

УДК 621.382.8:519.6

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧИХ СТРУКТУР ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО АДАПТИВНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ

Сорокін В.М.¹, член-кореспондент НАН України, **Басок Б.І.²**, член-кореспондент НАН України, **Давиденко Б.В.³**, доктор технічних наук, **Пекур Д.В.⁴**, доктор філософії

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. М. Капніст 2а, м. Київ 03680, Україна

¹Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкар'єва НАН України, пр. Науки, 41, Київ, 03028, Україна, orcid.org/0000-0002-1499-1357, vsorokin@isp.kiev.ua

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, orcid.org/0000-0002-8935-4248, e-mail: borys.basok@gmail.com

³Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, orcid.org/0009-0003-5791-1980, e-mail: bdavydenko@ukr.net

⁴Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкар'єва НАН України, пр. Науки, 41, Київ, 03028, Україна, orcid.org/0000-0002-4342-5717, demid.pekur@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2025.2>

Резюме. У роботі розглянуто проблему визначення температури р–п переходу напівпровідникових світловиpromінюючих структур, яка суттєво впливає на світлотехнічні параметри, надійність і довговічність світлодіодних систем. Запропоновано два підходи усунення рекурентної залежності між тепловою потужністю та температурою – ітераційний метод з по-кроковим уточненням та апроксимаційний метод на основі поліномної моделі. Обидва методи забезпечують високу точність моделювання і можливість використання для оптимізації енергоефективних систем адаптивного охолодження світлодіодів.

Бібл. 14, рис. 2.

Ключові слова: світлодіод, р–п перехід, температура, енергоефективне охолодження, ітераційний метод, апроксимаційний метод.

Вступ

Розвиток енергоефективних систем освітлення тісно пов'язаний із широким впровадженням потужних світлодіодних технологій, які характеризуються високою світловою ефективністю, довговічністю та можливістю гнучкого керування світловими параметрами [1–3]. Проте одним із основних обмежень підвищення потужності та надійності, особливо у випадку потужних світлодіодних COB-модулів (Chip-on-board), є надмірне теплове навантаження на випромінюючі світло кристали світлодіодів та світлоконвертуючі матеріали, зокрема люмінофори, що використовуються в його структурі [4, 5]. Надмірне нагрівання призводить до зниження світлового потоку, зміни спектральних характеристик, прискореної деградації матеріалів і, як наслідок, скорочення ресурсу роботи освітлювального пристрою [6, 7].

Традиційні пасивні системи охолодження на основі алюмінієвих або мідних радіаторів ефективні лише за помірних теплових навантажень, але їхні розміри та маса зростають пропорційно до необхідної потужності тепловідведення. Значне покращення ефективності

тепловідведення досягається шляхом інтеграції у конструкції систем охолодження двофазних теплопередавальних пристроїв [8]. Водночас застосування активних методів, зокрема вентиляторного охолодження, в системах охолодження на основі теплових труб і рідинних контурів, забезпечує суттєве зростання інтенсивності тепловідведення [9, 10]. Однак така інтенсифікація супроводжується підвищеними вимогами до оптимізації енергоспоживання та мінімізації теплової інерційності системи, що зумовлює необхідність раціонального проектування та адаптивного керування режимами роботи активними компонентами системи охолодження. Проблема ускладнюється тим, що потужні світлодіодні прилади часто працюють у широкому діапазоні температур навколишнього середовища та піддаються змінним тепловим навантаженням. Особливу складність створює рекурентна залежність між температурою кристала та тепловою потужністю: температура визначає величину тепловиділення, а тепловиділення – температуру. Такий замкнений розрахунковий цикл не може бути розв'язаний без застосування спеціальних чисельних

або аналітичних методів, а неврахування таких залежностей призводить до виникнення додаткових похибок розрахунку. Для систем охолодження світлодіодів це означає неможливість точного прогнозування температурних режимів, що ускладнює забезпечення стабільних робочих параметрів. Реалізація адаптивного енергоефективного охолодження можлива лише за умови врахування взаємозалежності теплових і електрооптичних характеристик, які безпосередньо впливають на оптимізацію конструкції та підвищення надійності роботи освітлювальних систем.

Метою роботи є розроблення методів усунення рекурентної залежності температури світловипромінювальних кристалів світлодіодів, які забезпечують високу точність розрахунку та придатність до вирішення задач стабілізації світлового потоку й адаптивного тепловідведення. Запропоновано і використано два варіанти реалізації – ітераційний метод, який передбачає поетапне уточнення розрахункової температури р–п переходу до досягнення заданої збіжності та апроксимаційний метод, що базується на використанні поліномної моделі залежності теплової потужності від температури за результатами експериментальних або модельних даних. Обидва методи дозволяють підвищити точність теплових розрахунків, оптимізувати конструкцію систем охолодження потужних світлодіодів та підвищити надійність освітлювальних систем у реальних умовах експлуатації.

Постановка задачі

Електрична потужність, що підводиться до випромінюючих світло р–п переходів світлодіодів, частково перетворюється на світлове випромінювання, а решта – на теплоту, яка повинна бути відведена через систему охолодження. Величина кожного з цих складників залежить від температури р–п переходів T_j , що створює складну зворотну залежність у розрахунках при необхідності досягнення цільового світлового потоку системою освітлення.

Електрична потужність світлодіоду може бути визначена експериментально, а при проектуванні може бути визначена як:

$$P_{el}(T_j, \Phi) = U(T_j) \cdot I(T_j, \Phi), \quad (1)$$

де: T_j – температура р–п переходу, °С; $U(T_j)$ – функція температурної залежності робочої напруги, спад якої зі зростанням температури зумовлений термічним звуженням енергетичної забороненої зони

випромінюючого світла матеріалу; $I(T_j, \Phi)$ – функція температурної залежності робочого струму, величина якого визначається як температурними характеристиками світлодіоду, так і вимогами до підтримання заданого стабілізованого світлового потоку Φ (лм).

Оптична потужність, яка випромінюється, також є функцією температури та цільового світлового потоку $P_{opt}(T_j, \Phi)$, через зміну спектрального складу світла при зміні T_j та квантової ефективності, а отже і випромінюваної потужності, що зменшуються при нагріванні через зростання ймовірності безвипромінювальних процесів та зміщенню максимумів випромінювання. Залежності $P_{opt}(T_j, \Phi)$ та $P_{el}(T_j, \Phi)$ можуть бути визначені на основі експериментальних даних зокрема з використанням методів регресійного аналізу [11, 12].

Теплова потужність, яку необхідно відвести, визначається як:

$$P_{th} = P_{el} - P_{opt}, \quad (2)$$

тому визначивши експериментально $P_{opt}(T_j, \Phi)$ та $P_{el}(T_j, \Phi)$ можна встановити залежність для $P_{th}(T_j, \Phi)$. Теплова потужність $P_{th}(T_j, \Phi)$ відводиться через тепловий шлях «р–п перехід → корпус світлодіода → радіатор → навколишнє середовище». Кожна ділянка цього шляху характеризується власним тепловим опором: R_{jc} – тепловий опір між р–п переходом і корпусом (junction-to-case), який залежить від типу світлодіоду; R_{th} – тепловий опір між корпусом і навколишнім середовищем (case-to-ambient), який залежить від конструкції та ефективності системи охолодження освітлювального приладу.

Температура корпусу світлодіоду (T_c) визначається рівнянням:

$$T_c = T_{amb} + R_{th} \cdot P_{th}(T_j, \Phi), \quad (3)$$

де T_{amb} – температура навколишнього середовища.

Температура р–п переходу, у свою чергу, визначається як:

$$T_j = T_c + R_{jc} \cdot P_{th}(T_j, \Phi). \quad (4)$$

Підстановка (3) рівняння у (4) призводить до виразу:

$$T_j = T_{amb} + R_{th} \cdot P_{th}(T_j) + R_{jc} \cdot P_{th}(T_j, \Phi), \quad (5)$$

або, враховуючи сумарний тепловий опір $R_{\Sigma} = R_{th} + R_{jc}$, до виразу:

$$T_j = T_{amb} + R_{\Sigma} \cdot P_{th}(T_j, \Phi). \quad (6)$$

У цих виразах теплова потужність $P_{th}(T_j, \Phi)$ залежить від температури, яку необхідно знайти. Таким чином, утворюється рекурентна залежність, яка не може бути розв'язана прямим підрахунком без використання додаткових математичних методів.

Проблема ускладнюється тим, що залежність $P_{th}(T_j, \Phi)$ нелінійна та визначається як матеріальними властивостями напівпровідника, так і алгоритмом стабілізації світлового потоку. Це означає, що задача вимагає або чисельного наближення з ітераційною корекцією, або попередньої побудови аналітичної моделі залежності теплової потужності від температури.

В даній роботі пропонується визначення стаціонарного значення T_j , яке відповідає тепловому балансу при заданому світловому потоці Φ , що є вихідною точкою для подальшої оптимізації роботи активних компонентів систем охолодження. Для усунення рекурентної залежності та досягнення стабільного розв'язку застосовано два підходи: ітераційний метод, що базується на послідовному уточненні розрахункової температури з урахуванням теплових зворотних зв'язків, та апроксимаційний метод, який передбачає використання поліномної моделі залежності теплової потужності від температури.

Запропоновані методи дослідження

Ітераційний метод ґрунтується на послідовному уточненні температури р–п переходу, доки не буде досягнута збіжність до стаціонарного значення.

Вихідні дані для розрахунку: T_{amb} - температура навколишнього середовища, °С; R_{th} - тепловий опір між корпусом та навколишнім середовищем (визначається при експериментальних вимірюваннях); R_{jc} - тепловий опір між р–п переходом і корпусом (надається виробником); $P_{th}(T_j, \Phi)$ – залежності теплової потужності світлодіода від температури кристалу, що може бути визначена експериментально.

Математична постановка ітераційного процесу передбачає формалізований опис послідовності обчислювальних кроків, спрямованих на визначення температури р–п переходу світлодіода у випадках, коли теплова потужність, що розсіюється, є функцією тієї ж температури, а отже створює рекурентну залежність у рівняннях теплового балансу.

Узагальнено кроки такого алгоритму можуть бути описані наступним чином:

1. Задати початкове наближення температури корпусу:

$$T_c^{(0)} = T_{amb} + \Delta T_{init}$$

де ΔT_{init} – попередня оцінка перегріву (підвищення температури кристалу відносно температури T_{amb}).

2. Для n-ї ітерації:

2.1. Розрахувати температуру р–п переходу:

$$T_j^{(n)} = T_c^{(n)} + R_{jc} \cdot P_{th}^{(n)}$$

2.2. Оновити температуру корпусу:

$$T_c^{(n+1)} = T_{amb} + R_{th} \cdot P_{th}^{(n)}(T_j^{(n)}, \Phi)$$

3. Перевірити умову збіжності:

$$|T_c^{(n+1)} - T_c^{(n)}| < \varepsilon$$

де ε – допустима обрана похибка.

4. Якщо умова не виконується - перейти до кроку 2, збільшивши ΔT_{init} .

Перевагами ітераційного методу є його універсальність та здатність враховувати будь-які складні, зокрема нелінійні, залежності електричних і оптичних параметрів світлодіода від температури. Це робить метод придатним для розрахунків як у стаціонарних, так і в змінних режимах роботи, а також для моделювання нестандартних алгоритмів стабілізації світлового потоку. Його обчислювальна структура проста та добре адаптується для реалізації у поширених інженерних середовищах, що спрощує інтеграцію в процеси проектування й аналізу теплових режимів потужних світлодіодів.

Отримані результати

Для перевірки працездатності запропонованих методів було виконано моделювання теплових параметрів сучасного потужного СОВ-світлодіодного модуля максимальною електричною потужністю 240 Вт та максимальним робочим струмом 4,32 А [13] з корельованою колірною температурою 4000К та індексом кольоропередачі більшим 90 (тип CMU2287-0000-00PP0U0A40G). Поєднання наданої виробником інформації із значенням спектральної ефективності для

світлодіодів даного типу визначеним експериментально, яке становить ~ 325 лм/Вт [14], дало можливість здійснити повний цикл теплових розрахунків та побудувати апроксимаційні залежності. Використання цих даних забезпечило формування узгодженого набору залежностей між світловим потоком, тепловою потужністю та температурами корпусу, а використання типового значення теплового опору між корпусом та кристалом ($\sim 0,1$ Вт/К) дозволило розрахувати температуру р–n переходу.

На рис. 1 подано залежність теплової потужності від струму світлодіодного модуля. Точкові маркери відображають результати розрахунків, виконаних на основі даних, наданих виробником, що використовують залежність електрооптичних характеристик (напруги та світлового потоку) від робочого струму та температури. Криві відповідають апроксимації цих результатів методом квадратичної регресії. Як видно з наведених графіків, побудовані моделі з високою точністю відтворюють експериментально визначені залежності у всьому діапазоні робочих струмів. На основі цих експериментальних даних була побудована двозмінна квадратична апроксимаційна модель, яка відображає зміну теплової потужності, що виникає на світлодіодному модулі, від світлового потоку та температури р–n переходу:

$$P_{th}(T_j, \Phi) = 19.70 - 0.00219\Phi - 0.2080T_j + 8.28 \cdot 10^{-8}\Phi^2 + 1.86 \cdot 10^{-5}\Phi T_j + 4.90 \cdot 10^{-4}T_j^2, \quad (7)$$

На рис. 2 представлено залежність теплової потужності світлодіодного модуля від світлового потоку при різних температурах р–n переходу, що демонструє у випадку невеликих світлових потоків (10–15 тис. лм) різницю між значеннями для різних температур у 1–2 Вт, а у діапазоні 30–40 тис. лм підвищення T_j на кожні 20°C призводить до додаткових теплових втрат на рівні близько 10 Вт.

Для проведення верифікації теплових розрахунків було обрано режим роботи світлодіодного модуля при світловому потоці $\Phi = 30\,000$ лм, температурі навколишнього середовища $T_{amb} = 70^\circ\text{C}$, теплового опору між р–n переходом і корпусом дорівнює $R_{jc} = 0.1^\circ\text{C}/\text{Вт}$, а тепловий опір між корпусом і навколишнім середовищем становив $R_{th} = 0.2^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Еквівалентний тепловий опір системи визначається сумою цих двох складових: $R_{\Sigma} = R_{jc} + R_{th} = 0.3^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

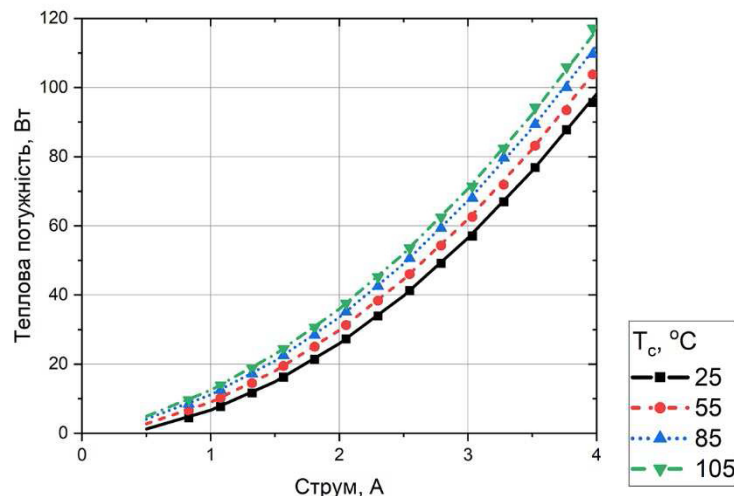


Рис. 1. Залежність теплової потужності світлодіодного модуля від робочого струму для різних температур корпусу: експериментальні дані, отримані на основі технічної документації виробника (позначені маркерами), та їх апроксимація (лінії)

Fig. 1. Dependence of the thermal power of an LED module on the operating current for different case temperatures (T_c): experimental data obtained from the manufacturer's technical documentation (marked with markers) and their approximation (lines)

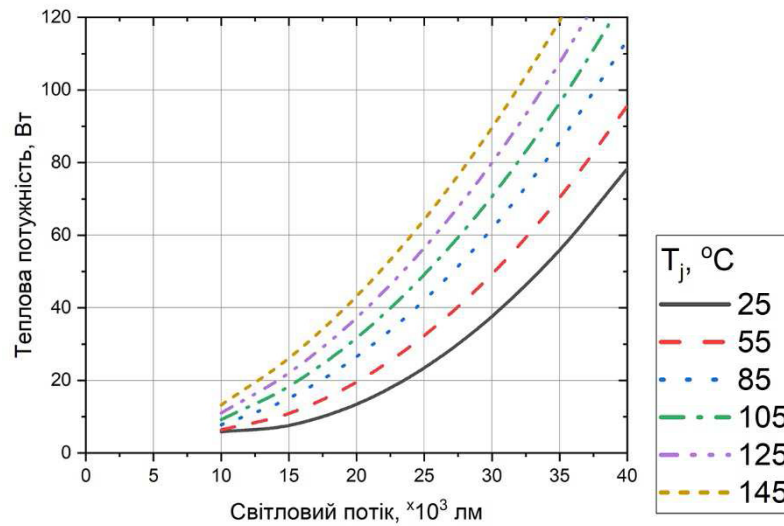


Рис. 2. Залежність теплової потужності світлодіодного модуля від світлового потоку при різних температурах випромінюючих світло p–n переходів світлодіодів апроксимовану квадратичною регресією (залежність 7)

Fig. 2. Dependence of the thermal power of an LED module on the luminous flux at different temperatures of light-emitting p–n junctions (T_j) of LEDs approximated by quadratic regression (dependence 7)

Оскільки теплова потужність P залежить від тієї ж температури T_j , яку необхідно знайти, рівняння теплового балансу має рекурентний характер. Для його розв'язання використовується послідовне ітераційне наближення. Початкове наближення приймається рівним температурі навколишнього середовища:

$$T_j^{(0)} = T_{\text{amb}} = 70^\circ\text{C}.$$

Використовується описаний вище ітераційний алгоритм з критерієм збіжності ε , який у даній роботі обраний $0,01^\circ\text{C}$.

При виконанні розробленого ітераційного алгоритму можуть бути записані такі результати на кожному кроці:

Ітерація 0: $T_j^{(0)} = 70^\circ\text{C}$, $P^{(0)} = 55,421$ Вт, $T_j^{(1)} = 86,626^\circ\text{C}$, $T_c^{(1)} = 81,084^\circ\text{C}$.

Ітерація 1: $T_j^{(1)} = 86,626^\circ\text{C}$, $P^{(1)} = 62,516$ Вт, $T_j^{(2)} = 88,755^\circ\text{C}$, $T_c^{(2)} = 82,503^\circ\text{C}$.

Ітерація 2: $T_j^{(2)} = 88,755^\circ\text{C}$, $P^{(2)} = 63,444$ Вт, $T_j^{(3)} = 89,033^\circ\text{C}$, $T_c^{(3)} = 82,689^\circ\text{C}$.

Ітерація 3: $T_j^{(2)} = 89,033^\circ\text{C}$, $P^{(2)} = 63,566$ Вт, $T_j^{(3)} = 89,070^\circ\text{C}$, $T_c^{(3)} = 82,713^\circ\text{C}$.

Ітерація 4: $T_j^{(2)} = 89,070^\circ\text{C}$, $P^{(2)} = 63,582$ Вт, $T_j^{(3)} = 89,078^\circ\text{C}$, $T_c^{(3)} = 82,716^\circ\text{C}$.

На цій ітерації різниця між сусідніми ітераціями менша за ε , що свідчить про досягнення збіжності, а отже про припинення роботи алгоритму. Таким чином визначена цим методом $T_j \approx 89,08^\circ\text{C}$.

В апроксимаційному методі рекурентна залежність між температурою T_j та тепловою потужністю P_{th} усувається шляхом попереднього визначення цієї залежності за експериментальними або модельними даними. На основі вимірювань або чисельних розрахунків формується набір пар (T_j, P_{th}) , що відображає поведінку світлодіода у заданих умовах.

Кроки такого алгоритму можуть бути описані наступним чином:

1. На основі вимірювань та розрахунків визначається набір трійок (T_j, Φ, P_{th}) .

2. Ці дані добре апроксимуються поліномом другого порядку:

$$P_{th}(T_j, \Phi) \approx a_0 + a_1 T_j + a_2 T_j^2 + a_3 T_j + a_4 \Phi + a_5 \Phi^2$$

3. Підставляючи цю залежність у рівняння теплового балансу:

$$T_j = T_{amb} + R_{\Sigma} \cdot P_{th}(T_j, \Phi)$$

отримуємо алгебраїчне рівняння, яке може бути розв'язано відносно T_j :

$$T_j = T_{amb} + R_{\Sigma} \cdot (a_0 + a_1 T_j + a_2 T_j^2 + a_3 T_j + a_4 \Phi + a_5 \Phi^2)$$

У результаті виконання такого алгоритму буде отримана залежність $T_j(T_{amb}, \Phi)$. Перевагами цього методу є висока швидкодія, яка робить його придатним для реалізації у мікроконтролерах та вбудованих системах реального часу, а також простота адаптації під різні моделі світлодіодів після проведення калібрування. Завдяки цьому метод легко інтегрується у системи стабілізації світлового потоку та адаптивного охолодження, де потрібні швидкі та стабільні розрахунки теплового стану.

У цьому підході рекурентна залежність між температурою переходу і тепловою потужністю усувається за рахунок попередньо визначеної апроксимаційної залежності $P(F, T)$. Вихідним є рівняння теплового балансу:

$$T_j = T_{amb} + R_{\Sigma} P(F, T_j).$$

Одержуємо алгебраїчне рівняння відносно температури T_j :

$$T_j = T_{amb} + R_{\Sigma} (19.70 - 0.00219\Phi - 0.2080T_j + 8.28 \cdot 10^{-8}\Phi^2 + 1.86 \cdot 10^{-5}\Phi T_j + 4.90 \cdot 10^{-4}T_j^2).$$

Після спрощення остаточне рівняння набуває компактного вигляду:

$$1.47 \cdot 10^{-4} T_j^2 - 0.895 T_j + 78.556 = 0.$$

Розв'язання цього рівняння дало два рішення, одіне з яких фізично некоректне ($T_j > 6000$ °C), а друге відповідає реальному стаціонарному стану: $T_j \approx 89.075$ °C.

Практичні рекомендації щодо застосування розроблених методів усунення рекурентності

Отримані результати показали високу збіжність ітераційного та аналітичного методів: різниця у визначенні температури р-п переходу, а отже і теплової потужності не перевищує десятих часток відсотка, що свідчить про високу узгодженість обчислень. Водночас ітераційний метод має важливу практичну перевагу – він не вимагає замкненої аналітичної форми функції $P_{th}(T_j, \Phi)$, а може ґрунтуватися безпосередньо на табличних даних, отриманих експериментально чи з технічної документації виробника. Це дозволяє застосовувати його у випадках, коли залежність між світловим потоком, тепловою потужністю та температурою задається лише дискретними точками, і робить метод особливо зручним для інженерних розрахунків у реальних умовах експлуатації світлодіодних систем.

Сукупність отриманих результатів засвідчила, що поєднання даних виробника та апроксимаційних моделей дозволяє достовірно описувати електрооптичні й теплові характеристики світлодіодів у широкому діапазоні робочих температур. Практичне значення такої верифікації полягає у можливості взаємодоповнюваного використання двох методів: ітераційний алгоритм доцільно застосовувати для дослідження складних динамічних режимів, тоді як аналітична апроксимація забезпечує швидкі оцінки та зручну інтеграцію у системи комп'ютерного проектування. Це створює надійну основу для подальших досліджень та оптимізації теплових режимів потужних світлодіодних систем освітлення.

Практичне застосування розроблених методів усунення рекурентної залежності температури світловипромінювального кристала світлодіодів передбачає вибір оптимального підходу залежно від умов експлуатації, доступних обчислювальних ресурсів та вимог до точності розрахунків. Ітераційний метод доцільно впроваджувати у випадках, коли є можливість використання потужних контролерів або комп'ютерних систем, а також

коли необхідно враховувати складні нелінійні залежності електричних і оптичних параметрів світлодіодів від температури. Натомість апроксимаційний метод найбільш ефективний для мікроконтролерних платформ з обмеженою обчислювальною потужністю, забезпечуючи високу швидкодію при достатній точності.

Важливим етапом підготовки до використання обох методів є калібрування та збір вхідних даних. Це передбачає проведення експериментальних вимірювань робочої напруги, струму та світлового потоку в широкому діапазоні температур. Для ітераційного підходу необхідно забезпечити наявність аналітичних або апроксимованих залежностей $P_{th}(T, \Phi)$, що дає змогу виконувати послідовні уточнення температури до досягнення заданої точності при цьому характер функції P_{th} не потребує встановлення. Для апроксимаційного методу формується набір трійок (T, Φ, P_{th}) , який апроксимується поліномом другого порядку з невеликою похибкою.

Реалізація алгоритмів у системах охолодження також має свою специфіку. В активних системах (вентилятори, термоелектричні модулі) обидва методи можна інтегрувати у контур адаптивного керування, що дозволяє стабілізувати температуру кристала та знижувати енергоспоживання під час часткових або пікових навантажень. У пасивних системах охолодження апроксимаційний метод забезпечує прогнозування пікових температур і необхідного теплового опору радіаторів без складних багаторазових розрахунків.

Використання описаних підходів у високоточних світлотехнічних системах – таких як медичне, лабораторне освітлення, машинне бачення чи оптичні вимірювальні комплекси – дозволяє забезпечити стабільність світлового потоку навіть за змінних умов навколишнього середовища. Це знижує коливання яскравості, які можуть негативно впливати на точність технологічних процесів та безпеку у транспортних системах.

Для серійного виробництва світлодіодних систем освітлення рекомендовано виконувати попереднє калібрування таких систем з урахуванням розбіжностей та зберігати у пам'яті контролера параметри апроксимаційних моделей для кожної серії світлодіодів. При цьому у недорогих бюджетних рішеннях можна застосовувати спрощені апроксимаційні методи, а у критично важливих системах – повноцінні ітераційні алгоритми з розширеними функціями контролю та діагностики.

Загальні результати та висновки

Показано шляхи вирішення проблеми рекурентної залежності між температурою світловипромінювальних кристалів світлодіодів та тепловою потужністю, що в них розсіюється. Така залежність є фундаментальною особливістю теплового балансу напівпровідникових випромінювачів і зумовлює необхідність використання спеціальних методів обчислення, які запобігають нескінченним ітераціям або суттєвим похибкам у прогнозуванні робочої температури. Запропоновано два методи вирішення цієї проблеми – ітераційний та апроксимаційний, які забезпечують високу точність і практичну придатність.

Застосування запропонованих методів дозволяє підвищити точність визначення температурного режиму роботи світлодіодів, що безпосередньо впливає на довговічність і стабільність їх світлотехнічних характеристик. Коректна оцінка температури р–п переходу дає змогу більш обґрунтовано визначати допустимі режими роботи потужних світлодіодних модулів, зменшувати ризик теплової деградації і підвищувати ресурс роботи світлодіодних систем освітлення на їх онові.

Використання розроблених методів у процесі проектування дозволяє оптимізувати конструкцію систем охолодження, зменшивши енергоспоживання допоміжних елементів, зокрема вентиляторів або термоелектричних модулів. Така оптимізація особливо важлива для потужних, компактних і автономних світлодіодних систем освітлення, де баланс між ефективністю охолодження та енергоспоживанням є критичним фактором.

Ітераційний метод забезпечує гнучкість у врахуванні складних, зокрема нелінійних, залежностей електрооптичних та теплових параметрів світлодіодів від температури. Його використання доцільне у випадках, коли потрібна висока точність моделювання та можливість роботи зі змінними режимами навантаження. Такий підхід дозволяє виконувати коректні розрахунки навіть за наявності нестандартних алгоритмів стабілізації світлового потоку.

Реалізація апроксимаційного методу при створенні систем освітлення дає змогу реалізувати ефективні алгоритми адаптивного охолодження в реальному часі, які запобігають перегріву світлодіодних структур під час пікових теплових навантажень і забезпечують стабільність температурного режиму. Це відкриває можливість інтеграції інтелектуальних функцій керування у освітлювальні системи, що працюють у технологічному обладнанні та/або в транспортних засобах і повинні забезпечувати стабільний вихідний світловий потік.

Таким чином, розроблені методи не лише усувають проблему рекурентності у розрахунках, але й створюють інженерні передумови для підвищення енергоефективності, надійності та стабільності сучасних світлодіодних систем освітлення.

Сприяння в створенні статті. Наведені підходи до теплофізичного моделювання взаємодії освітлення світлодіодними системами і системи їх теплового захисту і охолодження в частині методології проведення розрахунків відповідають змісту проєкту №2025.06/0054 «Поглинання та перешкоджання розповсюдженню електромагнітного випромінювання інфрачервоного діапазону та створення засобів для термомаскування» конкурсу Національного фонду досліджень України «Наука для зміцнення обороноздатності і національної безпеки України».

ЛІТЕРАТУРА

1. Weinold, M.P., Kolesnikov, S. & Anadón, L.D. Rapid technological progress in white light-emitting diodes and its source in innovation and technology spillovers. *Nat Energy* 10, 616–629 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41560-025-01757-1>
2. Héctor ChincheroHéctor ChincheroJ. Marcos AlonsoHugo OrtizHugo Ortiz A Review on Smart LED Lighting Systems. Conference: 2020 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC) November 2020 10.1109/IGESSC50231.2020.9285004
3. Gunjan BhartiyaPooja Pathak Pooja Pathak Intelligent Lighting Control and Energy Management System. Conference: 2020 International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC) February 2020 DOI: 10.1109/PARC49193.2020.236563
4. Singh, P., Tan, C. Degradation Physics of High Power LEDs in Outdoor Environment and the Role of Phosphor in the degradation process. *Sci Rep* 6, 24052 (2016). <https://doi.org/10.1038/srep24052>
5. Hong-Liang Ke, Lei Jing, Jian Hao, Qun Gao, Yao Wang, Xiao-xun Wang, Qiang Sun, and Zhi-Jun Xu, "Analysis of junction temperature and modification of luminous flux degradation for white LEDs in a thermal accelerated reliability test," *Appl. Opt.* 55, 5909-5916 (2016)
6. M.S. Ibrahim, Z. Jing, W.K.C. Yung, J. Fan, Bayesian based lifetime prediction for high-power white LEDs, *Expert Syst. Appl.* 185 (2021) 115627, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115627>.
7. J. Fan, K.-C. Yung, M. Pecht, Predicting long-term lumen maintenance life of LED light sources using a particle filter-based prognostic approach, *Expert Syst. Appl.* 42 (5) (2014) 2411–2420, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.10.021>.
8. D.V. Pekur, Y.E. Nikolaenko, V.M. Sorokin, Optimization of the cooling system design for a compact high-power LED luminaire, *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron.* 23 (1) (2020) 091–101, <https://doi.org/10.15407/spqeo23.01.091>.
9. Lin, X., Mo, S., Mo, B., Jia, L., Chen, Y., & Cheng, Z. (2020). Thermal management of high-power LED based on thermoelectric cooler and nanofluid-cooled microchannel heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 172, 115165. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115165>
10. Mrabet, B. (2025). Enhanced thermal management of High-Power LED headlights using Water-MWCNT nanofluid and Copper porous media. *Case Studies in Thermal Engineering*, 106781. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106781>
11. Masi F., Introduction to regression methods, in: *Introduction to Regression Methods* (2024) 31–92, <https://doi.org/10.1002/9781394325634.ch2>
12. Minyaylo A.M., Pekur D.V., Nikolaenko Yu.E., Kamuz O.M., The influence of temperature and current on the spectral and luminous characteristics of high-power LEDs. *SPQEO*. 2025. 26(3). In press.
13. <https://downloads.cree-led.com/files/ds/x/XLamp-CMU2287-Pro9.pdf>
14. D.V. Pekur, Yu.V. Kolomzarov, V.M. Sorokin, Yu.E. Nikolaenko. Super powerful LED luminaires with a high color rendering index for lighting systems with combined electric power supply. *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron.* 25 (1) (2022) 097-107. <https://doi.org/10.15407/spqeo25.01.097>

DETERMINATION OF THE TEMPERATURE OF SEMICONDUCTOR LIGHT-EMITTING STRUCTURES UNDER THE IMPLEMENTATION OF ENERGY-EFFICIENT ADAPTIVE COOLING

Sorokin V.M.¹, Basok B.I.², Davydenko B.V.³, Pekur D.V.⁴

¹Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 41 Nauky Ave., Kyiv, 03028, Ukraine, orcid.org/0000-0002-1499-1357, e-mail: vsorokin@isp.kiev.ua

²Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-8935-4248, e-mail: borys.basok@gmail.com

³Doctor of Technical Sciences, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0009-0003-5791-1980, e-mail: bdavydenko@ukr.net

⁴PhD, V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 41 Nauky Ave., Kyiv, 03028, Ukraine, orcid.org/0000-0002-4342-5717, e-mail: demid.pekur@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2025.2>

The paper addresses the problem of determining the p–n junction temperature of semiconductor light-emitting structures, which significantly affects the photometric parameters, reliability, and lifetime of LED systems. Two approaches are proposed to eliminate the recurrent dependence between thermal power and temperature: an iterative method with step-by-step refinement and an approximation method based on a polynomial model. Both methods ensure high modeling accuracy and can be applied to optimize energy-efficient adaptive cooling systems for LEDs.

References 14, figures 2.

Key words: HLED, p–n junction, temperature, energy-efficient cooling, iterative method, approximation method.

1. Weinold, M.P., Kolesnikov, S. & Anadón, L.D. Rapid technological progress in white light-emitting diodes and its source in innovation and technology spillovers. *Nat Energy* 10, 616–629 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41560-025-01757-1>

2. Héctor ChincheroHéctor ChincheroJ. Marcos AlonsoHugo OrtizHugo Ortiz A Review on Smart LED Lighting Systems. Conference: 2020 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC) November 2020 10.1109/IGESSC50231.2020.9285004

3. Gunjan BhartiyaPooja Pathak Pooja Pathak Intelligent Lighting Control and Energy Management System. Conference: 2020 International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC) February 2020 DOI: 10.1109/PARC49193.2020.236563

4. Singh, P., Tan, C. Degradation Physics of High Power LEDs in Outdoor Environment and the Role of Phosphor in the degradation process. *Sci Rep* 6, 24052 (2016). <https://doi.org/10.1038/srep24052>

5. Hong-Liang Ke, Lei Jing, Jian Hao, Qun Gao, Yao Wang, Xiao-xun Wang, Qiang Sun, and Zhi-Jun Xu, "Analysis of junction temperature and modification of luminous flux degradation for white LEDs in a thermal accelerated reliability test," *Appl. Opt.* 55, 5909–5916 (2016)

6. M.S. Ibrahim, Z. Jing, W.K.C. Yung, J. Fan, Bayesian based lifetime prediction for high-power white LEDs, *Expert Syst. Appl.* 185 (2021) 115627, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115627>.

7. J. Fan, K.-C. Yung, M. Pecht, Predicting long-term lumen maintenance life of LED light sources using a particle filter-based prognostic approach, *Expert Syst. Appl.* 42 (5) (2014) 2411–2420, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.10.021>.

8. D.V. Pekur, Y.E. Nikolaenko, V.M. Sorokin, Optimization of the cooling system design for a compact high-power LED luminaire, *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron.* 23 (1) (2020) 091–101, <https://doi.org/10.15407/spqeo23.01.091>.

9. Lin, X., Mo, S., Mo, B., Jia, L., Chen, Y., & Cheng, Z. (2020). Thermal management of high-power LED based on thermoelectric cooler and nanofluid-cooled microchannel heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 172, 115165. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115165>

10. Mrabet, B. (2025). Enhanced thermal management of High-Power LED headlights using Water-MWCNT nanofluid and Copper porous media. *Case Studies in Thermal Engineering*, 106781. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106781>

11. Masi F., Introduction to regression methods, in: *Introduction to Regression Methods* (2024) 31–92, <https://doi.org/10.1002/9781394325634.ch2>

12. *Minyaylo A.M., Pekur D.V., Nikolaenko Yu.E., Kamuz O.M.*, The influence of temperature and current on the spectral and luminous characteristics of high-power LEDs. SPQEO. 2025. 26(3). In press.

13. <https://downloads.cree-led.com/files/ds/x/XLamp-CMU2287-Pro9.pdf>

14. *D.V. Pekur, Yu.V. Kolomzarov, V.M. Sorokin, Yu.E. Nikolaenko*. Super powerful LED luminaires with a high color rendering index for lighting systems with combined electric power supply. Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron. 25 (1) (2022) 097-107. <https://doi.org/10.15407/spqeo25.01.097>

Отримано 06.09.2025

Received 06.09.2025

Прийнято до друку 04.11.2025

Accepted for publication 04.11.2025