

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(освітній (освітньо-кваліфікаційний) рівень)

на тему: **Стабілізація теплового режиму напівпровідникових джерел світла
термоелектричними модулями охолодження**

Виконав: студент VI курсу, групи ЕЕМЗ-61
напряму підготовки (спеціальності) 141
Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Гридовий В.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Закордонець В.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Вакуленко О.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Сіткар О.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

Кафедра Електричної інженерії

Освітній рівень магістр

Напрямок підготовки _____

(шифр і назва)

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри д.т.н., проф. М.Г. Тарасенко

«10» вересня 2019 р.

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Гридовому В.М.

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Стабілізація теплового режиму напівпровідникових джерел світла термоелектричними модулями охолодження

Керівник проекту (роботи) Закордонець В.С., к.ф.-м. н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом по університету від «23» серпня 2019 року № 4/7-731

2. Термін подання студентом проекту (роботи) 20 грудня 2019 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1. Аналітична частина

2. Науково-дослідна частина

3. Технологічна частина

4. Проектно-конструкторська частина

5. Спеціальна частина

6. Обґрунтування економічної ефективності

7. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

8. Екологія

Загальні висновки до дипломної роботи

Перелік посилань

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. _____ 1л. ф – А1

2. _____ 1л. ф – А1

3. _____ 1л. ф – А1

4. _____ 1л. ф – А1

5. _____ 1л. ф – А1

6. _____ 1л. ф – А1

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Обґрунтування економічної ефективності	Мельник Л. М. к.е.н., доцент		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Гурик О. Я. к.т.н., доцент		
	Стручок В. С. ст. викл.		
Екологія	Зварич Н. М. к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання **10 вересня 2019 року**

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вступ	15.09.2019	
2	Аналітична частина	25.09.2019	
3	Науково-дослідна частина	10.10.2019	
4	Технологічна частина	01.11.2019	
5	Проектно-конструкторська частина	20.11.2019	
6	Спеціальна частина	01.12.2019	
7	Обґрунтування економічної ефективності	10.12.2019	
8	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	10.12.2019	
9	Екологія	10.12.2019	
10	Висновки	15.12.2019	
11	Оформлення пояснювальної записки	20.12.2019	
12	Оформлення графічної частини	20.12.2019	

Студент _____

(підпис)

Гридовий В.М.. _____

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____

(підпис)

Закордонєць В.С. _____

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Гридовий В.М. Стабілізація теплового режиму напівпровідникових джерел світла термоелектричними модулями охолодження. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕЕМз 61. – Тернопіль.: ТНТУ, 2019.

Стор. – 101; рис. – 41; табл. – 17; посилань на першоджерела - 35.

В дипломній роботі побудовано теплову математичну модель світлодіодної матриці (СДМ), яка описує вплив основних параметрів: потужності, теплового опору системи охолодження, температури зовнішнього середовища на її тепловий режим. Розраховано температуру матриці з системою охолодження на базі локального радіатора та термоелектричного модуля охолодження (ТЕМО). Показано, що застосування ТЕМО дає можливість зменшити температуру матриці до значень нижчих ніж температура навколишнього середовища. Сформульовано рекомендації по збільшенню світлового потоку та світлової віддачі СДМ при одночасній стабілізації її теплового режиму.

Ключові слова: світлодіоди, енергетична ефективність, квантова ефективність, система охолодження, світловий потік, тепловий режим, тепловий опір.

ANNOTATION

V. Grydovyi. Stabilization of the thermal mode of semiconductor light sources by Thermoelectric Cooling Modules. 141 «Electrical energetics, electrical engineering and electromechanics». Ternopil Ivan Puluj National Technical University. Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering. Department of Electrical Engineering, group EEm-61. – Ternopil.: TNTU, 2019.

Pages – 101; Illustrations – 47; Tables – 19; Sources – 35.

In diploma paper is based on the thermal mathematical model of the LED matrix, which describes the influence of the main parameters: power, thermal resistance of the cooling system, ambient temperature on its thermal regime. The temperature of the matrix with cooling system based on local radiator and thermoelectric cooling module (TCM) was calculated. It is shown that the use of TCM makes it possible to reduce the temperature of the matrix to values lower than the ambient temperature. Recommendations for increasing the light flux and light output of the LED matrix are formulated while stabilizing its thermal regime.

Keywords: LEDs, energy efficiency, quantum efficiency, cooling system, light flux, thermal mode, thermal resistance.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	11
1.1 Освітлювальні світлодіоди	11
1.2 Світлодіодні матриці	13
1.3 Вплив температури на параметри світлодіодних матриць	18
1.4 Активні способи охолодження світлодіодних матриць	21
1.4.1 Охолодження активним радіатором	22
1.4.2 Охолодження за допомогою струменевої технології	23
1.4.3 Охолодження іонним вітром	25
1.4.4 Рідинне охолодження	25
1.4.5 Охолодження за допомогою теплових труб	26
2 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА	30
2.1 Розрахунок теплового режиму світлодіодних матриць	30
2.1.1 Поширення тепла в середовищі. Метод електротеплової аналогії	30
2.1.2 Розрахунок системи охолодження світлодіодної матриці на основі активного радіатора	33
2.2 Охолодження світлодіодних матриць термоелектричними модулями.	40
2.2.1 Основні співвідношення для розрахунку термоелектричного охолодження	40
2.2.2 Розрахунок системи охолодження світлодіодної матриці на основі термоелектричних модулів	43
2.3 Вплив охолодження на світловий потік світлодіодних матриць	51
3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	58
3.1 Термоелектричний модуль охолодження	58
3.2 Режими роботи термоелектричного модуля	60
3.3 Технічні характеристики сучасних термоелектричних модулів	62

4 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	64
4.1 Конструювання активних систем охолодження світлодіодних матриць	64
4.1.1 Системи охолодження на базі активних радіаторів	65
4.1.2 Системи охолодження на базі термоелектричних модулів	67
5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	71
5.1 Світлодіодні матриці для систем освітлення	71
5.2 Порівняльна характеристика світлодіодних матриць	72
6 ОБГРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ	80
6.1 Соціально-економічна ефективність нової техніки	80
6.2 Економічний ефект і строк окупності додаткових капіталовкладень в напівпровідникові системи освітлення	81
7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ..	85
7.1 Охорона праці	85
7.1.1 Інфрачервоне випромінювання та особливості його дії на організм людини	85
7.1.2 Дія електромагнітного випромінювання на організм людини	87
7.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях	90
7.2.1 Методи захисту світлотехнічної апаратури від дії електромагнітного імпульсу блискавок	90
8 ЕКОЛОГІЯ.	93
8.1 Джерела електромагнітних полів та методи зменшення їх впливу	93
8.2 Екологічний вплив електромагнітного опромінення на живі організми	96
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ	98
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	99

ВСТУП

Актуальність роботи Напівпровідникова світлотехніка є ефективною енергозберігаючою технологією, і протягом останніх років бурхливо розвивається практично у всіх країнах світу. Напівпровідникові джерела світла при однакових величинах світлового потоку споживають потужність в 10 раз меншу ніж лампи розжарювання і в 2 рази меншу ніж люмінесцентні лампи.

Незважаючи на високий *ККД* перетворення електричної енергії в світлову, близько 75% підведеної енергії перетворюється в теплову. Якщо її не відводити, то це спричинить надмірний нагрів джерела світла. Порушення його теплового режиму неминуче приведе до: зменшення світлового потоку, зменшення яскравості свічення, зменшення квантової ефективності, деградації світлових характеристик, зниження світлової проникності оптичної системи. В зв'язку із цим, особливої актуальності набуває забезпечення адекватного теплового режиму світлодіодних матриць. Для кардинального розв'язку цієї проблеми необхідно удосконалити якість матеріалу напівпровідникового матеріалу. В той же час, вдало сконструйований тепловідвід вже на сучасному етапі розвитку напівпровідникових технологій дозволить суттєво покращити експлуатаційні характеристики існуючих напівпровідникових джерел світла.

Мета роботи полягає у виявленні параметрів, які найбільше впливають на тепловий режим напівпровідникових джерел світла та підбір засобів для його стабілізації.

Об'єктом дослідження є світлодіодні матриці та охолоджувальні системи для них.

Предметом дослідження є світлодіодні матриці.

Наукова новизна отриманих результатів.

- Побудовано теплову математичну модель світлодіодної матриці, яка описує вплив основних параметрів: потужності, квантової ефективності, теплового опору охолоджувальної системи, температури зовнішнього середовища на її тепловий режим.

- Розраховано тепловий режим світлодіодної матриці з локальним радіатором.
- Розраховано тепловий режим світлодіодної матриці з термоелектричним модулем охолодження.
- Сформульовано рекомендації по збільшенню світлового потоку та світлової віддачі світлодіодної матриці при одночасній стабілізації її теплового режиму.

Практична цінність результатів дослідження.

- Запропоновано конструкцію світлодіодної лампи із системою охолодження на базі активного радіатора.
- Запропоновано конструкцію світлодіодної лампи із системою охолодження на базі термоелектричного модуля.
- Представлені результати дослідження, направлено на збільшення світлового потоку світлодіодних матриць при одночасній стабілізації їх теплового режиму.

Апробація. Основні результати роботи доповідались на VIII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів. «Актуальні задачі сучасних технологій», Тернопіль, ТНТУ, 28 – 29 листопада 2019 р.

Структура роботи. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 8 частин, висновків та переліку посилань. Обсяг розрахунково-пояснювальної записки –101 арк. формату А4.

Напівпровідникова світлотехніка є ефективною енергозберігаючою технологією, і протягом останніх років бурхливо розвивається практично у всіх країнах світу. Сьогодні існує безліч різних конструкцій світлодіодних ламп: з прихованим радіатором, з розсіювачем або без, з різним розташуванням і кількістю світлодіодів, проте найпростіша світлодіодна лампа складається з: світлодіода або світлодіодної матриці і радіатора охолодження. Основні параметри світлодіодної лампи визначаються, насамперед, характеристиками самих світлодіодів, їх розташуванням, ефективністю тепловідводу та якістю оптичної системи.

Потужні світлодіодні лампи при однакових величинах світлового потоку споживають потужність в 10 раз меншу ніж лампи розжарювання і в 2 рази меншу ніж люмінесцентні лампи. Термін експлуатації ламп розжарювання - 1000 годин, люмінесцентних - 5000 годин. Для порівняння, термін експлуатації світлодіодних ламп - від 50 до 100 тисяч годин.

Світлодіодні лампи є енергозберігаючими. Наприклад, за світловим потоком, світлодіодна лампа потужністю 5Вт може замінити лампу розжарювання потужністю 50Вт, споживаючи при цьому в 10 разів менше електроенергії. Якщо така лампа буде використовуватися хоча б з години на добу, то за рік лампа розжарювання витратить майже 54 кВт·год електроенергії, тоді як світлодіодна лампа тільки 5.4 кВт·год. Тому, коли ставиться питання про вибір кращого варіанту освітлення, в першу чергу розглядають їх енергоефективність.

Одна з найбільш масштабних областей застосування напівпровідникового освітлення – житлово-комунальне господарство. Напівпровідникове освітлення допоможе скоротити витрати на обслуговування, зменшити споживання електроенергії і попередити вандалізм в місцях які не охороняються.

Світлодіодні лампи мають наступні переваги в порівнянні з традиційними джерелами світла:

- зменшення енергоспоживання для загального освітлення в кілька разів;
- зменшення затрат на обслуговування в 4–5 разів за рахунок збільшення часу напрацювання до відмови до 50 000 годин;
- виключення негативного впливу на людину ультрафіолетового і електромагнітного випромінювань від засобів освітлення;
- електробезпека за рахунок переходу на низьку (менше 36 В) напругу вторинного живлення;
- екологічна чистота і безпека засобів освітлення.

На сьогодні в Україні до 25-30% валових енерговитрат припадає на різні види освітлення. Масове впровадження світлодіодних засобів освітлення може скоротити цей обсяг в 6÷8 разів. Це разом з кумулятивним ефектом може спричинити зростання ВВП на 1.5÷2%.

Сучасні світлодіоди мають ККД перетворення електричної енергії в світлову близький до 30%. Однак, майже 70% підведеної енергії перетворюється в тепло. Це приводить до надмірного нагріву напівпровідникового джерела світла. Порушення його теплового режиму зумовлює: зменшення світлового потоку, зменшення яскравості свічення, деградацію світлових характеристик, зниження світлової проникності оптичної системи. В зв'язку із сказаним особливої актуальності набуває забезпечення адекватного теплового режиму напівпровідникових джерел світла. Для кардинального розв'язку цієї проблеми необхідно удосконалювати якість матеріалу напівпровідникової гетероструктури. В той же час вдало сконструйований тепловідвід вже на сучасному етапі розвитку напівпровідникових технологій дозволить суттєво покращити експлуатаційні характеристики існуючих напівпровідникових джерел світла.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Освітлювальні світлодіоди

Застосування світлодіодних джерел світла може суттєво зменшити енергоспоживання освітлювальних систем [1-3]. Існує два основних типи освітлювальних світлодіодів: високої яскравості (НВ) та високої потужності (НР).

Світлодіоди високої яскравості можуть бути виготовлені в стандартному корпусі з виводами або в корпусі для поверхневого монтажу (SMD-світлодіоди). Надяскраві світлодіоди широко використовуються в усіх сферах життя: світлова реклама, дорожні світлофори і вказівники, автомобільна світлотехніка, екрани, мобільні телефони і т. п.



Рис. 1.1 - Монокристалльний НВ світлодіод потужністю 1Вт із світловим потоком 100 лм

Світлодіоди великої потужності – це надійні потужні пристрої, які здатні забезпечити потрібний рівень освітленості і мають світловий потік, який рівний або перевищує світловий потік традиційних джерел світла. Вони виготовляються з напівпровідникових кристалів розмірами 1×1 мм або $1,5 \times 1,5$ мм. Споживана потужність в номінальному режимі при струмі 350 мА складає порядка 1 Вт.[4,5] Можлива експлуатація і при струмах 500...700 мА. Світлодіод, при пропусканні через нього електричного струму випромінює некогерентне світло. Випромінюване світло традиційних світлодіодів лежить у вузькій ділянці спектру, а його колір залежить від хімічного складу використаного у світлодіоді напівпровідника. Сучасні світлодіоди можуть випромінювати світло від інфрачервоної ділянки спектру до ультрафіолетової. Існують методи розширення смуги випромінювання і створення білих світлодіодів.

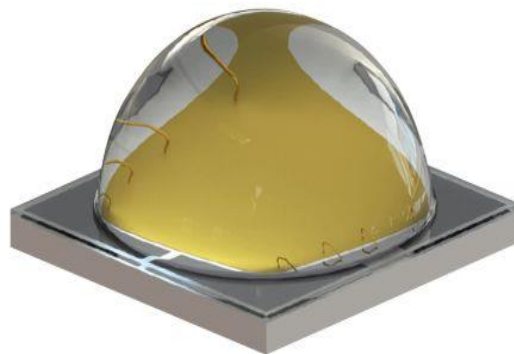


Рис. 1.2 - Монокристалльний HP світлодіод

GREE XQ-E потужністю 3 Вт із світловим потоком 334 Лм.

Не всі напівпровідникові матеріали ефективно випромінюють світло при рекомбінації. Добрими випромінювачами, як правило, є прямозонні напівпровідники типу $A^{III}B^V$ (наприклад, $GaAs$ або InP) і $A^{II}B^{VI}$ (наприклад, $ZnSe$ або $CdTe$). Варіюючи склад напівпровідників, можна створювати світлодіоди різних довжин хвиль, - від ультрафіолету (GaN) до середнього інфрачервоного діапазону (PbS).

В даний час напівпровідникових структур, які б випромінювали біле світло не існує. Випромінюване світло традиційних світлодіодів лежить у вузькій ділянці [спектру](#), а його колір залежить від хімічного складу використаного у світлодіоді

напівпровідника. Основою світлодіодів білого кольору свічення є структури на основі GaN, які випромінюють на частоті 470нм (синій колір) і нанесений зверху на неї люмінофор. Він випромінює в широкому діапазоні видимого спектру і має максимум в жовтій частині. Частково, випромінювання світлодіода потрапляє на люмінофор, формуючи вторинне випромінювання в жовто-помаранчевій області. Накладення двох випромінювань формує біле світло, колірна температура якого залежить від балансу між первинним і вторинним випромінюваннями. Однак люмінофор погіршує теплові характеристики світлодіода, тому його термін експлуатації скорочується.

1.2 Світлодіодні матриці

Зовсім недавно на ринку світлотехніки з'явилися нові ефективні і економні джерела світла – світлодіодні матриці [6,7]. Буквально за декілька років вони знайшли широке застосування в сфері зовнішнього освітлення та освітлення приміщень. Матриці надзвичайно економні і мають великий термін експлуатації. Наноструктурні технології, які використовуються для формування матриць, дозволяють отримувати потужні напівпровідникові джерела світла з рекордними характеристиками по світловіддачі. Фактично світ стоїть на порозі революційного перевороту в області світлотехніки, коли потужні білі світлодіодні матриці витіснять з області загального освітлення спочатку теплові джерела світла, а потім і люмінесцентні лампи.



Рис. 1.3 - Матриця нового покоління XLamp CMA

В порівнянні з традиційними джерелами світла світлодіодні матриці мають наступні переваги:

- Високу світлову віддачу. Сучасні світлодіоди зрівнялися за цим параметром з натрієвими газорозрядними і металогалогенними лампами, досягнувши 146 лм/Ват.

- Високу механічну міцність, вібростійкість (відсутність нитки розжарювання та інших чутливих складових).
- Тривалий термін служби - від 30000 до 100000 годин (при роботі 8 годин на день - 34 роки). Але і він не безмежний - при тривалій роботі і / або поганому охолодженні відбувається «деградація» кристала і поступове падіння яскравості.
- Кількість циклів включення-виключення не чинять істотного впливу на термін служби світлодіодів (на відміну від традиційних джерел світла - ламп розжарювання, газорозрядних ламп).
- Спектр сучасних білих світлодіодів буває різним - від теплого білого з колірною температурою 2700 К до холодного білого – 6500. Спектральна чистота, досягається не фільтрами, а принципом дії приладу.
- Відсутність інерційності - вмикається відразу на повну яскравість, в той час як у ртутно-фосфорних ламп час включення від 1 с до 1 хв., а яскравість збільшується від 30% до 100% за 3-10 хвилин, в залежності від температури навколишнього середовища.
- Різний кут випромінювання - від 15 до 180 градусів.
- Низьку вартість індикаторних світлодіодів.
- Безпеку в користуванні - не потрібні високі напруги.
- Низьку температуру поверхні світлодіода, зазвичай не вище 60°C.
- Нечутливість до низьких і дуже низьких температур. Однак, високі температури протипоказані світлодіоду, як і будь-яким іншому напівпровідниковому приладу.
- Екологічність - відсутність ртуті, фосфору і ультрафіолетового випромінювання на відміну від люмінесцентних ламп.

Світлодіодні матриці являють собою збірки [8,9] з декількох кристалів в одному блоці. Кристали покриті люмінофором, і для оптимізації споживаних струмів з'єднані послідовно-паралельно. Плоска поверхня блоку являє собою прозоре пластикове покриття, яке дозволяє встановити додаткову оптику для створення необхідної діаграми розсіювання світла. Матриці забезпечуються товстою мідною або алюмінієвою підкладкою з кріпильними отворами для монтажу блоку на тепловідвід. Гладка поверхня підкладки забезпечує надійний тепловий контакт блоку з тепловідводом. Монтаж слід робити обережно, щоб не деформувати і не пошкодити корпус. На всю поверхню підкладки слід нанести шар теплопровідної пасти або припою. Матриці випускаються на різну номінальну потужність, аж до 300 ват і більше. Принципово немає обмежень на розмір матриць. Усереднене значення робочої напруги для одного кристалу складає близько 3.4 вольт, а сила струму близько 350 міліампер. Застосування радіатора з запасом по площі – найкраща страховка для тривалої, надійної і безвідмовної роботи світлодіодної матриці.

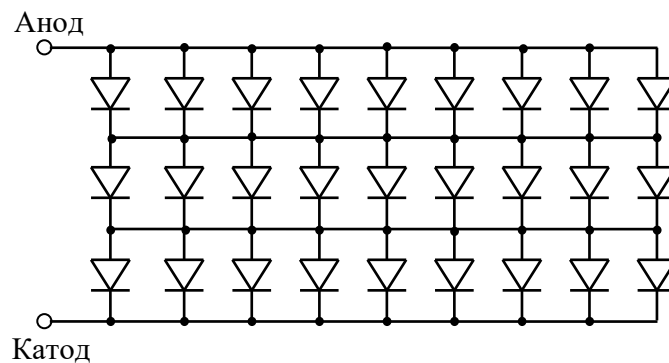


Рис. 1.4 - Послідовно-паралельне з'єднання світлодіодів в світлодіодній матриці

Якщо обмежити струм через кристал до 320 міліампер, світловий потік зменшиться на 3-5%, але при цьому тривалість життя світлодіодного кристала збільшується на порядок, практично умови його електропостачання будуть ідеальними. В останні роки з'явилася тенденція деякого охолодження розробників до перегонів щодо отримання світлодіодів з найбільшим світловим потоком і найбільшим показником світлової ефективності (лм/Вт). На сьогоднішній день практично всі провідні виробники і навіть деякі з виробників «другого ешелону»

вже наблизилися до деяких граничних показників вище яких підніматися вже немає економічної доцільності. Виявилось, що для кінцевих споживачів важливіші інші показники: споживач платить за світло, а не за лампу чи вмонтовані в нього світлодіоди. Те, що потрібно кінцевому користувачеві - якісне світло при мінімальній вартості світильника. Відповідно, виробники світлодіодних компонентів зміщують акцент в бік комплексного поліпшення всіх характеристик: підвищення надійності та збільшення терміну служби, підвищенню щільності світлового потоку при зменшенні площі компоненту (і відповідного зменшення потрібної площі друкованої плати, розмірів вторинної оптики та тепловідвідних радіаторів), підвищення якості випромінюваного світла (індекс кольоропередачі). При цьому важливими є також зручність форм-факторів для монтажу чи демонтажу, однорідність компонентів та інших параметрів - все, що в кінцевому підсумку допоможе створити оптимальний набір характеристик для кінцевого споживача. Нові матриці XLamp CMA повністю сумісні з форм-фактором матриць XLamp CXA2, при тому, що густина світлового потоку збільшена до 2,5 разів.

Таблиця 1.1 - Зразки сучасних потужних матриць

	XLamp CMA1516	XLamp CMA1825	XLamp CMA1840	XLamp CMA2550	XLamp CMA3090
Розмір, мм	15.85 x 15.85	17.85 x 17.85	17.85 x 17.85	23.85 x 23.85	27.35 x 27.35
Макс. струм драйвера, А	1.05 А	1.6 А	2.3 А	3.3 А	3.6 (48 V), 2.4 (72 V)
Макс. потужність, Вт	41 W	61 W	87 W	122 W	174 W
Светловий потік, лм	1,400 – 4,800 lm	2,150 – 7,300 lm	3,300 – 10,300 lm	4,400 – 15,000 lm	7,300 – 21,700 lm
Діаметр випромінюючої поверхні	9 mm	9 mm	14 mm	19 mm	23 mm
Кут випромінювання	115 °				

Матриці розміщуються на алюмінієвій основі, що дозволяє монтувати їх безпосередньо на радіатор, фіксуючи притискними гвинтами. Це значно спрощує конструкцію світильників і зменшує їх вартість.

Таблиця 1.2 - Характеристики теплопровідних матеріалів

Теплопровідний матеріал	Переваги	Недоліки
Термопаста	Велика об'ємна теплопровідність, мала товщина шару клею, низка в'язкість, не твердне	Вважається досить брудним при виробництві
Матеріали із зміною фази	Велика в'язкість дає більшу надійність в порівнянні з термопастами, зручніша в користуванні, нема розшарування	В порівнянні з термопастами нижча теплопровідність, поверхневий опір може бути більшим, ніж у термопаст, для збільшення ефективності необхідно прикласти тиск.
Гелі	Добре заповнюють нерівності поверхні	В порівнянні з термопастами нижча теплопровідність, слабше зчеплення, ніж у термоклей
Термоклей	Добре заповнюють нерівності поверхні	Необхідний процес очищення

Ефективність світлодіодних матриць проявляється найбільше там, де потрібно виробляти потужні кольорові світлові потоки (світлові сигнали). Світло від лампи розжарювання доводиться пропускати через спеціальні оптичні фільтри, що виділяють певну частину спектру (червону, синю, зелену). В результаті майже 90% енергії світлового потоку лампи втрачається. Більше того, близько 80-90% споживаної потужності лампи розжарення, витрачається на її нагрів. У світлодіоді 100% випромінювання є забарвленим світлом і в застосуванні світлофільтра, немає потреби.

Світлодіодні матриці є енергоощадними та споживають від 30% до 60% потужності, необхідної для звичайних ламп розжарювання, аналогічної яскравості та станом на 2019 рік, мають високий індекс передавання кольору. Основна проблема при створенні потужних світлодіодних матриць – ефективність перетворення електричної енергії в світлову. Вона визначається зовнішньою квантовою ефективністю

$$\eta_e = \gamma \eta_i \eta_o, \quad (1.1)$$

де γ – коефіцієнт інжекції електрон-діркових пар в активну зону світлодіода, $\eta_i = R_r/R$ – внутрішня квантова ефективність гетеропереходу (теоретично вона може бути близькою до 1), R_r і R – інтенсивності рекомбінації електрон-діркових пар з випромінюванням кванта світла і без випромінювання відповідно, η_o – коефіцієнт виходу світла в зовнішнє середовище.

Сучасні світлодіодні матриці мають ККД близький до 25÷30%.

1.3. Вплив температури на параметри світлодіодних матриць.

При проходженні струму через світлодіод його активна зона нагрівається внаслідок нагріву струмом провідності пасивних областей гетероструктури а також внаслідок безвипромінювальної рекомбінації електрон-діркових пар на дефектах гетероструктури [10,11]. Для збільшення світлового потоку світлодіоду потрібно збільшувати кількість електрон-діркових пар, які рекомбінують в одиницю часу в його активній зоні. Це легко зробити збільшуючи величину струму через гетероперехід. Однак, збільшення величини струму приводить до збільшення інтенсивності рекомбінації електрон-діркових пар на дефектах кристалічної ґратки, до зменшення квантової ефективності світлодіода і до збільшення теплових втрат. Сучасні світлодіоди мають *ККД* перетворення електричної енергії в світлову близький до 30%. Таким чином, майже 70% підведеної енергії перетворюється в тепло. Якщо теплову енергію не відводити, то це спричинить надмірний нагрів гетеропереходу світлодіоду. Збільшення температури гетеропереходу зменшує яскравість свічення і світловий потік. На рисунку зображено залежність величини відносного світлового потоку від температури для світлодіодів компанії CREE. Як видно із графіка, із збільшенням температури переходу світлодіода величина світлового потоку зменшується. Порушення теплового режиму (як правило це робота з температурою гетеропереходу більшою ніж 120...125°C) спричиняє деградацію світлових характеристик світлодіодної лампи. Зміна характеристик люмінофору приводить до зміщення робочої довжини хвилі що негативно впливає на якість кольоропередачі СД [13,14]. У приладів ряду виробників додатково знижується показник світлової проникності оптичної системи. В результаті цього зменшується довговічність світлодіодної лампи - один з основних показників, що вигідно відрізняє її від традиційних джерел світла. Світлова віддача поступово знижується. За визначенням, після того як вона досягне 50% від початкового значення, очікуваний термін служби світлодіода збігає.

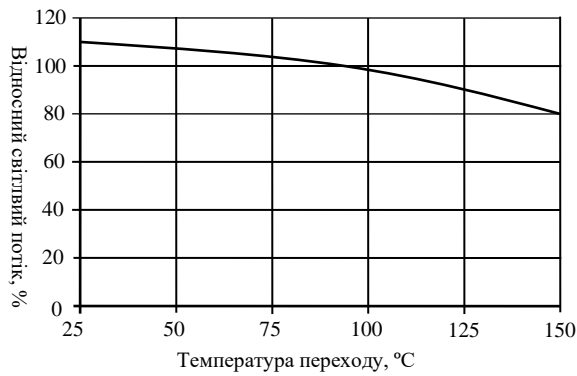


Рис. 1.5 - Залежність відносного світлового потоку від температури для світлодіода серії MKR

Із збільшенням температури зменшується і величина прямого падіння напруги на світлодіоді. Величина зміни напруги залежить від конкретної моделі. У таблиці 1 наведені значення коефіцієнтів залежності напруги від температури для серій світлодіодів MKR і MKR2. Важливо брати до уваги значення даного параметра і вибрати драйвер для освітлювальної системи так, щоб він міг забезпечувати необхідну напругу у всьому робочому діапазоні температур світлодіода.

Таблиця 1.3 - Величини коефіцієнтів залежності напруги від температури для світлодіодів серії MKR і MKR2

Назва	Коефіцієнт залежності напруги від температури, мВ/°C
MKR	-7
MKR2	-28

В зв'язку із сказаним особливої актуальності набуває забезпечення адекватного теплового режиму світлодіода. Для кардинального розв'язку цієї проблеми необхідно удосконалювати якість матеріалу світлодіодної гетероструктури. В той же час вдало сконструйований тепловідвід вже на сучасному етапі розвитку напівпровідникових технологій дозволить суттєво покращити експлуатаційні характеристики існуючих СД. При цьому важливо забезпечувати якісні теплові контакти між всіма ланками тепловідводу.

Для створення якісного теплового контакту між світлодіодом і радіатором або між друкованою платою і радіатором необхідні спеціальні теплопровідні

матеріали. Крім створення надійного теплового контакту, деякі теплопровідні матеріали, в залежності від дизайну охолоджуючої системи, можуть виконувати й інші функції, такі як ізоляція електричних вузлів схеми або створення механічного кріплення. Нижче в таблиці представлені характеристики основних теплопровідних матеріалів. При виборі теплопровідного матеріалу необхідно врахувати не тільки величину теплопровідності, але і багато інших параметрів. Часто не беруть до уваги товщину клейового шару матеріалу. Але як впливає з формули, наведеної нижче, тепловий опір безпосередньо залежить від цього параметра. Виробники теплопровідних матеріалів надають інформацію про основні параметри в документації, і для правильного вибору теплопровідного матеріалу дуже важливо розуміти вплив кожного з цих параметрів на роботу системи охолодження в цілому. Іноді більш тонкий клейовий шар з поганим значенням теплопровідності має більш низький тепловий опір в порівнянні з більш товстим шаром, але з кращою теплопровідністю. Обидві ці умови необхідно враховувати при виборі матеріалів.

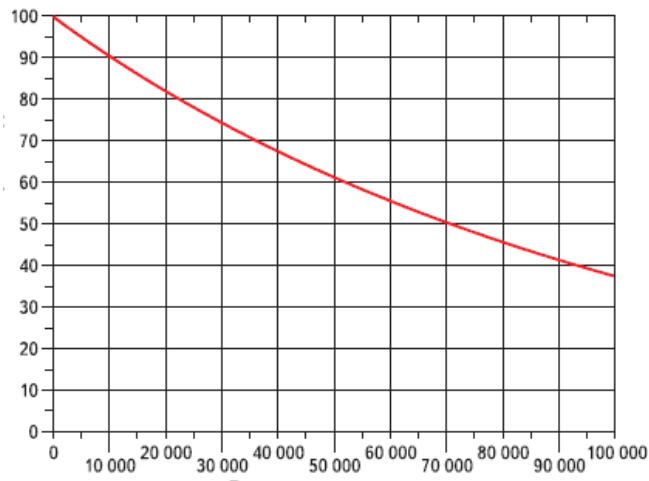


Рис. 1.6 - Залежність відносного світлового потоку від терміну експлуатації світлодіода.

1.4. Активні способи охолодження світлодіодних матриць

Нагрів буде тим більшим, чим більшою буде потужність світлодіода. Якщо для відводу тепла пасивного охолодження недостатньо, то використовують активне охолодження [15-17]. Існує безліч варіантів активного охолодження - від

вентиляторів [17] до водяного охолодження [18]. Якщо застосування активного охолодження неминуче, слід врахувати те, що світлодіоди можуть працювати протягом десятків тисяч годин. Тому слід передбачити наявність системи захисту світлодіодів від перегріву в разі виходу з ладу пристроїв активного охолодження. Інакше їх вихід з ладу практично відразу ж спричинить вихід з ладу світлодіодів через перегрів. Крім терміну експлуатації вентилятора важливими його параметрами є: ефективність, надійність, низький рівень шуму, ціна, зручність обслуговування, споживана потужність.



1.4.1 Охолодження активним радіатором

При розсіюванні потужностей більших за 15÷20 Вт або при необхідності оптимізації розмірів тепловідведення застосовується активний радіатор [18]. Це радіатор із закріпленим на ньому механічним приводом, який забезпечує примусову вентиляцію. При збільшенні швидкості потоку повітря між поверхнями і ребрами радіатора теплообмін суттєво інтенсифікується, а термічний опір охолоджувальної системи істотно зменшується. Це забезпечує еквівалентне охолодження СД при значно менших масо-габаритних показниках. При цьому енергоспоживання всієї системи, включаючи механічний привід, зростає незначно, як правило, не більше ніж на 10%. Широко поширені активні радіатори з інтегрованими в них вентиляторами.

Промисловість виробляє велику кількість вентиляторів для систем охолодження світлодіодних світильників. Вони забезпечують термін служби в десятки тисяч годин в різних кліматичних умовах і при доволі динамічно високих рівнях запиленості та забруднення повітря. Однак, вентиляторне охолодження пов'язане з шумом. Електродвигун і сам вентилятор створюють звукові хвилі, які небажані в багатьох випадках. Наприклад, при освітленні житлових приміщень, концертних залів, учбових аудиторій і т.п. Проте, в даний час існує ряд методів =ентіяції, які передбачають використання низькооборотних електродвигунів на радіаторі з використанням спеціального кронштейна оснащеного гумовими опорами [20-22]. Гумове кріплення послаблює механічний зв'язок, перешкоджає поширенню звукових хвиль і зменшує шум.)



Рис. 1.7 - Радіатор з вентилятором

1.4.2. Охолодження за допомогою струменевої технології

Охолодження при допомозі вентилятора порівняно недороге, але з огляду на генерацію звукового шуму має обмежене використання. Для подолання даного недоліку і ще більшого зниження розмірів тепловідведення була розроблена струменева технологія обдуву радіатора. Наприклад, розроблені компанією Nuventix струменеві системи охолодження світлодіодів SynJet [25,26].

Принцип роботи вентиляторів SynJet базується на поступально-поворотному коливанні мембрани, яка втягує порції повітря, а потім викидає їх через сопла в вигляді імпульсних турбулентних струменів. Імпульсні струмені відштовхують гаряче повітря від радіаторних пластин забезпечуючи ефективне охолодження радіатора. Порожнина в яку засмоктується зовнішнє повітря, герметична, і механізм, що приводить в рух мембрану захищений від пилу і вологи. Перевага охолоджувальної системи SynJet перед вентиляторами полягає у відсутності деталей, що труться, що сприяє довговічності механізму. Система охолодження SynJet при малих розмірах і низькому рівні генерації шуму забезпечує зниження теплового опору радіатора до $0,75 \div 2,67$ К/Вт.



Рис. 1.8. Зовнішній вигляд охолоджувальної системи SynJet

Альтернативою охолоджувальній системі SynJet може стати п'єзоелектрична система охолодження [27-29]. В ній, для створення пульсуючих потоків повітря використовуються гнучкі біморфні коливальні пластини на п'єзоелектричних приводах - п'єзоактиватори. Такі пристрої ще раніше набули поширення в системах охолодження НВІС і потужних тепловиділяючих напівпровідникових приладах. Одним з піонерів, що освоїли виробництво п'єзоактиваторів є японська компанія Murata. Більш потужні пристрої кілька років назад вивела на ринок і компанія General Electric. Тепер приводи на пластинчастих коливальних контурах з п'єзоактиваторами використовуються і для обдуву радіаторів світлодіодних світильників. Термін роботи п'єзоприводів

більше 20 років. Пристрої працюють від джерела напруги 5В або 12В і забезпечують охолодження НПДС потужністю до 110 Вт. Їх енергоспоживання в рази нижче в порівнянні з вентиляторами. Значно нижчий і шум, що виникає при їх роботі. Система охолодження з п'єзоприводом компанії Nuventix - R150 - забезпечує скорочення споживання енергії для метал-галогідних освітлювачів з таким же світловим потоком на 30%. Крім того вона на 40% менша і на 60% легша в порівнянні з системами охолодження на базі пасивних радіаторів.

1.4.3 Охолодження іонним вітром

Перспективним підходом в системах охолодження НПДС є використання іонного вітру. Створення пристінкового потоку повітря, стимульованого високою напругою, дозволяє на десятки відсотків інтенсифікувати, при незначних енергетичних витратах, процес охолодження. В окремих випадках, для світлодіодних джерел малої і середньої потужності, використання іонного вітру є достатнім для значного скорочення масогабаритних характеристик радіаторів. Ці рішення є дуже привабливими для автономних систем з гарантовано великим терміном служби, оскільки такі пристрої створення повітряного потоку не містять схильних до зносу рухомих частин і, безумовно, зможуть забезпечити тривалий термін експлуатації. Компанії Thorm Micro Technologies вдалося створити прототип охолоджуючого пристрою, яке має високу продуктивність і не має механічних рухомих частин [30].

Іонний кулер являє собою циліндричні ґрати і натягнуті поверх них оголені дроти. Потік вільних електронів в хмарі іонної плазми прямує до ґрат і захоплює за собою молекули повітря. Швидкість повітряного потоку, створюваного пристроєм, досягає 2.4 м/с. За допомогою такого кулера, об'єм якого менший одного кубічного сантиметра, можна охолодити елемент, що виділяє 25 Вт тепла.

1.4.4 Рідинне охолодження

Для розсіювання потужностей що вимірюються десятками і сотнями ват використовують рідинне охолодження. Настільки потужні теплові навантаження можуть виникати у відеопроєкторах, прожекторах, спеціальній світлосигнальній і освітлювальній апаратурі. Для ефективного відводу тепла тут необхідно

використовувати радіатори з тепловим опором, що становить десяті і соті долі вата. Домогтися такого малого теплового опору дозволяють рідинні охолоджувачі. Процес рідинного охолодження полягає в відводі зайвого тепла від робочого тіла за допомогою контакту з циркулюючою охолоджуючою рідиною. Рідина-теплоносій циркулює по герметичному контуру, нагріваючись від джерела тепла і остигаючи в охолоджувальному контурі (охолоджувачі).



Рис. 1.9 - Зовнішній вигляд рідинного охолоджувача.

В якості робочої рідини найчастіше використовується дистильована вода, але також застосовуються іноді масло, антифриз, рідкий метал, та інші спеціальні рідини. Рідинна система охолодження забезпечує зниження теплового опору до 0,05...0,1 К/Вт. Недоліком рідинної системи охолодження є її громіздкість і труднощі пов'язані з інсталяцією в освітлювальну систему.

1.4.5. Охолодження за допомогою теплових трубок

Тенденція з використанням теплових трубок в системах світлодіодного освітлення виникла не так давно і в даний час активно розвивається [30]. Це пов'язано як із зростанням потужності світлодіодних джерел так і з боротьбою за підвищення ефективності систем охолодження. Так, компанія 1-АСТ (США), успішно просуває рішення щодо застосування для охолодження НПДС разом з тепловими трубками активних радіаторів.

Застосування теплових трубок в радіаторах відкриває великі можливості пов'язані з використанням віддалених радіаторів, із застосуванням для цих цілей оточуючих конструктивних елементів, з використанням прилеглих каналів вентиляції і кондиціонування повітря, рідинних і газових трубопроводів і т.д. Наведені нижче на малюнках ілюстрації показують зниження температури під світлодіодним джерелом на 8 °С при застосуванні в конструкції радіатора теплової труби, а також можливість застосування віддаленого радіатора і транспортування теплового потоку за допомогою теплової трубки.

Теплові трубки широко використовуються в якості базового елемента систем автоматичної терморегуляції електронних пристроїв. Наприклад, для охолодження центрального процесора в ком'ютері. До основних переваг теплових трубок, в порівнянні з традиційними елементами теплопередаючих систем, відносяться:

- простота конструкції;
- відсутність рухомих деталей і безшумність роботи;
- малі масогабаритні характеристики;
- відсутність витрат енергії на переміщення теплоносія;
- надійність роботи;
- висока еквівалентна теплопровідність.

Теплові трубки мають відносно великий діапазон робочих температур, і ресурс роботи більше 20000 годин, що робить їх високоефективною і надійною технічною системою.

У конструкції Nuventix R150-170 є ще одна інновація: в ньому застосовуються теплові трубки для більш ефективного розподілу теплового потоку.



Рис. 1.10 - Зовнішній вигляд охолоджувальної системи світлодіоду з тепловими трубками

Висновки до першого розділу

1. На сьогодні в Україні до 25-30% валових енерговитрат припадає на різні види освітлення. Тому, масове впровадження напівпровідникових джерел світла може скоротити цей обсяг в 6÷8 разів. Це разом з непрямими ефектами може посприяти збільшенню ВВП держави на 1.5÷2%.
2. В сучасних світлодіодних матрицях ефективність перетворення електричної енергії в світлову складає близько 25%.
3. Майже 75% підведеної до світлодіодної матриці енергії перетворюється в тепло. Якщо теплову енергію не відводити, це спричинить надмірний нагрів приладу.
4. Порушення теплового режиму приводить до: зменшення яскравості свічення; зменшення світлового потоку; деградації світлових характеристик; зниження показника світлової проникності оптичної системи матриці; зменшення терміну експлуатації.

2 НАУКОВО ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

2.1. Розрахунок теплового режиму світлодіодних матриць

2.1.1 Поширення тепла в середовищі. Метод електротеплової аналогії

Існує три основних способи поширення тепла в середовищі: конвекція, кондукція (теплопровідність) і випромінювання. Теплова енергія, яка виділяється при роботі напівпровідникового джерела світла (НПДС) шляхом кондукції передається радіатору, а далі шляхом конвекції і випромінювання середовищу. Для діапазону температур, в якому працюють НПДС, впливом теплового випромінювання на охолодження нагрітого радіатора можна знехтувати. Конвекція, це передача тепла за рахунок руху потоків рідин або газів. Зазвичай в світлодіодних світильниках це передача тепла від радіатора в навколишнє середовище (як правило в повітря).

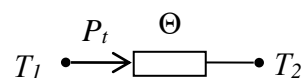
Розрахунок температури активної зони НПДС можна здійснити використовуючи принцип електротеплової аналогії. Він базується на формальній подібності рівнянь електропровідності і теплопровідності [23,24]. На підставі принципу електротеплової аналогії процес теплопередачі може бути представлений тепловою схемою, елементами якої є джерела і приймачі теплової енергії та теплові опори (провідності). Кожному вузлу теплової схеми ставиться у відповідність певна температура T . Змінні величини в тепловій схемі (теплові потоки і перепади температур) підпадають під дію законів Ома і Кірхгофа для теплових схем. Формально вони аналогічні законам Ома і Кірхгофа для електричних кіл. На підставі цих законів теплові схеми можуть бути перетворені і спрощені.

Для потоку тепла який прямує від ділянки кола з температурою T_1 до ділянки з температурою T_2 справедливий закон Ома

$$P_t = \frac{\Delta T}{\Theta}, \quad (2.1)$$

де - $\Delta T = T_1 - T_2$ – різниця температур між кінцями,

Θ – тепловий опір ділянки.



Величину теплового опору матеріалу через який внаслідок його теплопровідності проходить тепловий потік визначають співвідношенням:

$$\Theta = \frac{1}{\kappa} \frac{\Delta l}{\Delta S}, \quad (2.2)$$

де κ - питомий коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

ΔS і Δl - площа поперечного перерізу і товщина матеріалу відповідно.

Для перепаду температури між кінцями кількох послідовно з'єднаних віток справедливий другий закон Кірхгофа

$$T_1 - T_2 = \Delta T = \sum_{i=1}^n \Delta T_i, \quad (2.3)$$

де

$$\Delta T_i = \Theta_i P_t,$$

- перепад температури на i – тій вітці.

Очевидно, що сумарний тепловий опір послідовно з'єднаних віток

$$\Theta = \sum_{i=1}^n \Theta_i \quad (2.4)$$

де

$$\Theta_i = \frac{1}{\kappa} \frac{\Delta l_i}{\Delta S_i},$$

-тепловий опір i – тої вітки.

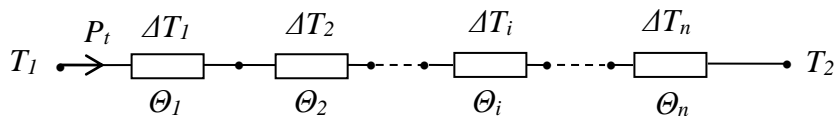


Рис. 2.1 - Теплова схема послідовного з'єднання елементів

Для потоку тепла який прямує від ділянки кола з температурою T_1 до ділянки з температурою T_2 по кількох вітках справедливий перший закон Кірхгофа для теплових потоків:

$$P_t = \sum_{i=1}^n P_{ii}, \quad (2.5)$$

де тепловий потік в i -тій вітці

$$P_{ii} = \frac{\Delta T}{\Theta_i}. \quad (2.6)$$

Очевидно, що тепловий опір паралельно з'єднаних віток

$$\Theta = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\Theta_i} \right)^{-1}. \quad (2.7)$$

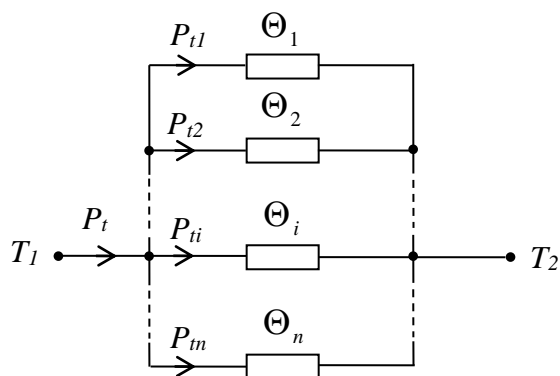


Рис. 2.2 - Теплова схема паралельного з'єднання елементів

Потік тепла, розсіяного за допомогою конвекції, можна розрахувати за формулою:

$$P_c = \alpha S \Delta T, \quad (2.8)$$

де: α – конвективний коефіцієнт теплообміну з навколишнім середовищем;

S - площа поверхні радіатора;

ΔT - різниця температур між температурою радіатора і температурою середовища.

Величина теплового опору теплообміну з середовищем через конвекцію визначається співвідношенням:

$$\Theta_c = \frac{1}{\alpha \Delta S}, \quad (2.9)$$

Загальний тепловий опір радіатора можна звести до двох складових: кондукційної, яка визначається теплопровідністю радіатора, і конвекційної, яка визначається теплорозсіюючою здатністю поверхні радіатора.

Основна проблема в підрахунку потоку тепла, розсіяного за допомогою конвекції, це визначення коефіцієнта α . Коефіцієнт конвекційного теплообміну залежить від багатьох чинників, в тому числі і від розташування охолоджуючої поверхні. Для плоскої поверхні радіатора, орієнтованої горизонтально нагрітою поверхнею вгору

$$\alpha = 1.3A \frac{\sqrt[4]{T_r - T_a}}{h} \quad (2.10)$$

Для плоскої поверхні радіатора, орієнтованої вертикально

$$\alpha = A \frac{\sqrt[4]{T_r - T_a}}{h} \quad (2.11)$$

Значення коефіцієнта α може значно змінюватися, в залежності від геометрії радіатора, граничних умов і інших параметрів. Наприклад, при природній конвекції коефіцієнт α знаходиться в межах $5 \div 20$ Вт/(м²·К). Для систем з примусовою конвекцією коефіцієнт теплообміну може досягати значень 100 Вт/(м²·К) при повітряному охолодженні і до 1000 Вт/(м²·К) - при рідинному. Для світлодіодів невеликої потужності зазвичай використовується природне повітряне охолодження. Для розрахунків таких систем значення коефіцієнта теплообміну приймають рівним 10 Вт/(м²·К).

2.1.2 Розрахунок системи охолодження світлодіодної матриці на основі активного радіатора

Світлодіодна матриця, перетворює в світло лише частину підведеної електричної енергії. Компанія CREE в документі «XLampThermalManagement» рекомендує вважати, що в світлову енергію перетворюється тільки 25% споживаної потужності. Це означає, що як мінімум 75% енергії перетвориться в тепло. Для забезпечення теплового режиму матриці її необхідно охолоджувати. [18] Розглянемо найбільш поширену конструкцію системи охолодження світлодіодної матриці, в якій тепло розсіюється в навколишнє середовище при допомозі радіатора.

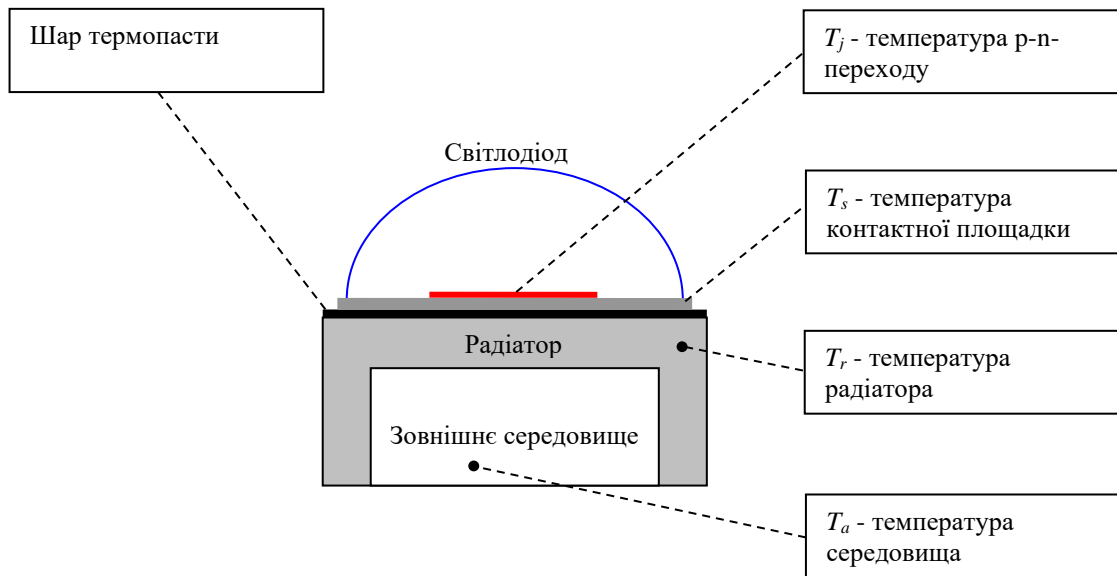


Рис. 2.3 - Схематичне зображення системи охолодження світлодіодної матриці з системою охолодження на основі локального радіатора

Теплова схема кола може бути представлена трьома ділянками, кожна з яких характеризується своїм тепловим опором.

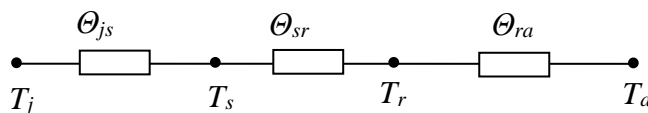


Рис. 2.4 - Теплова схема системи охолодження світлодіодної матриці на основі локального радіатора.

θ_{js} - тепловий опір р-п-перехід-контактна площадка,

θ_{sr} - тепловий опір контактна площадка – радіатор,

θ_{ra} - тепловий опір радіатор – навколишнє середовище.

Для світлодіодних матриць найбільш важливою характеристикою є тепловий опір між р-п-переходами і контактною площадкою θ_{js} . Його величина завжди вказується у технічній документації на прилад. Якщо світлодіодна матриця встановлюється на радіатор, то в тепловій схемі послідовно з θ_{js} вмикаються теплові опори між контактною площадкою і радіатором θ_{sr} , та

радіатором і навколишнім середовищем θ_{ra} (рис. 2.4). При цьому, загальний тепловий опір системи охолодження визначається співвідношенням:

$$\Theta_{ja} = \Theta_{js} + \Theta_{sr} + \Theta_{ra}, \quad (2.12)$$

Тепловий опір між *p-n* переходом та контактною площадкою світлодіода вказується в документації на прилад і визначається його внутрішньою конструкцією та матеріалом напівпровідникового пристрою. Для світлодіодних матриць середньої і великої потужності величина Θ_{js} коливається в межах від 2К/Вт до 0.1К/Вт.

Тепловий опір між контактною площадкою світлодіодної матриці і радіатором визначається якістю теплового контакту (притискний контакт, пайка, теплопровідні клеї і пасти та ін.).

Таблиця 2.1 - Теплопровідність теплоізоляційних матеріалів

Матеріал	Теплопровідність, Вт/(м·К)
Повітря	0.024
Термопаста/епоксидні смоли	0.1...10
Теплопровідні полімери	3...20
Кераміка	15...40; 100...200

Тепловий опір між радіатором та оточуючим середовищем визначається типом та розсіюючою потужністю радіатора. Радіатор можна вибрати із стандартного ряду, що пропонується на ринку. Його тепловий опір можна розрахувати на підставі відомих емпіричних методів розрахунку за умов максимальної теплової ефективності, технологічних, вартісних та інших показників. При цьому ефективним є використання спеціальних програм, наприклад QLED, за допомогою яких можна проаналізувати та оцінити ефективність прийнятих рішень щодо забезпечення теплового режиму пристроїв. На сьогодні широко використовують алюмінієві (голчасті і ребристі) та керамічні радіатори для матриць потужністю до 15 Вт. Для більш потужних світлодіодних матриць (30÷50 Вт) додатково використовують вентилятори чи

струминну технологію обдування радіатора (наприклад такі, що розроблені і впроваджені компанією Nuventix). Для найбільш потужних світлодіодних матриць (десятки і сотні Ват) застосовують рідинну або термоелектричну систему охолодження.

Проведемо розрахунок теплового режиму світлодіодної матриці GREE Xlamp SMA 1516 LED. Матриця містить більше сотні окремих світлодіодів і, таким чином, більше сотні різних вузлів температури T_j . Щоб підтримувати температуру $p-n$ переходів матриці при температурі не вищій у від максимальної температури, тепловий опір θ_{sa} повинен бути рівним або меншим від максимального значення $\theta_{sa \max}$. Залежність θ_{sa} від робочого струму при різних температурах середовища приведений на рисунку.

Максимальна величина струму SMA1516 залежить від температури корпусу T_c , в режимі теплової рівноваги.

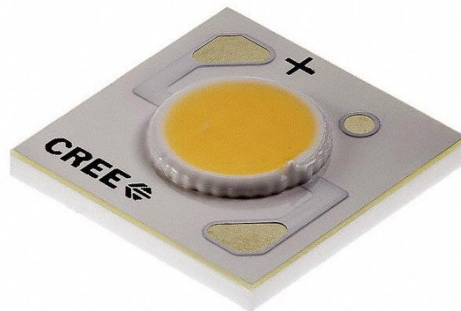


Рис. 2.5 - Зовнішній вигляд світлодіодної матриці SMA 1516 LED

Розробники компанії GREE замінили розрахунки теплового режиму з максимальними значеннями прямого струму при температурі гетеропереходу T_j значеннями прямого струму при температурі корпусу T_c .

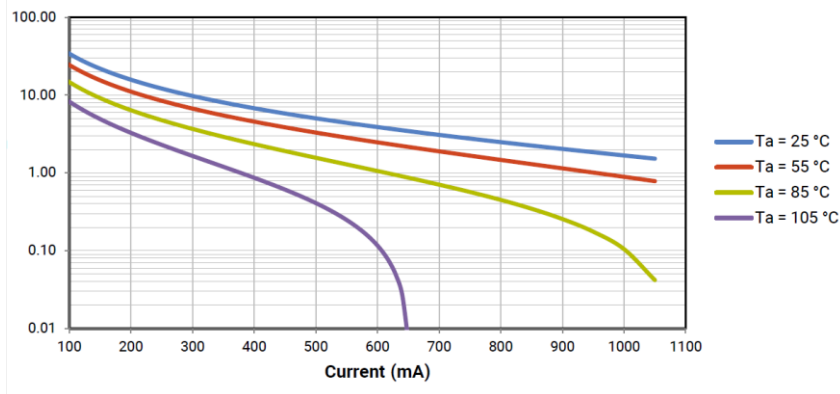


Рис. 2.6 - Залежність теплового опору Θ_{sa} світлодіодної матриці CMA 1516 LED від струму при різних температурах оточуючого середовища.

Таблиця 2.2 - Параметри світлодіодної матриці GREE Xlamp CMA 1516 LED

Максимальна температура р-п переходу, ($^{\circ}\text{C}$)	140	
Максимальна температура контактної площадки $T_{s \max}$ ($^{\circ}\text{C}$)	125	
Площа контакту світлодіоду ΔS , (mm^2)	250	
Квантова ефективність η_e	0.25	
Температура контактної площадки T_s , $^{\circ}\text{C}$	25	105
Максимальний тепловий опір контактна площадка-середовище $\Theta_{sa \max}$ (K/Wm)	2	0.01
Тепловий опір р-п –перехід – контактна площадка світлодіоду Θ_{js} при $I_f = 0.175\text{A}$, (K/Wm)		
Тепловий опір р-п – перехід – контактна площадка світлодіода Θ_{js} при $I_f = 0.350\text{A}$, (K/Wm)		

Величину квантової ефективності покладемо рівною $\eta_e = 0.25$. Для критичної температури GREE Xlamp CMA 1516 LED маємо:

$$T_j = 125 \cdot 0.75 = 85^{\circ}\text{C}.$$

Нехай температура середовища $T_a = 25^{\circ}\text{C}$. Проведемо розрахунок для максимального і мінімального значення прямого струму.

1 й випадок.

Нехай прямий струм $I_f=0.175A$. По вольт-амперних характеристиках знаходимо пряму напругу $U_f=37.5V$.

Відомо, що СД генерує теплову потужність

$$P_t = (1 - \eta_e)U_f I_f, \quad (2.13)$$

де I_f - прямий струм СДМ;

U_f - пряма напруга СДМ;

η_e - квантова ефективність.

Для потужності СД маємо:

$$P = U_f I_f = 37.5 \cdot 0.175 = 6.6 \text{ Вт}.$$

Знаходимо теплову потужність

$$P_t = (1 - \eta_e)P = 0.75 \cdot 6.6 = 4.9 \text{ Вт}.$$

Знаходимо максимально допустимий сумарний тепловий опір Θ_{ja}

$$\Theta_{ja} = \frac{T_j - T_a}{P_t} = \frac{85 - 25}{4.9} = 12.2 \text{ }^\circ\text{C/Вт}.$$

Знайдемо тепловий опір теплопровідної прокладки. Будемо використовувати термопасту КПТ-8. Її питомий коефіцієнт теплопровідності $\kappa = 0,7 \text{ Вт/(м К)}$. Товщину шару теплового контакту і його площу покладемо рівними $\Delta l = 0.1 \text{ мм}$ і $\Delta S = 250 \text{ мм}^2$ відповідно. Використовуючи формулу (2.2) отримаємо

$$\Theta_{sr} = \frac{1}{\kappa} \frac{\Delta l}{\Delta S} = \frac{10^{-3}}{0.7 \cdot 251 \cdot 10^{-6}} = 0.6 \text{ }^\circ\text{K/Вт}.$$

Тепловий опір $p-n$ – перехід – контактна площадка світлодіода візьмемо з паспортних даних. Для прямого струму $I_f = 0.175A$ та температури середовища $T_a = 25^\circ\text{C}$ знаходимо $\Theta_{js} = 6 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$. При такому струмі величина світлового потоку складе величину в 710 люмен.

Знаходимо максимально допустимий тепловий опір радіатора

$$\Theta_{ra} = \Theta_{ja} - \Theta_{js} - \Theta_{sr} = 12.2 - 6 - 0.6 = 5.6 \text{ }^\circ\text{K/Вт}.$$

2 й випадок.

Зробимо аналогічні розрахунки для струму $I_f = 0.350A$. При цьому $U_f = 41V$.

Знаходимо споживану потужність:

$$P = U_f I_f = 41 \cdot 0.350 = 14.4 \text{ Вт}.$$

Для теплової потужності і теплових опорів маємо:

$$P_t = (1 - \eta_e)P = 0.8 \cdot 41 \cdot 0.350 = 11.5 \text{ Вт},$$

$$\Theta_{ja} = 5.2^\circ\text{C}/\text{Вт}, \quad \Theta_{sr} = 0.6 \text{ К}/\text{Вт}.$$

При струмі $I_f=0.350\text{А}$ величина світлового потоку складе 1200 люмен.

Знаходимо максимально допустимий тепловий опір радіатора

$$\Theta_{ra} = \Theta_{ja} - \Theta_{js} - \Theta_{sr} = 5.2 - 4 - 0.6 - 0.1 = 1.5 \text{ К}/\text{Вт}.$$

Для прикладу виберемо радіатор LPF11180-ZHE зовнішній вигляд якого представлений на рисунку. Його максимальний тепловий опір $\Theta_{ra}=1.07 \text{ К}/\text{Вт}$. Тобто він повністю забезпечить тепловий режим світлодіода в інтервалі потужностей $P = 6.6 \div 14.4 \text{ Вт}$.



Рис. 2.7 - Зовнішній вигляд радіатора LPF11180-ZHE

Із закону Ома для теплових кіл температура p - n переходу визначається співвідношенням:

$$T_j = T_a + P_t \cdot R\Theta_{ja},$$

де T_a - температура навколишнього середовища, Θ_{ja} - сумарний тепловий опір, P_t - тепла потужність.

З наведеного співвідношення видно, що при заданих умовах роботи світлодіода висока температура навколишнього середовища та велика тепла потужність сприяють збільшенню, а низький тепловий опір - зменшенню температури переходу.

2.2 Охолодження світлодіодних матриць термоелектричними модулями

2.2.1 Основні співвідношення для розрахунку термоелектричного охолодження

В ряді випадків, для стабілізації теплового режиму НПДС доцільно застосовувати термоелектричні модулі охолодження [37, 38, 39]. Розглянемо роботу термоелемента який складається з двох напівпровідникових віток (рис.2.3). Одна вітка має електронний тип провідності а друга – дірковий. Вітки з'єднані металевією комутаційною пластиною. При проходженні постійного струму в зазначеному напрямку нижні пластини нагріваються, а верхні - охолоджуються. В цьому випадку верхню пластину називають холодним спаєм (температура T_c), а нижню - гарячим спаєм (температура T_h).

Теплова потужність, яка поглинається ТЕМО (холодопродуктивність) визначається співвідношенням [37]:

$$P_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - \kappa(T_h - T_c), \quad (2.14)$$

а від гарячої пластини при допомозі радіатора відводиться теплова потужність P_h

$$P_h = \alpha T_h I + \frac{1}{2} I^2 R - \kappa(T_h - T_c), \quad (2.15)$$

де α - коефіцієнт диференціальної термоЕРС, κ – теплопровідність, R – опір напівпровідникового матеріалу віток, T_c і T_h температура холодної і гарячої пластин, I – струм джерела живлення ТЕМО,

$$P_\kappa = \kappa(T_h - T_c), \quad (2.16)$$

потужність, яка переходить від гарячого спаю до холодного за рахунок теплопровідності віток.

Слід зазначити, що потужність яка виділяється на гарячому спаї ТЕМО більша від потужності, яку поглинає холодний спай на величину затрат електроенергії джерела живлення

$$P_h = P_c + W. \quad (2.17)$$

Потужність джерела витрачається на виконання роботи по переміщенню зарядів проти різниці електричних потенціалів, які виникають згідно із законом Зеебека в термоелектричному колі

$$P_z = \alpha I(T_h - T_c), \quad (2.18)$$

та на теплові втрати Джоуля

$$P_d = I^2 R. \quad (2.19)$$

Звідси

$$W = P_h - P_c = \alpha I(T_h - T_c) + I^2 R. \quad (2.20)$$

Ефективність термоелектричного охолодження визначається холодильним коефіцієнтом [37]:

$$\varepsilon = \frac{P_c}{W} = \frac{\alpha T_c I - 0.5 I^2 R - \kappa \Delta T}{\alpha I \Delta T + I^2 R}. \quad (2.21)$$

де $\Delta T = T_h - T_c$ перепад температур між спаями.

Важливо зазначити, що холодильний коефіцієнт залежить від величини струму живлення і від різниці температур ΔT , яка створюється термоелектричною батареєю. При даному струмі ε практично лінійно залежить від різниці температур (рис.2.8). Для термоелектричних модулів холодильний коефіцієнт в середньому складає $0.3 \div 0.7$.

Слід зазначити, що при нульовій різниці температур і при малих струмах границя холодильного коефіцієнту прямує до безмежності. Практично це означає, що коли необхідно мати підвищену ощадність пристрою, то бажано використовувати більшу кількість модулів і живити їх меншим струмом до тих пір, поки цього струму вистачає для компенсації зворотного потоку тепла. В залежності від режиму по струму для одного і того ж модуля можуть бути отримані різні значення холодильного коефіцієнту. При цьому, на невеликих перепадах температур і при малих струмах холодильний коефіцієнт може перевищувати значення $\varepsilon=1$.

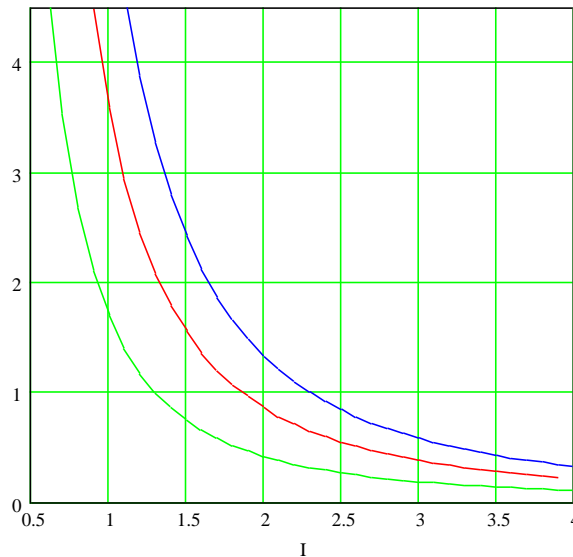


Рис. 2.8 - Залежність холодильного коефіцієнта від відносного струму при різних перепадах температур ТЕМО

2.2.2 Розрахунок системи охолодження світлодіодних матриць на основі термоелектричних модулів

В умовах збільшення потужності напівпровідникових джерел світла традиційні системи термостабілізації не завжди справляються із забезпеченням адекватних теплових режимів. Для підвищення інтенсивності охолодження потужних світлодіодів в системах відводу тепла активно застосовуються термоелектричні модулі охолодження.

Відомо, що СД генерує теплову потужність

$$P_t = (1 - \eta_e) U_f I_f, \quad (2.22)$$

де I_f та U_f прямий струм та пряма напруга СД, η_e – його квантова ефективність.

Очевидно, що ТЕМО повинен поглинати потужність не меншу ніж теплова потужність СД, оскільки, в протилежному випадку стабілізація теплового режиму буде неможлива. Якщо ж ТЕМО буде поглинати надлишкову потужність, то на його холодній поверхні буде утворюватися конденсат, що може привести до короткого замикання. Єдино можливим способом зробити використання ТЕМО ефективним є застосування електронного блоку, який зможе регулювати потужність модуля в залежності від температури гетеропереходу СД.

Будемо вважати, що теплова потужність СД повністю поглинається холодною поверхнею ТЕМО

$$P_t = P_c, \quad (2.23)$$

а від гарячої поверхні при допомозі радіатора відводиться теплова потужність P_h . Для розрахунку теплового режиму СД скористаємося методом електротеплової аналогії. Схема системи охолодження світлодіоду оснащеного ТЕМО приведена на рисунку 2.6.

Використовуючи метод електротеплової аналогії із другого закону Кірхгофа для теплових потоків отримаємо:

$$T_j = T_a + P_c \cdot (\Theta_{js} + \Theta_{sc}) + P_h \cdot (\Theta_{hr} + \Theta_{ra}) - \Delta T, \quad (2.24)$$

де Θ_{js} – тепловий опір між гетеропереходом та контактною площадкою, $\Theta_{sc} = \Theta_{hr}$ – теплові опори між контактною площадкою і холодною поверхнею ТЕМО та між гарячою поверхнею ТЕМО і радіатором, Θ_{ra} – тепловий опір між радіатором та середовищем, $\Delta T = T_h - T_c$ – перепад температури між гарячою та холодною поверхнями ТЕМО обумовлений ефектом Пельтьє.

Теплова потужність, яка поглинається ТЕМО (холодопродуктивність) визначається співвідношенням:

$$P_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - \kappa \Delta T, \quad (2.25)$$

а від гарячої поверхні при допомозі радіатора відводиться теплова потужність P_h

$$P_h = \alpha T_h I + \frac{1}{2} I^2 R - \kappa \Delta T, \quad (2.26)$$

де α - коефіцієнт диференціальної термоЕРС, κ – теплопровідність, R – опір напівпровідникового матеріалу віток ТЕМО, T_c , і T_h температура холодної і гарячої поверхонь ТЕМО, I – струм джерела живлення ТЕМО.

Потужність, яка виділяється на гарячій поверхні ТЕМО більша від потужності, яку поглинає холодна поверхня на величину затрат електроенергії джерела живлення

$$P_h = P_c + W. \quad (2.27)$$

Потужність W витрачається на виконання роботи по переміщенню зарядів проти різниці електричних потенціалів, які виникають згідно із законом Зеебека в термоелектричному колі, та на теплові втрати Джоуля:

$$W = P_h - P_c = \alpha I \Delta T + I^2 R. \quad (2.28)$$

Ефективність роботи ТЕМО визначається холодильним коефіцієнтом:

$$\varepsilon = \frac{P_c}{W}. \quad (2.29)$$

поверхонь ТЕМО, I – струм джерела живлення ТЕМО.

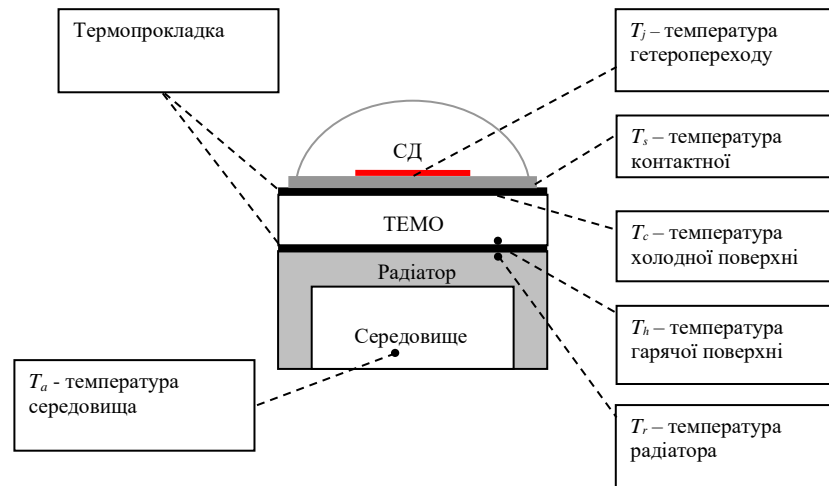


Рис. 2.9 - Схематичне зображення системи охолодження світлодіода з термоелектричним модулем та радіатором [19]

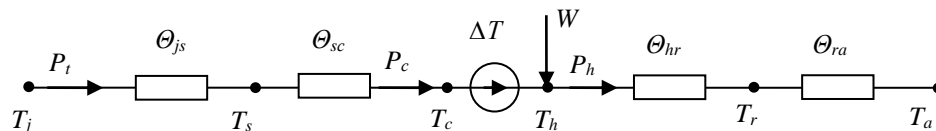


Рис. 2.10 - Теплова схема системи охолодження світлодіода з термоелектричним модулем та радіатором. Тут T_j - температура гетеропереходу СД, T_s - температура контактної площадки, T_c і T_h - температура холодної і гарячої поверхні ТЕМО відповідно, T_r - температура радіатора, T_a - температура середовища.

Із другого рівняння Кірхофа для теплових потоків для температури перегріву гетеропереходу СД отримаємо:

$$\Delta T_j = T_j - T_a = P_c \cdot (\Theta_c + \Theta_h) + (\alpha I \Delta T + I^2 R) \cdot \Theta_h - \Delta T \quad (2.30)$$

де $\Theta_c = \Theta_{js} + \Theta_{sc}$, і $\Theta_h = \Theta_{hr} + \Theta_{ra}$ - теплові опори з боку холодної і гарячої поверхонь ТЕМО,

$$\Delta T = \frac{1}{\kappa} \cdot \left(\alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - P_c \right), \quad (2.31)$$

перепад температури.

В формулі (2.22) перший доданок, описує збільшення температури гетеропереходу СД при передачі теплової потужності, що виділяється СД і самим модулем. Два останніх - визначають вплив ТЕМО на температуру гетеропереходу СД. Охолодження забезпечується за рахунок перепаду температур між гарячою і холодною поверхнями ТЕМО. У підсумку, саме від взаємного співвідношення величин цих доданків залежить ефективність роботи термоелектричної системи охолодження.

Очевидно, що температура гетеропереходу СД визначається його потужністю, тепловим опором охолоджувальної системи, температурою оточуючого середовища та режимом роботи ТЕМО. Керування режимом роботи модуля здійснюється шляхом зміни величини струму живлення. При розробці і експлуатації термоелектричної системи охолодження важливим питанням є вибір оптимального струму при якому відбувається ефективне охолодження.

Розглянемо вплив струму живлення ТЕМО на ефективність термостабілізації гетеропереходу СД при заданих значеннях його потужності і теплового опору системи. В якості напівпровідникового джерела світла виберемо сучасну світлодіодну матрицю XLamp CMA1516, параметри якої приведені в таблиці 2.1 [28].

Таблиця 2.4. Параметри світлодіодної матриці CMA1516

Макс. струм, <i>A</i>	Макс. напруга, <i>V</i>	Макс. потужн., <i>Вт</i>	Світл. потік, <i>лм</i>	Тепловий опір СД Θ_{j-s} , <i>K/Вт</i>	Площа теплов.конт. <i>мм²</i>
1.05	39	40	1400-4800	0.4	250

Потужністю СД можна керувати в широких межах змінюючи його напругу живлення або струм. Очевидно, що максимальна потужність СД повинна бути не більшою від максимальної холодопродуктивності ТЕМО. Для даної світлодіодної матриці максимальна тепла потужність складає величину:

$$P_{t \max} = (1 - \eta_e) U_{f \max} I_{f \max} = 0.75 \cdot 39 \cdot 1.05 = 30 \text{ W}.$$

Модель ТЕМО виберемо керуючись тепловою потужністю, габаритами і вимогами до температурного режиму експлуатації СД. При проведенні розрахунків були використані характеристики серійних ТСМ ТВ-161 з параметрами: максимальний струм $I_{\max} = 5,7 \text{ A}$, максимальна напруга $U_{\max} = 18,3 \text{ В}$, максимальна холодопродуктивність при нульовій різниці температури $P_{c,\max} = 66.3 \text{ Вт}$, максимальний перепад температури при нульовій холодопродуктивності $\Delta T_{\max} = 70 \text{ К}$.

Застосування термоелектричних модулів завжди пов'язане з використанням того чи іншого радіатора, який повинен розсіяти не тільки тепло, яке виділяє світлодіод, але і тепло Джоуля, яке виділяється в термоелементі при проходженні через нього електричного струму. Тепловий опір сучасних радіаторів оснащених вентиляторами складає $\Theta_{\text{ра}} = 0.3 \div 0.6 \text{ К/Вт}$. Кращі зразки з використанням теплових трубок досягають значень $\Theta_{\text{ра}} = 0.1 \text{ К/Вт}$. Рідинні тепловідвідні системи ще ефективніші. Їх тепловий опір складає $\Theta_{\text{ра}} = 0,1 \div 0.01 \text{ К/Вт}$, але при цьому є громіздкими і важко інсталюються в освітлювальну систему.

Аналіз отриманих співвідношень був проведений числовими методами. На рисунку 3.2 представлена графічна залежність температури перегріву гетеропереходу СД від струму ТЕМО при різних величинах теплової потужності СД.

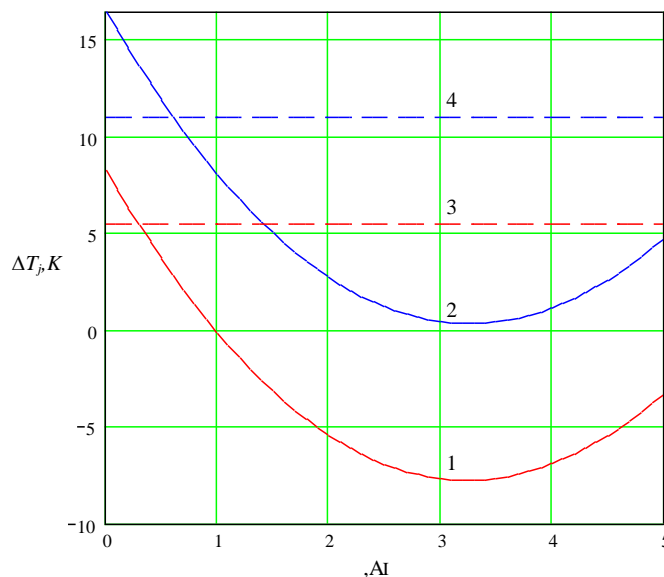


Рис.2.11 Залежність температури перегріву гетеропереходу СД від струму ТЕМО при різних величинах потужності СД і при теплових опорах

$\Theta_c=0.6 \text{ K/W}$, $\Theta_h=0.2 \text{ K/W}$. Суцільні лінії 1 і 2 при $P_c=10 \text{ W}$, і $P_c=20 \text{ W}$ відповідно. Штрихові лінії 3 і 4 при тих же потужностях і теплових опорах, але при відсутності ТЕМО.

Мінімуми ліній $\Delta T_j(I)$ відповідають режимам роботи з максимальною ефективністю системи охолодження, при якій досягається найменша температура гетеропереходу. Очевидно, що при струмах близьких до ефективного, термоелектрична система охолодження дозволяє отримати нижчі значення температури, ніж традиційна. Штриховими лініями на рисунку відзначені температурні залежності для системи охолодження без ТЕМО, розраховані по формулі (2.21) для таких же значень теплового опору.

Залежність температури перегріву гетеропереходу від струму ТЕМО при різних значеннях теплового опору з гарячого боку ТЕМО представлена на рисунку 2.11.

Очевидно, що ростом теплового опору Θ_h ефективність охолодження погіршується а розташування мінімумів залежностей $\Delta T_j(I)$ зміщується в область менших значень струму. При певних співвідношеннях між потужністю ТЕМО і СД можливе зниження температури гетеропереходу до температури середовища, а іноді і нижчої ніж температура середовища. Це особливо актуально у випадку коли температура середовища близька до критичної температури гетеропереходу СД.

Залежність перепаду температури від струму ТЕМО при різних потужностях СД представлена на рисунку 2.10. З графіка випливає, що із збільшенням струму перепад температури між гарячою і холодною поверхнями ТЕМО збільшується. Крім того, він залежить від теплового навантаження. Зокрема, із збільшенням теплової потужності СД перепад температури зменшується і навпаки, при зменшенні потужності - збільшується.

На величину теплового опору системи охолодження істотно впливає режим роботи ТЕМО та потужність теплового навантаження. Якщо температура гетеропереходу СД зрівняється з температурою середовища або стане нижчою, тепловий опір системи стане нульовим, або навіть негативним.

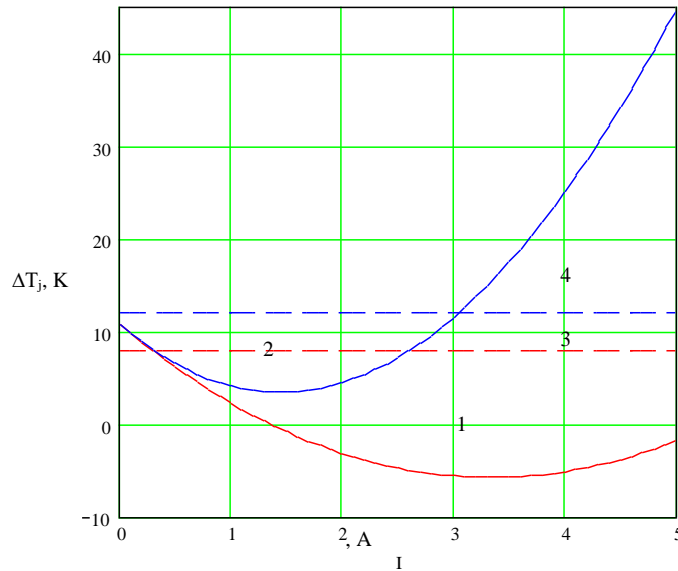


Рис.2.12 - Залежність температури перегріву гетеропереходу від струму ТЕМО при потужності СД $P_c=10 \text{ Вт}$ і при різних значеннях теплового опору з гарячого боку ТЕМО. Суцільні лінії 1 і 2 при $\Theta_h=0.2 \text{ К/Вт}$ і $\Theta_h=0.6 \text{ К/Вт}$ відповідно. Штрихові лінії 3 і 4 при тій же потужності і теплових опорах, але при відсутності ТЕМО.

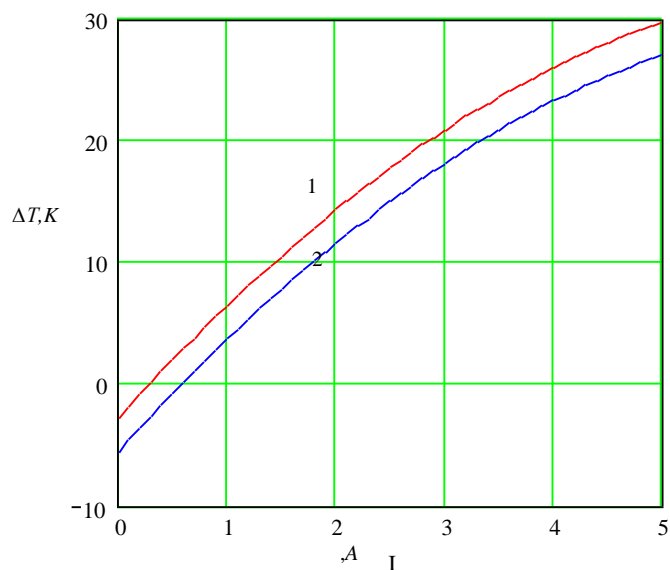


Рис.2.13. Залежність перепаду температури від струму ТЕМО при різних потужностях СД. Лінія 1 при $P_c=10 \text{ Вт}$, лінія 2 при $P_c=20 \text{ Вт}$.

Термоелектричні системи охолодження мають ряд переваг в порівнянні з іншими системами охолодження, а саме: високу надійність, відсутність рухомих частин, компактність і невелику вагу, малу інерційність, безшумність роботи. Крім того застосування ТЕМО наділяє тепловідвідну систему функцією охолодження, тобто дає можливість досягати температури гетеропереходу нижчої

ніж температура навколишнього середовища. Звичайні повітряні вентилятори вже не здатні справитися з постійно зростаючими тепловими потоками, а рідинні системи охолодження громіздкі і важко інсталиуються в освітлювальну систему.

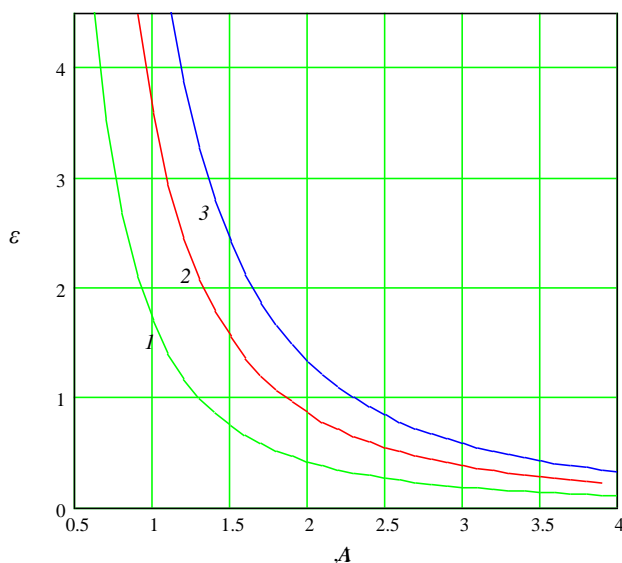


Рис.2.14. Залежність холодильного коефіцієнту від струму ТЕМО при різних потужностях СД. Лінія 1 при $P_c=10$ Вт, лінія 2 при $P_c=20$ Вт, лінія 3 при $P_c=30$ Вт.

2.3 Вплив охолодження на світловий потік світлодіодних матриць

При проходженні електричного струму через світлодіодну матрицю в ній виділяється тепло. Місцями виділення тепла є контакти, зовнішні шари і гетеропереходи. При малих значеннях струму нагріванням контактів і зовнішніх шарів можна знехтувати, оскільки потужність яка розсіюється на їх паразитних опорах мала. Тому, при малих струмах основним джерелом тепла є гетеропереходи світлодіодів, які нагріваються в результаті безвипромінювальної рекомбінації. Із збільшенням струму внесок паразитних опорів контактів і зовнішніх шарів у збільшення температури діода стає помітнішим. В результаті підвищення ролі безвипромінювальної рекомбінації через глибокі домішкові рівні, поверхневої рекомбінації і втрат носіїв заряду в бар'єрних шарах гетероструктур температура СДМ збільшується, а інтенсивність випромінювання світла зменшується. Висока температура експлуатації є визначальним фактором, який погіршує ефективність світлодіодних матриць. Причому в бік погіршення змінюються відразу кілька важливих параметрів —

світловий потік, колірна температура, довговічність і, в сукупності, економічна ефективність застосування НПДС.

Використовуючи методи регресійного аналізу, залежність інтенсивності випромінювання СДМ від температури і струму живлення з точністю до 1% можна апроксимувати співвідношенням

$$\Phi(T_j, I_f) = \Phi_0 [c_0 - c_1(T_c - T_{c0})] \left[-d_0 + d_1 \frac{I_f}{I_{f0}} - d_2 \left(\frac{I_f}{I_{f0}} \right)^2 \right] \quad (2.32)$$

де Φ_0, T_{c0}, I_{f0} – номінальні світловий потік, температура та струм живлення СДМ відповідно, T_c, I_f – температура контактної площадки та струм живлення матриці, c_0, c_1, d_0, d_1, d_2 – постійні для даної матриці коефіцієнти.

Подібна залежність характерна для всіх СДМ. Із аналізу даного співвідношення випливає, що суттєвого збільшення світлового потоку можна досягти шляхом збільшення струму живлення матриці при одночасному зменшенні її температури. Виконання таких суперечливих вимог можливе при застосуванні активного охолодження. Як показано в [19], температурою СДМ можна керувати при допомозі термоелектричних модулів (ТЕМО). Зокрема, використовуючи ТЕМО можна знизити температуру матриці на

$$\Delta T_c = T_c - T_a = P_c \cdot (\Theta_c + \Theta_h) + (\alpha I \Delta T + I^2 R) \cdot \Theta_h - \Delta T \quad (2.33)$$

де P_c – теплова потужність СДМ, I – струм живлення ТЕМ, α – коефіцієнт диференціальної термоЕРС, R – опір напівпровідникового матеріалу, $\Theta_c = \Theta_{js} + \Theta_{sc}$, і $\Theta_h = \Theta_{hr} + \Theta_{ra}$ – теплові опори з боку холодної і гарячої поверхонь, ΔT – перепад температури між між гарячою і холодною поверхнями ТЕМ.

Застосування ТЕМ дає можливість знизити температуру СДМ до температури нижчої ніж температура середовища. Це особливо актуально в умовах, коли температура середовища рівна або більша від температури СДМ. Як відомо із [22], для світлодіодної матриці СМА-1516 при $T_c = 105^\circ\text{C}$ і при струмі $I_f = 500 \text{ ма}$ світловий потік складає 1900 лм. В той же час, як слідує із рівнянь (2.32) і (2.33), при збільшенні струму до $I_f = 1000 \text{ ма}$ і при одночасному зниженні

температури до $T_c=25^\circ\text{C}$ світловий потік може збільшитися більш ніж в 2 рази - до 4000 лм.

Вольт-амперна характеристика світлодіодної матриці GREE Xlamp SMA 1516 LED представлена на рисунку 2.16, а залежність відносного світлового потоку від температури гетеропереходу на рисунку 2.17. Світловий потік нормується на 100% при прямому струмі $I_f=450\text{mA}$, при температурі переходу $T_{j0}=85^\circ\text{C}$.

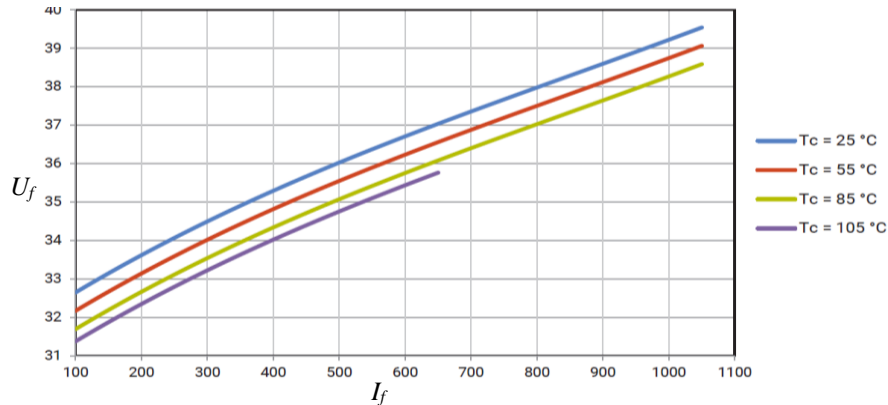


Рис. 2.16 – Вольт-амперна характеристика світлодіода GREE Xlamp SMA 1516 LED

При цьому абсолютна величина світлового потоку Φ_0 складає 1900лм. Світловий потік при інших параметрах знаходять шляхом перерахунку. Наприклад, в стаціонарному режимі при температурі контактної площадки $T_c = 25^\circ\text{C}$, і при струмі $I_f=700\text{ mA}$, відносний світловий потік становить 150%. Йому відповідає світловий потік $1900 \cdot 1.5=2850\text{лм}$.

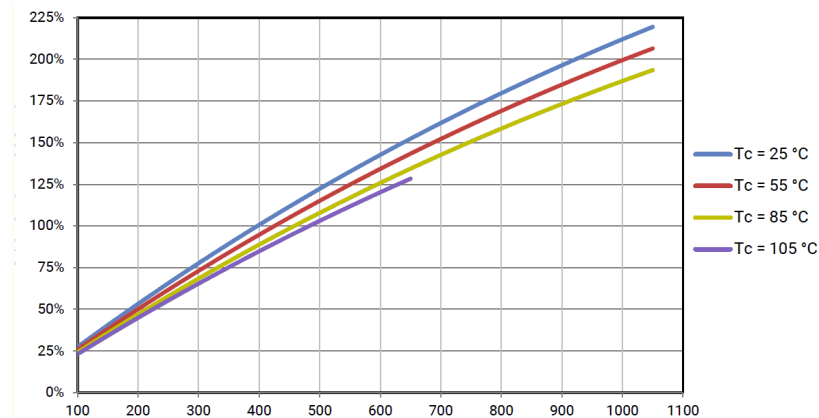


Рис. 2.16. Залежність відносного світлового потоку від температури гетеропереходу світлодіода GREE Xlamp SMA 1516 LED.

Використовуючи метод регресійного аналізу [0] температурну залежність світлового потоку можна апроксимувати лінійною функцією

$$\Phi_{|I_f=I_{f0}}(T_j) = \Phi_0 [c_0 - c_1(T_j - T_{j0})], \quad (2.34)$$

де Φ_0 – світловий потік при температурі p - n -переходу $T_{j0}=85$ C і при струмі $I_{f0}=450$ mA, $c_0=1$, $c_1=0.003236$ K⁻¹.

Цей вираз в межах інтервалу температур $T_j = 25 \div 150$ C описує дані з точністю до 1%. Із збільшенням струму частота рекомбінації електрон-діркових пар з випромінюванням квантів світла збільшується. Це приводить до збільшення інтенсивності випромінювання. Графічна залежність відносного світлового потоку від струму представлена на рисунку 2.16. Залежність світлового потоку від струму можна апроксимувати параболічною функцією

$$\Phi_{|T_j=T_{j0}}(I_f) = \Phi_0 \left[-d_0 + d_1 \frac{I_f}{I_{f0}} - d_2 \left(\frac{I_f}{I_{f0}} \right)^2 \right], \quad (2.35)$$

де $d_0 = 0,0481$, $d_1 = 1,451$, $d_2 = 0,404$, $T_{j0}=85$ C, $I_{f0} = 450$ mA.

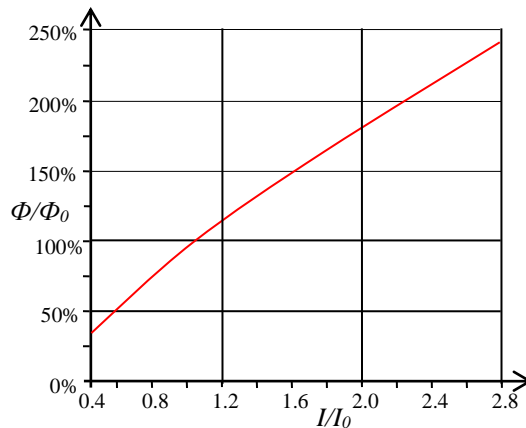


Рис. 2.17 - Типова залежність відносного світлового потоку від струму для світлодіодних матриць серії GREE Xlamp LED.

Оскільки світловий потік залежить від двох незалежних змінних, то в першому наближенні можна припустити, що його можна представити у вигляді добутку двох знайдених функцій:

$$\Phi(T_j, I_f) = \Phi_0 [c_0 - c_1(T_j - T_{j0})] \left[-d_0 + d_1 \frac{I_f}{I_{f0}} - d_2 \left(\frac{I_f}{I_{f0}} \right)^2 \right] \quad (2.36)$$

Використовуючи отриману функцію, можна знайти оптимальний баланс між тепловим режимом і параметрами розроблюваної системи на базі СД.

Для приросту світлового потоку маємо:

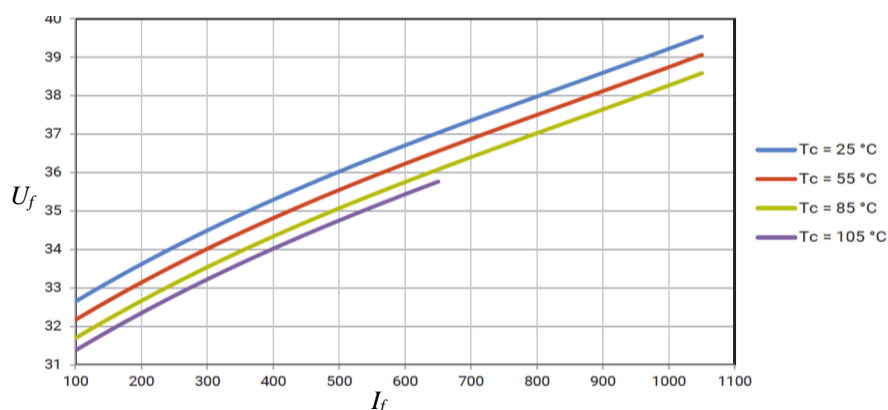
$$d\Phi = \frac{\partial\Phi(T_j, I_f)}{\partial T_j} dT_j + \frac{\partial\Phi(T_j, I_f)}{\partial I_f} dI_f. \quad (2.37)$$

При одночасній зміні T_j , та I_f найбільшого зростання світлового потоку можна досягти, якщо одночасно

$$\frac{\partial\Phi(T_j, I_f)}{\partial I_f} \Big|_{T_j=const} > 0 \text{ і } \frac{\partial\Phi(T_j, I_f)}{\partial T_j} \Big|_{I_f=const} > 0. \quad (2.38)$$

Перша умова виконується завжди, тому що із збільшенням прямого струму світловий потік збільшується. Виконання другої умови можна забезпечити при охолодженні гетеропереходу СД активними засобами охолодження. Наприклад, при використанні теплових труб, або термоелектричних модулів охолодження.

Рис. 2.17 – Вольт-амперна характеристика світлодіода GREE Xlamp SMA



1516 LED

Отже, для отримання великого світлового потоку необхідно експлуатувати світлодіод при великих струмах і при низьких температурах переходу. Запропонована узагальнена процедура розрахунку і приклади аналітичних виразів дозволяють отримати світловий вихід СД залежно від теплового режиму. Дана методика дозволить вибрати температуру переходу і прямий струм на основі світлового потоку, близького до максимальної величини.

Висновки до другого розділу

1. В умовах, коли температура середовища близька до критичної температури гетеропереходу LED, для стабілізації його теплового режиму доцільно використовувати термоелектричні модулі охолодження (ТЕМО).

2. При даній тепловій потужності LED та тепловому опорі системи охолодження існує оптимальна величина струму живлення ТЕМО, при якому температура гетеропереходу LED досягає мінімуму. При струмах близьких до оптимального, термоелектрична система охолодження дозволяє отримувати нижчі значення температури гетеропереходу ніж традиційна.

3. При оптимальному співвідношенні між потужностями ТЕМО та LED термоелектрична система охолодження дозволяє знижувати температуру

гетеропереходу LED до температур нижчих, ніж температура навколишнього середовища. Ефективність використання ТЕМО знижується при збільшенні теплової потужності LED і сумарного теплового опору системи охолодження.

4. При аналізі ефективності роботи системи охолодження слід керуватися не лише параметрами ТЕМО, але і параметрами всієї системи охолодження LED в цілому: сумарним тепловим опором системи охолодження, тепловим навантаженням та режимом роботи ТЕМО.

3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1. Термоелектричний модуль охолодження

Енергетична ефективність термоелектричних модулів охолодження (ТЕМО) залежить від фізичних властивостей матеріалів (термоелектриків), з яких виготовлені їх активні елементи. Найпростіший термоелектричний охолоджувач (термоелемент) складається з двох напівпровідників різного типу провідності (віток) з'єднаних комутаційними пластинами.

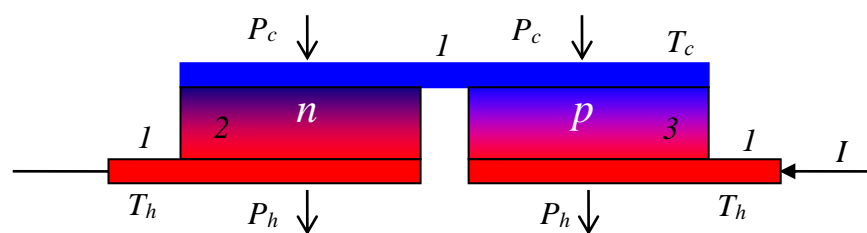


Рис. 3.1 - Схема термоелемента. 1 – металева комутаційна пластина, 2 – вітка n-типу провідності, 3 – вітка p-типу типу провідності.

В термоелементах, як правило, використовуються напівпровідники з електронним і дірковим типом провідності. При накладанні зовнішнього електричного поля в напівпровіднику виникає рух електронів і дірок, а загальний струм є сумою електронного та діркового струмів.

Робота термоелектричних холодильників базується на термоелектричних явищах до яких відносяться ефекти Зеебека і Пельтьє [37]. Ці ефекти пов'язані, як з перетворенням теплової енергії в електричну, так і з зворотним перетворенням енергії електричного струму в холод або тепло.

Ефект Зеебека полягає в тому, що коли в розімкненому електричному колі, яке складається з двох різнотипних віток, на одному з контактів підтримувати температуру T_h (гарячий спай), а на іншому температуру T_c (холодний спай), то за умови $T_h \neq T_c$ між кінцями кола виникне термоЕРС

$$E = \alpha(T_h - T_c),$$

де α коефіцієнт диференціальної термоЕРС віток. При замиканні контактів в колі виникне електричний струм.

Ефект Пельтьє полягає в тому, що при пропусканні постійного струму через термоелемент, який складається з двох різнотипних віток, в місці контакту виділяється або поглинається певна теплова потужність (в залежності від напрямку струму)

$$P_{II} = \alpha TI,$$

де T – температура контакту, I – струм, який протікає через контакт.

Коли електрони переходять через електричний контакт з матеріалу p -типу в матеріал n -типу, їм доводиться долати енергетичний бар'єр і забирати для цього енергію у кристалічної ґратки. Контакт (спай) охолоджується. Навпаки, при переході з матеріалу n -типу в матеріал p -типу електрони віддають енергію ґратці. Контакт (спай) нагрівається. [38]. Ефект Пельтьє контактний, тобто поверхневий. Велика площа контакту дозволяє отримати велику холодопродуктивність.

В сучасних практичних застосуваннях використовуються термоелектричні модулі охолодження (ТЕМО). Це конструктивно завершені термоелектричні пристрої в яких одиничним елементом є термоелектричний елемент. Термоелементи, як в сандвічі, укладені між двома керамічними пластинами на основі нітриду або оксиду алюмінію, які добре проводять тепло, але є добрими електричними ізоляторами (рис. 3.2). Термоелементи електрично з'єднані послідовно мідними комутаційними пластинами. При цьому, по тепловому потоку, вони виявляються з'єднаними паралельно. Кількість термоелементів в різних модулях може змінюватися від декількох штук до декількох сотень. Це дає

зможу створювати ТЕМО будь якої холодильної продуктивності від десятих долей до сотень ват з робочою напругою від мілівольт до десятків вольт. Хоча модуль - самостійний охолоджуючий вузол, він не може працювати без відводу теплової енергії від гарячого спаю. Тому найпростіший термоелектричний холодильник завжди складається з трьох частин: термоелектричного модуля, радіатора на гарячій стороні та охолоджуваного об'єкта на холодній стороні. Охолоджуваний об'єкт може знаходитися в безпосередньому тепловому контакті з холодною стороною модуля, однак частіше використовується теплопровідна пластина, повітряний або рідинний теплообмінник.

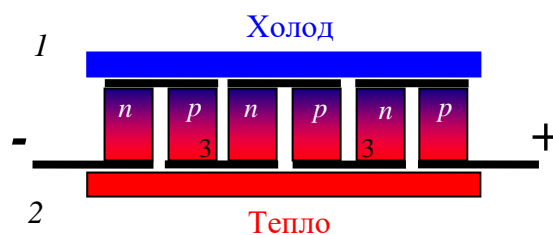


Рис. 3.2 - Принципова схема термоелектричного модуля: 1 – гарячий спай; 2 – холодний спай, 3 – напівпровідникові вітки n -і p -типів провідності.

3.2 Режими роботи термоелектричного модуля

Термоелектричний модуль охолодження може працювати в різних режимах, найбільш важливими з яких є: режим максимального холодильного коефіцієнта ε_{max} і режим максимальної холодопродуктивності $P_{c\ max}$. В першому випадку ТЕМО буде найбільш ефективно перетворювати споживану електричну енергію в „холод”, в другому – за рахунок зменшення ошадливості може бути отримане найбільше зниження температури. Іншими словами, режим ε_{max} характеризує найбільш ошадливу роботу ТЕМО, в той час як режим $P_{c\ max}$ забезпечує максимальну величину відведеної теплової потужності.

Можна показати [38], що холодильний коефіцієнт досягне максимального значення

$$\varepsilon_{max} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \frac{\sqrt{1 + 0.5Z(T_h - T_c)} - T_h/T_c}{\sqrt{1 + 0.5Z(T_h - T_c)} + 1} \quad (3.1)$$

при струмі

$$I = \frac{\alpha(T_h - T_c)}{R[\sqrt{1 + 0.5Z(T_h - T_c)} - 1]}. \quad (3.2)$$

В умовах максимальної холодопродуктивності холодильний коефіцієнт можна представити у вигляді

$$\varepsilon_d = \frac{1}{2T_h} \left(T_c - \frac{2(T_h - T_c)}{ZT_c} \right). \quad (3.3)$$

Слід зазначити, що холодильний коефіцієнт залежить від різниці температур ΔT , створюваної термоелектричною батареєю, і величини добротності термоелектричного матеріалу Z . Термоелектрична добротність визначається співвідношенням

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa}, \quad (3.4)$$

де α - коефіцієнт диференціальної термоЕРС, σ - коефіцієнт електропровідності, κ - коефіцієнт теплопровідності віток термоелемента.

Режими, близькі до максимальної холодопродуктивності використовуються в малопотужних системах, в яких заощадження електроенергії не є важливим фактором. Навпаки, в пристроях великої потужності доцільно застосовувати режими, близькі до умов максимального холодильного коефіцієнта [38].

Режим $P_{c \max}$ відповідає максимально можливому значенню робочого струму в термоелементі I_{\max} . Для режиму ε_{\max} характерним є те, що робочий струм змінюється у відповідності із змінами різниці температур на спаях.

На практиці термоелектричні холодильники, як правило працюють при струмах, які складають 25–80 % I_{\max} . Для термоелектричного холодильника дуже просто змінювати режим роботи від ε_{\max} до $P_{c \max}$, і навпаки, а також працювати в деякому проміжному режимі шляхом зміни електричного струму. Таким чином, ТЕМО відрізняє висока функціональна гнучкість.

Величина холодильної потужності модуля залежить від ΔT . Типова залежність наведена на рис.3.1. Із графіка слідує, що досягнення максимальної різниці температур можливе тоді, коли відсутня холодопродуктивність: $P_c=0$. З іншого боку, при нульовій різниці температур досягається максимальна холодопродуктивність при струмі I_{\max} .

Холодильний коефіцієнт збільшується при збільшенні Z і при $Z \rightarrow \infty$ досягає максимального значення, рівного холодильному коефіцієнту ідеальної теплової машини Карно

$$\varepsilon_k = \frac{P_c}{P_h - P_c} = \frac{\alpha T_c I}{\alpha I (T_h - T_c)} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad (3.5)$$

Тому при виготовленні ТЕМО використовують напівпровідникові матеріали з максимальною величиною добротності [37].

3.3 Технічні характеристики сучасних термоелектричних модулів

Стандартні ТЕМО мають більш ніж 250 найменувань і мають наступні типорозміри 50x50 мм, 40x40 мм, 30x30 мм, 15x15 мм та ін. Загальний вигляд термоелектричного модуля представлений на рис. 3.3.

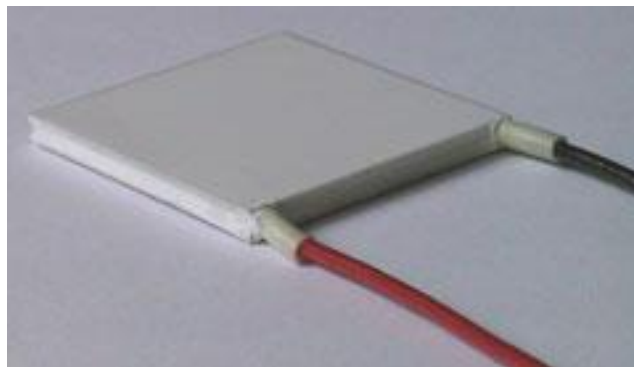


Рис. 3.3 - Зовнішній вигляд термоелектричного модуля

Сучасна промисловість випускає різноманітні термоелектричні модулі охолодження. Номенклатура і технічні характеристики деяких з них представлена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Технічні характеристики сучасних ТЕМО

Тип термоелектричного модуля	Характеристики					
	I_{max} (A)	U_{max} (B)	$P_c \max$ (Bm)	ΔT_{max} (°C)	К-сть. віток	Розмір вітки (мм)

A-TM 11.2-127-1.4	11.2	15.4	108.0	70	127	40 x 40 x 3.2
A-TM 11.2-127-1.4 HR1	11.2	15.4	108.0	69	127	40 x 40 x 3.2
A-TM 11.2-127-1.4 HR2	11.2	15.4	108.0	68	127	40 x 40 x 3.2
A-2TM 9.0-126/63-1.4 HR1	9.0	13.5	28	94	126	40x40x5.4
A-2TM-8.5-126/63-1.4 HR1	8.5	13.2	22.0	95	126	40x40x6.3
A-2TM-7.0-126/63-1.4 HR1	7.0	13.1	27.0	82	126	40x40x5.4
A-2TM-10.0-126/63-1.4 HR1	10.0	13.3	33.0	93	126	40x40x4.8
A-2TM-6.5-126/63-1.4 HR1	6.5	13.3	19.0	93	126	40x40x6.7
A-2TM-7.0-126/63-1.4 HR1	7.0	14.0	25.0	90	126	40x40x5.8
A-2TM 11.0-127/126-1.4 HR1	11.0	11.6	38	96	127	40x40x5.9
A-2TM 8.0-127/126-1.4 HR1	8.0	10.0	32	95	126	40x40x6.3
A-TM 8.5-127-1.4	8.5	15.4	72.0	72	127	40 x 40 x 3.7
A-TM 8.5-127-1.4 HR1	8.5	15.4	72.0	71	127	40 x 40 x 3.4
A-TM 8.5-127-1.4 HR2	8.5	15.4	72.0	70	127	40 x 40 x 3.7
A-TM 6.0-127-1.4	6.0	15.4	53.0	72	127	40 x 40 x 4.2
A-TM 6.0-127-1.4 HR1	6.0	15.4	53.0	71	127	40 x 40 x 3.8
A-TM 6.0-127-1.4 HR2	6.0	15.4	53.0	70	127	40 x 40 x 4.2
A-TM 3.9-127-1.4	3.9	15.4	35.0	73	127	40 x 40 x 5.1
A-TM 3.9-127-1.4 HR1	3.9	15.4	35.0	71	127	40 x 40 x 4.8
A-TM 3.9-127-1.4 HR2	3.9	15.4	35.0	70	127	40 x 40 x 5.1

4 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

4.1. Конструювання активних систем охолодження світлодіодних матриць

Термін служби світлодіодних матриць залежить від напівпровідникового матеріалу, а також від співвідношення між струмом живлення та світловим

потоком що випромінюється. Нагрів буде тим більшим, чим більшою буде потужність матриці. При постійно зростаючих потужностях матриць, пасивного охолодження може не вистачити. Очевидно, що в цьому випадку потрібно використовувати активне охолодження. Існує безліч варіантів активного охолодження - від вентиляторів до водяного охолодження.

Якщо застосування активного охолодження неминуче, слід врахувати те, що світлодіодні матриці можуть працювати протягом десятків тисяч годин. Тому, слід передбачити наявність системи захисту від перегріву в разі виходу з ладу пристроїв активного охолодження. Інакше, їх вихід з ладу практично відразу ж спричинить вихід з ладу світлодіодної матриці через перегрів. Крім терміну служби, важливими параметрами є ефективність, надійність, низький рівень шуму, ціна, зручність при обслуговуванні, споживана потужність. Компанії виробники для забезпечення ефективної і надійної експлуатації світлодіодного пристрою забезпечують необхідне відведення тепла від контактної площадки світлодіодної матриці в оточуюче середовище. В залежності від величини потужності що відводиться, використовуються декілька можливих способів (див. табл 4.1). Найчастіше пристрої активного охолодження вимагають додаткового живлення, це призводить до зниження ККД системи в цілому.

До світильників на основі світлодіодних матриць пред'являються досить серйозні вимоги по і масогабаритних параметрах. Зокрема, при проектуванні системи охолодження потрібно врахувати її кінцеву вагу, вартість, теплові параметри, можливість подальшого виробництва.

Таблиця.4.1 - Способи активного охолодження світлодіодних матриць

Тип	Теплова потужність, Вт	Опис
Рідинне охолодження	<200	Висока вартість. Складність інтеграції в освітлювальну систему. Необхідне додаткове живлення.
Вентилятор	<170	Монтується безпосередньо на радіатор. Створює високий рівень шуму.
Теплові труби	<140	Переносять тепло в інше місце. Використовуються разом з іншими системами охолодження.

Термоелектричне охолодження	<80	Довгий термін служби. Безшумний. Можливість регулювання температури об'єкта в широких межах. Необхідне додаткове живлення.
Струйне охолодження SynJet	<80	Аналогічне до кулера, але працює тихіше і має високу надійність.

4.1.1 Системи охолодження на базі активного радіатора

При розсіюванні потужностей більших 15...20 Вт або при необхідності оптимізації розмірів тепловідведення радіатор можна доповнити елементом примусового повітряного обдування. Найбільш типове рішення - доповнення радіатора з вентилятором. Вентилятор в залежності від способу застосування може покращити тепловідвід на 40%. Для цього використовують спеціально розроблені голчасті радіатори.

Постачальники радіаторів для світлодіодів вказують графічні залежності теплового опору виробів в документації до них. Користуючись наданими виробником графіками, по розрахункових значеннях теплового опору користувач може визначити параметри радіатора для конкретного застосування. Графічна залежність теплового опору конкретного радіатора в залежності від швидкості потоку повітря представлена на рисунку.

Однак, вентиляторне охолодження пов'язане з шумом. Електродвигун і сам вентилятор створюють звукові хвилі, які небажані в багатьох випадках. Наприклад, при освітленні житлових приміщень, концертних залів, учбових аудиторій і т.п. Проте, в даний час існує ряд методів вентиляції, які передбачають використання низькооборотних електродвигунів на радіаторі з використанням спеціального кронштейна оснащеного гумовими опорами.

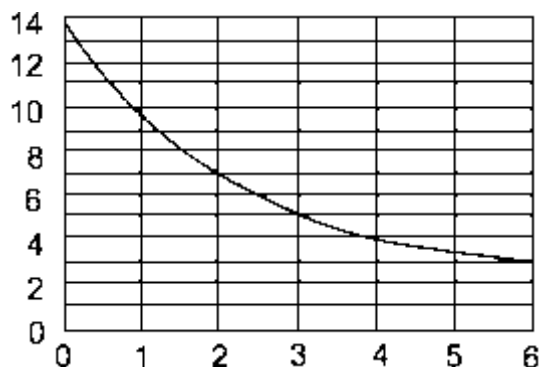


Рис. 4.1 - Залежність теплового опору радіатора Θ (К/Вт) від швидкості потоку повітря v (м/с)

Гумове кріплення послаблює механічний зв'язок, перешкоджає поширенню звукових хвиль і зменшує шум. Високоякісні вентиляторні електродвигуни мають суттєво меншу частоту відмов, а їх середній термін експлуатації складає прилижно 200 тис. годин, що переважає розрахунковий термін експлуатації світлодіода. Деякі електродвигуни передбачають можливість керування за допомогою широтно імпульсної модуляції і тому особливо добре підходять для використання в вентиляторах. До інших переваг активної вентиляції, крім можливості роботи при низьких температурах, є менше забруднення повітря пилом, а також більш однорідний розподіл тепла при частому вмиканні і вимиканні.



Рис. 4.2 - Конструкція системи охолодження світлодіодної матриці на базі радіатора та вентилятора

4.1.2 Системи охолодження на базі термоелектричних модулів

Збільшення потужності світлодіодних матриць і ступеня інтеграції напівпровідникових джерел світла призводить до збільшення теплових потоків, з якими традиційні системи тепловідведення не завжди справляються. В даний час для підвищення інтенсивності охолодження потужних світлодіодних матриць в системах відводу тепла активно застосовуються термоелектричні модулі охолодження (ТЕМО). ТЕМО складається з послідовно з'єднаних напівпровідників p -і n -типу, що утворюють pn -і np -переходи. Кожен з таких переходів має тепловий контакт з однією із двох металевих пластин. У результаті

проходження електричного струму певної полярності утворюється перепад температур між пластинами модуля: одна пластина охолоджується, інша нагрівається і служить для відводу тепла.

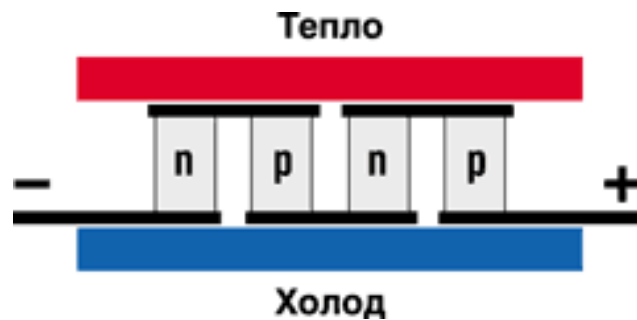


Рис. 4.5 - Схема використання напівпровідників n - і p -типу в термоелектричних модулях охолодження.

По суті ТЕМО виступає як тепловий насос, перекачуючи тепло від холодної пластини до гарячої. Гаряча пластина ТЕМО охолоджується повітряним або водяним охолодувачем. Як будь-який тепловий насос, він описується формулами термодинаміки. Тому ТЕМО можна назвати не тільки термоелектричними, але і термодинамічними модулями. На рисунку зображений типовий напівпровідниковий термоелектричний модуль охолодження (модуль Пельтьє).

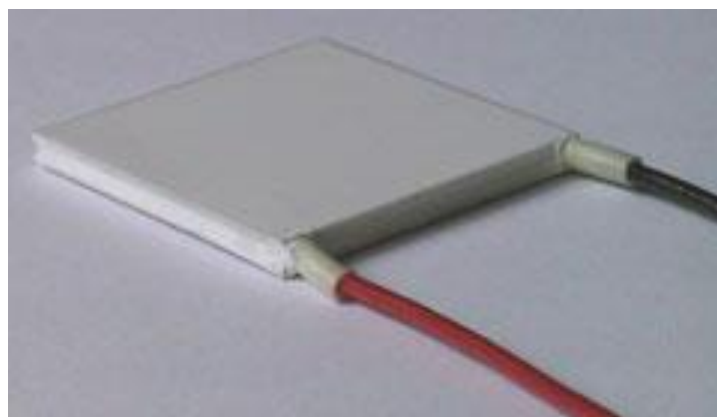


Рис. 4.6 - Зовнішній вигляд термоелектричного модуля охолодження

Застосування ТЕМО наділяє тепловідвідну систему функцією охолодження, тобто дає можливість досягати температури p - n -переходу нижчої ніж температура навколишнього середовища. Термоелектричні системи охолодження мають ряд переваг в порівнянні з іншими системами охолодження, а саме: високу надійність,

відсутність рухомих частин, компактність, невелику вагу, малу інерційність, безшумність роботи.

Використання ТЕМО для охолодження напівпровідникових джерел світла робить їх істотно більш ефективними в порівнянні із стандартними охолоджувачами на основі традиційних радіаторів і вентиляторів. Однак у процесі конструювання та використання охолоджувачів з ТЕМО необхідно враховувати ряд специфічних особливостей, що впливають з конструкції модулів та їх принципу роботи. Велике значення має потужність модуля Пельтьє, яка, як правило, залежить від його розміру і від кількості і параметрів використовуваних в ньому пар напівпровідників p -і n -типу.



Рис 4.7 - Конструкція системи охолодження світлодіодної матриці на базі термоелектричного модуля та активного радіатора

Модуль малої потужності не здатний забезпечити необхідний рівень охолодження, що призводить до порушення працездатності світлодіодного елемента із-за перегріву. Однак застосування модулів дуже великої потужності може знизити температуру холодної пластини до рівня конденсації вологи з повітря, що може привести до коротких замикань в електричному колі світлодіода.

Таблиця 4.2 - Теплопровідність матеріалів що використовуються

Матеріал	Теплопровідність, Вт/(м·К)
Повітря	0.024

Термопаста/епоксидні смоли	0.1...10
Вода	0.58
Теплопровідні полімери	3...20
Нержавіюча сталь	16
Кераміка	15...40; 100...200
Алюміній	120...240
Мідь	401

5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

5.1. Світлодіодні матриці для систем освітлення

В розділі наведена інформація про основні параметри світлодіодних матриць серій CXA і CXA2 (CXV). Особливістю цих матриць є висока питома щільність світлового потоку, що дозволяє при мінімальних витратах реалізувати як окремі світильники, так і системи освітлення різного призначення. До складу серії CXA2 входять світлодіодні матриці XLamp CXA2 Studio з високим індексом передачі кольору. Вони призначені для застосування у фотографії, кінематографії і телебаченні.

Світлодіодні матриці CXA і CXA2 з білим кольором свічення є найбільш потужними приладами освітлювального класу, в яких поєднуються:

- велика світловіддача;
- високий ККД;
- зручність застосування.

Конструкція матриць оптимізована для спрощення конструкції світильників та зниження собівартості систем освітлення. Витрати на розробку і габарити світильників, побудованих на основі світлодіодних матриць, істотно менші, від аналогічних світильників на дискретних світлодіодах.

Світловий потік найменших за розміром матриць серії СХА становить близько 300÷1000 лм, а найбільших - понад 17000 лм. Це сприяє їх оптимальному вибору як для застосування в світильниках промислового обладнання, так і в системах освітлення вулиць, площ, складів та ін. В більш пізніх модифікаціях матриць серії СХА2 (СХВ) максимальний світловий потік збільшений до 18000 лм. Випускаються матриці серії СХА з колірною

температурою 2700, 3000, 3500, 4000, 5000, 5700 і 6500 К за стандартом ANSI, а також 4000 і 5000 К - за класифікацією EasyWhite.

Нова лінійка світлодіодних матриць сімейства СХА2, що випускається компанією Cree, дозволяє знизити вартість пристроїв і систем освітлення та підсвічування завдяки підвищеній енергоефективності цих виробів. Матриці виготовляються по карбідокремнієвій технології SC5 Technology™. У складі серій є світлодіоди з індексом передачі кольору (CRI) більше 95.

Колірна температура матриць СХА2 варіюється від 2700 до 6500 К, а індекс передачі кольору (CRI) становить 70, 80 або 90. За форм-фактору вони повністю ідентичні светодиодам СХА.

Світлодіоди серії СХА можна умовно розділити на три групи:

Світлодіоди серії СХА можна умовно поділити на три групи:

- світлодіоди з великою густиною світлового потоку [1];
- світлодіоди із стандартною густиною світлового потоку [2,3];
- світлодіоди із діаметром випромінювача до 14 мм;
- світлодіоди із діаметром випромінювача понад 14 мм.





5.2 Порівняльна характеристика світлодіодних матриць

Параметри світлодіодних матриць серії СХА з високою щільністю світлового потоку (HD) наведені з табл. 3.1, а зі стандартною щільністю світлового потоку - в табл. 5.2 і табл.5.3.





Для більшості матриць цієї серії компанія Cree надає результати випробувань, проведених протягом 6000 годин, як регламентовано документом LM-80. При цьому розрахований за методикою TM-21 термін їх служби L90 (навіть при температурі 105 ° С) перевищує 4 роки безперервної роботи. Області

застосування світлодіодів серії СХА: спотові і трекові світильники для систем зонального освітлення ретрофітніе лампи спрямованого і ненаправленого світла, в тому числі PAR-лампи (Parabolic Anodized Reflector-з параболічним анодованим рефлектором) замість ламп розжарювання, люмінесцентних та металогалогенних ламп та ін.




Таблиця 5.1 - Параметри світлодіодів серії СХА з високою густиною світлового потоку.

Параметр				
Тип світлодіоду	CXA1310	CXA1520	CXA1850	CXA2590
Розміри, мм	13.35*13.35	15.85*15.85	17.85*17.85	23.85*23.85
Діаметр випромінювача,мм	6	9	12	19
Світловий потік, лм	900...2000	1000...3800	2000...8300	5900...13500
Пряма напруга, В	17.8 35.6	35	35	69
Прямий струм, А (тип.)	0.7 0.35	0.5	1.4	1.2
Прямий струм, А (макс.)	1.05 0.525	0.9	2.1	1.8
Споживана потужн., Вт(тип/макс)	12.5/20	17.5/33	42/78	83/130

Таблиця 5.2 - Параметри світлодіодів серії СХА з діаметром випромінювача до 14мм.



Параметр									
Тип світлодіода	CXA 1304			CXA 1507	CXA 1510	CXA 1512	CXA 1816	CXA 1820	CXA 1830
Розміри, мм	13.35*13.35			15.85*15.85			17.85*17.85		
Діаметр випромінювача, мм	6			9			12		19
Світловий потік, лм	250...1050			500...1700	500...1900	1000...2500	1200...4050	1800...4400	2050...6500
Пряма напруга, В	9.0	18	36	17.5/35		18.2/36.4	36.2	36.2	36.4
Прямий струм, А (тип.)	0.4	0.2	0.1	0.4/0.2	0.5/0.25	0.7/0.35	0.45	0.55	0.8
Прямий струм, А (макс.)	1	0.5	0.25	0.75/0.35	0.9/0.45	1.2/0.6	0.9	1.05	1.4
Споживана потужність, Вт (тип/макс)	3.7/10			7.3/14	9/16	13/24	16/37	20/42	30/55

Таблиця 5.3 - Параметри світлодіодів серії CXA з діаметром випромінювача понад 14мм.

Параметр							
Тип світлодіода	CXA2520	CXA2530	CXA2540	CXA3050	CXA3070	CXA3590	
Розміри, мм	23.85*23.85			27.35*27.35		34.85*34.85	
Діаметр випромінювача, мм	19			23		30	
Світловий потік, лм	1000...5600	2000...7000	3500...9200	3500...11300	4000...12500	5500...17500	
Пряма напруга, В	35	36.4	36.2	36	38.5	38.5	77
Прямий струм, А (тип./макс)	0.55/1.25	0.8/1.6	1.1/2.1	1.4/2.5	1.93/2.8	2.4/3.6	1.2/2.8
Споживана потужність, Вт (тип/макс)	20/48	29/64	40/84	51/99	74/116	93/151	93/151





Для світлодіодних матриць серії СХВ збільшення ефективності ($лм/Вт$) для кожної серії в порівнянні з матрицями першого покоління складає в середньому 15 ... 20% при номінальному струмі управління і до 33% - при максимальному. Параметри світлодіодних матриць серії СХВ з високою щільністю світлового потоку (HD) наведені в табл. 3.4 [4]. Порівнюючи параметри HD-матриць СХА і СХВ, можна переконатися в тому, що при схожих значеннях споживаної потужності нові матриці забезпечують істотно більший світловий потік. Номінальні струми в матрицях обох серій однакові, а ось максимальні в серії СХВ більше приблизно в 1.3 рази.

Таблиця 5.4 - Параметри світлодіодних матриць серії СХВ з високою густиною світлового потоку




Параметр		
Тип світлодіода	СХВ1310	СХВ1520
Розміри, мм	13.35*13.35	15.85*15.85
Діаметр випромінювача, мм	6	9
Світловий потік, лм	1000...3400	1800...6500
Пряма напруга, В	16.5	33
Прямий струм, А (тип.)	0.7	0.35
Прямий струм, А (макс.)	1.4	0.7
Споживана потужність, Вт(тип/макс)	12.6/24	16.5/49

В табл. 5.5 і табл.5.6 наведені параметри матриць СХВ із стандартною густиною світлового потоку [5, 6].

Таблиця 5.5 - Параметри світлодіодів серії СХВ з діаметром випромінювача до 14мм

Параметр									
Тип світлодіода	CXB1304			CXB1507	CXB1512	CXB1816	CXB1820	CXB1830	
Розміри, мм	13.35*13.35			15.85*15.85		17.85*17.85			
Діаметр випромінювача, мм	6			9		12		14	
Світловий потік, лм	300... 1100			600... 1950	600... 3100	1400... 4500	1950... 5500	2100...7200	
Пряма напруга, В	8.6	17.3	34.5	17.3/34.5	17.2/34.3	35	35	35	
Прямий струм, А (тип.)	0.4	0.2	0.1	0.4/0.2	0.7/0.35	0.45	0.55	0.8	
Прямий струм, А (макс.)	1	0.5	0.25	0.75/0.35	1.2/0.6	0.9	1.05	1.4	
Споживана потужність, Вт(тип/макс)	3.5/10			7/14	12/22	16/34	20/40	28/53	

Таблиця 5.6 - Параметри світлодіодів серії CXB з діаметром випромінювача понад 14мм

Параметр						
Тип світлодіода	CXB520	CXB2540	CXB3050	CXB3070	CXB3590	
Розміри, мм	23.85*23.85		27.35*27.35		34.85*34.85	
Діаметр випромінювача, мм	19		23		30	
Світловий потік, лм	2500... 8000	3500... 9600	5500... 12500	4000... 14000	8000... 18000	
Пряма напруга, В	35	34.8	34.8	36	36	72
Прямий струм, А (тип./макс)	0.8/1.6	1.1/2.1	1.4/2.5	1.9/2.8	2.4/3.6	1.2/1.8
Споживана потужність, Вт(тип/макс)	28/61	39/79	49/93	69/107	87/137	87/137

Порівнюючи параметри матриць з таблиць 2 і 3 (СХА) з даними табл. 5.5 і табл 5.6 (СХВ) нескладно помітити, що потужність, яка розсіюється матрицями серії СХВ, трохи менша ніж у матриць серії СХА, а от максимальний світловий потік істотно більший. Оскільки матриці серії СХВ мають таке ж конструктивне виконання і габаритні розміри, як і серії СХА, то цим забезпечується сумісність рефлекторів, радіаторів та інших аксесуарів для обох серій світлодіодних матриць.

З огляду на те, що технології виготовлення підкладки і люмінофора для світлодіодних матриць СХА і СХВ однакові, стандарт LM-80 допускає використання існуючих для світлодіодів серії СХА даних випробувань на деградацію світлового потоку для прогнозування терміну служби матриць СХВ.

Для застосування на телебаченні і в кінематографії компанія Cree розробила матриці XLamp CXA2 Studio LED, які оптимізовані для зйомок кінофільмів і фотографії [7]. Індекс CRI 90+ для колірних температур 5700 ... 3000 К відповідає калібрувальним колірним температурам ПЗС-матриць які використовуюються в фото та відеотехніці.



Рис. 5.1 - Світлодіодна матриця XLamp® CXA2 Studio

Основні характеристики XLamp CXA2 Studio приведені нижче:

- білий колір світіння з колірною температурою 5600 і 3200 К, індекс CRI дорівнює 90+;
- пряме падіння напруга 36 або 72 В;
- максимальний струм 3.6 А (36 В) і 1.8 А (72 В);
- кут випромінювання 115 °;
- наявність точки кріплення термопари;
- габаритні розміри 34.85'85 мм.;

У табл. 3.7 наведені значення індексу CRI і світлового потоку для XLamp CXA2 Studio.

Таблиця 5.7. Залежність світлового потоку матриць XLamp CXA2 Studio від температури

Колірна температура, К	Індекс CRI		Мінімальний світловий потік, лм		
	мін.	макс.	Група	при t=85C	при t=85C
5600	93	95	BB	9500	10545
3200			BD	10000	11100
			AB	8500	9435
			AD	9000	9900

Графік відносної спектральної потужності матриці XLamp® CXA2 Studio приведені на рис. 5.2.

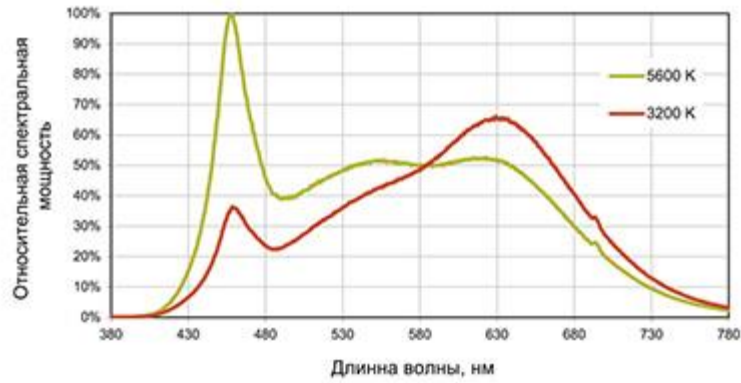


Рис. 5.2 - Графік залежності відносної спектральної потужності матриці XLamp CXA2 Studio

Компанія Cree розробила рекомендації щодо застосування світлодіодних матриць серії CXA і CXB [8], в яких наведено приклади кріплення світлодіодів на радіаторах (рис. 3.3), точки вимірювання температури кристала, приклади кріплення світлодіодів на різних радіаторах тощо.

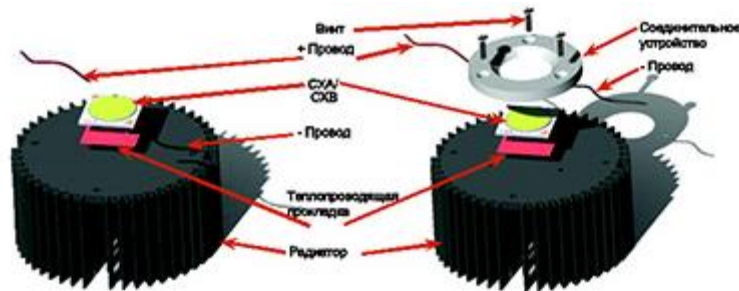


Рис. 5.3 - Приклади кріплення світлодіодних матриць серії CXA і CXB на радіаторах.

Дотримання рекомендацій дозволяє забезпечити гарантовані компанією Cree параметри матриць і забезпечить тривалий термін їх безвідмовної експлуатації. На рис. 3.4 наведені деякі типи з'єднувачів і рефлекторів, які рекомендує компанія Cree для створення світильників різного призначення з використанням матриць CXA і CXB.



Рис.5.4 - З'єднувачі і рефлектори для матриць СХА і СХВ

6. ОБГРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

6.1 Соціально-економічна ефективність нової техніки

Управління виробництвом, як процес безперервної і планомірної дії на колектив людей з метою організації їх виробничої діяльності, завжди пов'язане з виробленням і виконанням певних рішень, що складають вихідну управлінську функцію. Серед останніх особливе місце займають інженерні рішення. Їх можна віднести до професійних рішень, тобто до рішень найбільш високого класу, що підготовлені інженерними кадрами на основі наукового аналізу і узагальнення відповідної інформації. Рішення, що приймаються суб'єктами управління, повинні відповідати певним вимогам. Останні зводяться до того, що кожне інженерне рішення повинно бути науково обґрунтованим, своєчасним, погодженим по всіх елементах, таким що не суперечить раніше прийнятим рішенням, чітко і ясно викладеним.

Створення, освоєння випуску і застосування нової техніки в кінцевому підсумку завжди переслідує конкретні економічні й соціальні цілі. Тому використовується категорія соціально-економічної ефективності нової техніки, що виражає співвідношення корисного соціально-економічного результату і затрат

суспільної праці для його досягнення. Соціально-економічний ефект включає два взаємопов'язаних ефекти: економічний і соціальний. Економічний ефект нової техніки характеризується підвищенням якості засобів виробництва і предметів споживання, економією всіх видів ресурсів, зниженням собівартості продукції, ростом прибутків.

Соціальні результати використання нової техніки виражаються у покращенні умов праці і побуту працюючих, посиленні творчого характеру трудових процесів, охорони здоров'я людини і навколишнього середовища.

Економічний ефект служить матеріальною основою для проявлення різноманітних соціальних результатів нової техніки. В цей же час вирішення за допомогою нової техніки соціальних проблем розвитку суспільства впливає на ріст економічних результатів виробництва (підвищення продуктивності праці й якості продукції, краще використання суспільних ресурсів).

Економічний та соціальний ефекти від впровадження нової техніки та технологій можуть мати різнонаправлений характер, наприклад, досягнення суттєвого економічного ефекту може супроводжуватись негативною дією на навколишнє середовище. Це потрібно враховувати при проведенні економічного обґрунтування і оцінці технічних нововведень. Тобто техніко-економічна оцінка продукції без урахування соціального ефекту не може вважатись достатньою для прийняття рішення про впровадження нової техніки чи технологій.

6.2 Економічний ефект і строк окупності додаткових капіталовкладень в напівпровідникові системи освітлення

Розрахунок експлуатаційних витрат проведено для варіантів систем освітлення:

а) на основі світильника ЖСП-07 ВОТ 600 з лампою потужністю *600 Вт* — базовий варіант;

б) на основі світильника ATLANT INDUSTRY LED з світлодіодними модулями потужністю *270 Вт*.

В розрахунку відображені статті витрат: матеріальних ресурсів, енергетичних ресурсів та обслуговування обладнання.

Річний розхід електроенергії розраховується за формулою:

$$PE = P_n \cdot N_{cv} \cdot P\Phi \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (6.1)$$

де P_n — номінальна потужність світлодіодної лампи, Вт;

N_{cv} — загальна кількість світлодіодних ламп.

Річні витрати на електроенергію визначаємо за формулою:

$$BE = PE \cdot C_k, \quad (6.2)$$

де C_k — ціна однієї кВт·год, грн.

Розрахунок витрат на електроенергію приведений в табл. 6.1.

Табл. 6.1 — Річні витрати на електроенергію

Параметри системи освітлення	CO1 600 Вт ЕПРА	CO2 270 Вт
Загальна кількість світильників, шт.	16	30
1	2	3
1	2	3
Активна потужність світильника, Вт	660	270
Річний фонд роботи системи, годин	3500	3500
Річний розхід електроенергії, кВт·год	36960	24427
Ціна кВт·год електроенергії, грн.	0,9318	0,9318
Річні витрати на електроенергію, грн.	34 439,33	22 761,01

Повні капіталовкладення в обладнання розраховуємо за формулою:

$$PK = (C_{cv} + C_l) \cdot N_{cv} \cdot (1 + K_{mm}), \quad (6.3)$$

де C_{cv} , C_l — оптова ціна світильника та лампи відповідно, грн.;

K_{mm} — коефіцієнт, що враховує транспортно-монтажні витрати, $K_{mm} = 0,1$.

Визначення повних капіталовкладень приведена в табл. 4.2.

Табл. 6.2 — Капіталовкладення в обладнання систем освітлення

Капіталовкладення в обладнання	<i>CO1 600 Вт ЕПРА</i>	<i>CO2 270 Вт</i>
Кількість світильників, шт	16	30
Ціна світильника, грн.	1014	2 075
Кількість ламп, шт	16	-
Ціна лампи, грн.	400	-
K_{mm}	0,1	0,1
Всього, грн.	24 886	68 475

Додаткові капіталовкладення, які необхідні для варіантних систем освітлення, знаходимо як різницю між варіантними і базовими

$$\Delta K = K_v - K_b, \quad (6.4)$$

де K_v , K_b — капіталовкладення в базу та варіанту системи освітлення відповідно, грн.

Тоді строк окупності додаткових капіталовкладень можна визначити за формулою:

$$T_{ок} = \frac{\Delta K}{\Delta E}, \quad (6.5)$$

де ΔE — річний економічний ефект.

Всі отримані дані стосовно економічної ефективності додаткових капіталовкладень в варіантні системи освітлення заносимо в табл. 4.3.

Табл. 4.3 – Показники економічної ефективності додаткових капіталовкладень

Економічний ефект і строк окупності додаткових капіталовкладень	CO1 600 Вт ЕПРА	CO2 270 Вт
Капіталовкладення в обладнання, грн.	24 886	94 875
Додаткові капіталовкладення, грн.	-	43 589
Річні експлуатаційні витрати, грн.	34 439,33	22 761,01
Зміна річних експлуатаційних витрат, грн.	-	11 678,32
Річний економічний ефект, грн.	-	11 678,32
Строк окупності, років	-	3,73

Як видно з табл. 4.3 світлодіодна система освітлення CO2 повертає додаткові капіталовкладення за 3,73 року. З цього часу витрати на базовий варіант перевищать додаткові капіталовкладення і почнеться пряма економія матеріальних ресурсів.

7. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

7.1 Охорона праці

7.1.1 Інфрачервоне випромінювання та особливості його дії на організм людини

До інфрачервоних випромінювань належать електромагнітні випромінювання (ЕМВ) невидимої частини спектра, що знаходяться в діапазоні довжини хвилі $\lambda=0.78-1000$ мкм.

Джерелом інфрачервоного випромінювання є будь-яке тіло, температура поверхні якого перевищує температуру абсолютного нуля (-273°C). Спектральний склад випромінювань інфрачервоного діапазону залежить від температури поверхні тіла. Чим вища температура тіла, тим коротша довжина випромінюваної електромагнітної хвилі. Вплив інфрачервоного випромінювання на людину залежить від довжини хвилі, що випромінюється, й від глибини проникнення променів. В залежності від цього інфрачервоне випромінювання поділяють на три ділянки: А, В, С.

А – ближня (короткохвильова) – характеризується високою проникністю крізь шкіру $\lambda=0.78-1.4$ мкм;

В – середня (середньохвильова) – поглинається шарами дерми та підшкірною жировою тканиною $\lambda=1.4-3.0$ мкм;

С – далека (довгохвильова) – поглинається епідермісом $\lambda=3.0-1000$ мкм.

Інфрачервоне випромінювання, що потрапляє на тіло людини, впливає, перш за все, на незахищені його ділянки (обличчя, руки, шию, груди, очі). Основним його проявом є тепло, яке проникає на деяку глибину в тканини. Тіло людини може витримувати інфрачервоне випромінювання певної

густини потоку енергії, яка вимірюється в $\text{Вт}/\text{м}^2$. Так, при густині потоку випромінювання $280-260 \text{ Вт}/\text{м}^2$ відчувається ледь помітне тепло. Його людський організм може витримувати тривалий час без будь-яких змін у функціональному стані. При густині потоку випромінювання $560-1050 \text{ Вт}/\text{м}^2$ настає межа, коли людина не витримує дії інфрачервоного випромінювання. Знаходження людини протягом тривалого періоду часу в зоні інфрачервоного випромінювання такої потужності, як і при дії високих температур, впливає на центральну нервову систему, серцево-судинну систему (збільшується частота серцебиття, змінюється артеріальний тиск, прискорюється дихання), порушує тепловий баланс в організмі, що призводить до посиленого потовиділення, втрати необхідних для

організму людини солей. Діючи на очі, інфрачервоне випромінювання викликає помутніння кришталика, опік сітківки, кон'юнктивіти. Нормована допустима густина потоку енергії інфрачервоного випромінювання на робочому місці залежить від місця куди падає випромінювання.

Для ділянки А нормована густина потоку енергії не повинна перевищувати 100 Вт/м^2 при опроміненні 50% тіла і більше.

Для ділянки В - 120 Вт/м^2 при опроміненні поверхні тіла в межах 25-50%.

Для ділянки С - 150 Вт/м^2 , якщо опромінюється не більше 25% поверхні тіла.

Для захисту людини від інфрачервоного випромінювання при перебуванні в приміщеннях з установками для імпульсного опромінення рослин використовують декілька способів.

Захист відстанню. Цей спосіб полягає в тому, що при віддаленні від джерела випромінювання густина потоку енергії зменшується пропорційно відстані до нього.

Захист часом передбачає обмеження перебування людини в зоні інфрачервоного випромінювання.

Теплоізоляція джерела випромінювання передбачає застосування конструкторських та технологічних рішень, направлених на теплоізоляцію випромінювальної поверхні матеріалами (скловата, цегла), що знижують температуру поверхні випромінювання.

Екранування джерела випромінювання полягає у використанні непрозорих або напівпрозорих екранів, які можуть бути відбиваючими або теплопоглинаючими. Для охолодження використовують водяні завіси з водяної плівки.

Індивідуальні засоби захисту: спецвзуття, спецодяг, який витримує високі температури і захищає від інфрачервоних випромінювань, який водночас є м'яким і повітронепропускним (брезент, сукно). Для захисту очей використовують спеціальні окуляри зі скельцями жовто-зеленого або синього кольору.

7.1.2 Дія електромагнітного випромінювання на організм людини

Електромагнітні поля негативно впливають на організм людини, яка безпосередньо працює з джерелом випромінювання, а також на населення, яке мешкає поблизу джерел випромінювання. Тому в діапазоні промислових частот (у тому числі 50 Гц) допустимо розглядати вплив на біологічний об'єкт електричної і магнітної складових електромагнітного поля роздільно. В будь-якій точці ЕМП промислової частоти енергія магнітної складової поля, яка поглинається тілом людини, майже в 50 разів менша від енергії електричної складової цього поля. Це дає змогу зробити висновок, що в діапазоні промислових частот дією магнітної складової поля на біологічний об'єкт можна знехтувати. Тобто, негативний вплив на організм обумовлений лише електричною складовою поля.

Ступінь впливу електромагнітних випромінювань на організм людини залежить від діапазону частот, тривалості опромінення, характеру опромінення, режиму опромінення, розмірів поверхні тіла яке опромінюється, та індивідуальних особливостей організму.

У результаті дії ЕМП на людину можливі гострі та хронічні форми порушення фізіологічних функцій організму. Ці порушення виникають в результаті дії електричної складової ЕМП на нервову систему, а також на структуру кори головного та спинного мозку, серцево-судинну систему.

У більшості випадків такі зміни в діяльності нервової та серцево-судинної системи мають зворотній характер, але в результаті тривалої дії вони накопичуються, підсилюються з плином часу, але, як правило, зменшуються та зникають при виключенні впливу та поліпшенні умов праці. Тривалий та інтенсивний вплив ЕМП призводить до стійких порушень та захворювань.

На початку 60-х років у науково-технічній літературі з'явилися перші відомості про те, що люди, опромінені імпульсом НВЧ коливань, можуть постійно чути якийсь звук. Залежно від тривалості та частоти повторень імпульсів цей звук

сприймається як щебет, цвірінчання чи дзюркіт у деякій точці всередині чи зовні голови. Це явище викликало інтерес вчених, які розпочали систематичні дослідження на людях та тваринах.

Сумісну дію випромінювань широкого діапазону можна класифікувати як окрему радіохвильову хворобу. Тяжкість її наслідків знаходиться у прямій залежності від напруженості ЕМП, тривалості впливу, фізичних особливостей різних діапазонів частот, умов зовнішнього середовища, а також від функціонального стану організму, його стійкості до впливу різних чинників можливостей адаптації.

У результаті дії на організм людини електромагнітних випромінювань в діапазоні 30 кГц - 300 МГц спостерігається загальна слабкість, підвищена втома, сонливість, порушення сну, головний біль та біль в ділянці серця. З'являється роздратованість, втрачається увага, сповільнюються рухово-мовні реакції. Виникає ряд симптомів, які свідчать про порушення роботи окремих органів - шлунку, печінки, підшлункової залози. Погіршуються харчові та статеві рефлексії, діяльність серцево-судинної системи, фіксуються зміни показників білкового та вуглеводного обміну, змінюється склад крові, зафіксовані зміни на рівні клітин.

Із ростом інтенсивності відбуваються електрокардіографічні зміни, при хронічному впливі - тенденція до гіпотонії, до змін у нервовій системі. Потім спостерігається прискорення пульсу, коливання об'єму крові.

При інтенсивності 6 мВт/см^2 помічені зміни у статевих залозах, у складі крові, помутніння кришталика, зміни у здатності згортання крові, умовно-рефлекторній діяльності, вплив на клітини печінки, зміни у корі головного мозку.

Випромінювання інтенсивністю до 100 мВт/см^2 викликають стійку гіпотонію, стійкі зміни серцево-судинної системи, двосторонню катаракту. Подальше опромінення помітно впливає на тканини, викликає больові почуття. Якщо інтенсивність перевищує 1 Вт/см^2 , це спричинює дуже швидко втрату зору, що є одним із серйозних ефектів дії НВЧ на організм людини. На більш низьких частотах такі ефекти не відбуваються, і тому їх треба вважати специфічними для

НВЧ діапазону. Ступінь пошкодження залежить, в основному, від інтенсивності та тривалості опромінення.

Інтенсивне НВЧ опромінення відразу викликає сльозотечу, подразнення, звуження зіниці ока. Після короткого (1-2 доби) прихованого періоду спостерігається погіршення зору, що посилюється під час повторного опромінення і свідчить про кумулятивний характер пошкоджень. Спостереження за людьми доводять існування механізму відбудови пошкоджених клітин, який вимагає тривалого часу (10-20 діб). Зі зростанням часу та інтенсивності впливу пошкодження набувають незворотного характеру.

У разі прямого впливу на око випромінювання відбувається пошкодження рогівки. Але серед усіх тканин ока найбільшу чутливість в діапазоні 1...10 ГГц має кришталік. Сильні пошкодження кришталіка зумовлені тепловим впливом НВЧ (при щільності потоку енергії понад 100 мВт/см²). За малої інтенсивності помутніння спостерігаються тільки у задній ділянці, за великої - по всьому об'єму кришталіка.

Для попередження професійних захворювань, які виникають при перебуванні у приміщеннях імпульсного опромінення рослин, відповідно до ГОСТ 12.1.006-84 «ССБТ. Електромагнітне поле радіочастот» встановлені гранично допустимі рівні електромагнітних випромінювань, які дорівнюють $E_{\text{пд}}=500$ А/м, $H_{\text{пд}}=50$ А/м, де $E_{\text{пд}}$ і $H_{\text{пд}}$ — значення напруженості електричного і магнітного полів відповідно. Рівні ЕМП необхідно контролювати не рідше 1 разу на рік. Якщо вводиться в дію новий об'єкт або здійснюється реконструкція старих об'єктів, то заміри рівня електромагнітних випромінювань проводяться перед введенням їх в експлуатацію.

7.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

7.2.1 Методи захисту світлотехнічної апаратури від дії електромагнітного імпульсу блискавок

Дія електромагнітного імпульсу блискавки на металеві елементи будівельних конструкцій, електричні й електронні системи є вторинною дією блискавки.

Вторинні дії блискавки пов'язані з дією на об'єкт електромагнітного поля близьких розрядів. Це поле має дві складових: електростатичну та електромагнітну індукції.

Електростатична індукція зумовлена переміщенням зарядів у каналі блискавки. Електростатичний індукційний вплив проявляється у виді імпульсних перенапруг, що виникають на металевих конструкціях об'єкта. Величина імпульсної перенапруги залежить від величини сили струму блискавки, відстані до місця удару, опору заземлення. За відсутності належного заземлення імпульсна перенапруга може сягати сотень кіловольт і створювати небезпеку ураження людей електричним струмом та виникнення іскор між окремими частинами об'єкта.

Електромагнітна індукція зумовлена зміною струму блискавки в часі. Електромагнітна індукція приводить до утворення у металевих контурах об'єкта ЕРС, пропорційної швидкості зміни струму блискавки і площі, охопленої контуром. Протяжні комунікації в сучасних виробничих будівлях можуть утворювати контури, що охоплюють велику площу, в яких є небезпека наведення ЕРС у кілька десятків кіловольт. У місцях зближення протяжних металевих конструкцій, у розривах незамкнутих контурів створюється небезпека перекриттів та іскрінь із можливим розсіюванням енергії близько десятих часток джоуля.

Відповідно до ГОСТ 12.1.004 пожежна небезпека вторинних дій блискавки полягає в іскрових розрядах, що виникають у результаті індукційного й електромагнітного впливу атмосферної електрики на виробниче устаткування, трубопроводи й будівельні конструкції. Енергія іскрового розряду перевищує 250 мДж є достатньою для запалення горючих речовин з мінімальною енергією запалювання до 0.25 Дж.

Також небезпечним є занесення високого потенціалу в будинок по металевих комунікаціях не тільки при прямому влученні блискавки, але і при

розташуванні комунікацій у безпосередній близькості від громовідводу. При недотриманні безпечних відстаней між громовідводами й комунікаціями енергія можливих іскрових розрядів сягає значень 100 Дж і більше, тобто є достатньою для загоряння всіх горючих речовин.

Захист від електростатичної індукції здійснюється приєднанням устаткування до заземлювача для відведення електростатичних зарядів, індукованих блискавкою, в землю. Захист від електромагнітної індукції полягає у встановленні методом зварювання перемичок між протяжними металоконструкціями в місцях їхнього зближення менше, ніж на 10 см. Інтервал між перемичками повинен становити не більше 20 м. Це дає змогу наведеному струму блискавки переходити з одного контуру в інший без утворення електричних розрядів. Захист від занесення високих потенціалів у будівлю здійснюється шляхом приєднання до заземлювача металоконструкцій перед їх введенням у будівлю.

Для влаштування штучних заземлюючих пристроїв використовуються сталеві вертикально закладені у землю труби діаметром від 3 до 5 см і товщиною стінок не менше як 3,5мм, довжиною 2,5...3 м; металеві стержні діаметром 10-12 мм, довжиною до 10м; кутову сталь 40Ч40Ч4, довжиною 2.5-5м. Застосовувати для штучних заземлюючих пристроїв алюмінієві оболонки силових кабелів і неізольовані алюмінієві провідники заборонено.

Таким чином при дотриманні вимог, викладених у ПУЕ-7, щодо улаштування захисту від ЕМІ блискавок, буде збережене світлотехнічне обладнання та його складові, а також життя працівників, які обслуговують цю апаратуру.

8. ЕКОЛОГІЯ

8.1 Джерела електромагнітних полів та методи зменшення їх впливу.

Екологія вивчає проблеми взаємовідносин між живими істотами та умовами їхнього життя. Назва походить від грецьких слів oikos — дім, житло та logos — наука. Рівновага людини з навколишнім світом — це насамперед її

комфортне відчуття себе в ньому. Такий стан передбачає сприятливе поєднання умов життя, як природних, так і соціальних.

Людина — це біологічна істота, тому всі природні фактори та умови у яких вона живе впливають на її здоров'я. Активна трудова діяльність упродовж багатьох тисяч років розвинула й ускладнила взаємозв'язок людини і природи. Лише шляхом пристосування до навколишнього середовища людина залишається жити на Землі. Сьогодні природне середовище, в якому діє людина змінюється швидше порівняно з адаптивністю людини. Це що негативно відбивається на її здоров'ї.

Покоління наших предків жили в тісному спілкуванні з природою. Уклад життя та праці був синхронним із природними режимами. Кожна пора року мала притаманні тільки їй трудову налаштованість і режим життя. Проблема здоров'я людини вирішувалась досить ефективно і просто. Це пояснюється тим, що культура здоров'я складалась в індивідуальній свідомості особистості поступово, під впливом природних умов життя і була важливим елементом загальної культури людини.

Нині вся сукупність факторів діяльності людини, які негативно впливають на її здоров'я, вимагає іншого підходу до проблеми формування здоров'я. Сьогодні люди живуть у режимі виробничого циклу, однаково в будь-яку пору року. Умови життя та праці сучасної людини, безперечно, покращились, але наслідки цього далеко не однозначні.

Забрудненість навколишнього середовища, поряд із токсичними ефектами, таїть у собі небезпеку генетичних змін (на потреби промисловості спалюється 10 млрд. т. палива, у повітря потрапляє біля 20 млрд. т. вуглекислого газу, 300 млн. т. чадного газу, 50 млн. т. окису азоту, сотні млн. т. пилу, велика кількість шкідливих та канцерогенних речовин). Забруднення атмосфери стало великою проблемою для міст. Осідання викидів на крапельках води зумовлює появу димних туманів — смогу. Л. Батонн писав: “Станеться одне з двох, або люди зроблять так, що у повітрі стане менше диму, або дим зробить так, що на Землі стане менше людей”.

Надходження великої кількості окисів азоту та сірки зумовлює появу кислотних дощів, які забруднюють територію на великих відстанях від джерел їхнього викиду. Такі дощі знищують рослини та тварин, пошкоджують людські споруди та конструкції. Промислові викиди в атмосферу фреонів зменшують товщину озонового шару навколо Землі, який захищає живу природу від губної дії ультрафіолетових променів із космосу.

Особливо негативно позначилась на стані здоров'я населення нашої країни аварія на Чорнобильській атомній станції.

Конституційне право на безпечне для життя і здоров'я довкілля (право на екологічну безпеку) тісно пов'язане з правом на життя й охорону здоров'я.

Екологічна ситуація потребує мобілізації всіх урядових та неурядових організацій, усього суспільства на вирішення існуючих проблем. Основні шляхи для цього:

- перехід до матеріало- та енергозберігаючих технологій, а в перспективі до замкнених, безвихідних циклів виробництва;
- раціональне природовикористання з урахуванням особливостей окремих регіонів;
- розширення природно-заповідних територій;
- екологічна освіта та виховання населення.

Вирішення проблеми здоров'я людини закладено в самій людині, у знанні та розумінні нею низки проблем, а також в умінні дотримуватись правил здорового способу життя.

Електромагнітне випромінювання — це процес утворення вільного електромагнітного поля, яке випромінюється зарядженими частинками, що коливаються. Головними джерелами ЕМП є телевізійні ретранслятори, радіолокаційні станції, антени сотового й інших видів радіозв'язку, високовольтні мережі електропередач, комп'ютерна техніка, імпульсні джерела світла тощо.

Якщо інтенсивність ЕМП перевищує вимоги нормативних актів, застосовують різні засоби і способи захисту персоналу. Вибір того чи іншого

способу захисту залежить від робочого діапазону частот, характеру виконуваних робіт та умов опромінення, від параметрів ЕМП і необхідного ступеня захисту.

Найбільшого поширення одержали наступні методи захисту від ЕМП:

1. Зменшення потужності випромінювання джерела сигналу.

Зменшення параметрів випромінювання безпосередньо у самому джерелі досягається раціональним вибором генератора, застосуванням узгоджених навантажень і спеціальних пристроїв - поглиначів потужності (еквівалент антени і навантаження).

2. Захист віддаленістю.

Якщо неможливо послабити інтенсивність опромінення цими методами, використовують захист відстанню шляхом її збільшення. Захист відстанню забезпечується за рахунок механізації й автоматизації виробничих процесів, застосуванням дистанційного управління і спеціальних маніпуляторів, раціональним розміщенням устаткування та робочих місць.

На підставі інструментальних вимірювань характеристик ЕМП для кожного конкретного випадку розміщення апаратури виділяють зони випромінювання, межі яких позначають яскравою фарбою на підлозі.

3. Архітектурно-планувальні рішення.

Діючі установки потужністю понад 10 кВт слід розміщати у спеціально виділених приміщеннях регламентованої площі з капітальними стінами і перекриттями, покритими матеріалами, що поглинають ЕМП радіочастотного діапазону — цеглою, шлакобетоном; а також матеріалами, що здатні відбивати ці випромінювання, наприклад, олійними фарбами. Такі приміщення мають бути обладнані безпосереднім виходом у коридор чи назовні. Для цього підходять кутові приміщення першого й останнього поверхів будинку.

4. Екранування джерел випромінювання та робочих місць.

Екранування - одне з найбільш ефективних і найчастіше застосовуваних засобів захисту від ЕМП.

6. Установлення раціональних режимів роботи.

Коли немає можливості знизити інтенсивність опромінення до нормативних значень, застосовують захист часом, тобто обмежують час перебування персоналу в ЕМП.

7. Застосування індивідуальних засобів захисту.

До них належать переносні парасолі, халати, куртки з каптуром, комбінезони, фартухи з металізованої тканини, які захищають організм людини за принципом сітчастого екрана із заземленням. Наприклад, від дії ЕМП НВЧ застосовують халати радіозахисні, виготовлені з тканини "Щит".

8. Організаційні заходи.

Необхідно регулярно проводити дозиметричний контроль (не менше одного разу на 6 місяців); медогляд (не менше одного разу на рік). Робітникам, що працюють із джерелами ЕМП, має бути надана додаткова відпустка, скорочений робочий день та ін.

8.2 Екологічний вплив електромагнітного опромінення на живі організми

Ступінь біологічного впливу електромагнітних полів на організм людини залежить від частоти коливань, напруженості та інтенсивності поля, тривалості його впливу.

Захворювання, пов'язані з впливом електромагнітних випромінювань малої інтенсивності, проявляються у вигляді граничних нервовопсихічних розладів у поєднанні з синдромом вегетативної дистонії, характерними суб'єктивними розладами, порушеннями у центральній нервовій і серцевосудинній системах, шлунковокишкового тракту, репродуктивної функції, імунного статусу, змінами біохімічних та гематологічних показників крові. Залежно від стадії захворювання виявлені порушення можуть мати стійкий характер і не зникати після припинення контакту з електромагнітним полем. До віддалених наслідків хронічного впливу електромагнітних полів радіочастотного діапазону слід віднести негативний вплив на потомство та синдром раннього старіння організму.

Електромагнітне опромінення людини супроводжується тепловими та нетепловими ефектами в біологічних тканинах і рідинах.

У зоні генерування електромагнітного поля відбувається безперервний взаємний перехід електричного поля в магнітне і навпаки. Електрична компонента ЕМП поглинається передусім у середовищі, де знаходяться полярні молекули чи вільні електричні заряди. У якості акцепторів магнітної компоненти ЕМП можуть виступати гемоглобін і міоглобін, рухомі електричні заряди, що виникають при окислювально-відновлювальних реакціях у процесі клітинного метаболізму, а також вільні радикали, що утворюються під час біохімічних та механікохімічних реакцій, і феромагнітні частинки, які потрапляють у легені людини з повітрям у вигляді пилу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

1. В сучасних світлодіодних матрицях майже 75% підведеної електричної енергії перетворюється в теплову, яка інтенсивно нагріває активну зону приладу.

2. Порушення теплового режиму світлодіодної матриці приводить до перегріву активної зони і значного зниження світлового потоку та яскравості.

3. В умовах високих температур навколишнього середовища для стабілізації теплового режиму СДМ доцільно використовувати термоелектричні модулі охолодження.

4. При даній тепловій потужності СДМ та тепловому опорі системи охолодження існує оптимальна величина струму живлення ТЕМО, при якому температура активної зони матриці досягає мінімуму.

5. При струмах близьких до оптимального, термоелектрична система охолодження дозволяє отримувати нижчі значення температури СДМ ніж традиційні системи.

6. При оптимальному співвідношенні між потужностями ТЕМО та СДМ термоелектрична система охолодження дозволяє знижувати температуру активної зони матриці до температур нижчих, ніж температура навколишнього середовища.

7. Ефективність використання ТЕМО знижується при збільшенні теплової потужності СДМ і сумарного теплового опору системи охолодження.

8. При аналізі ефективності роботи термоелектричної системи охолодження слід керуватися не лише параметрами ТЕМО, але і параметрами всієї системи охолодження в цілому: сумарним тепловим опором, величиною теплового навантаження та режимом роботи ТЕМО.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Светодиоды / Авт.: Шуберт Ф.Е. Издательство: ФИЗМАТЛИТ, 2008. –496 с. ISBN: 978-5-9221-0851-5.
2. Справочная книга по светотехнике / Под ред.. Ю. Б. Айзенберга. 3-е изд. Перераб. И доп. М.: Знак. – 972 с.
3. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур. /Ж.И Алферов // Физика и техника полупроводников. – 1998. – т. 32, – № 1. – С.3-18.
4. Полищук А.А. Обеспечение теплового режима светодиодных ламп при разработке светотехнических устройств. /А.А Полищук // Современная электроника. – 2006. – № 3. – С. 42-45.
5. Давыденко Ю. Высокоэффективные современные светодиоды. / Ю. Давыденко // Современная электроника. – 2004. – № 10. – С. 36-43.
6. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов. / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2005. – № 9. – С. 140-146.
7. Миранович В. Мощные светодиоды: особенности применения, проблемы и методы решения на примере светодиодов компании
8. PROLIGHT OPTO TECHNOLOGY. / В. Миранович, И. Филоненко // Электронные компоненты. – 2007. – № 6. – С. 45-49.
9. В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев Электроника. М: Высш. школа, 1991 г. - 622 с.
10. Староверов К. Системы охлаждения для светодиодов. / К. Староверов // Новости электроники. – 2008. – № 17. – С. 21-23.

11. Константинов В. И. Выбор оптимального режима работы светодиодных излучателей / В. И. Константинов, Е. В. Вставская, Т. А. Барбасова, В. О. Волков // Вестник ЮУрГУ. 2010, № 2. С.46–51.
12. Schubert E. F. Light-emitting diodes. – Cambridge, 2006.
13. Вейнерт Дж. Справочник: светодиодное освещение. – М., 2010.
14. Ноэль Л. Охлаждение и регулирование температурных режимов светодиодов // Полупроводниковая светотехника. 2010, № 3. С. 13–15.
15. Колпаков А. Охлаждение силовых модулей: проблемы и решения // Силовая электроника. 2012, № 3. С. 12–18.
16. Колпаков А. Охлаждение в системах высокой мощности // Силовая электроника. 2010, № 3. С. 62–66.
17. Huaiyu Y. A review of passive thermal management of LED module / Y. Huaiyu, S. Koh, H. Zeijl, A.W.J. Gielen, Z. Guoqi // J. of Semiconductors. 2011. Vol. 32, N 1.P. 0140081–0140084.
18. Поль А. Особенности расчета систем отвода тепла при использовании светодиодов в корпусах PLCC // Полупроводниковая светотехника. 2010, № 5. С. 54–57.
19. Гридовий В.М., Закордонец В.С., Кутузова Н.В. «Вплив термоелектричного охолодження на ефективність світлодіодних матриць»// Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 27-28 листопада 2019., м.Тернопіль. – С.35.
20. Арутюнян А. А. - Основы энергосбережения. Москва, Энергосервис. – 2007.-387с.
21. Рохлин Г.Н. Газоразрядные источники света . М.: Энергоатомиздат, 1991.- 586с.
22. <http://duray.ru/database/stati/svetodiod-ustroystvo-printsip-raboty-preimushchestva/>
23. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики. / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 735 с.

24. Беляев Н.М. Методы теории теплопроводности. Ч.1. / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. – М.: Высш. шк., 1982. –327 с.
 25. http://www.kit-e.ru/articles/powerel/2009_12_120.php
 26. http://elektrotovary.te.ua/index.php?route=information/news&news_id=6
 27. <https://dilux.com.ua/p461859293-svetodiodnaya-matritsa-prozhektora.html>
 28. http://www.kit-e.ru/articles/powersource/2010_12_131.php
 29. http://www.led-e.ru/articles/led-cooling/2010_3_13.php
 30. <https://moluch.ru/archive/131/36367/>
 31. <http://www.electrosad.ru/Ohlajd/TC.htm>
 32. <https://npostk.ru/teplovaya-trubka-heat-pipe.html>
 33. <https://cyberleninka.ru/article/v/analiz-effektivnosti-primeneniya-termoelektricheskikh-moduley-v-sistemah-ohlazhdeniya-radioelementov>
 34. <https://foton.ua/upload/datasheet/cree/CXA1507.pdf>
 35. <https://www.compel.ru/lib/ns/2013/2/5-spasitelnaya-prohlada-ili-teplootvod-dlya-moshhnyih-svetodiodnyih-matrits>
 36. <https://books.ifmo.ru/file/pdf/1235.pdf>
- <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/2195/doc/48674/>
37. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Киев: Наукова думка, 1979. – 768с.
 38. Булат Л.П., Бузин Е.В. Термоэлектрические охлаждающие устройства. СПб.: СПбГУНиПТ, 2001. 41 с.
 39. Шостаковский П. Современные решения термоэлектрического охлаждения. / П. Шостаковский // Компоненты и технологии. – 2009. – № 12. – С. 40-46.
 40. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. ДНАОП 0.00–1.21–98.
 41. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці : підручник / М. П. Гандзюк, Є.П. Желібо, М.О. Халімовський; за ред.. М.П. Гандзюка; МОН України. – 4-е вид. – К. : Каравела, 2008. - 384 с.