

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(назва факультету)

Кафедра електричної інженерії  
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

**магістр**

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему:

**Розробка термоелектричної системи охолодження  
світлодіодних джерел світла**

Виконав: студент 6 курсу, групи ЕТм-61

напряму підготовки (спеціальності)

**141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»**

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

	<hr/>	<b>Пастущак Н.А.</b> (прізвище та ініціали)
Керівник	<hr/>	<b>Закордонець В.С.</b> (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	<hr/>	<b>Мовчан Л.Т.</b> (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	<hr/>	<b>Тарасенко М.Г.</b> (прізвище та ініціали)
Рецензент	<hr/>	<b>Габрусєв Г.В.</b> (прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2022

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

Факультет \_\_\_\_\_  
Кафедра Електричної інженерії  
Освітній рівень магістр  
Напрямок підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(шифр і назва)  
Спеціальність \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022\_р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ**

Пастушак Назар Андрійович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розробка термоелектричної системи охолодження  
світлодіодних джерел світла

Керівник проекту (роботи) Закордонець Володимир Савич, к.ф.-м.н, доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом по університету від «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 року № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом проекту (роботи) \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту (роботи) \_\_\_\_\_

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

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

---

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра Пастуцака Назара Андрійовича містить: 64 сторінки, 45 рисунків, 13 таблиць, 23 посилання на першоджерела.

**Предметом дослідження** є освітлювальні лампи на базі світлодіодних матриць (СДМ).

**Мета роботи** полягає в розробці термоелектричних систем охолодження для освітлювачів на базі світлодіодних матриць.

**Об'єктом дослідження** є системи охолодження на базі термоелектричних модулів Пельтьє (ТЕМП).

**Основні результати:** Побудована розрахункова математична модель СДМ, яка дозволяє виявити фактори, що суттєво впливають на її тепловий режим, розроблена термоелектрична система охолодження для освітлювачів на базі світлодіодних модулів.

**Ключові слова:** світлодіодні джерела світла, світлодіодні матриці, світловий потік, світловіддача, термоелектричний модуль Пельтьє.

## ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	7
1.1 Вплив температури на світлотехнічні параметри світлодіодів	7
1.2 Огляд традиційних систем термостабілізації	11
1.3 Термоелектричне охолодження	15
1.4 Рідинне охолодження	18
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	20
2.1 Принцип роботи та особливості будови світлодіодів	20
2.2 Світлодіодні матриці	23
2.3 Гібридні світлодіодні матриці	28
2.4 Принцип роботи та будова термоелектричного модуля Пельтьє	29
2.5 Конструювання системи охолодження СДМ з модулем Пельтьє	32
3. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ	39
3.1 Розрахунок теплового режиму СДМ з пасивним радіатором	39
3.2 Вибір ТЕМП	45
3.3 Розрахунок теплового режиму СДМ з термоелектричним модулем Пельтьє	47
4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	56
4.1 Аналіз можливих небезпечних і шкідливих виробничих чинників, електробезпеки і пожежної безпеки	56
4.2 Захист персоналу та навколишнього середовища від небезпечних виробничих факторів	59
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	62

## ВСТУП

В сучасних системах освітлення все більшого поширення набувають світлодіодні джерела світла. І цьому є кілька причин. По перше, вони є надзвичайно економними. Їх ефективність складає 25%, що в кілька разів перевищує ефективність традиційних джерел. Це, в умовах наростаючої енергетичної кризи, має першорядне значення. Так, наприклад, світлодіодна лампа електричною потужністю 10 Вт за величиною світлового потоку може замінити лампу розжарювання потужністю 60 Вт, споживаючи при цьому електроенергії в 6 разів менше. Якщо така лампа буде працювати хоча б п'ять годин на добу, то за рік можна заощадити понад 600 кВт год електроенергії.

Другим важливим фактором є їх технологічність напівпровідникових джерел, яка дозволяє швидко виконати монтаж освітлювальних приладів великої потужності. При цьому виділення тепла буде мінімальним і пожежна небезпека будуть мінімальними.

Серед інших видатних якостей напівпровідникових джерел світла можна виділити можливість їх мініатюризації. Зокрема, їх можна розмістити в місцях, які недоступні для традиційних джерел світла. Крім того, світлодіодні лампи забезпечують високу освітленість об'єктів, мають великий термін експлуатації і дозволяють отримати будь-який колір освітлення, не застосовуюч світлофільтри.

Виробники напівпровідникових джерел світла гарантують, що термін експлуатації їх продукції перевищує 100 000 годин, або 10 років неперервної роботи. При цьому, виготовлення напівпровідникових джерел світла потребує значно менше ресурсів і обходиться набагато дешевше. Внаслідок наявності пластикової оболонки світлодіодні матриці механічно міцні і досить надійні. Вони не руйнуються при ударі, і не потребують спеціальних заходів утилізації, як газорозрядні, не потребують високої напруги живлення.

Проте, незважаючи на високу ефективність, майже 75% підведеної електричної потужності перетворюється в тепло. А це суттєво впливає на тепловий режим світлодіодних джерел світла. Адже вони, на відміну від

традиційних джерел світла не випромінюють тепло у вигляді інфрачервоних хвиль. Це призводить до понаднормового нагріву корпусу світлодіодів і їх світловипромінювальних кристалів. Порушення теплового балансу кристалів викликає: зменшення світлового потоку, скорочення терміну роботи, зменшення яскравості свічення та колірної температури випромінювання, деградації світлодіодних структур та прозорості оптичної системи. В зв'язку із сказаним, актуальною стає проблема забезпечення потрібного теплового режиму кристалів. Для розв'язання цієї проблеми необхідно застосувати ряд технічних рішень, які б суттєво покращили тепловий режим роботи.

В сучасних напівпровідникових освітлювачах, для забезпечення теплового балансу, застосовуються як пасивні так і активні пристрої охолодження. В основі їх роботи лежать принципи каналізації теплової енергії шляхами конвекції і кондукції. Пасивні системи охолодження – радіатори є простими по конструкції, надійні, дешеві, не потребують додаткових енергозатрат. Однак, для термостабілізації потужних світлодіодних приладів вони мало придатні, внаслідок малої густини потоку тепловідведення.

Активні системи охолодження, в яких використовується примусовий рух теплоносія в контурі охолодження або вентиляція холодними потоками повітря, забезпечують потрібний тепловий режим. Однак при цьому шумні в роботі і потребують додаткового технічного обслуговування. Сказане вище стимулює до активного пошуку нетрадиційних систем охолодження. До таких належать термоелектричні системи термостабілізації і охолодження на базі термоелектричних модулів Пельтьє.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Вплив температури на світлотехнічні параметри світлодіодів

При підключенні світлодіода до джерела живлення через його р-п- перехід проходить електричний струм. Величина струму залежить від потужності світлодіода, його режиму роботи, типу використаних напівпровідникових матеріалів та ін.. Проходження струму спричинює нагрів активної зони СД внаслідок джоулевого нагріву струмом провідності пасивних ділянок гетеропереходу, а також внаслідок взаємної рекомбінації електронів і дірок на дефектах напівпровідникової структури. Для збільшення світлового потоку та яскравості світлодіодів необхідно збільшувати концентрацію електрон-діркових пар та інтенсивність їх рекомбінації. Це легко зробити збільшуючи величину струму.

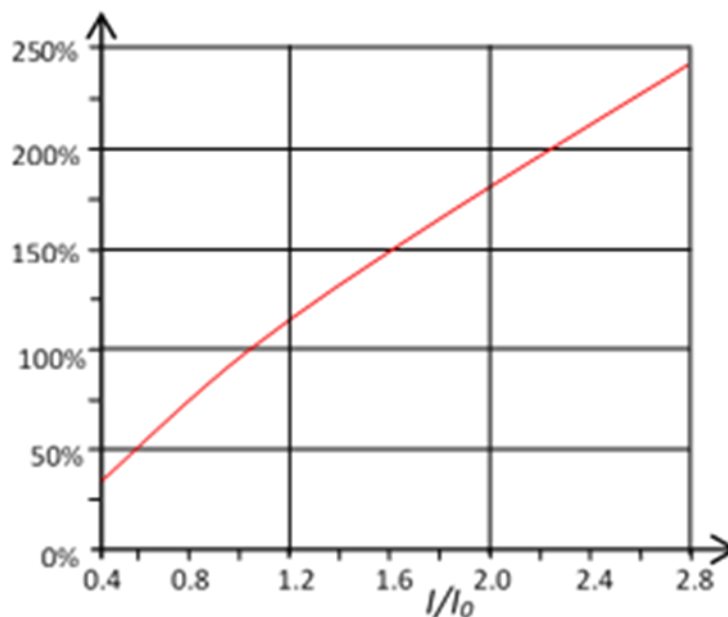


Рис. 1.1 Типова залежність відносного світлового потоку від струму для світлодіодів серії СМА

Однак, збільшення струму призведе до зростання безвипромінювальної рекомбінації на дефектах кристалічної ґратки і до ще більшого нагріву світлодіода. При цьому, квантова ефективність СД і його ККД будуть зменшуватися.

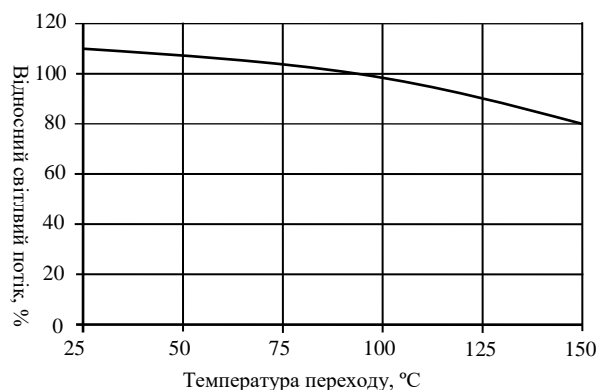


Рис. 1.2 Типова залежність відносного світлового потоку від температури для світлодіодів серії СМА

Сучасні напівпровідникові джерела світла (світлодіоди, світлодіодні матриці) мають *ККД* конвертації електроенергії в енергію світла близький до 25%. Отже, понад 75% спожитої електричної потужності перетворюється в теплову. Якщо надлишкову теплову потужність не відводити, то це призведе до перегріву напівпровідникової гетероструктури і світлодіода в цілому. В свою чергу, збільшення температури світлодіода и зменшить яскравість свічення і потік світла.

Як видно з графіка, при збільшенні температури активної зони світлодіода величина відносного світлового потоку зменшується. Крім того, перегрів світлодіода до температур більших ніж 120 - 125°C викликає деградацію люмінофору, зміщення робочої частоти хвилі в бік синьої частини спектра випромінювання, помутніння його оптичної системи. Це негативно впливає на якість кольоропередачі СД. Принято вважати, що після того як відносний світловий потік досягне 50% від початкового значення, термін служби світлодіода закінчується. В результаті температурної деградації також різко зменшується довговічність світлодіодного світильника - характеристики, яка вигідно відрізняє його від інших джерел світла.

При зміні температури змінюється і величина прямого падіння напруги на гетеропереході світлодіода. Очевидно, що величина зміни залежить від



конкретної моделі прилада. В таблиці 1.1 наведені значення температурного коефіцієнта напруги для світлодіодів серії MKR та MKR2.

Таблиця 1.1

Величина температурного коефіцієнта напруги для деяких світлодіодів

Назва	Температурний коефіцієнт, мВ/°С
Серія MKR 1	-7
Серія MKR2	-28

Значення температурного коефіцієнта напруги важливо враховувати при конструюванні і виборі драйвера освітлювальної системи, оскільки він має забезпечити необхідний струм в температурному діапазоні роботи світлодіодної матриці.

Сказане диктує необхідність забезпечення потрібного теплового режиму. Зрозуміло, що для фундаментального вирішення цієї проблеми потрібно удосконалювати якість напівпровідникової гетероструктури. Однак вже зараз, грамотно сконструйований і виготовлений тепловідвід може суттєво поліпшити техніко-експлуатаційні характеристики існуючих СД. При цьому надзвичайно важливо забезпечити ідеальні теплові контакти між всіма складовими тепловідводу. Для створення якісних теплових контактів між елементами теплового кола кристал-навколишнє середовище застосовують спеціальні контактні матеріали (клеї, пасти, припої).

Крім забезпечення якісних теплових контактів, деякі теплопровідні матеріали, в залежності від конструкції системи термостабілізації, як правило, виконують і інші супутні функції. Наприклад, електроізоляцію струмонесучих поверхонь і створення механічної фіксації.

В таблиці 1.2 представлені характеристики сучасних теплоконтактних матеріалів. При їх виборі треба зважати не лише на величину коефіцієнта теплопровідності, але і на багато інших параметрів. Зокрема, велике значення має товщина теплоконтактного шару.

$$\Theta_i = \frac{1}{\kappa} \frac{\Delta l}{\Delta S}. \quad (1.1)$$

де  $\kappa$  - коефіцієнт теплопровідності теплоконтактного матеріалу;

$\Delta l$  - товщина теплового контакту відповідно

$\Delta S$  - площа поперечного перерізу.

Як впливає з формули (1.1), тонший теплоконтактний шар з поганим значенням коефіцієнта теплопровідності може мати менший тепловий опір в порівнянні з тепловим опором шару з кращим коефіцієнтом теплопровідності, але більшої товщини. Обидві ці умови треба враховувати при конструюванні і виготовленні світильників.

Таблиця 1.2

Технічні властивості сучасних контактних 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, немає 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 термоклеїв
Термоклеї	Добре заповнюють нерівності поверхні	Необхідний процес очищення

Коефіцієнти теплопровідності деяких теплопровідних матеріалів

Таблиця 1.3

Матеріал	Теплопровідність, $Вт/(м \cdot К)$
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

## 1.2 Огляд традиційних систем термостабілізації

Системи термостабілізації по способу охолодження поділяються на пасивні і активні. Пасивні система є найпростішим, найдешевшим і тривіальним вирішенням проблеми охолодження. При цьому, надлишкова теплова потужність кондуктивним шляхом передається до корпусу освітлювача, а далі шляхами конвекції і випромінювання - оточуючому середовищу [8]. Цей спосіб охолодження характеризується доволі низькою ефективністю.



Рис. 1.3 Систематизація пасивних способів охолодження

Пасивне охолодження можна покращити застосувавши радіатор.

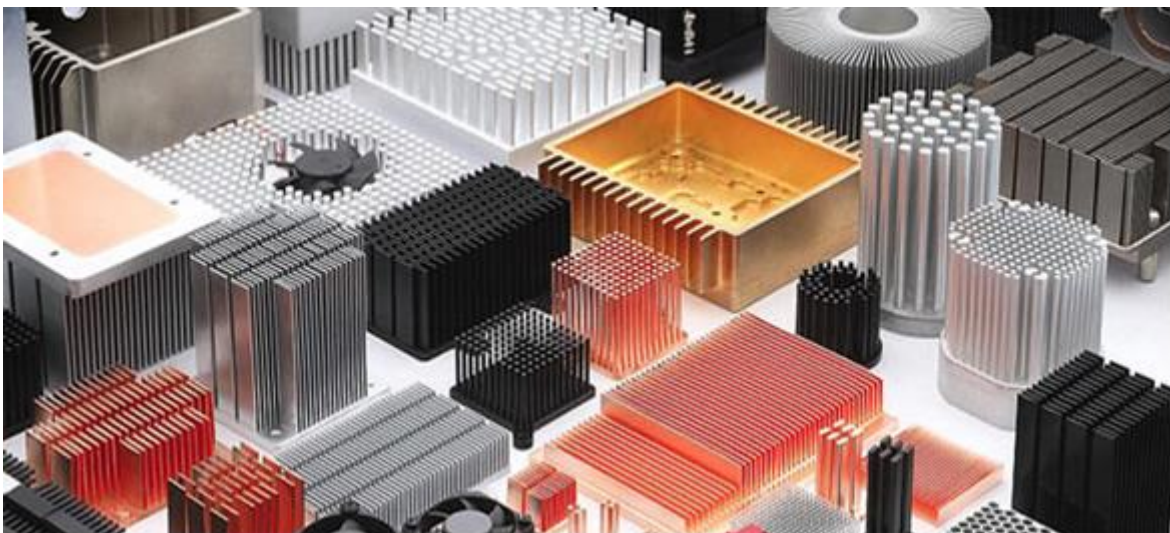


Рис.1.4 Зовнішній вигляд радіаторів для конвективного теплообміну

В основі роботи радіатора лежить одночасна дія явищ кондукції і конвекції. Завдяки великому коефіцієнту теплопровідності матеріалу радіатора та ребристості його поверхні багатократно збільшується ефективна площа розсіювання тепла. Ребра радіатора нагріваються і вмикається конвективний механізм теплопередачі. Завдяки цьому радіатор скидає надлишкове тепло - охолоджується сам і охолоджує світлодіод. Як правило, до напівпровідникових джерел світла пред'являються досить високі технічні вимоги по масо-габаритних параметрах. Тому часто виникає потреба в проектуванні ексклюзивного радіатора для конкретного прилада [9].

Часто, для термостабілізації світлодіодів пасивного охолодження не достатньо. Особливо, коли світлодіоди потужні, або якщо спостерігається велика густина світлодіодних елементів в світильнику доведеться використовувати активні способи охолодження.

Сучасні способи активного охолодження світлодіодних матриць

Таблиця 1.4

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 трубки	<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.

Як правило, для термостабілізації СД потужніших 20 Вт, доводиться використовувати повітряний обдув вентиляторами [11]. Вентилятор може інтенсифікувати теплообмін на 20-40%. Схема вентиляторної термостабілізації показана на схемі.

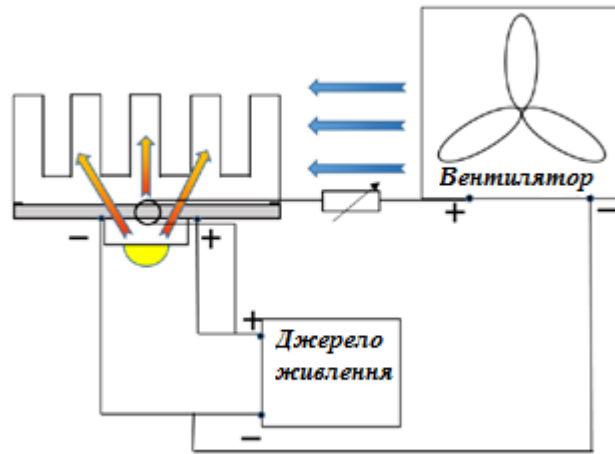


Рис.1.5 Схема вентиляторної термостабілізації

Разом з вентилятором ставлять спеціальні радіатори. За ефективністю конвекції, на перше місце слід поставити радіатори отримані фрезируванням, потім голчаті. Матеріал радіатора також має велике значення. Зокрема, він повинен мати великий коефіцієнт теплопровідності. Цим вимогам відповідають пристрої, зроблені з кольорових металів, (мідь та її сплави, алюміній та його сплави).

Графічна залежність відносного теплового опору мідного радіатора від абсолютної швидкості потоку повітря приведена нижче.

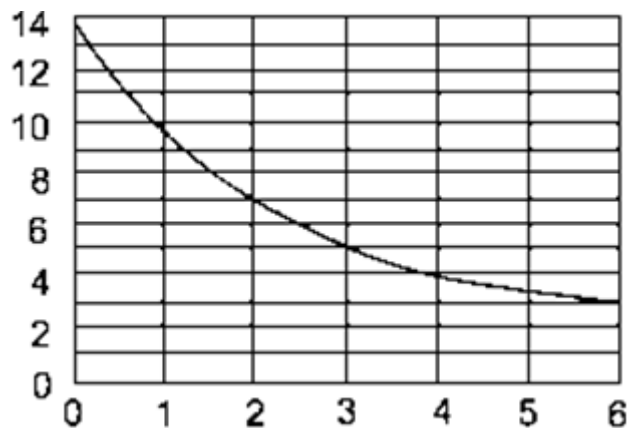


Рис. 1.6 Графічна залежність відносного теплового опору мідного радіатора (%) від абсолютної швидкості потоку повітря (м/с).

Як видно з графіка, ефективність радіаторного охолодження зростає при збільшенні швидкості теплового потоку. Однак, обертання лопатей вентилятора створює шум, який негативно впливає на персонал [12,13]. Щоб позбутися цієї проблеми, були виготовлені і впроваджені у виробництво низькооборотні

малошумні вентилятори. Їх техніко-економічні характеристики вигідно відрізняють їх від традиційних в кращу сторону. Зокрема, це великий термін експлуатації (більше 200 тисяч годин), компактність, економність.



Рис. 1.7 Низькооборотний малошумний вентилятор в тандемі з радіатором

Для зменшення шумового ефекту сучасні вентиляторні системи використовують струменеву технологію обдуву SynJet.



Рис. 1.8 Вентиляторна система SynJet

Дія вентиляторної системи SynJet базується на поворотно-поступальному коливанні мембранного механізму, який по чергову втягує і виштовхує порції

повітря у вигляді турбулентних імпульсних струменів. Турбулентні холодні струмені передають імпульс гарячому повітрю, яке знаходиться біля радіаторних пластин, забезпечуючи швидке охолодження радіатора. Об'єм, в який втягується повітря - герметичний. А значить механізм, який приводить до поворотно-поступальних рухів мембрану захищений від негативного впливу довкілля (пил, волог та ін.). Перевага вентиляторної системи SynJet полягає в простоті та у відсутності деталей, які труться. Це сприяє безшумності і довговічності роботи механізму.

### 1.3 Термоелектричне охолодження

Подальший ріст потужності світлодіодних матриць призводить до збільшення тепловиділення, з яким традиційні системи термостабілізації вже не справляються. В даний час для інтенсифікації відбору тепла від потужних світлодіодних матриць все активніше використовуються термоелектричні модулі Пельтьє (ТЕМП). ТЕМП являє собою послідовне сполучення напівпровідникових гілок  $p$ -і  $n$ -типу провідності. Гілки мають тепловий контакт з одним із колекторів тепла. В результаті прикладання зовнішньої напруги певної полярності та ініціювання в колі електричного струму між колекторами виникає перепад температури. При цьому один колектор нагрівається до температури вищої ніж температура довкілля, а другий навпаки – охолоджується.

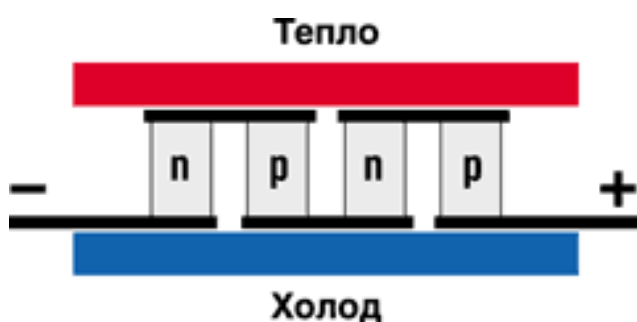


Рис. 1.9 Схема використання напівпровідникових гілок  $n$  - і  $p$  -типу провідності в ТЕМП.

Гарячий колектор ТЕМП потрібно примусово охолоджувати шляхом обдуву холодними потоками повітря, або циркуляцією рідини. На рисунку (1.10)

зображений досить поширений на даний момент термоелектричний модуль охолодження Пельтьє.

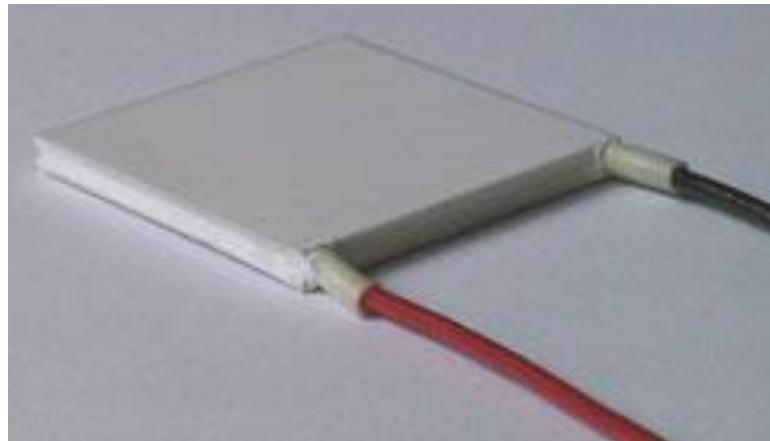


Рис. 1.10. Зовнішній вигляд ТЕМП

Використання, для цілей охолодження світлодіодних матриць, ТЕМП сприяє зниженню температури світловипромінюючих кристалів. Зокрема, їх температура може бути навіть нижчою ніж температура довкілля. Термоелектрична система охолодження має малу інерційність і дозволяє проводити гнучке і оперативне керування процесом термостабілізації.



Рис 1.11 Типова схема охолодження світлодіодної матриці модулем Пельтьє.

Проте, застосування модулів малої потужності може не дати бажаного ефекту охолодження, і навпаки, використання надто потужних модулів може дати зворотний ефект. Зокрема, температура холодного колектора може опуститися до температури точки роси, що неминуче призведе до короткого замикання і виходу системи охолодження з ладу.



В ряді робіт вже описувалися термоелектричні системи охолодження [22]. Однак, при використанні потужних і надпотужних світлодіодних матриць часто виникає ситуація коли джерело тепла і холоду треба рознести в просторі.

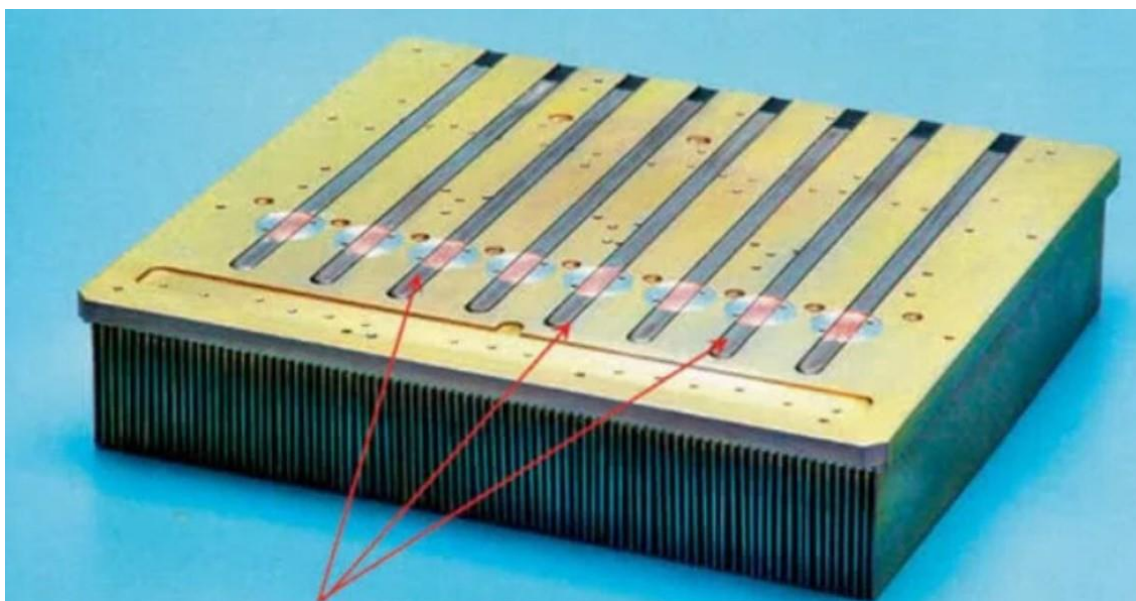


Рис 1.12 Конструкція радіатора із вмонтованими тепловими трубками.

Аналогічна проблема виникає, коли геометричні розміри необхідного радіатора надто великі і не задовольняють систему охолодження по масо-габаритних параметрах. Це ускладнює, або робить навіть неможливим його монтаж без порушення базових правил конструювання. Труднощі легко усунути використовуючи теплові трубки (ТТ). Хоч і теплові трубки самостійно участі в охолодженні не беруть, вони успішно застосовуються в комплекті з активними радіаторами (рис. 1.12).

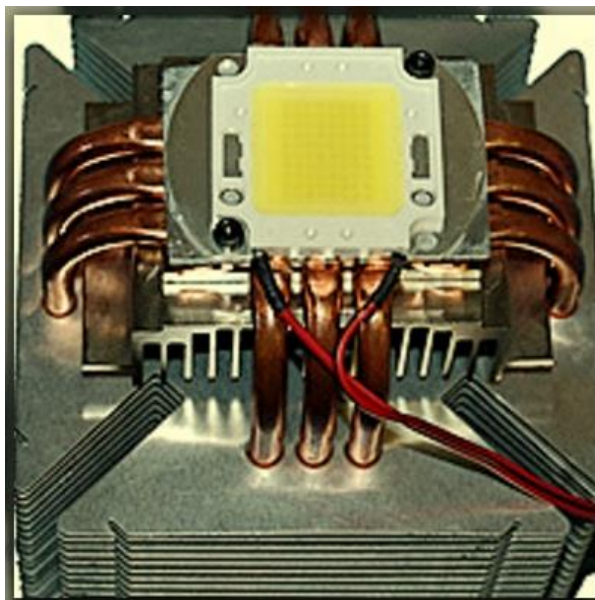


Рис. 1.13 Спряження світлодіодної матриці з радіатором при допомозі теплових трубок

ТТ є зміст застосовувати коли між джерелом тепла і холодильником відстань складає хоча б 5 сантиметрів. В інших випадках використовувати теплові трубки не доцільно. Для коротких дистанцій є резон використати суцільні металеві теплопроводи. Проте, металева трубка набагато важча ніж теплова з тими ж теплотранспортними можливостями.

#### **1.4 Рідинне охолодження**

До кардинальних способів розсіювання великих теплових потужностей використовують рідинні охолоджувачі. Великі теплові навантаження виникають в прожекторах, спецапаратурі, відеопроєкторах. Для швидкого і ефективного відбору тепла тут потрібні системи охолодження з тепловим опором, який складає величину від  $0.01 \text{ K/Wt}$  до  $0.1 \text{ K/Wt}$ . Добитися таких величин теплового опору можуть рідинні охолоджувачі. В основі роботи рідинного охолоджувача лежить принцип примусового прокачування охолодженої рідини (часто це дистильована вода) через теплообмінник. Рідина-переносчик тепла, циркулює по замкнутому контуру, відбираючи тепло від світлодіодної матриці і віддаючи його в радіаторі-теплообміннику з оточуючим середовищем.



Рис. 1.14 Рідинний охолоджувач.

Як носій тепла найчастіше застосовують воду. Правда, іноді, це може бути машинне масло, антифриз, рідкий електроліт, рідкий метал тощо. Великим недоліком такої системи охолодження є її громіздкість і труднощі спряження з освітлювальною системою.

## 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Принцип роботи та особливості будови світлодіодів

Докорінно розв'язати проблему енергозбереження в світлотехніці можна шляхом розробки та застосування світлодіодних джерел світла [1-3]. На сьогоднішньому етапі розвитку освітлювальних технологій можна виділити два типи таких джерел: освітлювальні світлодіоди (ОСД) та світлодіодні матриці (СДМ).

ОСД в свою чергу поділяються на світлодіоди великої потужності (СВП) і світлодіоди великої яскравості (СВЯ). СВП виготовляються із напівпровідникових кристалів малого і середнього розміру (до  $500 \times 500$  мкм) і мають досить високі світлові характеристики (сила світла майже 10 кд, а світловий потік понад 30 лм. При цьому робочий діапазон струмів складає від 30 мА до 250 мА.

СВП - світлодіоди виготовляються в стандартних корпусах з електричними виводами, або в корпусах для поверхневого монтажу.

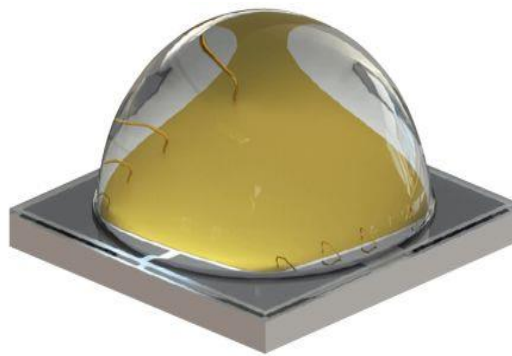


Рис. 2.1 Сучасний монокристалний СВП світлодіод в корпусі для поверхневого монтажу XQ-E потужністю 3 Вт зі світловим потоком 330 Лм.

Світлодіоди великої потужності – надійні та високопотужні пристрої, які здатні забезпечити потрібний рівень освітленості і мають світловий потік, який рівний або більший від світлового потоку традиційних джерел світла (ламп розжарювання, газорозрядних та люмінесцентних ламп). СВП виготовляються з напівпровідникових кристалів розмірами  $1 \times 1$  мм або більше. Споживана ними

номінальна потужність при струмі 300 мА досягає 1 Вт. Проте, при застосуванні активного охолодження допускається експлуатація і при струмах 500-700 мА. Надяскраві СД широко використовуються у всіх сферах побуту та промисловості. Це світлова реклама, дорожні вказівники і світлофори, авто і мото техніка, кінотехніка, інформаційні екрани та ін..



Рис. 2.2 Зовнішній вигляд СВЯ потужністю 1Вт із світловим потоком 100 лм

В основі роботи світлодіодів лежить принцип прямого перетворення електричної енергії в світлову. Зокрема, при проходженні струму через напівпровідниковий кристал в область р-п-переходу здійснюється інжекція електронів. При цьому в активній зоні відбувається процес рекомбінації інжекттованих електронів, який супроводжується їх переходом з вищого енергетичного рівня на нижчий.

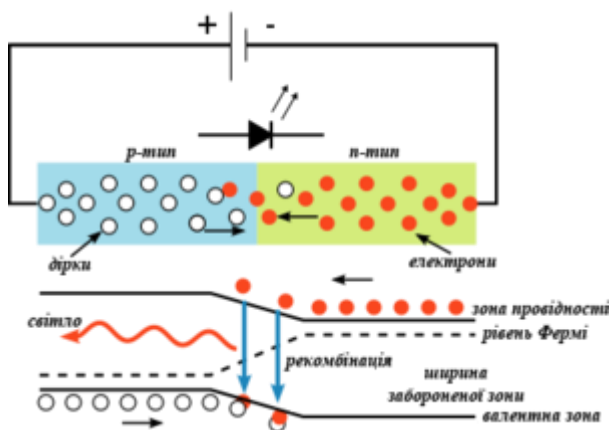


Рис. 2.3. Діаграма принципу роботи СД

Процес рекомбінації супроводжується випромінюванням квантів світла – фотонів. Щоб довжина хвилі фотонів відповідала квантам видимого світла –р-п-

перехід роблять складним. Зокрема, він складається з великої кількості дрібніших p-n-переходів. Складний p-n-перехід називається гетеропереходом.

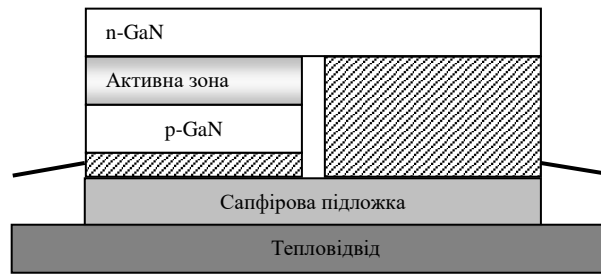


Рис. 2.4. Схема будови світлодіода з напівпровідниковою структурою на основі нітриду галію.

Для ефективного рекомбінаційного випромінювання світлової енергії придатні не всі напівпровідники. Для цього, як правило, використовують прямозонні напівпровідникові матеріали типу  $A^{III}B^V$  ( $GaAs$ ,  $GaN$ s,  $InP$ ) і  $A^{II}B^{VI}$  ( $ZnSe$ ,  $CdTe$ ). Змінюючи хімічний склад напівпровідникових матеріалів, можна створювати світлодіоди з різною частотою випромінювання світла, від ультрафіолетового, як в  $GaN$  до інфрачервоного як в  $PbS$ . Некогерентне випромінювання традиційних світлодіодів лежить у вузькій ділянці спектру. Проте, існують методи розширення смуги випромінювання і створення білих світлодіодів. Ефективність напівпровідникових джерел світла найбільше проявляється в місцях, де потрібні потужні кольорові світлові потоки (реклами, світлові сигнали та ін.), так що в застосуванні світлофільтра, немає потреби.

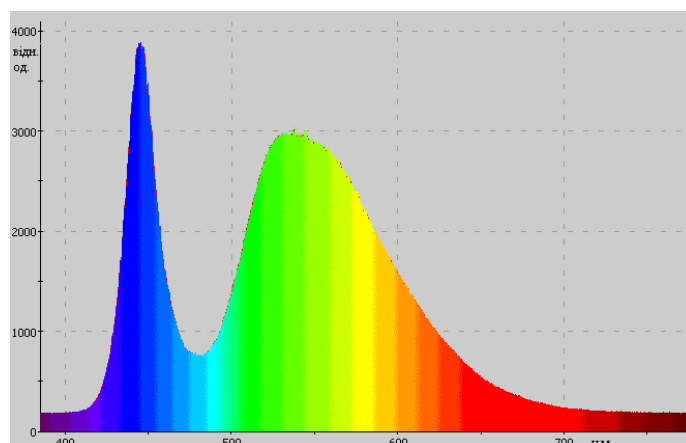


Рис. 2.5 Спектральний розподіл випромінювання білого світлодіода

Для побутових і технічних застосувань потрібне біле світло. Однак, в даний час, напівпровідникових структур з білим свіченням не існує. Основою світлодіодів білого свічення є напівпровідникові структури на основі нітриду галію, які випромінюють синє світло частотою  $460\text{нм}$  і нанесений на структуру люмінофор. Люмінофор має здатність випромінювати світло в широкому діапазоні видимого світла, проте має максимум в його жовтій частині. Деяка частина синього випромінювання потрапляє на люмінофор, і збуджує вторинне випромінювання з максимумом в жовто-оранжевій області. Накладання двох випромінювань утворює біле світло. Колірна температура отриманого світла визначається балансом між первинним і вторинним випромінюваннями.

## 2.2 Світлодіодні матриці

Не так давно, на технічному ринку засобів освітлення з'явилися нові джерела світла - світлодіодні матриці (СДМ). СДМ є сукупністю декількох сотень світлодіодів, які інтегровані в одному корпусі. Для підвищення надійності світлодіоди з'єднані послідовно в гірлянди, а гірлянди між собою - паралельно.

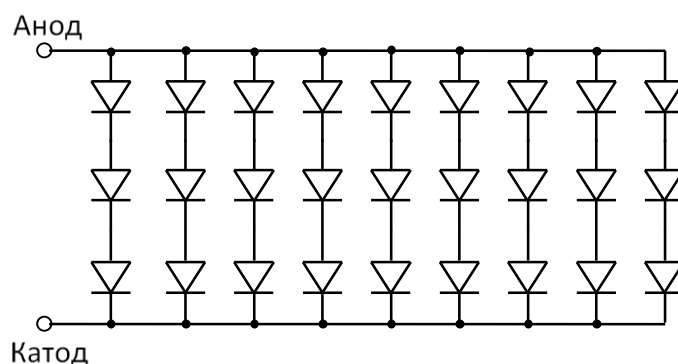


Рис. 2.6 Схема з'єднання світлодіодів в матриці

Особливістю СДМ є велика щільність потоку світла. Це дає змогу при виробництві світлодіодних освітлювачів різного призначення мінімізувати матеріальні витрати. Світлодіодні матриці серії СХА з білим кольором випромінювання є найбільш потужними освітлювальними приладами. В них органічно поєднані велика потужність і світловіддача при високій технологічності, ККД та зручності застосування. Плоска поверхня СДМ залита прозорим пластиковим компаундом, який, для створення необхідної діаграми розсіювання світла, дозволяє встановити спеціальну оптику.

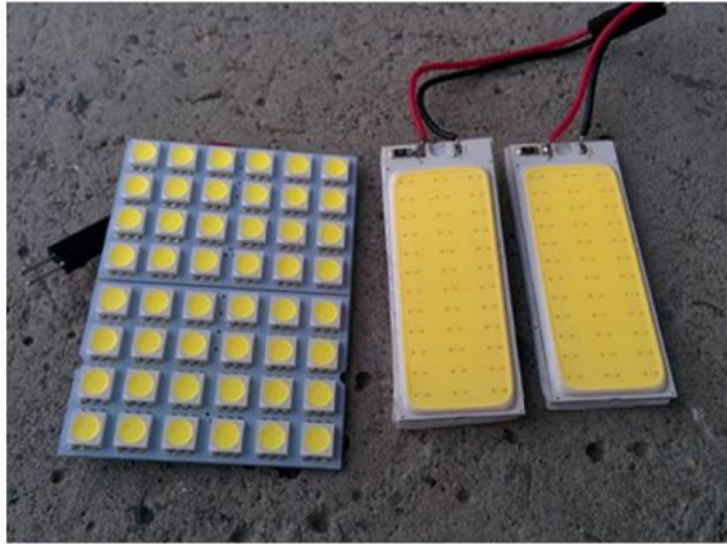


Рис. 2.7 СДМ серії CMD 5050 (зліва), і серії COB (справа).

Для монтажу на тепловідвід, СДМ монтуються на товстій мідній, або алюмінієвій контактній пластині з кріпильними отворами. Завдяки цьому, матриці кріплять безпосередньо на радіатор, закріплюючи їх гвинтами. Для забезпечення ідеального теплового контакту на всю контактну площадку наноситься тонкий шар теплопровідної пасти. Дані заходи значно спрощують монтаж потужних світлодіодних освітлювачів.



Рис. 2.8 Світлодіодна матриця нового покоління серії XLamp SMA

СДМ випускають різної номінальної потужності, від кількох ват до кіловата. Принципового обмеження на величину потужності нема. За невеликий період часу СДМ знайшли широке застосування в освітлювальній техніці. Матриці мають великий ККД і термін експлуатації. Нанотехнології, які застосовуються



при виготовленні СДМ, дозволяють формувати напівпровідникові джерела світла з рекордними потужністю і світловіддачею. Фактично, це технологічна революція в світлотехніці.

Зараз, лідери світового світлотехнічного виробництва досягли граничних параметрів СДМ, покращувати які недоцільно. Адже для покупця значення має якісне світло при мінімально можливій ціні прилада. Тому конструктори працюють над поліпшенням якості світла, збільшенням колірної температури, підвищенням надійності. Перспективними в плані підвищення техніко-економічних показників є СДМ серії СМА.

Технічні параметри сучасних матриць серії СМА





Таблиця 2.1

	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 °				

При конструюванні світлодіодних систем з оптимальним набором характеристик важливим моментом є однорідність компонентів, яка в підсумку приведе до вирішення поставленої задачі. Сконструйована таким чином освітлювальна система буде мати максимально спрощену конструкцію та низьку собівартість розробки. Фінансові затрати на розробку освітлювачів, побудованих на основі СДМ, набагато менші, від аналогів на дискретних світлодіодах.








## Технічні параметри світлодіодних матриць серії СХА

Таблиця 2.2

Параметр				
Тип матриці	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 потужність, Вт(тип/макс)	12.5/20	17.5/33	42/78	83/130








Технічні параметри світлодіодних матриць серії СХА з діаметром випромінювача до 14мм.

Таблиця 2.3

Параметр							
Тип світлодіоду	CXA	CXA	CXA	CXA	CXA	CXA	CXA
Розміри, мм	13.35*13.35	15.85*15.85	15.85*15.85	15.12	18.16	18.20	18.30
Діаметр випромінювача, мм	6	9	9	12	12	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	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

Технічні параметри світлодіодних матриць серії СХА з діаметром випромінювача більше 14мм.



Таблиця 2.4

Параметр							
Тип світлодіоду	CXA	CXA	CXA	CXA	CXA	CXA	CXA
Розміри, мм	13.35*13.35	15.85*15.85	15.85*15.85	15.12	18.16	18.20	18.30
Діаметр випромінювача, мм	6	9	9	12	12	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	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

Світлодіодні матриці серії CXB при схожих значеннях споживаної потужності мають набагато більший світловий потік ніж CXA.







Технічні параметри світлодіодних матриць серії CXB з підвищеною густиною світлового потоку.

Таблиця 2.5

Параметр		
Тип світлодіода	CXB1310	CXB1520
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	33
Прямий струм, А (тип.)	0.7 0.35	0.5
Прямий струм, А (макс.)	1.4 0.7	1.4
Споживана потужність, Вт(тип/макс)	12.6/24	16.5/49






Параметри світлодіодних ів серії CXB з діаметром випромінювача до 14мм.

Таблиця 2.6

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

Параметри світлодіодів серії CXB з діаметром випромінювача понад 14мм.

Таблиця 2.7

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

Із порівняння технічних параметрів для світлодіодів серії СХА і СХВ видно, що теплова потужність, яка розсіюється матрицями СХВ, дещо менша ніж у СХА, а світловий потік набагато більший. Через те, що матриці СХВ мають ті ж монтажні розміри що і СХА, аксесуари для них є однаковими.



Рис. 2.9 Світлодіодна матриця СХА2 Studio

### 2.3 Гібридні світлодіодні матриці

Кардинальна відмінність звичайної світлодіодної матриці від гібридної криється в схемі з'єднання світловипромінюючих кристалів. В звичайній матриці всі кристали з'єднані в послідовно (в гірлянди). В свою чергу гірлянди з'єднані паралельно. При виході з ладу одного з кристалів в гірлянді перестає працювати вся гірлянда. При цьому струм через справні гірлянди збільшується, збільшуючи тим самим їх температуру. Таким чином, зіпсований один світлодіод приводить до виходу з ладу всієї матриці.



Рис. 2.10 Гібридна світлодіодна матриця Brille 32-959

В гібридних матрицях використовується гібридна комутація: всі кристали з'єднані одночасно і послідовно і паралельно. Надійність такої матриці в сотні разів перевершує надійність звичайної світлодіодної матриці. Гібридні матриці доцільно використовувати в потужних світлодіодних лампах, вуличних світлодіодних освітлювачах, в промисловому освітленні і в місцях де потрібне особливо надійне освітлення.

Гібридні матриці приводять до зменшення витрат при виготовленні потужних світлодіодних матриць, які пов'язані з сортуванням кристалів по опорі, потужності, ККД та інших параметрах. В процесі експлуатації перерозподіл навантажень світлодіодів відбувається автоматично.

В звичайних матрицях при вимиканні можна помітити, що кожен кристал гасне з різною швидкістю. Це і є причиною швидкого виходу з ладу світлодіодної лампи. В гібридних світлодіодних матрицях використовується суттєво збільшена контактна площадка зпосрібненням. Це кратно зменшує тепловий опір між світлодіодами таповими трубками теплообмінника. Вдале поєднання технічних рішень піднімає експлуатаційні чкості гібридних матриць на якісно новий рівень.

#### **2.4 Принцип роботи та будова термоелектричного модуля Пельтьє**

В основі роботи термоелектричного модуля лежить ефект Пельтьє. Він полягає у виділенні або поглинанні енергії у місці контакту двох напівпровідників з різним типом провідності. Кількість енергії і її знак залежать від напрямку протікання струму і його величини.

$$P_{\Pi} = \Pi_{AB} I = (\Pi_B - \Pi_A) I, \quad (2.1)$$

тут  $\Pi = \alpha T$  – коефіцієнт Пельтьє, який зв'язаний з коефіцієнтом термоЕРС напівпровідника  $\alpha$ ,  $T$  – абсолютна температура контакту,  $I$  – сила струму.

Причиною виникнення явища Пельтьє є контактна різниця потенціалів. Зокрема, в місці контакту двох напівпровідників виникає контактна різниця потенціалів, яка створює внутрішнє контактне поле. Якщо через контакт пропустити постійний електричний струм, то контактна різниця потенціалів або сприятиме, або заважатиме його проходженню.

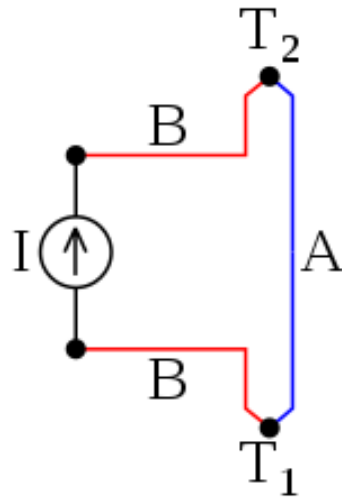


Рис 2.11 Схема виникнення ефекту Пельтьє

Якщо електричний струм протікає назустріч контактному полю, то зовнішнє джерело електроенергії повинно виконати додаткову роботу, яка виділиться в місці контакту у вигляді додаткового тепла. Якщо електричний струм протікає в напрямку контактного поля, то контактне поле підтримує струм і само виконує роботу по переміщенню зарядів. Необхідна енергія забирається від контакту і він охолоджується.

В даний час, для практичного використання застосовують термоелектричні модулі Пельтьє (ТЕМП). Це пристрої, складовою частиною яких є термоелектрична пара (термопара), яка складається з двох напівпровідників з n - і p - типом провідності. Термопари щільно упаковані між двома керамічними пластинами - колекторами, які добре проводять тепло, але одночасно є хорошими електроізоляторами (рис. 2.12).

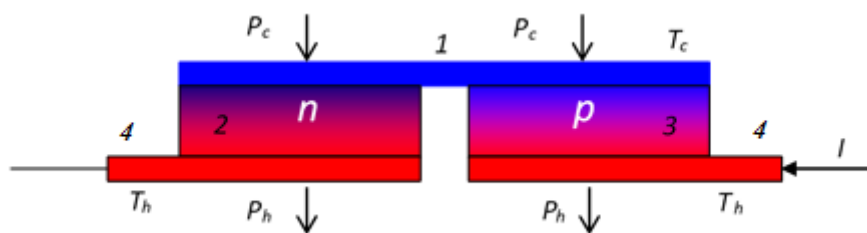


Рис. 2.12. Схема елементарного ТЕМП: 1 – холодний колектор; 2 – гілка n - типу провідності, 3 - гілка p - типу провідності, 4 – гарячий колектор.

Термопари по електричному струму мідними комутаційними шинами сполучені послідовно, а по тепловому потоку - паралельно. Кількість термопар в різних термоелектричних модулях Пельтьє може варюватися від кількох штук до кількох сотень штук. Це відкриває широкі можливості для виготовлення ТЕМП

довільної холодопродуктивності (від 0.1 Вт до 1000 Вт) з напругою живлення до кількох десятків вольт. Хоч модуль Пельтьє і є автономним охолоджуючим вузлом, він не може обійтися без інтенсивного тепловідбору від гарячого колектора. Тому, найпростіша термоелектрична система охолодження завжди містить три складові: термоелектричний модуль, радіатор на гарячому колекторі, об'єкт охолодження на холодному колекторі. Завдання спрощується, якщо охолоджуваний об'єкт знаходиться в безпосередньому тепловому контакті з холодним колектором. При цьому, відбор тепла здійснюється безпосередньо від об'єкта. Проте, найчастіше, холодний колектор і охолоджуваний об'єкт рознесені в просторі. Тоді для їх теплового контакту використовується теплопровідна металева шина, газоподібний або рідинний агент холоду.

Стандартизовані ТЕМП мають велику кількість типорозмірів (більш ніж 250). Основними з них є 15x15 мм 30x30 мм, 40x40 мм та ін. Типовий зовнішній вигляд ТЕМП представлений на рис. 2.13.

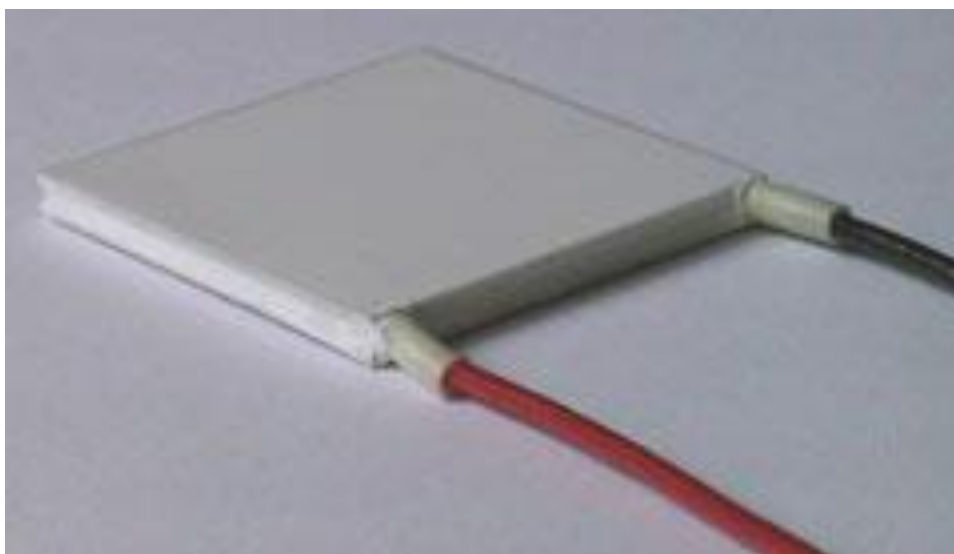


Рис. 2.13 Зовнішній вигляд стандартизованого ТЕМП

Основні технічні характеристики деяких з них представлена в таблиці.

Як видно з таблиці, напруга живлення, робочий струм і потужність модуля Пельтьє визначається його розмірами, і кількістю термопар в ньому.

## Номенклатура і основні технічні характеристики сучасних ТЕМП

Таблиця 2.8

Тип термоелектричного модуля	Характеристики					
	$I_{max}$ (А)	$U_{max}$ (В)	$P_{e\ max}$ (Вт)	$\Delta T_{max}$ (°С)	К-сть в'яток	Розмір в'ятки (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

### 2.5 Конструювання системи охолодження СДМ з модулем Пельтьє

Збільшення кількості світлодіодів в світлодіодних освітлювачах приводить до збільшення енергії тепловиділення. Часто, сучасні охолоджувальні системи з проблемою охолодження напівпровідникових джерел світла справляються не надто ефективно. Тому, в сучасних системах відбору тепла для прискорення процесу охолодження потужних напівпровідникових освітлювачів активно застосовуються термоелектричні модулі Пельтьє (ТЕМП) [1, 2]. В результаті проходження струму через певної полярності через ТЕМП між колекторами модуля створюється перепад температури. При цьому один колектор поглинає



тепло, а інший - виділяє. Холодний колектор служить для поглинання тепла, яке виділяє світлодіод. Схематична будова типового термоелектричного напівпровідникового модуля Пельтьє зображений на рис. 2.7.

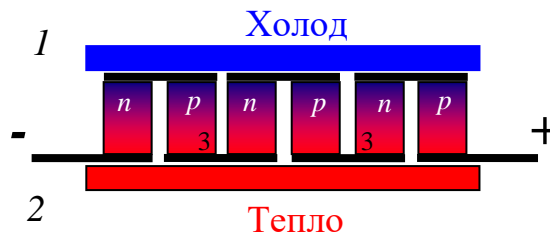


Рис. 2.14 - Схема модуля Пельтьє: 1 – гарячий колектор; 2 – холодний колектор, 3 – напівпровідникові гілки.

Фактично, модуль Пельтьє є тепловим насосом, який перекачує теплову енергію від колектора з нижчою температурою до колектора з вищою температурою. Гарячий колектор модуля Пельтьє примусово охолоджують потоками рідини або газу. Як правило, в ролі останніх, виступають вода або повітря. Це дає можливість понизити температуру контактної площадки світлодіода до температури нижчої ніж температура довкілля. Таким чином, термоелектричне охолодження в порівнянні з іншими способами охолодження, має ряд принципових переваг: компактність та надійність, малу інерційність та безшумність роботи, технологічність та можливість мініатюризації. Використання ТЕМП для охолодження світлодіодів робить їх досить привабливими порівняно з традиційними.

На початковому етапі конструювання термоелектричної охолодження СД з модулем Пельтьє спочатку доцільно розглянути роботу термопари. Термопара складається з двох напівпровідникових гілок електронного і діркового типів провідності (рис.2.9). Гілки послідовно сполучені мідною комутаційною шиною, при чому остання одночасно є колектором тепла. При спрямуванні електричного струму в напрямку від напівпровідникової гілки p – типу до гілки n- типу нижній колектор нагрівається, а верхній - охолоджується.

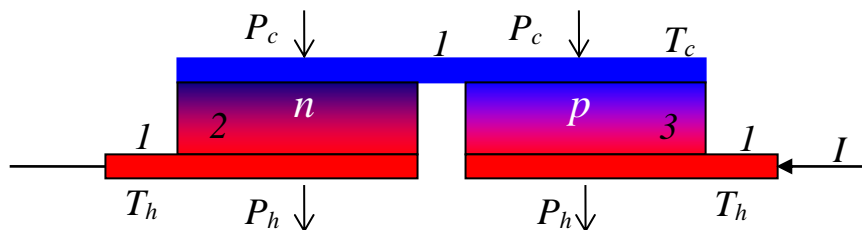


Рис. 2.15 Принципова схема напівпровідникової термопарі.

Теплова потужність, яка поглинається холодним колектором термопарі називається холодопродуктивністю [8,9]:

$$P_c = \alpha T_c I - 0.5 I^2 R - \kappa (T_h - T_c). \quad (2.2)$$

Теплова потужність  $P_h$ , яка нагріває гарячий колектор описується співвідношенням

$$P_h = \alpha T_h I + \frac{1}{2} I^2 R - \kappa (T_h - T_c), \quad (2.2)$$

тут  $\alpha = \alpha_p - \alpha_n$  і  $\kappa$  - коефіцієнт диференціальної термоЕРС і питомий коефіцієнт теплопровідності термопарі відповідно,  $R$  - загальний омичний опір гілок термопарі,  $T_c$  - абсолютна температура холодного колектора,  $T_h$  - абсолютна температура гарячого колектора,  $I$  - сила струму.

Теплову потужність  $P_h$  активними способами вентиляції відводять в навколишнє середовище.

Теплова потужність, яка поширюється від гарячого колектора до холодного способом кондукції описується тепловим законом Ньютона

$$P_\kappa = \kappa (T_h - T_c), \quad (2.4)$$

Очевидно, що кількість тепла, яке виділяється в одиницю часу на гарячому колекторі термопарі буде більшою від кількості тепла, яке поглинається в одиницю часу на холодному колекторі на величину потужності, яку витратить джерело енергії. Отже

$$W = P_h - P_c,$$

З іншого боку можна записати що

$$W = P_z + P_d, \quad (2.5)$$

де  $P_z = \alpha I(T_h - T_c)$  - доданок, який описує потужність джерела, яка витрачається на перенесення носіїв заряду в напрямку, протилежному до напрямку дії термоелектричного поля,  $P_d = I^2 R$  - описує потужність втрат Джоуля.

Підставляючи записані вирази в формулу (2.5) знайдемо:

$$W = P_h - P_c = \alpha I(T_h - T_c) + I^2 R. \quad (2.6)$$

Холодильним коефіцієнтом (коефіцієнтом корисної дії термопари) є відношення теплової потужності, яка поглинається холодним колектором термопари до загальних витрат електроенергії [10]:

$$\varepsilon = \frac{P_c}{W} = \frac{\alpha T_c I - 0.5 I^2 R - \kappa \Delta T}{\alpha I \Delta T + I^2 R}. \quad (2.7)$$

тут  $\Delta T = T_h - T_c$  різниця абсолютних температур між колекторами.

Очевидно, що холодильний коефіцієнт залежить від сили струму термопари і від різниці температур між колекторами. Для реальних ТЕМП холодильний коефіцієнт складає величину порядку  $\varepsilon = 0.4 - 0.8$ . При малому перепаді температур між колекторами, і при малій силі струму

$$\varepsilon = \lim_{I \rightarrow 0} \frac{\alpha T_c I - 0.5 I^2 R - \kappa \Delta T}{\alpha I \Delta T + I^2 R} = \infty, \quad (2.8)$$

що фактично означає, що при потребі мати великий холодильний коефіцієнт ТЕМП, треба вибирати модулі Пельтьє з великою кількістю елементів. До того ж, через модулі ТЕМП треба пропускати мінімально можливу силу струму. Мінімальний струм доцільно знаходити експериментально. Іншими словами, силу струму зменшують до величини, яка зможе повністю компенсувати потік тепла в протилежному напрямку, викликаного теплопровідністю гілок ТЕМП. Варюючи режим роботи модуля, холодильним коефіцієнтом можна керувати. При цьому, якщо  $\Delta T \rightarrow 0$  холодильний коефіцієнт може бути  $\varepsilon > 1$ .

Звичайно, що ТЕМП потужності меншої ніж потужність світлодіода не зможе забезпечити його термостабілізацію. Це спровокує порушення теплового балансу і перегрів світлодіода. З іншого боку, застосування ТЕМП завищеної потужності може призвести до зниження температури холодного колектора температури точки роси. Це спровокує утворення на елементах конструкції льоду і до короткого замикання.

Дуже важливим є режим максимального холодильного коефіцієнта. Диференціюючи (2.7) по струму, із умови

$$\frac{d\varepsilon}{dI} = 0, \quad (2.9)$$

Знайдемо, що холодильний коефіцієнт досягне максимальної величини

$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \frac{\sqrt{1 + 0.5Z \Delta T} - T_h/T_c}{\sqrt{1 + 0.5Z \Delta T} + 1} \quad (2.10)$$

при силі струму

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{R \left[ \sqrt{1 + 0.5Z \Delta T} - 1 \right]}. \quad (2.11)$$

Аналогічно знайдемо максимальну холодопродуктивність, яке наступить коли

$$\varepsilon_d = \frac{1}{2T_h} \left( T_c - \frac{2\Delta T}{ZT_c} \right). \quad (2.12)$$

Як видно з отриманого співвідношення, холодильний коефіцієнт визначається перепадом температур  $\Delta T$ , який створює ТЕМП, і величиною критерію Йоффе напівпровідникових матеріалів  $Z$ . Критерій Йоффе описується формулою

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa}, \quad (2.13)$$

тут  $\alpha$ ,  $\sigma$ , і  $\kappa$  коефіцієнти термоЕРС, електропровідності, і теплопровідності гілок термопари.

Аналіз формул (2.10) і (2.12) показує, що холодильний коефіцієнт росте при рості критерію  $Z$ , а при  $Z \rightarrow \infty$  прямує до величини холодильного коефіцієнта ідеальної машини Карно

$$\varepsilon_k = \frac{P_c}{P_h - P_c} = \frac{\alpha T_c I}{\alpha I (T_h - T_c)} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad (2.14)$$

В термоелектричних системах малої потужності ощадливе використання електроенергії не має особливого змісту. Тому там можна вмикати режим максимальної холодопродуктивності. Однак, системах великої потужності частіше вмикають режим максимального холодильного коефіцієнта [38].

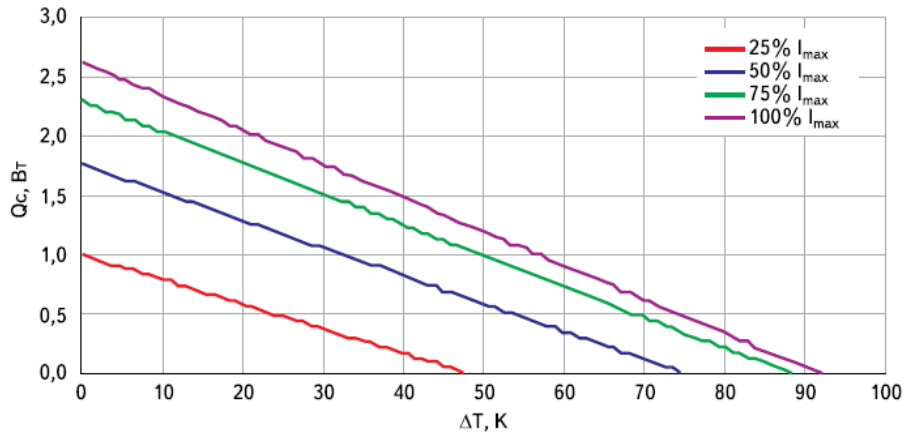


Рис. 2.16 Типова залежність холодильної потужності від різниці температур ТЕМП.

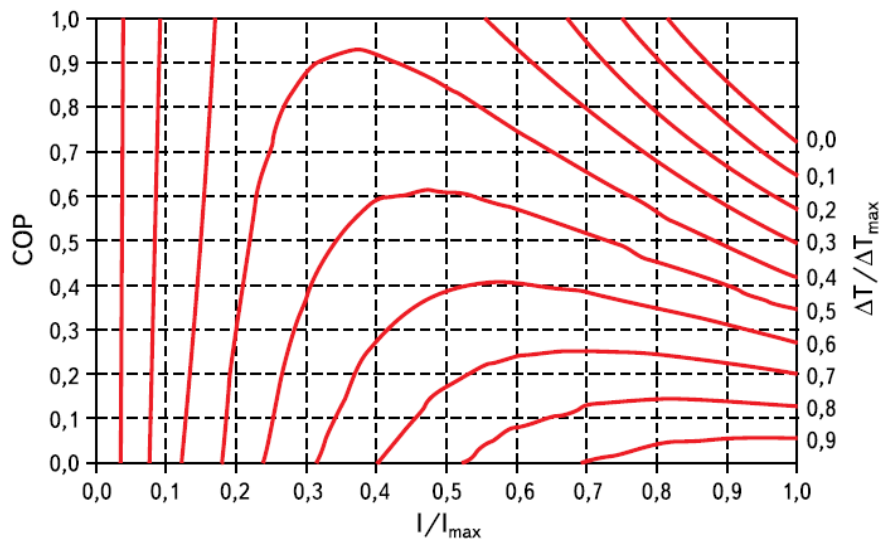


Рис. 2.17 Типова залежність холодильного коефіцієнта від відносного струму ТЕМП.

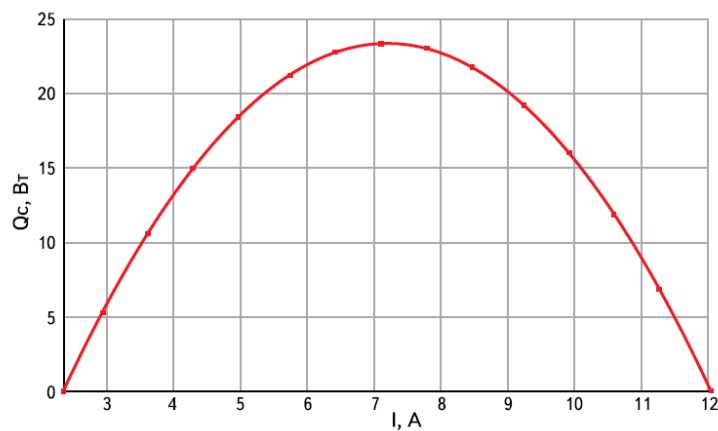


Рис. 2.18 Залежність холодильної потужності від сили струму ТЕМП.

Безсумнівною перевагою ТЕМП є низьковольтне живлення постійним струмом. Це дає змогу підєднувати їх до стандартних систем з напругою 12, 24, 36 і 48 В.

Безпечна для людини низьковольтна напруга створює сутєві переваги перед пристроями з живленням від мережі змінного струму 220 і 380 В. При цьому ТЕМО не створює шкідливих електромагнітних випромінювань і дає можливість плавного вмикання і вимикання приладів для згладжування великих пускових струмів. Це буває важливим для поліпшення якості електричної енергії бортової мережі. Для повноти картини слід зазначити, що ТЕМО можна застосовувати не тільки для високоефективного охолодження, але і для ефективного нагріву. Тоді до теплової потужності Джоуля, яка генерується ТЕМО при протіканні електричного струму додається тепло, перекачане ефектом Пельтьє з холодного колектора. В залежності від призначення, густини теплових потоків між світлодіодом та і докільям ТЕМО виготовляють з різними конструкціями теплообмінників. Найбільшого поширення набули теплообмінники з повітряним і рідинним типом каналізації теплової енергії. Каналізація тепла. Теплопередача може здійснюватися і при допомозі прямого кондуктивного контакту.

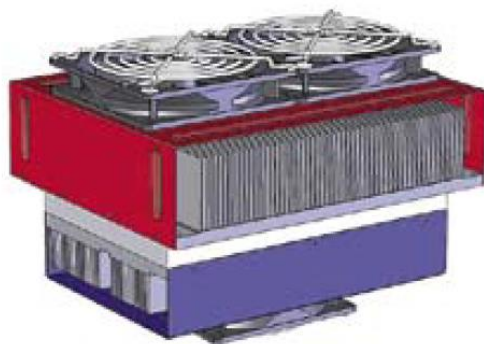


Рис. 2.19 Зовнішній вигляд термоелектричного тандему «повітря-повітря»

Термоелектричний тандем «повітря-повітря» внаслідок універсальності і простоти застосування отримав найбільше поширення. В ньому до обох боків ТЕМП приєднані радіатори, в яких теплообмін забезпечується тепловою конвекцією повітряного потоку, який збуджується вентиляторами.

### 3 НАУКОВО - ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Розрахунок теплового режиму СДМ з пасивним радіатором

Для початку розглянемо традиційний спосіб охолодження світлодіодної матриці пасивним радіатором. Як зразок, розглянемо схему, приведену нижче.

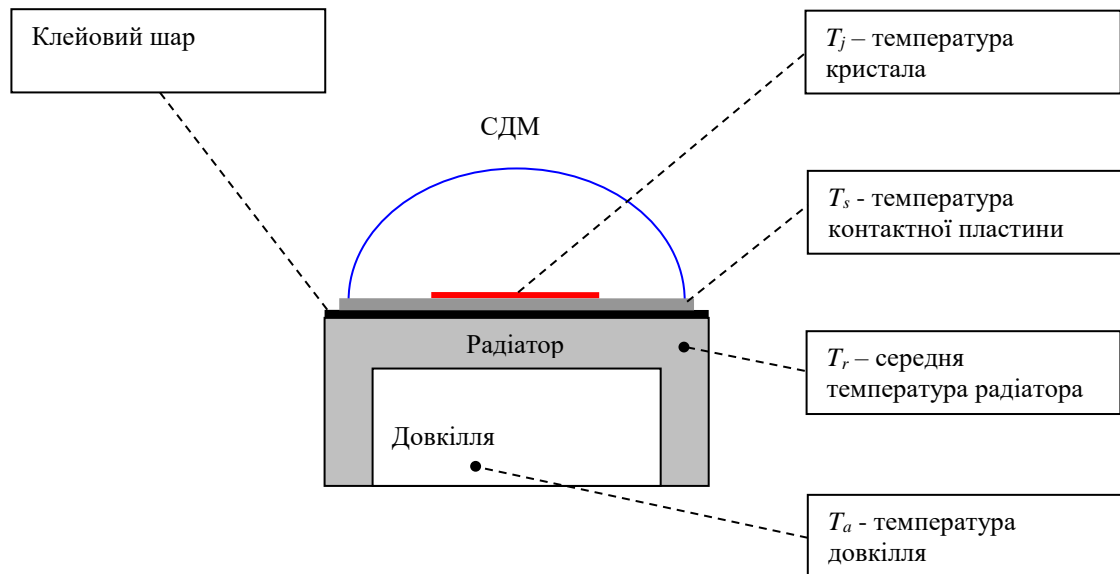


Рис. 3.1. Зразкова схема охолодження світлодіодної матриці пасивним радіатором.

Теплове коло охолодження світлодіодної матриці будемо зображати трьома послідовно сполученими тепловими опорами.

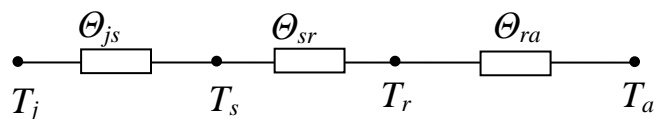


Рис. 3.2 Теплове коло охолодження світлодіодної матриці

$\Theta_{js}$  - тепловий опір кристал-контактна пластина ,

$\Theta_{sr}$  - тепловий опір контактна пластина – радіатор,

$\Theta_{ra}$  - тепловий опір радіатор – дошкілля.

Для світлодіодних матриць дуже важливим параметром є тепловий опір між кристалом і контактною пластиною  $\Theta_{js}$ . Його величину знаходять в технічній документації на матрицю. Якщо матриця монтується на радіатор, то в

теплову схему послідовно до  $\Theta_{js}$  під'єднують теплові опори між контактною пластиною і радіатором  $\Theta_{sr}$ , та радіатором і доквіллям  $\Theta_{ra}$  (рис. 3.2). Повний тепловий опір теплового кола визначають сумуванням:

$$\Theta_{ja} = \Theta_{js} + \Theta_{sr} + \Theta_{ra}, \quad (3.1)$$

Потік тепла в для повного кола описується тепловим законом Ома

$$P_t = \frac{T_j - T_a}{\Theta_{ja}}. \quad (3.2)$$

тут  $T_a$  - температура доквілля,

$\Theta_{ja}$  – повний тепловий опір,

$P_t$  - тепла потужність світлодіодної матриці.

Із (3.2) для температури світловпромінюючих кристалів світлодіодної матриці отримаємо:

$$T_j = T_a + P_t \cdot R\Theta_{ja}. \quad (3.3)$$

Слід зазначити, що в рамках побудованої теплової моделі світлодіодної матриці ми вважаємо, що кристали знаходяться в однакових теплових умовах. Крім того вони абсолютно ідентичні. Це дає право розраховувати тепловий режим лише одного кристала, поширюючи отримані дані на всі кристали.

Формула (3.3) показує, що високі температури доквілля, і великі потужності світловипромінюючих приладів негативно впливають на тепловий режим СДМ. В той же час, малий тепловий опір системи охолодження і низька температура доквілля приводять до зниження температури світловипромінюючих кристалів, і сприяють роботі згідно технічних вимог.

Тепловий опір між кристалом та контактною пластиною СДМ вказується в техдокументації на матрицю і залежить від його потужності, внутрішньої конструкції та структури внутрішньоматричних сполучень. Зокрема, для малопотужних світлодіодних матриць величина величина  $\Theta_{sj}$  досить велика, і знаходиться в діапазоні  $4 K/Vm \div 12 K/Vm$ . В той же час, для світлодіодних матриць великої потужності тепловий опір  $\Theta_{sj}$  може знаходитися в діапазоні.



$0.1 K/Wm \div 0.01 K/Wm$ . Тепловий опір між контактною пластиною СДМ і тепловідводом чи охолоджуючим радіатором залежить від якості теплового контакту.

Визначальним для якості всієї термостабілізуючої системи є тепловий опір між радіатором та доквіллям  $\Theta_{ra}$ . Він визначається типом, теплорозсіюючою здатністю радіатора, та температурою доквілля. Тепловий опір радіатора розраховують на основі відомих емпіричних співвідношень, за допомогою числового комп'ютерного моделювання, або експериментальним шляхом. Комп'ютерне моделювання дозволить прийняти технічні рішення щодо забезпечення адекватного теплового режиму, а експериментальні вимірювання проаналізувати правильність прийнятих рішень по забезпеченню температурного режиму світлодіодних пристроїв.



Рис. 3.2 Світлодіодна матриця CMA 1516 LED

Зараз, для пасивного охолодження світлодіодів потужністю до 15 Вт широко використовуються алюмінієві та керамічні радіатори. Для охолодження світлодіодних матриць потужністю більше ніж 15÷30 Вт для інтенсифікації теплообміну додатково використовують вентилятори. Для охолодження світлодіодних матриць потужністю більше ніж 50÷300 Вт необхідно застосовувати термоелектричне або рідинне охолодження.

## Технічні параметри СДМ СМА 1516 LED

Таблиця 3.1

Максимальна температура р-п переходу, (°C)	140	
Максимальна температура контактної площадки $T_{s \max}$ (°C)	125	
Площа контакту світлодіоду $S_j$ (мм <sup>2</sup> )	250	
Квантова ефективність $\eta_e$	0.25	
Температура контактної площадки $T_s$ °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 $\Theta_{js}$ при $I_f=0.175A$ , K/Wm		
Тепловий опір р-п –перехід – контактна площадка світлодіода $\Theta_{js}$ при $I_f=0.350A$ , K/Wm		

В світлодіодних матрицях серії СМА скомутовано кілька сотень окремих світлодіодів, а отже на тепловій схемі буде кілька сотень різних температурних вузлів  $T_j$ .

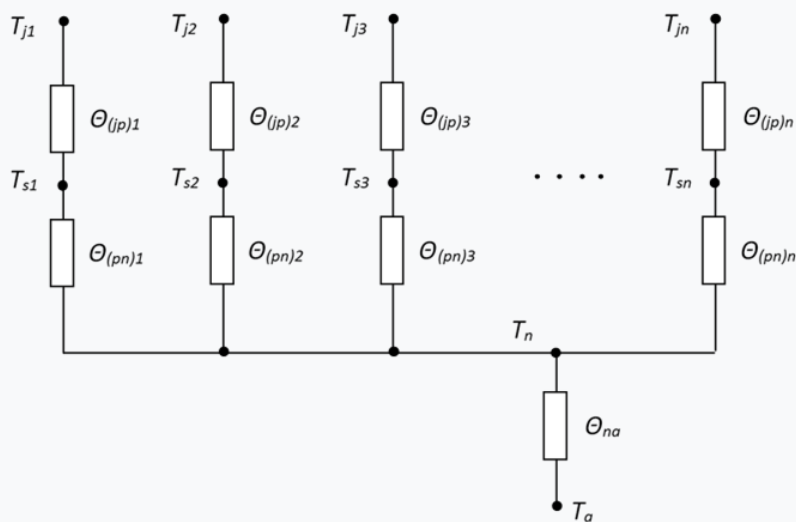


Рис. 3.3 Теплова схема СДМ з великою кількістю світлодіодних кристалів на контактній пластині.

Еквівалентну теплову схему можна подати у вигляді, як показано на рис. 3.3. Взагалі кажучи, теплові умови в яких перебувають кристали СДМ

різні. Зокрема, хоч кристали електрично сполучені послідовно, по теплу виявляються сполученими паралельно.

Тому тепловий опір СДМ слід обчислювати керуючись правилами для паралельного сполучення теплових опорів:

$$\frac{1}{\Theta_{(j-a)\Sigma}} = \sum_i \frac{1}{\Theta_{(j-b)i}}. \quad (3.4)$$

В ідеальному випадку рівності умов теплового режиму для кожного кристала (3.4) набере вигляду:

$$\Theta_{(j-a)\Sigma} = \frac{\Theta_{(j-b)l}}{n}, \quad (3.5)$$

Здійснимо розрахунок температурного режиму СДМ серії СМА 1516, яка має понад сотню світлодіодів. Щоб утримувати температуру світловипромінюючих кристалів світлодіодів при температурі не вищій від допусимої, тепловий опір  $\Theta_{sa}$  повинен бути меншим від критичного, при якому починаються незворотні руйнівні процеси в напівпровідниковій структурі кристалів. Графічна залежність  $\Theta_{sa}$  від прямого струму при різних температурах довкілля зображений на рис. 3.5.

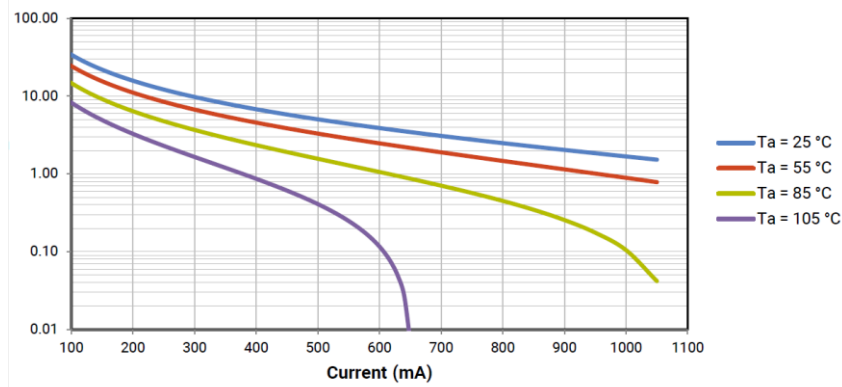


Рис. 3.4 Залежність теплового опору  $\Theta_{sa}$  світлодіодної матриці серії СМА 1516 від струму при різній температурі довкілля.

Теоретичний розрахунок і експериментальні вимірювання підтверджують той факт, що теплові втрати в світлодіодних матрицях складають 75% від підведеної від мережі електричної потужності. Отже, значення квантової

ефективності матриць взагалі і конкретної матриці СМА 1516 будемо брати на рівні  $\eta_e = 0.25$ .

Тепер можна зробити оцінку верхньої межі температури кристала.

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

Дана оцінка дає дещо занижену температуру. Однак, при експлуатації приладу, його температура, внаслідок непередбачуваних коливань температури довкілля, може легко вийти за окреслені межі. Це приведе до негайного виходу з ладу СДМ.

Нехай температура довкілля  $T_a = 25^\circ\text{C}$ . Виконаємо розрахунок для максимального і мінімального струму живлення.

Виберемо мінімальний струм матриці  $I_{min} = 0.175 \text{ A}$ . По вольт-амперних характеристиках приладу знаходимо пряму напругу, яка відповідає цьому струму. Маємо  $U_{min} = 37.2 \text{ В}$ .

Використовуючи закон Джоуля в інтегральній формі знайдемо мінімальну потужність, яку споживає матриця від мережі

$$P = U_{min} I_{min} = 37.2 \times 0.175 = 6.51 \text{ Вт}$$

Враховуючи величину квантової ефективності приладу знайдемо потужність теплової генерації:

$$P_t = (1 - \eta_e) \cdot P = 0.75 \cdot 6.51 = 4.9 \text{ Вт}$$

Знайдемо тепловий опір кристал-середовище. Використаємо закон Ома для теплових кіл

$$\Theta_{ja} = \frac{T_j}{P_t} = \frac{85-25}{4.9} = 12.2 \text{ К/Вт}.$$

Обчислимо тепловий опір клейового шару між контактною площадкою світлодіодної матриці і радіатором. Із технічних характеристик знайдемо площу контактної площадки. Маємо  $\Delta S = 250 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ . Товщину теплоконтактного шару виберемо рівним  $\Delta l = 10^{-4} \text{ м}$ . Для теплового опору теплоконтактного шару маємо

$$\Theta_{sr} = \Delta l / \kappa \cdot \Delta S = 10^{-4} / 0.7 \cdot 250 \cdot 10^{-6} = 0.6 \text{ К/Вт}$$

Тепловий опір кристал-контактна площадка матриці можна взяти з паспортних даних на прилад. Для струму  $I_{min} = 0.175 \text{ A}$  та для температури

довкілля  $T = 278 \text{ K}$  маємо  $\Theta_{js} = 6 \text{ K/Вт}$ . Тепер можна знайти необхідний тепловий опір радіатора матриці.

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

Виконаємо розрахунок для максимального струму матриці  $I_{max} = 0.350 \text{ A}$ . По вольт-амперних характеристиках приладу знаходимо пряму напругу, яка відповідає цьому струму. Маємо  $U_{max} = 41 \text{ В}$ .

Для потужності, яку матриця споживає від мережі маємо:

$$P = U_{max} I_{max} = 41 \times 0.350 = 14.40 \text{ Вт}$$

Для потужності теплової генерації маємо:

$$P_t = (1 - \eta_e) \cdot P = 0.75 \cdot 14.4 = 10.8 \text{ Вт}$$

Обчислюємо найбільший тепловий опір радіатора в форсованому режимі роботи матриці.

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



Рис. 3.5 Радіатор охолодження LPF11180-ZHE для світлодіодної матриці охолодження СДМ

### 3.2 Вибір ТЕМП

Для розрахунку оптимального охолодження світлодіодної матриці необхідно знати: теплову потужність СДМ; температуру при якій слід стабілізувати роботу матриці, температуру середовища.

Знаючи ці величини, можна розрахувати потрібну холодопродуктивність даної охолоджувальної системи, температуру гарячого і холодного колекторів.

Для охолодження до заданої температури і відводу деякої кількості тепла необхідно прикласти до модуля певну напругу (пропустити через модуль певний струм). Також корисно знати холодильний коефіцієнт і вимоги щодо споживаної потужності самим модулем.

Для демонстрації методики розрахунку виберемо СДМ з електричною потужністю  $P=65 \text{ Вт}$ , що відповідає тепловій потужності  $P_c = 50 \text{ Вт}$ . Для термостабілізації такої матриці виберемо, наприклад, термоелектричний модуль ТЕМП А-ТМ 11,2-127-1,4 HR2, холодильна потужність якого в залежності від струму живлення може досягати  $100 \text{ Вт}$ . На графіку, що зображений на рис. 3.16 проведемо горизонтальну лінію  $P_c = 50 \text{ Вт}$ , до перетину з кривими 1-5. Очевидно, що даний модуль може забезпечити перепад між колекторами  $\Delta T = 5 \text{ К}$  при струмі  $I = 0.4 I_{\text{max}}$ ,  $\Delta T = 15 \text{ К}$  при струмі  $I = 0.6 I_{\text{max}}$ ,  $\Delta T = 25 \text{ К}$  при струмі  $I = 0.8 I_{\text{max}}$ , а при максимальному струмі  $I = 1.0 I_{\text{max}}$ , перепад температур може скласти вже  $\Delta T = 25 \text{ К}$ . Завдання полягає в знаходженні робочого струму, робочої напруги і холодильного коефіцієнта для вибраних умов експлуатації.

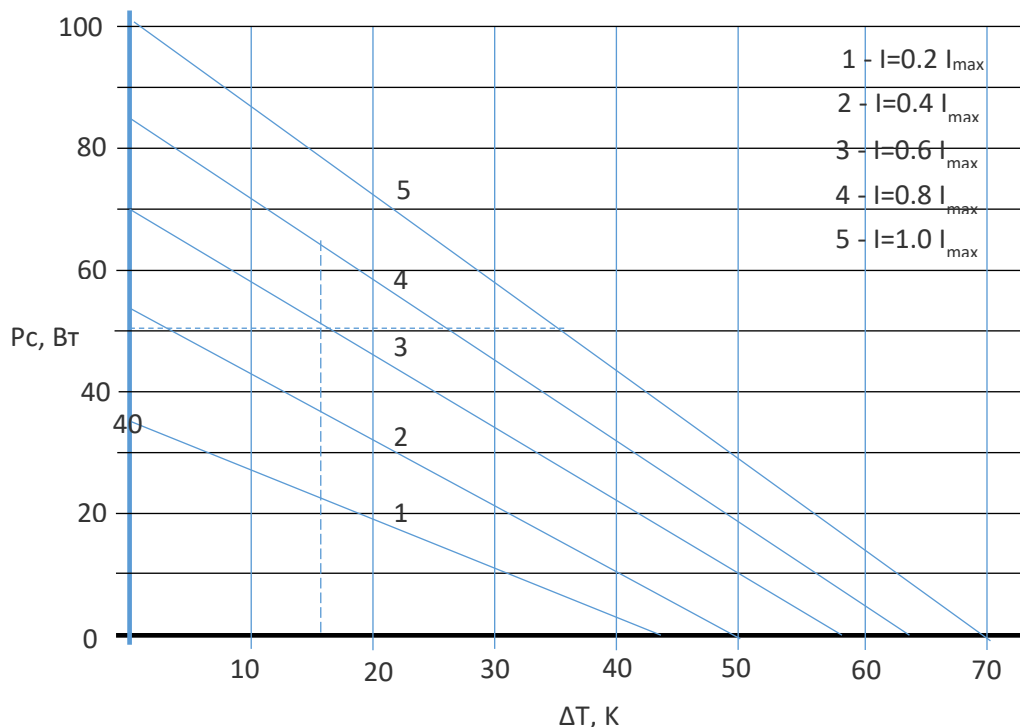


Рис. 3. 6 Залежність холодної потужності ТЕМП А-ТМ 11,2-127-1,4 HR2 від різниці температур між колекторами при різних струмах. Крива 1 при  $I = 0.2 I_{\text{max}}$ , 2 -  $I = 0.4 I_{\text{max}}$ , 3 -  $I = 0.6 I_{\text{max}}$ , 4 -  $I = 0.8 I_{\text{max}}$ , 5 -  $I = 1.0 I_{\text{max}}$ .

Обчислюємо різницю температур між колекторами

$$\Delta T = T_h - T_c = 321 - 293 = 28K$$

Проводимо горизонтальну лінію, яка відповідає потужності світлодіодної матриці  $P_c = 50 \text{ Вт}$ . По графіку знаходимо, що при  $\Delta T = 28K$ , і  $P_c = 50 \text{ Вт}$  струм повинен складати  $I = 0.9I_{\max}$ , що в перерахунку на реальні складає  $I = 0.9I_{\max} = 10A$ .

При допомозі стандартних вольт-амперних характеристик визначаємо напругу живлення. Зокрема, вона повинна складати  $U = 15V$ .

### 3.3 Розрахунок теплового режиму СДМ з термоелектричним модулем Пельтьє

Будемо розглядати роботу модуля у вигляді термопари, яка складається з двох гілок з різним типом провідності (рис.3.3). Нехай перша гілка має провідність  $n$  - типу, а друга  $p$  - типу. Вважаємо, що гілки сполучені мідною комутаційною шиною. При протіканні постійного струму у вказаному на рисунку напрямку, нижній колектор нагрівається, а верхній - охолоджується. Позначимо температуру холодного колектора -  $T_c$ , а гарячого -  $T_h$ .

Знайдемо теплову потужність, яка поглинається холодним колектором (холодопродуктивність) [8,9]:

$$P_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - \kappa(T_h - T_c), \quad (3.6)$$

при цьому від гарячого колектора при допомозі активного радіатора буде відводитися потужність  $P_h$

$$P_h = \alpha T_h I + \frac{1}{2} I^2 R - \kappa(T_h - T_c), \quad (3.7)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт термоЕРС,  $\kappa$  і  $R$  – сумарна теплопровідність і сумарний опір гілок,  $I$  – сила струму.

Знаходимо потужність, яка переходить від гарячого колектора до холодного шляхом теплопровідності гілок

$$P_\kappa = \kappa(T_h - T_c), \quad (3.8)$$

Зрозуміло, що потужність, яка виділяється на гарячому колекторі більша потужності, яку поглинає холодний колектор на величину затрат електричної потужності джерела

$$P_h = P_c + W. \quad (3.9)$$

Вона витрачається на перенос носіїв заряду проти термоелектричного поля

$$P_z = \alpha I(T_h - T_c), \quad (3.10)$$

та на потужність Джоуля

$$P_d = I^2 R. \quad (3.11)$$

Отримаємо

$$W = P_h - P_c = \alpha I(T_h - T_c) + I^2 R. \quad (3.12)$$

Холодильний коефіцієнт знаходимо як відношення теплової потужності, яка поглинається холодним колектором до електричної потужності:

$$\varepsilon = \frac{P_c}{W} = \frac{\alpha T_c I - 0.5 I^2 R - \kappa \Delta T}{\alpha I \Delta T + I^2 R}. \quad (3.13)$$

де  $\Delta T$  перепад температури між холодним і гарячим колекторами.

Принадно відмітимо, що холодильний коефіцієнт визначається величинами сили струму  $I$  і перепаду температур  $\Delta T$ . Як видно із рис. 3.8, при даній силі струму холодильний коефіцієнт є лінійною функцією перепаду температури. Для реальних ТЕМП, які працюють в реальних теплових умовах холодильний коефіцієнт знаходиться в діапазоні  $0.35 \div 0.75$ .

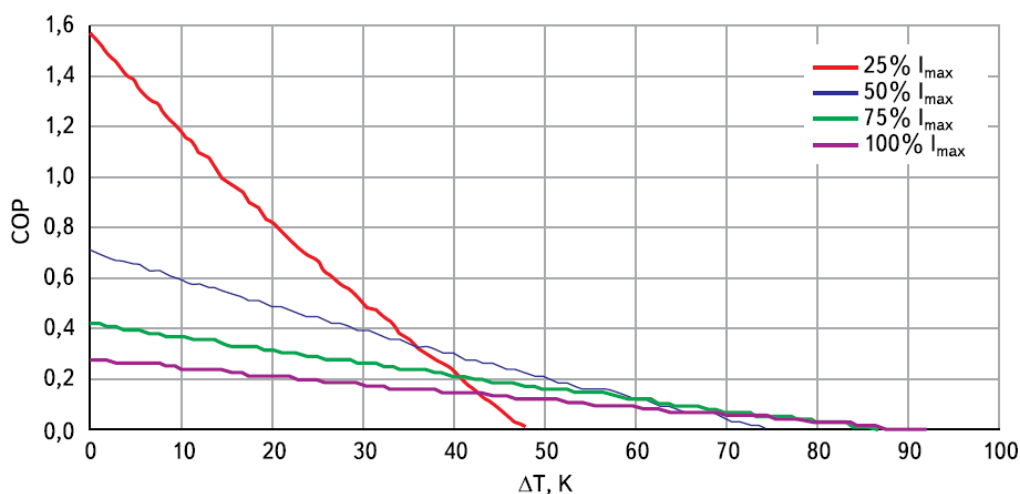


Рис. 3.7 Залежність холодильного коефіцієнта ТЕМП від різниці температур між між колекторами і відносної величини струму.



Цікаво, що при нульовому перепаді температур і при невеликих струмах величина холодильного коефіцієнту необмежено зростає. В цьому криється глибокий практичний зміст. Зокрема, якщо потрібно мати великий коефіцієнт корисної дії термоелектричного холодильника, то треба брати велику кількість модулів, і живити їх малим струмом. Зменшення струму може тривати до тих пір, поки отриманого холоду вистачає для покриття зворотного потоку тепла від гарячого колектора до холодного. Оскільки, змінюючи величину сили струму, холодильним коефіцієнтом можна керувати, то при малих струмах можуть бути отримані значення більші одиниці.

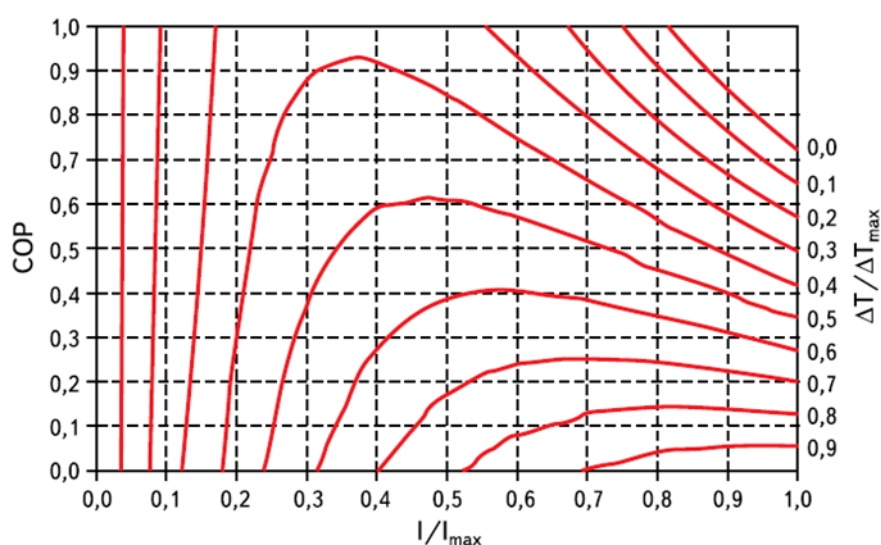


Рис. 3.8 Залежність холодильного коефіцієнта від струму при різних перепадах температур між холодним і гарячим колекторами ТЕМП

Зокрема, графічна залежність показує, що при струмі  $I=0.12 I_{max}$  холодильний коефіцієнт  $\varepsilon=1.5$ , при цьому відношення  $\Delta T/\Delta T_{max} = 0.3$ .

Запишемо рівняння теплогенерації Джоуля. Враховуючи, що в тепло перетворюється не вся електрична енергія отримаємо

$$P_t = (1 - \eta_e) U_f I_f, \quad (3.14)$$

де  $I_f$ ,  $U_f$ ,  $\eta_e$  сила струму, робоча напруга, та квантова ефективність СДМ.

Із рівняння балансу потужностей випливає, що теплова потужність СДМ повинна дорівнювати потужності генерації холоду

$$P_t = P_c, \quad (3.15)$$

Нехай від гарячого колектора активним радіатором відбирається теплова потужність  $P_h$ . Для розрахунку температурного режиму СДМ використаємо метод електротеплової аналогії. Схема заміщення ТЕМП зображена на рисунку 3.6.

Із другого теплового закону Кірхгофа можна записати

$$T_j = T_a + P_c \cdot (\Theta_{js} + \Theta_{sc}) + P_h \cdot (\Theta_{hr} + \Theta_{ra}) - \Delta T, \quad (3.16)$$

де  $\Theta_{js}$  – тепловий опір між кристалом і контактною пластиною, де  $\Theta_{sc} = \Theta_{sc}$  – теплові опори між контактною пластиною і холодним колектором та між гарячим колектором і радіатором, де  $\Theta_{ra}$  – тепловий опір між активним радіатором та довкіллям.

Запишемо холодопродуктивність у вигляді [8,9]:

$$P_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - \kappa \Delta T, \quad (3.17)$$

а потужність притоку тепла у вигляді

$$P_h = \alpha T_h I + \frac{1}{2} I^2 R - \kappa \Delta T, \quad (3.18)$$

Очевидно, що між тепловими потужностями гарячого і холодного колекторів існує зв'язок

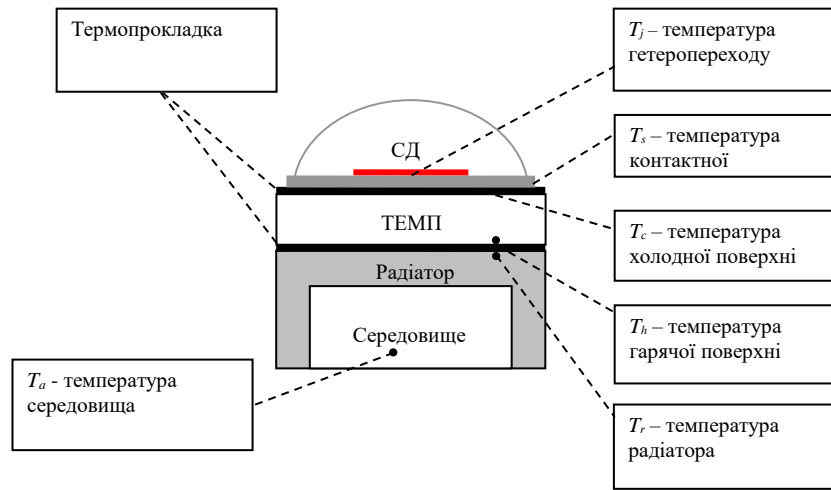
$$P_h = P_c + W. \quad (3.19)$$

де  $W$  – електрична потужність джерела, при чому

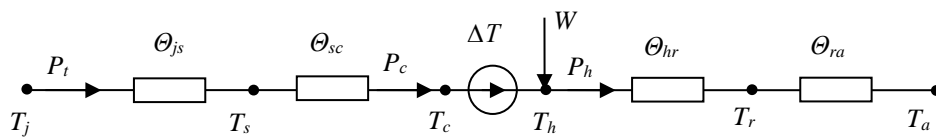
$$W = P_h - P_c = \alpha I \Delta T + I^2 R. \quad (3.20)$$

Звідси, для коефіцієнта корисної дії холодильника отримаємо

$$\varepsilon = \frac{P_c}{W}. \quad (3.21)$$



а)



б)

Рис. 3.9 Схема охолодження СДМ з ТЕМП і радіатором (а) та еквівалентне теплове коло (б).  $T_j$  - температура кристала,  $T_s$  - температура контактної пластини,  $T_c$  і  $T_h$  - температури холодного і гарячого колектора ТЕМП,  $T_r$  - температура радіатора,  $T_a$  - температура середовища.

Керуючись другим тепловим законом Кірхофа можна записати рівняння:

$$\Delta T_j = T_j - T_a = P_c \cdot (\Theta_c + \Theta_h) + (\alpha I \Delta T + I^2 R) \cdot \Theta_h - \Delta T \quad (2.22)$$

де  $\Theta_c = (\Theta_{js} + \Theta_{sc})$  і  $\Theta_h = (\Theta_{hr} + \Theta_{ra})$  - теплові опори з боку холодного і гарячого колектора ТЕМП,

$$\Delta T = \frac{1}{\kappa} \cdot \left( \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - P_c \right), \quad (3.23)$$

різниця температур між колекторами.

В співвідношенні (3.33) перша складова відповідає за збільшення різниці температур між колекторами внаслідок поглинання теплової енергії Пельтьє. Дві наступних складових описують виділення потужності Джоуля і виділення теплової потужності світлодіодною матрицею. Сумарно, якраз від співвідношення між величинами цих складових залежить ефективність охолодження СДМ.

Управління режимом роботи ТЕМП відбувається при допомозі зміни сили струму живлення. При конструюванні і подальшій експлуатації термоелектричної системи теплової стабілізації СДМ важливо вибрати оптимальний струм, при якому буде відбуватися охолодження з максимальною ефективністю.

Проведемо числовий аналіз роботи СДМ СМА1516 в тандемі з ТЕМП ТСМ ТВ-161. Для прикладу розглянемо вплив величини струму живлення ТЕМП на ефективність теплової стабілізації кристалів матриці при певній величині його потужності і при певному тепловому опорі системи охолодження. Її параметри наведені в табл. 2.1 [11].

Зрозуміло, що максимальна потужність СДМ повинна бути меншою від максимальної холодопродуктивності ТЕМП. Для даної СДМ максимальна тепла потужність складає величину:

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

Тип ТЕМП будемо вибрати в залежності від потужності СДМ, її геометричних розмірів, паспортними вимогами щодо температурного режиму роботи та температури довкілля.

Для проведення числового аналізу отриманих співвідношень використаємо характеристики серійних модулів охолодження ТСМ ТВ-161 [12] з параметрами: Даний ТЕМП має наступні параметри:  $I_{\max} = 5,7 \text{ A}$ ;  $U_{\max} = 18,3 \text{ V}$ ;  $P_{c, \max} = 66.3 \text{ Wm}$ ,  $\Delta T_{\max} = 70 \text{ K}$ .

Застосування будь якої системи охолодження завжди передбачає використання того чи іншого радіатора. Звичайно, що це стосується і термоелектричного охолодження. Оскільки термоелектричний модуль сам споживає електричну потужність, то він мусить скинути середовищу не тільки теплову енергію, яку виділяє матриця, але і свою, власну. Тому вимоги до радіатора є особливо високими. Тепловий опір сучасних радіаторних охолоджувачів складає менше ніж  $\Theta_{ra} = 0.4 \div 0.8 \text{ K/Wm}$ . А системи охолодження з використанням рідинного охолодження і теплових трубок може складати величини  $\Theta_{ra} = 0,1 \div 0.01 \text{ K/Wm}$ . Проте, рідинні системи громіздкі, і їх сусідство з електроприладами часто є не бажаним.

На графіку 3.10 представлена температури перегріву кристалів СДМ від струму ТЕМП при різній потужності джерела світла.

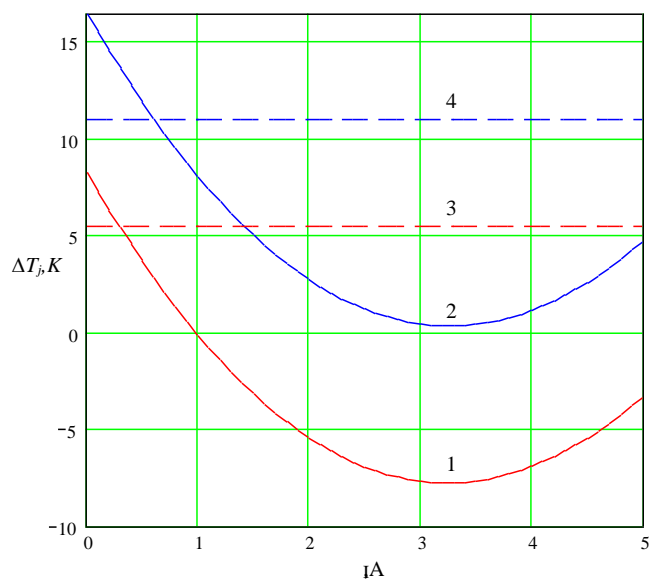


Рис.3.10 Залежність температури кристалу від робочого струму ТЕМП при різних теплових потужностях СДМ при теплових опорах  $\Theta_c=0.4$  K/Wm,  $\Theta_h=0.2$  K/Wm. Суцільні криві 1 і 2 при  $P_c=10$  Вт, і  $P_c=20$  Вт відповідно. Штрихові криві 3 і 4 при тих же параметрах, але при відсутності ТЕМП.

Мінімальні значення кривих  $\Delta T_j(I)$  описують режими роботи з максимально можливою ефективністю термоелектричної системи охолодження. При цьому досягається оптимальна з точки зору випромінювання світла, температура кристалів СДМ. Аналіз показує, що при близьких до ефективного значення струмах, термоелектрична система охолодження сприяє отриманню нижчих ніж традиційна величинам температури. На графіку штриховими кривими показані температурні залежності для системи охолодження без ТЕМП, розраховані по формулі (2.21) для таких же значень теплового опору.

Функціональна залежність температури окремого кристала від сили струму ТЕМП при параметричній зміні величини теплового опору з боку гарячого колектора ТЕМП побудована на рисунку 3.10.

Аналіз графіка показує, що із збільшенням теплового опору  $\Theta_h = (\Theta_{hr} + \Theta_{ra})$  – з боку гарячого колектора ТЕМП тепловий режим СДМ погіршується а мінімальні величини функцій  $\Delta T_j(I)$  зміщуються в бік менших

струмів. При певній величині потужності ТЕМП для даної СДМ можливе зменшення температури кристалів до температури деколи меншої ніж температура довкілля. Це дуже важливо коли температура довкілля висока, а деколи навіть рівна критичній температурі СДМ.

Залежність перепаду температур між температурою кристалів і температурою довкілля різних теплових потужностях СДМ приведена на рисунку 3.10. Із аналізу графічної залежності випливає, що збільшення сили струму приводить до збільшення перепаду температур між колекторами ТЕМП. Проте, на перепад сильно впливає і теплове навантаження термоохолодильника. А саме, при збільшенні теплового навантаження перепад температури зменшується і навпаки, при зменшенні - збільшується.

Величина теплового опору системи охолодження сильно впливає режим роботи модуля Пельтьє. Якщо, внаслідок охолодження, температура кристалу СДМ зрівняється з температурою довкілля, то тепловий опір системи охолодження стане нульовим.

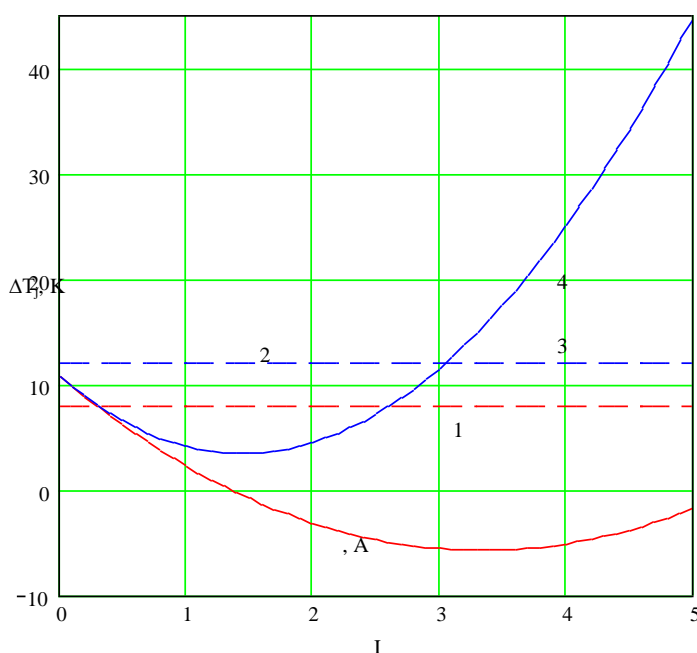


Рис.3.11. Залежність температури кристалу від робочого струму ТЕМП при потужності  $P_c = 10 \text{ Вт}$  і при різних теплових опорах з боку гарячого колектора. Суцільні криві 1 і 2 при  $\Theta_h = 0.2 \text{ К/Вт}$  і  $\Theta_h = 0.6 \text{ К/Вт}$ . Штрихові 3 і 4 при тих же параметрах, але при відсутності ТЕМП.

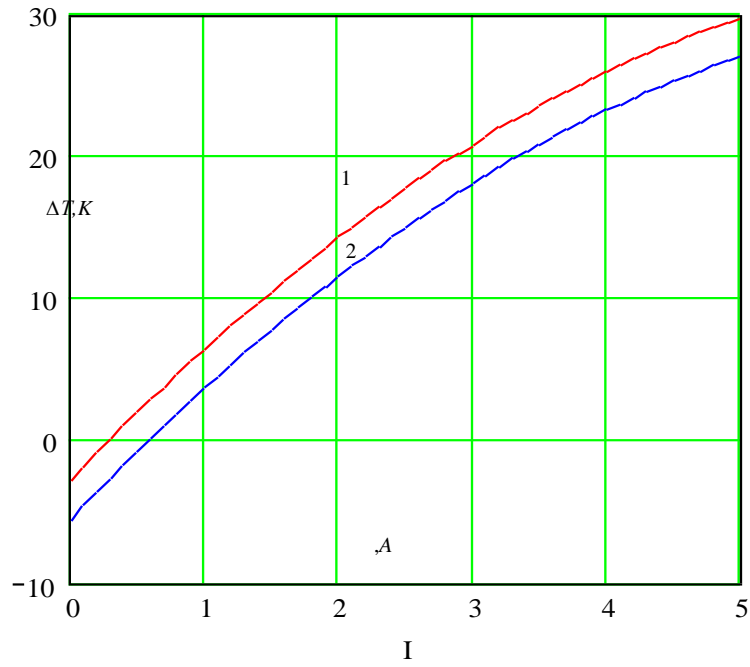


Рис.3.12. Залежність різниці температур між колекторами від робочого струму ТЕМП при різних потужностях СД. Крива 1 при  $P_c=15 \text{ Вт}$ , 2 - при  $P_c=25 \text{ Вт}$ .

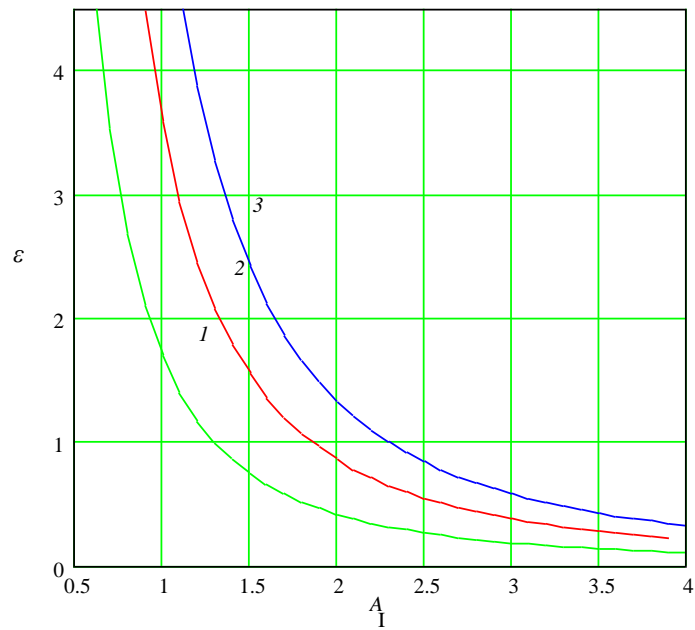


Рис.3.13 Залежність холодильного коефіцієнта від робочого струму ТЕМП при різних потужностях СДМ. Крива 1 при  $P_c=15 \text{ Вт}$ , 2 - при  $P_c=25 \text{ Вт}$ , 3 - при  $P_c=35 \text{ Вт}$ .

## **4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ**

### **4.1 Аналіз можливих небезпечних і шкідливих виробничих чинників, електробезпеки і пожежної безпеки**

Підстерігати безпека у вигляді різних негативних факторів нас може практично скрізь [44-49]. Навіть на самих нешкідливих робочих місцях можна говорити про шкідливий вплив комп'ютерів, тривалої сидячої роботи і про багато іншого. На багатьох виробництвах робота пов'язана з постійним впливом на працівників несприятливих умов. Шкідливі та небезпечні виробничі фактори (ВФ) нерозривно пов'язані між собою. ВФ - це фактори, які в результаті свого тривалого або короткочасного впливу на людину призводять до погіршення стану здоров'я або до травми. На виробництвах з такими умовами праці різні нещасні випадки відбуваються досить часто.

ВФ - це фактори, які, діючи на працівника, знижують його працездатність або призводять до різних захворювань, їх часто ще називають професійними хворобами. Варто зазначити, що межа між цими двома групами факторів досить умовна. При деяких умовах шкідливі виробничі фактори можуть стати небезпечними. Наприклад, підвищена вологість відноситься до несприятливих умов праці, вона може викликати різні захворювання дихальної системи. Якщо людині доводиться в таких умовах працювати з електричним струмом, то це стає вже занадто небезпечно, а не просто шкідливо.

Всі фактори на будь-якому підприємстві можуть мати різне походження. Часто можна зустрітися з несприятливими умовами праці, які виникають з вини керівництва. Це питання потребує особливої уваги з боку контролюючих органів. Слід зазначити, що немає чіткої межі між шкідливими та небезпечними факторами, вона завжди умовна і в будь-який момент може бути зруйнована. На виробництві завжди є технологічні процеси, обладнання, які є джерелом виділення ВФ. До цих проваджень можна віднести: очищення деталей за допомогою хімічних засобів; фарбування устаткування; зварювальні роботи; процеси нанесення захисних антикорозійних покриттів; обробку або переробку металів. При здійсненні всіх цих процесів виділення шкідливих речовин



неминуче, але, як правило, посилене їх утворення пов'язане з недотриманням технологій або невмілим їх використанням.

На багатьох виробництвах просто неможливо уникнути впливу деяких факторів. Серед них особливе місце займають: температура, висока вологість і випромінювання; електромагнітні поля; лазерне і ультразвукове випромінювання; вібрація; сильний шум; освітлення, яке може бути як занадто інтенсивним, так і недостатнім, що однаково шкідливо для зору; вплив пилу і аерозолів; працюючі частини обладнання. Кожен фактор окремо начебто і не становить особливої небезпеки для здоров'я людини при короткочасному впливі. Але часто працівник перебуває тривалий час у їх оточенні, та ще відразу декількох, тому їх вплив стає цілком відчутним.

На підприємствах, де в цехах стоять верстати та інше обладнання, без шуму, як правило, не обходиться. Постійно працює техніка видає гучні звуки, які можуть змінювати свою інтенсивність. Якщо людина змушений регулярно зазнавати такого впливу, то це негативно позначиться на його здоров'ї. Від сильного шуму починає боліти голова, підвищується тиск, знижується гострота слуху. Зрештою, від таких умов знижується працездатність, з'являється втома, знижується увага, а це вже може призвести до нещасного випадку. Керівники на подібних підприємствах повинні подбати про своїх працівників, щоб постаратися хоч трохи зменшити негативний вплив шуму на організм.

В результаті постійного впливу даного фактору починає страждати не тільки нервова система, а й опорно-рухова, і система аналізаторів. Робітники, які змушені працювати в таких умовах, часто скаржаться на головні болі, запаморочення, заколисування.

Якщо додати ще і вплив супутніх чинників, таких як вологість, висока температура, шум, то це тільки посилює шкідливий вплив вібрації. Якщо на шкідливих підприємствах досить ефективно налагоджено використання засобів захисту, то робітники будуть піддаватися впливу небезпечних речовин в набагато меншому ступені.

До психофізіологічних факторів можна віднести тягар умов праці і його напруженість. Під напруженістю роботи мається на увазі навантаження на

нервову систему та органи відчуття. Сюди можна віднести тривалу розумову роботу, монотонність виконуваних процесів, емоційні перевантаження. Все це шкідливі виробничі фактори, які, якщо розібратися, практично кожен з нас на своєму робочому місці відчуває в тій чи іншій мірі.

На будь-якому підприємстві необхідно з метою створення сприятливих умов для працівників намагатися забезпечувати комфортну обстановку. Це стосується, насамперед, чистоти повітря у виробничих приміщеннях. Санітарно-гігієнічні служби розділяють основні шкідливі виробничі фактори на хімічні речовини та промисловий пил.

Негативний вплив пилу проявляється в тому, що він здатний провокувати розвиток легеневих захворювань. На будь-якому підприємстві на працівників чиниться вплив шкідливих виробничих факторів відразу з кількох груп, тобто комплексний.

Незважаючи на всі заходи, спрямовані на нейтралізацію шкідливого впливу факторів, неможливо досягти ідеальних умов праці. Це не дозволяють зробити особливості технологічних процесів, продукція та сировина для її виготовлення. Тому для керівників захист від шкідливих виробничих факторів - це першочергове завдання.

Часто буває так, що всі вжиті заходи не можуть забезпечити повністю безпечні умови праці, в цих випадках без застосування ЗІЗ просто не обійтись. Можна зробити висновок про те, що засоби індивідуального захисту, з одного боку, зменшують вплив шкідливих факторів, а з іншого - можуть створювати іншу небезпеку для здоров'я працівника. Заходи безпеки спрямовані, насамперед, на те, щоб шкідливі виробничі фактори не надавали свого небезпечного впливу на людину. З цією метою на будь-якому підприємстві в обов'язковому порядку повинен проводитись інструктаж з безпеки. Дата проведення, зміст фіксуються у спеціальному журналі за підписом усіх інструктованих і того, хто провів цей інструктаж.

## **4.2 Захист персоналу та навколишнього середовища від небезпечних виробничих факторів**

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 незамкнених контурів створюється небезпека перекриттів та іскрінь із можливим розсіюванням енергії близько десятків частот 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 3,5 мм, довжиною 2,5...3 м; металеві стержні діаметром 10-12 мм, довжиною до 10 м; кутову сталь 40Ч40Ч4, довжиною 2.5-5 м. Застосовувати для штучних заземлюючих пристроїв алюмінієві оболонки силових кабелів і неізолювані 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.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

1. В сучасних світлодіодних матрицях (СДМ) ефективність перетворення електроенергії в енергію світлового випромінювання близька до 25%. Інші 75% йдуть на джоулевий нагрів, і виділяються у вигляді тепла.
2. Виділена теплова енергія підвищує температуру світловипромінюючих кристалів матриці, і сильно знижує якість світла, світловіддачу і час експлуатації приладу.
3. Побудована розрахункова математична модель СДМ дозволяє виявити фактори, які суттєво впливають на її тепловий режим.
4. Температура світлодіодної матриці буде зменшуватися при зменшенні інтегрального теплового опору системи охолодження і температури довкілля.
5. Тепловий опір можна зменшити застосовуючи активні способи охолодження, зокрема термоелектричний.
6. Завдяки термоохолодженню тепловим опором можна керувати, а при певних умовах навіть зменшити до нуля.
7. Термоохолодження доцільно використовувати в місцях, де температура довкілля близька до критично високої.
8. Термоелектричне охолодження доцільно використовувати, якщо загальна потужність світлодіодних матриць не перевищує 1000 Вт. В протилежному випадку, внаслідок значного погіршення масогабаритних параметрів, її використання стає недоцільним.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

2. Справочная книга по светотехнике / Под ред.. Ю. Б. Айзенберга. 3-е изд. Перераб. И доп. М.: Знак. – 972 с.
3. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики. / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 735 с.
4. Беляев Н.М. Методы теории теплопроводности. Ч.1. / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. – М.: Высш. шк., 1982. –327 с.
5. Светодиоды / Авт.: Шуберт Ф.Е. Издательство: ФИЗМАТЛИТ, 2008. –496 с. ISBN: 978-5-9221-0851-5.
6. В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев Электроника. М: Высш. школа, 1991 г. - 622 с.
7. Полищук А.А. Обеспечение теплового режима светодиодных ламп при разработке светотехнических устройств. /А.А Полищук // Современная электроника. – 2006. – № 3. – С. 42-45.
8. Сергеев В.А.¶, Ходаков А.М. Расчет и анализ распределений плотности тока и температуры по площади структуры InGaN/GaN мощных светодиодов. ФТП, 2010, т. 44, вып. 2. С.230-234.
9. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур. /Ж.И Алферов // Физика и техника полупроводников. – 1998. – т. 32, – № 1. – С.3-18.
10. Сергеев В.А. Расчет и анализ распределений плотности тока и температуры по площади структуры InGaN/GaN мощных светодиодов. /В.А Сергеев, А.М. Ходаков // Физика и техника полупроводников. – 2010. – т. 44, – № 2. – С. 30-34.
- 11.Ефремов А.А. Влияние джоулева разогрева на квантовую эффективность и выбор теплового режима мощных InGaN/GaN светодиодов. / А.А. Ефремов, Н.И. Бочкарева, Р.И. Горбунов, Д.А. // Физика и техника полупроводников. – 2006. – т. 40, – № 2. – С. 621-627.

1. [Давыденко Ю. Высокоэффективные современные светодиоды. / Ю. Давыденко // Современная электроника. – 2004. – № 10. – С. 36-43.](#)
2. [Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов. / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2005. – № 9. – С. 140-146.](#)
3. [Лотар Ноэль. Охлаждение и регулирование температурных режимов светодиодов. / Лотар Ноэль // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 3. – С. 13-15.](#)
4. [Миранович В. Мощные светодиоды: особенности применения, проблемы и методы решения на примере светодиодов компании PROLIGHT OPTO TECHNOLOGY. / В. Миранович, И. Филоненко // Электронные компоненты. – 2007. – № 6. – С. 45-49.](#)
5. [Староверов К. Системы охлаждения для светодиодов. / К. Староверов // Новости электроники. – 2008. – № 17. – С. 21-23.](#)
6. [Шостаковский П. Современные решения термоэлектрического охлаждения. / П. Шостаковский // Компоненты и технологии. – 2009. – № 12. – С. 40-46.](#)
7. [Закордонец В.С., Рекуник Т.М. Стабілізація температурного режиму світлодіодних систем термоелектричними модулями охолодження// Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 16-17 листопада 2017., м.Тернопіль. – С.138.](#)
8. [Арутюнян А. А. - Основы энергосбережения. Москва, Энергосервис. – 2007.-387с.](#)
9. [Рохлин Г.Н. Газоразрядные источники света . М.: Энергоатомиздат, 1991.- 586с.](#)
10. [Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. ДНАОП 0.00–1.21–98.](#)

11. 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.
- 12.<http://duray.ru/database/stati/svetodiod-ustroystvo-printsip-raboty-preimushchestva/>
- 13.[http://www.kit-e.ru/articles/powerel/2009\\_12\\_120.php](http://www.kit-e.ru/articles/powerel/2009_12_120.php)
- 14.[http://elektrotovary.te.ua/index.php?route=information/news&news\\_id=6](http://elektrotovary.te.ua/index.php?route=information/news&news_id=6)
- 15.<https://dilux.com.ua/p461859293-svetodiodnaya-matritsa-prozhektora.html>
- 16.[http://www.kit-e.ru/articles/powersource/2010\\_12\\_131.php](http://www.kit-e.ru/articles/powersource/2010_12_131.php)
- 17.[http://www.led-e.ru/articles/led-cooling/2010\\_3\\_13.php](http://www.led-e.ru/articles/led-cooling/2010_3_13.php)
- 18.<https://moluch.ru/archive/131/36367/>
- 19.<http://www.electrosad.ru/Ohlajd/TC.htm>
- 20.<https://npostk.ru/teplovaya-trubka-heat-pipe.html>
- 21.<https://cyberleninka.ru/article/v/analiz-effektivnosti-primeneniya-termoelektricheskikh-moduley-v-sistemah-ohlazhdeniya-radioelementov>
- 22.<https://foton.ua/upload/datasheet/cree/CXA1507.pdf>
- 23.<https://www.compel.ru/lib/ns/2013/2/5-spasitelnaya-prohlada-ili-teplootvod-dlya-moshhnyih-svetodiodnyih-matrits>
- 24.<https://books.ifmo.ru/file/pdf/1235.pdf>

<http://www.russianelectronics.ru/developer>