

DOI: 10.63527/1607-8829-2026-1-67-75

Закордонець В.С. (<https://orcid.org/0000-0001-8190-448X>)

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

Corresponding author: Закордонець В.С., e-mail: wladim21@gmail.com

Охолодження світлодіодних модулів тепловими акумуляторами на основі фазоперехідних матеріалів

Метою роботи є розрахунок та створення безшумної, пасивної системи охолодження на основі фазоперехідних матеріалів здатної підтримувати температуру світлодіодних матриць в оптимальному діапазоні протягом тривалого часу. Принцип роботи системи базується на використанні прихованої теплоти плавлення робочої речовини і дозволяє досить жорстко зафіксувати температуру напівпровідникового джерела світла. Основною умовою її нормального функціонування є умова не перевищення температурою плавлення робочої речовини максимально допустимої температури світлодіодного елемента. В залежності від гранично допустимої температури охолоджуваних елементів в якості робочих речовин можуть використовуватися віск, парафін, гідрати солей, та ін. Недоліком фазоперехідних матеріалів є їх великий тепловий опір, який перешкоджає швидкому заряджанню і розряджанню теплового акумулятора. Для зменшення загального теплового опору робочої речовини ТА передбачена модульна конструкція, при якій акумулятор складається з кількох модулів, заповнених ФПМ з різною температурою плавлення. Визначальною особливістю системи стабілізації температури є незмінність температури робочої речовини в процесі плавлення, що призводить до незмінності температури активної зони СДМ. Системи термостабілізації на базі акумуляторів тепла мають важливу перевагу, зокрема, вони є автономними та незалежними від мінливих зовнішніх умов.

Ключові слова: світлодіодний модуль, світловий потік, тепловий акумулятор, фазоперехідні матеріали, тепловий опір, термостабілізація, тепловміст.

Постановка проблеми

Сучасні напівпровідникові освітлювальні прилади потребують стабілізації теплового режиму, оскільки майже 70% споживаної ними електричної потужності

Цитування: Закордонець В.С. (2026). Охолодження світлодіодних модулів тепловими акумуляторами на основі фазоперехідних матеріалів. *Термоелектрика*, (1), 67–75. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2026-1-67-75>

Отримано: 26.01.2026; Переглянуто: 27.02.2026; Опубліковано: 31.03.2026

© 2026 Автори. Це стаття з відкритим доступом, що розповсюджується відповідно до умов ліцензії Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

перетворюється в тепло. Для того, щоб світлодіодна матриця (СДМ) мала заявлені технічні характеристики необхідно забезпечити адекватний тепловий режим роботи. Як відомо [1, 2], при підвищенні температури активної зони СДМ на кожні 10°C світловий потік зменшується приблизно на 2.5%. Наприклад, якщо виробник вказує, що світловий потік матриці СХА1310 при температурі активної зони 25 °С складає, 1000 лм то при неякісному тепловідводі температура може збільшитися до 125 °С, а світловий потік зменшиться на 25 %. Крім того, висока температура експлуатації погіршує відразу кілька важливих параметрів – світловіддачу, колірну температуру, термін експлуатації, а в сукупності, економічну ефективність застосування напівпровідникових освітлювальних приладів.

Для охолодження сучасних потужних СДМ широко використовуються активні системи термостабілізації. В основі їх роботи лежить примусова циркуляція повітря або рідини в контурі. Однак, активне охолодження часто пов'язане з генерацією шуму. Електродвигуни вентиляторів і сам повітряний потік створюють акустичні коливання, які часто небажані. Крім того, вони потребують додаткового технічного обслуговування. Все це змушує шукати альтернативні системи термостабілізації.

Теплові трубки є одним з найбільш ефективних і безшумних методів відбору і переносу теплової енергії від напівпровідникових приладів, які працюють в обмеженому просторі [4–6]. Системи охолодження з тепловими трубками часто застосовуються в парі з повітряними радіаторами.

Термоелектрична система охолодження дає можливість зменшити температуру СДМ до значень нижчих ніж температура навколишнього середовища [7]. Це особливо актуально в умовах, коли температура середовища близька до критичної температури експлуатації світлодіодів матриці.

Аналіз відомих результатів досліджень

Найпростішими тепловими акумуляторами є металеві конструкції світлотехнічних апаратів, радіатори, кріпильні деталі, корпуси та ін. Такий метод охолодження та відбору тепла може бути використаний, якщо повна теплоємність конструкції достатня для термостабілізації режиму роботи. В іншому випадку необхідно збільшувати масу і об'єм конструкції, що не завжди можливо, а часто і не раціонально.

В останні роки значний інтерес викликає акумулювання теплової енергії при допомозі фазоперехідних матеріалів (ФПМ). Охолодження напівпровідникових освітлювальних приладів тепловими акумуляторами в яких використовуються матеріали з прихованою теплою фазового переходу забезпечує постійну температуру під час плавлення, та високу щільність її зберігання [8–10]. Це дозволить досить жорстко зафіксувати температуру світлодіодних елементів. Кількість тепла, поглинутого акумулятором залежить від питомої теплоти плавлення фазоперехідного матеріалу, його теплоємності, маси, та приросту температури.

Метою роботи є розрахунок та створення безшумної, пасивної системи охолодження на основі фазоперехідних матеріалів здатної підтримувати температуру світлодіодних елементів в оптимальному діапазоні протягом тривалого часу.

Конструкція та розрахунок теплового акумулятора

В процесі роботи СДМ генерується теплова потужність

$$P_t = (1 - \eta_e) \cdot U_f \cdot I_f, \quad (1)$$

де I_f та U_f прямиий струм та пряма напруга СДМ, η_e – квантова ефективність.

Виділене тепло передається матеріалу зі зміною фази, інтегрованому в ТА. Для забезпечення охолодження теплова потужність повинна повністю поглинатися тепловим акумулятором, в протилежному випадку стабілізація теплового режиму буде неможлива. Будемо вважати, що між контактною площадкою СДМ та колектором ТА існує ідеальний тепловий контакт, тоді

$$P_t = P_h, \quad (2)$$

де P_h потужність, яка поглинається акумулятором.

Процес поглинання тепла ФПМ відбувається при сталому тиску. При цьому, згідно із першим законом термодинаміки, кількість поглинутого тепловим акумулятором тепла можна представити у вигляді

$$\delta Q|_p = dU + p \cdot dV = d(U + p \cdot V) = dH, \quad (3)$$

де U – внутрішня енергія ФПМ, V – його об'єм, p – тиск,

$$H = U + p \cdot V, \quad (4)$$

H – ентальпія.

Ентальпія є ключовою термодинамічною функцією, яка описує тепловміст системи. Ентальпія досягає максимуму при ізохоричному процесі і дорівнює кількості тепла, яке поглинається акумулятором при первинному нагріванні, плавленні та вторинному нагріванні розплавленої робочої речовини. При цьому

$$\Delta H = Q_p. \quad (5)$$

Таким чином, зміна питомої ентальпії при нагріванні та плавленні робочої речовини є сумою трьох окремих процесів:

- нагрівання ФПМ від початкової температури T_a до температури плавлення;
- фазовий перехід при температурі плавлення;
- нагрівання ФПМ від температури плавлення до максимальної температури T_m .

$$\Delta h = \int_{T_a}^{T_f} c_s(T) \cdot dT + \lambda(T) + \int_{T_f}^{T_m} c_f(T) \cdot dT, \quad (6)$$

де $c_s(T)$ і $c_f(T)$ питома теплоємність робочої речовини в твердому і рідкому стані відповідно, $\lambda(T)$ – питома теплота плавлення. Оскільки вказані параметри слабо залежать від температури, то в подальших розрахунках будемо вважати їх постійними величинами.

В якості фазоперехідних матеріалів широко використовуються парафіни, жирні кислоти, гідрати солей та ін. Особливістю ФПМ є їх великий тепловий опір, який перешкоджає швидкому заряджанню і розряджанню теплового акумулятора. Для зменшення загального теплового опору робочої речовини ТА передбачена модульна конструкція, при якій акумулятор складається з кількох модулів, заповнених ФПМ з різною температурою плавлення.

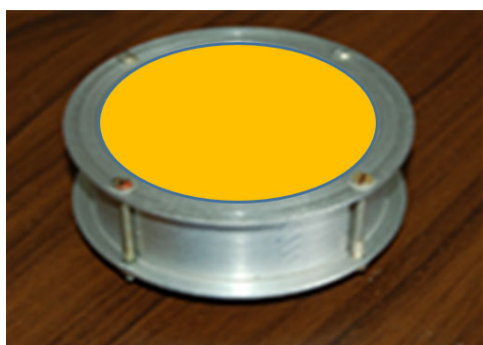


Рис. 1. Зовнішній вигляд модуля акумулятора тепла на ФПМ із СДМ (показаний без зовнішніх радіаторів)

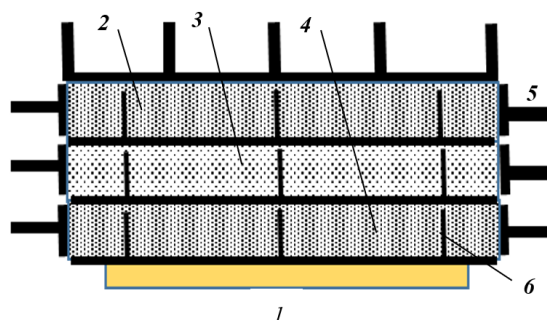


Рис. 2. Схематична будова акумулятора тепла. 1 – світлодіодна матриця, 2, 3, 4 – модулі з робочими речовинами, 5 і 6 – відповідно зовнішні і внутрішні радіатори

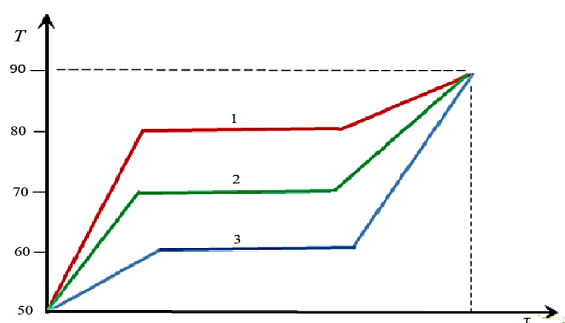


Рис. 3. Зміна температури фазоперехідного матеріалу при нагріванні твердої фази, плавленні і нагріванні рідкої фази.
1 – нафталін, 2 – стеаринова кислота, 3 – тригідрат ацетату натрію

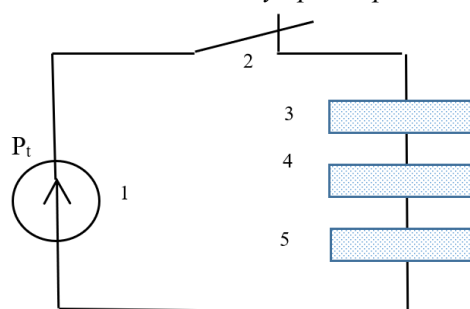


Рис. 4. Узагальнена модель теплового процесу системи охолодження СДМ.
1 – джерело тепла, 2 – ключ, 3, 4, 5 – теплові модулі

Для спрощення розрахунку будемо розглядати ідеалізовані фази стану плавлення ФПМ, які зображені на рисунку 3. Причому, температури плавлення ФПМ зменшуються в напрямку протилежному до градієнта температури і перпендикулярно до площини

поділу фаз. Кожен з модулів оснащений системою внутрішніх радіаторів (Рис. 2). Зважаючи на складність опису процесів плавлення (затвердіння) у взаємозв'язаній багатомодульній системі, кожен із модулів якої перебуває у стані фазового переходу, введемо спрощення:

1. Вважаємо, що в ТА одночасно здійснюється плавлення тільки в одному модулі.
2. Першою починає плавитися речовина, яка знаходиться в найближчому до джерела тепла модулі.
3. Після її повного розплавлення плавиться речовина, яка знаходиться в наступному модулі, і так аж до повного розплавлення у всіх модулях.
4. Тривалість роботи системи термостабілізації на основі ТА складається з часу, необхідного для прогрівання і повного розплавлення ФПМ у всіх модулях.
5. Аналіз буде проводитися в припущенні, що на плавлення ФПМ у кожному модулі витрачається вся теплота, яка надходить від джерела світла.

Для інтенсифікації теплообміну зовнішня поверхня ТА має ребра охолодження. Вважаємо, що ТА знаходиться в середовищі з постійною температурою T_a . Під час роботи основна частина тепла, яке генерується СДМ внаслідок процесу теплопровідності передається ФПМ де поглинається за рахунок прихованої теплоти плавлення. Знайдемо повну ентальпію теплового акумулятора

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n m_i \cdot h_i = \sum_{i=1}^n m_i \cdot [c_{si} \cdot (T_{si} - T_a) + \lambda_i + c_{fi} \cdot (T_m - T_{fi})], \quad (7)$$

де m_i – маса робочої речовини в i – тому модулі, n – кількість модулів. Для збільшення часу термостабілізації зовнішня поверхня ТА має ребра охолодження. Вважаємо, що ТА знаходиться в середовищі з постійною температурою T_a .

Мінімальний час дії системи охолодження τ_{\min} визначимо із рівняння теплового балансу

$$\Delta H = P_t \cdot \sum_{i=1}^n (\tau_{si} + \tau_i + \tau_{fi}) = P_t \cdot \tau_{\min}, \quad (8)$$

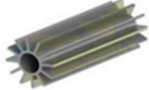



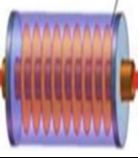
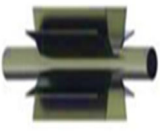
де $\tau_i = \tau_{si} + \tau_{\lambda i} + \tau_{fi}$, $\tau = \sum_{i=1}^n \tau_i \cdot \tau_{si}$ – час нагрівання від початкової температури до температури плавлення, $\tau_{\lambda i}$ – час плавлення, τ_{fi} – час нагрівання розплаву до граничної температури T_m в i – тому модулі. Звідки

$$\tau_{\min} = \frac{\Delta H}{P_t}, \quad (9)$$

Таким чином, мінімальний час дії системи термостабілізації визначається часом нагрівання та повного розплавлення робочої речовини у всіх модулях та тепловою потужністю світлодіодних елементів.

Таблиця 1

Деякі типи внутрішніх теплообмінних радіаторів

№	Радіатор	Тип ребра
1.		Радіальні
2.		Циліндричні
3.		Пластинчаті
4.		Штирьові
5.		Дискові
6.		Деревовидні

Числовий аналіз результатів Для проведення аналізу виберемо білий світлодіод середньої потужності СХА1310 з параметрами $U_f = 17.80\text{В}$, $I_f = 0.75\text{А}$, $\eta_e = 0.25$, та критичною температурою активної зони випромінювання $T_c = 125^\circ\text{С}$. При цьому, його потужність і світловий потік відповідно рівні $P = 13.35\text{Вт}$ і 1000лм . В якості наповнювача для першого модуля виберемо нафталін з параметрами: $T_{s1} = 80^\circ\text{С}$, $c_{s1} = 1.30 \cdot \text{кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}$, $c_{f1} = 1.70 \cdot \text{кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}$, $\lambda_1 = 152.2 \cdot \text{кДж} / \text{кг}$; для другого модуля – стеаринову кислоту з параметрами; $T_{s2} = 69.6^\circ\text{С}$, $c_{s2} = 1.76 \cdot \text{кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}$, $c_{f2} = 2.30 \cdot \text{кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}$, $\lambda_2 = 198.9 \cdot \text{кДж} / \text{кг}$; для третього – тригідрат ацетату натрію з параметрами: $T_{s3} = 58.0^\circ\text{С}$, $c_{s3} = 2.57 \cdot \text{кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}$, $c_{f3} = 4.88 \cdot \text{кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}$, $\lambda_3 = 280 \cdot \text{кДж} / \text{кг}$. Оскільки оптимальна температура для кристалів LED знаходиться в діапазоні $90\text{--}100^\circ\text{С}$, виберемо максимальну температуру ФПМ $T_m = 90^\circ\text{С}$. Нехай $m_1 = m_2 = m_3 = 0.4\text{ кг}$, а $T_a = 20^\circ\text{С}$. При вказаних параметрах загальна ентальпія

акумулятора на ФПМ складе $H = 556.4 \text{кДж}$ (для порівняння $H_{H_2O} = 220 \text{кДж}$), а мінімальний час стабілізації теплового режиму матриці СХА1310 складе 15.5 год.

Таблиця 2

Технічні характеристики деяких фазоперехідних матеріалів з високою питомою теплою плавлення

№	Фазоперехідний матеріал	Хімічна формула	Темп. плавл. °С	Питома теплоємн. тв. фаза (кДж/кг К)	Питома теплоємн. рідка фаза (кДж/кг К)	Питома теплота плавлення (кДж/кг)
1.	Глауберова сіль	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32.4	2.09	4.88	267
2.	Міристинова кислота	$\text{C}_{14}\text{H}_{28}\text{O}_2$	54.0–58.8	1.89	2.00	198.7
3.	Парафіновий віск	$\text{C}_{25}\text{H}_{52}$	55	2.14	2.90	200–220
4.	Тригідрат ацетату натрію	$\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	58	2.57	4.88	264–280
5.	Пальмінітова кислота	$\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$	62.9	1.81	2.64	163.9
6.	Стеаринова кислота	$\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$	69.6	1.76	2.30	198.9
7.	Нафталін	C_{10}H_8	80	1.30	1.70	152.2
8.	Натрій	Na	98	1.23	1.28	113
9.	Вода (для порівняння)	H_2O	0	4.18	4.20	333.5

Для отримання ефективної системи охолодження в електричну схему живлення СДМ необхідно ввести ключ, який буде відключати джерело тепла в момент, коли ФПМ в усіх модулях повністю розплавиться. Основною умовою її нормального функціонування є умова не перевищення температурою плавлення робочої речовини максимально допустимої температури світлодіодного елемента. Цей підхід є особливо актуальним для потужних світлодіодів або світильників, які працюють в повторно-періодичному режимі або в середовищах з обмеженим простором для традиційних радіаторів. Після вимкнення СДМ або зменшення його потужності (коли генерація тепла зменшиться), накопичене тепло поступово відводиться в навколишнє середовище, і акумулятор повертається у початковий стан, "перезаряджаючись" для наступного циклу роботи. Для інтенсифікації регенерації зовнішня поверхня ТА має ребра охолодження.

Висновки

Використання теплових акумуляторів з ФПМ дозволить жорстко зафіксувати температуру охолоджуваних світлодіодних елементів. Здатність теплового акумулятора

підтримувати температуру залежить від потужності світлодіодного пристрою, типу та кількості ФПМ. При тривалій безперервній роботі та при великій потужності світлодіодного елемента ТА потребуватиме допомоги радіаторів.

ФПМ необхідно підібрати під конкретні температурні умови. Системи термостабілізації на базі акумуляторів тепла з ФПМ мають важливу перевагу перед традиційними - теплоємнісними. Зокрема, вони мають в кілька разів більшу ентальпію та не залежать від мінливих зовнішніх температурних умов. ФПМ дозволять створити більш компактні системи охолодження, оскільки вони мають високу щільність накопичення теплової енергії на одиницю маси порівняно з традиційними матеріалами (наприклад, металами чи водою).

При збільшенні масогабаритних параметрів, тепловий акумулятор оснащений термоелектричним генератором може бути використаний в якості аварійного блоку живлення в місцях, де потрібне аварійне резервування [13].

Інформація про авторів

Закордонець В.С. – к.ф.-м.н., доцент.

Література

1. Yurtseven M.B., Mete S., Onaygil S. (2015). The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available, high-power, white LEDs. *Lighting Res. Technol.*, 48(8), 943–965.
2. Nazarenko L.A., Kolesnik A.I. (2021). *Physics and technology of LEDs: a textbook*. O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (NUUE).
3. Wu Y., Tang Y., Li Z. et al. (2016). Experimental investigation of a PCM-HP heat sink on its thermal performance and antithermal-shock capacity for high-power LEDs. *Appl. Therm. Eng.*, 108, 192–203.
4. Zakordonets V.S., Kutuzova N.V. (2018). Calculation of the LED cooling system based on a heat pipe. *J.Thermoelectricity*, 4, 60–67.
5. Levenberg V.D., Tkach M.R., Golstrem V.A. (1991). *Heat accumulation*. Kyiv: Tekhnika.
6. *A 3D numerical analysis using phase change material for cooling circular light emitting diode* (2023). M.B.B. Hamida, K. Hajlaoui, M.A. Almeshaal – Case Studies in Thermal, Elsevier.
7. Zakordonets V.S., Kutuzova N.V. (2018). Calculation of thermoelectric LED cooling system. *J.Thermoelectricity*, 5, 41–51
8. Iten M., Liu S. (2014). A work procedure of utilising PCMs as thermal storage systems based on air-TES systems. *Energy Conversion and Management*, 77, 608–627. doi: 10.1016/j.enconman.2013.10.012
9. Bahiraei F., Fartaj A., Nazri G.A. (2017). Experimental and numerical investigation on the performance of carbonbased nanoenhanced phase change materials for thermal

- management applications. *Energy Conversion and Management*, 153, 115–128. doi: 10.1016/j.enconman.2017.09.065
10. Li G., Hwang Y. (2012). Radermacher R. Review of cold storage materials for air conditioning application. *International Journal of Refrigeration*, 35 (8), 2053–2077.
 11. Veerakumar C., Sreekumar A. (2016). Phase change material based cold thermal energy storage: materials, techniques and applications – A review. *International Journal of Refrigeration*, 67, 271–289. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2015.12.005
 12. Zakordonets V.S., Kopcha O.Ya. (2024). System for stabilizing the temperature of LED arrays using thermal accumulators. *Proc. of VII International Scientific and Technical Conference of TNTU "Lighting and electrical energy: history, problems, prospects"* p. 26–27.
 13. Anatyshuk L.I. (1979). *Thermoelements and thermoelectric devices*. Kyiv: Naukova Dumka.

V.S. Zakordonets (<https://orcid.org/0000-0001-8190-448X>)

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

Cooling of LED Modules with Thermal Accumulators Based on Phase Change Materials

The purpose of this study is to design and develop a silent, passive cooling system based on phase change materials capable of maintaining the temperature of LED arrays within an optimal range for extended periods. The system operating principle utilizes the latent heat of fusion of the working substance and allows for the temperature of the semiconductor light source to be precisely fixed. The main condition for its normal functioning is that the melting point of the working substance does not exceed the maximum permissible temperature of the LED element. Depending on the maximum permissible temperature of the cooled elements, wax, paraffin, salt hydrates, etc. can be used as working substances. A disadvantage of phase change materials is their high thermal resistance, which hinders rapid charging and discharging of the thermal accumulator. To reduce the overall thermal resistance of the working substance, the thermal accumulator uses a modular design, in which the accumulator consists of several modules filled with phase change materials with different melting points. The defining feature of a temperature stabilization system is the constant temperature of the working substance during the melting process, which results in a constant temperature of the LED array active area. Thermal stabilization systems based on thermal accumulators offer a significant advantage: they are autonomous and independent of changing external conditions.

Keywords: LED module, luminous flux, thermal accumulator, phase change materials, thermal resistance, thermal stabilization, enthalpy.