

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Бакалавр

Освітній рівень

Драйвер для живлення потужних світлодіодів

Назва теми

**СПЕЦІАЛЬНІСТЬ** 172 Телекомунікації та радіотехніка  
Шифр і назва

**ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ** 17 Електроніка та телекомунікації  
Шифр і назва

**ОСВІТНЯ ПРОГРАМА** Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології

КвРТР. 2019029.01.08 ПЗ

Виконав:

студент 3 курсу, група ТР1с-19-1

підпис

Олександр НЕСТЕРЧУК  
ім'я, прізвище

Керівник: канд. техн. наук, доцент

підпис, дата

Олександр ЯНОВИЦЬКИЙ  
ім'я, прізвище

Нормоконтроль:

канд. техн. наук, доцент

підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА  
ім'я, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри автоматизації та  
комп'ютерно-інтегрованих технологій.  
д-р техн. наук, проф.

підпис

Валерій МАРТИНЮК  
Ім'я, прізвище

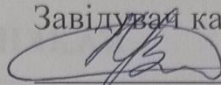
« 13 » червня 2022р.

Хмельницький, 2022

|                   |  |
|-------------------|--|
| Факультет         | інформаційних технологій                                 |
| Кафедра           | автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій     |
| Освітній рівень:  | бакалавр   |
| Галузь знань:     | 17 Електроніка та телекомунікації                        |
| Спеціальність:    | 172 Телекомунікації та радіотехніка                      |
| Освітня програма: | Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології |

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКТ

 Валерій МАРТИНЮК

« 03 » березня 2022 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

НЕСТЕРЧУКУ Олександр Руслановичу

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

- 1 Тема роботи: Драйвер для живлення потужних світлодіодів
- Керівник роботи: к.т.н, доцент Яновицький Олександр Костянтинович  
Затверджено наказом по університету від «01» березня 2022р. № 18
- 2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру 25 травня 2022 року
- 3 Вихідні дані до роботи: схема технологічного процесу, технічне завдання
- 4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
  - огляд існуючих стабілізаторів струму для живлення потужних світлодіодів;
  - розробка структурної і функціональної схем стабілізатора струму;
  - розробка електрично-принципової схеми стабілізатора струму на основі мікросхеми MP2481
- 5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):
  - функціональна схема пристрою;
  - презентаційні слайди.

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

| Розділ        | Прізвища, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|---------------|---|----------------|------------------|
|               |   | Завдання видав | Завдання прийняв |
| Нормоконтроль | КОРЕЦЬКА Людмила<br>к.т.н., доцент        |                |                  |
| Антиплагіат   | ФЕДУЛА Микола<br>к.т.н., доцент           |                |                  |

7 Дата видачі завдання 03 березня 2022 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № п/п | Найменування виду роботи   | Форма звітності, термін виконання | Відмітка наукового керівника |
|-------|--|-----------------------------------|------------------------------|
| 1.    | Розробка завдання на кваліфікаційну роботу                                     | 03.03.2022р.                      | виконано                     |
| 2.    | Складання індивідуального плану на кваліфікаційну роботу                       | 15.03.2022р.                      | виконано                     |
| 3.    | Написання першого (теоретичного) розділу                                       | 20.03.2022р.                      | виконано                     |
| 4.    | Написання другого розділу  | 03.04.2022р.                      | виконано                     |
| 5.    | Написання третього розділу   | 15.04.2022р.                      | виконано                     |
| 6.    | Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до кваліфікаційної роботи | 30.04.2022р.                      | виконано                     |
| 7.    | Оформлення кваліфікаційної роботи  | 10.05.2022р.                      | виконано                     |
| 8.    | Рецензування кваліфікаційної роботи  | 15.05.2022р.                      | виконано                     |
| 9.    | Презентаційні матеріали за результатами виконання кваліфікаційної роботи       | 20.05.2022р.                      | виконано                     |

Здобувач

(підпис, дата)

Олександр НЕСТЕРЧУК

Науковий керівник

(підпис, дата)

Олександр ЯНОВИЦЬКИЙ

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Драйвер для живлення потужних світлодіодів»

Автор роботи: Нестерчук Олександр Русланович

Керівник роботи: к.т.н, доцент Яновицький Олександр Костянтинович.

Пояснювальна записка: 63 сторінок, 30 рисунків, 2 таблиці, 22 джерела, 1 додаток.

Графічна частина: 15 презентаційних слайдів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ДРАЙВЕР, ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ, СИСТЕМА, КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЄМ, СТРУКТУРНА СХЕМА, МІКРОКОНТРОЛЕР, БУФЕРНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ СТРУМУ.

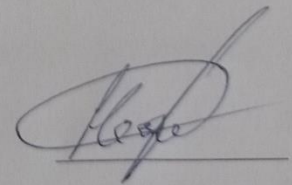
Об'єктом дослідження є джерела живлення потужних світлодіодів.

*Мета кваліфікаційної роботи* полягає в розробці драйвера джерела струму для живлення потужних світлодіодів.

У даній кваліфікаційній роботі вибрані компоненти, що необхідні для реалізації джерела живлення, представлений принцип роботи системи керування пристроєм, що необхідний для роботи джерела живлення.

Виконаний літературний огляд компонентів, що входять до системи.

25.05.2022 р.



## ЗМІСТ

|  | С. |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....  | 4  |
| ВСТУП.....   | 5  |
| 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ СТРУМУ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ<br>СВІТЛО ДІОДІВ.....                          | 6  |
| 1.1 Загальні показники потужних світлодіодів .....   | 6  |
| 1.2 Будова світлодіодів .....  | 9  |
| 1.3 Керування світлодіодами постійним струмом .....  | 16 |
| 1.4 Джерела стабільного постійного струму .....  | 17 |
| 1.5 Види з'єднань світлодіодів .....   | 19 |
| 1.6 Типи стабілізаторів напруги та струму для живлення світлодіодів .....                          | 22 |
| 1.6.1 Лінійні стабілізатори .....  | 22 |
| 1.6.2 Імпульсні стабілізатори .....  | 24 |
| 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМ<br>СТАБІЛІЗАТОРА СТРУМУ .....                        | 31 |
| 2.1 Структурна схема стабілізатора струму .....  | 31 |
| 2.2 Огляд мікросхеми MP2481 стабілізатора струму потужних світлодіодів .....                       | 33 |
| 2.3 Вибір елементної бази .....  | 44 |
| 2.4 Вибір вхідного пристрою живлення драйвера .....  | 47 |
| 3 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ СТАБІЛІЗАТОРА<br>СТРУМУ НА ОСНОВІ МІКРОСХЕМИ MP2481 ..... | 50 |

| Змн.      | Арк. | № докум.        | Підпис | Дата     |  | Літ.               | Арк. | Аркушів |
|-----------|------|-----------------|--------|----------|--|--------------------|------|---------|
|           |      |                 |        |          | КвРТР.2019029.01.08 ПЗ                     |                    |      |         |
| Розроб.   |      | Нестерчук О.Р.  |        | 10.06.22 | Драйвер для живлення потужних світлодіодів |                    |      |         |
| Перевір.  |      | Яновицький О.К. |        | 10.06.22 |  |                    | 2    | 62      |
| Реценз.   |      |                 |        |          | Пояснювальна записка                       | ХНУ, гр. ТР1с-19-1 |      |         |
| Н. Контр. |      | Корецька Л.О.   |        | 13.06.22 |  |                    |      |         |
| Затверд.  |      | Мартинюк В.В.   |        | 12.06.22 |  |                    |      |         |

|   |   |    |
|---|---|----|
| 3.1                                     | Схема електрична принципова стабілізатора струму .....            | 50 |
| 3.1.1                                   | Розробка друкованої плати пристрою .....                          | 50 |
| 3.1.2                                   | Вибір та обґрунтування основних параметрів друкованої плати ..... | 52 |
| 3.1.3                                   | Конструкторський розрахунок друкованої плати .....                | 52 |
| 3.1.4                                   | Розрахунок електричних параметрів друкованої плати.....           | 57 |
| ВИСНОВКИ.....                           |   | 61 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....         |   | 62 |
| ДОДАТОК А Зовнішній вид друкованої..... |   | 64 |

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 3    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

|        |   |   |
|--------|---|---|
| LED    | – | light emitting diodes                           |
| BST    | – | вхід вольтодобавки                              |
| FB     | – | вхід сигналу ОС за струмом навантаження         |
| Ge     | – | германій  |
| INGND  | – | загальний вивід для входу                       |
| OVP    | – | вхід сигналу ОС по вихідному                    |
| Si     | – | кремній   |
| SW     | – | вихід (до початку коמוтованого транзистора)     |
| Vdd    | – | плюсовий вивід живлення                         |
| Vss    | – | мінусовий вивід живлення; загальний вивід       |
| ДП     | – | друкована плата                                 |
| EN/DIM | – | вхід сигналу керування струмом навантаження     |
| ККД    | – | коефіцієнт корисної дії                         |
| УФ-СІД | – | ультрафіолетовий спектр                         |
| ЧІ     | – | частотно-імпульсне регулювання                  |
| ЧШІ    | – | широтно-частотно-імпульсному режимі регулювання |
| ШІ     | – | широтно-імпульсне регулювання                   |

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 4    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

## ВСТУП

За останні роки ми стали свідками стрімкого розвитку та революційного вдосконалення світлодіодів (світловипромінюючі діоди, в англійському варіанті LED – light emitting diodes) – твердотільних напівпровідникових джерел світла. Ще недавно світлодіоди були лише пристроями індикації, а сьогодні це вже високоефективні джерела світла, які в найближчі 10-15 років перетворять світ штучного освітлення і повністю замінять лампи розжарювання.

Світлодіодне освітлення – один з перспективних напрямків технологій штучного освітлення, що базується на застосуванні світлодіодів у вигляді джерела світла. Застосування світлодіодних ламп вже займає суттєву частку ринку. Розвиток безпосередньо пов'язаний з технологічним удосконаленням світлодіода.

В даний час світлодіоди знайшли застосування в різних областях: світлодіодні ліхтарі, автомобільна світлотехніка, рекламні вивіски, світлодіодні панелі та індикатори, рядки, що біжать, і світлофори та і т.д. У порівнянні зі звичайними лампами розжарювання, а також люмінесцентними лампами світлодіоди мають багато переваг: мініатюрність, екологічність, безпека, тривалий термін служби, високі світлові характеристики, можливість роботи у широкому спектр температур, великий вибір кольорів.

Ключовим моментом заміни традиційних ламп розжарювання, світлодіодні джерела світла є суттєва економія електроенергії.

В основному використовуються прилади на білих світлодіодах [1].

Головні проблеми, що зупиняють масове впровадження цих найперспективніших джерел світла, на сьогодні є: Перше це – висока початкова вартість пристроїв освітлення на світлодіодах, але витрати, потрібні при експлуатації значно менше конкурентних джерел освітлення та протягом року окупаються. Другою проблемою досі залишається відведення тепла потужних світлодіодів, тільки 5% передається у вигляді теплого випромінювання у повітря та близько 90% переходить у підкладку самого світлодіода.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 5    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

# 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ СТРУМУ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ СВІТЛОДІОДІВ

## 1.1 Загальні характеристики потужних світлодіодів

Винахід транзисторів став одним із найпрогресивніших відкриттів у науці. Подальший розвиток напівпровідникової електроніки та створення комп'ютерів у другій половині ХХ ст. призвело до кардинального стрибка в еволюції високотехнологічних виробництв, організацію праці на всіх рівнях керування.

Особливі перспективи виникли у сфері фізики напівпровідників, що вивчає люмінесценцію. Прогрес у цій сфері дозволив створити напівпровідникові джерела світла – світлодіоди.

Щоб зрозуміти, чому світлодіодам пророкують велике майбутнє, розглянемо докладніше їхній пристрій, історію створення та розвитку.

У 1907 році англійський інженер Раунд, який працював у всесвітньо відомій лабораторії Марконі, випадково помітив, що у працюючого детектора навколо точкового контакту виникає свічення. Всерйоз зацікавився цим фізичним явищем і спробував знайти йому практичне застосування Олег Володимирович Лосєв.

Виявивши 1922 року під час своїх нічних радіовахт світіння кристалічного детектора, цей, тоді ще 18-річний, радіоаматор не обмежився констатацією «дивного» факту, а негайно перейшов до оригінальних експериментів. Прагнучи отримати стійку генерацію кристала, він пропускав через точковий контакт діодного детектора струм від батареї. Тобто мав справу ні з чим іншим, як із прототипом напівпровідникового приладу, названого згодом світлодіодом. Весь світ заговорив про «ефект Лосєва», на практичне застосування якого винахідник встиг одержати (до своєї загибелі на війні 1942 р.) чотири (!) патенти.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 6    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

З 1951 року центр із розробки «напівпровідникових лампочок», що діють на основі «ефекту Лосева», перемістився до Америки, де його очолив К. Леховець (США). У дослідженні проблем, пов'язаних зі світлодіодами, взяв найактивнішу участь і «батько транзисторів» фізик В. Шоклі.

Незабаром з'ясувалося, що германій (Ge) і кремній (Si), на основі яких робляться напівпровідникові тріоди (транзистори), безперспективні для світлодіодів через надто велику «роботу виходу» і, відповідно, слабе випромінювання фотонів на р-п-переході. Успіх супроводжував монокристалів зі складних композитних напівпровідників: сполук галію (Ga), арсенікуму (миш'яку – As), фосфору (P), індію (In), алюмінію (Al), інших елементів періодичної системи Менделєєва.

Однак реалізовані на практиці ці ідеї були лише у 60-70-ті роки, після виявлення ефективної люмінесценції напівпровідникових сполук типу АШБУ-фосфіду (GaP) та арсеніду (GaAs) галію та їх твердих розчинів. У результаті на їх основі були створені світлодіоди і, таким чином, закладено фундамент нової галузі техніки – оптоелектроніки.

Перші світлопромислові значення, що мають промислове значення, були створені в 60-ті роки на основі структур GaAsP/GaP Ніком Холоньяком (США) з червоним і жовто-зеленим світінням. Зовнішній квантовий вихід був трохи більше 0,1%. Довжина хвилі випромінювання цих приладів знаходилася в межах 500-600 нм – області найвищої чутливості людського ока, тому яскравість їх жовто-зеленого випромінювання була достатньою для цілей індикації. Світлова віддача світлодіодів у своїй становила приблизно 1-2 лм/Вт.

Ефективні світлодіоди для зеленувато-блакитний, блакитний, синій та фіолетовий частин спектру були створені у 90-ті роки. Виробляються вони на основі напівпровідників зі значною шириною забороненої зони: карбиду кремнію SiC, сполук групи АІІ ВVІ, нітридів групи АІІ ВV. У випромінювачів на основі

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 7    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

ZnSe (AII BVI ) великий квантовий вихід, але вони мають маленький термін роботи, але мають велике електричне опір. У карбід-кремнієвих діодів дуже малий ККД, так як SiC – непрямозонний напівпровідник.

В останні роки було зроблено справжній прорив у розробках блакитних та зелених світлодіодів. У приладах на основі нітриду галію та його твердих розчинів GaN, InxGa1-xN, AlxGa1-xN зовнішній квантовий вихід збільшений до  $\eta = 9-16\%$  [2]. Світловіддача діодних випромінювачів із різних матеріалів для всіх основних кольорів перевищила світловіддачу ламп розжарювання. Діоди стали приладами і оптоелектроніки, і світлотехніки.

*Терміни, що використовуються для характеристики світлодіодів.*

Квантовий вихід – це число випромінюваних квантів світла на одну електронно-діркову пару, що рекомбінувала. Розрізняють внутрішній та зовнішній квантовий вихід. Внутрішній – у самому р-п-переході, зовнішній – для приладу в цілому (адже світло може губитися "по дорозі" - поглинатися, розсіюватися). Внутрішній квантовий вихід для «хороших» кристалів із потужним тепловідведенням досягає майже 100%, рекорд зовнішнього квантового виходу для червоних світлодіодів становить 55%, а для синіх – 35%.

Зовнішній квантовий вихід – одна з основних характеристик ефективності світлодіода.

Світловіддача – кількість люменів, що випромінюються, на одиницю споживаної потужності люмен/ват (лм/Вт). Цей параметр показує, скільки енергії, що надходить на світлодіод, перетворюється на світло, а скільки в тепло. Що цей параметр, то краще.

Світловий потік – величина, що характеризує кількість випромінюваного (поглинається або відбитого) світла. Світловий потік є потужністю

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 8    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

випромінювання, оцінену з позиції його на зоровий апарат людини. Одиниця світлового потоку – люмен (лм).

## 1.2 Будова світлодіодів

Світлодіод на рисунку 1.1 має два виводи – анод та катод. На катоді розташований алюмінієвий параболічний рефлектор (відбивач). Зовні він виглядає, як чашоподібне заглиблення, на дно якого вміщено світловипромінюючий кристал.

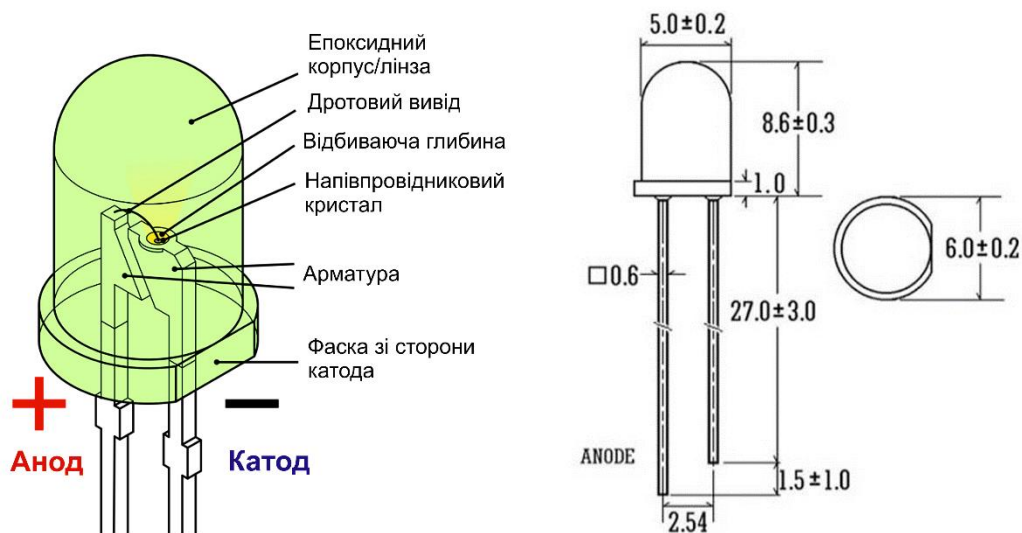


Рисунок 1.1 – Найпоширеніша конструкція світлодіода – традиційний 5-міліметровий корпус

Активний елемент – напівпровідниковий монокристал – у більшості сучасних світлодіодів використовується у вигляді кубика (чіпа) розмірами 0,3 x 0,3 x 0,25 мм, що містить p-n або гетероперехід та омичні контакти.

Кристал з'єднаний з анодом за допомогою перемички із золотого дроту. Оптично прозорий полімерний корпус, що є одночасно фокусувальною лінзою

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

разом з рефлектором, визначає кут випромінювання (діаграму спрямованості) світлодіода.

Щодо яскравості світлодіода, то для неї далеко не байдужа і оптична прозорість n-області (надтонкі плівки напівпровідників цілком прозорі). Ну а колір (частота) випромінювання, маючи чіткий функціональний зв'язок з енергією фотонів, що випускаються, залежить від матеріалів напівпровідникових р-п-переходів. Зокрема, чистий монокристал GaAs дає інфрачервоний промінь, невелика добавка Al та/або P змінює колір випромінювання на червоний. Зелене світло випромінює GaP. Використання р-п-переходу на основі композиції AlInGaP дозволяє отримувати жовте або помаранчеве випромінювання.

Працюючи одиночний світлодіод споживає дуже невелику енергію: при напрузі 2-4 В і струмі 10-30 мА електрична потужність варіюється від 20 до 120 мВт. При ККД 5-25% у вигляді світла випромінюється 1-30 мВт (сила світла 1-30 кд). Для порівняння - мініатюрна лампа розжарювання працює при напрузі близько 12 В та струмі 50-100 мА.

На відміну від ламп розжарювання світлодіоди випромінюють світло відносно вузькій смузі спектру, ширина якої становить 20-50 нм. Вони займають проміжне положення між лазерами, світло яких монохроматичне (випромінювання зі строго певною довжиною хвилі), і лампами різних типів, що випромінюють біле світло (суміш випромінювань різних спектрів). Іноді таке «вузькосмугове» випромінювання називають «квазімонохроматичним». Як джерела «кольорового» світла світлодіоди давно випередили лампи розжарювання зі світлофільтрами. Так, світлова віддача лампи розжарювання з червоним світлофільтром становить лише 3 лм/Вт, тоді як червоні світлодіоди сьогодні дають 30 лм/Вт і більше. Наприклад, новітні прилади Luxeon виробництва американської компанії Lumileds (спільне підприємство Agilent Technologies та Philips Lighting) забезпечують 50 лм/Вт для червоної та навіть 65

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 10   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

лм/Вт для оранжево-червоної частини спектру. Втім, і це не рекорд – для жовто-жовтогарячих світлодіодів планку 100 лм/Вт вже взято.

На наступному етапі розробок перейшли до багатошарових гетероструктур GaN/ Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N з нелегованим активним шаром Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N завтовшки до 2-3 нм. Фізичні принципи, раніше використані при створення приладів на основі GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As та GaAs<sub>s</sub>/In<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>Ga<sub>1-x-y</sub>P послужили стосовно нових структур [2].

У надтонких шарах впливають ефекти розмірного квантування. залежності енергетичного спектру електронів та дірок від товщини шару, коли товщина шару можна порівняти з довжиною хвилі де Бройля. Таким чином, відкрилася можливість регулювати колір світіння, змінюючи склад напівпровідника, а товщина потенційної ями, званої в цих умовах квантової.

Було дуже важливо розробити технологію вирощування нових структур, забезпечуючи на межах мінімальну кількість дефектів. Допомогло те, що в надтонких шарах невідповідність параметрів решітки певних випадках викликає на гетерокордонах лише пружну деформацію розтягування чи стиснення. А суто пружна деформація не супроводжується утворенням дислокацій та дефектів - центрів безвипромінної рекомбінації.

Структура світлодіода із множинними квантовими ямами є досить складною "пиріг" на рисунку 1.2. На сапфіровій підкладці, після буферного шару AlN (товщиною 30 нм), вирощений відносно товстий (4 мкм) шар n-GaN: Si. Потім йде активний нелегований шар, що складається з п'яти квантових ям, що чергуються. In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (3-4 нм) та бар'єрів GaN (4-5 нм). Ефективна ширина забороненої зони квантових ям In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N відповідає випромінюванню від блакитний до жовтої області (450-580 нм), якщо склад активного шару змінюється не більше  $x = 0.2-0.4$ ; вона залежить від товщини  $d$ . Розташований вище бар'єрний широкозонний шар p-Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N:Mg (100 нм) інжектує дірки

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 11   |

та погоджує решітку з решіткою верхнього шару p-GaN:Mg (0.5 мкм), на який нанесено металевий контакт Ni-Au. Другий металевий контакт (Ti-Al) з нижнім шаром n-GaN створюється після травлювання частини структури [2]. Шляхом вибору напівпровідникового матеріалу та присадки можна цілеспрямовано впливати на характеристики світлового випромінювання світлодіодного кристала, насамперед на спектральну область випромінювання та ефективність перетворення енергії, що підводиться, у світло.

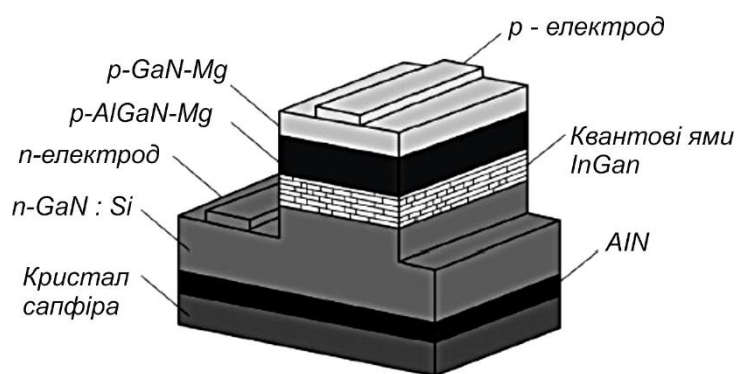


Рисунок 1.2 – Схема світлодіода на основі гетероструктур типу InGaN/AlGaN/GaN з множинними квантовими ямами

На сьогоднішній час існує три способи отримання білого світла за допомогою світлодіодів:

- змішування у певній пропорції випромінювання червоного, зеленого та синього світлодіодів. При цьому можуть бути використані як окремі світлодіоди різних кольорів, так і 3-хкристальні світлодіоди, що поєднують кристали червоного, синього та зеленого світіння в одному корпусі.

На рисунку 1.3 показано отримання білого світла шляхом змішування у певній пропорції випромінювання червоного, зеленого та синього світлодіодів.

Основою більш дешевого і поширеного способу отримання світлодіода білого світла є напівпровідниковий кристал структури InGaN, що випромінює на

довжині хвилі 460-470 нм (синій колір) і нанесений зверху на поверхню кристала люмінофор на основі YAG (ітрій-гадолінієвих гранатів, активований  $\text{Ce}^{3+}$ ) широкому діапазоні видимого спектру і що має максимум у його жовтій частині спектра.

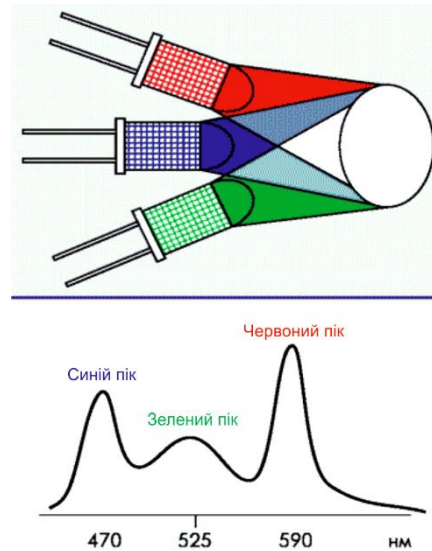


Рисунок 1.3 – Ультрафіолетовий діод з трьома люмінофорами

На рисунку 1.4 показано отримання білого світла за допомогою кристала синього світлодіода та нанесеного на нього шару жовтого люмінофора.

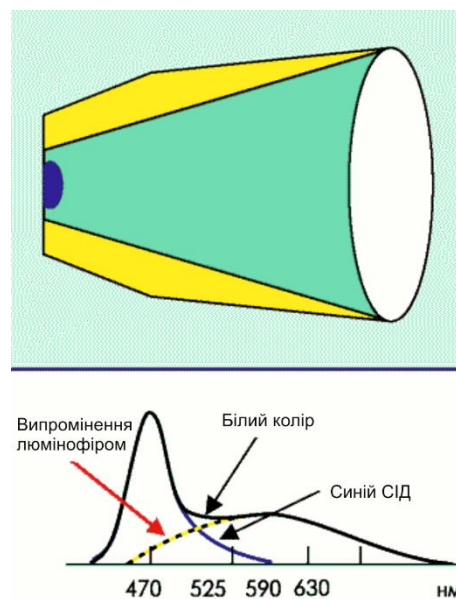


Рисунок 1.4 – Блакитний світлодіод із жовтим люмінофором

Людське око комбінацію такого роду сприймає як білий колір. Такі світлодіоди набагато дешевші за 3-х кристалальні, мають хорошу передачу кольору, а по світловіддачі (до 30 лм/Вт) вони вже обігнали лампи розжарювання (7-10 лм/Вт).

Ще один метод отримання білого світла – збудження 3-шарового люмінофора світлодіодом ультрафіолетового спектру (УФ-СІД).

На рис. 5 показано отримання білого світла за допомогою ультрафіолетового світлодіода та RGB-люмінофора.

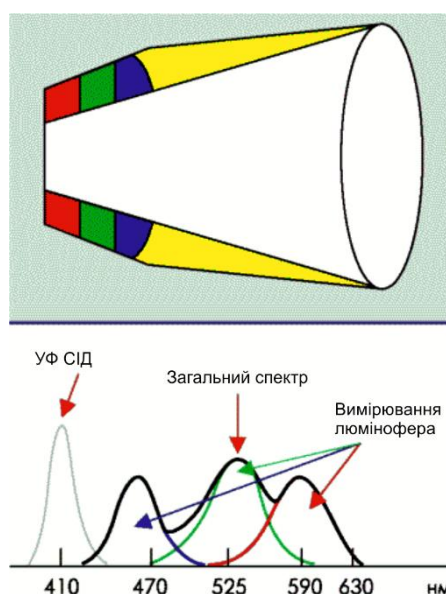


Рисунок 1.5 – Отримання білого світла за допомогою ультрафіолетового світлодіода та RGB-люмінофора

Кожен спосіб має свої переваги і недоліки. Технологія RGB в принципі дозволяє не тільки отримати білий колір, але й переміщатися по діаграмі при зміні струму через різні світлодіоди. Цим процесом можна керувати вручну або за допомогою програми, можна також отримувати різні кольорні температури. Тому RGB-матриці широко використовуються у світлодінамічних системах.

Крім того, велика кількість світлодіодів у матриці забезпечує високий сумарний світловий потік та велику осьову силу світла. Але світлова пляма через аберації оптичної системи має неоднаковий колір у центрі та по краях, а головне, через нерівномірне відведення тепла з країв матриці та з її середини світлодіоди нагріваються по-різному, і, відповідно, по-різному змінюється їх колір. У процесі старіння – сумарна колірна температура і колір «пливуть» під час експлуатації. Це неприємне явище досить складно та дорого компенсувати.

Білі світлодіоди з люмінофорами істотно дешевші, ніж світлодіодні RGB-матриці (у перерахунку на одиницю світлового потоку), і дозволяють отримати хороший білий колір. І для них у принципі не проблема потрапити до точки з координатами (0,33; 0,33) на колірній діаграмі МКО. Недоліки такі: по-перше, у них менше, ніж у RGB-матриць, світловіддача через перетворення світла в шарі люмінофора; по-друге, досить важко точно проконтролювати рівномірність нанесення люмінофора в технологічному процесі і, отже, колірну температуру; і, нарешті, по-третє, люмінофор теж старіє, причому швидше, ніж сам світлодіод.

Промисловість на даний момент випускає як світлодіоди з люмінофором, так і RGB-матриці - у них різні сфери застосування.

Як уже згадувалося, будова світлодіода не обмежується стандартним 5-мм корпусом і визначається потужністю випромінювання та прямим струмом, що проходить через діод. Світловий потік, що випромінюється світлодіодом, безпосередньо залежить від прямого струму, що протікає через світлодіод. Чим більший струм, тим яскравіше світить світлодіод. Це з тим, що більше струм, тим більше електронів і дірок надходять у зону рекомбінації в одиницю часу. Але струм не можна збільшувати до безкінечності. Через внутрішній опір напівпровідника і р-п-переходу діод перегріється і вийде з ладу.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 15   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

### 1.3 Керування світлодіодами постійним струмом

Шляхом вирішення проблеми різної прямої напруги  $V_f$  при однаковому струмі є використання керування постійного струму, а не напруги. Для підтримки постійного струму, а отже і сили світла, драйвер світлодіода автоматично підлаштовує вихідну напругу. Такий підхід можна використовувати у разі одиничного твердотілого випромінювача або при їх послідовному з'єднанні. Якщо Струм через всі світлодіоди однаковий, то, незважаючи на відмінності в  $V_f$ , вони будуть мати однакову яскравість, як показано на рисунку 1.6 [5].

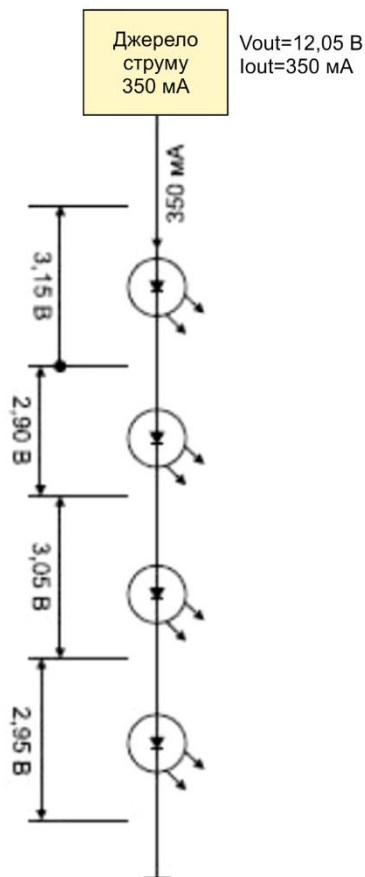


Рисунок 1.6 – Коло світлодіодів

Якщо випромінювачі прогрілися до робочої температури, то для підтримання величини струму незмінною, джерело постійного струму автоматично зменшить напругу керування. Це робить їх яскравість, не залежить

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 16   |

від температури. Ще однією значною перевагою є те, що джерело стабільного струму не дозволяє якомусь окремому світлодіоду в колі бути перевантаженим. Це гарантує, що всі вони будуть мати великий термін служби. Якщо один із напівпровідникових випромінювачів виявиться пробитим (коротко замкненим), то інші продовжать функціонувати з коректним робочим струмом.

#### 1.4 Джерела стабільного постійного струму

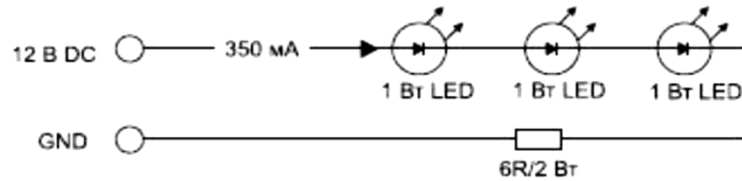
Найпростішим джерелом постійного струму є генератор постійної напруги, що керує світлодіодом через резистор. Якщо падіння напруги на опорі приблизно дорівнює прямому напруги на світлодіоді. Таке рішення дуже дешево, але має поганими характеристиками регулювання струму і дуже марнотратно потужності. Багато дешевих світлодіодних ламп типу кластера, пропоновані як заміна низьковольтних галогенних ламп, використовують цей метод. У разі замикання в одному із світлодіодів резистор перегорить відносно швидко і таким самим відносно коротким буде час життя всього кластера [6].

Іншим найпростішим джерелом постійного струму є його лінійний регулятор. На ринку доступні кілька дешевих драйверів світлодіодів, які використовують цей метод. Для цієї ж мети можуть застосовуватись і лінійні стабілізатори напруги, що працюють у режимі постійного струму. Внутрішній зворотний зв'язок підтримує керований струм всередині 5%-го коридору, але теплова потужність виділяється у вигляді тепла, і для її розсіювання потрібно хороше тепловідведення. Погана ефективність цього методу слабо узгоджується з принципом високої ефективності твердотільного освітлення.

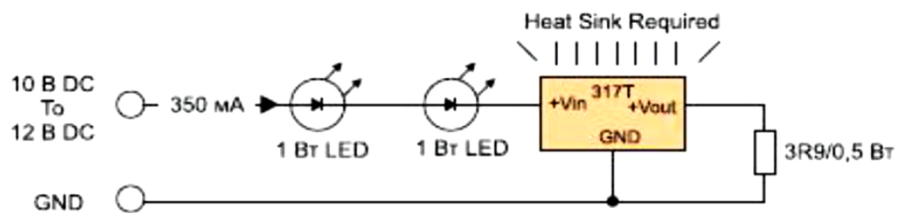
Найкращим джерелом постійного струму є імпульсний стабілізатор (switching regulator). Ціна такого драйвера вища, ніж у інших рішень, але точність у широкому діапазоні навантажень знаходиться в межах 3%, а ефективність

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 17   |

перетворення перевищує 96%, це означає, що тільки 4% енергії витрачається марно і пристрій може працювати при високих температурах довкілля (рисунок 1.7).



Лінійний регулятор: мало витрат, висока точність, але низька ефективність



Регулятор-перемикач: вища ціна, але більш точний і ефективний

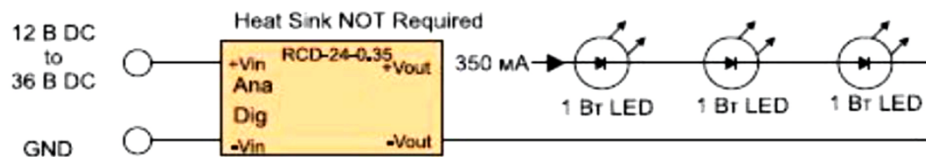


Рисунок 1.7 – Приклади джерел стабільного струму для світлодіодів

Одна важлива відмінність між альтернативними підходами, наведеними вище, – діапазон вхідної та вихідної напруги. Так, DC/DC-регулятор-перемикач має великий діапазон вхідних та вихідних напруг, в якому він забезпечує стабільний струм (наприклад, RCD-24.0.35 при зміні постійної напруги від 5 до 36 В може давати на виході 2-34 В). Великий діапазон вихідних напруг дозволяє використовувати різні комбінації світлодіодних лінійок, але також дозволяє в широких межах регулювати яскравість.

Два інші альтернативні рішення, наведені вище, у разі, якщо потрібен тільки один світлодіод, приведуть до проблем з розсіюванням потужністю,

оскільки падіння напруги на резисторі чи регуляторі буде більше, відповідно зростуть і втрати енергії. Діапазон вхідних напруг також обмежений з тих же міркувань.

### 1.5 Види з'єднань світлодіодів

Більшість потужних білих світлодіодів розробляються на робочий струм 350 мА. Відбувається це тому, що за законами хімії їхнє пряме напруга має бути порядку 3, а  $3,0 \times 0,35 \approx 1 \text{ Вт}$ , що є зручною для світлодіодів потужністю. Більшість DC/DC-драйверів стабільного струму для твердотільних випромінювачів світла є подрібнюючими або знижуючими (buck or step-down) перетворювачами. Це означає, що максимальна вихідна напруга менша, ніж вхідна. Якщо вхідну напругу не можна змінювати (наприклад, батарея), то максимальна кількість світлодіодів повинна бути скорочена залежно від мінімального значення доступної вхідної напруги.

Два випромінювачі – це не дуже багато, щоб обійти цю проблему можна, використовуючи підвищуючий перетворювач, у якого вихідна напруга перевищує вхідну, або поставити в паралель два або більше кола. Для кожного з них драйвер забезпечуватиме необхідні 350 мА; дві, включені в паралель, будуть забезпечуватись струмом 700 мА, три - 1,05 А і т. д. Отже, вибір джерела живлення для світлодіодів повинен враховувати доступну вхідну напругу та число кіл, якими необхідно керувати. На рисунках 1.8, 1.9 і 1.10 показані деякі варіанти підключення типових одноватних білих світлодіодів до 12-В джерела постійної напруги.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 19   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

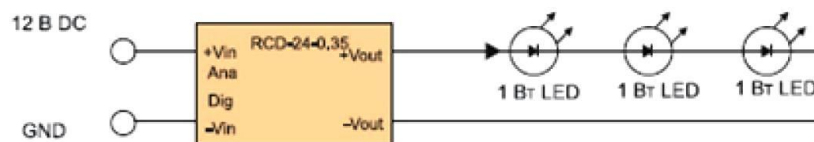


Рисунок 1.8 – Три світлодіоди включені послідовно

Переваги: висока точність завдання струму, безпека при відмові.

Недоліки: мала кількість випромінювачів у колі.

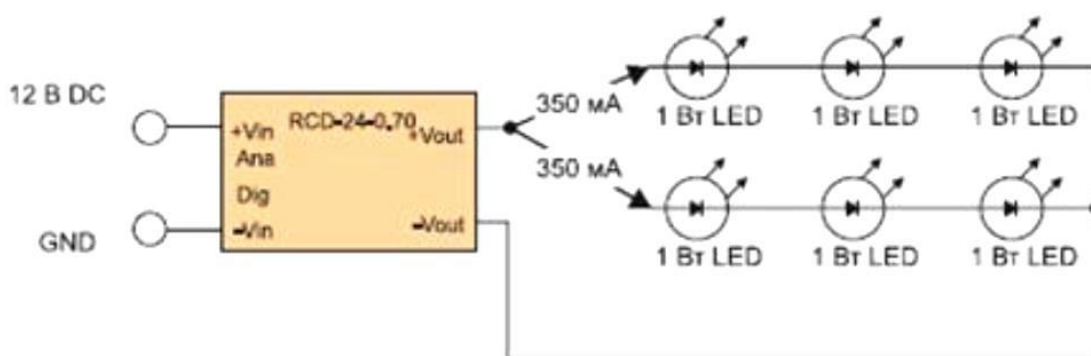


Рисунок 1.9 – Шість світлодіодів у двох паралельних колах

Переваги: подвоєне число випромінювачів.

Недоліки: безпека при відмові не забезпечується, незбалансованість струмів у колах.

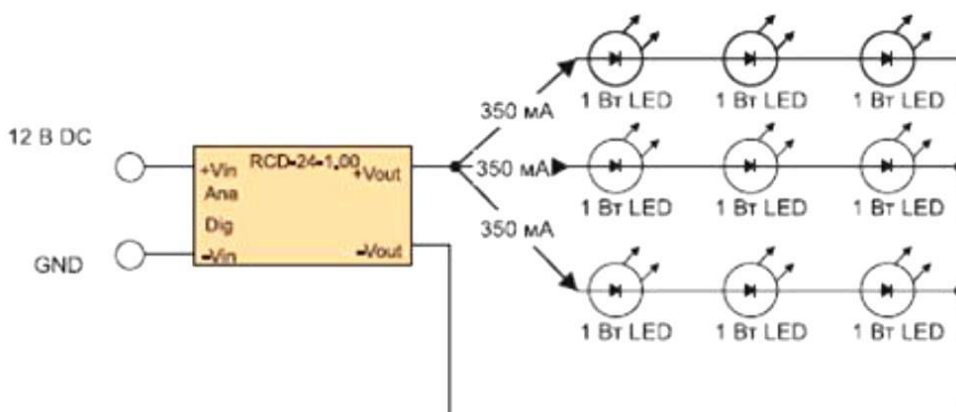


Рисунок 1.10 – Дев'ять світлодіодів у трьох колах

Переваги: потрібна кількість випромінювачів.

Недоліки: безпека при відмові не забезпечується, незбалансованість струмів у колі.

Найбільш безпечним та надійним методом є підключення до драйвер одного кола світлодіодів. Якщо якийсь випромінювач вийде з ладу і розімкне коло, подача струму до інших припиниться. Якщо ж один з них вийде з ладу і стане короткозамкненим колом, то ті, що залишилися по- як і раніше будуть забезпечуватися тим самим струмом.

Перевагою керування багатьма світлодіодами за допомогою одного драйвера є велика кількість випромінювачів, а недоліком незахищеність у разі відмови. У разі двох паралельних кіл при такій відмові світлодіода, коли він розриває коло, ті самі постійні 700 мА потечуть через коло, що залишився, який через дуже короткий час також вийде з ладу. При трьох паралельно включених лінійках в у разі відмови одного випромінювача два кола, що залишилися, ділитимуть між собою струм дорівнює 1 А. Обидві виявляться перевантаженим струмом 500 мА. Можливо, певний час вони зможуть працювати, але це залежатиме від якості тепловідведення, згодом великий струм викличе відмову іншого світлодіода, після чого третє коло прийме на себе весь струм в один ампер і майже відразу вийде з ладу [7].

Якщо ж якийсь світлодіод відмовить і перетвориться на короткозамкнуте коло, це викличе перерозподіл струмів між колами, але найбільший потече через коло, в якому прилад вийшов із ладу. Зрештою, остання відмовить і викличе «ефект доміно», аналогічний описаному вище. Потужні світлодіоди надійні, тому описані вище відмови можуть відбуватися не надто часто. Виходячи з цього, більшість розробників твердотілого освітлення вибирають зручний та дешевий варіант живлення кількох кіл світлодіодів від одного драйвера, хоч і

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 21   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

усвідомлюють ризик того, що при відмові одного з ладів вийдуть і багато інших випромінювачів [8].

## 1.6 Типи стабілізаторів напруги та струму для живлення світлодіодів

У радіоелектроніці найчастіше використовуються два типи стабілізаторів: лінійні та імпульсні.

### 1.6.1 Лінійні стабілізатори

Лінійні стабілізатори діють за принципом резистора: обмежують струм, що протікає через ключовий елемент (транзистор) так, щоб напруга (або струм) у навантаженні залишалися постійними. При цьому частина корисної потужності втрачається (виділяється у вигляді тепла на регулюючому транзисторі). У деяких випадках ця "частина" може бути дуже значною. Наприклад, при вхідному напрузі 10 і вихідному 2,5 В падіння напруги на транзисторі становить 7.5, тобто. 75% енергії джерела живлення витрачається на паразитний розігрів транзистора і лише 25% виконують корисну роботу.

Ще гірше справа з регульованими джерелами живлення, коли для більшого діапазону зміни вихідної напруги розробник намагається зробити вхідну напругу більше. У таких випадках за мінімальної вихідної напруги ККД джерела живлення може знижуватися до одиниць відсотка

Резистор є елементом, що обмежує струм, що протікає через світлодіод. Але опір зручно застосовувати, якщо напруга живлення постійно. На практиці часто трапляється, що напруга не стабільна, наприклад, напруга акумуляторної батареї зменшується при її розряді досить у широких межах. І тут широко застосовують лінійні стабілізатори струму.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 22   |

Найпростіший лінійний стабілізатор струму можна зібрати на широко поширених мікросхемах типу КР142ЕН12(А), LM317 (та їх численних аналогах), як показано на рисунку 1.11.

Резистор R вибирається в межах  $0,25 \div 125$  Ом, при цьому струм через світлодіод визначається виразом

$$I_{vd} = 1,25 / R.$$

Схема побудови таких стабілізаторів струму відрізняється простотою (мікросхема та один резистор), компактністю, надійністю та дешевизною. Надійність додатково обумовлена розвиненою системою захисту від перевантажень та перегріву, вбудованою у мікросхему стабілізатора.

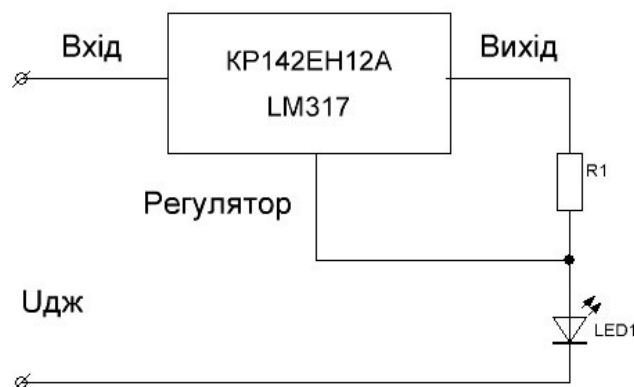


Рисунок 1.11 – Схема найпростішого лінійного стабілізатора струму

Для стабілізації струмів від 350 мА і вище можна використовувати і потужніші мікросхеми лінійних регуляторів з мінімальним падінням напруги серій 1083, 1084, 1085 різних виробників або вітчизняні аналоги КР142ЕН22А/24А/26А.

Але лінійні стабілізатори струму мають суттєві недоліки:

- низький ККД;

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 23   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

- великі втрати сильне нагрівання при регулюванні великих струмів
- необхідність у радіаторі для охолодження за потужності > 200-300 мВт

### 1.6.2 Імпульсні стабілізатори

Через недоліки лінійних стабілізаторів застосовуються імпульсні перетворювачі та стабілізатори для живлення світлодіодів та світлодіодних модулів. На рисунку 1.12 представлений зовнішній вигляд світлодіодного модуля та вторинної оптики. Слід зазначити, що світлодіоди та перетворювач живлення конструктивно виконані на єдиній платі.

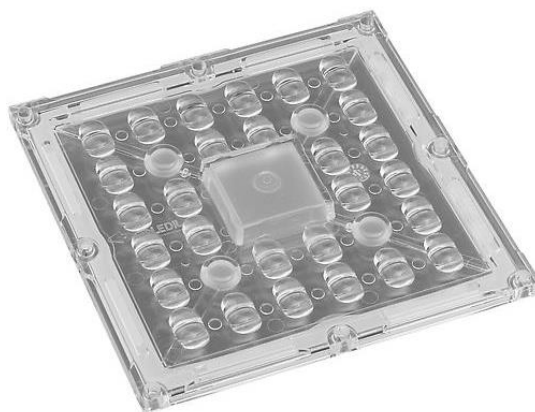


Рисунок 1.12 – Зовнішній вигляд світлодіодного модуля та вторинної оптики

Імпульсні стабілізатори, здатні трансформувати напругу в струм і навпаки. ККД такого джерела струму, незалежно від величини вхідної (вихідної) напруги, практично постійний і становить, залежно від схеми та комплектуючих, що використовуються, до 80...95%. Завдяки такому високому ККД полегшується тепловий режим пристрою: його компоненти практично не гріються, і там, де раніше доводилося використовувати громіздкі радіатори-тепловідводи та

вентилятори, вдається обійтися однією маленькою платівкою або взагалі голим корпусом транзистора. Зменшується споживаний пристроєм струм, що дуже важливо при автономному режимі роботи.

Чим вище робоча частота перетворювача, тим менших розмірів можуть бути його габаритні деталі - котушка індуктивності (дросель або трансформатор) і конденсатори, що фільтрують. Образно кажучи, за 1 такт сердечник дроселя чи трансформатора може накопичити невелику кількість енергії певної величини, і обсяг залежить від робочої частоти. Тобто, підвищивши робочу частоту, в 10 разів, можна за той же час "передати" в навантаження в 10 разів більшу потужність при тому ж розмірі котушки та сердечника. Тому, якщо звичайний 50-герцовий трансформатор потужністю 270 Вт (ТС-270) важить більше 5 кг і розміром з 3-літрову банку, то імпульсний трансформатор на 300 Вт, що працює на частоті 30 кГц, лише з 3-4 сірникових коробок.

На жаль, частоту не можна підвищувати нескінченно: для більшості недорогих ключових транзисторів максимальна робоча частота не перевищує 100...300 кГц, а у феритових сердечників на частотах вище 30...100 кГц сильно збільшуються втрати через вихрові струми всередині сердечника. Тому оптимальна робоча частота імпульсного джерела струму – 30...50 кГц. Вона досить висока для того, щоб людина не чула писку при його роботі (максимальна чутна частота не перевищує 20 кГц), і в той же час втрати на такій частоті ще досить малі.

Проте імпульсні стабілізатори мають і недоліки. Головний їх у самому принципі дії. Стабілізатор працює в імпульсному режимі і на досить високій частоті, тому він випромінює дуже потужні електромагнітні (радіохвилі) та електричні (пульсації напруги) перешкоди. Позбутися їх дуже складно. Тому застосовувати імпульсні стабілізатори доцільно тільки там, де навантаження споживає значний струм або потужність (більше 10...20 Вт), є велика різниця між

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 25   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

вхідною та вихідною напругою (мінімум у 2...5 разів), а навантаження порівняно нечутливе до перешкод і пульсаціям (заряджається акумулятор, лампочка, електромотор та ін.).

Імпульсний стабілізатор складається з п'яти частин:

- схеми керування;
- ключового транзистора;
- дроселя (котушки індуктивності з магнітним сердечником, частіше феритовим);
- фільтруючих конденсаторів;
- зворотноходовий діод, в якості якого для невеликого збільшення ККД (і значного зменшення нагріву корпусу) можна використовувати потужний транзистор.

Залежно від того, як ці елементи з'єднані, імпульсний джерело живлення може підвищувати, знижувати, а також інвертувати полярність напруги. Також відомі трансформаторні імпульсні перетворювачі, але вони менш поширені і використовуються, в основному, там, де необхідна гальванічна розв'язка (блоки живлення та зарядні пристрої з живленням від мережі) або де потрібно значно (більш ніж у 3...10 разів) підвищити напругу .

Схема керування сучасних імпульсних джерел збирають з урахуванням спеціалізованих мікросхем. Вони порівняно дешеві, мають чудові характеристики і практично не вимагають підключення зовнішніх елементів і копіткої настройки.

Для керування польовими транзисторами необхідні мікросхеми з потужними виходами: для досягнення максимального ККД транзистор повинен швидко відкриватися (за час порядку сотень наносекунд), а у польових транзисторів ємність затвора дуже велика. Тому мікросхема-драйвер польового транзистора повинна мати підлоги мостовий вихід, здатний забезпечити струм

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 26   |

0,2...2,0 А. Чим вище робоча частота, тим більшим має бути вихідний струм. Цей струм споживається транзистором короткочасно (поки не зарядиться або розрядиться ємність затвора), а решта часу струм не споживається. Тому потужніший драйвер не призведе до збільшення енергоспоживання, а навпаки, ККД схеми тільки зросте.

Схема підвищуючого перетворювача напруги показано на рисунку 1.13 а. Під час робочого ходу коли транзистор відкритий, котушка запасає енергію. Її можна як батарейку (конденсатор), позитивний полюс якої – вгорі схеми на рисунку 1.13 б.

Діод при цьому закритий, напруга на виході підтримується конденсатором. Після замикання транзистора полярність напруги на висновках котушки через ЕРС самоіндукції змінюється на протилежну, вона підсумовується з напругою живлення і через діод, що відкрився, заряджає конденсатор на рисунку 1.13 в. Таким чином, можна отримати скільки завгодно велику напругу, але зазвичай вона не перевищує кілька сотень вольт через втрати, як у самій котушці, так і в інших елементах схеми.

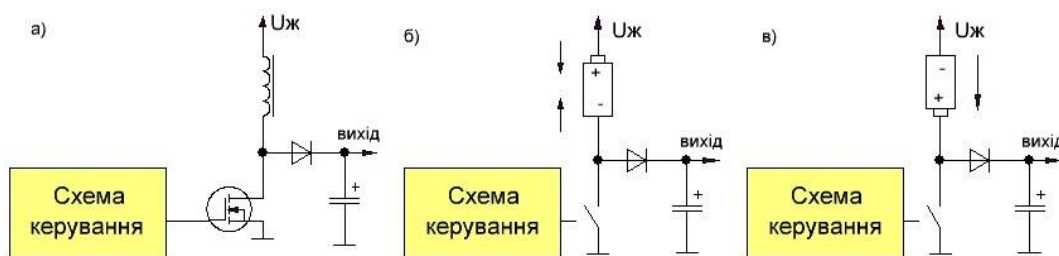


Рисунок 1.13 – Схема підвищуючого перетворювача

При складанні такої схеми потрібно приділити особливу увагу надійності елементів та монтажу. Транзистор, конденсатор і діод у цій схемі повинні бути розраховані на максимальну вихідну напругу плюс 10...20 запасів.

Оскільки робоча точка регулюючого приладу майже весь час знаходиться в області насичення або відсічення, минаючи активну область, в транзисторі розсіюється мало тепла, а значить ККД імпульсного стабілізатора високий.

Стабілізація реалізована шляхом зміни тривалості імпульсів або керуванням частотою їхнього прямування. Відповідно, розрізняють широтно-імпульсне (ШИ) або частотно-імпульсне (ЧІ) регулювання. Іноді імпульсні стабілізатори працюють у змішаному широтно-частотно-імпульсному режимі (ЧШІ).

У стабілізаторах з ШІ-регулюванням частота проходження імпульсів постійна, а тривалість імпульсів непостійна. У стабілізаторах із ЧІ-регулюванням тривалість імпульсів незмінна, а варіюють частоту.

Після регулюючого приладу напруга має імпульсну форму, а отже, непридатне для безпосереднього живлення навантаження. Перш ніж подати напругу на навантаження, його необхідно згладити, для чого на виході всіх імпульсних стабілізаторів встановлюють індуктивно-ємнісні фільтри, що згладжують. Фільтри можуть бути багатоланковими, П-подібними, Г-подібними та іншими видами.

Усереднену напругу, що додається до навантаження, можна знайти за формулою:

$$U_{вих} = \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^{t_i} R_n \cdot I(t) dt,$$

де  $T_i$  – тривалість періоду, с;

$t_i$  – тривалість імпульсу, с;

$R_n$  – опір навантаження, Ом;

$I(t)$  – величина струму, що протікає через навантаження, А.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 28   |

Залежно від індуктивності дроселя, що згладжує струм через LC-фільтр може перестати текти до початку чергового імпульсу (тоді говорять про режим роботи з розривним струмом) або продовжувати текти, і в цьому випадку мають на увазі режим роботи з нерозривним струмом.

Якщо навантаження вимогливе до пульсацій напруги, то віддають перевагу режиму нерозривних струмів, мирячись із зазвичай великими витратами дроту обмотки дроселя. Якщо величина пульсації вихідної напруги несуттєва, то доцільною є робота в режимі розривних струмів.

### Висновки до 1 розділу

Отже, в даному теоретичному розділі було проведено огляд існуючих стабілізаторів струму для живлення світлодіодів. Наведено загальні показники потужних світлодіодів. Розглянуто будову та типи світлодіодів. Визначено, що найкращим джерелом постійного струму є імпульсний стабілізатор. Ціна такого драйвера вища, ніж у інших рішень, але точність у широкому діапазоні навантажень знаходиться в межах 3%, а ефективність перетворення перевищує 96%, це означає, що тільки 4% енергії витрачається марно і пристрій може працювати при високих температурах довкілля.

Визначено, що найкращим джерелом постійного струму є імпульсний стабілізатор. Ціна такого драйвера вища за інші рішення, але точність у широкому діапазоні навантажень знаходиться в межах 3%, а ефективність перетворення становить понад 96%, а це означає, що лише 4% енергії витрачається даремно і пристрій може працювати при високих температурах навколишнього середовища.

Проведено порівняння лінійних та імпульсних стабілізаторів. Лінійні стабілізатори діють за принципом резистора: обмежують струм, що протікає

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 29   |

через ключовий елемент (транзистор) так, щоб напруга (або струм) у навантаженні залишалися постійними. Схема керування сучасних імпульсних джерел збирають з урахуванням спеціалізованих мікросхем. Вони порівняно дешеві, мають чудові характеристики і практично не вимагають підключення зовнішніх елементів і копіткої настройки.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 30   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

## 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМ СТАБІЛІЗАТОРА СТРУМУ

### 2.1 Структурна схема стабілізатора струму

Принцип дії імпульсних стабілізаторів напруги.

У загальному випадку імпульсний стабілізатор складається з імпульсного перетворювача, що містить регулюючий прилад; задає генератора, керуючого перетворювачем; фільтра, що згладжує, зменшує пульсації вихідної напруги, та пристрої порівняння, що виробляє різницевий сигнал між вихідним та опорним напругою.

З'єднання основних блоків відображено на структурній схемі стабілізатора імпульсного струму, що показана на рисунку 2.1.

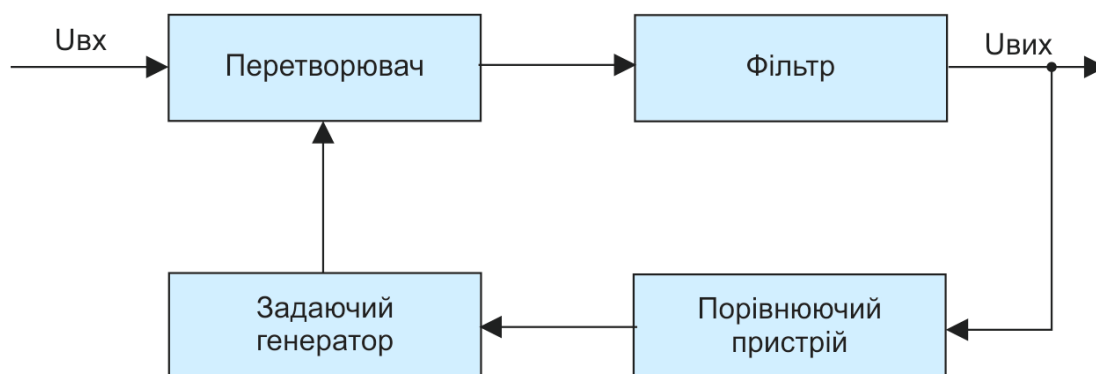


Рисунок 2.1 – Імпульсний стабілізатор напруги

Вихідну напругу стабілізатора подають на пристрій порівняння із зразковою напругою і на виході пристрою отримують сигнал, пропорційний різниці цих напруг. Різновидний сигнал відразу ж подають на генератор, що задає, або спочатку збільшують його підсилювачем постійного струму.

При ШІ-регулюванні в генераторі, що задає, аналоговий різницевий сигнал перетворюють на імпульси з фіксованою частотою і тривалістю, що змінюється, а при ЧІ-регулюванні тривалість імпульсів постійна, а залежно від параметрів сигналу змінюють частоту імпульсів, що генеруються.

Вироблені генератором, що задає, імпульси керування надходять на компоненти перетворювача, що регулює транзистор якого працює у ключовому режимі. Варіюючи частоту чи ширину імпульсів генератора можна змінювати напругу на навантаженні. В залежно від параметрів імпульсів керування, перетворювач коригує величину вихідної напруги, стабілізуючи її. Теоретично в стабілізаторах з ШІ- та ЧІ-регулюванням пульсації напруги на навантаженні можуть бути повністю відсутніми.

При релейній стабілізації сигнал керує перетворювачем напруги, що виробляється тригером. При подачі постійного напруги на вхід стабілізатора ключовий транзистор перетворювача відкритий і зростає вихідна напруга. Пристрій порівняння виробляє різницевий сигнал, який, досягаючи певного верхнього порога, змінить стан тригера, і він перемкне регулюючий транзистор у стан відсічення. Вихідна напруга стабілізатора розпочнеться знижуватися.

При досягненні нижнього порога пристрій порівняння виробляє різницевий сигнал, який знову переключить тригер, та регулюючий транзистор увійде до стану насичення. Напруга на навантаження стабілізатора почне зростати. Таким чином, при релейній стабілізації вихідна напруга постійно флюктує, та її середня значення відповідає номінальній напрузі. Поріг спрацьовування тригера встановлюють коригуванням амплітуди напруги на виході пристрої порівняння.

Релейні стабілізатори мають більш високу швидкодію порівняно зі стабілізаторами з ШІ- та ЧІ-регулюванням, що є гідністю. Теоретично при

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 32   |

релейній стабілізації завжди у вихідному Напрузі будуть присутні пульсації, що відносять до недоліків.

## 2.2 Огляд мікросхеми MP2481 стабілізатора струму для потужних світлодіодів

Імпульсні керовані стабілізатори струму MP2481 фірми Monolithic Power призначені для живлення потужних світлодіодів стабілізованим струмом до 1.2 А в умовах зміни напруги живлення в широких межах – 4,5 - 36В (MP2481 -36В, 1,2А, 1,4 MHz (MP2481 - 36V) 1.2 А, 1.4 MHz White LED Driver Buck/Boost Halogen Replacement. В залежно від поточного значення напруги живлення стабілізатор автоматично вибирає режим зниження або підвищення напруги. В приладі передбачена можливість керування стабілізованим струмом.

Переважна сфера застосування – світлодіодні освітлювальні прилади зі стабілізацією яскравості випромінювання та можливістю керування нею, наприклад, панелі світлодіодного підсвічування, у тому числі в комп'ютерних моніторах, ноутбуках, цифрових фотоапаратах та відеокамерах, приладах супутникової навігації, мультимедійних плеєрах. Стабілізатор MP2481 забезпечує стабільну яскравість світлодіодів, що живляться незалежно від напруги хімічних джерел струму, що знижується.

Мікросхеми MP2481 випускають у восьмививідному пластмасовому корпусі MSOP8 (рисунок 2.2), призначеному для поверхневого монтажу; виводи плоскі луджені. Виводи мікросхеми представлена в таблиця 2.1.

Спрощена функціональна схема приладу показана на рисунку 2.3. Мікросхема містить пристрій керування яскравістю навантажувальних світлодіодів DA1, тактовий генератор G1, формувач пилкоподібного напруги DA2, суматор DA3, підсилювач сигналу помилки DA4, компаратори DA5-DA7,

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 33   |

RS-тригер DD1, джерела зразкового напруги трьох значень G2-G4, стабілізатор напруги DA8, буферний підсилювач DA9, потужний n-канальний перемикач польовий комутуючий транзистор VT1 (шунт RS1 – датчик струму навантаження, диференціальний підсилювач DA10).

Таблиця 2.1 – Виводи мікросхеми

| Номер виводу | Позначення | Функціональне призначення                   |
|--------------|------------|---|
| 1            | Vdd        | Плюсовий вивід живлення                     |
| 2            | Vss        | Мінусовий вивід живлення; загальний вивід   |
| 3            | OVP        | Вхід сигналу ОС по вихідному                |
| 4            | FB         | Вхід сигналу ОС за струмом навантаження     |
| 5            | EN/DIM     | Вхід сигналу керування струмом навантаження |
| 6            | INGND      | Загальний вивід для входу                   |
| 7            | BST        | Вхід вольтодобавки                          |
| 8            | SW         | Вихід (до початку комутованого транзистора) |

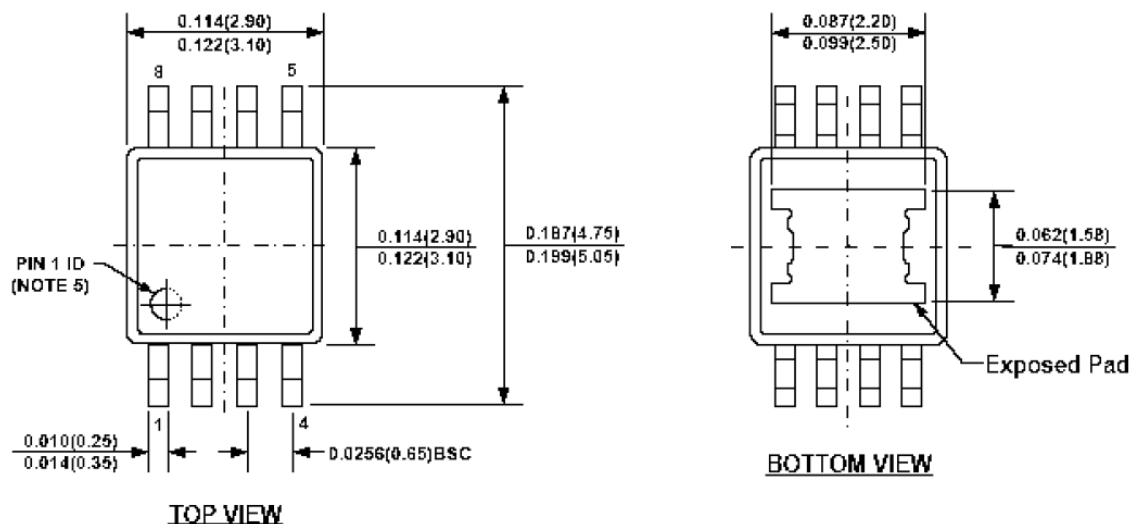


Рисунок 2.2 – Восьмививідний пластмасовий корпус MSOP8

Для роботи імпульсного стабілізатора струму необхідний зовнішній дросель, який накопичує енергію, коли транзистор VT1 відкритий, і віддає її в навантаження, коли цей транзистор закритий. Після включення живлення пульси тактового генератора G1 встановлюють тригер DD1 в одиничний стан. Транзистор VT1 відкривається та пропускає струм у зовнішній дросель, який у цей час накопичує магнітну енергію.

Транзистор VT1 відкритий до того часу, поки тригер DD1 перебуває у цьому стані. Тригер DD1 перемикається, коли напруга на вході FB, що надходить із датчика струму навантаження, перевищить 0,2 В. Так стабілізується струм через світлодіоди. Також тригер DD1 переключується в нульовий стан сигналом перевищення напруги на вході OVP, сигналом з формувача пілкоподібної напруги DA2, сигналом з виходу диференціального усилителя DA10, якщо струм стоку транзистора VT1 перевищить 2 А.

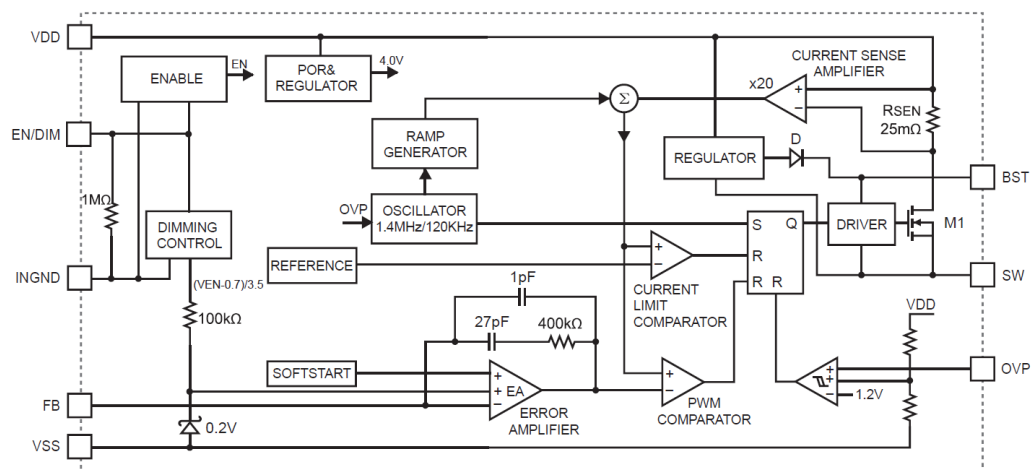


Рисунок 2.3 – Спрощена функціональна блок схема приладу

Керують стабілізатором MP2481 подачею напруги на вивід OVP щодо загального виводу V<sub>SS</sub>. Якщо ця напруга менше 0,4 В, тактовий генератор виробляє знижену частоту 120 кГц. Нормальному режиму роботи приладу

відповідають межі 0,4...1,23 В. З перевищенням верхньої межі стабілізатор відключається, транзистор VT1 закривається. Напруга ОС на вхід OVP подають із резистивного діляника вихідної напруги блоку живлення, у складі якого працює стабілізатор MP2481.

Типова схема включення стабілізатора MP2481 у режимі зниження напруги показано на рисунку 2.4. Тут L1 - накопичувальний дросель, VD1 перемикальний діод Шотки, C3 – конденсатор, що згладжує, C2 – конденсатор вольтодобавки, EL1 – навантаження – потужний світлодіод (їх може бути кілька, з'єднаних послідовно), резистор R1 – датчик струму навантаження. Опір резистора R1 підібраний для стабілізації струму на рівні 1 А. Коло R2R3 – резистивний діляник, призначений для відключення стабілізатора у разі перевищення напруги живлення.

Коли перемикальний транзистор стабілізатора відкритий, діод VD1 закритий, через дросель L1 і світлодіод EL1 тече лінійно збільшується струм. Дросель L1 накопичує магнітну енергію. Як тільки падіння напруги на струмі – резисторі R1 – перевищить 0.2 В, транзистор закривається, діод VD1 відкривається і струм через світлодіод EL1 підтримує енергію, що накопичена дроселем L1. Через елементи L1, VD1, EL1 тече струм, що лінійно зменшується.

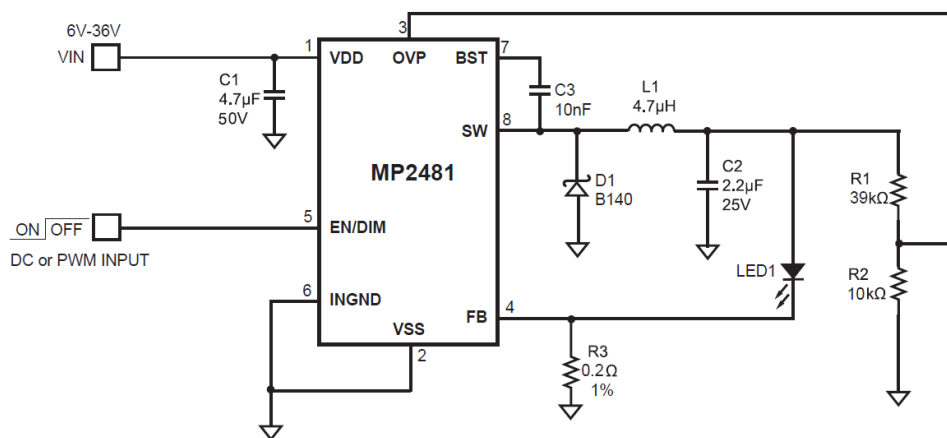


Рисунок 2.4 – Типова схема включення стабілізатора MP2481

У момент, коли цей струм зменшується на  $\Delta I$ , транзистор знову відкривається та описані процеси повторюються. Опір резистора  $R_1$  (Ом) розраховують за такою формулою:

$$R_1 = \frac{0.2B}{I} \quad (2.1)$$

де  $I$  – струм через навантаження, А.

Максимальний струм через дросель  $L_1$  дорівнює:

$$I_{\max} = I + \frac{\Delta I}{2} \quad (2.2)$$

Струм через дросель не повинен зменшуватися до нуля. Рекомендоване значення його пульсацій

$$\Delta I = 0.3I_{\max} \quad (2.3)$$

Максимально допустиме значення струму через дросель  $L_1$ , не викликає насичення його магнітопроводу та зменшення індуктивності, має бути більше  $I_{\max}$  не менше ніж на 25%.

Індуктивність дроселя  $L_1$  (мкГн) розраховують за такою формулою:

$$L_1 = \frac{U_{\text{вих}}(U_{\text{жс}} - U_{\text{вих}})}{U_{\text{жс}} \cdot \Delta I \cdot f} \quad (2.4)$$

де  $U_{\text{жс}}$  – мінімальна напруга живлення, В;

$U_{\text{вих}}$  – вихідна напруга (сумарна напруга на світлодіодах та резисторі  $R_1$  - датчика струму) В;

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 37   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

$\Delta I$  – пульсація струму через дросель  $L_1$ , А;

$f$  – частота комутації перемикального транзистора стабілізатора, МГц.

Фірма-виробник мікросхем MP2481 рекомендує вибирати індуктивність дроселя  $L_1$  в межах 3,3... 10 мкГн. Якщо обчислене за формулі (2.3) значення перевищує 10 мкГн, необхідно обмежити індуктивність цим значенням та відповідним чином змінити  $U_{жс}$  та  $\Delta I$ .

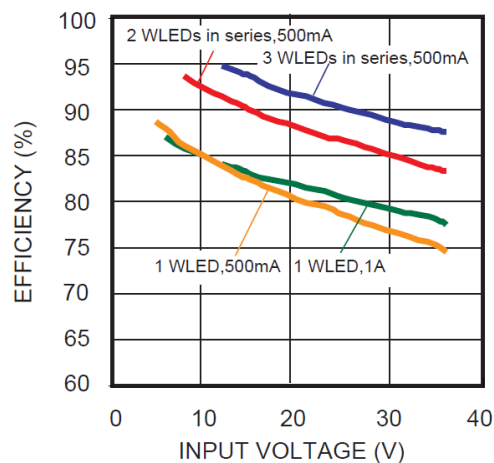


Рисунок 2.5 – Залежність ККД стабілізатора від напруги живлення

На рисунку 2.5 зображено залежність ККД стабілізатора від напруги живлення для випадків:

- один світлодіод, струм 0,5 А (крива 1);
- один світлодіод, струм 1 А (крива 2);
- два світлодіоди, струм 0,5 А (крива 3);
- три світлодіоди, струм 0,5 А (крива 4).

ККД зменшується при збільшенні напруги живлення та зростає з збільшенням числа світлодіодів.

Характеристика керування яскравістю світлодіода змінного струму через нього (для випадку кривої 2 на рисунку 2.5) представлена на рисунку 2.6.

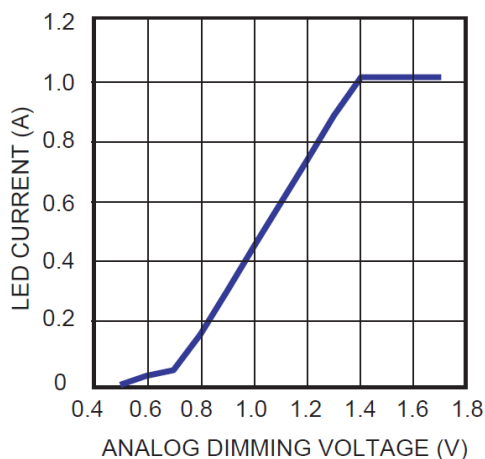


Рисунок 2.6 – Характеристика керування яскравістю світлодіода змінного струму

Керуючу напругу подають на виводи 5 та 6 мікросхеми. При 0,7 і 1,4 на характеристиці видно характерні злами, між якими залежність практично лінійна. Саме ця ділянка характеристики рекомендується використовувати практично. В області малого струму (близько 5% від максимального) характеристика різко нелінійна, так як зменшення керуючої напруги нижче 0,7 В призводить до відключення мікросхеми.

Якщо потрібна лінійність характеристики керування від нуля до максимального струму, рекомендується керування прямокутними імпульсами, які подаються на ці виводи. Низький рівень імпульсів повинен відповідати лівій точці зламу характеристики на рисунку 2.7 (0.7 В), а високий - правої (1,4 В). Частота імпульсів має бути не більше 100 –1000 Гц. Залежність середнього струму через світлодіод від коефіцієнта наповнення періодів імпульсами практично лінійна (рисунок 2.7)

Якщо яскравість не падає до нуля, то при точному регулюванні пристрою зменшують низький рівень імпульсів нижче 0,7 В, але не нижче напруги відключення мікросхеми, яке повинно бути заздалегідь виміряне. Ця напруга

відповідає різкому зменшенню споживаного мікросхемою струму зі зняттям характеристики (див. рисунок 2.6) у бік зменшення керуючої напруги.

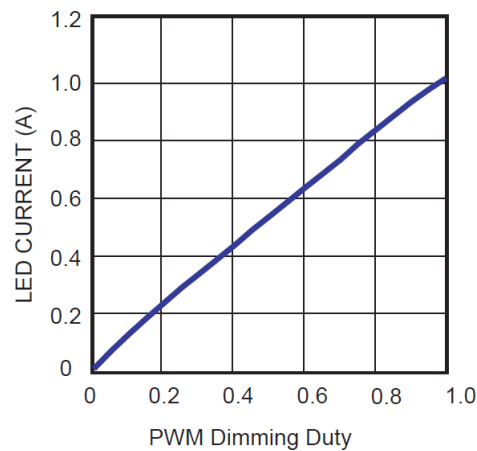


Рисунок 2.7 – Залежність середнього струму через світлодіод від коефіцієнта заповнення

Високий рівень імпульсної керуючої напруги може бути вище 1,4 В – це не впливає на характеристику керування, але цей рівень повинен бути нижчим за максимально допустиму напругу 6 В. На практиці достатній високий рівень імпульсної напруги 1,5...2 В. Така ж постійна напруга подається на вихід EN/DIM, якщо керування цим виходом не використовується.

Інша типова схема включення стабілізатора MP2481 для роботи в режимах підвищення та зниження напруги показана на рисунку 2.8. Її відмінність від попередньої схеми в тому, що мінусовий провід живлення з'єднується не з виводом стабілізатора  $U_{ss}$ , а з верхнім за схемою виводом накопичувального дроселя L1. Коли перемикальний транзистор стабілізатора відкритий, наростаючий струм тече через дросель L1 до мінусового виводу живлення, через світлодіоди він не протікає.

Тільки після закривання транзистора та відкривання діода Шотки VD1 накопичена дроселем L1 магнітна енергія витрачається на живлення світлодіодного кола з N світлодіодів (EL1-ELN). Тому ККД цього блоку дещо

менше, ніж попереднього. Падіння напруги у колі світлодіодів може перевищувати напругу живлення.

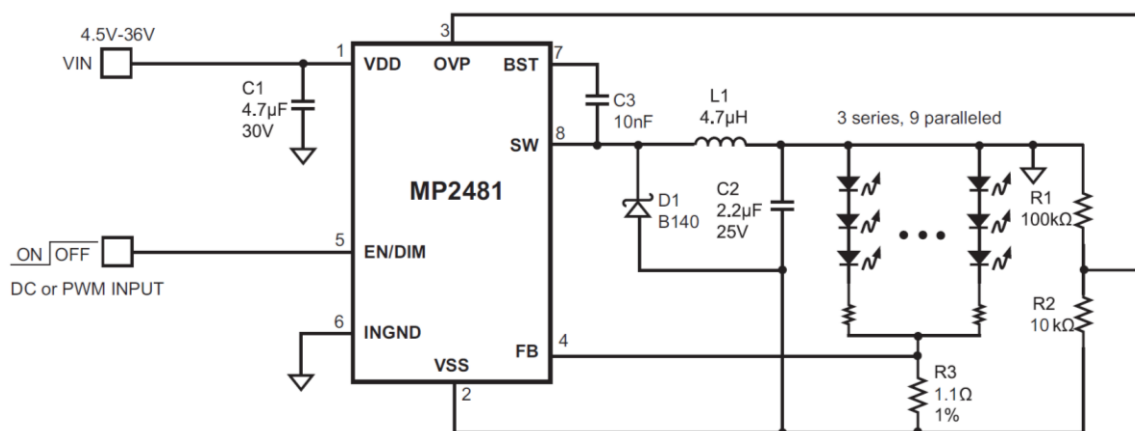


Рисунок 2.8 – Інша типова схема включення стабілізатора MP2481

Залежність ККД від напруги живлення цього блоку показана на рисунку 2.9:

- крива 1 – відповідає живленню чотирьох світлодіодів зі струмом 400 мА;
- крива 2 – відповідає трьом світлодіодам зі струмом 400 мА;
- крива 3 – відповідає 27 світлодіодам – 9 паралельно з'єднаних кіл по три послідовно, плюс вирівнюючий резистор у кожному. Загальний споживаний струм – 180 мА.

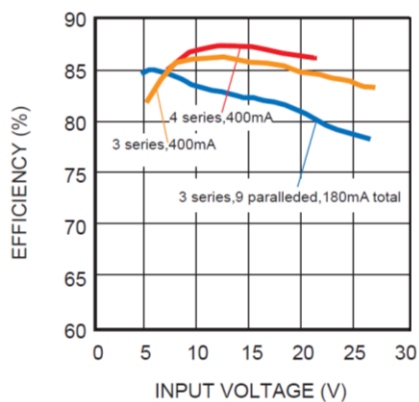


Рисунок 2.9 – Залежність ККД від напруги живлення

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

Опір вирівнюючих резисторів у першоджерелі не вказано. Для кривої 3, що на рисунку 2.10, зображена залежність струму через світлодіоди від постійної керуючої напруги, а на рисунку 2.11 – середнього струму через них від коефіцієнта заповнення для імпульсного керування яскравістю. Легко помітити, що ці залежності подібні показаним на рисунку 2.6 та 2.7 відповідно.

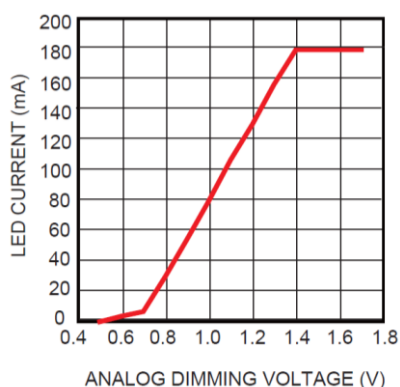


Рисунок 2.10 – Залежність струму через світлодіоди від постійної керуючої напруги

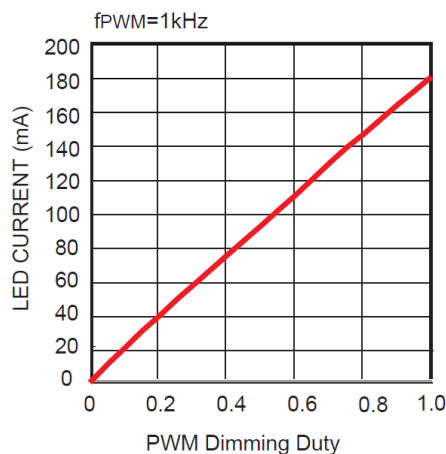


Рисунок 2.11 – Залежність середнього струму через світлодіоди від коефіцієнта заповнення для імпульсного керування яскравістю.

Індуктивність дроселя L1 для схеми включення на рисунку 2.8 розраховують за формулою:

$$L_1 = \frac{-U_{вих} \cdot U_{жс}}{(U_{жс} - U_{вих}) \cdot \Delta I \cdot f} \quad (2.5)$$

Позначення та розмірності ті самі, що й у формулі (2.4). Знак «мінус» перед  $U_{вих}$  поставлений тільки тому, що ця напруга має негативну полярність по відношенню до загального дроту. Рекомендовані межі індуктивності дроселя L1 – 3,3..22 мкГн. Якщо розрахункова індуктивність виходить за вказані межі, то необхідно змінити параметри  $U_{жс}$  та  $\Delta I$ .

Якщо потрібно тільки підвищення напруги, схема включення стабілізатора може бути тією ж, що показана на рисунку 2.8, але опір резистора R2 необхідно змінити. Наприклад, для випадку живлення описаного вище кола з 27 світлодіодів від батареї напругою 4,5...9 В резистор R2 замінюють іншим, опором 39 кОм. У загальному випадку резистор R2 підбирають так, щоб стабілізатор відключався при необхідній максимальній напрузі живлення.

Опір RL накопичувального дроселя L1 на постійному струмі має перевищувати 0,2 Ом. Фірма-виробник стабілізаторів рекомендує застосування дроселів поверхневого монтажу, параметри яких вказані у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри дроселів поверхневого монтажу

| Фірма             | Позначення   | Ом    | Макс. струм, А | Розміри, мм     |
|-------------------|--------------|-------|----------------|-----------------|
| Toko              | A921CY-4R7M  | 0.027 | 1.66           | 6 x 6.3 x 3     |
| Sumida            | CDRH4D28C/LD | 0.036 | 1.5            | 5.1 x 5.1 x 3   |
| Würth Electronics | 7440530047   | 0.038 | 2.0            | 5.8 x 5.8 x 2.8 |

Ці дроселі задовольняють усім вимогам сумісності з стабілізаторами MP2481. Номінальна індуктивність всіх дроселів – 4,7 мкГн. Конденсатори повинні мати низьку ЕПС (еквівалентний послідовний опір) та практичну незалежність ємності від температури. Цим умовам відповідають конденсатори з діелектриком із кераміки X5P або X7R. Конденсатори та резистор R1 датчик струму – повинні бути змонтовані якомога ближче до виводів мікросхеми DA1.

### 2.3 Вибір елементної бази

#### Індуктивність

Індуктивність обмежує динаміку зміни струму на виході драйвера і таким чином визначає величину високочастотних пульсацій струму у світлодіодах. Значне перевищення струму у світлодіодах над середнім значенням призводить до швидкої деградації кристала світлодіода та знижує ресурс роботи світлодіода. Особливо сильні пульсації здатні вивести світло діод з ладу з допомогою імпульсного пробою. Тому на етапі проектування необхідно обмежити рівень пульсацій на виході драйвера на безпечний для світлодіодів рівень. Обмежимо рівень пульсації величиною 30% від середньої величини струму  $I_{LED\_AV}$  ( $I_{LED\_AV}$  – номінальний струм на виході драйвера):

$$I_{LED\_MAX} - I_{LED\_MIN} = 30\% \cdot I_{LED\_AV}$$

Для підтримки обраного рівня пульсацій струму у світлодіодах (30%) потрібно використовувати індуктивність наступного номіналу:

$$L = I_{LEDx} \cdot t_{of\ f} / (30\% \cdot I_{LED\_AV})$$

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 44   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

При цьому пікове значення струму в індуктивності, нормоване кожного окремо взятого індуктора, відповідає  $I_{LED\_AV}$  і може бути визначено за формулою:

$$I_L = I_{LED\_AV} \cdot (1 + 0.5 \cdot 30\%).$$

На даному етапі важливо визначити доступність для замовлення індуктора отриманими параметрами, а також його габаритні розміри та вартість. Якщо необхідний індуктор недоступний, дорогий або дуже великий, необхідно провести корекцію зазначеного вище розрахунку. Намагатися застосовувати рекомендовану індуктивність доцільно лише у разі безуспішності корекції розрахунків.

Струмовимірювальний резистор  $R_1$

Працюючи від вбудованого джерела 250 мВ (без використання входу LD) величина пікового значення струму у світлодіодах, що обмежується драйвером, визначається номіналом резистора  $R_{SENSE}$ :

$$I_{LED\_max} = 250 / R_{SENSE}.$$

Вибравши рівень пульсацій на виході драйвера (30%), можна визначити величину пікового струму на виході драйвера:

$$I_{LED\_max} = I_{LED\_AV} \cdot (1 + 0.5 \cdot 30\%)$$

Необхідний середній струм на виході драйвера ( $I_{LED\_AV}$ ) дозволяє визначити номінал резистора  $R_{SENSE}$  у схемі драйвера:

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 45   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

$$R_{SENSE} = 250 / I_{LED\_max}$$

Потужність, що виділяється на датчику струму, може бути оцінена величиною:

$$P_{SENSE} = I_{LED\_AV} \cdot R_{SENSE} \cdot D.$$

Вхідний фільтруючий конденсатор

Вхідна постійна напруга прикладається до вхідного конденсатора, номінал ємності якого  $C_{BULK}$  вибирається виходячи з мінімального значення випрямленої напруги та потужності, споживаної драйвером із зовнішньої мережі живлення:

$$C_{BULK} = \frac{P_{AC}}{F_{AC}} \cdot dV \cdot dV,$$

де

$$dV = V_{BULK\_min} - (1.414 \cdot V_{AC\_min}).$$

При цьому рівень споживаної з мережі живлення  $P_{AC}$  визначається як сума потужностей втрат у драйвері та потужності, що віддається у світлодіоди. Потужність втрат складається з втрат транзисторі, дроселі, зворотному діоді та резисторах, а також потужності, споживаної мікросхемою MP2481.

Мінімальна напруга  $V_{AC\_min}$  визначається технічним завданням на драйвер (нижній поріг напруги живлення драйвера), а  $F_{AC}$  – номінальна частота змінного струму в мережі живлення.

Напруга  $V_{BULK\_min}$  – сума напруги на виході драйвера і падінь напруг на вимірювальному резисторі, відкритому транзисторі та дроселі.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 46   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

Другим параметром, що визначає вибір конденсатора, є номінальна напруга фільтруючого конденсатора.

Необхідно пам'ятати, що електролітичні конденсатори мають паразитні параметри найбільш важливий з яких –  $E_{SR}$ , або еквівалентний послідовний опір який призводить до нагрівання конденсатора при протіканні імпульсних струмів. При виборі конденсатора необхідно переконатися в тому, що він витримуватиме максимальний імпульсний струм при максимальній температурі, а його параметр  $E_{SR}$  стабільний у необхідному діапазоні частот (від 120 Гц до 100 кГц).

Ефективна послідовна індуктивність ( $E_{SL}$ ) – інший паразитний параметр, що обмежує ефективність електролітичного конденсатора на високих частотах. Комбінація значень  $E_{SR}$  в потрібному діапазон температур та наявність великого  $E_{SL}$  можуть вимагати додаткового паралельного включення танталового конденсатора, який усуватиме високочастотні викиди напруги. При цьому знижується вплив  $E_{SL}$  у всьому температурному діапазоні.

#### Вибір діода

Максимальна напруга на діоді VD дорівнює напрузі на вході схеми. Для збільшення надійності необхідно забезпечити запас у 50%:

Робоча напруга на діоді відповідає максимальному напруги на виході драйвера із запасом 50%, а середнє значення струму через діод залежить від шпаруватості D і від середнього струму у світлодіодах. Рекомендується вибирати діод із трикратним запасом потоку [20].

#### 2.4 Вибір вхідного пристрою живлення драйвера

У паузах між напівперіодами випрямленої мережевої напруга живлення світлодіодів відсутня, що призводить до їхнього мерехтіння. Зображена на

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 47   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

рисунку 2.12 схема демонструє приклад використання безіндуктивного ключового джерела живлення як джерела живлення драйвера світлодіодів. Зроблена з доступних компонентів без індуктивностей на вихідному боці, схема не вимагає високовольтних конденсаторів, працює від змінної напруги 120 або 230 В, розсіює мінімальну потужність та дозволяє регулювати вихідну напругу.

Робота схеми заснована на керуванні кутом провідності MOSFET транзистор VT2. Коли випрямлена змінна напруга нижче задається стабілітроном D1 високого порога  $V_{TH}$ , послідовний прохідний транзистор вмикається. Після цього накопичувальний конденсатор C2 починає заряджатися через навантаження, а прохідний транзистор вимикається.

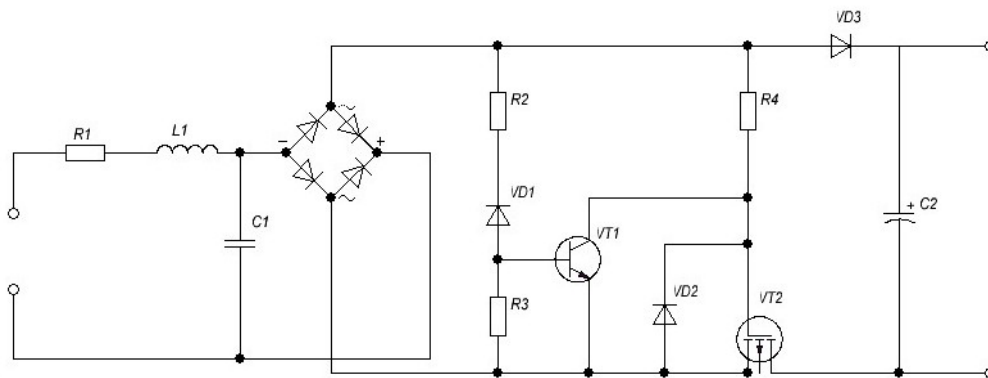


Рисунок 2.12 – Вхідний пристрій живлення драйвера

Вихідна напруга схеми падатиме поки випрямлена змінна напруга залишатиметься нижчою від вихідної напруги (рисунку 2.13). Тривалість спаду вихідного напруги визначається струмом навантаження та ємністю конденсатора C2. Ключ відкривається лише за низької напруги, завдяки чому потужність, що розсіюється на ньому, невелика. Під час наростання синусоїдальної напруги вихідний конденсатор заряджається.

Резистор-запобіжник R1 захищає схему та обмежує кидки струму при першому вмиканні змінної напруги. 15-вольтовий стабілітрон D2 обмежує напругу на затворі VT2 та колекторі VT1. Комутація струму MOSFET транзистором породжує «дзвін» між стоком і джерелом VT2, що є джерелом електромагнітних досліджень, придушити які можна за допомогою дроселя L1 та конденсатора C1. Схема непогано стабілізує яскравість світіння світлодіодів у широкому діапазоні вхідної напруги. За бажання можна додати ще декілька кіл світлодіодів.

## Висновки до 2 розділу

У другому розділі представлено розробку структурної та функціональної схем стабілізатора струму. У загальному випадку імпульсний стабілізатор складається з імпульсного перетворювача, що містить регулюючий прилад; задає генератора, керуючого перетворювачем; фільтра, що згладжує, зменшує пульсації вихідної напруги, та пристрої порівняння, що виробляє різницевий сигнал між вихідним та опорним напругою.

Проведено огляд мікросхеми MP2481 стабілізатора струму для потужних світлодіодів. Імпульсні керовані стабілізатори струму MP2481 фірми Monolithic Power призначені для живлення потужних світлодіодів стабілізованим струмом до 1.2 А в умовах зміни напруги живлення в широких межах – 4,5 - 36В (MP2481 -36В, 1,2А, 1,4 MHz (MP2481 - 36V) 1.2 A, 1.4 MHz White LED Driver Buck/Boost Halogen Replacement.

Зроблено вибір елементної бази та вхідного пристрою живлення драйвера

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 49   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

### 3 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНО-ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ СТАБІЛІЗАТОРА СТРУМУ НА ОСНОВІ МІКРОСХЕМИ MP2481

#### 3.1 Схема електрична принципова стабілізатора струму

Схема стабілізатора струму разом із вхідним стабілізатором представлена на рисунку 3.1

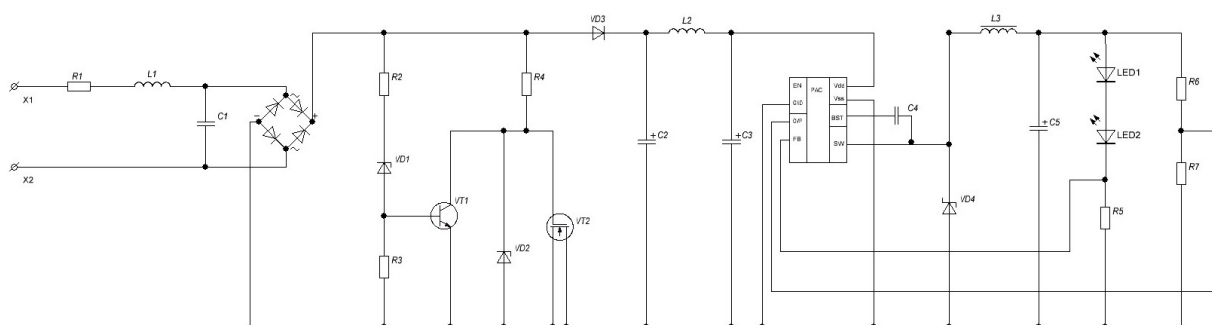


Рисунок 3.1 – Схема стабілізатора струму

#### 3.1.1 Розробка друкованої плати пристрою, що розробляється

Відповідно до технічного завдання на цей виріб зробимо розробку друкованої плати (ДП) установки. Беручи до уваги так само рекомендації ГОСТ 10317-79 щодо конфігурації друкованих плат, проєктовану друковану плату виготовлятимемо прямокутної форми з габаритними розмірами 140,0×70,0 мм.

Як матеріал основи будемо використовувати двосторонній фольгований склотекстоліт марки СФ-2-50Г-1,5 завтовшки 2 мм (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Склотекстоліт фольгований марки СФ-2-50Г-1,5 (2 мм)

Вибір цього матеріалу заснований на його широкому застосуванні та низькій вартості щодо всіх марок склотекстолітів при найбільш оптимальних електричних, хімічних та механічних характеристиках. Товщина матеріалу 2 мм цілком відповідає вимогам умов. експлуатації до механічної міцності друкованої плати.

Після формування друкованої плати її необхідно покрити сплавом «Розе» для покращення здатності до паяння та збереження електричних параметрів провідників, а також для зупинки окисних процесів. Відповідно до конструктивних та схмотехнічних особливостей розроблюваної установки, також з урахуванням результатів конструкторського аналізу установки, проводимо розміщення компонентів на друкованій платі та трасування друкованих провідників. Цю процедуру здійснюємо за допомогою програмного пакету Sprint-Layout на персонального комп'ютера.

Складальне креслення та креслення друкованої плати, що дають повне уявлення про конструкцію друкованого модуля та спосіб виготовлення друкованої плати, наведені у Додатку А.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 51   |

### 3.1.2 Вибір та обґрунтування основних параметрів друкованої плати

Вивчення та аналіз технічного завдання на розроблювальний пристрій, до складу якого входить проектована друкована плата, а також аналіз схемотехнічних рішень та загальної конструкції пристрою, дозволяє зробити вибір та обґрунтування основних параметрів розроблюваної установки.

Щільність монтажу не велика, тому, друковану плату, можливо виготовити по другому класу точності виконання елементів друкованого рисунка. Друкована плата 1 - 2-го класів точності прості у виконанні, надійні в експлуатації та мають мінімальну вартість, 3 - 5 класів вимагають використання високоякісних матеріалів, інструменту та обладнання.

### 3.1.3 Конструкторський розрахунок друкованої плати

Вихідними даними для конструкторського розрахунку є наступні показники:

- плата одностороння з розмірами 145,0 175,0 мм;
- матеріал основи – склотекстоліт фольгований марки СФ-2-50Г-1,5 2кл ГОСТ10316-78 товщиною 2 мм;
- резистивне покриття – олово-свинець;
- крок координатної сітки - 2,5 мм;
- точність виконання елементів конструкції друкованої плати – по другому класу;

Першому класу точності відповідають наступні мінімальні значення основних параметрів елементів конструкції друкованої плати для вузького місця:

- ширина друкованого провідника  $t' = 0,45$  мм;

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 52   |

- відстань між краями сусідніх елементів провідного рисунка  $S' = 0,45$  мм;
- відстань від краю просвердленого отвору до контактного краю площадки (гарантійний пояс)  $b = 0,20$  мм;
- відношення діаметра неметалізованого отвору до товщини друкованої плати  $\gamma^* = 0,4$ .

1) Номінальні значення діаметрів монтажних та перехідних металізованих отворів визначаються за формулою:

$$d' = d_e + r' + |\Delta d'_{H3}| \quad (3.1)$$

де  $d_e$  – максимальне значення діаметра виводу навісного елемента, встановлюваного на друковану плату;

$r'$  – різниця між мінімальним значенням діаметра отвору та максимальним значенням діаметра виводу встановлюваного елемента;

$\Delta d'_{H3}$  – нижнє граничне відхилення номінального значення діаметра отвору.

У конструкцію друкованої плати, що розробляється, входять елементи діаметрами отворів 0.45; 0.8; 1.0; 1.2.

Значення  $r'$  вибирається в межах 0,1 ÷ 0,4 мм. Відповідно до таблиці 3.2 [11], значення для металізованих отворів без оплавлення  $\Delta d'_{H3}$  друкованої плати першого класу точності становить 0,15 мм – для отворів діаметром менше 1 мм та 0,2 мм для отворів діаметром більше 1 мм.

Для паяння дротів діаметром 0,45 мм:

$$d'_3 = 0,45 + 0,2 + 0,15 = 0,5 \text{ (мм)} \quad (3.2)$$

Для паяння дротів діаметром 0,8 мм:

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 53   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

$$d_3' = 0,8 + 0,2 + 0,15 = 0,15 \text{ (мм)} \quad (3.3)$$

Для паяння дротів діаметром 1 мм:

$$d_3' = 0,1 + 0,2 + 0,15 = 1,35 \text{ (мм)} \quad (3.4)$$

Для паяння дротів діаметром 1,2 мм:

D

$$d_3' = 1,2 + 0,2 + 0,15 = 1,55 \text{ (мм)} \quad (3.5)$$

2) Найменше номінальне значення діаметра контактної площадки під обраний отвір для односторонніх друкованих плат розраховується за формулою:

$$D_{KП} = d' + \Delta d'_{BB} + 2 \cdot b' + \Delta t'_{BB} + 2 \cdot \Delta d'_{TP} + [T_{d'}^2 + T_{D_{KП}}^2 + t_{HB}^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (3.6)$$

де  $\Delta d'_{BB}$  – верхнє граничне відхилення діаметра отвору;  $\Delta d'_{BB} = 0,1 \text{ мм}$  ;

$\Delta t'_{BB}$  і  $\Delta t'_{HB}$  – верхнє та нижнє граничні відхилення діаметра контактного майданчика, відповідно.  $\Delta t'_{BB} = \Delta t'_{HB} = 0,1 \text{ мм}$  ;

$T_{d'}^2$  – позиційний допуск розташування отвору  $T_{d'}^2 = 0,15 \text{ мм}$  ;

$T_{D_{KП}}^2$  – позиційний допуск розташування центру контактного майданчика.

$T_{D_{KП}}^2 = 0,25 \text{ мм}$  для (ДП).

Для паяння дротів діаметром 0,45 мм:

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 54   |

$$D_{KIII} = 0,5 + 2 \cdot 0,1 + [0,15^2 + 0,25^2 + 0,1]^{\frac{1}{2}} = 1 \text{ мм.} \quad (3.7)$$

Для паяння дротів діаметром 0,8 мм:

$$D_{KIII} = 1,1 + 2 \cdot 0,1 + [0,15^2 + 0,25^2 + 0,1]^{\frac{1}{2}} = 1,6 \text{ мм.} \quad (3.8)$$

Для паяння дротів діаметром 1 мм:

$$D_{KIII} = 0,135 + 2 \cdot 0,1 + [0,15^2 + 0,25^2 + 0,1]^{\frac{1}{2}} = 1,85 \text{ мм.} \quad (3.9)$$

Для паяння дротів діаметром 1,2 мм:

$$D_{KIII} = 1,55 + 2 \cdot 0,1 + [0,15^2 + 0,25^2 + 0,1]^{\frac{1}{2}} = 2,05 \text{ мм.} \quad (3.10)$$

3) Найменше значення ширини провідника розраховується за формулою:

$$t' = t'_{MD} + |\Delta t'_{HB}|, \quad (3.11)$$

де  $t'_{MD}$  – мінімально допустима ширина провідника.

Враховуючи, що значення  $t'_{MD}$  для першого класу точності складає 0,75 з таблиці 3.1 [11], отримуємо:

$$t' = 0,45 + 0,1 = 0,55 \text{ мм,} \quad (3.12)$$

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 55   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

4) Номінальне значення відстані між сусідніми елементами провідного рисунка визначається за формулою:

$$S' = S'_{MD} + \Delta t'_{BB}, \quad (3.13)$$

де  $S'_{MD}$  – мінімально допустима відстань між сусідніми елементами провідного рисунка. Враховуючи, що значення  $S'_{MD}$  для першого класу точності складає 0,75, то отримуємо:

$$S' = 0,45 + 0,1 = 0,55 \text{ мм}. \quad (3.14)$$

Згідно з таблицею 3.5 [11] максимальна напруга для  $S' = 0,55$  мм складає 350 В.

5) Розрахунок мінімальної відстані для прокладання  $n$ -ї кількості провідників між двома отворами з контактними майданчиками діаметрами  $D_{KП1}$  та  $D_{KП2}$  виробляють за формулою:

$$l' = \frac{(D_{KП1} + D_{KП2})}{2} + t' \cdot n + S' \cdot (n + 1) + T'_1. \quad (3.15)$$

де  $T'_1$  – позиційний допуск розташування друкарського провідника щодо сусіднього елемента провідного рисунка.

Значення  $T'_1$  для односторонніх друкованих плат другого класу точності складає: 0,1 мм.

Таким чином для  $n = 1$  і  $D_{KП1} = D_{KП2} = 0,5$  мм отримаємо:

$$l' = 0,5 + 0,45 + 0,45 \cdot (1 + 1) + 0,1 = 1,5 \text{ мм}. \quad (3.16)$$

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 56   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

Для  $D_{КП1} = D_{КП2} = 1,15$  мм отримаємо:

$$l' = 1,15 + 0,45 + 0,45 \cdot (1 + 1) + 0,1 = 2,15 \text{ мм} . \quad (3.17)$$

Для  $D_{КП1} = D_{КП2} = 1,35$  мм отримаємо:

$$l' = 1,35 + 0,45 + 0,45 \cdot (1 + 1) + 0,1 = 2,35 \text{ мм} . \quad (3.18)$$

Для  $D_{КП1} = D_{КП2} = 1,55$  мм отримаємо:

$$l' = 1,55 + 0,45 + 0,45 \cdot (1 + 1) + 0,1 = 2,55 \text{ мм} . \quad (3.19)$$

Аналіз результатів конструкторського розрахунку друкованої плати показує, що отримані в результаті розрахункові дані цілком задовольняють топології рисунка друкованої плати.

### 3.1.4 Розрахунок електричних параметрів друкованої плати

Зі збільшенням швидкодії схем все більшого значення набувають питання зв'язку між елементами. При цьому стає необхідним визначення як параметрів ліній зв'язку (опір, ємності, індуктивності), так і ступеня їх впливу один на одного (паразитна ємність, взаємоіндукція).

Електричний опір провідників з покриттям визначається за формулою:

$$R = \frac{\rho}{h'} \sum_{i=1}^{m'} \frac{L'_i}{t'_i} . \quad (3.20)$$

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 57   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

де  $\rho$  – питомий електричний опір;  $h'$  – товщина друкованого провідника із покриттям;  $m'$  – кількість ділянок друкованого провідника, мають різну ширину;  $L'_i$  – довжина  $i$ -ої ділянки;  $t'_i$  – ширина провідника на  $i$ -ій ділянці.

1) Визначимо електричний опір провідника «землі». В цьому випадку при  $\rho = 1,72 \cdot 10^{-8}$  Ом/м,  $h' = 50 \cdot 10^{-6}$  м,  $t' = 7,5 \cdot 10^{-4}$  м  $L = 0,13$  м, отримуємо:

$$R = \frac{1,72 \cdot 10^{-8} \cdot 0,13}{50 \cdot 10^{-6} \cdot 7,5 \cdot 10^{-4}} = 0,006 \text{ Ом}. \quad (3.21)$$

Допустиму здатність навантаження по струму на елементи провідного рисунка знайдемо з умови допустимого перевищення температури доквілля. Для мідного друкарського провідника товщиною 50 мкм, шириною 0,45 мм при нагріванні на 20 °С вона становитиме 4 А. Величина допустимої робочої напруги між елементами провідного рисунка для  $S' = 0,45$  мм, згідно з ГОСТ 23751-86, дорівнює 300 В. Допустиме падіння напруги на провіднику обчислюється за формулою:

$$U = \frac{\rho \cdot L'_i}{h' \cdot t'} \cdot I, \quad (3.22)$$

де  $I$  – струм через провідник.

Струм, що протікає за даними провідниками, не перевищує 4 А, тоді:

$$U = 0,006 \cdot 4 = 0,024 \text{ В}, \quad (3.23)$$

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 58   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

Для такого типу схем допустиме падіння напруги в колах «живлення» та «сигнал» не повинно перевищувати 1 - 2% від номінального. Отримані значення задовольняють цю вимогу.

Для оцінки завадостійкості виробів електронної техніки на друкованій платі, визначають ємнісну та індуктивну складові паразитного зв'язку, які залежать від паразитної ємності  $C_{\Pi}$  між друкарськими провідниками та паразитної взаєміндукції  $M$  між ними.

2) Паразитна ємність між двома друкованими провідниками визначається за формулою:

$$C_{\Pi} = C_{\text{ПОГ}} \cdot l_{\text{ПЕР}}, \quad (3.24)$$

де  $C_{\text{ПОГ}}$  – друкована ємність зв'язку між двома провідниками,

$l_{\text{ПЕР}}$  – довжина взаємного перекриття провідників.

З графіків 3.7 (а, б) [11] визначимо друковану ємність, скориставшись співвідношенням  $S'/H = 0.225$  і  $t'/H = 0.225$ :

найбільшу довжину перекриття 90 мм, при  $C_{\text{ПОГ}} = 0,15$  пФ/мм:

$$C_{\Pi} = 0.15 \cdot 110 = 17 \text{ пФ}, \quad (3.25)$$

3) Індуктивність друкованого прямокутного провідника обчислюється за такою формулою:

$$L_{\text{ПН}} = L_{\text{ПОГ}} \cdot l_{\text{ДП}}, \quad (3.26)$$

де  $L_{\text{ПОГ}}$  - погона індуктивність плоского прямокутного провідника;

$l_{\text{ДП}}$  – довжина друкованого провідника.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 59   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

З графіків 3.8 (а, б) [11] визначимо погонну індуктивність, скориставшись співвідношенням  $S'/H = 0.225$  і  $t'/H = 0.225$ , при  $l_{ДП} = 175$  мм,  $L_{ПОГ} = 14$  нГн/мм:

$$L_{ДП} = 14 \cdot 175 = 2,5 \text{ мкГн}, \quad (3.27)$$

4) Взаємоіндукція між друкованими провідниками розраховується за формулою:

$$M_{ДП} = M_{ПОГ} \cdot l_{ПЕР}, \quad (3.28)$$

де  $M_{ПОГ}$  – погонна взаємоіндукція.

Визначимо взаємоіндукцію між провідниками, які мають найбільшу довжину перекриття, при  $M_{ПОГ} = 0,5$  нГн,  $l_{ПЕР} = 110$  мм:

$$M_{ДП} = 0,5 \cdot 110 = 55 \text{ нГн}. \quad (3.29)$$

### Висновки до 3 розділу

У третьому розділі представлено розробку електрично-принципової схеми стабілізатора струму на основі мікросхеми MP2481.

Зроблено складальне креслення та креслення друкованої плати, що дають повне уявлення про конструкцію друкованого модуля та спосіб виготовлення друкованої плати. Проведено конструкторський розрахунок та розрахунок електричних параметрів друкованої плати.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 60   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

## ВИСНОВКИ

У процесі роботи над кваліфікаційною роботою були вивчені основні параметри, характеристики та залежності напівпровідникових світловипромінюючих діодів, а також матеріали та технології для їх проектування.

На підставі проаналізованих даних та розрахованих електричних, оптичних та теплових характеристик напівпровідникових джерел оптичного випромінювання розробили схему джерела струму.

Для проектованого джерела було здійснено розрахунок елементів схеми. За результатами розрахунку було спроектовано схему джерела струму для живлення потужних світлодіодів.

Результати виконаної роботи показали, що необхідно проводити подальші дослідження в даному напрямку та рухатися шляхом удосконалення енергозберігаючих технологій на основі світлодіодів. Напрямок досить перспективний і попит на дані компоненти з кожним днем тільки зростатиме.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 61   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Світлодіоди: фізика, технологія, застосування: навч. посібник/В. І. Карась, Л. А. Назаренко, І. В. Карась; Харк. нац. акад. міськ.госп-ва – Х.: ХНАМГ, 2012, - 323 с.
2. Комп'ютерна схемотехніка : підручник / [Азаров О. Д., Гарнага В. А., Клятченко Я. М., Тарасенко В. П.]. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 230 с.
3. Світлодизайн : навч. посіб. / С. В. Чирчик. – 2-ге вид. – Київ : ДП “Вид. дім “Персонал”, 2018. – 160 с. : іл. Бібліогр. : с.154.
4. Гріффен Л. О., Чирчик С. В. Основи світлотехніки для дизайнерів: навч. посіб. / Л. О. Гріффен, С. В. Чирчик. – Чернігів: Лозовий В. М., 2012. – 184 с.
5. Зеленков І. А. Фотометрія: навч. посіб. / А. І. Зеленков. — К.: НАУ, 2003. – 212 с.
6. Назаренко Л. А. Фізичні основи джерел світла: навч. посіб. / Л. А. Назаренко. – Харків: ХНАМГ, 2009. — 206 с.
7. Рябенський В.М. Жуйков В.Я. Ямненко Ю.С. Заграничний А.В. „Схемотехніка: Пристрої цифрової електроніки». Електронний підручник для вищих навчальних закладів. – НТУУ «КПІ». – Київ, –399 с.
8. О. М. Воробйова, В. Д. Іванченко. Основи схемотехніки: підручник. – [2-е вид.]. – Одеса: Фенікс, 2009. – 388 с.
9. Смирнов В. С. Електронні імпульсні пристрої. – Київ: НТУ КПІ, 1998.- 140 с.
10. Бойко В. І., Багрій В. В. Цифрова схемотехніка. – К: ІЗМН, 2001. – 228 с.
11. Балакіреєв А. Є., Туркін А. Н. Розвиток технології нітриду галію та перспективи його застосування у НВЧ-електроніці // Сучасна електроніка// А. Є. Балакіреєв, А. Н. Туркін - 2015. № 4. С. 28-32.
12. Берг А., Дін П. Світлодіоди / пров. з англ. / А. Берг, П. Дін. - М.: Мир, 1979. - 688 з.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 62   |

13. Світлодіодне освітлення [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Режим доступу: <http://homester.com.ua/remont/svet/led-osveschenie-v-dome/>

14. Лемешев М. С. Основи охорони праці для фахівців радіотехнічного профілю : навчальний посібник / М. С. Лемешев, О. В. Березюк. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 108 с.

15. S. Li, H. Lei, Yi Wang, Md Barkat Ullah, J. Chen, V. Avrutin, U. Özgür, H. Morkoç, anRuterana, Polarity control within one monolayer at ZnO/GaN Heterointerface:(0001) pinversion domain boundary, ACS Appl. Mater. Interfaces, 10, 37651 (2018).

16. M. Adachi, InGaN based green laser diodes on semipolar GaN substrate, Jpn J. A Phys. 53, 100207 (2014).

17. "HJ Round was a pioneer in the development of the LED". [www.myledpassion.com](http://www.myledpassion.com). Archived from the original on October 28, 2020. Retrieved April 11, 2017.

18. Guo, X., Hao, X., Zheng, J., Little, C., Kholsa, S., Response of greenhouse mini-cucumber to different vertical spectra of LED lighting under overhead high pressuresodium and plasma lighting. Acta Hort. 2016. 1170, 1003–1010. <http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.129>.

19. Hasperué, J.H., Rodoni, L.M., Guardianelli, L.M., Chaves, A.R., Martínez, G.A., Use of LED light for Brussels sprouts postharvest conservation. Sci. Hortic. (Amsterdam) 2016. 213, 281–286. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.004>.

20. Hatcher M. OSRAM develops tiny thin-GaN white LED // Compound Semiconductor. April, 2005.

21. Nakamura S., Fasol G. The blue Laser Diode; GaN based Light Emitters and Lasers. Heidelberg. 1997.

22. [http://www.maxim-ic.com/solutions.cfm/cpk/75/scpk/0/pl\\_pk/0/ln/en](http://www.maxim-ic.com/solutions.cfm/cpk/75/scpk/0/pl_pk/0/ln/en).

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | КПТР.2019029.01.08 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 63   |

## Додаток А

### ЗОВНІШНІЙ ВИД ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ ПРИСТРОЮ

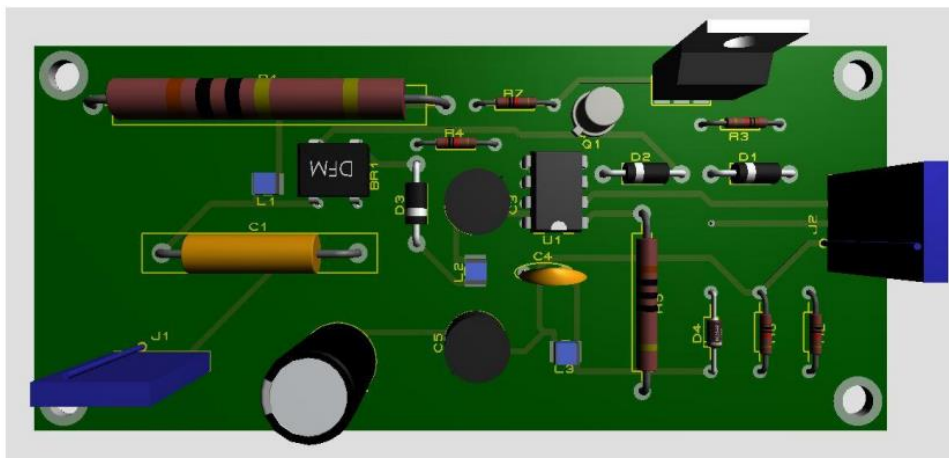


Рисунок А1 – Зовнішній вид друкованої плати з встановленими компонентами пристрою

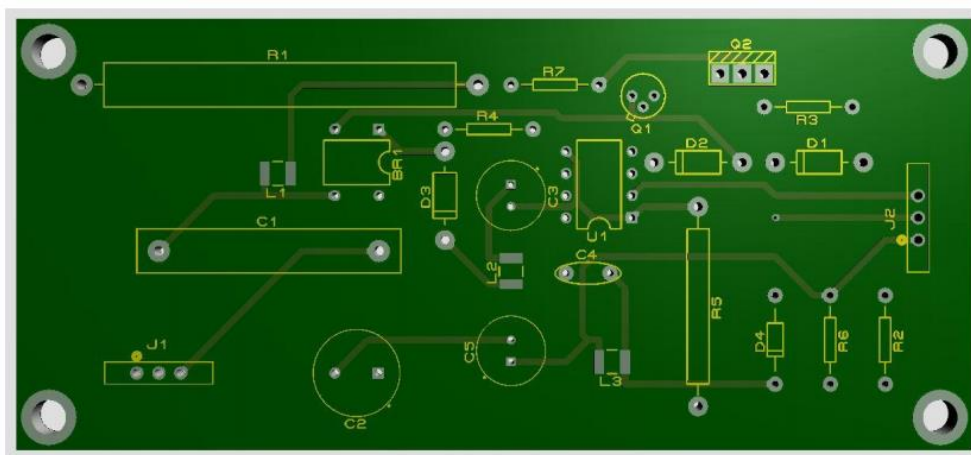


Рисунок А2 – Вигляд зверху

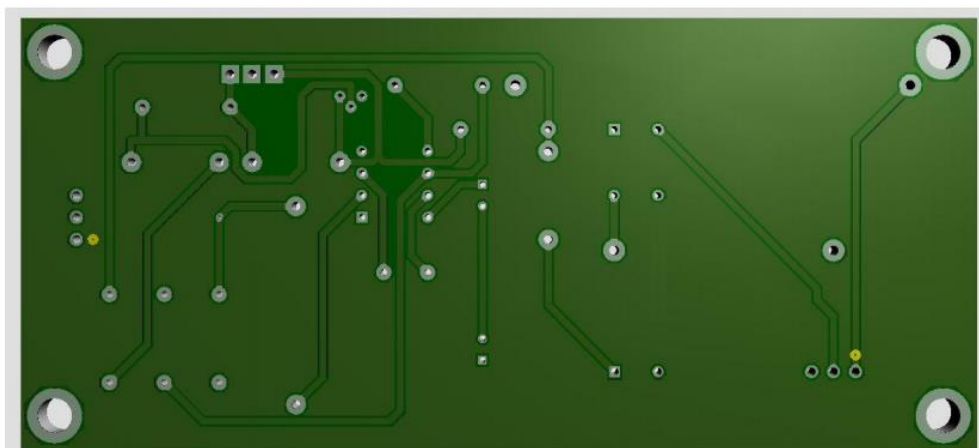


Рисунок А3 – Вигляд знизу



ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій  
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**ДРАЙВЕР ДЛЯ  
ЖИВЛЕННЯ ПОТУЖНИХ  
СВІТЛОДІОДІВ**

Виконав:  
студент групи ТР1с-19-1  
**Нестерчук О.Р.**

Науковий керівник:  
кандидат техн. наук, доцент  
**Яновицький О.К.**



2

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

**МЕТА РОБОТИ:**  
розробка драйвера для живлення потужних світлодіодів

**ВИХІДНІ ДАНІ:**

- огляд існуючих стабілізаторів струму для живлення потужних світлодіодів;
- розробка структурної і функціональної схем стабілізатора струму;
- розробка електрично-принципової схеми стабілізатора струму на основі мікросхеми MP2481

# ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ СТРУМУ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ СВІТЛОДІОДІВ

## Загальні характеристики потужних світлодіодів

Світлодіоди – LED – light emitting diodes – світловипромінювальні діоди – твердотільні напівпровідникові джерела світла.

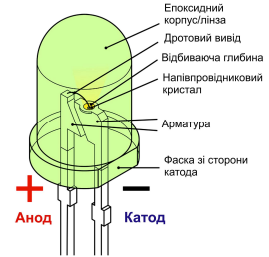


Рис. 1 – Найпоширеніша конструкція світлодіода – традиційний 5-ти мм корпус

### ЗАСТОСУВАННЯ СВІТЛОДІОДІВ:

- Освітлення автомобільних та літакових кабін;
- Освітлення панелі автомобіля та літака;
- Висвітлення запасного виходу будівлі;
- Колірно-світлове оформлення будівель;
- Промислове та зовнішнє освітлення;
- Дорожні та залізничні знаки;
- Автомобільні стоп-сигнали
- Світлодіодні матриці та відеомонітори;
- Підсвічування ЖК-монітора;
- Ліхтарика;
- Висвітлення медичного інструменту та приладів;
- Спалах цифрових камер та відео світло;

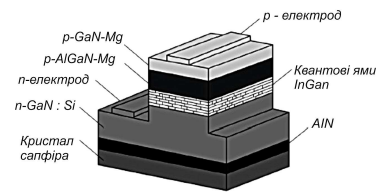
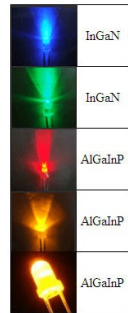


Рис. 2 – Схема світлодіода на основі гетероструктур типу InGaN/AlGaIn/GaN з множинними квантовими ямами



# ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ СТРУМУ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ СВІТЛОДІОДІВ

## Застосування світлодіодів

На сьогоднішній час існує три способи отримання білого світла за допомогою світлодіодів:

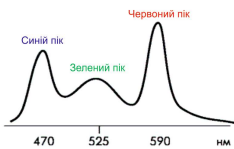
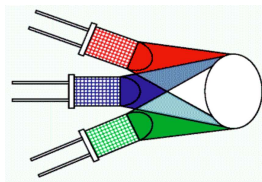


Рис. 1 – Ультрафіолетовий діод з трьома люмінофорами

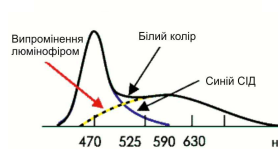
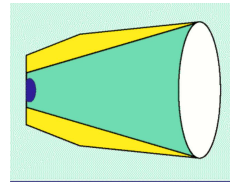


Рис. 2 – Блакитний світлодіод із жовтим люмінофором

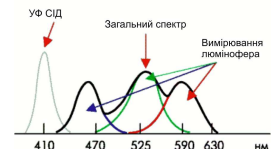
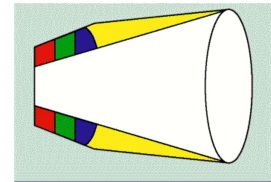


Рис. 3 – Ультрафіолетовий світлодіод та RGB-люмінофор

# ДЖЕРЕЛА СТАБІЛЬНОГО ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Керування світлодіодами постійним струмом

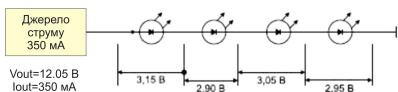


Рис. 1 – Коло світлодіодів

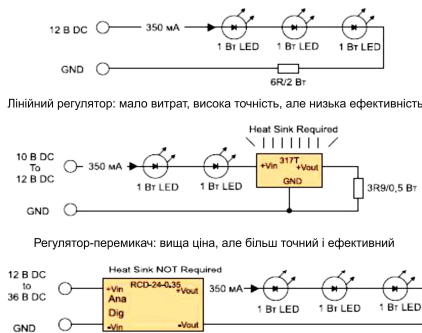


Рис. 2 – Приклади джерел стабільного струму для світлодіодів

## Види з'єднань світлодіодів

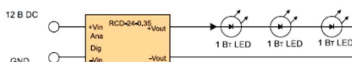


Рис. 3

**Переваги:** висока точність завдання струму, безпека при відмові.  
**Недоліки:** мала кількість випромінювачів у колі.

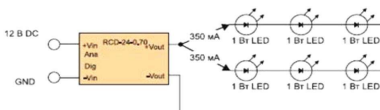


Рис. 4

**Переваги:** подвоєне число випромінювачів.  
**Недоліки:** безпека при відмові не забезпечується, незбалансованість струмів у колах.

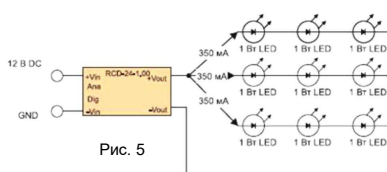


Рис. 5

**Переваги:** потрібна кількість випромінювачів.  
**Недоліки:** безпека при відмові не забезпечується, незбалансованість струмів у колі

# ТИПИ СТАБІЛІЗАТОРІВ НАПРУГИ ТА СТРУМУ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ СВІТЛОДІОДІВ

Типи стабілізаторів:

- лінійні
- імпульсні



Рис. 1 – Схема найпростішого лінійного стабілізатора струму

**Недоліки лінійних стабілізаторів:**

- низький ККД;
- великі втрати сильне нагрівання при регулюванні великих струмів
- необхідність у радіаторі для охолодження за потужності > 200-300 мВт

Через недоліки лінійних стабілізаторів застосовуються імпульсні перетворювачі та стабілізатори для живлення світлодіодів та світлодіодних модулів.

**Застосовують імпульсні стабілізатори тоді, коли:**

- навантаження споживає значний струм або потужність (більше 10...20 Вт)
- є велика різниця між вхідною та вихідною напругою (мінімум у 2...5 разів),
- навантаження порівняно нечутливе до перешкод і пульсаціям (заряджається акумулятор, лампочка, електромотор та ін.)

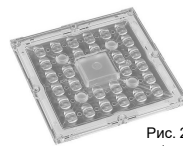


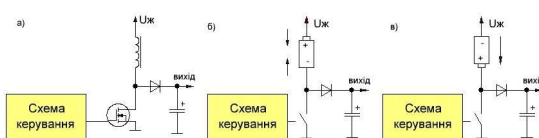
Рис. 2 – Зовнішній вигляд світлодіодного модуля та вторинної оптики

ККД ≈ 80...95%.

**Недоліки імпульсних стабілізаторів:**

- принцип дії
- Стабілізатор працює в імпульсному режимі і на досить високій частоті, тому він випромінює дуже потужні електромагнітні (радіохвилі) та електричні (пульсації напруги) перешкоди.

**Імпульсний стабілізатор складається з п'яти частин:**



- схеми керування;
- ключового транзистора;
- дроселя (котушки індуктивності);
- фільтруючих конденсаторів;
- зворотного діода, в якості якого для невеликого збільшення ККД

Рис. 3 – Схема підвищуючого перетворювача

## РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМ СТАБІЛІЗАТОРА СТРУМУ

Структурна схема стабілізатора струму

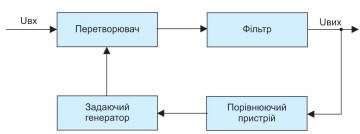
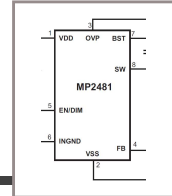


Рис. 1 – Імпульсний стабілізатор напруги

Мікросхема MP2481 стабілізатора струму для потужних світлодіодів



**MP2481**  
36V, 1.2A, 1.4MHz  
White LED Driver



### ЗАСТОСУВАННЯ MP2481

- Загальне світлодіодне підсвічування
- РК-панелі підсвічування
- Кишенькові комп'ютери
- Автомобільне внутрішнє освітлення
- Портативні мультимедійні плеєри
- Портативні GPS-пристрої

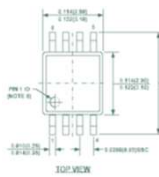


Рис. 2 – Восьмививідний пластмасовий корпус MSOP8

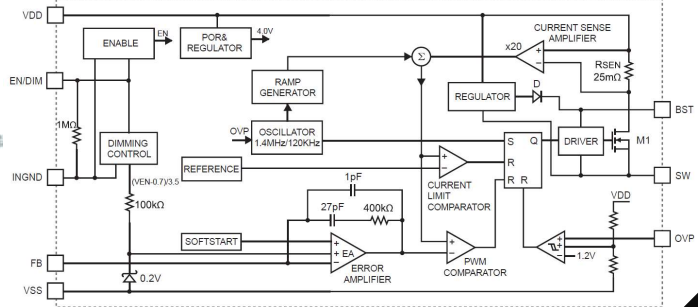


Рис. 3 – Спрощена функціональна схема приладу

## СХЕМА ВКЛЮЧЕННЯ СТАБІЛІЗАТОРА MP2481

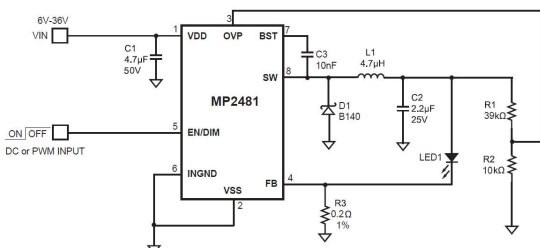


Рис. 1 – Типова схема включення стабілізатора MP2481

$$R_1 = \frac{0.2B}{I} \quad (1)$$

$$I_{max} = I + \frac{\Delta I}{2} \quad (2)$$

$$\Delta I = 0.3I_{max} \quad (3)$$

$$L_1 = \frac{U_{diss}(U_{jct} - U_{diss})}{U_{jct} \cdot \Delta I \cdot f} \quad (4)$$

Фірма-виробник мікросхем MP2481 рекомендує вибирати індуктивність дроселя  $L_1$  в межах 3,3... 10 мкГн. Якщо обчислене за формулі (3) значення перевищує 10 мкГн, необхідно обмежити індуктивність цим значенням та відповідним чином змінити  $U_{jct}$  та  $\Delta I$ .

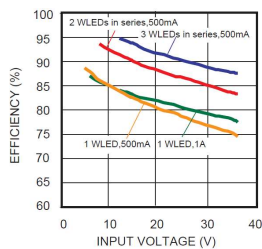


Рис. 2 – Залежність ККД стабілізатора від напруги живлення

- один світлодіод, струм 0,5 А (крива 1);
- один світлодіод, струм 1 А (крива 2);
- два світлодіоди, струм 0,5 А (крива 3);
- три світлодіоди, струм 0,5 А (крива 4)

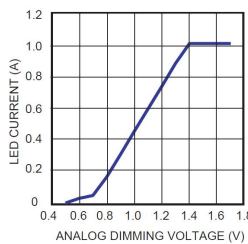


Рис. 3 – Характеристика керування яскравістю світлодіода змінного струму

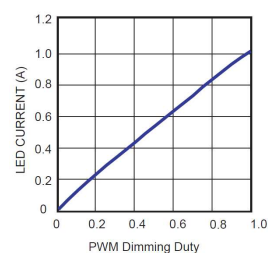
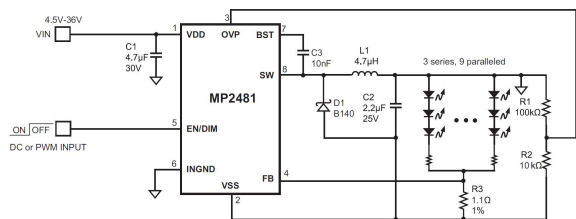


Рис. 4 – Залежність середнього струму через світлодіод від коефіцієнта заповнення

## СХЕМА ВКЛЮЧЕННЯ СТАБІЛІЗАТОРА MP2481



$$L_1 = \frac{-U_{out} \cdot U_{in}}{(U_{in} - U_{out}) \cdot \Delta I \cdot f} \quad (1)$$

Фірма-виробник мікросхем MP2481 рекомендує вибирати індуктивність дроселя  $L_1$  в межах 3,3... 10 мкГн. Якщо обчислене за формулі (3) значення перевищує 10 мкГн, необхідно обмежити індуктивність цим значенням та відповідним чином змінити  $U_{in}$  та  $\Delta I$ .

Рис. 1 – Типова схема включення стабілізатора MP2481

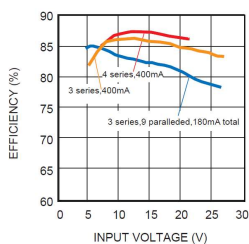


Рис. 2 – Залежність ККД стабілізатора від напруги живлення

- крива 1 – відповідає живленню чотирьох світлодіодів зі струмом 400 мА;
- крива 2 – відповідає трьом світлодіодам зі струмом 400 мА;
- крива 3 – відповідає трьом світлодіодам – 9 паралельно з'єднаних кіл по три послідовно, плюс вивірний резистор у кожному.

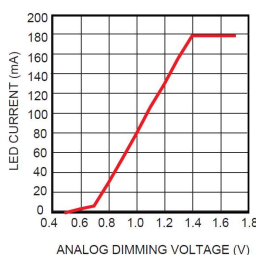


Рис. 3 – Залежність струму через світлодіоди від постійної керуючої напруги

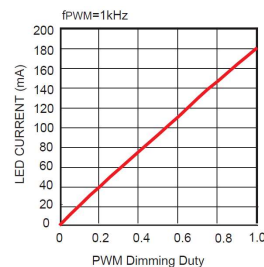


Рис. 4 – Залежність середнього струму через світлодіод від коефіцієнта заповнення

## ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ

### Індуктивність

Номинальний струм на виході драйвера:

$$I_{LED\_MAX} - I_{LED\_MIN} = 30\% \cdot I_{LED\_AV} \quad (1)$$

Для підтримки обраного рівня пульсації струму у світлодіодах (30%) потрібно використовувати індуктивність наступного номіналу:

$$L = I_{LEDx} \cdot t_{of} / (30\% \cdot I_{LED\_AV}) \quad (2)$$

При цьому пікове значення струму в індуктивності, нормоване кожного окремо взятого індуктора, відповідає  $I_{LED\_AV}$  і може бути визначено за формулою:

$$I_L = I_{LED\_AV} \cdot (1 + 0.5 \cdot 30\%) \quad (3)$$

### Струмвимірювальний резистор $R_1$

Працюючи від вбудованого джерела 250 мВ (без використання входу LD) величина пікового значення струму у світлодіодах, що обмежується драйвером, визначається номіналом резистора  $R_{SENSE}$ :

$$I_{LED\_max} = 250 / R_{SENSE} \quad I_{LED\_max} = I_{LED\_AV} \cdot (1 + 0.5 \cdot 30\%) \quad (4)$$

Необхідний середній струм на виході драйвера ( $I_{LED\_AV}$ ) дозволяє визначити номінал резистора  $R_{SENSE}$  у схемі драйвера:

$$R_{SENSE} = 250 / I_{LED\_max} \quad (5)$$

Потужність, що виділяється на датчику струму

$$P_{SENSE} = I_{LED\_AV} \cdot R_{SENSE} \cdot D \quad (6)$$

### Вхідний фільтруючий конденсатор

$$C_{BULK} = \frac{P_{AC}}{F_{AC}} \cdot dV \cdot dV \quad (7)$$

$$dV = V_{BULK\_min} - (1.414 \cdot V_{AC\_min})$$

Мінімальна напруга  $V_{AC\_min}$  визначається технічним завданням на драйвер (нижній поріг напруги живлення драйвера), а  $F_{AC}$  – номінальна частота змінного струму в мережі живлення.

Напруга  $V_{BULK\_min}$  – сума напруги на виході драйвера і падіння напруг на вимірювальному резисторі, відкритому транзисторі та дроселі.

Другим параметром, що визначає вибір конденсатора, є номінальна напруга фільтруючого конденсатора.

### Вибір вхідного пристрою живлення драйвера

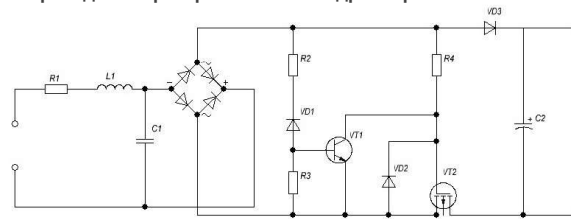


Рис. 1 – Вхідний пристрій живлення драйвера

# РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНО-ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ СТАБІЛІЗАТОРА СТРУМУ НА ОСНОВІ МІКРОСХЕМИ MP2481



**MP2481**  
36V, 1.2A, 1.4MHz  
White LED Driver

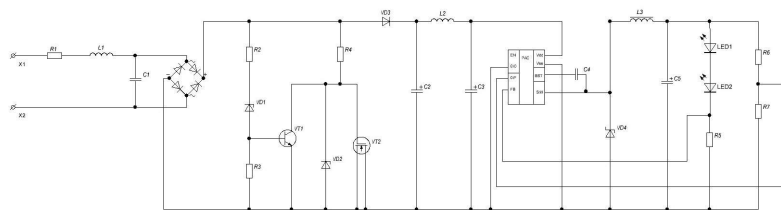
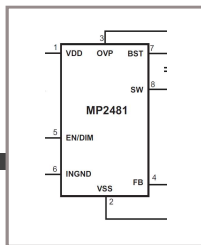


Рис. 1 – Схема стабілізатора струму

| Познач       | Назва/значення                                  | К-ть | Познач |
|--------------|---|------|--------|
| Діоди        |   |      |        |
| V01          | КВРС100S  | 1    |        |
| V02          | 1N4754A   | 1    |        |
| V03          | 1N4744  | 1    |        |
| V04          | 1N4004  | 1    |        |
| V05          | 1N4001  | 1    |        |
| Дроселі      |   |      |        |
| L1-L3        | 0,010H-600K                                     | 3    |        |
| Конденсатори |   |      |        |
| C1           | KT1-11-01 мкФ-400В                              | 1    |        |
| C2, C3       | КСО-35 220 нФ x 63 В                            | 2    |        |
| C4           | КСО-35 100 нФ                                   | 1    |        |
| C5           | КСО-35 2,2 мкФ x 25 В                           | 1    |        |
| Мікросхеми   |   |      |        |
| DA1          | MP2481  | 1    |        |
| Резистори    |   |      |        |
| R1-R12       | MF-2x1 MΩ                                       | 2    |        |
| Резистори    |   |      |        |
| R1           | 110000-25000/PE3 110000 Ω (в 5%) резистор 10 Вт | 1    |        |
| R2           | 13-4 0,05/0,25 Вт 670 Ω 39 мΩ                   | 1    |        |
| R3           | 13-4 0,05/0,25 Вт 670 Ω 10 мΩ                   | 1    |        |
| R4           | 2700M-1-30 4,70 кΩ                              | 1    |        |
| R5           | 13-4 0,05/0,25 Вт 670 Ω 10 м                    | 1    |        |
| R6, R7       | 13-4 0,05/0,25 Вт 670 Ω 100 мΩ                  | 2    |        |
| Транзистори  |   |      |        |
| V11          | BC547   | 1    |        |
| V12          | BC107   | 1    |        |

КІПР 20190110109 ПЕ.3

| № | Ім'я   | № доку | Дата | Статус |
|---|--------|--------|------|--------|
| 1 | Сидор  |        |      |        |
| 2 | Лавриш |        |      |        |
| 3 | Лавриш |        |      |        |
| 4 | Лавриш |        |      |        |

# ВИБІР ТА ОБГРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ

1) Номінальні значення діаметрів монтажних та перехідних металізованих отворів визначаються за формулою:

$$d' = d_e + r' + |\Delta d'_{ПЗ}| \quad (1)$$

Для паяння дротів діаметром 0,45 мм:  $d'_3 = 0,45 + 0,2 + 0,15 = 0,5$  мм

Для паяння дротів діаметром 0,8 мм:  $d'_3 = 0,8 + 0,2 + 0,15 = 0,15$  мм

Для паяння дротів діаметром 1 мм:  $d'_3 = 0,1 + 0,2 + 0,15 = 1,35$  мм

Для паяння дротів діаметром 1,2 мм:  $d'_3 = 1,2 + 0,2 + 0,15 = 1,55$  мм

2) Найменше номінальне значення діаметра контактної площадки під обраний отвір для односторонніх друкованих плат:

$$D_{КП} = d' + \Delta d'_{ВВ} + 2 \cdot b' + \Delta l'_{ВВ} + 2 \cdot \Delta d'_{ТР} + [T_d^2 + T_{D_{КП}}^2 + T_{НВ}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Для паяння дротів діаметром 0,45 мм:  $D_{КП} = 0,5 + 2 \cdot 0,1 + [0,15^2 + 0,25^2 + 0,1]^{\frac{1}{2}} = 1$  мм

Для паяння дротів діаметром 0,8 мм:  $D_{КП} = 1,1 + 2 \cdot 0,1 + [0,15^2 + 0,25^2 + 0,1]^{\frac{1}{2}} = 1,6$  мм

Для паяння дротів діаметром 1 мм:  $D_{КП} = 1,35 + 2 \cdot 0,1 + [0,15^2 + 0,25^2 + 0,1]^{\frac{1}{2}} = 1,85$  мм

Для паяння дротів діаметром 1,2 мм:  $D_{КП} = 1,55 + 2 \cdot 0,1 + [0,15^2 + 0,25^2 + 0,1]^{\frac{1}{2}} = 2,05$  мм

Вихідні дані для конструкторського розрахунку:

- плата одностороння з розмірами 145,0 x 175,0 мм;
- матеріал основи – склотекстоліт фольгований марки СФ-2-50Г-1,5 кл ГОСТ10316-78 товщиною 2 мм;
- резистивне покриття – олово-свинець;
- крок координатної сітки - 2,5 мм;
- точність виконання елементів конструкції друкованої плати – по другому класу;

3) Найменше значення ширини провідника:

$$l' = l'_{МД} + |\Delta l'_{НВ}| \quad l' = 0,45 + 0,1 = 0,55 \text{ мм} \quad (3)$$

4) Номінальне значення відстані між сусідніми елементами провідного рисунка

$$S' = S'_{МД} + \Delta l'_{ВВ} \quad S' = 0,45 + 0,1 = 0,55 \text{ мм} \quad (4)$$

5) Розрахунок мінімальної відстані для прокладання n-ї кількості провідників між двома отворами з контактними майданчиками діаметрами  $D_{КП1}$  та  $D_{КП2}$  виробляють за формулою:

$$l' = \frac{(D_{КП1} + D_{КП2})}{2} + l' \cdot n + S' \cdot (n + 1) + T'_l \quad (5)$$

$$l' = 0,5 + 0,45 + 0,45 \cdot (1 + 1) + 0,1 = 1,5 \text{ мм}$$

$$l' = 1,15 + 0,45 + 0,45 \cdot (1 + 1) + 0,1 = 2,15 \text{ мм}$$

$$l' = 1,35 + 0,45 + 0,45 \cdot (1 + 1) + 0,1 = 2,35 \text{ мм}$$

$$l' = 1,55 + 0,45 + 0,45 \cdot (1 + 1) + 0,1 = 2,55 \text{ мм}$$

## РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДП

Електричний опір провідників з покриттям:

$$R = \frac{1,72 \cdot 10^{-8} \cdot 0,13}{50 \cdot 10^{-6} \cdot 7,5 \cdot 10^{-3}} = 0,006 \text{ Ом} \quad R = \frac{\rho}{h'} \sum_{i=1}^m \frac{L'_i}{l'_i} \quad (1)$$

Допустиме падіння напруги на провіднику:

$$U = \frac{\rho \cdot L'_i}{h' \cdot l'_i} \cdot I \quad (2)$$

$U = 0,006 \cdot 4 = 0,024 \text{ В}$

Паразитна ємність між двома друкованими провідниками:

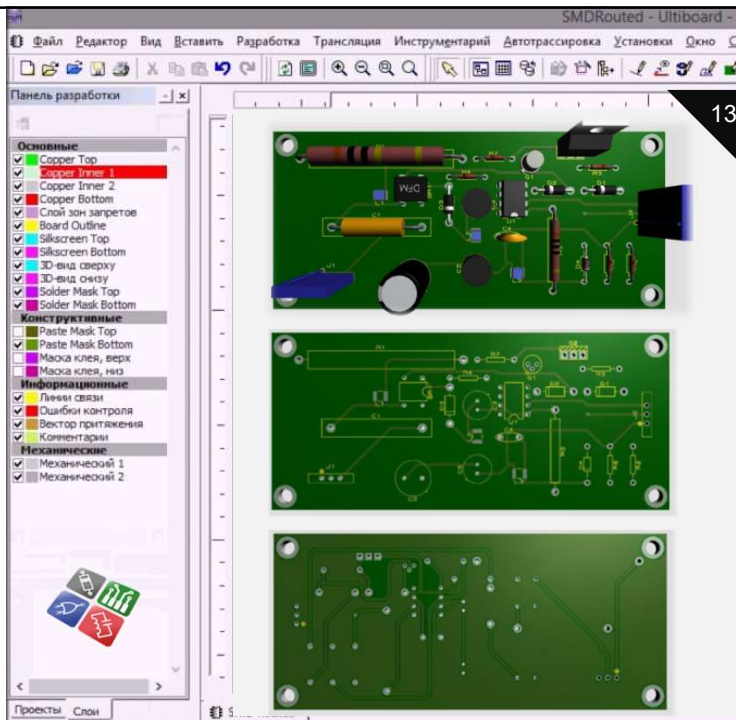
$$C_{П} = 0,15 \cdot 110 = 17 \text{ пФ} \quad C_{П} = C_{\text{ПОГ}} \cdot I_{\text{ПЕР}} \quad (3)$$

Індуктивність друкованого прямокутного провідника:

$$L_{ПН} = 14 \cdot 175 = 2,5 \quad L_{ПН} = L_{\text{ПОГ}} \cdot I_{\text{ДП}} \quad (4)$$

Взаємодія між друкованими провідниками:

$$M_{ДП} = 0,5 \cdot 110 = 55 \text{ нГн} \quad M_{ДП} = M_{\text{ПОГ}} \cdot I_{\text{ПЕР}} \quad (5)$$



13

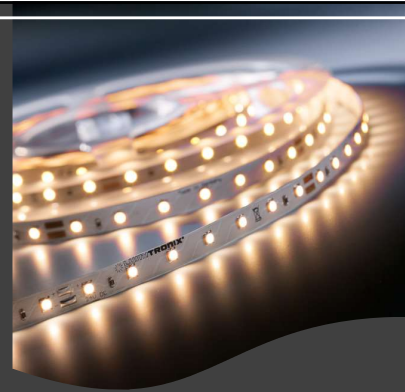


14

## ВИСНОВКИ

- були вивчені основні параметри, характеристики та залежності напівпровідникових світловипромінюючих діодів, а також матеріали та технології для їх проектування;
- на підставі проаналізованих даних та розрахованих електричних, оптичних та теплових характеристик напівпровідникових джерел оптичного випромінювання розроблено схему джерела струму;
- здійснено розрахунок елементів схеми. За результатами розрахунку було спроектовано схему джерела струму для живлення потужних світлодіодів.

ДЯКУЮ  
ЗА УВАГУ!



Доповідь завершено

Ім'я користувача:  
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:  
1011554750

Дата перевірки:  
13.06.2022 08:39:03 EEST

Тип перевірки:  
Doc vs Internet

Дата звіту:  
13.06.2022 08:43:15 EEST

ID користувача:  
100005862

Назва документа: на плагіат Нестерук

Кількість сторінок: 56 Кількість слів: 7924 Кількість символів: 58828 Розмір файлу: 3.91 MB ID файлу: 1011426442

## 12.9% Схожість

Найбільша схожість: 3.03% з Інтернет-джерелом (<https://deps.ua/ua/katalog/sensors/44483.html>)

12.9% Джерела з Інтернету

53

Сторінка 58

Пошук збігів з Бібліотекою не проводився

## 0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

## 0% Вилучень

Немає вилучених джерел

## Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи

1

## Anti-Plagiarism v-15.257

**Максимальное совпадение с одним документом 3.0%**

**Словари проверки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Ошибок в документах: 9%**

|   |          |         |                                     |         |
|---|----------|---------|-------------------------------------|---------|
| ID: 104996<br>Название: Бакалаврська кваліфікаційна робота<br>Добавлено в БД: 2022-06-10<br>Авторы: Нестерчук О.<br>Руководители: Яновицький О.К.<br>Консультанты:<br>Оponentы: | Документ |         | Суммарное совпадение по Базе Данных |         |
|   | Символы  | Лексемы | Символы                             | Лексемы |
|   | 57944    | 896     | 3640 (6%)                           | 54 (6%) |

### Источник плагиата

| ID | Описание | Наличие плагиата в документе |         |
|----|----------|------------------------------|---------|
|    |          | Символы                      | Лексемы |
|    |          |                              |         |

МІНІСТЕРСТВО ОВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Нестерчук Олександр Русланович

Тема роботи: Драйвер для живлення потужних світлодіодів

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи

Кількість листів креслень 0 Кількість сторінок записки 63

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Метою кваліфікаційної роботи є розробка драйвера джерела струму для живлення потужних світлодіодів. У даній роботі розглянуто огляд існуючих стабілізаторів струму для живлення потужних світлодіодів, розроблено структурну і функціональну схеми стабілізатора струму, а також . розроблено електрично-принципову схему стабілізатора струму на основі мікросхеми MP2481.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Кваліфікаційна робота відповідає виданому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: В першому розділі було проведено огляд існуючих стабілізаторів струму для живлення світлодіодів. Наведено загальні показники потужних світлодіодів. Розглянуто будову та типи світлодіодів. Визначено, що найкращим джерелом постійного струму є імпульсний стабілізатор. Ціна такого драйвера вища, ніж у інших рішень, але точність у широкому діапазоні навантажень знаходиться в межах 3%, а ефективність перетворення перевищує 96%, це означає, що тільки 4% енергії витрачається марно і пристрій може працювати при високих температурах довкілля. У другому розділі представлено розробку структурної та функціональної схем стабілізатора струму. У загальному випадку імпульсний стабілізатор складається з імпульсного перетворювача, що містить регулюючий прилад; задає генератора, керуючого перетворювачем; фільтра, що згладжує, зменшує пульсації вихідної напруги, та пристрої порівняння, що виробляє різницевий сигнал між вихідним та опорним напругою. Проведено огляд мікросхеми MP2481 стабілізатора струму для потужних світлодіодів. Зроблено вибір елементної бази та вхідного пристрою живлення драйвера. У третьому розділі представлено розробку електрично-принципової схеми стабілізатора струму на основі мікросхеми MP2481. Зроблено складальне

креслення та креслення друкованої плати, що дають повне уявлення про конструкцію друкованого модуля та спосіб виготовлення друкованої плати. Проведено конструкторський розрахунок та розрахунок електричних параметрів друкованої плати.

4. Позитивні сторони роботи: Результати виконаної роботи показали, що необхідно проводити подальші дослідження в даному напрямку та рухатися шляхом удосконалення енергозберігаючих технологій на основі світлодіодів. Напрямок досить перспективний і попит на дані компоненти з кожним днем тільки зростатиме.

5. Негативні сторони роботи: У роботі бажано було б більш детально розглянути питання потужних світлодіодів. Присутні невеликі граматичні помилки. Однак, ці недоліки не мають принципового значення, суттєво не впливають на кінцевий результат і не знижують загального враження від проведеної роботи

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає

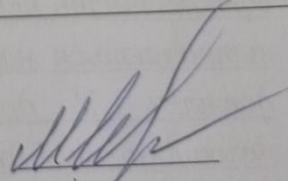
7. Відгук про роботу в цілому: В цілому кваліфікаційно робота виконано на високому технічному рівні, вона має безперечну актуальність в області сучасних технологій телекомунікацій

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка кваліфікаційної роботи: Кваліфікаційна робота відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки добре (4,0/С), а її автору Нестерчуку О.Р., присвоєння кваліфікації бакалавра зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка»

10. Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, місце роботи) Мішан Віктор Володимирович –к.т.н., доцент кафедри ТМІТ

«07» червня 2022р.

  
підпис

Завідувачу кафедри автоматизації та  
комп'ютерно-інтегрованих технологій  
д.т.н., професору Мартинюку В.В.  
здобувача вищої освіти  
Нестерчука О.Р.  
ФІТ, гр. ТРС-19-1

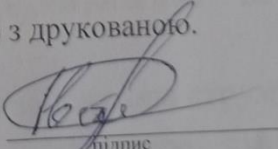
### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

25 травня 2022 р.  
дата

  
підпис

РІШЕННЯ

кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Драйвер для живлення потужних світлодіодів

Автор: Нестерчук Олександр Русланович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: к.т.н., доцент Яновицький Олександр Костянтинович

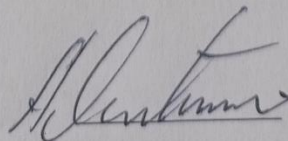
Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

| № | Висновок  | Позначка про відповідність |
|---|---|----------------------------|
| 1 | Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.  | -                          |
| 2 | Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедрі за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи | відповідає                 |
| 3 | Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.  | -                          |
| 4 | Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.  | -                          |
| 5 | Інше:   | -                          |

Підтвердження: Виявлені запозичення не є плагіатом так як розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження (є власні терміни, визначення тощо), складають 8,19% та мають посилання на приведенний список літературних джерел.

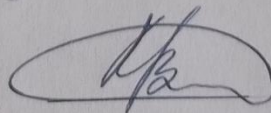
«0» червня 2022 р.

Науковий керівник



Яновицький О.К.

Завідувач кафедрою АКІТ



Мартинюк В.В.