

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

бакалавр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему:

**РОЗРОБКА СИСТЕМИ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА ТЕПЛОВИМИ
ТРУБКАМИ**

Виконав: студент (ка) 4 курсу, групи ЕТ-41

напряму підготовки (спеціальності)

**141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Палій Ілля Юрійович

(прізвище та ініціали)

Керівник

Закордонець В.С.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Мовчан Л.Т.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Тарасенко М.Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Шелестовський Б.Г.

(прізвище та ініціали)

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«_____» _____ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Волос Роман Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи)

**РОЗРОБКА СИСТЕМИ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА ТЕПЛОВИМИ
ТРУБКАМИ**

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 «_____» _____ 202__ року № _____

2. Термін подання студентом проекту (роботи)

3. Вихідні дані до проекту (роботи)

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

Зробити аналітичний огляд літературних джерел

Написати проектно-конструкторський розділ

Написати розрахунковий розділ

Написати висновки до роботи

Оформити список використаних літературних джерел

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

Мета роботи, об'єкт дослідження, наукова новизна

Використання низькопотенційної енергії

Низькопотенційні теплові машини

Будова і принцип дії конвертера

Розрахунок характеристик конвертера

Режими роботи конвертера

Висновки

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вступ		
2	Аналітичний розділ		
3	Проектно-конструкторський розділ		
4	Розрахунковий розділ		
5	Безпека життєдіяльності та ОП		
6	Перелік посилань		
7	Написання висновків		
8	Оформлення графічної частини		

Студент _____
(підпис)

Палій Ілля Юрійович _____
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____
(підпис)

Закордонець Володимир Савич _____
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра Палія Іллі Юрійовича «Розробка системи термостабілізації напівпровідникових джерел світла тепловими трубками» містить: 63 сторінки, 41 рисунок, 10 таблиць, 31 посилання на першоджерела.

Предметом дослідження є напівпровідникові джерела світла.

Метою роботи є розрахунок та створення високоефективної системи термостабілізації теплового режиму LED освітлювачів з різними типами теплових трубок.

Об'єктом дослідження є система термостабілізації напівпровідникових джерел світла з різними типами теплових трубок та радіаторів.

Основні результати: побудовано теплову математичну модель LED-освітлювача, яка описує вплив основних технічних параметрів: електричної потужності, теплового опору, температури довкілля на температурний режим; розраховано температурний режим LED з активною тепловою трубкою; оптимізовано конструкцію пристрою.

Ключові слова: LED, ТЕПЛОВА ТРУБКА, СВІТЛОВИЙ ПОТІК, СВІТЛОВІДДАЧА, ТЕРМІЧНИЙ РЕЖИМ, ТЕРМІЧНИЙ ОПІР.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	7
1.1 LED елементи – як джерела світла і тепла	7
1.2 Вплив температурного нагріву на параметри LED	10
1.3 Відомі практичні конструкції термостабілізації LED	11
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	16
2.1 Будова та принцип роботи теплової трубки	16
2.2 Типи теплових трубок	19
2.3 Тепловий менеджмент LED	23
2.4 Експериментальні дослідження термостабілізації LED тепловими трубками	29
3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	32
3.1 Термостабілізація активною тепловою трубкою	32
3.2 Вплив температури на параметри LED-елементів	36
3.3 Розрахункова модель LED з тепловою трубкою	42
3.4 Розрахунок системи термостабілізації LED	48
4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	55
4.1 Аналіз шкідливих виробничих факторів, електробезпеки, пожежної небезпеки світлодіодних ламп	55
4.2 Захист персоналу та навколишнього середовища від небезпечних виробничих факторів	58
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	60
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	61

ВСТУП

В даний час, щорічне сукупне світове споживання енергетичних ресурсів еквівалентно 13 ТВт (TW). При цьому, до кінця поточного століття, прогнозована чисельність населення та економічне зростання підвищаться майже в три рази. Це неминуче спричинить значне збільшення світового споживання енергії. Тому, ощадне використання електричної енергії має першочергове значення.

В зв'язку із сказаним, напівпровідникові LED-технології досить швидко завойовують світовий світлотехнічний ринок продукції [1-3]. НПДС містять світлодіоди і світлодіодні матриці. В плані енергоощадності, вони дуже перспективні для використання як в побуті так і в промисловості. Це можна пояснити цілим рядом параметрів, не притаманних традиційним освітлювачам. НПДС створюють великий потік світла при малій потужності споживання електроенергії, випромінюють світло довільного забарвлення, мають великий термін експлуатації [4]. Відомо, що їх термін експлуатації сягає майже 100000 годин безвідмовної роботи. Завдяки відсутності механічно вразливих елементів напівпровідникові джерела світла надзвичайно надійні й міцні. Є й інші чудові якості: екологічна чистота; безпека експлуатації; мініатюрність; технологічність; широкий спектр напруг живлення та струмів.

Найважливішою перевагою напівпровідникових джерел світла є їх енергоефективність та ощадність. Енергоефективністю (світловіддачею) називають відношення виробленого світлового потоку (в люменах) до спожитої електричної потужності (у ватах). В системі одиниць SI світловіддача вимірюється в люменах на ват (лм/вт) і є одним з основних критеріїв оцінки ефективності джерел світла. Чим це відношення більше, тим джерело енергоефективніше. Для порівняння, світловіддача ламп розжарювання складає всього 10-15 лм/вт, галогенних – 15-20 лм/вт, ламп – 40-70 лм/вт, а сучасних LED - приладів – 80-120 лм/вт. При цьому світловіддача напівпровідникових джерел

світла невпинно зростає. Сучасні світлодіоди здатні випромінювати 130-135 лм/вт, а надсучасні вже перетнули межу 200 лм/вт.

Світлодіодні лампи споживають 30% - 60% потужності традиційних ламп з аналогічним світловим потоком, забезпечуючи високу якість світла. Зокрема, використання напівпровідникових джерел світла заощаджує споживання електричної енергії майже на 93% в порівнянні з лампами розжарювання, 90% – в порівнянні з галогенними, більш ніж 70% – з металогалогенними та близько 66% порівняно з люмінесцентними. Очевидно, що LED-лампи споживають суттєво меншу потужність і при цьому випромінюють більший світловий потік. Це дозволяє зменшити витрати на освітлення та заощадити на комунальних послугах. За енергоефективністю саме світлодіодні лампи вважаються найбільш ефективними.

В дипломній роботі, для стабілізації теплового режиму LED, були застосовані теплові трубки в парі з пасивними радіаторами [16-20]. Застосування ТТ дозволяє каналізувати потоки тепла за межі освітлювального приладу знижуючи таким чином температуру LED. Термостабілізація дає можливість значно збільшити світловіддачу, покращити якість світла і продовжити термін роботи приладу.

Метою роботи є розрахунок та розробка системи термостабілізації LED на основі теплових трубок та пасивних радіаторів.

Постановка завдання. На основі математичної моделі LED встановити аналітичні співвідношення між потужністю LED та параметрами теплової трубки, пасивного радіатора та температурою середовища.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 LED елементи – як джерела світла і тепла

До LED-елементів відносяться світлодіоди, СД - модулі, світлодіодні матриці, СД-лампи, а також світлодіодні світильники. Часто усі ці елементи називають «світлодіодними лампами», але між ними існує суттєва різниця.

Світлодіод (СД) – це окреме, самостійне джерело світла, яке може використовуватися як СД - індикатор для підсвітки елементів керування приладами. Вони є базовими елементами світлодіодних ламп та світильників.



Рис. 1.1. Світлодіодні індикатори

В світлодіодному модулі групується кілька світлодіодів, які встановлюються на друковану плату. Типовими представниками СД-модуля є кластер, або світлодіодна стрічка.

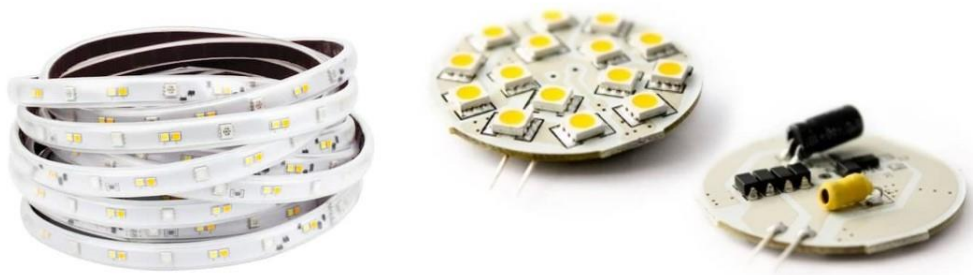


Рис. 1.2 Світлодіодні модулі

Світлодіодні лампи – це світловипромінюючі пристрої на базі декількох світлодіодів або світлодіодних матриць. LED-лампа має цоколь для установки в світильник і виглядає як звичайна лампа розжарювання. Світлодіодні лампи

можуть використовуватися у корпусах різних світильників і дозволяють швидко замінити традиційні лампи розжालювання.



Рис. 1.3 Світлодіодні лампи

Світлодіодний світильник – це освітлювальний прилад, який складається із вбудованих незнімних світлодіодних модулів або змінних СД - ламп.



Рис. 1.4 Світлодіодні світильники

Конструкція світлодіодних світильників досить складна. Відомо, що напруга живлення світлодіодів постійна і складає 12-24 В. Тому, в корпусі світлодіодних світильників розміщується спеціальний блок живлення – драйвер. Драйвер знижує напругу живлення та випрямляє та стабілізує величину струму. Найчастіше драйвер являє собою електронну плату, на якій встановлюють електронні компоненти, набір яких визначає тип драйвера. Драйвер регулює величину струму живлення, конвертуючи струм звичайної мережі в струм, необхідний для живлення світильника.

Важливою особливістю світлодіодів є температурна залежність їх параметрів від температури. За відведення надлишкового тепла і захист світлодіодів від перегріву відповідає охолоджувальна система світильника.

Корпус світлодіодного світильника виготовлений з пластмасианодованого алюмінію. Більшість моделей має додатковий охолоджувальний елемент – радіатор. Він являє собою металеву оребрену пластину, яка конструктивно

інтегрована в корпус або розташована зовні. Це забезпечує відведення тепла від кристалів і запобігає перегріву ламп. Крім цього, LED-прилади мають вбудований диммер, який регулює яскравість освітлення та керує освітленням за допомогою пульта чи сенсора. В даний час, завдяки ряду незаперечних переваг, світлодіодні освітлювальні прилади є найбільш затребуваними в усьому світі і поступово витісняють традиційні типи ламп та світильників.

Найважливішою перевагою напівпровідникових джерел світла є їх енергоефективність та ощадність. Енергоефективністю (світловіддачею) називають відношення виробленого світлового потоку (в люменах) до спожитої електричної потужності (у ватах). В системі одиниць SI світловіддача вимірюється в люменах на ват (лм/вт) і є одним з основних критеріїв оцінки ефективності джерел світла. Чим це відношення більше, тим джерело енергоефективніше. Для порівняння, світловіддача ламп розжарювання складає всього 10-15 лм/вт, галогенних – 15-20 лм/вт, ламп – 40-70 лм/вт, а сучасних LED - приладів – 80-120 лм/вт. При цьому світловіддача напівпровідникових джерел світла невпинно зростає. Сучасні світлодіоди здатні випромінювати 130-135 лм/вт, а надсучасні вже перетнули межу 200 лм/вт.

Світлодіодні лампи споживають 30% - 60% потужності традиційних ламп з аналогічним світловим потоком, забезпечуючи високу якість світла. Зокрема, використання напівпровідникових джерел світла заощаджує споживання електричної енергії майже на 93% в порівнянні з лампами розжарювання, 90% – в порівнянні з галогенними, більш ніж 70% – з металогалогенними та близько 66% порівняно з люмінесцентними. Очевидно, що LED-лампи споживають суттєво меншу потужність і при цьому випромінюють більший світловий потік. Це дозволяє зменшити витрати на освітлення та заощадити на комунальних послугах. За енергоефективністю саме світлодіодні лампи вважаються найбільш ефективними.

Окрім енергоощадності, LED-лампи забезпечують тривалість використання порівняно з іншими світловими приладами. Зокрема, термін експлуатації LED-лампи складає до 50 тисяч годин, що еквівалентно 12 рокам служби при 12 годинній роботі в день. LED-світильники служать ще довше – до

80 і навіть 100 тисяч годин. В перерахунку це понад 20 років роботи без заміни ламп. Це значно перевищує терміни використання інших виробів.

Для прикладу, лампи розжарювання служать не більше 1000-2000 годин, галогенні – до 2000-4000 годин, люмінесцентні – від 2000 до 10 000 годин (хоча виробники часто зазначають триваліші терміни служби, проте зазначають ідеальні умови роботи, дотримання яких в реальних умовах нереально. Як видно, LED-прилади б'ють всі рекорди.

До деякої міри, тривалий термін експлуатації LED-ламп можна пояснити тим, що вони працюють від драйвера, який захищає прилад від неякісної електроенергії (стрибки і провали напруги, вищі гармоніки та ін.). Крім того, LED-світильники не містять елементів, які пер. едчасно з ладу та потребують постійного догляду та обслуговування протягом терміну служби. Цей факт забезпечує швидку окупність LED-продуктів

LED-прилади загораються за мікросекунди і створюють максимальний світловий потік практично миттєво. Вони не бояться частих комутацій, і порівняно з лампами розжарювання та люмінесцентними лампами, яким потрібний певний час на розігрів, та перезапуск. LED-лампи випромінюють світло потрібного кольору без застосування кольорових фільтрів. Адже світло LED, є забарвленим і у використанні світлофільтрів нема необхідності.

1.2 Вплив температурного нагріву на параметри LED

При проходженні струму через світлодіод (LED) внаслідок виділення тепла Джоуля його температура збільшується. Вплив температури на світлотехнічні характеристики LED досліджувався ряді науково-практичних робіт [3-8]. Наприклад, в [3] розглядався вплив величини струму на температуру поверхні LED. Була розрахована температура перегріву його поверхні в залежності від струму живлення та зовнішньої температури. При цьому розрахунок проводився з використанням методу електротеплової аналогії [9].

Дослідження впливу температури на світловий потік LED проводився і в експериментальних роботах [4-7]. При цьому робився порівняльний аналіз ефективності охолодження різних типів активних і пасивних радіаторів.

Зроблені рекомендації для ефективної стабілізації температурного режиму роботи LED.

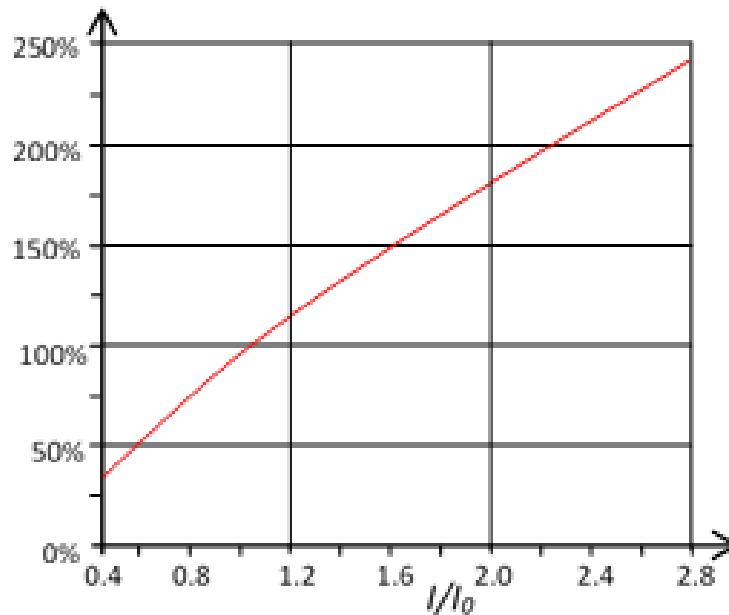


Рис. 1.5 Залежність відносного світлового потоку LED від струму для LED серії *GREE Xlamp*.

Як видно з наведеного графіка, для збільшення світлового потоку LED треба збільшувати струм живлення. Проте, при збільшенні величини струму в активних елементах LED збільшується і виділення теплової потужності Джоуля. Тепловиділення буде тим сильнішим, чим більша потужність світлодіода.

Як відомо, ККД сучасних LED знаходиться в інтервалі 30-35%. Отже, біля 65-70 % електроенергії виділяється і вигляді тепла. Якщо виділене тепло не каналізувати, то це неминуче призведе до перегріву LED. Безконтрольне збільшення його температури в кінці кінців приведе до зменшення поток світла і яскравості свічення. Зокрема, прийнято вважати, що після досягнення світловим потоком 50-60% від початкової величини, декларований термін експлуатації LED закінчується. З огляду на це, першочергового значення набуває завдання стабілізації робочої температури LED. Для вирішення цієї проблеми важливим є забезпечення якісного теплового контакту всіх елементів теплового кола на всіх етапах експлуатації LED починаючи від джерела тепла і закінчуючи навколишнім середовищем.

1.3 Відомі практичні конструкції термостабілізації LED

Пристрої термостабілізації LED умовно можна поділити на пасивні та активні. До пасивних належать пристрої в яких тепло, яке генерується при роботі LED, кондуктивним шляхом передається до корпусу, а потім шляхом конвекції та інфрачервоного випромінювання до навколишнього середовища [8].

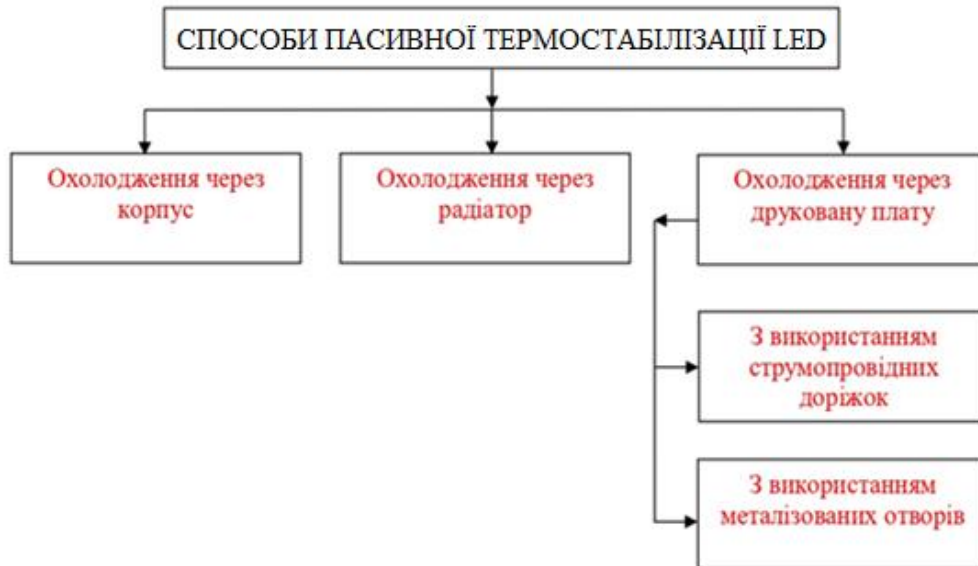


Рис. 1.6 Класифікація пасивних способів термостабілізації LED

Цей спосіб термостабілізації хоч і найдешевший, проте не найефективніший. До того ж, пасивна термостабілізація має низьку функціональну гнучкість. Зокрема вона не передбачає регулювання температури LED. Покращити, без докоріної переробки конструкції освітлювача, якість пасивного охолодження LED можна застосувавши локальний радіатор. Для цього LED прикріплюють безпосередньо на радіатор. Завдяки високій теплопровідності матеріалу радіатора, багатократно збільшується площа розсіювання тепла. Далі включається механізм природної конвекції, завдяки якій і охолоджується радіатор.

Розсіюючу здатність радіатора вибирають керуючись величиною потужності LED і їх кількістю в освітлювачі. Як правило, до LED-освітлювачів пред'являються високі вимоги по масо-габаритних параметрах. Внаслідок цього, часто виникає потреба в проектуванні радіатора під конкретний виріб [9].

В розглянутих роботах розглядалося розміщення LED безпосередньо на радіаторах. Однак, при термостабілізації потужних освітлювальних приладів із

щільною упаковкою LED-елементів треба просторово розділити джерела теплогенерації і місця його утилізації.

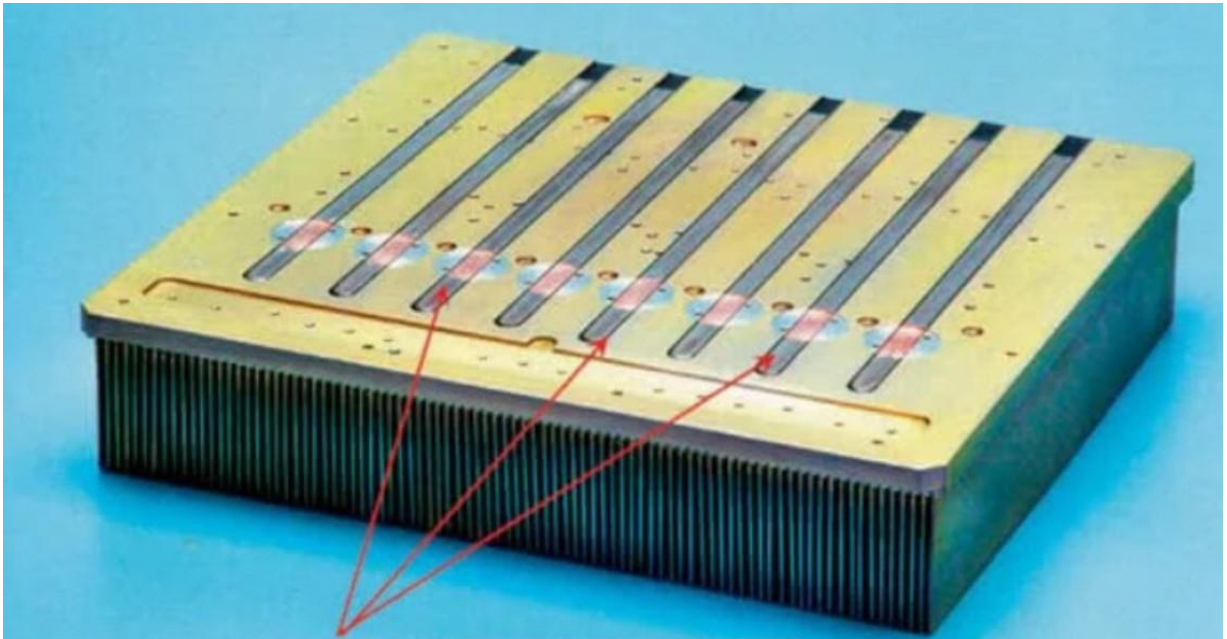


Рис 1.7 Активно - пасивний радіатор із вбудованими тепловими трубками

Просторове розділення потрібне і в тому випадку, коли розміри пасивного радіатора, необхідного для ефективної термостабілізації LED-елементів занадто великі. Наприклад, його основа дещо перевищує розмір джерела світла або його висота не відповідає вимогам конструкції. Сказане ускладнює, або зовсім унеможлиблює розміщення радіатора без порушення правил конструювання. Проблема порівняно легко вирішується при застосуванні теплових трубок. ТТ є змій доцільно використовувати у випадку, коли треба транспортувати тепло від джерела до місця охолодження на відстань більшу 5 сантиметрів. Для більш коротких відстаней більше достатньо суцільних металевих стержнів, наприклад мідних чи алюмінієвих.

Особлива потреба в застосуванні теплових трубок є в пристроях з поганою вентиляцією його елементів. Або коли металевий радіатор не відповідає тепловим. Зокрема, хоч і знаходиться в межах максимально допустимого діапазону, але не відповідає вимогам по вазі або стійкості до вібрації та ударів.

Таким чином, теплові трубки можуть бути ідеальним вирішенням проблеми термостабілізації, коли необхідно забезпечити високоефективну термостабілізацію LED-елементів з високою питомою потужністю, а також коли

потрібно передати велику кількість тепла на значну велику відстань. Оскільки ТТ є пасивними елементами, вони не вимагають живлення, не потребують догляду та не створюють побічного шуму (на відміну від вентиляторів), відрізняються високою надійністю, мають малу масу та високу вібро та ударостійкість.

Засоби та способи активного охолодження LED.

Таблиця 1.1

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.

Якщо для стабілізації теплового режиму LED-освітлювачів пасивних засобів недостатньо, доведеться використовувати активні засоби. Є безліч різних пристроїв активної стабілізації - від різноманітних найсучасніших вентиляційних пристроїв типу SynJet до термоелектричних пристроїв [10]. Відомі засоби та способи активного охолодження LED приведені в таблиці 1.2.

Для термостабілізації режиму роботи напівпровідникових джерел світла потужністю понад 20 Вт, є зміст використовувати примусовий повітряний обдув вентиляторами [11]. Вентилятор може інтенсифікувати тепловідвід на 50-70%. Практична схема вентиляторної термостабілізації LED представлена на рис.1.4.

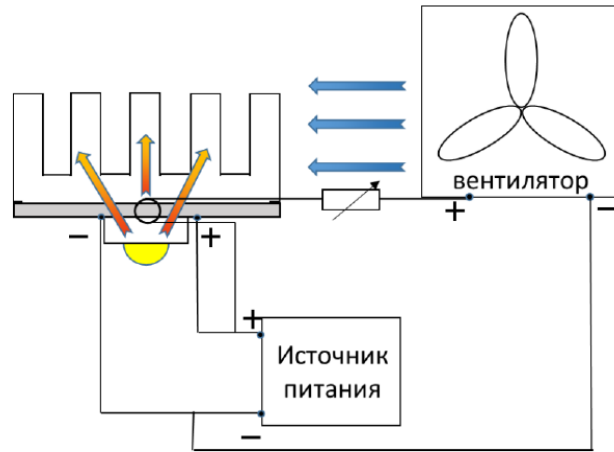


Рис.1.8 Схема вентиляторної термостабілізації LED

В парі з вентилятором рекомендують ставити голчасті радіатори. По-перше, їх ефективність не залежить від орієнтації в просторі, по друге їхні шипи-голки найкраще обдуваються повітряним потоком. Для прикладу, типова залежність теплового опору голчастого радіатора від швидкості повітряного потоку зображена на рисунку.

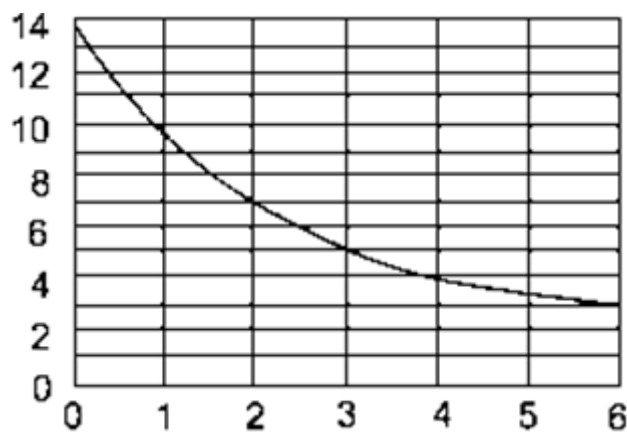


Рис. 1.9 Графік залежності теплового опору радіатора у Вт/К від швидкості потоку повітря у м/с.

Загальновідомо, що обдув радіаторів потоками повітря є досить гучним [12, 13]. Лопаті вентилятора генерують шум, який негативно впливає на нервову діяльність людини. Щоб мінімізувати цей чинник, або навіть його зовсім усунути використовують безшумні низькооборотні електродвигуни. Якщо врахувати, що вони маєть великий термін експлуатації (він складає понад 200 тисяч годин) то їх застосування є проривом і індустрією охолодження LED.

Часто, для мінімізації рівня шуму використовують струменеву технологію обдуву. Наприклад, пристрій струменевого обдуву холодними потоками повітря SynJet.



Рис. 1.10 Пристрій струменевого обдуву SynJet

Пристрій SynJet, в залежності від типу, може суттєво зменшити тепловий опір радіатора.

2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Будова та принцип роботи теплової трубки

Теплова трубка (ТТ), це пасивний тепловий двофазний пристрій, який призначений для підвищення продуктивності передачі тепла від джерела до стандартних пасивних радіаторів. Процес передачі відбувається при допомозі циклу випаровування та конденсації робочої рідини, яка міститься у вакуумній герметичній капсулі. Як правило, ТТ використовуються тоді, коли тепло від напівпровідникового елемента не може бути достатньо ефективно переміщене, або розсіяне стандартними радіаторами. Висока теплопровідність та легкість, з якою ТТ можна згинати та формувати, а також досить тривалий термін експлуатації робить теплові трубки ідеальним вибором, коли тепло потрібно переміщувати чи транспортувати до зони конденсації.

Корпус теплової трубки, це вакуумно-герметична ємність (трубка або оболонка), у якій міститься робоча рідина. Вона відводить тепло від напівпровідникового елемента вигляді пари, і гнотова структура, яка

транспортує конденсовану рідину назад до джерела тепла. Найпоширенішим матеріалом корпусу є мідь і алюміній. Проте, в залежності від сумісності матеріалу корпусу з гнотовою структурою і робочою рідиною та терміну експлуатації, можуть використовуватися нержавіюча сталь і титан. ТТ з товстішими стінками використовують для покращення структурної цілісності та міцності пристрою, тоді як більш тонші - застосують в місцях з обмеженим простором.

На відміну від твердих металів, які мають постійний коефіцієнт теплопровідності $\kappa \sim 180$ Вт/(мК) для алюмінію та ~ 400 Вт/(мК) для міді, коефіцієнт теплопровідності теплових трубок знаходиться в діапазоні від 1500 до 60 000 Вт/(мК). Причина збільшення на кілька порядків коефіцієнта теплопровідності від міді до нижнього кінця діапазону теплових трубок полягає в тому, що пара є надзвичайно хорошим теплоносієм. Причиною зміни «ефективного коефіцієнта теплопровідності» теплової трубки заданого діаметра пояснюється зміною її довжини.

Оскільки пара є досить ефективним теплоносієм, різниця температур між випарником і конденсатором на кінцях теплової труби (ΔT) практично однакова для короткої і для довгої теплової трубки. Тому, при збільшенні її довжини ефективна теплопровідність ТТ майже не змінюється.

Капілярна дія гноту – полягає в тому, що у випадку, коли частина випарника теплової трубки знаходиться в області конденсатора, капілярний ефект забезпечує механізм повертатися робочої рідини з конденсатора до випарника. В основі цього, лежить явище поверхневого натягу робочої рідини, яке змушує рідину рухатися від мокрої до сухої частини гноту. Цей процес, можна спостерігати, частково помістивши нижню частину рулону паперових рушників у ванночку з водою.

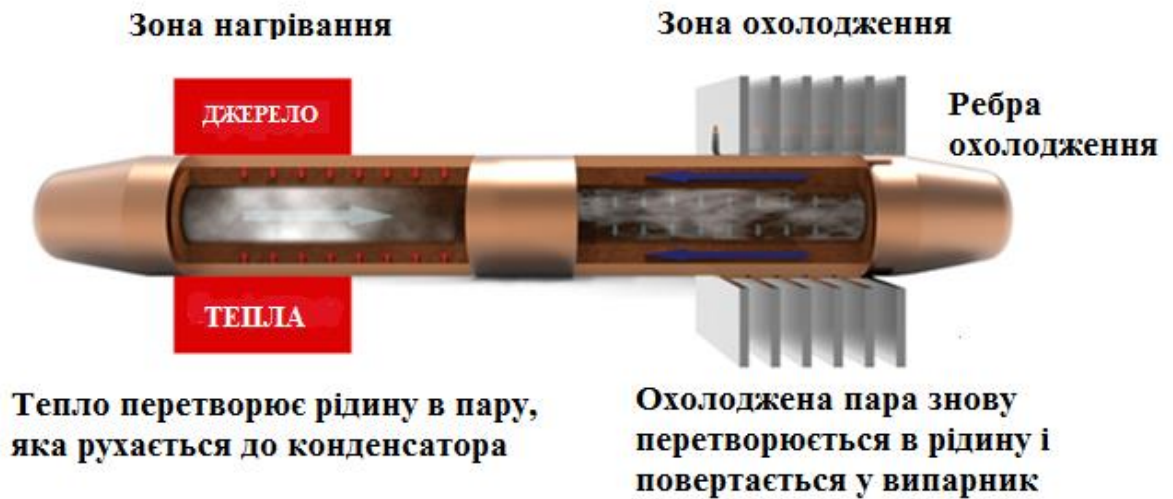


Рис 2.1 Поздовжній переріз теплової трубки

Двофазний цикл теплообміну полягає в тому, що тепло підводиться до випарника, де частина рідкої фази робочої рідини перетворюється в пару та рухається в область нижчого тиску до конденсатора. Оскільки, рідина в тепловій трубці знаходиться в умовах часткового вакууму, то її кипіння і випаровування відбувається при значно нижчій температурі ніж кипіння при нормальному атмосферному тиску. В конденсаторі пара охолоджується і повертається до рідкої фази, де поглинається пористою структурою гнота та за допомогою капілярного ефекту транспортується назад до джерела тепла. В стаціонарному режимі процес протікає циклічно.

Робоча та неробоча температури. Тип робочої рідини визначає робочий діапазон теплових трубок. Водяні теплові трубки працюють в інтервалі від 0 °C до 200 °C. Вище цієї температури внутрішній тиск пари зростає, що потенційно може спричинити структурне пошкодження теплової трубки. Нижче мінімальної температури теплова трубка під час запуску може пересохнути. Хоча цикли заморожування / розморожування, як правило, не є проблемою для спечених теплових трубок, запуск нижче мінімальної температури призводить до того, що заморожена рідина на кінці випарника плавиться і перетворюється на пару. В той же час, низька температура конденсатора теплової труби може призвести до замерзання пари в конденсаторі, таким чином висушуючи випарник. При цьому, напівпровідниковий прилад ризикує перегрітися, або навіть вийти з ладу.

Теплові трубки, які розроблені для роботи в інтервалі проектних параметрів і які виготовлені з якісних матеріалів при ретельному контролі якості, служать 20 і більше років.

2.2 Типи теплових трубок

Теплові трубки постійної провідності (ТТПП або просто «стандартні теплові трубки») є найпоширенішим типом двофазного пристрою. Вони мають фіксовану теплопровідність між випарником і конденсатором і широко використовується для охолодження електронних пристроїв. До інших типів теплових труб належать:

Парові камери (ПК). ПК набагато ефективніші, ніж теплові трубки. В ПК тепло розподіляється по великій площі поверхні, завдяки чому різко збільшується паровий простір. Конструктивно ПК вимагають монтування внутрішніх опор або прокладок, які б забезпечували структурну міцність конструкції, та одночасно дозволяли б парі вільно рухатися. Варіанти випарних камер включають традиційну конструкцію з двох частин, в якій використовуються дві з'єднані разом штамповані пластини, або дешевшу конструкцію з однієї частини, яка має вигляд дуже великої сплющеної трубки.

Контурні теплові трубки призначені для транспортування тепла на великі відстані (до кількох метрів), і добре працюють при будь-якій просторовій орієнтації, але є досить дорогими через свою складність.

Теплові трубки застосовують тоді, коли стандартні ребрені радіатори на твердій основі не відповідають термічним і/або механічним вимогам. Використання теплових трубок часто вирішує проблему.

Продуктивність теплової трубки Q_{\max} , - максимальна пропускна спроможність теплової трубки зазвичай збільшується разом із збільшенням діаметра трубки. Проте, кожен тип гноту можна налаштувати для оптимізації конкретних параметрів продуктивності, і це особливо стосується спечених гнотів. Онлайн-калькулятор теплових труб і інструкції з використання від Celsia обчислюють Q_{\max} під різними кутами орієнтації, ефективну теплопровідність і підвищення температури (ΔT) для різних діаметрів теплових труб.

Наприклад, на наведеній нижче діаграмі показано графіки Q_{max} для типових теплових трубок зі спеченим гнотом різного діаметру в залежності від орієнтації, у якій трубка повинна працювати. Сіра лінія позначає трубку 10 мм, призначену для максимізації Q_{max} у плоскій формі (орієнтація 0 градусів). Як і в інших теплових трубках, Q_{max} збільшується, коли випарник переміщується нижче конденсатора. Протилежне також вірно, і Q_{max} може знизитися на 95% від однієї крайньої орієнтації до наступної. Проте внутрішню структуру – товщину гноту, пористість гнота та кількість робочої рідини – можна змінити для оптимізації для конкретних умов.

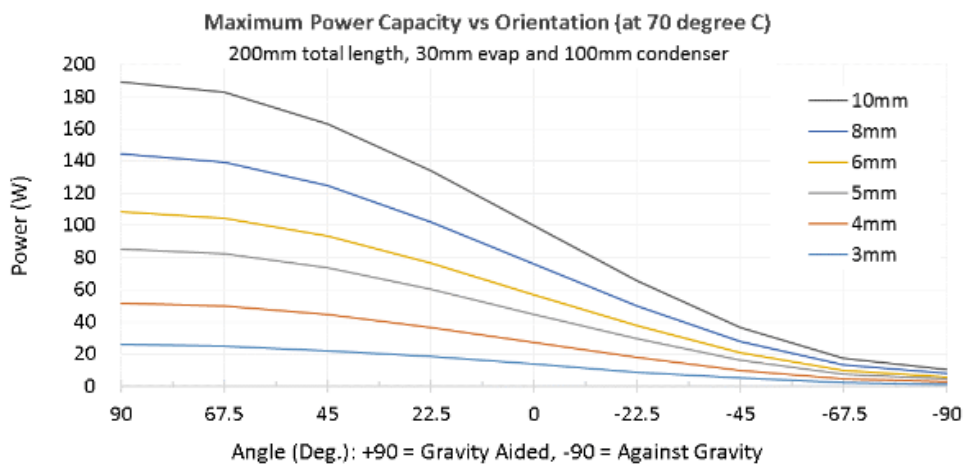


Рис 2.2 Пропускна здатність теплової труби (Q_{max}) в залежності від орієнтації

Якщо тепла трубка повинна працювати в орієнтаціях від -50 до -90 градусів, структуру гноту можна оптимізувати для посилення капілярного накачування. Як видно з діаграми, оптимізована гравітаційна тепла трубка діаметром 6 мм має вищу пропускну здатність (Q_{max}), ніж неоптимізована трубка діаметром 6 мм, щоб задовольнити потреби цього застосування.

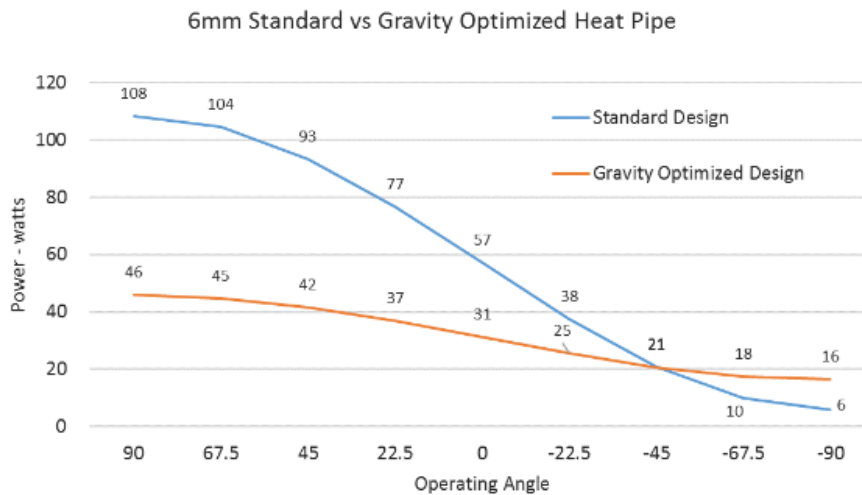


Рис 2.3 Параметри гравітаційної теплової трубки

Тепловим трубкам можна надати практично будь-яку форму, згинаючи та/або сплющуючи їх до певних розмірів. Типовий мінімальний радіус вигину повинен в три рази перевищувати діаметр труби. Однак, згинання теплової труби зменшить її максимальну здатність передачі тепла. Плавні і поступові згини перешкоджають поширенню тепла менше ніж різкі. Експериментальні дослідження показують, що для кожного згину на 45 градусів Q_{max} зменшується на 2,5%.

Сплющення теплової труби до однієї третини її початкового діаметру зазвичай вважається максимальним, хоча цей показник зменшується для трубок меншого діаметра (2-4 мм) і збільшується для трубок більшого діаметра (>10 мм). Ультратонкі теплові трубки можна виготовляти з використанням інших гнотових структур. На продуктивність може вплинути, оскільки трубка сплющена. Наведена нижче таблиця дає деяке уявлення про те, як сплющення впливає на продуктивність теплової трубки. За умови, що теплова труба правильно підібрана для застосування, її Q_{max} визначається нижньою межею гноту або межею пари. Наприклад, для круглої стандартної теплової трубки діаметром 6 мм обмеження потужності гноту (чорна пунктирна лінія) становить трохи менше 60 Вт. Сплющування до 4, 3,5 або 3 мм не впливає на його Q_{max} , оскільки межа випаровування вище межі гноту. Зверніть увагу, що сплющення круглої теплової трубки діаметром 8 або 10 мм до 3 мм або 2,5 мм матиме істотний вплив на її Q_{max} .

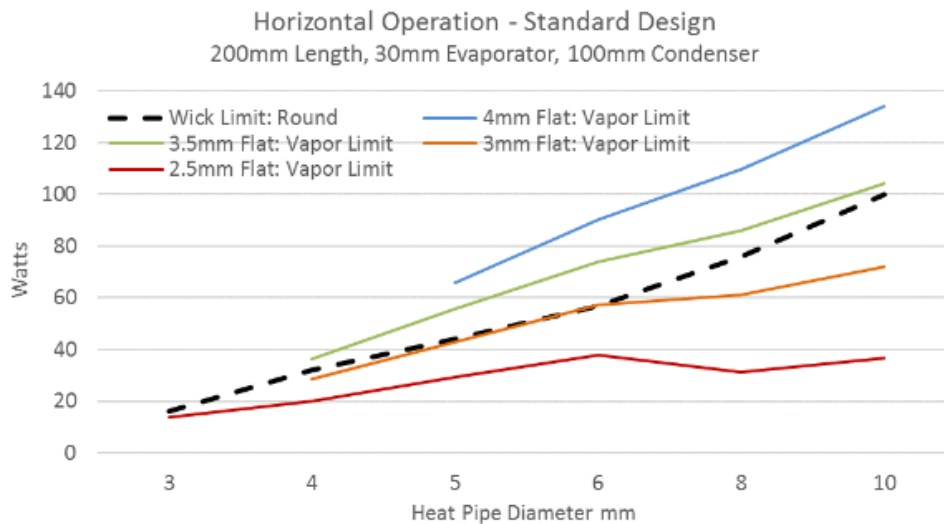


Рис 2.4 Залежність потужності ТТ від її діаметра

Технологія теплових трубок пропонує переваги, включаючи високу теплопровідність, легкість формування та згинання, а також тривалий термін експлуатації порівняно з іншими механізмами охолодження. До недоліків можна віднести більш високу вартість теплових трубок, особливо в порівнянні з твердими алюмінієвими альтернативами. Контурні теплові трубки, парові камери та осцилюючі теплові трубки є альтернативними типами двофазних пристроїв, які використовуються для охолодження електронних пристроїв та забезпечують більшу гнучкість конструкції та вищу потужність передачі тепла.

Теплові трубки особливо корисні для покращення продуктивності радіатора в пристроях, де потрібно ефективно переміщати або розподіляти тепло до зони конденсатора радіатора, наприклад, у ситуаціях із низьким або відсутнім потоком повітря або коли радіатор і джерело тепла рознесені в просторі. При проектуванні теплових трубок слід ретельно враховувати низку факторів, включаючи діапазон робочих температур, щільність теплового потоку, теплову потужність, обмеження розміру та вимоги механічної потужності.

2.3 Тепловий менеджмент LED

В даний час найпоширенішим типом теплових трубок є теплова трубка Гровера. Вона складається з трьох основних частин: герметичної металевої капсули, теплоносія і гноту.



Рис. 2.5 Зовнішній вигляд теплових трубок Гровера

Холодильний агент стосовно до матеріалу капсули і гноту має бути хімічно пасивним, мати: високу термостійкість, коефіцієнт змочування, коефіцієнт теплопровідності. Для оцінки якості холодильного агента використовується емпірична формула Бонда [10].

$$Bo = \frac{\sigma}{\rho}, \quad (2.1)$$

де Bo - критерій Бонда,

σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідкої фракції холодильного агента,

ρ – її питома густина.

В таблиці 2.1 наведені коефіцієнти теплопровідності матеріалів для капсул ТТ.

Коефіцієнт теплопровідності матеріалів для капсул ТТ

Таблиця 2.1

Матеріал	Коефіцієнт теплопровідності Вт/м·К
Графен	4000 - 5780
Алюміній	202 - 236
Бронза	47 - 180
Латунь	86 - 111
Мідь	389 - 401
Залізо -	74 - 92
Нікель	55 - 93
Сталь	11 - 78
Титан	14 - 16

Критерій Бонда, встановлює зв'язок між поверхневою енергією холодильного агента та гравітаційним полем і застосовується для оцінки ефективності роботи ТТ. Модуль критерію Бонда, в широкому інтервалі температур, має бути мінімальним. Це забезпечується малим коефіцієнтом поверхневого натягу холодильного агента та його великою густиною.

Технічні характеристики деяких типових холодильних агентів для теплових трубок

Таблиця 2.2

Теплоносій	Температура кипіння (С°) (при тиску 101.3 кПа)	Питома теплота пароутворення (кДж/кг)	Кількість речовини, що випарувалася (г)
Вода	100	2256	0.44
Пропіловий спирт	97.2	750	1.33
Бензол	80.1	394	2.5
Етиловий спирт	78.3	840	1.2
Тетрахлорметан	76.6	195	5.13
Метиловий спирт	64.6	1100	0.9
Хлороформ	61.3	279	3.58
Ацетон	56.3	525	1.9
Фреон 113	48	260	3.85
Пентан	36.1	360	2.8
Диетилефір	34.5	384	2.6
Фреон (11)	24	200	5
Диметилефір	-24.8	467	2.14
Фреон 12	-24.9	162	6.17
Аміак	-33.4	1370	0.73

Іноді, для порівняння спроможності різних холодильних агентів застосовують критерій Кунца [10, 11]. Критерій Кунца описує максимально можливу пропускну здатність теплопередачі трубки, і описується формулою [13]:

$$Ku = \frac{\sigma L \rho}{\mu}, \quad (2.2)$$

тут μ – коефіцієнт в'язкості холодильного агента,

ρ – густина,

L – питома теплота пароутворення рідини,

σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідкої фракції холодильного агента.

Як видно з наведених даних, ідеальним холодильним агентом є вода. У води, при найбільшому коефіцієнті питомої теплоти пароутворення найменша ймовірність виникнення центрів утворення пари. Крім того, при кінцевому відборі холодильного агента визначальну роль відіграють: доступність, ціна, легкість заправки в систему термостабілізації. Після заправки трубки холодильним агентом, її нагрівають до високої температури, після чого запаюють. В результаті здійснення такої процедури частина повітря вийде, а в трубці встановиться понижений тиск. Відомо, що при низькому тиску властивості води кардинально змінюються. Зокрема, знижується температура кипіння і пароутворення. При цьому, кількість води і тиск підбираються таким чином, щоб температура кипіння була близькою до 30°C.

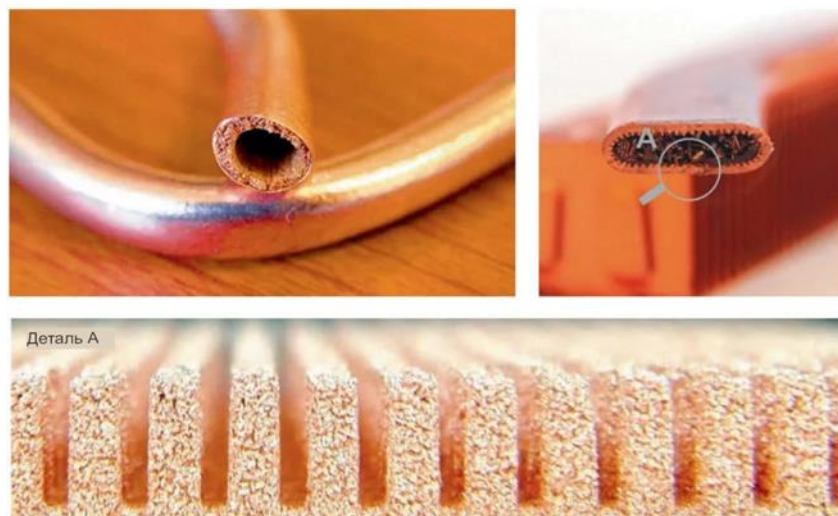


Рис. 2.6 Капілярно –пористий гніт теплової трубки

Значення параметра перегріву найбільш затребуваних теплоносіїв

Таблиця 2.3

Теплоносій	Величина параметра перегріву (K)
Вода	1,4675
CH ₃ OH	0.0117
CH ₃ OH	0.0103
CH ₃ OH	0.0222
Перфторметилдеклін	0.1877
Перфторметил-циклогексан	0.095
Аміак	0.044

Структура гнотів теплових трубок різної конфігурації: капілярної, канавчатої, порошкової і сіткоподібної показана на рисунку 2.2.

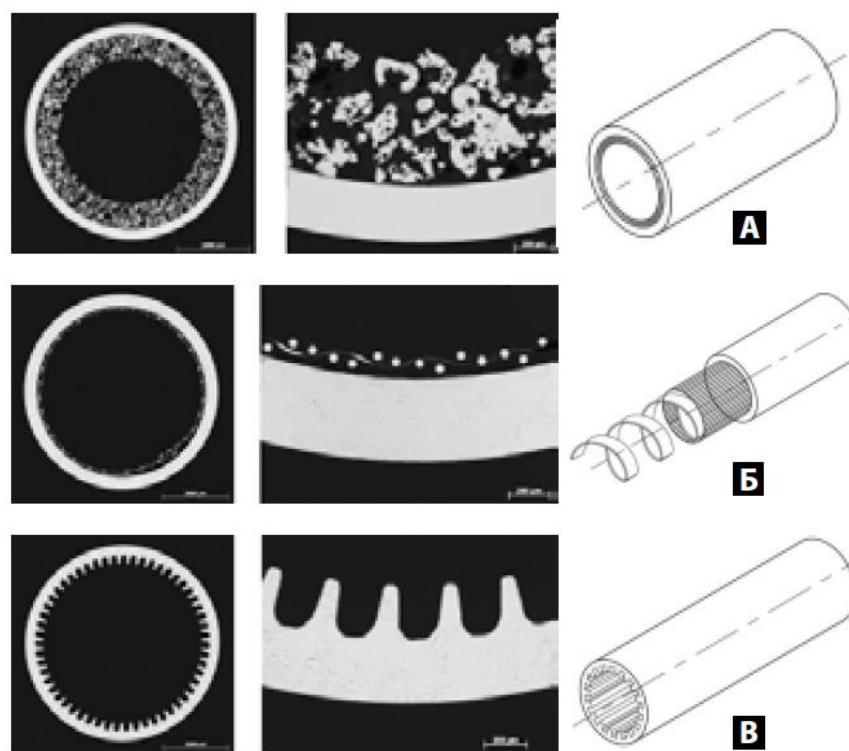


Рис 2.7 Переріз ТТ з різними структурами: а - порошковою, б – сіткоподібною, в - канавчастою.

Характеристики систем термостабілізації на теплових трубах.

Таблиця 2.4

Тип системи охолодження	Температура світлодіода, (°C)	Максимальна температура системи охолодження, °C
електрична потужність, теплова потужність, яка подається на систему охолодження 30 Вт температура середовища 20 °C		
на теплових трубах	78	53
на мідних стержнях	133	36
на алюмінієвих стержнях	163	30
температура середовища 40 °C		
на теплових трубах	99	73
на мідних стержнях	154	56
на алюмінієвих стержнях	185	50
електрична потужність, теплова потужність, яка подається на систему охолодження 20 Вт температура середовища 20 °C		
на теплових трубах	61	44
на мідних стержнях	98	32
на алюмінієвих стержнях	119	27
температура середовища 40 °C		
на теплових трубах	81	64
на мідних стержнях	118	52
на алюмінієвих стержнях	140	48

Ефективність LED, в основному, залежить від температури експлуатації і температури середовища. Вказуючи паспортні дані, виробник бере за основу нормальні умови. Традиційні умови експлуатації приладу передбачають температуру активної зони більшу 85°C. Тому, на відміну від люмінесцентних ламп, для яких ідеальною температурою є 35°C, для LED поняття оптимальної робочої температури відсутнє. Ідеальному режиму роботи LED сприяють низькі температури, причому чим нижчі, тим краще. Переконатися в цьому твердженні можна при глибокому охолодженні, при якому ефективність LED набагато перевищує задекларовані технічні параметри. Сучасний LED-світільник розрахований на ефективну роботу на протязі 50000 годин. Проте, для цього необхідно дотриматися певних важливих умов експлуатації.

По-перше, задекларований термін експлуатації справедливий для інтервалу температур 80-85°C. Вищі температури скорочують термін експлуатації. І навпаки, більш нижчі - дозволяють його продовжити.

По-друге, слід врахувати, що з плином часу LED поступово втрачають яскравість. Відомо, що в середньому через кожні 50 тисяч годин роботи, світловий потік LED в порівнянні із стартовим рівнем падає на 70%. Тому серйозні виробники приділяють серйозну увагу термостабілізації LED-світильників. Для досягнення поставлених цілей, в світильниках невеликої потужності, використовують металеві пластини та спеціальну струмопровідну фольгу.

Характеристики теплоконтактних матеріалів.

Таблиця 2.5

Теплопровідний матеріал	Переваги	Недоліки
Термопасти	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, розшарування немає	В порівнянні з термопастами нижча теплопровідність, поверхневий опір може бути більшим, ніж у термопаст, для збільшення ефективності необхідно прикласти тиск.
Гелі	Добре заповнюють нерівності поверхні	В порівнянні з термопастами нижча теплопровідність, слабше зчеплення, ніж у термоклей
Термоклей	Добре заповнюють нерівності поверхні	Необхідний процес очищення

Для створення якісного термічного контакту між елементами теплового кола, їх з'єднують при допомозі спеціальних теплопровідних шарів. В якості таких шарів використовують термопасти, термоклей або термогелі. Характеристики деяких сучасних термоконтактних матеріалів наведені в таблиці 2.5. Термічний опір між елементами теплового кола розраховують при допомозі співвідношення

$$\Theta = \frac{1}{\kappa} \frac{l}{S}$$

тут κ – коефіцієнт теплопровідності термоконтактного шару, l і S – відповідно товщина і площа термоконтактного шару.

Як видно із формули, термічний опір пропорційний товщині термоконтактного шару, і обернено пропорційний його площі. Тому ідеальний термічний контакт можна створити при збільшенні площі контакту і при зменшенні його товщини.

2.4 Експериментальні дослідження термостабілізації LED тепловими трубками

Критерієм правильності вибору параметрів системи термостабілізації на базі теплових трубок є експериментальні дослідження. Для моделювання роботи системи термостабілізації був виготовлений тестувальний стенд у вигляді алюмінієвого радіатора, що мав форму пластини товщиною 5 мм. Для моделювання тепловиділення LED-елементами був виготовлений спеціальний плоский електричний нагрівач (ПЕН) потужністю 200 Вт. Для адіабатичної ізоляції ПЕН від зовнішнього середовища були використані азбесто-цементні пластини та мінвата. Алюмінієвий радіатор разом з ПЕН служив моделлю тепловиділяючої спроможності LED - матриці. Для живлення ПЕН використовувався лабораторний блок живлення Mastech NY3020E. При цьому, потужність ПЕН регулювалася в інтервалі 0 - 200 Вт.

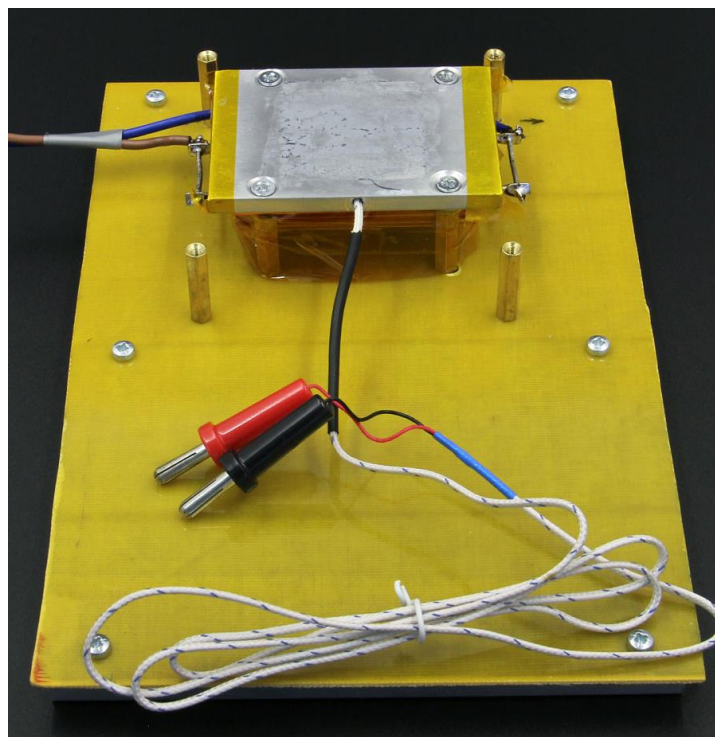


Рис. 2.8. Тестувальний стенд для системи термостабілізації LED

Для контролю температури в радіатор був вмонтований датчик температури.

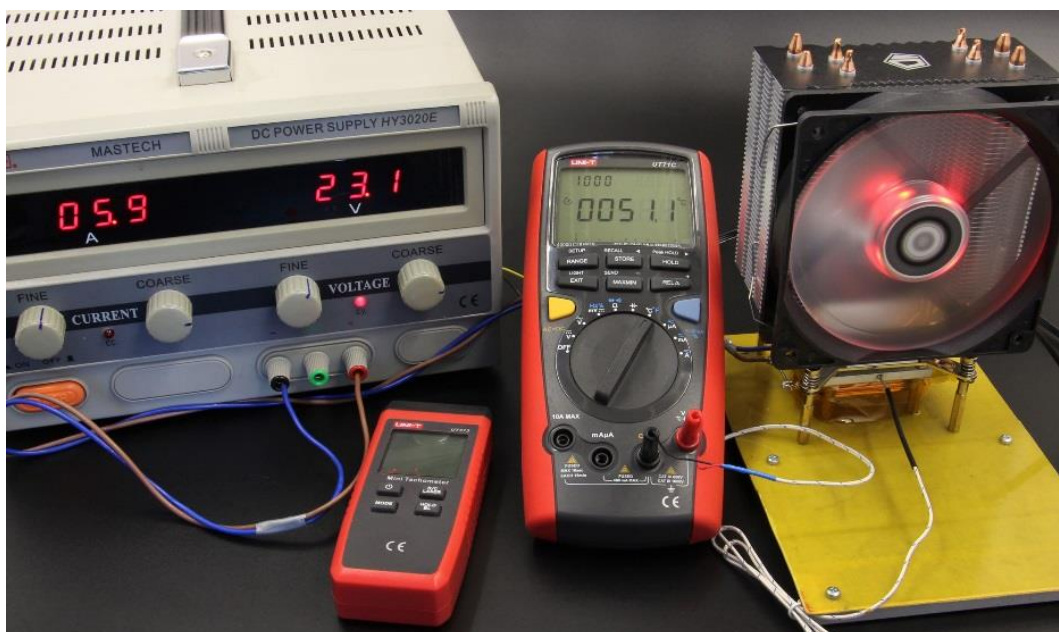


Рис. 2.9. Схема апаратної компоновки тестувального стенду



Рис. 2.10 Тестувальний стенд із встановленою системою термостабілізації

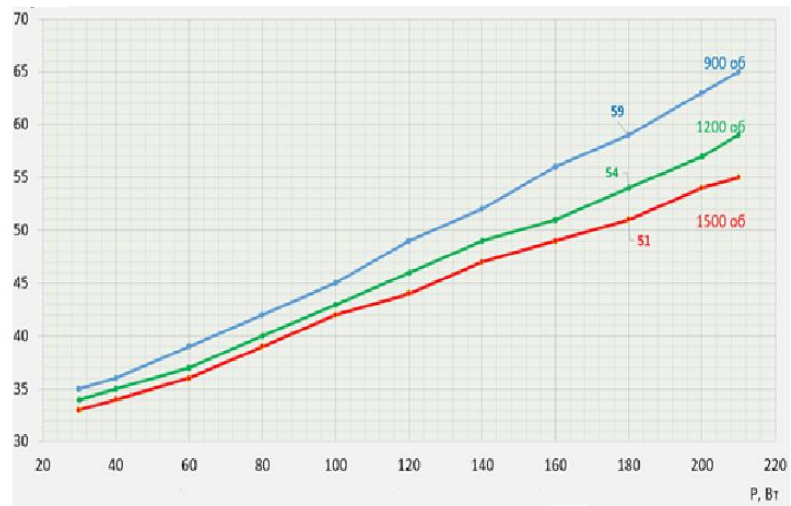


Рис. 2.11 Температура алюмінієвого радіатора в залежності від потужності ПЕН при різних частотах обертання лопатей вентилятора SE-224М

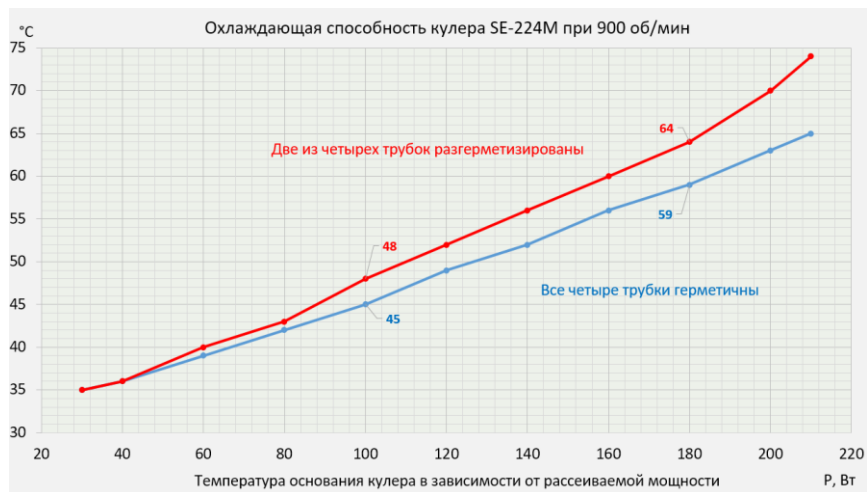


Рис. 2.12 Температура алюмінієвого радіатора в залежності від потужності ПЕН для вентилятора SE-224М при частоті 900 об/хв, та при різній кількості теплових трубок

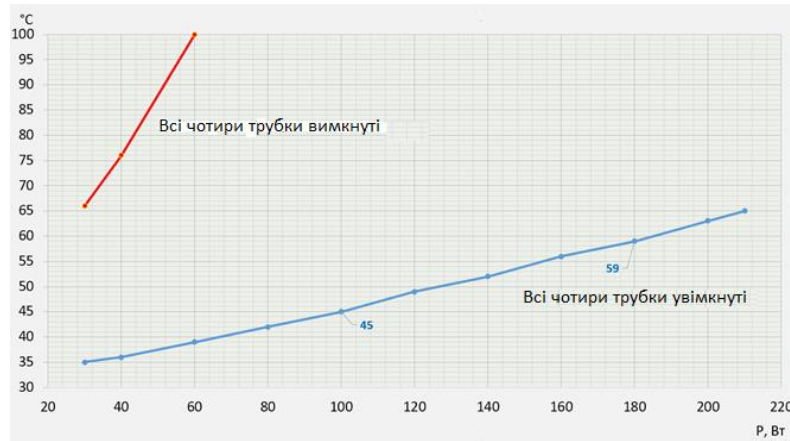


Рис. 2.13 Температура алюмінієвого радіатора в залежності від потужності ПЕН для вентилятора SE-224M при частоті 900 об/хв

Дослідження системи термостабілізації на теплових трубках підтверджує припущення, що ТТ суттєво знижують температуру LED-освітлювачів, які працюють екстремальних умовах.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Термостабілізація активною тепловою трубкою

Термостабілізація теплового режиму LED виключно тепловими трубками (ТТ) не використовується. Як правило ТТ засовуються в парі з іншими пристроями: вентиляторами, рідинними радіаторами, термоелектричними холодильниками та ін. Тоді їх називають активними тепловими трубками.

До основних переваг ТТ належать:

- відсутність додаткових енергозатрат на перенос теплоагента;
- надійність і низька ймовірність виходу з ладу;
- великий діапазон робочих температур,
- великий ресурс роботи;
- малі габарити і маса;
- велика потужність теплопереносу;
- безшумність роботи.

В даний час, і на найближчу перспективу теплові трубки є і будуть найефективнішим пасивним пристроєм для відбору і переносу тепла в місця його розсіювання. Теплові трубки безшумно і практично миттєво виносять тепло з

місце теплогенерації в місця його подальшої утилізації [17]. В основі їх роботи лежить принцип переносу і конденсації прихованої теплоти пароутворення. Ефективна теплопровідність теплової трубки в сотні тисяч разів більший ніж коефіцієнт теплопровідності найефективніших сплавів алюмінію чи міді.

Термостабілізація режиму роботи елементів радіоелектронної апаратури ТТ свідчить про високу ефективність цих пристроїв тепловідведення [17,18]. Очевидно, що ці пристрої можуть бути затребуваними і для термостабілізації LED-елементів і LED-матриць. В роботах [8-10] також досліджувалася система термостабілізації LED-освітлювачів, де застосовувалися теплові трубки. Як показали дослідження, такі системи термостабілізації забезпечують задовільний тепловий режим роботи в широкому інтервалі температур.

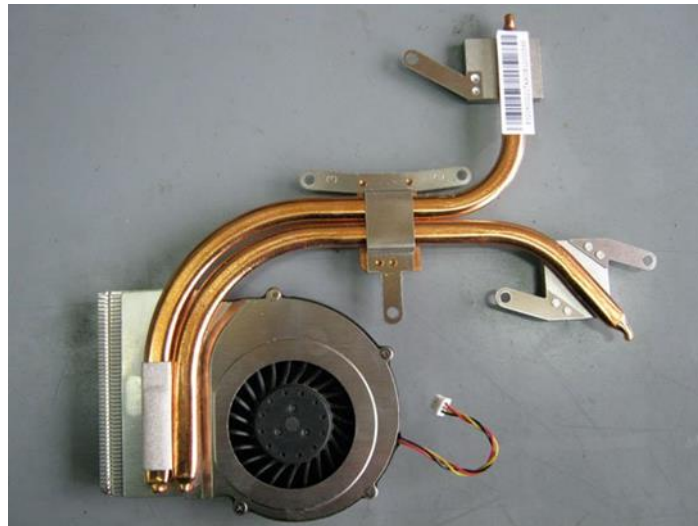


Рис. 3.1 Теплова трубка для охолодження центрального процесора ноутбука

Система термостабілізації LED-освітлювача при різних режимах роботи теплової трубки досліджувалася в роботі [17]. LED-освітлювач являє собою певну кількість LED-елементів, які закріплені на чотирьох сполучених паралельно теплових трубках. Трубки, в свою чергу знаходяться в ідеальному тепловому контакті з пасивними радіаторами. Холодне повітря, контактуючи з пластинами радіатора, нагрівається і піднімається вгору. На його місце поступає холодне повітря. Процес охолодження триває до моменту, поки буде можливим процес конвекції. Було експериментальним шляхом доведено досить високу

ефективність ТТ в порівнянні з подібними металевими трубками, які мали аналогічний профіль і однакову площу бічної поверхні.



Рис 3.2 Енергозберігаюча лампа з охолодженням елементів LED системою теплових трубок.

Аналогічна конструкція лампи з термостабілізацією LED-елементів одинарною тепловою трубою-радіатором великого діаметра представлена на рисунку 1.8. Розглядувана конструкція лампи являє собою пустотілий циліндр, зовнішня поверхня якого, для інтенсифікації теплообміну, має радіаторне ребрення. Циліндр-радіатор, виготовлений з анодованого алюмінію, має зовнішній діаметр 0.17 м, і висоту 0.23 м. В його нижній частині знаходяться LED-матриці загальною електричною потужністю 200 Вт. При роботі лампи виділяється тепла потужність 150 Вт. При цьому, температура корпусу LED – елементів не перевищує 90°C при температурі середовища не більше 35°C .



Рис 3.3 LED-лампа з термостабілізацією елементів одинарною тепловою трубою-радіатором.

На рисунку 1.9 представлена потужна LED-лампа з тепловими трубками та пасивним радіатором. Для виносу тепла використана радіально-променева система ТТ, сполучених між собою паралельно по тепловому потоку і приєднаних до охоплюючого їх діаметрально, радіатора великої площі. Особливістю такої лампи є велика кількість потужних LED-матриць, які змонтовані на тепловому колекторі. Тепло від колектора, по радіальних ТТ трубках передається до радіатора, звідки розсіюється конвективним шляхом. Внаслідок такої термостабілізації температура корпусу LED-матриць підтримується на рівні не вище 400К.

Незважаючи на очевидні плюси системи термостабілізації з тепловими трубками та пасивними радіаторами, основним недоліком такого типу термостабілізації є обмежена можливість роботи з потужними напівпровідниковими джерелами світла. Адже, щоб утилізувати теплову енергію в десятки і сотні ват, природної конвекції замало.

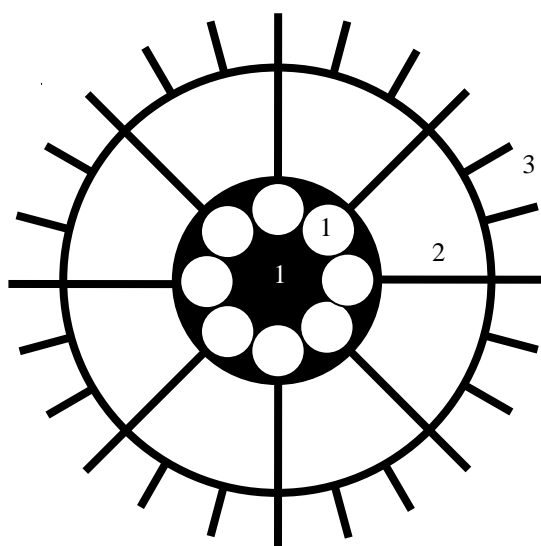


Рис 3.4. Схема LED-лампи з радіальними тепловими трубками та пасивним радіатором. 1- тепловий колектор із LED - матрицями, 2 – теплові трубки, 3 – пасивний радіатор.

В потужних LED-світільниках, для термостабілізації їх теплового режиму, в парі з тепловими трубками доцільно застосовувати активний радіатор з вентилятором.

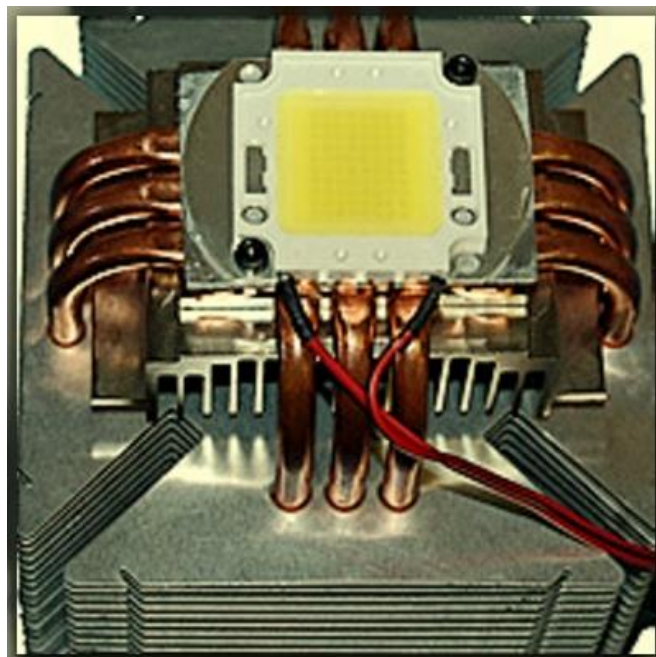


Рис. 3.5 Термостабілізація LED - матриці CMA1516 активним радіатором з вентилятором та з інтегрованою тепловою трубкою.

Слід зазначити, що системи термостабілізації, які містять вентилятор дещо вразливі. Вони мають обмежене застосування через генерацію шуму і необхідність додаткового живлення. Крім того, хоч і ресурс роботи електродвигунів хоч і великий, але не безмежний. Крім зазначених небезпек, використання вентиляторів приводить, порівняно із LED-світильниками з пасивною термостабілізацією приводить до збільшення вартості готового пристрою.

3.2 Вплив температури на параметри LED-елементів

При живленні LED електричним струмом в світловипромінюючих кристалах виділяється тепло. Для освітлювачів невеликої потужності виділенням тепла нехтують, оскільки нагрів елементів конструкції є незначним. Проте, із збільшенням потужності пристрою величина струму збільшується, і відповідно збільшується виділення тепла. Це призводить до надмірного розігріву світловипромінюючих кристалів приладу і, як наслідок, до зменшення інтенсивності світлового випромінювання.



Рис. 3.6 Схематична будова LED.

Залежність світлового потоку від температури для LED приведена на рисунку 3.2 [10]. Його величина нормується на 100% при робочому струмі $I_f = 450\text{mA}$, та при температурі гетеропереходу $T_{j0} = 85\text{C}$. Тоді, модуль світлового потоку складає $\Phi_0 = 1900\text{лм}$. Світловий потік при інших робочих струмах знаходять розрахунковим шляхом. Зокрема, розглянемо стаціонарний режим при температурі теплоконтактної площадки $T_c = 25^\circ\text{C}$, та при робочому струмі $I_f = 700\text{mA}$. Цьому режиму роботи відповідає відносний світловий потік - 150%. Після перерахунку знаходимо

$$\Phi |_{I_f=1900} = 1900 \frac{150}{100} = 2850\text{лм}$$

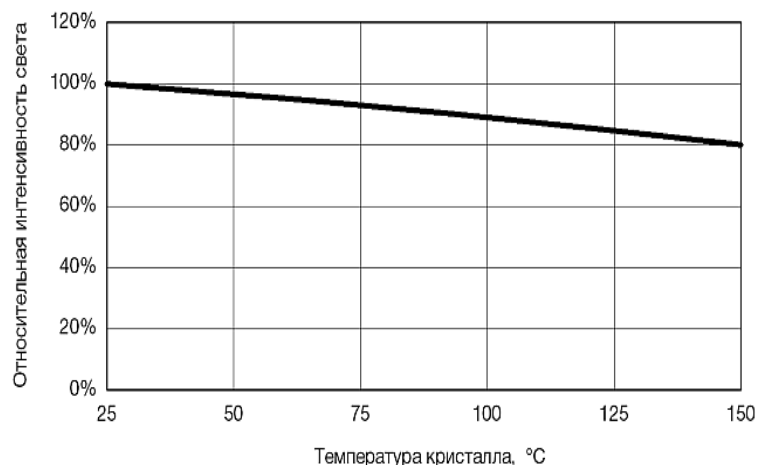


Рис. 3.7 Залежність відносного світлового потоку від температури гетеропереходу для LED-CMA 1516.

Температурну залежність світлового потоку, з використанням методу регресійного аналізу [0], можна апроксимувати функцією

$$\Phi |_{I_f=I_{f0}} (T_j) = \Phi_0 [c_0 - c_1(T_j - T_{j0})], \quad (3.1)$$

де Φ_0 – світловий потік при температурі гетеропереходу LED $T_{j0}=85\text{ C}$ і при робочому струмі $I_{f0}=450\text{mA}$, $c_0=1$, $c_1=0.003236\text{ K}^{-1}$.

Дана аналітична залежність в рамках інтервалу температур $T_j = 25 \div 150\text{ C}$ описує світловий потік з точністю до 1%. При збільшенні струму стає більшою частота рекомбінації електрон-діркових пар з випромінюванням квантів світла. Це сприяє збільшенню світлового потоку. Проте, збільшується і частота рекомбінації носіїв на дефектах кристалічної ґратки. При цьому світло не випромінюється, а електрична енергія перетворюється в тепло. При цьому LED нагрівається. Графічна залежність відносного світлового потоку від робочого струму приведена на рисунку 3.2.

Аналітичну залежність модуля світлового потоку від величини струму можна апроксимувати параболічною залежністю виду

$$\Phi |_{T_j=T_{j0}} (I_f) = \Phi_0 \left[-d_0 + d_1 \frac{I_f}{I_{f0}} - d_2 \left(\frac{I_f}{I_{f0}} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

де $d_0 = 0,0481$, $d_1 = 1,451$, $d_2 = 0,404$, $T_{j0} = 85\text{ C}$, $I_{f0} = 450\text{mA} = 700\text{ mA}$

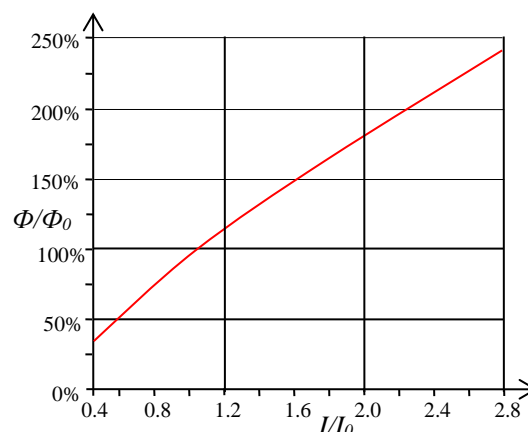


Рис. 3.8 Залежність відносного світлового потоку від величини струму для LED –матриці CMA 1516 LED.

Оскільки, світловий потік є функцією двох незалежних змінних, то логічно припустити, що його можна представити у вигляді добутку:

$$\Phi(T_j, I_f) = \Phi_0 [c_0 - c_1(T_j - T_{j0})] \left[-d_0 + d_1 \frac{I_f}{I_{f0}} - d_2 \left(\frac{I_f}{I_{f0}} \right)^2 \right] \quad (3.3)$$

Використовуючи записану залежність, можна знайдемо оптимальний баланс між тепловим режимом і параметрами системи стабілізації на базі LED. Для приросту світлового потоку маємо:

$$d\Phi = \frac{\partial \Phi(T_j, I_f)}{\partial T_j} dT_j + \frac{\partial \Phi(T_j, I_f)}{\partial I_f} dI_f \quad (3.4)$$

При зміні T_j , та I_f найбільше зростання світлового поток досягається при виконанні умов

$$\frac{\partial \Phi(T_j, I_f)}{\partial I_f} \Big|_{T_j = \text{const}} > 0 \quad \text{і} \quad \frac{\partial \Phi(T_j, I_f)}{\partial T_j} \Big|_{I_f = \text{const}} > 0. \quad (3.5)$$

Перша нерівність – тривіальна, вона виконується завжди, оскільки при збільшенні струму живлення світловий потік збільшується. Забезпечити виконання другої нерівності можна в процесі термостабілізації LED пристроями примусового охолодження. Таким чином, LED – освітлювачі бажано використовувати при великих струмах і при понижених температурах.

Запропонований узагальнений алгоритм збільшення світлового потоку і апаратне устаткування для його реалізації дозволять зменшити необхідну кількість LED – світильників при одночасному збільшенні світлового потоку. Це може дати подвійний світловий ефект. По-перше, знизиться вартість освітлювальної системи, по-друге, зменшиться загальне споживання електроенергії.

Графік залежності світлового потоку від температури LED для матриці *СМА 1516* наведена на рис. 3.2 із якого видно, що світловий потік збільшується із збільшенням струму. При цьому, безпечна температура гетеропереходу LED складає 90÷110 С. Таким чином, у будь-якому LED світловий потік не може бути

більшим 90% від паспортного значення. При порушенні теплового режиму, відхилення від декларованого значення можуть бути ще більшими. Окрім цього, при високих температурах гетеропереходу LED збільшується його колірна температура (рис. 3.4).

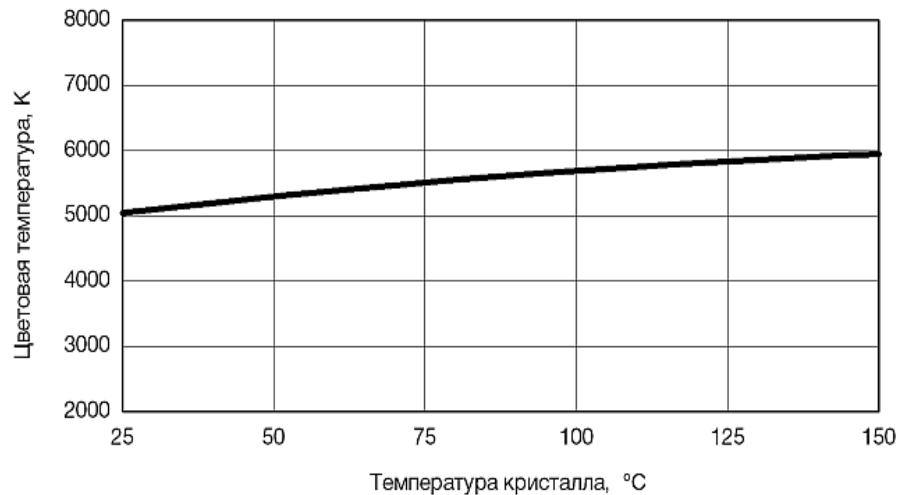


Рис. 3.9 Залежність колірної температури від температури гетеропереходу LED.

Найбільш поширена практика- встановлення в LED-світильниках приладів білого холодного світла з деякою часткою блакитного забарвлення. Це пояснюється тим, що такі освітлювачі мають меншу вартість в порівнянні з такими ж освітлювачами «теплішого» світла. Їх колірна температура складає понад 6000 К і надзвичайно близька до колірної температури сонячної поверхні. В LED холодного білого світла більша частина випромінювання містить синю частину спектра, там де чутливість ока людини менша. І, хоча світловий потік буде більшим, ніж у «теплих» LED, відчуттєва освітленість таких світлових джерел виглядає недостатньою, а світло - тьмяним. Перегрів LED і зміщення спектра випромінювання в бік синьої частини в разі зменшення потоку світла сприймається як помітне погіршення сили світла. До всіх зазначених вище факторів слід додати втрати потоку світла в оптичній гарнітурі: рефлекторах, фокусируючих елементах та захисних елементах ін.. Для зменшення марних втрат світлової енергії, оптика й захисна оснастка LED виготовляється з полікарбонату, втрати в якому менші, ніж в оптиці із силікатного скла. Сумуючи сказане, можна зробити висновок, що високі експлуатаційні температури є

головним фактором, який погіршує світлові параметри LED. Причому, погіршуються відразу всі важливі параметри: світловіддача, світловий потік, колірна температура, тривалість експлуатації, прозорість оптики. В результаті сумісної дії вказаних чинників зменшується економічна ефективність та доцільність застосування LED. Проте, в сучасних високоякісних LED-світильниках негативний фактор впливу високої температури на технічну і економічну ефективність врахований. Елементи термостабілізації виготовлені таким чином, із з таких матеріалів, що при найнесприятливіших режимах роботи максимальна температура гетеропереходів LED залишається меншою 100 C. Ці запобіжні заходи гарантують високоякісне освітлення, великий термін експлуатації та значний економічний ефект застосування LED.

Очевидно, що світловий потік LED збільшується при збільшенні струму і навпаки, при збільшенні температури зменшується. Ці обидві залежності близькі до лінійної. Як характерний приклад, розглянемо як залежить світловий потік LED серії XP-L від температури при струмах різної величини. Графік вказаної залежності зображений на рисунку 3.5. З рисунка стає очевидним, наскільки сильно зменшується світловіддача LED при збільшенні струму і температури гетеропереходу. Так, при $I = 150 \text{ mA}$, та при температурі гетеропереходу LED $t = 25^\circ\text{C}$ ефективність матриці світлодіода XP-L сягає понад 200 lm/W , а на максимально можливому струмі $I = 3000 \text{ mA}$ - зменшується майже в 2 рази, до 100 lm/W .

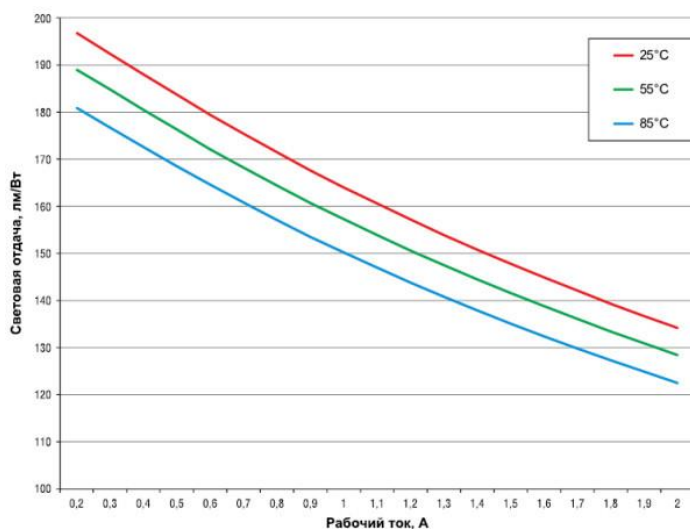


Рис. 3.10 Світловіддача LED, як функція прямого струму і температури гетеропереходу.

3.3 Розрахункова модель LED з тепловою трубкою

В основу розрахункової моделі LED покладений принцип подібності рівнянь, які описують електричне поле в провідному середовищі і поле температур поза джерелами тепла.

Таблиця подібності електричних і теплових величин

Таблиця 3.1

Електричне коло			Теплове коло		
Назва	Позн. або форм.	Од. вимір.	Назва	Позн. або форм.	Одиниця вимір.
Питома електропровідність	σ	$1/\text{Ом}\cdot\text{м}$	Питома теплопровідність	K	$\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$
Електричний опір	R	Ом	Тепловий опір	Θ	$\text{К}/\text{Вт}$
Сила струму	I	А	Потужність	P	Вт
Потенціал	φ	В	Температура	T	$\text{К}, \text{ }^\circ\text{C}$
Напруга	$U=\varphi_1-\varphi_2$	В	Перепад температури	$\Delta T=T_1-T_2$	$\text{К}, \text{ }^\circ\text{C}$

Побудована математична модель дозволяє оперувати тепловими опорами так само як електричними. Зокрема, стласти теплову схему, що значно спрощує розрахунки. Математична модель не впливає на точність розрахунків і не обмежує сфери застосування.

Будемо розглядати LED як тепловий генератор теплової потужності P_t , яка сконцентрована на одному з кінців теплової трубки. Будемо вважати теплову трубку суцільним однорідним теплопровідним середовищем з постійною площею поперечного перерізу, а густину теплового потоку однаковою в усіх точках поперечного перерізу. Для посилення теплообміну з середовищем поверхня трубки має радіаторний профіль.

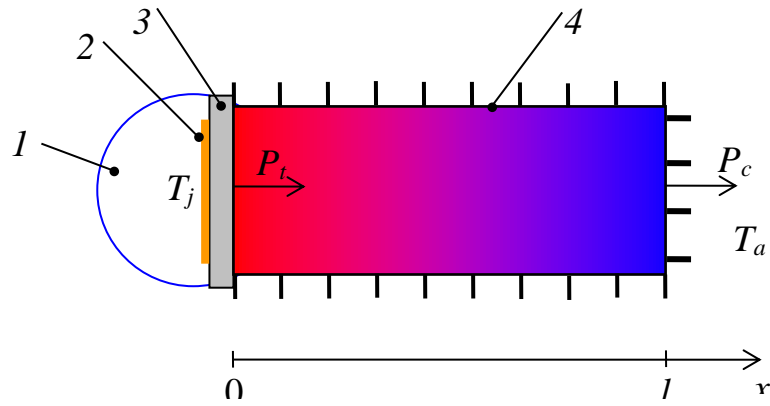


Рис. 3.11 Схема термостабілізації LED тепловою трубкою. 1 – захисний корпус LED, 2 – світловипромінюючий кристал, 3 – теплоконтактна площадка, 4 – теплова трубка.

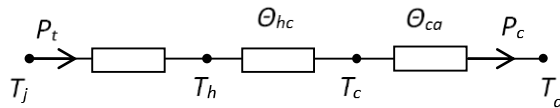


Рис. 3.7 Теплова схема термостабілізації LED тепловою трубкою. T_j - температура світловипромінюючого кристала, T_h - температура теплоконтактної контактної площадки, T_c - температура бічної поверхні трубки, T_a - температура середовища.

Процес теплопровідності тепловою трубкою можна описати рівнянням теплопровідності [8]

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} - \gamma^2 t = 0. \quad (3.6)$$

тут T - температура бокової поверхні трубки,

T_a - температура середовища,

$$t = T - T_a, \quad (3.7)$$

різницева температура,

$$\gamma = \sqrt{\frac{\alpha_p p}{\kappa S}}, \quad (3.8)$$

p і S – відповідно периметр і площа перерізу теплової трубки,

κ – ефективний коефіцієнт теплопровідності ТТ,

α_p - коефіцієнт теплообміну між бічною поверхнею ТТ і середовищем.

Рівняння теплопровідності для різницевої температури слід доповнити рівнянням генерації тепла. Згідно із законом Джоуля маємо

$$P_t = (1 - \eta_e) I_f U_f. \quad (3.9)$$

Запишемо граничні умови неперервності теплових потоків на межі поділу однорідних структур LED (світловипромінюючий кристал - теплоконтактна площадка, теплоконтактна площадка –теплова трубка)

$$-\kappa \frac{dt}{dx} \Big|_{x=0} = q_t, \quad (3.10)$$

$$-\kappa \frac{dt}{dx} \Big|_{x=l} = \alpha_l t \Big|_{x=l}. \quad (3.11)$$

Тут P_t - потужність теплогенерації LED,

I_f , - робочий струм LED,

U_f , - робоча напруга живлення,

η_e - квантова ефективність LED,

α_l - ефективний коефіцієнт теплообміну між правим краєм ТТ і середовищем.

Знайдемо густину теплового потоку:

$$q_t = \frac{P_t}{S}. \quad (3.12)$$

Розв'язок диференціального рівняння запишемо у вигляді:

$$t(x) = C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x}, \quad (3.13)$$

де C_1 і C_2 постійні інтегрування, які знайдемо із граничних умов.

Із (3.13), (3.10) і (3.11) знайдемо

$$(C_1 - C_2) = -\frac{q_t}{\kappa \gamma}, \quad (3.14)$$

$$(C_1 e^{\gamma l} - C_2 e^{-\gamma l}) = -\frac{\alpha_l}{\kappa \gamma} (C_1 e^{\gamma l} + C_2 e^{-\gamma l}) \quad (3.15)$$

Розв'язуючи систему рівнянь знайдемо C_1 і C_2

$$C_1 = \frac{q_t}{2\kappa\gamma} \left(1 - \frac{\alpha_l}{\kappa\gamma} \right) \left(\frac{e^{-\gamma l}}{sh \gamma l + (\alpha_l/\kappa\gamma) ch \gamma l} \right), \quad (3.16)$$

$$C_2 = \frac{q_t}{2\kappa\gamma} \left(1 + \frac{\alpha_l}{\kappa\gamma} \right) \left(\frac{e^{\gamma l}}{sh \gamma l + (\alpha_l/\kappa\gamma) ch \gamma l} \right) \quad (3.17)$$

Враховуючи значення постійних інтегрування знайдемо температуру перегріву бокової поверхні ТТ:

$$t(x) = \frac{P_t}{\alpha_l S} \left(\frac{ch \gamma(l-x) + sh \gamma(l-x)}{sh \gamma l + (\alpha_l/\kappa\gamma) ch \gamma l} \right) \frac{\alpha_l}{\kappa\gamma}, \quad (3.18)$$

Знайдемо різницю температур між гарячим кінцем теплової трубки та середовищем. Покладаючи $x=0$ отримаємо

$$t(0) = \frac{P_t}{\alpha_l S} \left(\frac{1 + (\alpha_l/\kappa\gamma) th \gamma l}{(\alpha_l/\kappa\gamma) + th \gamma l} \right) \frac{\alpha_l}{\kappa\gamma}. \quad (3.19)$$

Знайдемо різницю температур між холодним кінцем теплової трубки та середовищем. При $x=l$ маємо

$$t(l) = \frac{P_t}{\alpha_l S} \left(\frac{1}{(\alpha_l/\kappa\gamma) + th \gamma l} \right) \frac{\alpha_l}{\kappa\gamma}. \quad (3.20)$$

Для процесу термостабілізації, важливим параметром є усереднений по поверхні трубки градієнт температури. Враховуючи вирази (3.19) та (3.20), маємо:

$$\lambda(\gamma l) = \frac{t(0) - t(l)}{l} = \frac{P_t}{\alpha_l S} \left(\frac{\alpha_l}{\kappa\gamma} \right)^2 \frac{th \gamma l}{(\alpha_l/\kappa\gamma) + th \gamma l}. \quad (3.21)$$

Проаналізуємо (3.21) для різних довжин трубок. Для довгої теплової трубки

$$\lim_{\gamma l \rightarrow \infty} \lambda(\gamma l) = \lim_{\gamma l \rightarrow \infty} \frac{P_t}{\alpha_l S} \left(\frac{\alpha_l}{\kappa\gamma} \right)^2 \frac{th \gamma l}{(\alpha_l/\kappa\gamma) + th \gamma l} = 0. \quad (3.22)$$

Даний результат говорить, що бокова поверхня теплової трубки є еквітермічною поверхнею, тому в теплообміні із середовищем одночасно бере участь вся поверхня ТТ. Даний факт сприяє рівномірному, швидкому і ефективнішому теплом із середовищем.

Від температури перегріву перейдемо до температури гетеропереходу кристала. Оскільки

$$T_j = T_a + t, \quad (3.23)$$

то

$$T_j = T_a + P_t \left[\frac{\varepsilon}{\alpha_l S} \left(\frac{1 + \varepsilon th \beta}{\varepsilon + th \beta} \right) \right]. \quad (3.24)$$

тут $\beta = \mathcal{L}$ - безрозмірна (приведена) довжина трубки,

$\varepsilon = \alpha_l / \kappa \gamma$ - коефіцієнт теплообміну між правим кінцем теплової трубки і середовищем.

Коефієнт теплопровідності радіаторних матеріалів і теплових трубок.

Таблиця 3.2

Матеріал теплопроводу	Граничні коефіцієнти теплопровідн Вт/мК
Нержавіюча сталь	10-80
Анодований алюміній	200-235
Електротехнічна мідь	390-400
Теплова трубка	5000-6000

Аналіз температурної залежності системи стабілізації проведемо для різних тепловідводів: сталевих, алюмінієвих і мідних. Тепловідводи візьмемо однакової довжини і однакового профілю. Отримана формула показує, що температура гетеропереходу LED падає, при збільшенні довжини ТТ, і при $\beta \rightarrow \infty$ асимптотично прямує до граничної величини.

$$T_j = T_a + P_t \left[\frac{\alpha_l}{\alpha_p} \frac{1}{\kappa \mathcal{L}} + \Theta_{jh} \right]. \quad (3.25)$$

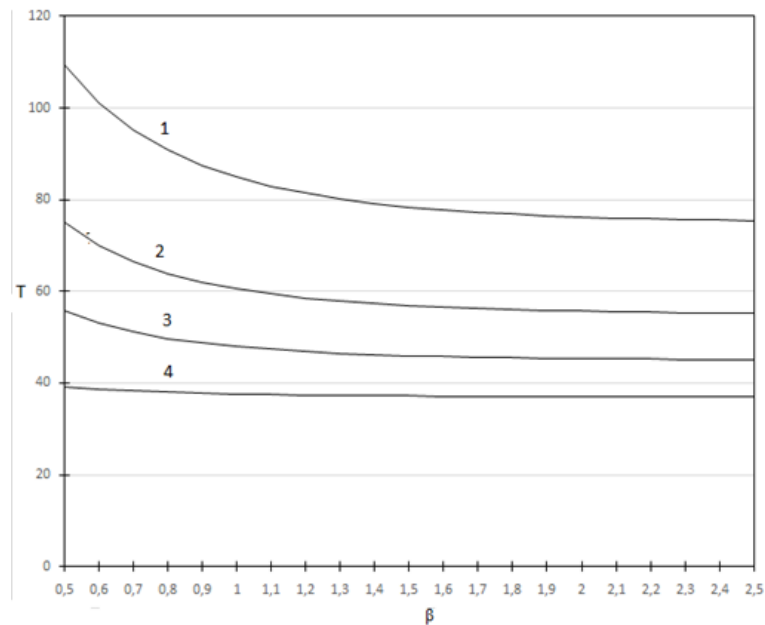


Рис. 3.12 Залежність температури кристала світлодіода потужністю 20 Вт від безрозмірної довжини тепловідводу. Крива 1 - сталюого, 2 - алюмінієвого, 3— мідного, 4 – теплової трубки.

На рисунку 3.6 приведений графік залежності температури гетеропереходу LED від безрозмірної довжини тепловідводу. З рисунка видно, що із збільшенням безрозмірної довжини і периметра тепловідводу інтенсивність тепловіддачі збільшується, а температура гетеропереходу LED зменшується. Очевидно, що це є наслідком збільшення ефективної площі поверхні теплообміну із середовищем.

На температуру LED суттєво впливає ефективний коефіцієнт теплообміну.

$$\varepsilon = \frac{\alpha_l}{\kappa\gamma} = \alpha_l \sqrt{\frac{S}{\alpha_p \kappa p}} \quad (3.26)$$

Його зменшення приводить до зменшення температури гетеропереходу LED T_j . Залежність температури гетеропереходу LED від ε приведена на рисунку 3.6.

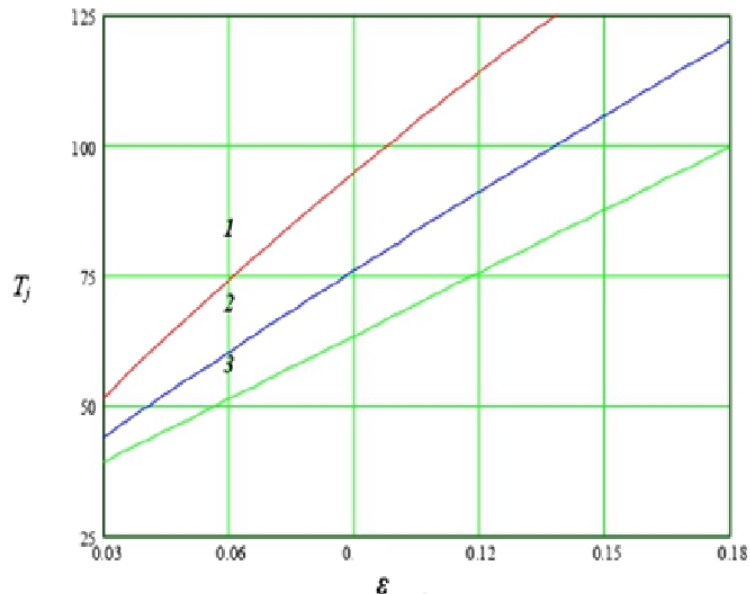


Рис. 3.13 Залежність температури гетеропереходу LED потужністю $P_t=100W$ від ε при різних безрозмірних довжинах ТТ. Криві 1, 2 і 3 при $\beta=0.5$, $\beta=0.9$, $\beta=3$ відповідно.

Отже, система термостабілізації температури LED при допомозі ТТ ефективніша ніж система термостабілізації при допомозі металевих стержнів. Вища ефективність термостабілізації є наслідком рівномірного розподілу температури по поверхні ТТ і, як наслідок, інтенсивнішою каналізацією теплової енергії.

3.4 Розрахунок системи термостабілізації LED

Розрахуємо температуру кристалів конкретної LED-матриці. Для визначеності візьмемо потужну білу LED-матрицю CXA-3590. Вона здатна віддати через теплоконтактну площадку до 150 ват теплової енергії при температурі активної зони не більше $85^{\circ}C$. Але для цього теплоконтактну площадку матриці потрібно встановити на тепловід.

Всі потужні LED-матриці випускаються в корпусах, які легко можна встановити на тепловідвід. Його основне завдання полягає в тому, щоб стабілізувати температуру корпусу LED-матриці, яка не перевищує максимально допустимої. Для LED-матриці CXA-3590, це $125^{\circ}C$. Його параметри приведені нижче в табл. 3.2.

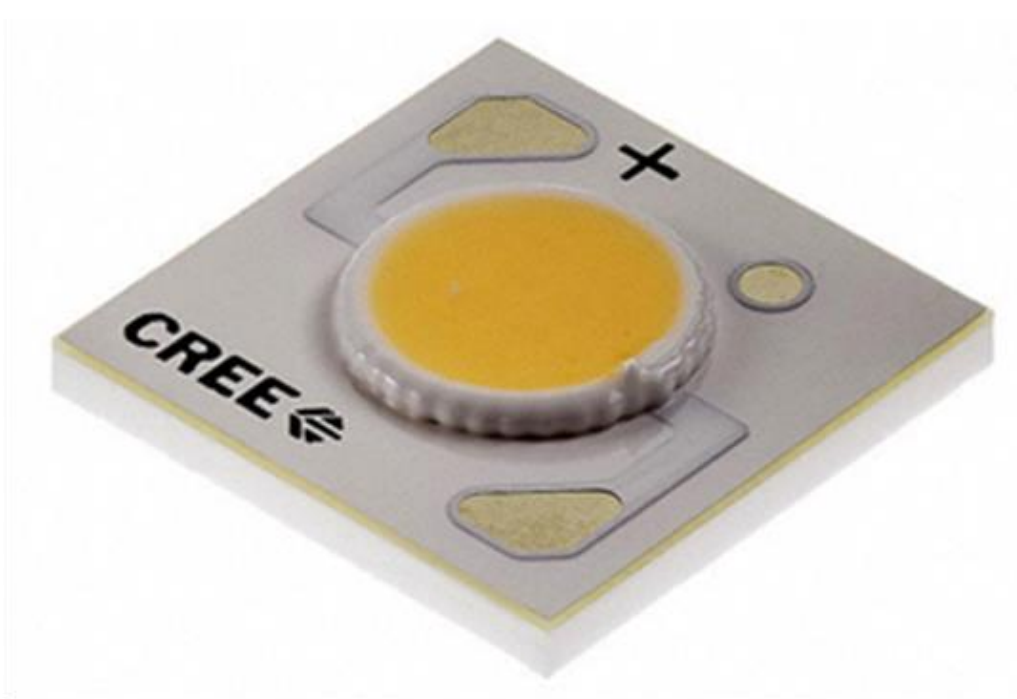


Рис. 3.14 LED матриця CXA-3590

Таблиця 3.3

Серія	Ном. Напр. (В)	Прямий струм (мА)	Макс. потужн. (Вт)	Світл. потік (Лм)	Тепл. опір (К/Вт)	Макс. темп. активної зони (С°)
XL1310СХ А	18	700-1050	20	1400-2100	1.2	125
XL1310СХ А	36	350-525	20	1400-2100	1.2	125
XL1520СХ А	35	500-900	33	2000-4000	1.2	125
XL1850СХ А	35	1400-2100	78	6000-9400	0.6	125
XL2590СХ А	69	1200-1800	130	8000-15600	0.6	125

Знаючи ключові параметри, можна емпіричним шляхом підібрати необхідні тип, розмір і кількість теплових трубок. Дуже важливо знати максимально можливу температуру середовища, при якій працюватиме освітлювальний прилад та максимальну потужність, яку він буде розсіювати. Згодом, на основі методу електротеплової аналогії, розрахувати температуру

гетеропереходу. Для цього треба знайти величину всіх теплових опорів переходів: гетероперехід-теплоконтактна площадка, теплоконтактна площадка – теплова трубка, теплова трубка - середовище. На завершальному етапі треба вибрати тип і кількість теплових трубок, при яких температура гетеропереходів буде меншою від критичної температури, при якій відбувається руйнування напівпровідникової структури.

Найважливішим параметром при підборі і розрахунку кількості теплових трубок є тепловий опір LED. Згідно із законом Ома для теплової гілки

$$\Theta = \frac{T_j - T_h}{P_t}, \quad (3.27)$$

де P_t – потік тепла,

T_j - температура гетеропереходу,

T_h - температура теплоконтактної площадки.

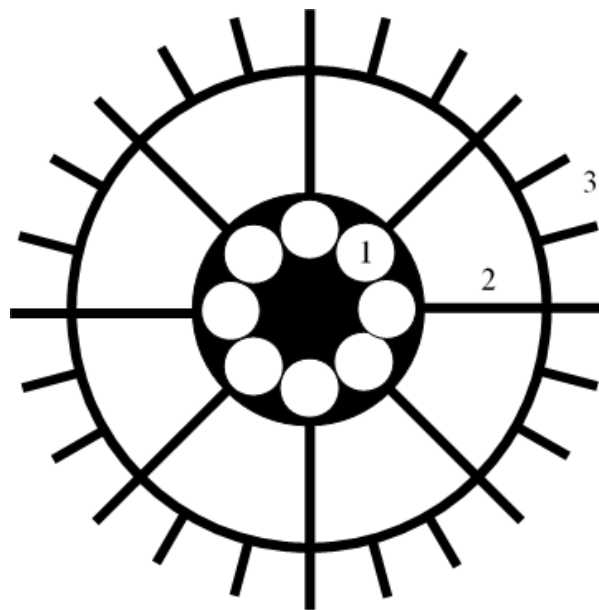


Рис. 3.15 Зовнішній вигляд LED-освітлювача нової конструкції.

1 - теплові колектори тепла із LED-матрицями, 2 – теплові трубки, 3 радіальний радіатор.

Тепловий опір не залежить від температури гетеропереходу і середовища, і залежить тільки від якості теплового контакту. Проведемо розрахунок теплового режиму освітлювача нової конструкції, який містить LED-матриці СХА-3590. LED-матриця СХА-3590 є досить компактною і перспективною для

широкого застосування в освітлювальній галузі. Ці LED-матриці генерують потік світла, що знаходиться в інтервалі 8000 - 15600 люмен. Це дозволяє конструювати LED-лампи простої конструкції, низької вартості з широким діапазоном потоку світла.

Для визначеності, розглянемо LED - освітлювач нової конструкції, в якому тепло поширюється від колектора тепла через ряд, з'єднаних паралельно, теплових трубок, до розсіюючого радіатора радіального типу.

Оскільки освітлювач має чотири осі симетрії то еквівалентну схему теплопереносу від LED матриці CXA-3590 по тепловій трубці до радіатора представимо у вигляді еквівалентної схеми.

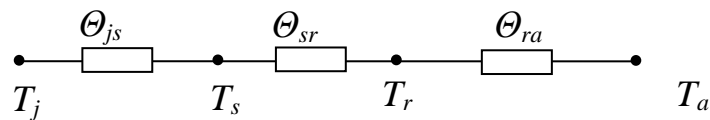


Рис. 3.12 Еквівалена схема теплового кола системи охолодження LED-матриці CXA-3590

Сумарний тепловий опір системи термостабілізації представимо у вигляді

$$\Theta = \frac{T_j - T_a}{P_t} = \left[\frac{\alpha_l}{\alpha_p} \frac{1}{\kappa\varphi} + \Theta_{js} + \Theta_{sr} \right]$$

Тепловий опір Θ_{js} LED-матриці перебуває в інтервалі 0.01 - 0.1 K/Wm. Його числове значення залежить від величини струму, і визначається графічно. В даному випадку $\Theta_{js} = 0.05$ K/Wm.

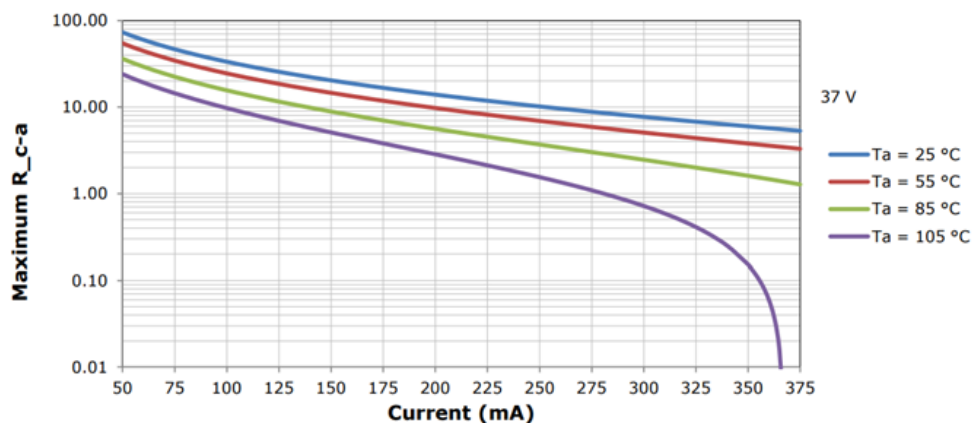


Рис. 3.16 Залежність внутрішнього теплового опору Θ_{jh} LED-матриці СХА-3590 від струму.

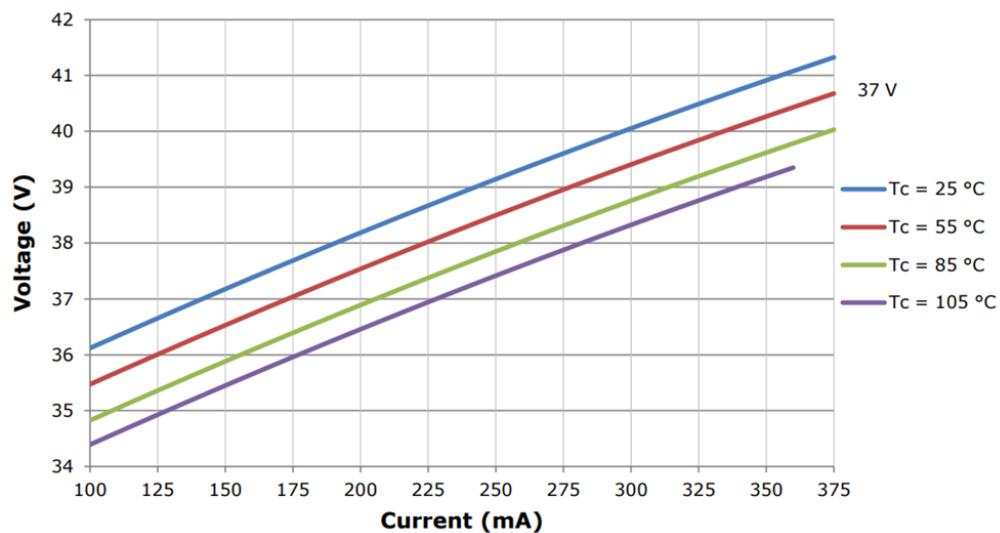


Рис. 3.17 Вольт-амперна характеристика LED- матриці СХА-3590.

Параметри LED- матриці СХА-3590

Таблиця 3.4

1	Напруга (В)	36-42
2	Струм (мА)	1000-3600
3	Потужність (Вт)	40-150
4	Макс. температура переходу (К)	400
5	Колірна температура (К)	3600
6	Кут освітлення (град)	115
7	Макс. температура переходу (К)	400
8	Розмір контактної площадки	34,85*34,85 мм ²
9	Тепловий опір Θ_{jh} (К/Вт.)	0.015

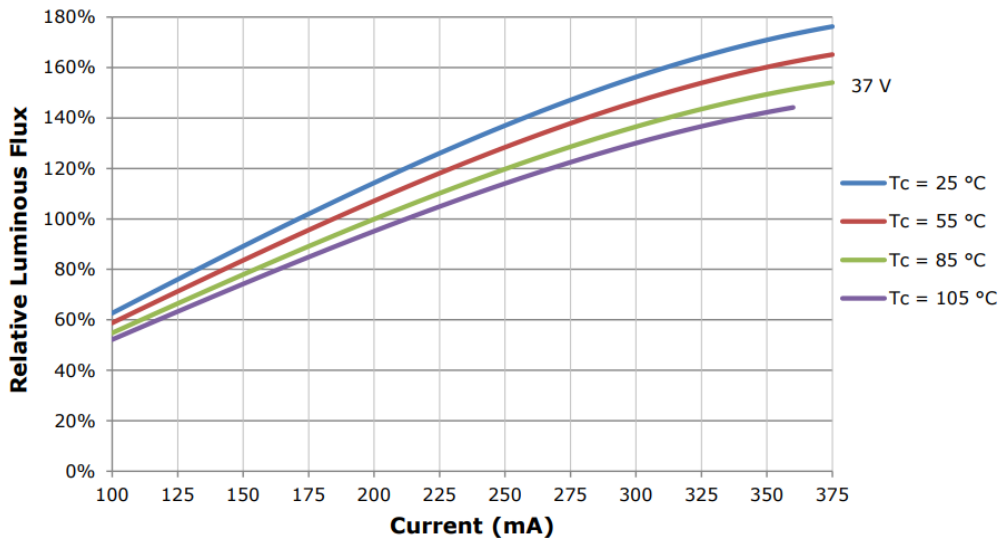





Рис. 3.18 Люмен-амперна характеристика LED-матриці CXA-3590.

Параметри LED-матриць з діаметром випромінювача понад 14мм.

Таблиця 3.5

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

Для визначеності, виберемо робочий струм LED-матриці $I_f = 3600 \text{ mA}$.

Для даного струму, із вольт-амперної характеристики знайдемо, що робоча напруга $U_f = 42 \text{ V}$.

Знайдемо електричну і теплову потужність:

$$P = U_f I_f = 42 \cdot 3.6 = 150 \text{ Wm},$$

$$P_t = (1 - \eta_e)P = 0.8 \cdot 150 = 120 \text{ Вт}.$$

Знайдемо опір теплоконтактного шару. Для монтажу конструкції використаємо термічну пасту КПТ-8 з коефіцієнтом теплопровідності $\kappa = 0,7 \text{ Вт}/(\text{м К})$. Нехай товщина теплоконтактного шару $\Delta l = 0,1 \text{ мм}$ а його площа $\Delta S = 1215 \text{ мм}^2$. Для теплового опору маємо

$$\Theta_{sr} = \frac{1}{\kappa} \frac{\Delta l}{\Delta S} = \frac{10^{-3}}{0,7 \cdot 251 \cdot 10^{-6}} = 0,1 \text{ К}/\text{Вт}.$$

Знайдемо загальний тепловий опір системи охолодження в нормальних умовах. Для температури середовища $T_a = 300 \text{ К}$ маємо:

$$\Theta_{ja} = \frac{T_j - T_a}{P_t} = \frac{400 - 300}{120} = 0,8 \text{ }^\circ\text{К}/\text{Вт}.$$

Опір теплової ділянки радіатор–середовище визначимо із формули

$$\Theta_{ra} = \Theta - \Theta_{js} - \Theta_{sr} = 0,8 - 0,05 - 0,1 = 0,65 \text{ }^\circ\text{К}/\text{Вт}$$

Такий тепловий опір може забезпечити ребристий радіаторний профіль з алюмінієвого анодованого сплаву площею $S = 150 \text{ см}^2$ в розрахунку на одну LED-матрицю. При такій електричній потужності, світловий потік від LED-матриці становитиме $17500 \cdot 8 = 140000$ люмен.

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 обійтися.

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 індукцію.

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 часток Джоуля.

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

Також небезпечним є занесення високого потенціалу в будинок по металевих комунікаціях не тільки при прямому влученні блискавки, але і при розташуванні комунікацій у безпосередній близькості від громовідводу. При недотриманні безпечних відстаней між громовідводами й комунікаціями енергія можливих іскрових розрядів сягає значень 100 Дж і більше, тобто є достатньою для загоряння всіх горючих речовин.

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

Для влаштування штучних заземлюючих пристроїв використовуються сталеві вертикально закладені у землю труби діаметром від 3 до 5 см і товщиною стінок не менше як 3,5 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 неізольовані алюмінієві провідники заборонено.

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

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. При проходженні електричного струму через LED, згідно із законом Джоуля, в його активній зоні генерується теплова потужність, яка нагріває прилад.

2. Для тривалого, та ефективного використання LED не можна допускати перегріву приладу. Ефективним способом термостабілізації є застосування теплових трубок.

3. Для підвищення ефективності системи термостабілізації теплові трубки доцільно застосовувати в комплекті з пасивним виносним радіатором.

4. Побудована теплова математична модель системи термостабілізації на теплових трубках показала, що для збільшення ефективності термостабілізації потрібно: збільшувати довжину та площу поперечного перерізу трубки; зменшувати тепловий опір між активною зоною та навколишнім середовищем.

5. Зменшення теплового опору можливе при застосуванні ТТ разом з активним радіатором та вентилятором.

6. Аналіз показав, що система на ТТ має вищу ефективність в порівнянні з аналогічною системою на металевих трубках. Перевага обумовлена на порядок більшою ефективною теплопровідністю ТТ порівняно з теплопровідністю металів.

7. Нами запропонована нова конструкція LED-світильника з системою радіальних теплових трубок, з'єднаних з пасивним радіатором великої площі. Використання такої схеми термостабілізації дасть можливість стабілізувати температуру LED на оптимальному рівні при мінімальних апаратних затратах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Перестюк М.О., Маринець В.В. Теорія рівнянь математичної фізики К.:Либідь, 2006, -363с.
2. Світлотехніка : навч. посіб. / О. М. Прядко. – Київ : КНУКіМ, 2017. – 343 с.
3. Овчинников С.С, Поліщук В.М. Основи світлотехніки. Навчально методичний посібник з практичного вивчення курсу. Ч.1 ХДАМГ, Харків, 2002.
4. Овчинников С.С, Поліщук В.М., Бухарін С.Л., Петченко Г.О. Основи світлотехніки. Збірник завдань та домашніх контрольних робіт ХНАМГ, Харків, 2004.
5. Schubert E. F. Light-emitting diodes. – Cambridge, 2006.
6. Huaiyu Y. A review of passive thermal management of LED module / Y. Huaiyu, S. Koh, H. Zeijl, A.W.J. Gielen, Z. Guoqi // J. of Semiconductors. 2011. Vol. 32, N 1.P. 0140081–0140084.
7. Lee H. Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells. – New Jersey: Wiley, 2010.
8. Reay D., Kew P., McGlen R. Heat pipes: theory, design and applications. – Oxford: Elsevier, 2014.

9. Faghri A. Heat pipes: review, opportunities and challenges // *Frontiers in Heat Pipes*. 2014. Vol. 5, Is. 1. P. 1
10. Закордонець В.С., Фера В.І. Розрахунок системи охолодження світлодіода на базі теплової труби. // *Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*, 16-17 листопада 2017., м.Тернопіль. – С.138.
11. Rittidech S. Heat-transfer characteristics of a closed-loop oscillating heat-pipe with check valves / S. Rittidech, N. Pipatpaiboon, P. Terdtoon // *Applied Energy*. 2007. – № 84. – p. 565-577. 4. Thompson S.M. Investigation of a flat-plate oscillating heat pipe with Tesla-type check valves / S.M. Thompson, H.B. Ma, C. Wilson // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2011. – Vol. 35, Issue 7. – p. 1265-1273.
12. Bhuwaketkumjohn N. Internal flow patterns on heat transfer characteristics of a closed-loop oscillating heat-pipe with check valves using ethanol and a silver nanoethanol mixture / N. Bhuwaketkumjohn, S. Rittidech // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2010. – Vol. 34, Issue 8. – p. 1000-1007.
13. Yang H. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes / H. Yang, S. Khandekar, M. Groll // *Applied Thermal Engineering*. – 2008. – Vol. 28, Issue 1. – p. 49-59.
14. Tong B.Y. Closed-loop pulsating heat pipe / B.Y. Tong, T.N. Wong, K.T. Ooi // *Applied Thermal Engineering*. – 2001. – № 21. – p. 1845-1862.
15. Xu J.L. High speed flow visualization of a closed loop pulsating heat pipe / J.L. Xu, X. Li, T.N. Wong // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2005. № 48. – p. 3338-3351.
16. Konev S.V. Investigation of heat & mass transfer in capillary heat pipes / S.V. Konev, V.A. Aliakhnovich // *13th Int. Heat Pipe Conf., China*. – 2004. – p. 290294. 130 10. Khandekar S. Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study / S. Khandekar, N. Dollinger, M. Groll // *Applied Thermal Engineering*. – 2003. – №23. – p. 707-719.

17. Qu M. Theoretical analysis of startup of a pulsating heat pipe / M. Qu, H.B. Ma // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – № 50. – p. 2309-2316.
18. Katpradit T. Effect of aspect ratios and Bond number on internal flow patterns of Closed End Oscillating Heat Pipe at critical state / T. Katpradit, T. Worngatanapaisarn, P. Terdtoon, etc. // 13th IHPC, China. – September 21-25, 2004. – P.295-301.
19. Kim S. Effects of fluctuations of heating and cooling section temperatures on performance of a pulsating heat pipe / S. Kim, Y. Zhang, J. Choi // Applied Thermal Engineering. – 2013. – Vol. 58, Issues 1-2. – p. 42-51.
20. Rao M. Understanding transport mechanism of a self-sustained thermally driven oscillating two-phase system in a capillary tube / M. Rao, F. Lefèvre, S. Khandekar, etc. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – Vol. 65. – p. 451-459.
15. Das S.P. Thermally induced two-phase oscillating flow inside a capillary tube / S.P. Das, V.S. Nikolayev, F. Lefevre, etc. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53, Issues 19-20. – p. 3905-3913.
21. Khandekar S. An insight into thermo-hydrodynamic coupling in closed loop pulsating heat pipes / S. Khandekar, M. Groll // International Journal of Thermal Sciences. – 2004. – № 43. – p. 13-20.
17. Charoensawan P. Thermal performance of horizontal closed-loop oscillating heat pipes / P. Charoensawan, P. Terdtoon // Applied Thermal Engineering. – 2007. № 27. – p. 721-727.
22. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. ДНАОП 0.00–1.21–98.
23. 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.