta T_{max})},$$

$$a_m = \frac{V_{max}}{T_e}.$$

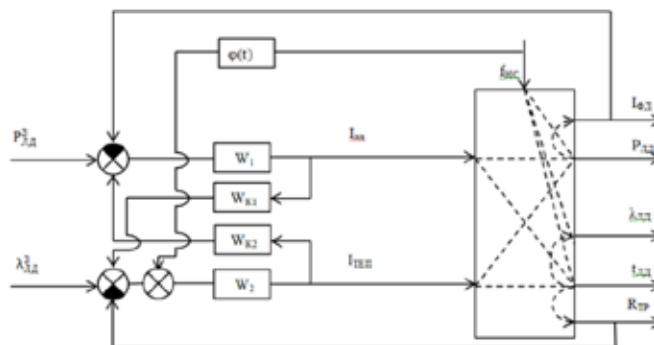
Коефіцієнти залежать від параметрів терморезистора і від діапазону температур в якому це рівняння дає достатню для практичного застосування точність..

Для керування лазерними випромінювачами при формуванні оптичних сигналів за технологією оптичного мультиплексування DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) застосовуються системи керування як потужністю так і довжиною хвилі випромінювання. При цьому керування довжиною хвилі випромінювання здійснюється скісно без безпосереднього вимірювання довжини хвилі – за опором терморезистора R<sub>тр</sub>, що вимірює температуру лазерного діода. Структурна схема такої «базової» САР представлена на рис. 5.



**Рис. 8.** Базова структура САК процесом формування випромінювання лазерним DFB-модулем, де W<sub>1</sub> – регулятор потужності випромінювання лазерного діода, W<sub>2</sub> – регулятор довжини хвилі лазерного діода, I<sub>ла</sub> – струм накачки лазерного діода (керуючий вплив зміни потужності випромінювання), I<sub>теп</sub> – струм термоелектричного перетворювача (керуючий вплив зміни довжини випромінювання)

Виходячи з того, що в об'єкті керування існують значні взаємні перехресні впливи між контурами керування потужністю та довжиною хвилі випромінювання, а також спостерігається досить суттєвий вплив температури навколишнього середовища підвищення динамічної точності системи керування можливе при її побудові на принципах інваріантності та автономності. Концептуальна структурна схема такої САК представлена на рисунку 6.



**Рис. 9. Структурна схема САК процесом формування випромінювання підвищеної динамічної точності, де  $W_1$  – регулятор потужності випромінювання,  $W_2$  – регулятор довжини хвилі випромінювання,  $W_{k1}, W_{k2}$  – корегувальні між регуляторні ланки,  $\phi(t)$  – корегувальна ланка компенсації збурень по температурі навколишнього середовища**

Інваріантність контуру регулювання довжини хвилі випромінювання від температури навколишнього середовища досягається за рахунок введення корегувального зв'язку  $\phi(t)$  в контур стабілізації температури ЛД, а автономність за рахунок введення між регуляторних корегувальних зв'язків [5].

**Висновки.** Можна сказати, що лазери в своїй різноманітності мають ряд характеристик, що робить їх досить унікальними. Таким чином слід виділити напівпровідникові лазери, діапазон дії яких базується на видимому та інфрачервоному спектрі. Їх відносно малий розмір дозволяє зменшити вагу та габарити пристроїв у яких їх можна використовувати. Якщо розглядати діодний лазер, як об'єкт керування, то можна сказати, що вони вимагають досить високої стабілізації температури. Така стабілізація є необхідною у результаті великої залежності його частоти випромінювання від температури. Підтримка необхідної частоти та інтенсивності когерентного випромінювання на виході лазера та температури відкриває широке застосування у багатьох сферах та пристроях.

#### Список використаної літератури

1. R. Palacios, A. Arenas, R. Rodríguez-Pecharrómán, F.L. Pagola, Analytical procedure to obtain internal parameters from performance curves of commercial thermoelectric modules, Applied Thermal Engineering (2009), doi: 10.1016/j.applthermaleng.2009.06.003
2. Belovski I. et al. Mathematical Model of Thermoelectric Peltier Module // Journal of Communication and Computer. – 2017. – Т. 14. – №. 2. – С. 60–64.
3. Похлебіна Н.О. Стан розвитку та шляхи удосконалення систем автоматичного керування параметрами випромінювання dfb лазерів / Похлебіна Н.О., Мазур О.В., Ковальчук Д.А. // Науково-періодичні видання ОНТУ (ONTU periodicals) Автоматизація технологічних та бізнес-процесів (Automation of technological and business processes) Том 12 № 2, 2020
4. Похлебіна Н. О. Автоматизація процесу формування випромінювання лазерними DFB-модулями: структурна та параметрична ідентифікація, концепція перспективної САК / Н. О. Похлебіна, О. В. Мазур // Інформаційні технології і автоматизація–2020 : зб. доп. XIII Міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 22–23 жовт. 2020 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій, Інститут комп'ютерних систем і технологій «Індустрія 4.0» ім. П. М. Платонова ; орг. ком.: Б. В. Єгоров (голова) та ін. – Одеса, 2020. – С. 132–135 : рис. – Бібліогр.: 7 назв.
5. Хобін В.А. – Конспект лекцій з курсу «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форми навчання. – Одеса: ОНАХТ, 2016. 96 с.
6. Хобін В.А. – Конспект лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форми навчання. – Одеса: ОНАХТ, 2012. Ч. 1. 112 с.
7. Хобін В.А. – Конспект лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форми навчання. – Одеса: ОНАХТ, 2019. Ч. 2. 72 с.
8. Й. Коэф, М. Фишер, М. Легге, Й. Сейферт, Р. Вернер – Лазеры с распределенными брэгговскими решетками на квантовых ямах, точках и с квантовыми каскадами.

9. Жмудь В.А. – Системы автоматического управления. прецизионное управление лазерным излучением, 2018.
10. Дураев В.П. – Источники оптического излучения. – В кн.: Волоконно-оптическая техника: История, достижения, перспективы: Сб. статей под ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. – М.: Изд. Connect, 2000.
11. Дураев В.П. – Полупроводниковые лазеры с волоконой брэгговской решеткой и узким спектром генерации на длинах волн 1530-1560 нм. – Квантовая электроника, 2001.
12. А.А. Вітров, канд. техн. наук; Д.А. Данилов; С.С. Єсіпов; С.С. Комісаров; М. Сергушичів, канд. техн. наук, Порівняння температурних і електричних методів управління довгій хвилі випромінювання напівпровідникових лазерів, «Оптичний журнал», 76, 8, 2009 р.
13. H. Suzuki et al. – IEEE Photon. Technol. Lett. 2000, v. 12, p. 903.
14. P. Werle. Diode-Laser Sensors for in-situ Gas Analysis. – In: Lasers in Environmental and Life Sciences – Modern Analytical Methods, Springer, Heidelberg, 2004, p. 223.
15. H. Kogelnik, C. Shank. – J. Appl. Phys., 1972, v. 43, p. 2327.
16. J. Whiteaway et al. – IEEE. J. Quantum Electron., 1992, v. 28, p. 1277.
17. G. Li et al. – Electron. Lett., 1992, v. 28, p. 1726.
18. HITRAN database: <http://cfa-www.harvard.edu/hitran>
19. F. Schaefer et al. – Appl. Phys. Lett., 1999, v. 74, p. 2915.
20. J. Faist et al. – Science, 1994, Issue 264, p. 553.

### References

1. R. Palacios, A. Arenas, R. Rodríguez-Pecharromán, F.L. Pagola, Analytical procedure to obtain internal parameters from performance curves of commercial thermoelectric modules, Applied Thermal Engineering (2009), doi: 10.1016/j.applthermaleng.2009.06.003
2. Belovski I. et al. Mathematical Model of Thermoelectric Peltier Module // Journal of Communication and Computer. – 2017. – Vol. 14. – No. 2. – pp. 60-64.
3. N.O. Pokhlebinina The state of development and ways of improving the systems of automatic control of radiation parameters of dfb lasers / N.O. Pokhlebinina, O.V. Mazur, D.A. Kovalchuk. // Scientific periodicals of ONTU (ONTU periodicals) Automation of technological and business processes (Automation of technological and business processes) Volume 12 No. 2, 2020
4. N.O. Pokhlebinina Automation of the process of radiation formation by laser DFB modules: structural and parametric identification, the concept of a promising SAC/N.O. Pokhlebinina, O. V. Mazur // Information technologies and automation-2020: coll. add. XIII International science and practice conference, Odesa, October 22–23. 2020 / Odessa. national Acad. food. of technologies, Institute of computer systems and technologies “Industry 4.0” named after P. M. Platonova; org. com.: B.V. Yegorov (chairman) and others. – Odesa, 2020. – pp. 132–135: fig. – Bibliography: 7 titles.
5. Khobin V.A. – Synopsis of lectures from the course “Identification and modeling of technological objects” for students studying in the specialty 151 “Automation and computer-integrated technologies” full-time and part-time. – Odesa: ONAKHT, 2016-96 p.
6. Khobin V. A. – Synopsis of lectures from the course “Theory of automatic control” for students studying in the specialty 151-“Automation and computer-integrated technologies” full-time and part-time. – Odesa: ONAKHT, 2012.-Part 1-112 p.
7. Hobin V. A. – Synopsis of lectures from the course “Theory of automatic control” for students studying in the specialty 151 “Automation and computer-integrated technologies” full-time and part-time. – Odesa: ONAKHT, 2019. Part 2. 72 p.
8. J. Koef, M. Fischer, M. Legge, J. Seifert, R. Werner – Lasers with distributed Bragg gratings on quantum wells, dots and with quantum cascades.
9. Zhmud V.A. – Automatic control systems. precision control of laser radiation, 2018.
10. Duraev V.P. – Sources of optical radiation. – In the book.: Fiber-optic technology: History, achievements, prospects: Sat. articles under the editorship of Dmitrieva S.A., Slepova N.N. – М.: Изд. Connect, 2000.
11. Duraev V.P. – Semiconductor lasers with a fiber Bragg grating and a narrow lasing spectrum at wavelengths of 1530–1560 nm. – Quantum electronics, 2001.
12. A. Vitrov, Candidate of Science technical sciences; D. A. Danilov; S. S. Yesipov; S. S. Komisarov; M. Sergushychiv, candidate technical Sciences, Comparison of temperature and electrical methods of controlling the long-wave emission of semiconductor lasers, “Optical journal”, 76, 8, 2009.
13. H. Suzuki et al. – IEEE Photon. Technol. Lett. 2000, v. 12, p. 903.
14. P. Werle. Diode-Laser Sensors for in-situ Gas Analysis. – In: Lasers in Environmental and Life Sciences – Modern Analytical Methods, Springer, Heidelberg, 2004, p. 223.
15. H. Kogelnik, C. Shank. – J. Appl. Phys., 1972, v. 43, p. 2327.
16. J. Whiteaway et al. – IEEE. J. Quantum Electron., 1992, v. 28, p. 1277.
17. G. Li et al. – Electron. Lett., 1992, v. 28, p. 1726.
18. HITRAN database: <http://cfa-www.harvard.edu/hitran>
19. F. Schaefer et al. – Appl. Phys. Lett., 1999, v. 74, p. 2915.
20. J. Faist et al. – Science, 1994, Issue 264, p. 553.