

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

Кафедра електронних пристроїв та систем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Євген ВЕРБИЦЬКИЙ

« ____ » червня _____ 2025 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електронні компоненти і системи»

спеціальності 171 «Електроніка»

на тему: «Освітлювальна система із живленням постійним струмом»

Виконав:

студент IV курсу, групи ДС-11

Тарасенко Дмитро Володимирович _____

Керівник:

Доц. кафедри ЕПС, доц., к.т.н,

Бондаренко Олександр Федорович _____

Рецензент:

Проф. кафедри АМЕС, проф., д.т.н,

Дідковський Віталій Семенович _____

Консультант

з нормоконтролю

Доц. кафедри ЕПС, доц., к.т.н. _____

Батрак Лариса Миколаївна

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроніки
Кафедра електронних пристроїв та систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 171 «Електроніка»

Освітньо-професійна програма «Електронні компоненти і системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Євген ВЕРБИЦЬКИЙ

«21» травня 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Тарасенку Дмитру Володимировичу

1. Тема проєкту «Освітлювальна система із живленням постійним струмом»

керівник проєкту Бондаренко Олександр Федорович, Доц., к.т.н.

затверджені наказом по університету від «3» червня 2025 р. №1885-с

2. Термін подання студентом проєкту «11» червня 2025 р.

3. Вихідні дані до проєкту: удосконалення наявної освітлювальної системи постійного струму, система включає LED-кільце на 16 елементів і драйвера на мікросхемі HV9910B, підвищення енергоефективності, надійності та стабільності роботи шляхом заміни HV9910B на HV9961, оптимізації параметрів силових елементів (MOSFET, індуктивність, діод, фільтри), живлення системи здійснюється від джерела постійного струму номіналом 100 В, струм споживання не перевищує 0.4 А.

4. Зміст пояснювальної записки: огляд сучасних DC-LED освітлювальних систем та драйверів, порівняльний аналіз джерел постійного та змінного струму, техніко-економічне обґрунтування вибору архітектури, проектування структурної та принципової електричної схеми пристрою, розрахунок електричних параметрів усіх компонентів (індуктивність, фільтри, діоди, MOSFET), моделювання та оптимізація схеми на основі HV9961, а також розробка друкованої плати під обмежені габарити

5. Перелік графічного матеріалу: схема електрична структурна (Е1), схема електрична принципова (Е3), перелік елементів (СП), технічне креслення(ТК).

6. Консультанти розділів проєкту*

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

7. Дата видачі завдання 21 травня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури	29.05.2025	
2	Написання розділів дипломного проєкту	02.06.2025	
3	Розрахунок та розробка схеми	08.06.2025	
4	Оформлення пояснювальної записки	11.06.2025	

Студент

Тарасенко Дмитро

Керівник

Олександр БОНДАРЕНКО

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт присвячений удосконаленню освітлювальної системи з живленням постійним струмом, що використовується у швидкісному залізничному транспорті.

Актуальність теми обумовлена необхідністю підвищення надійності та енергоефективності систем освітлення в умовах обмеженого простору, вібрацій та нестабільного електроживлення.

Метою проєкту є проєктування та розрахунок покращеної LED-системи освітлення на базі драйвера HV9961 з урахуванням оптимізації роботи силових елементів схеми.

У межах роботи були поставлені такі завдання:

- 1) провести аналіз сучасних DC-систем освітлення та їх драйверів;
- 2) побудувати структурну та принципову електричну схему вдосконаленого пристрою;
- 3) виконати розрахунок елементної бази згідно вимог до стабільності струму;
- 4) реалізувати модель друкованої плати у відповідності до геометричних обмежень;
- 5) обґрунтувати вибір компонентів з позицій технічної доцільності.

У роботі здійснено техніко-функціональний аналіз типових рішень для живлення світлодіодів постійним струмом, досліджено переваги імпульсних драйверів із керуванням за середнім струмом. Розраховано ключових елементів: індуктивності, фільтрів, силового ключа, діода та токозадаючого резистора. Змодельовано роботу пристрою на базі мікросхеми HV9961.

Розробка може бути впроваджена в освітлення залізничного, медичного, автономного транспорту та інших систем із живленням постійним струмом.

Ключові слова: світлодіод, постійний струм, драйвер HV9961, фільтр, перетворювач, енергоефективність.

ANNOTATION

The diploma project is dedicated to the improvement of a direct current (DC) powered lighting system used in high-speed railway transport.

The relevance of the topic is determined by the need to increase the reliability and energy efficiency of lighting systems operating under conditions of limited space, vibration, and unstable power supply.

The aim of the project is to design and calculate an improved LED lighting system based on the HV9961 driver, taking into account the optimization of the power components in the circuit.

The following tasks were set in the course of the work:

- 1) to analyze modern DC lighting systems and their drivers;
- 2) to develop a structural and schematic electrical diagram of the improved device;
- 3) to perform component calculations in accordance with current stability requirements;
- 4) to implement a printed circuit board model considering geometric constraints;
- 5) to justify the selection of components from a technical feasibility standpoint.

The work includes a technical and functional analysis of standard DC LED driver solutions and an investigation of the benefits of average current control in switching regulators.

Key elements such as the inductor, filters, power switch, diode, and current-sensing resistor were calculated. The operation of the device was modeled using the HV9961 chip.

The developed system can be applied in lighting for railway, medical, autonomous transport, and other DC-powered systems.

Keywords: LED, DC power, HV9961 driver, filter, converter, efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ПРОЄКТУ	8
1.1 Переваги систем освітлення на постійному струмі	8
1.1.1 Енергетична ефективність.....	8
1.1.2 Зниження мерехтіння та стабільність світлового потоку	9
1.1.3 Сумісність з джерелами відновлюваної енергії.....	9
1.1.4 Локальна стабільність у системах з DC-живленням	10
1.1.5 Порівняння систем DC та AC	10
1.1.6 Готове технічне рішення: драйвер HV9961	11
1.1.7 Компоненти типової DC-системи.....	12
1.1.8 Застосування систем з DC-живленням	13
1.2 Роль драйверів постійного струму в LED-системах.....	14
1.2.1 Фізична природа LED та необхідність стабілізації струму	14
1.2.2 Порівняння драйверів постійного струму та постійної напруги	14
1.2.3 Типи та принципи роботи драйверів постійного струму.....	15
1.2.4 Основні технічні вимоги до драйверів.....	15
1.2.5 Застосування драйверів постійного струму на практиці	17
1.3 Сучасні компоненти для LED-драйверів	18
1.3.1 Огляд типової мікросхеми HV9961.....	19
1.3.2 Вимоги до LED-драйверів.....	20
1.3.3 Підвищення ККД та зниження втрат	21
1.3.4 Інтеграція з цифровими системами керування	22
1.4 Огляд готових технічних рішень та аналіз їхньої структури	24
1.4.1 Загальні принципи побудови готових DC-систем освітлення	24

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ					
Змн	Арк.	№ докум.№	Підпис	Дата	Освітлювальна система із живленням постійним струмом. Пояснювальна записка					
Розроб.		Гарасенко Д.В..						Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Бондаренко О.Ф.						3	58	
Н. Контр.		Батрак Л.М.						«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПС, гр. ДС-11		
Затверд.		Бондаренко О.Ф.								

1.4.2	Приклад реального рішення – Philips Xitanium	25
1.4.3	Порівняння типових рішень.....	26
1.5	Застосування систем освітлення з живленням постійним струмом	28
1.5.1	Транспортні засоби	28
1.5.2	Медичні заклади.....	30
1.5.3	Промисловість	31
1.5.4	Сонячні та гібридні енергосистеми.....	33
2	РОЗРОБКА ТА РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ	35
2.1.	Структурна схема приладу.....	35
2.2.	Принципова електрична схема	38
2.2.1	Вхідний фільтр	38
2.2.2	LED-драйвер (HV9961).....	39
2.2.3	Понижуючий перетворювач постійної напруги (Buck)	41
2.2.4	Вихідний фільтр	42
2.2.5	Електрична схема принципова	43
3	РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ СХЕМИ.....	44
3.1.	Розрахунок резистора R_{CS}	44
3.2	Розрахунок резистора $R_T(R_2)$	45
3.3	Розрахунок індуктивності дроселя L_1	46
3.4	Розрахунок вихідного фільтруючого конденсатора C_3	47
3.5	Розрахунок діода D_1	48
3.6	Розрахунок силового MOSFET-транзистора VT_1	49
3.7	Розрахунок фільтра контролю струму($R_4 - C_6$).....	51
3.8	Розрахунок елементів вхідного фільтра (R_1, C_1, C_2).....	51
3.9	Розрахунок елементів обв'язки мікросхеми HV9961 (R_3, C_4, C_5).....	53
4	КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	54
4.1.	Загальні вимоги до конструкції	54
4.2.	Плата та компонування елементів.....	55

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	57
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	59
ДОДАТОК А. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА СТРУКТУРНА	
ДОДАТОК Б. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА	
ДОДАТОК В ПЛАКАТ КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	
ДОДАТОК Г. ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ	
ДОДАТОК Д РЕФЕРАТ	

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Постійний струм – електричний струм, напрямок протікання якого не змінюється з часом. На відміну від змінного струму, що широко використовуються у промислових та побутових електромережах, постійний струм є незамінним у таких сферах, як залізничний транспорт, телекомунікаційне обладнання, сонячні електростанції, освітлювальні системи з живленням від акумуляторів й автономні джерела живлення.

Використання постійного струму має наступні переваги: простота керування, висока ефективність передачі енергії на короткі відстані, відсутність потреби в синхронізації частоти і можливість прямого живлення світлодіодів. Проте такі системи мають певні обмеження: зокрема, зниження ефективності при довгих лініях живлення, потреба в надійному захисті від перенапруги й перегріву, а також складність стабілізації струму при коливаннях напруги.

Одним із ключових компонентів освітлювальної системи є драйвер, який забезпечує стабілізацію струму для LED - модуля. У багатьох існуючих рішеннях драйвери мають дуже вузький або фіксований діапазон керування струмом та обмежений діапазон вхідної напруги. Це суттєво знижує гнучкість і обмежує застосування таких систем у транспорті чи в умовах автономної роботи. Удосконалити драйвер можна, зокрема реалізувавши адаптивне керування струмом у широкому діапазоні (наприклад, від 10 до 1000 мА), дозволяє адаптувати систему до різних умов живлення, зберігаючи стабільну яскравість і захищаючи LED – елементи від перевантаження.

Сучасні мікроконтролери, що використовуються для керування такими системами, також зазнають суттєвого розвитку.

Вони дозволяють реалізувати гнучке програмне регулювання яскравості (через ШІМ або аналогову модуляцію), моніторинг стану системи в реальному часі, інтеграцію з датчиками температури, освітленості або присутності. Це

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

відкриває широкі можливості для створення інтелектуальних систем освітлення, які працюють автономно, адаптуючись до змінних зовнішніх умов.

Області застосування таких освітлювальних систем із живленням постійним струмом охоплюють транспорт (залізничні вагони, метро, автобуси), аварійне та резервне освітлення, мобільні робочі платформи, військову техніку, системи з альтернативним живленням (сонячні батареї), а також спеціалізовані рішення для медицини, сільського господарства та індустрії.

Актуальність теми дипломного проєкту зумовлена потребою у вдосконаленні подібних систем шляхом розширення їх функціональності, підвищення енергоефективності та забезпечення стабільної роботи при змінних умовах експлуатації.

Метою даної роботи є модернізація освітлювальної системи з живленням постійним струмом шляхом розробки вдосконаленого драйвера для світлодіодного кільця, з підтримкою широкого діапазону керування струмом, стійкістю до змін вхідної напруги та можливістю інтеграції з сучасними мікроконтролерними платформами.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Переваги систем освітлення на постійному струму

Використання постійного струму (DC) в системах світлодіодного освітлення є не лише технічно доцільним, але й енергетично ефективним рішенням, що дедалі активніше впроваджується у різні сфери — від транспорту до резервного живлення та автономних об'єктів. У цьому розділі розглядаються основні переваги застосування DC-живлення у LED-системах, а також технічні приклади реалізації.

1.1.1 Енергетична ефективність

Однією з головних переваг живлення LED-систем від джерел постійного струму є вища ефективність у порівнянні зі схемами живлення від змінного струму. Це зумовлено тим, що DC-системи не потребують складних етапів перетворення (AC-DC-DC), а працюють на основі більш простих і високоефективних DC-DC драйверів.

DC-живлення LED-системи забезпечило на 20% вищу ефективність у порівнянні з AC-системою, більш стабільний рівень освітлення, зменшене мерехтіння та кращу сумісність із джерелами живлення низької напруги. [1]

Для прикладу, типові ККД для AC-DC драйвера становлять 85–89 %, тоді як для DC-DC — досягають 95–97 % наведено в табл. 1.1:

Таблиця 1.1

Тип драйвера	Коефіцієнт корисної дії (ККД), %
AC-DC	85-89
DC-DC	95-97

Крім підвищеного ККД, системи на постійному струмі дозволяють зменшити втрати енергії за рахунок усунення інверторів та випрямлячів у проміжних ланках. У багатьох прикладних дослідженнях відзначається

зниження споживання енергії до 15% у розгалужених освітлювальних мережах, які були переведені на DC-розподіл [12].

Це особливо важливо для систем з обмеженим доступом до електромережі: мобільні або аварійні освітлювальні установки, де кожен відсоток втрат критично впливає на тривалість роботи.

1.1.2 Зниження мерехтіння та стабільність світлового потоку

Однією з ключових переваг освітлювальних систем на постійному струмі є відсутність помітного мерехтіння світлодіодів. У системах змінного струму, навіть із застосуванням фільтрації, залишаються пульсації напруги після випрямлення, що призводить до високочастотного мерехтіння (до 100–120 Гц). Згідно з рекомендаціями IEEE, мерехтіння світлодіодів із частотою менше 165 Гц може викликати втоми очей, головний біль та інші негативні ефекти для здоров'я людини. Це особливо критично для освітлення в навчальних та медичних закладах [19].

Натомість системи з DC-живленням забезпечують стабільний світловий потік, що не залежить від коливань мережі. Це створює більш комфортне зорове середовище, особливо в медичних закладах, навчальних класах і лабораторіях, де критичною є якість освітлення. Наукові джерела також вказують, що освітлення на постійному струмі характеризується стабільністю інтенсивності світла та значно меншим рівнем мерехтіння [1].

1.1.3 Сумісність з джерелами відновлюваної енергії

Системи освітлення на постійному струмі природно узгоджуються з джерелами відновлюваної енергії, такими як сонячні панелі, акумулятори чи гібридні інверторні системи. На відміну від змінного струму, для підключення LED-світильників до DC-джерел не потрібно встановлювати інвертор або додатковий блок перетворення. Це суттєво спрощує архітектуру системи,

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

зменшує її вартість, а також мінімізує втрати енергії, пов'язані з подвійним перетворенням.

Дослідження підтверджують, що освітлення на постійному струмі особливо ефективно в низьковольтних системах, які працюють від батарей або фотоелектричних джерел [1]. Такий підхід забезпечує не лише енергоефективність, а й надійність автономної роботи в умовах відсутності мережі.

1.1.4 Локальна стабільність у системах з DC-живленням

У практиці експлуатації транспортних засобів, мобільних об'єктів і систем резервного живлення переважно використовуються DC-джерела. Перетворення змінного струму в постійний може викликати просідання напруги та створювати проблеми стабільності при пускових струмах або змінному навантаженні.

DC-живлення напряду забезпечує стабільну роботу освітлення навіть у нестабільних умовах. Це дає змогу зменшити кількість електронних перетворювачів і забезпечити швидшу реакцію на зміну навантаження. У поєднанні з драйверами, які підтримують широкий діапазон напруги, це робить DC-системи ідеальними для використання в транспорті, аварійних системах, військових об'єктах і автономних джерелах живлення.

1.1.5 Порівняння систем DC та AC

У табл. 1.2 представлено порівняльну характеристику систем освітлення з живленням постійним і змінним струмом.

Згідно з аналізом, проведеним у проєкті EMerge Alliance, застосування стандарту 24 В та 380 В постійного струму в офісних будівлях дозволило досягти стабільної роботи освітлення, значно знизити витрати на електромережу та спростити конфігурацію систем [13]. Таким чином, DC-системи мають перевагу як з точки зору енергетики, так і з боку системної інтеграції.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Таблиця 1.2

Характеристика	DC-система	AC-система
Енергоефективність	93-97%	85-89%
Мерехтіння	< 5%	< 35%
Архітектура	Спрощена	Складна(випрямляч, фільтр, драйвер)
Сумісність із сонячними панелями	Пряма	Потребує інвертор
Вартість експлуатації	Нижча	Вища

1.1.6 Готове технічне рішення: драйвер HV9961

У якості прикладу сучасного драйвера постійного струму для LED-систем варто розглянути HV9961, розроблений компанією Supertex (тепер Microchip Technology). Це середньозначний ШІМ-контролер з керуванням у режимі постійного часу вимкнення (constant off-time), який дозволяє реалізувати стабільну систему живлення світлодіодів без використання складних компенсувальних контурів або високочастотного вимірювання струму.

Основні характеристики HV9961 [5]:

- 1) Діапазон вхідної напруги: 8...450 В DC;
- 2) Метод керування: середньозначне керування струмом;
- 3) Точність стабілізації струму: $\pm 3\%$;
- 4) Вихідний струм програмується: через зовнішній шунт (резистор R_{CS}), формула:
- 5) Методи димування: ШІМ та аналогове (лінійне);
- 6) Захист: вбудоване обмеження струму з переходом у режим "hiccup" при короткому замиканні;
- 7) Діапазон робочих температур: $-40^{\circ}\text{C} \dots +125^{\circ}\text{C}$;
- 8) Сумісність: пін-сумісний із HV9910В, з покращеним керуванням середнім струмом.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Переваги

HV9961 значно покращує точність, регулювання струму світлодіода в лінії та під навантаженням без необхідності компенсації контуру або зондування струму високої напруги [5]. Це дозволяє використовувати драйвер у високовольтних DC/DC- або AC/DC-системах освітлення, де критично важлива стабільність струму та мінімальна кількість зовнішніх компонентів.

Типові компоненти в схемі на базі HV9961:

- 1) HV9961 — керуюча мікросхема;
- 2) MOSFET — зовнішній ключ (керується через вивід GATE);
- 3) R_{CS} — резистор струмового зворотного зв'язку;
- 4) RT — резистор встановлення часу вимкнення;
- 5) ШІМ-сигнал (PWMD) — керування яскравістю;
- 6) Світлодіодне навантаження;
- 7) Конденсатори на V_{DD} та VIN — для фільтрації;
- 8) Додатково (опційно): LD-вхід для лінійного димування, TVS-діоди для захисту.

Приклади застосування HV9961:

- 1) DC/DC-драйвери для LED-стрічок та LED-кілець;
- 2) Архітектурне та декоративне підсвічування;
- 3) Підсвітка LCD-дисплеїв (LED backlight);
- 4) Вуличне освітлення;
- 5) Постійнострумові системи у транспорті (напр., LED у потягах).

1.1.7 Компоненти типової DC-системи

Сучасна система освітлення на постійному струмі зазвичай має модульну будову та включає такі елементи:

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

- 1) Джерело живлення — автономний акумулятор (Li-ion, LiFePO₄), сонячна панель із контролером або бортова DC-шина транспортного засобу;
- 2) Драйвер струму — наприклад, Mean Well LDD-700L [4] або мікросхема HV9961, яка забезпечує стабілізований струм незалежно від коливань напруги;
- 3) Світлодіодний модуль — LED-кільце, COB-матриця або SMD-стрічка;
- 4) Система керування — мікроконтролер із PWM або аналоговим виходом (ESP32, STM32, ATmega), який відповідає за димування, перемикання режимів тощо;
- 5) Захист — запобіжники, TVS-діоди, температурні датчики або NTC-термістори, що захищають від короткого замикання, перегріву чи перевищення струму.

1.1.8 Застосування систем з DC-живленням

На практиці освітлювальні системи на постійному струмі використовуються в низці спеціалізованих і критичних застосувань:

- 1) Транспорт — внутрішнє та зовнішнє освітлення потягів, автобусів, тролейбусів, де DC-живлення забезпечується з бортової шини (зазвичай 24–110 В);
- 2) Медицина — точне та безпечне освітлення в операційних і лабораторіях, де мінімальне мерехтіння є ключовим чинником;
- 3) Промисловість — виробничі цехи з централізованим DC-розподілом, де потрібна підвищена надійність і контроль;
- 4) Резервне освітлення — аварійні джерела світла, які живляться від акумуляторів при зникненні мережі;
- 5) Сонячні системи — автономне LED-освітлення для приватних будинків, вулиць і інфраструктури, що напряму живиться від фотоелектричних модулів.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

1.2. Роль драйверів постійного струму у LED-системі

Світлодіоди, як нелінійні напівпровідникові елементи, вимагають стабілізованого струму для нормальної, ефективної та безпечної роботи. Використання драйверів постійного струму стало стандартом у професійних LED-системах, зокрема в умовах змінної або нестабільної напруги. Цей розділ розкриває значення драйверів у таких системах, типи керування, приклади схем та ключові вимоги до їхніх характеристик.

1.2.1 Фізична природа LED та необхідність стабілізації струму

Світлодіоди мають експоненційну залежність між струмом і напругою. Це означає, що навіть незначне збільшення прикладеної напруги викликає різке зростання струму, що може призвести до перегріву, деградації люмінофора або навіть термічного пробою напівпровідникового переходу. Зважаючи на це, стабілізація саме струму, а не напруги є основною умовою безпечної експлуатації LED. Якщо драйвер LED не є стабілізатором струму, світлодіод може споживати надмірний струм у процесі нагрівання, що значно скоротить термін служби або навіть повністю знищить його. [2]

1.2.2 Порівняння драйверів постійного струму та постійної напруги

У LED-системах використовуються два підходи до живлення: з постійною напругою (CV, constant voltage) та постійним струмом (CC, constant current). У CV-системах надійна робота світлодіодів можлива лише за наявності додаткових резисторів або стабілізуючих елементів, які обмежують струм. Це спрощує схему, але знижує ефективність і не гарантує стабільної яскравості при змінному навантаженні. Драйвер постійної напруги забезпечує фіксовану напругу (зазвичай 12 або 24 В), очікуючи, що навантаження буде самостійно обмежувати

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

струм. Це часто призводить до проблем, якщо світлодіоди не мають струмообмежувальних резисторів або сумісних схем. [2]

Натомість СС-драйвери забезпечують підтримку стабільного струму незалежно від змін напруги живлення, опору елементів або температури. Це дає змогу підтримувати постійну яскравість, подовжити термін служби та підвищити ККД.

1.2.3 Типи та принципи роботи драйверів постійного струму

Драйвери постійного струму зазвичай реалізуються у вигляді імпульсних DC-DC перетворювачів типу buck, boost, buck-boost або SEPIC. Керування струмом здійснюється за допомогою одного з двох основних методів:

- 1) пікове керування струмом (peak current mode);
- 2) середньозначне керування струмом (average current mode).

В дослідженнях зазначено, що драйвери зі середньозначним керуванням струмом демонструють кращу відповідність вимогам стандартів IEEE щодо стабільності яскравості, особливо в умовах варіативного живлення або зміни навантаження [14].

Наприклад, HV9961 працює у режимі середньозначного керування з фіксованим часом вимкнення ключа. Це дозволяє уникнути пік-ту-середнє помилки та досягти точності $\pm 3\%$ без складної компенсації в контурі керування [5].

1.2.4 Основні технічні вимоги до драйверів

Для стабільної роботи драйвер постійного струму повинен відповідати ряду ключових технічних характеристик, що забезпечують його ефективність, сумісність з різними навантаженнями та надійність у довготривалому використанні:

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1) Широкий діапазон вхідної напруги. Це дозволяє використовувати драйвер у системах з нестабільним живленням або у випадках, коли джерело може варіювати (наприклад, живлення від акумуляторів, сонячних батарей, транспортних джерел);

2) Високий коефіцієнт корисної дії (ККД). Енергоефективність понад 90% дозволяє зменшити теплові втрати, підвищити ресурс елементів та зменшити навантаження на систему охолодження;

3) Підтримка регулювання яскравості (димування). Забезпечення можливості керування яскравістю світильників за допомогою широтно-імпульсної модуляції (PWM) або аналогового сигналу є важливою вимогою в інтелектуальних освітлювальних системах;

4) Інтегровані захисти. Сучасні драйвери повинні мати захист від перевантаження по струму, короткого замикання, перегріву та перенапруги для гарантії стабільної роботи в складних умовах;

5) Можливість інтеграції з мікроконтролерами. Це дозволяє реалізувати інтелектуальне керування системою освітлення, включаючи дистанційне управління, адаптивне регулювання, зворотний зв'язок та моніторинг стану системи в реальному часі;

6) Стабільність вихідного струму при змінному навантаженні. Надійне регулювання повинно забезпечуватись при коливаннях напруги, температури або зміні типу LED-навантаження;

7) Низький рівень електромагнітних перешкод (ЕМП). Відповідність стандартам щодо електромагнітної сумісності (ЕМС) є критично важливою для застосування в медичній техніці, авіації та телекомунікаціях.

Сучасні мікросхеми (HV9961, MAX16832, TPS92512) поєднують усі ці функції на одному кристалі.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

1.2.5 Застосування драйверів постійного струму у практиці

Драйвери постійного струму знаходять широке застосування у світлодіодних системах різного призначення, де необхідна висока надійність, енергоефективність та точне керування світловим потоком. Ось кілька ключових напрямів використання:

1) Транспортні системи. У поїздах, автобусах, літаках та автомобілях широко застосовується LED-освітлення, яке працює від бортових мереж постійного струму (12 В, 24 В, 48 В, 110 В). Драйвери забезпечують стабільну роботу навіть при перепадах напруги під час запуску двигуна або заряджання батарей;

2) Вуличне та промислове освітлення. У цих системах часто використовують світлодіодні модулі великої потужності з живленням від постійного струму. Драйвери дозволяють централізовано керувати яскравістю, зменшуючи споживання енергії вночі;

3) Медичні та лабораторні прилади. У системах, де важлива відсутність мерехтіння (flicker-free), стабільне світло з точним керуванням необхідне для візуального аналізу або хірургічного освітлення;

4) Архітектурне освітлення. Багатоканальні драйвери з підтримкою керування по протоколах DALI, DMX тощо використовуються для створення динамічних світлових сцен;

5) Освітлення на основі відновлюваних джерел енергії. У системах, де джерело енергії є нестабільним (сонячна панель, акумулятор), драйвер постійного струму забезпечує надійність незалежно від варіацій напруги;

6) Інтелектуальні освітлювальні системи. У поєднанні з датчиками освітленості, присутності або з підключенням до Інтернету речей (IoT) драйвери використовуються для створення автоматизованих, саморегульованих систем освітлення.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Таким чином, драйвери постійного струму є критично важливим елементом сучасних LED-рішень, забезпечуючи стабільність, безпеку та керованість у всіх галузях застосування. У табл. 1.3 наведено порівняння режимів керування струмом наведено.

Таблиця 1.3

Характеристика	Пікове керування струмом	Середньозначне керування струмом
Тип керування	Peak Current Mode	Average Current Mode
Точність регулювання	Середня	Висока
Чутливість до пульсацій струму	Висока	Низька
Стабільність при змінному навантаженні	Низька	Висока
Потреба в компенсації контуру	Так	Ні

1.3. Сучасні компоненти для LED-драйверів: енергоефективність та інтеграція

Сучасний розвиток напівпровідникової електроніки дозволив значно підвищити ефективність та функціональність LED-драйверів, особливо в системах живлення на постійному струмі. Основні напрямки удосконалення стосуються: підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД), мініатюризації елементної бази, зниження електромагнітних перешкод (ЕМП), а також впровадження цифрового керування та комунікаційних інтерфейсів. Нові мікросхеми драйверів, такі як TPS92515, крім стабілізації струму, також включають інтерфейси цифрового керування та захисти з телеметрією. Це дозволяє інтегрувати LED-системи в інтелектуальні системи моніторингу та керування через IoT [15]. Також за даними останніх досліджень, системи з живленням постійним струмом значно спрощують інтеграцію фотоелектричних панелей і акумуляторних блоків, оскільки виключають потребу в інверторах,

зменшують втрати на перетворення та підвищують загальний ККД системи до 92 % [20].

1.3.1 Огляд типової мікросхеми HV9961

Тенденції мініатюризації та інтеграції функціоналу в електроніці призвели до появи багатофункціональних мікросхем драйверів, спеціально призначених для керування світлодіодами. Такі компоненти є серцем сучасних DC-освітлювальних систем, де пріоритетними є енергоефективність, стабільність та спрощена схемотехніка.

Одним із показових прикладів є HV9961, виробництва Supertex (тепер Microchip), яка підтримує середньозначне керування струмом із фіксованим часом вимкнення комутаційного ключа. Мікросхема забезпечує стабільну точність регулювання вихідного струму в межах $\pm 3\%$ без необхідності складної компенсації зворотного зв'язку [5]. Такий підхід дозволяє зменшити чутливість до шумів та мінімізувати кількість зовнішніх пасивних елементів.

Схемотехнічно HV9961 включає наступні ключові внутрішні блоки:

- 1) генератор опорної напруги, який задає фіксовану напругу для порівняння із струмовим сигналом;
- 2) компаратор струму для контролю моменту вимкнення MOSFET;
- 3) логіку керування ключем та формування сигналів ШІМ;
- 4) вбудований стабілізатор живлення для внутрішніх схем;
- 5) захисти від короткого замикання, перегріву та перенапруги.

Завдяки цьому, мікросхема не потребує додаткових схем генерації імпульсів або логіки керування транзисторами, що суттєво зменшує габарити кінцевої плати. Крім того, інтеграція ключових функцій дозволяє забезпечити вищу відтворюваність параметрів у масовому виробництві.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Подібні мікросхеми нового покоління орієнтовані на застосування у складних або обмежених за простором системах: медичних приладах, залізничному та автомобільному транспорті, а також у побутовому освітленні, де важливе поєднання компактності й стабільності.

1.3.2 Вимоги до LED-драйверів

Однією з ключових вимог до драйверів світлодіодного освітлення, що працюють у системах з живленням постійним струмом, є здатність витримувати широкий діапазон вхідної напруги. Це особливо актуально для інфраструктур з нестабільними джерелами живлення, таких як акумуляторні системи, сонячні панелі, бортові мережі транспорту (48 В, 72 В, 110 В) або промислові DC-шини (до 380 В).

Сучасні мікросхеми драйверів та силові елементи (MOSFET, діоди, контролери) проектується з урахуванням підвищеної стійкості до перенапруг і різких імпульсних коливань. Наприклад:

1) HV9961 підтримує роботу при напрузі до 450 В завдяки вбудованому високовольтному стабілізатору живлення, що дає змогу застосовувати його без додаткових елементів навіть у промислових середовищах [5];

2) MOSFET-транзистори з напругою пробою 600 В використовуються у драйверах, призначених для залізничного освітлення, де стандартною є напруга 110 ВDC;

3) TVS-діоди (transient-voltage suppressors) забезпечують захист від короткочасних імпульсів перенапруги до 1 кВ, що типово при комутаціях або включенні живлення.

Крім того, у високонадійних застосуваннях активно використовуються топології з гальванічною розв'язкою (ізольовані драйвери), які дозволяють адаптуватися до різних рівнів напруги без порушення стабільності роботи

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

керованого навантаження. Для зниження ризику збоїв, викликаних високими напругами, використовуються також високовольтні плівкові конденсатори, що витримують 630–1000 В, та дроселі з міжобмотковою ізоляцією, стійкою до пробою.

Усе це дозволяє реалізовувати драйвери, здатні стабільно працювати в умовах агресивного енергетичного середовища, що характерне для транспорту, зовнішнього освітлення або аварійних систем живлення.

1.3.3 Підвищення ККД та зниження втрат

Коефіцієнт корисної дії (ККД) є критичним параметром для драйверів світлодіодного освітлення, особливо в системах на постійному струмі, де часто живлення забезпечується з обмежених або автономних джерел (акумулятори, генератори, сонячні панелі). Кожен відсоток втрат безпосередньо впливає на тепловий режим, габарити, надійність і тривалість автономної роботи системи.

У традиційних схемах значну частину втрат спричиняє:

- 1) тепловиділення у ключових елементах (MOSFET, діодах);
- 2) активні резистори для вимірювання струму;
- 3) неоптимальні режими перемикання.

Щоб зменшити втрати, у сучасних драйверах застосовують такі рішення:

1) Синхронні схеми з використанням MOSFET замість діодів Шотткі. Завдяки цьому зменшується падіння напруги на вихідному елементі та, відповідно, втрати потужності;

2) Швидкоперемикаючі транзистори з низьким опором відкритого каналу $R_{DS(on)}$. Наприклад, сучасні n-канальні MOSFET із напругою

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

пробою 150–600 В мають $R_{DS(on)}$ менше 0,1 Ом, що мінімізує втрати на провідність;

3) Використання феритових дроселів із малими втратами на перемагнічування. Дроселі з магнітопроводами на основі нанокристалічних сплавів забезпечують високий ККД навіть при високій частоті перемикання (100–500 кГц);

4) Оптимізація ШІМ-алгоритмів. Використання фіксованого часу вимкнення ключа, як у HV9961, дозволяє досягати стабільного середнього струму з мінімальними втратами енергії на повторне включення [5];

5) Зниження втрат на вимірювання струму. Деякі мікросхеми замість низькоомних шунтів використовують інтегральні датчики Hall-ефекту або внутрішні каскади з підсиленням, що мінімізує падіння напруги та теплову генерацію.

Як результат, сучасні драйвери досягають ККД понад 92–95 % у діапазоні навантажень 5–50 Вт, навіть у складних температурних умовах (–40...+85 °С). Високий ККД не лише знижує енергоспоживання, а й дозволяє зменшити розміри систем охолодження або повністю обійтися без радіаторів у малопотужних пристроях.

1.3.4 Інтеграція з цифровими системами керування

У сучасних освітлювальних системах зростає потреба в інтелектуальному керуванні світловими параметрами, що виводить драйвери світлодіодів за межі звичайних джерел струму. Інтеграція цифрових інтерфейсів у мікросхеми драйверів відкриває можливості для автоматизованого, дистанційного та адаптивного регулювання освітлення — як у локальних, так і в глобальних мережах.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Основні напрямки інтеграції включають:

1) Підтримку цифрових протоколів керування: сучасні драйвери підтримують DALI (Digital Addressable Lighting Interface), DMX512, I²C, SPI, UART, PWM або BLE. Це дає змогу створювати складні освітлювальні системи з можливістю адресного доступу, зворотного зв'язку та програмного конфігурування параметрів освітлення в режимі реального часу [5];

2) Інтеграція з мікроконтролерами: багато мікросхем драйверів дозволяють пряме підключення до MCU через стандартні інтерфейси. Наприклад, контролери на базі STM32 або ESP32 можуть керувати яскравістю, режимами роботи, часом увімкнення та кольоровою температурою освітлення, ґрунтуючись на даних із сенсорів (освітленість, рух, температура тощо);

3) Підтримка IoT-функціональності: драйвери з вбудованим бездротовим інтерфейсом (BLE, ZigBee, Wi-Fi) використовуються в розумних будинках, офісах і виробництвах. Завдяки цьому користувачі можуть змінювати освітлення через мобільні додатки, голосові помічники (Google Home, Alexa) або автоматичні сценарії;

4) Адаптивне керування енергоспоживанням: цифрові драйвери дозволяють точно регулювати потужність відповідно до зовнішніх умов або заданого профілю. Це особливо важливо у великих освітлювальних інсталяціях (торгові центри, склади, вулиці), де енергозбереження має критичне значення.

Приклад:

У LED-драйверах з інтерфейсом DALI драйвер має унікальну адресу та зберігає налаштування яскравості у вбудованій пам'яті. Це дозволяє централізовано керувати тисячами світильників без окремого кабелю керування — достатньо двожильного проводу живлення та DALI-шини.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Завдяки цифровій інтеграції драйвери перетворюються з простих силових елементів на **повноцінні інтелектуальні вузли** у складі кіберфізичних освітлювальних систем.

Висновок:

Сучасні LED-драйвери на постійному струмі характеризуються високим рівнем інтеграції, енергоефективністю та здатністю працювати в широкому діапазоні напруг. Мікросхеми нового покоління забезпечують стабільну роботу, мінімальні втрати та компактність. Впровадження цифрових інтерфейсів розширює їх функціональність, дозволяючи інтеграцію в розумні системи керування освітленням.

1.4. Огляд готових технічних рішень та аналіз їхньої структури

Для побудови надійної та енергоефективної освітлювальної системи на постійному струмі доцільно проаналізувати існуючі промислові рішення, що вже успішно впроваджені на ринку. Це дозволяє виявити сильні сторони сучасних реалізацій, оцінити структуру системи та визначити доцільні напрямки для вдосконалення.

1.4.1 Загальні принципи побудови готових DC-систем освітлення

Промислові системи освітлення на постійному струмі зазвичай включають наступні базові елементи:

- 1) центральне джерело живлення постійного струму (наприклад, 24 В, 48 В або 110 В);
- 2) мережу розподілу енергії (шина або кабельна система);
- 3) світильники з драйверами, які адаптують струм до характеристик LED-навантаження;

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

4) елементи керування (диммер, таймер, сенсор, мікроконтролер).

Типова система проектується з урахуванням втрат на лінії, теплового режиму та допустимих пульсацій струму. Велике значення мають також стандартизація роз'ємів, рівень захисту корпусів (IP65–IP67) та електромагнітна сумісність.

1.4.2 Приклад реального рішення — Philips Xitanium

Один із найпоширеніших у комерційному секторі варіантів — драйвери серії Philips Xitanium, які підтримують живлення як від змінного, так і постійного струму. Наприклад, модель Xitanium 150W 0.7A 230V I 230V дозволяє роботу при вхідній напрузі 127–250 ВDC та має програмований вихідний струм у межах 150–700 мА [3].

Ключові характеристики:

- 1) діапазон вхідної напруги: 127–250 ВDC;
- 2) ККД: до 93 %;
- 3) програмованість через інтерфейс SimpleSet;
- 4) вбудовані захисти від перегріву, короткого замикання та перенапруги;
- 5) пасивне охолодження без вентилятора.

Основні компоненти такого драйвера:

- 1) вхідний фільтр ЕМС (для відповідності стандартам);
- 2) перетворювач на базі ізольованої топології (flyback або LLC);
- 3) схема вимірювання струму з опорним джерелом;
- 4) мікроконтролер керування та конфігурації параметрів.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

1.4.3 Порівняння типових рішень

Порівняння типових рішень наведено в табл. 1.4:

Таблиця 1.4

Параметр	Xitanium 150W [3]	MeanWell HLG-120H [4]	CastLab DCLED-60
Вихідна напруга (DC)	127-250 В	90-305 В	18-60 В
ККД	92-93 %	91 %	89 %
Вихідний струм	150-700 мА	350-1050 мА	500-1000 мА
Інтерфейси керування	SimpleSet	0-10 В, PWM	немає
Захист	Повний набір	Повний набір	Лише захист від КЗ
Охолодження	пасивне	пасивне	пасивне

Провівши низку досліджень бачимо різницю в показниках ККД наших драйверів. Ці відмінності пояснюються як технологічними, так і конструктивними чинниками:

Топологія перетворювача

1) Philips Xitanium використовує оптимізовану ізольовану топологію (LLC або resonant flyback), яка має менші втрати на перемикання завдяки “м’якому” комутаційному режиму (ZVS – zero voltage switching).

2) MeanWell HLG застосовує класичну топологію типу flyback або buck з обмеженим зниженням втрат при перемиканні, але з хорошою фільтрацією.

3) CastLab DCLED-60 зазвичай реалізує просту buck-архітектуру з жорсткою комутацією, що спричиняє вищі втрати на перемикання.

Рівень інтеграції та контроль алгоритмів

1) Xitanium має цифровий контролер SimpleSet, який дозволяє налаштувати струм, обмежити пікові навантаження та оптимізувати режим залежно від навантаження.

2) CastLab — здебільшого аналогове керування без оптимізації алгоритму ШІМ, що не дозволяє адаптуватися до змінного навантаження з мінімальними втратами.

3) MeanWell частково підтримує аналогове керування яскравістю, але без активного зворотного зв'язку по ККД.

Якість компонентів

1) У Philips застосовуються високоякісні MOSFET з низьким $R_{DS(on)}$, феритові дроселі та малощумні компоненти, що мінімізують теплові й комутаційні втрати.

2) CastLab часто орієнтований на бюджетний сегмент, тож використовує дешевші компоненти з вищими втратами на провідність та перемикання.

Додаткові функції збереження енергії

1) Xitanium реалізує адаптивне регулювання робочої частоти, що дозволяє працювати з найменшими втратами на різних навантаженнях.

2) CastLab працює на фіксованій частоті незалежно від умов, що зменшує ефективність у неповному навантаженні.

Philips Xitanium досягає найвищого ККД завдяки поєднанню ефективної топології, цифрового керування, якісних компонентів і динамічного адаптивного регулювання. Найнижчий ККД у CastLab пояснюється спрощеною схемотехнікою, жорсткою комутацією та обмеженою можливістю адаптації.

Висновок:

Аналіз показує, що навіть у компактних промислових рішеннях реалізується повноцінна система керування та захисту. Більшість драйверів розраховані на роботу з DC-напругою в широкому діапазоні та мають високий

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

ККД. Однак не всі рішення мають інтелектуальні інтерфейси керування — це залишає простір для вдосконалення, зокрема в напрямку інтеграції мікроконтролерів, бездротових протоколів та автоматичного налаштування.

1.5. Застосування систем освітлення з живленням постійним струмом в різних сферах

Системи освітлення, що працюють від джерел постійного струму, все ширше впроваджуються в практичних застосуваннях завдяки високому ККД, зниженому мерехтінню, сумісності з автономними джерелами живлення та можливості точного керування світловим потоком. Їх застосування охоплює транспорт, медицину, промисловість, побут і відновлювану енергетику.

1.5.1 Транспортні засоби

Системи освітлення з живленням постійним струмом широко застосовуються в транспортному секторі, зокрема в залізничному, автомобільному, авіаційному та міському електротранспорті. Це зумовлено як технічними, так і експлуатаційними чинниками, серед яких — живлення від бортових джерел, потреба в підвищеній стабільності освітлення та безпека для пасажирів і обслуговуючого персоналу. У дослідженнях щодо систем освітлення міського транспорту зазначено, що традиційні драйвери мають низьку надійність і нестабільну роботу, тоді як DC-драйвери демонструють кращу стабільність, більший ресурс та спрощене керування зворотним зв'язком [17].

У більшості сучасних поїздів, зокрема Інтерсіті, застосовується бортова DC-шина з номіналом 110 В постійного струму, від якої живиться вся система освітлення вагонів. Такий підхід дозволяє уникнути багаторазового перетворення енергії, зменшити втрати та забезпечити більшу стабільність напруги на кінцевих пристроях.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Основні переваги DC-освітлення в транспорті:

1) Сумісність із акумуляторними системами живлення. У транспорті часто застосовуються буферні акумулятори (24 В, 48 В, 110 В), які безпосередньо живлять освітлювальні прилади під час руху або на стоянці. У разі аварійного знеструмлення це забезпечує негайне перемикання на резервне джерело без мерехтіння та зниження яскравості.

2) Висока стійкість до пускових струмів і нестабільності напруги. На відміну від систем на змінному струмі, де падіння напруги під час пуску двигуна або навантаження може викликати помітне мерехтіння, у DC-системах освітлення стабільність підтримується на рівні драйвера.

3) Енергетична ефективність. Відсутність інверторів або проміжних перетворювачів дозволяє досягти ККД 90–95 % у більшості рішень, що важливо для загальної енергоефективності рухомого складу.

4) Безперебійна робота. Зниження кількості комутаційних елементів і простота електричної схеми підвищують надійність системи. Це критично для транспортного обладнання, де обслуговування виконується рідко або в складних умовах.

5) Модульність та простота обслуговування. У DC-системах легко реалізувати заміну окремих світильників без необхідності відключення великої частини мережі, що зручно при експлуатації поїздів і автобусів.

Також важливим є те, що вузли освітлення з постійним струмом можуть бути з'єднані послідовно або паралельно, що полегшує конфігурування системи залежно від кількості місць, типу вагону чи типу транспортного засобу.

У випадку з міським електротранспортом (тролейбуси, трамваї), живлення від мережі також трансформується в DC 24–110 В, після чого подається на освітлювальні лінії з вбудованими драйверами, як Mean Well LDD-500L, що адаптують струм до LED-навантаження та гарантують його стабілізацію. Також у транспортній галузі активно впроваджуються централізовані DC-мережі з

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

напругою до 800 В, до яких підключаються локальні світлодіодні модулі. Такий підхід зменшує витрати на прокладку кабелів і підвищує енергоефективність [18].

1.5.2 Медичні заклади

У сфері охорони здоров'я до систем освітлення висуваються надзвичайно суворі вимоги щодо стабільності, відсутності мерехтіння, електромагнітної сумісності та безпеки. LED-освітлення з живленням від постійного струму задовольняє ці вимоги значно краще, ніж традиційні рішення на змінному струмі, особливо в умовах чутливих до якості світла приміщень.

Вимоги до освітлення в медицині включають:

- 1) відсутність мерехтіння навіть при частотах понад 100 Гц;
- 2) стабільність світлового потоку незалежно від навантаження мережі;
- 3) точну передачу кольору, важливу для діагностики та хірургії;
- 4) електричну безпеку в умовах контакту з тілом пацієнта;
- 5) мінімізацію електромагнітних завад для сусіднього обладнання.

Переваги систем з DC-живленням у цьому контексті:

1) Відсутність мерехтіння. Постійний струм не створює пульсацій світлового потоку, які спостерігаються при живленні від мережі змінного струму навіть після фільтрації. Це забезпечує зоровий комфорт персоналу та знижує ризик помилок при візуальній діагностиці або хірургічних маніпуляціях.

2) Низький рівень шуму та електромагнітних завад. Освітлювальні системи на змінному струмі з перетворювачами можуть створювати електромагнітні перешкоди, що порушують роботу апаратів ЕКГ, УЗД, томографії. Натомість DC-джерела, зокрема ті, що працюють на низьких напругах (12–48 В), створюють мінімальний фон і є придатними для сумісного використання з медичною технікою.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

3) Вбудована можливість аварійного живлення. Медичні освітлювальні системи часто інтегруються з акумуляторами безпосередньо у конструкцію. Завдяки живленню постійним струмом переключення на резервне джерело відбувається миттєво — без миготіння чи затримки. Це важливо в операційних та палатах інтенсивної терапії.

4) Гнучкість у керуванні освітленням. DC-драйвери з підтримкою ШІМ або аналогового керування дозволяють точно регулювати яскравість без зміни спектральних характеристик, що важливо при створенні адаптивного медичного освітлення, зокрема — денного/нічного режимів.

5) Безпечне напруга живлення. У зонах контакту з пацієнтом, відповідно до міжнародних стандартів (IEC 60601-1), допускається лише обмежена напруга. Системи DC-освітлення на 12–24 В ідеально відповідають цим вимогам, зменшуючи ризик ураження струмом.

Застосування:

- 1) операційні лампи та безтіньові світильники;
- 2) хірургічні стельові модулі;
- 3) освітлення стоматологічних крісел;
- 4) лабораторне та приладове підсвічування;
- 5) аварійні системи освітлення палат та евакуаційних маршрутів.

1.5.3 Промисловість

У промислових умовах вимоги до освітлення є специфічними: висока надійність, довговічність, стійкість до електричних та механічних впливів, а також можливість централізованого керування. Системи освітлення з живленням постійним струмом демонструють помітні переваги в цих умовах, особливо у виробничих залах, складських приміщеннях, автоматичні та системах чергового підсвічування. Практичні експерименти, описані в роботах NREL, свідчать про ефективність використання LED-драйверів на DC у автономних сонячних

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

установках для об'єктів критичної інфраструктури — лікарень, вишок зв'язку та транспортних вузлів [16].

Переваги DC-живлення у промисловості:

1) Уніфікація системи енергопостачання. У багатьох виробництвах паралельно з освітленням застосовуються контролери, датчики, актуатори, які також живляться від постійного струму (наприклад, 24 В або 48 В). Це дозволяє створювати єдину DC-шину, що спрощує проектування, знижує втрати та зменшує кількість перетворювальних пристроїв.

2) Мінімізація електромагнітних перешкод. На підприємствах із великою кількістю автоматизованих систем (роботизовані лінії, ПЛК, інвертори) надмірна кількість перетворювачів може створювати електромагнітний шум. Використання DC-освітлення дозволяє позбутися інверторів, які часто є джерелом високочастотних завад.

3) Високий ККД і низьке тепловиділення. Світлодіодні драйвери з живленням від DC-шини можуть досягати ККД понад 95 %, що особливо актуально в умовах обмеженого вентиляційного простору. Зменшення тепловиділення також позитивно впливає на загальний тепловий режим у виробничих приміщеннях.

4) Надійність і спрощене обслуговування. Відсутність трансформаторів, складних перетворювачів або вентиляторів у драйверах DC-типу забезпечує меншу ймовірність виходу з ладу. Такі системи мають вищу механічну стійкість до вібрацій і пилу, що типово для виробництва.

5) Масштабованість і модульність. DC-системи легко масштабуються — додавання нових світильників можливе без реконструкції всієї мережі. У разі потреби світильники підключаються до шини через стандартні конектори та драйвери, що підтримують постійний струм.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Приклади застосування:

- 1) освітлення виробничих ліній та верстатних зон;
- 2) чергове освітлення серверних приміщень та шаф керування;
- 3) внутрішнє освітлення розподільчих щитів;
- 4) енергоефективне освітлення логістичних центрів;
- 5) аварійне освітлення промислових об'єктів із АКБ-живленням.

Типові конфігурації:

- 1) централізоване живлення 48 В або 110 ВDC;
- 2) децентралізоване живлення 24 ВDC з локальними АКБ;
- 3) шини живлення з підключенням драйверів типу HV9961, TPS92512 або Mean Well LDD-H.

1.5.4 Сонячні та гібридні енергосистеми

Системи освітлення з живленням постійним струмом ідеально узгоджуються з джерелами відновлюваної енергії, зокрема фотоелектричними модулями, гібридними інверторами, буферними акумуляторами. З огляду на те, що сонячні панелі та більшість накопичувачів енергії виробляють та зберігають DC-енергію, застосування освітлення на постійному струмі дає змогу виключити втрати на інверторах і забезпечити високу енергоефективність.

Основні переваги застосування:

1) Пряме підключення без інвертора. Освітлювальні пристрої, зокрема LED-модулі з драйверами типу LDD або HV9961, можуть житись безпосередньо від сонячного контролера або буферного АКБ. Це усуває проміжну ланку у вигляді інвертора, що спрощує систему, підвищує її ККД (до 95–98 %) та знижує вартість.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

2) Незалежність від електромережі. У віддалених районах, сільській місцевості, на об'єктах без централізованого енергопостачання (наприклад, фермерські угіддя, насосні станції, пости охорони) DC-освітлення дозволяє реалізувати автономну систему з нульовим споживанням від мережі.

3) Можливість живлення вночі від акумулятора. У сонячних системах із накопиченням енергії (АКБ 12/24/48 В) світильники можуть житись у нічний час напряму без перемикання та втрат, як це відбувається в системах АС → DC.

4) Інтеграція в розумну інфраструктуру. Гібридні системи з підтримкою Wi-Fi, ZigBee, LoRa дозволяють реалізувати телеметрію та віддалений контроль освітлення (наприклад, ввімкнення в сутінках, адаптивне регулювання яскравості, контроль стану АКБ тощо).

5) Екологічність і довговічність. Відсутність інверторів, вентиляторів та складної електроніки зменшує теплові навантаження, забезпечуючи понад 10 років роботи світильника в польових умовах.

Типові приклади використання:

1) вуличні LED-ліхтарі на сонячних батареях із автономною роботою до 3–5 діб без сонця;

2) системи освітлення сільських клінік та навчальних закладів, що живляться від фотоелектричних модулів 150–300 Вт;

3) освітлення автозупинок, камер відеонагляду, тротуарів і парковок, де світильники живляться від компактних сонячних панелей (20–50 Вт) з АКБ.

Типова структура такої системи включає:

1) сонячну панель → контролер MPPT → буферна АКБ (LiFePO₄ або GEL) → драйвер постійного струму → LED-модуль.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

2. РОЗРОБКА ТА РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ

2.1. Структурна схема приладу

Вдосконалена система освітлення з живленням постійним струмом побудована на основі існуючої, але з урахуванням покращень для підвищення енергоефективності, надійності та керованості. Оновлена структура складається з кількох основних блоків, кожен з яких виконує специфічну роль у підвищенні продуктивності системи.

Джерело живлення (100 В DC)

Система живлення використовує DC джерело, яке подає стабільну напругу на всі елементи системи. Це може бути, наприклад, бортова шина потяга з напругою 100 В.

Вхідний LC-фільтр

Після того, як енергія потрапляє на систему, вона проходить через LC-фільтр, який:

- 1) Зменшує пульсації напруги — фільтр згладжує високочастотні коливання та зменшує шуми, що можуть виникати від джерела живлення.
- 2) Електромагнітна сумісність (ЕМС) — фільтрує можливі перешкоди, що можуть негативно впливати на інші електронні компоненти в системі.

Мікросхема HV9961

Основне удосконалення — заміна старої мікросхеми HV9910В на HV9961.

Ця мікросхема:

- 1) Використовує середньозначне керування струмом, що дозволяє досягти більш точного та стабільного струму в світлодіодах.
- 2) Має вбудовані захисти від короткого замикання, перегріву та перенапруги.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

3) Підвищує ККД до 95%, зменшуючи втрати потужності та тепловиділення.

4) Можливість роботи з різними типами LED-модулів та налаштуванням вихідного струму.

Порівняння характеристик мікросхем HV9961 та HV9910В наведено в табл. 2.1:

Таблиця 2.1 [5]

Характеристика	HV9910В	HV9961
Режим з постійною частотою	Резистор між R_T і GND	Відсутній
Режим з постійним t_{off}	Резистор між R_T і GATE	Резистор між R_T і GND(коригування номіналу при переході до HV9961)
Порогова опорна напруга, мВ	250 або V_{LD} (пікова)	272 або $V_{LD} / 5,5$ (усереднена)
Розкид опорної напруги	10%	Автокалібрування
Стабілізація струму світлодіодів	Незадовільна в багатьох випадках, струм світлодіодів залежить від вхідної та вихідної напруги	Відмінна
Діапазон напруги на LD	0–250 мВ	0,2 (0,15)–1,5 В
Залишковий струм світлодіодів при $V_{LD} = GND$	5% (тип.) від I_{LED} при $V_{LD} = 250$ мВ	0
Поріг захисту від короткого замикання, мВ	Не передбачено	400
Пауза після спрацювання захисту, мкс	Не передбачено	400
Мінімальна тривалість t_{on} , нс	465	1000
Мах скважність	0,5	0,75

На рис.2.1 наведено типову схему підключення мікросхеми HV9961.

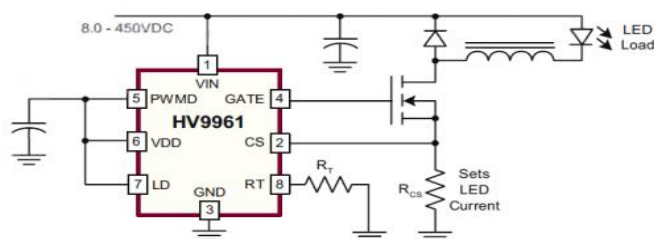


Рис.2.1 Типова схема підключення мікросхеми HV9961 [5]

Порівняння вихідних вольт-амперних характеристик LED-драйверів на основі HV9961 та HV9910В наведено на рис.2.2:

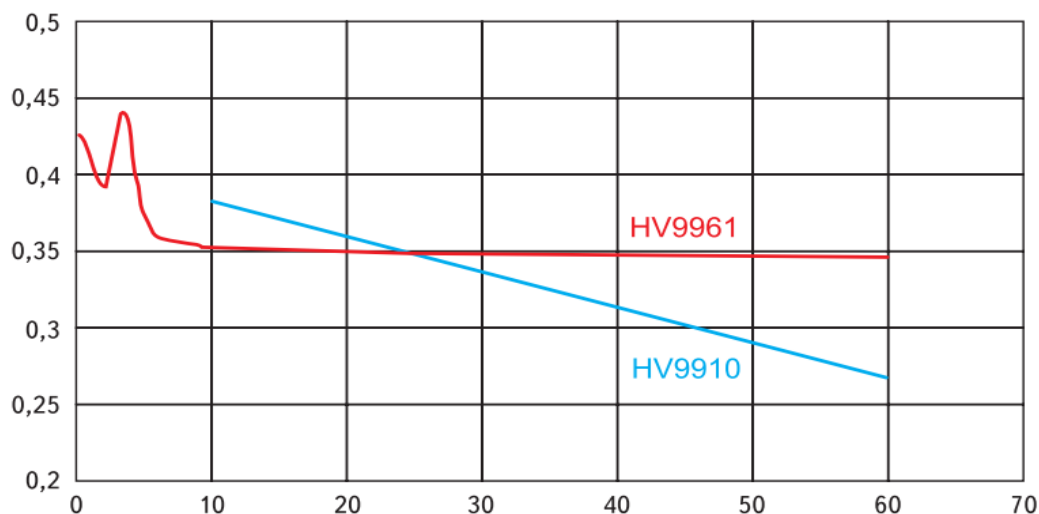


Рис.2.2 Порівняння ВАХ

LED-кільце (світлодіодний модуль)

Виступає як основне навантаження в системі. У даному випадку використовується матриця з 16 світлодіодів, з'єднаних послідовно. Світлодіоди працюють на стабільному струмі, що подається через драйвер HV9961, у свою чергу це дозволяє забезпечити рівномірний світловий потік. Структурну схему приладу наведено на рис.2.3.

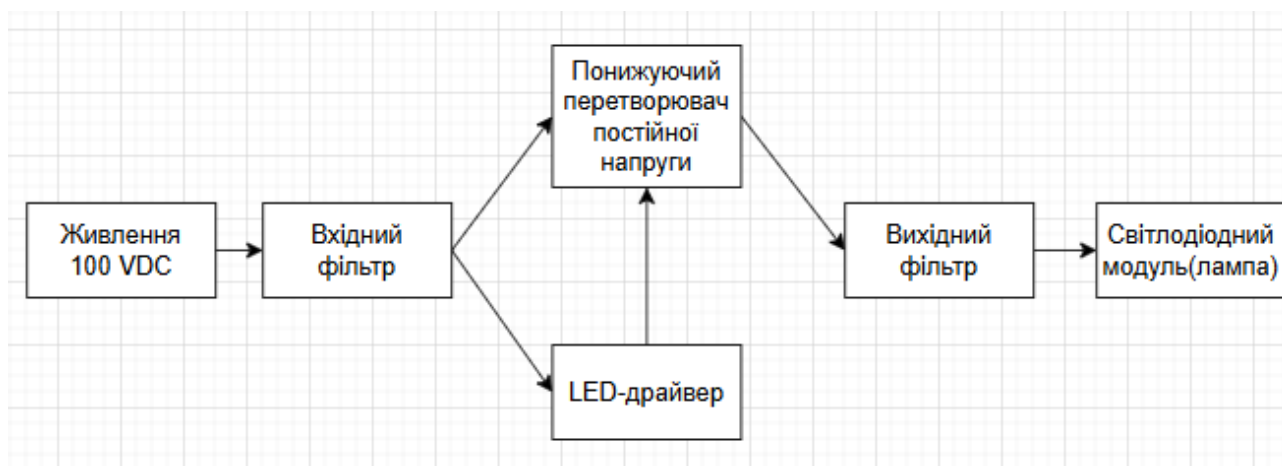


Рис.2.3 Структурна схема приладу

2.2. Принципова електрична схема

2.2.1 Вхідний фільтр

Вхідний фільтр є першою ланкою в електричній схемі пристрою та забезпечує базовий захист та попередню стабілізацію живлення. У даній системі освітлення, що живиться від джерела постійної напруги 100 В, фільтр виконує кілька ключових функцій:

- 1) обмеження пускового струму під час підключення живлення;
- 2) зниження високочастотних перешкод від перетворювача назад у джерело живлення;
- 3) зменшення імпульсних викидів напруги, які можуть негативно впливати на роботу мікросхеми HV9961.

У схемі фільтр реалізовано на елементах R1, C1, C2, які утворюють просту R-C-фільтрувальну мережу.

1) Резистор R1 виконує роль токообмежуючого елемента. Його основна функція — обмеження імпульсного струму при першому заряді вхідних конденсаторів, зниження пікового навантаження на джерело живлення та захист інших компонентів.

2) Конденсатори C1 і C2 паралельно з'єднані між плюсом і мінусом живлення. Вони формують ємнісну частину фільтра, що виконує згладжування пульсацій напруги та високочастотних шумів, зумовлених перемиканням силового ключа перетворювача.

Даний фрагмент схеми, а саме вхідний фільтр наведено на рис.2.4.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

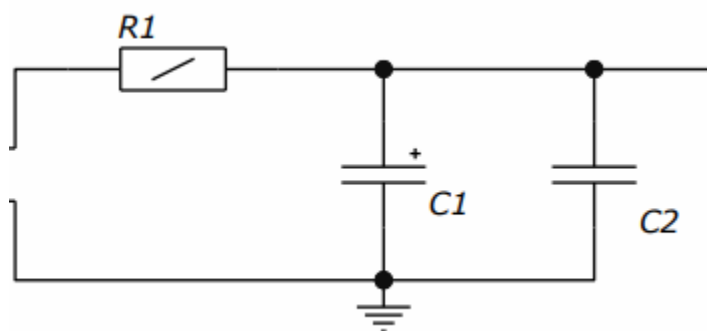


Рис.2.4 Фрагмент схеми (вхідний фільтр)

2.2.2. LED-драйвер (HV9961)

LED-драйвер на основі мікросхеми HV9961 є ключовим елементом схеми керування, який реалізує точне середньозначне керування струмом через світлодіодне навантаження та забезпечує високу стабільність, ефективність і надійність системи. На відміну від простих ШІМ-регуляторів, HV9961 дозволяє реалізувати середньозначний контроль струму з високою точністю без необхідності складної компенсації в контурі зворотного зв'язку.

Основні функції LED-драйвера:

- 1) генерація керуючого сигналу для силового MOSFET-а;
- 2) вимірювання струму через світлодіоди за допомогою шунта;
- 3) реалізація середньозначного керування струмом у режимі фіксованого часу вимкнення;
- 4) забезпечення захисту від перенапруги, короткого замикання та перегріву;
- 5) стабільна робота за широкого діапазону напруг живлення (до 400 В).

Реалізація у схемі

У даній схемі HV9961 працює в режимі понижуючого (buck) перетворювача з фіксованим часом вимкнення ключа [5]. Мікросхема розташована в окремому блоці з наступними елементами об'язки:

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

1) R2 — задає час вимкнення силового ключа через вивід RT. Чим менше значення резистора, тим коротший час вимкнення, що впливає на частоту роботи перетворювача.

2) C5 — фільтрує внутрішню напругу живлення VDD, яка формується вбудованим стабілізатором HV9961.

3) R3 — підтягуючий резистор LD до VDD, що визначає логічний стан входу димування (в даній реалізації фіксований рівень).

4) R4, R5, R6 — елементи ланцюга вимірювання струму. R5 і R6 утворюють струмовий шунт, а R4 формує фільтрований сигнал для входу CS.

5) C6 — ємнісний фільтр на вході CS, зменшує пульсації, викликані перемиканням MOSFET.

Принцип роботи

У процесі роботи HV9961 вимірює падіння напруги на шунті (R5+R6) та порівнює його з внутрішнім еталоном. Після досягнення заданого рівня мікросхема вимикає керуючий сигнал на затвор силового транзистора. Час вимкнення задається резистором R2 (RT). Після його завершення починається новий цикл перемикання.

Таким чином, забезпечується середньозначне регулювання струму, що дозволяє уникнути надлишкових струмових піків та забезпечує більш рівномірну і безпечну роботу світлодіодів.

Даний фрагмент схеми, а саме LED-драйвер наведено на рис.2.5.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Стабільність роботи перетворювача гарантується завдяки чіткому керуванню з боку драйвера HV9961, а оптимальні значення елементів визначено у розділі з розрахунками. Даний фрагмент схеми, а саме понижуючий перетворювач постійної напруги наведено на рис.2.6.

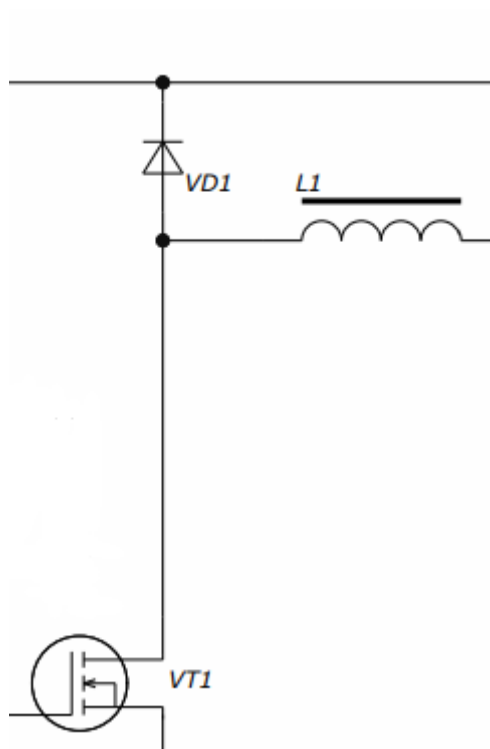


Рис.2.6 Фрагмент схеми (Понижуючий перетворювач постійної напруги)

2.2.4 Вихідний фільтр

Вихідний фільтр у структурі пристрою призначений для згладжування пульсацій напруги після імпульсного перетворювача та забезпечення стабільного живлення світлодіодного модуля. Незважаючи на те, що buck-конвертер працює з відносно високою частотою перемикання, залишкові пульсації напруги можуть спричинити нестабільність яскравості або електромагнітні завади. Для усунення цих ефектів у схемі передбачено фільтраційний елемент — вихідний конденсатор С3.

Конденсатор С3 розташований між виходом перетворювача та загальною шиною (GND) і виконує функцію буфера, який накопичує заряд під час фази

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

провідності та віддає його у фазі вимкнення ключа. Це дозволяє підтримувати постійний рівень напруги на навантаженні та зменшити пульсації струму, що особливо важливо для світлодіодного модуля, чутливого до змін у живленні. Даний фрагмент схеми, а саме вихідний фільтр наведено на рис.2.7.

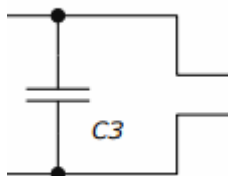


Рис.2.7. Фрагмент схеми (вихідний фільтр)

2.2.5 Електрична схема принципова

Електрична принципова схема освітлювального пристрою побудована на основі понижуючого імпульсного перетворювача, керованого драйвером HV9961. Світлодіодний модуль, зображений на схемі як блок В1, виконує функцію випромінювання світлового потоку. Він складається з 16 дискретних світлодіодів (HL1–HL16), з'єднаних у дві паралельні гілки по 8 послідовно з'єднаних світлодіодів у кожній.

Модуль під'єднується до джерела живлення через роз'єм ХР1, і отримує постійний струм, сформований драйвером HV9961 та силовою частиною buck-перетворювача.

Загальну схему наведено в Додатку Б.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

3. РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ СХЕМИ

3.1. Розрахунок резистора R_{CS}

У LED-драйверах з керуванням середньозначним струмом, таких як HV9961, струм світлодіодного навантаження визначається величиною напруги на вході CS, що знімається з резистора струмового контролю — R_{CS} . Цей резистор у нашій схемі реалізується як послідовне з'єднання $R_5 + R_6$.

Для забезпечення стабілізації струму через LED-модуль, вхід CS мікросхеми порівнює напругу на R_{CS} з внутрішнім пороговим рівнем.

Формула для розрахунку:

$$R_{SC} = \frac{V_{SC(th)}}{I_{LED}}, \quad (3.1)$$

де R_{SC} — шуканий опір резистора струмового шунта, Ом, $V_{CS(th)}$ — порогове значення напруги, при якому драйвер відключає ключ, для HV9961 воно становить 0.25 В [5], I_{LED} — бажаний струм через LED-навантаження, в нашій схемі це 0.35 А.

Підставлення значень:

$$R_{SC} = \frac{0.25}{0.35} \approx 0.714(\text{Ом}) \quad (3.2)$$

Найближче стандартне значення за рядом E24 — 0.68 Ом або 0.75 Ом, проте для точнішої реалізації можливо використати два з'єднані паралельно резистори номіналом по 1.4 Ом, що дасть:

$$R_{eq} = \frac{1.4 \cdot 1.4}{1.4 + 1.4} = 0.7(\text{Ом}) \quad (3.3)$$

Це лише на 1.9 % менше від розрахункового значення й цілком допустимо для системи з точністю $\pm 3\%$ [5].

Розрахунок потужності розсіювання

Резистор розсіює теплову потужність згідно формули:

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

$$P = I_{LED}^2 \cdot R_{CS} \quad (3.4)$$

Підставляємо:

$$P = 0.35^2 \cdot 0.714 \approx 0.0875(\text{Вт}) \quad (3.5)$$

Резистор повинен мати запас — рекомендується мінімум 0.25 Вт або два по 0.125 Вт паралельно.

3.2. Розрахунок резистора R_T (R_2)

Мікросхема HV9961 використовує метод керування з фіксованим часом виключення силового ключа (constant off-time). Частота перемикання залежить від опору резистора R_{T} , що підключається до відповідного виводу R_T . Цей параметр критично впливає на ефективність перетворення, розміри дроселя, а також рівень електромагнітних завад.

Згідно з [5], частота перемикання задається формулою:

$$f_{SW} = \frac{1}{1.5 \cdot R_T \cdot 10^{-9}}, \quad (3.6)$$

де f_{SW} — бажана частота перемикання, Гц, R_T — номінал резистора R_2 , Ом.

Вибір робочої частоти

Для портативних, мініатюрних систем освітлення на постійному струмі, таких як у транспорті, доцільно використовувати частоти в діапазоні 200–500 кГц, щоб забезпечити:

- 1) зменшення розміру фільтрів і індуктивностей;
- 2) зниження шуму в діапазоні 50–150 кГц (чутливому до слуху);
- 3) покращення ККД при малому навантаженні.

Тоді маємо значення:

$$f_{SW} = 250 \cdot 10^3 = 250(\text{кГц}) \quad (3.7)$$

Вибираємо стандартний номінал резистора:

$$(3.8)$$

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

$$R_T = 2.7(\kappa O M)$$

Це дає реальну частоту:

$$f_{SW} = \frac{1}{1.5 \cdot 2.7 \cdot 10^3 \cdot 10^{-9}} \approx 247(\kappa Гц), \quad (3.9)$$

що відповідає допуску $\pm 5\%$ і є цілком прийнятним для цієї мікросхеми [5].

3.3. Розрахунок індуктивності дроселя L_1

Дросель L_1 у схемі на базі HV9961 є ключовим елементом понижувального імпульсного перетворювача (buck-converter). Він забезпечує:

- 1) накопичення енергії під час відкриття ключа;
- 2) передачу енергії до навантаження в фазі вимкнення;
- 3) обмеження струмових пульсацій через світлодіоди.

Оптимальне значення індуктивності дозволяє зменшити рівень шумів, розміри вихідного фільтра, та підвищити ефективність перетворення.

Для Buck-конвертера у режимі перемикання з фіксованим off-time, індуктивність визначається за формулою:

$$L = \frac{V_{OUT} \cdot (1 - D)}{f_{SW} \cdot \Delta I_L}, \quad (3.10)$$

де L — шукане значення індуктивності, Гн, V_{OUT} — напруга на світлодіодному навантаженні, D — коефіцієнт заповнення (duty cycle), f_{SW} — частота перемикання (із попереднього розрахунку ≈ 250 кГц), ΔI_L — пульсації струму через дросель (зазвичай 20–40 % від I_{LED}).

Прийняті параметри:

$$V_{OUT} = 48(V) \text{ — світлодіоди (16 штук по 3 В)}, \quad (3.11)$$

$$I_{LED} = 0.35(A), \quad (3.12)$$

$$\Delta I_L = 0.35 \cdot 0.3 = 0.105(A), \quad (3.13)$$

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

$$V_{IN} = 55(B) \Rightarrow D = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{48}{55} \approx 0.873, \quad (3.14)$$

і значення частоти маємо вже пораховане у формулі (3.6)

$$f_{SW} = 250 \cdot 10^3 = 250(\text{кГц}).$$

Розрахунок:

$$L = \frac{48 \cdot (1 - 0.873)}{250000 \cdot 0.105} = \frac{48 \cdot 0.127}{26250} \approx \frac{6.096}{26250} \approx 0.000232(\text{Гн}), \quad (3.15)$$

звідси маємо $L \approx 232(\mu\text{H})$ та обираємо стандартну індуктивність, наприклад, Würth 744773022 [6], струм до 0.7 А, низький ESR, підходить для частоти до 500 кГц.

3.4. Розрахунок вихідного фільтруючого конденсатора C_3

Конденсатор C_{OUT} згладжує струмові пульсації після індуктивності та забезпечує стабільність напруги на світлодіодах. Його правильний вибір дозволяє:

- 1) мінімізувати мерехтіння;
- 2) зменшити електромагнітні завади;
- 3) покращити роботу у режимі часткових навантажень.

Розрахункова формула для buck-конвертера базова формула для мінімальної ємності конденсатора має вигляд:

$$C_{OUT} \geq \frac{I_{LED}}{\Delta V_{OUT} \cdot f_{SW}}, \quad (3.16)$$

де C_{OUT} — шуканий конденсатор, I_{LED} — струм навантаження, D — коефіцієнт заповнення, ΔV_{OUT} — допустимі пульсації напруги (зазвичай 1–5 % від V_{OUT}), f_{SW} — частота перемикання.

Рахуємо:

$$(3.17)$$

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

$$\Delta V_{OUT} = 0.01 \cdot V_{OUT} = 0.48(B),$$

Прийняті значення з минулих розрахунків:

$$V_{OUT} = 48(B), \quad (3.18)$$

$$I_{LED} = 0.35(A), \quad (3.19)$$

$$D = 0.873, \quad (3.20)$$

і значення частоти з формули (3.6), $f_{SW} = 250 \cdot 10^3 = 250(\text{кГц})$.

Розрахуємо конденсатор:

$$C_{OUT} \geq \frac{0.35 \cdot 0.873}{0.48 \cdot 250000} \approx \frac{0.3055}{120000} \approx 2.54 \cdot 10^{-6}(\Phi), \quad (3.21)$$

Вибір компонента:

З урахуванням температурної стабільності, імпульсного режиму та низького ESR, оптимальним варіантом буде:

- 1) керамічний або MLCC конденсатор типу X7R або C0G,
- 2) з номіналом 4.7...10 μF , на 63 В або більше,
- 3) наприклад: Murata GRM32ER71J106KA12L (10 μF , 63 В, X7R) [7].

Це дозволяє зменшити пульсації вдвічі від допустимого рівня та підвищити ресурс.

3.5. Розрахунок діода D₁

У схемі buck-конвертера діод VD₁ забезпечує шлях для струму через індуктивність у фазі вимкнення силового ключа VT₁. Під час закриття ключа накопичена енергія індуктивності розряджається через цей діод у навантаження. Від надійності та швидкодії діода залежить ККД перетворювача, величина пульсацій, а також нагрівання елементів.

Основні вимоги до діода:

- 1) Швидкодія — обов'язково використовуються fast-recovery або Schottky-діоди.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

- 2) Зворотна напруга $U_{RRM} \geq U_{IN} + \text{запас (на 20–30 \%)}.$
- 3) Середній прямий струм $I_{F(AV)} \geq I_{LED}$
- 4) Мале пряме падіння напруги U_F — для зниження теплових втрат.

Використаємо вхідні дані та результати минулих розрахунків:

$$V_{OUT} = 48(B), \quad (3.22)$$

$$I_{LED} = 0.35(A), \quad (3.23)$$

$$f_{SW} = 250 \cdot 10^3 = 250(\text{кГц}). \quad (3.24)$$

Підберемо параметри діода:

- 1) Напруга пробою:

$$V_{RRM} \geq 1.3 \cdot V_{IN} = 1.3 \cdot 100 = 130(B) \quad (3.25)$$

- 2) Середній струм:

$$I_{F(AV)} \geq 0.35(A) \quad (3.26)$$

- 3) Тип:

Найкраще підійде діод Шоттки, він швидкий, має малий V_f , низький рівень шуму.

Тому обираємо варіант Nexperia PMEG2010ER [8]:

- 1) 200 В, 1 А, $V_f = 0.35$ В;
- 2) SOD123 або SMA корпус, мале падіння напруги, висока швидкодія;
- 3) Працює до 500 кГц — повністю сумісний із HV9961.

3.6. Розрахунок силового MOSFET-транзистора VT_1

Польовий транзистор (MOSFET) VT_1 є головним керованим силовим елементом buck-конвертера. Він комутує струм від джерела живлення через індуктивність L_1 у фазі "ввімкнено". Його параметри напряму впливають на:

- 1) ефективність перетворення (ККД);
- 2) електромагнітні завади;

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

- 3) теплові втрати і надійність;
- 4) сумісність із драйвером (HV9961).

Основні критерії вибору:

1) Напруга пробою (V_{DS}) мінімум 20–30 % запасу від максимальної вхідної напруги:

$$V_{DS} \geq 1.3 \cdot V_{IN} = 1.3 \cdot 100 = 130(B) \quad (3.27)$$

2) Максимальний струм (I_D) повинен перевищувати пік струму в індуктивності:

$$I_D \geq I_{LED} \cdot 1.5 = 0.35 \cdot 1.5 = 0.525(A) \quad (3.28)$$

3) Низький опір $R_{DS(on)}$, щоб зменшити теплові втрати.

4) Мала зарядка затвора (Q_g) для сумісності з драйвером HV9961, який має обмежені можливості керування затвором.

Використаємо параметри з минулих пунктів:

$$V_{IN} = 100(B), \quad (3.29)$$

$$I_{LED} = 0.35(A), \quad (3.30)$$

$$f_{SW} = 250 \cdot 10^3 = 250(\kappa\Gamma\text{ц}). \quad (3.31)$$

$$\Delta I = 30\% \Rightarrow \text{нік} \approx 0.4(A) \quad (3.32)$$

Тип керування — звичайний драйвер без підсилення струму (не придатний для транзисторів із великим Q_g).

Обраний варіант:

IPA60R380C6 (Infineon) [91fdf]

- 1) 600 В, 4.7 А, $R_{DS(on)} = 0.38$ Ом;
- 2) $Q_g = 10.5$ нКл — сумісний з HV9961;
- 3) Корпус ТО-220 або DPAK;
- 4) Частота роботи до 500 кГц.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Розрахунок втрат на провідність:

$$P = I^2 \cdot R_{DS(on)} = 0.35^2 \cdot 1.4 \approx 0.17(Bm) \quad (3.33)$$

Достатньо пасивного охолодження (радіатор не обов'язковий при хорошій вентиляції).

3.7. Розрахунок фільтра контролю струму (R₄ - C₆)

Фільтр R₄-C₆ підключено між струмовим шунтом R_{CS} (R₅ + R₆) та входом CS мікросхеми HV9961. Його головна функція — приглушення високочастотних пульсацій і шумів, які можуть викликати помилкове спрацьовування струмового захисту та нестабільну роботу.

Роль елементів:

- 1) R₄ обмежує струм через вхід CS і створює RC-ланку;
- 2) C₆ забезпечує інтегруючу дію та приглушення імпульсних завад;
- 3) RC-фільтр також мінімізує вплив імпульсних перешкод на мікросхему, особливо на високих частотах (200+ кГц).

Рекомендовані значення згідно з документацією Microchip [5]:

Типова RC-константа:

$$\tau = R_4 \cdot C_6 \approx 0.5(\mu s) \quad (3.34)$$

Рекомендований опір:

$$R_4 = 1(kOm) \quad (3.35)$$

Тоді ємність:

$$C_6 = \frac{0.5 \cdot 10^{-6}}{1000} = 0.5(nF) \quad (3.36)$$

3.8. Розрахунок елементів вхідного фільтра (R₁, C₁, C₂)

Елементи R₁, C₁ та C₂ утворюють вхідний RC-фільтр, призначений для:

- 1) згладжування пульсацій напруги живлення,
- 2) обмеження пускового струму при заряджанні вхідних конденсаторів,

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

3) зменшення високочастотних завад, що можуть проникати з джерела живлення у внутрішні вузли драйвера.

Розрахунок R_1 :

Під час першого ввімкнення схеми відбувається швидкий заряд C_1 та C_2 , що може призвести до надмірного імпульсу струму. Для обмеження цього струму встановлюється резистор R_1 . Його номінал вибирають виходячи з компромісу: з одного боку — обмеження струму, з іншого — мінімальні втрати під час нормальної роботи.

Допустимий пусковий струм обмежимо значенням $I_{\text{пуск}} \leq 1.5 \text{ А}$. Тоді:

$$R_1 \geq \frac{V_{in}}{I_{\text{пуск}}} = \frac{100}{1.5} = 66.7(\text{Ом}) \quad (3.37)$$

Обираємо найближчий стандартний номінал, $R_1=68(\text{Ом})$.

Розрахунок конденсаторів C_1, C_2 — вхідне згладжування:

Конденсатори C_1 та C_2 забезпечують первинну фільтрацію напруги живлення після джерела. Для стабільної роботи драйвера вони повинні мати достатню ємність, щоб згладжувати пульсації від комутації на частоті $f=250 \text{ кГц}$.

Розрахунок мінімальної ємності (припустимі пульсації на вході — не більше 2 В):

$$C_{\text{мін}} = \frac{I}{2 \cdot f \cdot \Delta V} = \frac{0.35}{2 \cdot 250000 \cdot 2} = 350(\text{мкФ}), \quad (3.38)$$

де $\Delta V=2\text{В}$, $I=0.35\text{А}$, $f=250\text{кГц}$.

Беремо два конденсатори C_1 і C_2 по 220 мкФ, тоді сумарна ємність у паралельному з'єднанні буде 440 мкФ.

Це забезпечує стабільне живлення для всієї схеми та знижує амплітуду пульсацій на вході.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

3.9 Розрахунок елементів обв'язки мікросхеми HV9961 (R_3 , C_4 , C_5)

Для забезпечення стабільної роботи ШІМ-драйвера HV9961, необхідно правильно підібрати допоміжні елементи обв'язки, що підключаються до виводів мікросхеми: підтягуючі резистори, конденсатори живлення та фільтруючі елементи. У цій схемі використовуються резистор R_3 та конденсатори C_4 і C_5 .

Згідно з [5], рекомендований номінал $R_3=10\text{ кОм}$.

Цей резистор забезпечує надійне підтягування входу LD до V_{DD} та запобігає випадковому запуску дімування або нестабільній роботі.

Конденсатор C_4 — фільтрація LD або RT. Вивід LD може бути чутливим до завад. Для фільтрації високочастотних перешкод та стабілізації потенціалу LD паралельно до R_3 підключаються конденсатори. У схемі застосовано конденсатор C_4 , який з'єднаний між LD і землею. Для цього вузла типово використовують керамічні конденсатори ємністю $C_4=1\text{ нФ}$.

Це значення дозволяє ефективно фільтрувати сигнали на частотах вище 100 кГц, не впливаючи на статичне значення напруги на вході.

Конденсатор C_5 — фільтрація живлення V_{DD} для живлення мікросхеми HV9961 використовується внутрішній стабілізатор на виводі V_{DD} , до якого обов'язково необхідно підключити конденсатор фільтрації. Цей елемент забезпечує стабільність живлення внутрішніх ланцюгів та запобігає запуску через завади.

Рекомендоване значення згідно з [5] $C_5=100\text{ нФ}$.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

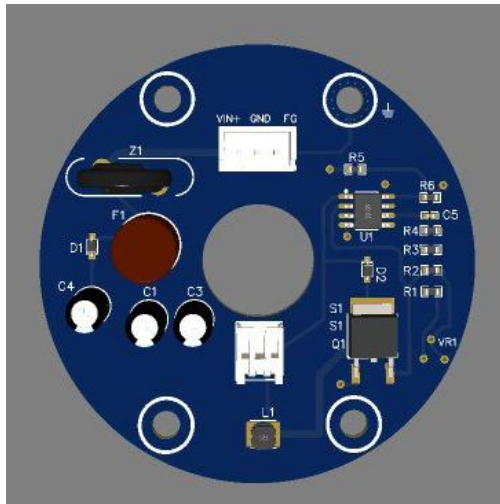


Рис. 4.3. Модель плати LED-драйвера у середовищі EasyEDA [11].

2) зовнішнє кільце – для встановлення 16 світлодіодів та розведення їх у вигляді однорідної підсвітки по периметру.

3D модель плати LED-модуля наведено на рис.4.4.

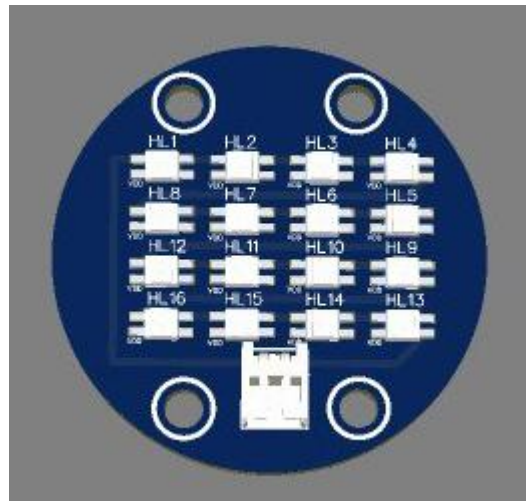


Рис. 4.4. Модель плати LED-модуля у середовищі EasyEDA [11].

Плати виготовляється з двошарового склотекстоліту FR4 товщиною 1,6 мм, з мідним шаром 35 мкм на кожному боці. Це дозволяє розмістити всі SMD-компоненти на верхньому шарі, а нижній шар використовується як суцільна площа заземлення для підвищення EMC та покращення тепловідведення.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного проєкту була досягнута поставлена мета – розроблено вдосконалену освітлювальну систему з живленням постійним струмом, що забезпечує стабільну роботу LED-модуля при підвищеній енергоефективності.

Проведений у першому розділі огляд літературних джерел дозволив з'ясувати сучасні тенденції та переваги застосування систем на постійному струмі у транспортній інфраструктурі, зокрема в умовах інтенсивного використання. Встановлено, що постійна напруга живлення, на відміну від змінної, дозволяє зменшити втрати енергії, підвищити надійність та сумісність з альтернативними джерелами енергії.

У другому розділі було здійснено проєктування структурної та функціональної схем пристрою. Особливу увагу приділено вибору топології та ключових вузлів, таких як LED-драйвер HV9961, що забезпечує надійне керування струмом світлодіодного кільця. Було враховано особливості експлуатації, зокрема фіксовану кількість світлодіодів (16 шт.) та необхідність забезпечення стабільної яскравості без ШІМ-регулювання.

У третьому розділі виконано повний розрахунок елементної бази схеми. Усі компоненти підібрані відповідно до технічних умов: розраховано номінали дроселя, ємностей, резисторів зворотного зв'язку та струмового шунта, а також обрано відповідний MOSFET та діод Шоттки.

У четвертому розділі розглянуто процес розробки друкованої плати та конструктивної реалізації. Враховано вимоги до форми (кругла плата з діаметром 71 мм), до розміщення контактних отворів та до зручності інтеграції в наявну систему вагона. Було дотримано правил електромагнітної сумісності та тепловідведення. Таким чином, у межах дипломного проєкту реалізовано

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

повноцінний інженерний цикл – від аналізу сучасних рішень до розрахунку, підбору компонентів і розробки кінцевої конструкції.

					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

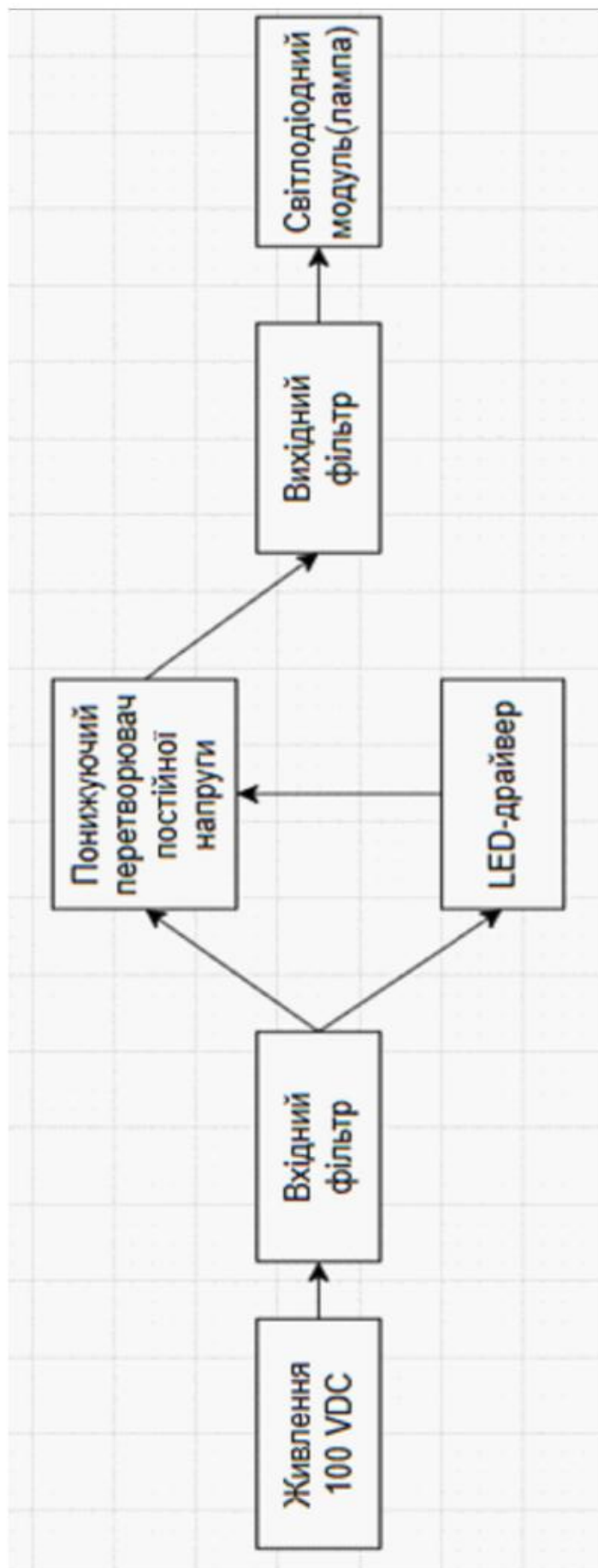
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhang H., Wang X., Li Q. Super-efficient Lighting Systems Based on DC Power Distribution // IEEE Trans. Power Delivery. – 2020. – Vol. 35(2). – P. 948–956.
2. Кулік С. І. Основи схемотехніки. — К.: Техніка, 2016. — 312 с.
3. Philips Lighting. Xitanium LED Drivers – Technical Application Guide. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.assets.signify.com/is/content/PhilipsLighting/Assets/philips-lighting/global/20210224-xitanium-application-guide.pdf> – Дата звернення: 05.06.2025.
4. MeanWell. LDD-H Series DC-DC LED Driver Datasheet. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.meanwell.com/webapp/product/search.aspx?prod=LDD-H> – Дата звернення: 05.06.2025.
5. HV9961 Datasheet. Microchip Technology Inc. – 2018. – 19 р. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.microchip.com/en-us/product/hv9961> – Дата звернення: 05.06.2025.
6. Würth Elektronik. Application Note: Design of Inductors for LED Drivers. 2021.
7. Murata. "Design Considerations for Ceramic Capacitors in High-Frequency Power Converters", 2021. [Електронний ресурс] – <https://www.murata.com> – Дата звернення: 12.06.2025.
8. Nexperia PMEG2010ER Datasheet. – [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.nexperia.com/products/PMEG2010ER> – Дата звернення: 12.06.2025.
9. Infineon IPA60R380C6 Datasheet. – [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.infineon.com/dgdl/IPA60R380C6.pdf> – Дата звернення: 13.06.2025.
10. Erickson R., Maksimović D. *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd ed. – Springer, 2001.

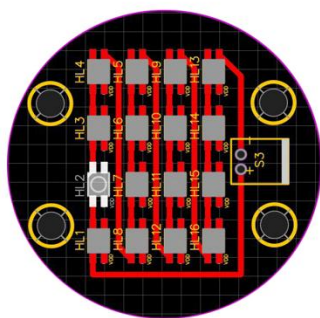
					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

11. <https://easyeda.com>.
12. Nordman B., Piette M.A. DC Power for Buildings. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2016. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://eta.lbl.gov/publications/dc-power-buildings>
13. EMerge Alliance. DC Power Standards. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.emergealliance.org/standards/>
14. IEEE Std 1789-2015. IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers. – IEEE, 2015.
15. Texas Instruments. TPS92515 Wide-Input Voltage LED Driver. Datasheet. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps92515.pdf>
16. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Direct-DC Power Systems for Energy Efficiency and Renewable Integration. – NREL, 2019. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72287.pdf>
17. Huang J., Nie R. Evaluation on LED Lighting Driving Power Supply for Urban Rail Vehicles // *Heliyon*, 2024.
18. Pham T. et al. Operational and Safety Considerations for Light Rail DC Traction Systems. – TRB Circular E058, 2001.
19. IEEE PAR 1789. Recommending practices for modulating current in High Brightness LEDs for mitigating health risks to viewers. – IEEE Std PAR1789, 2010.
20. Dastjerdi A.M., Rezaei N. *Design and Optimization of a DC Microgrid Lighting System Integrated with Solar Power*. – *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 45, 2021. – P. 101–109.

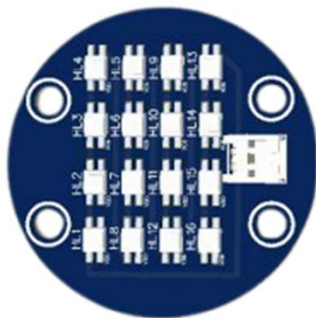
					ДП.ДС-11.07.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60



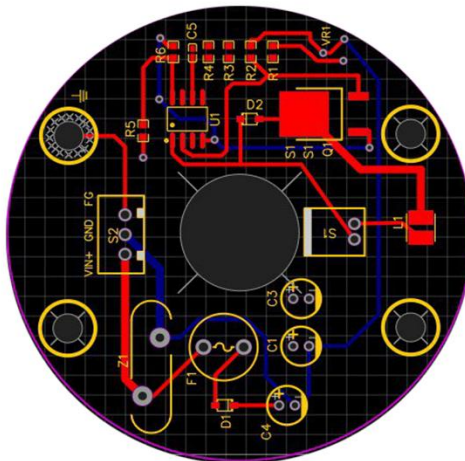
ДП ДС-11.007.000 ЕЗ		Мас	Маса	Кількість
Схема електрична приладів призначена для роботи				
№	Назва	Мас	Маса	Кількість
1	Схема електрична приладів призначена для роботи	7,1		
ДП в Додатку (Сторінка)				
ДП-27				



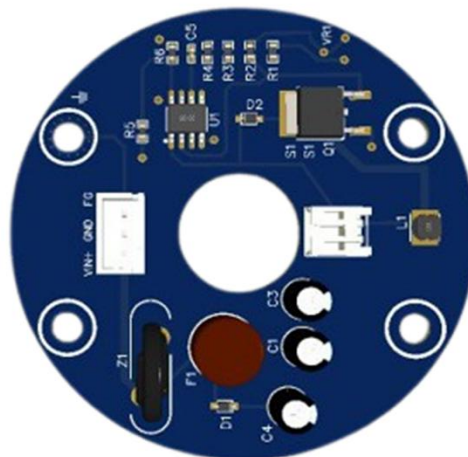
Трасування плати LED-модуля



3D модель плати LED-модуля



Трасування плати LED-драйвера



3D модель плати LED-драйвера

ДЛПДС-1107.000 ТК		Лист	Всього	Відомості
Дат. розробки	ВР. Версія	Познач.	Вид	Р/П
Виконав	Перевірив	Відомості	Листів	
Проєктант	Відомості	Листів		
Перевірив	Відомості			
Листів				
Всього				
КРП. Ім. Серія. Сторінка				
[]-[]-[]				

ДОДАТОК Г

Позначення	Найменування	Кільк.	Примітка
<i>Резистори</i>			
R1	1W 2512(RC2512JK-68R-Hitano) - 1W - 68 Ом ±5%	1	
R2	CRMA1206AF2K70FKEF - 0,30W - 2,7 кОм ±1%	1	
R3	RJ1206-10K-HS - 0,25W - 10 кОм ±5%	1	
R4	RC0603FR-071KL-YAGEO - 0,1W - 1 кОм ±1%	1	
R5, R6	FMP100FRF52-1R4 - 1W - 1,4 Ом ±1%	2	
<i>Конденсатори</i>			
C1, C2	ECR221M2EB-Hitano - 220 мкФ - 250V	2	
C3	GRM32ER71J106KA12L - 10 мкФ - 63V	1	
C4	0603 AVX - 1 нФ - 50V	1	
C5	CC0805KRX7R9BB104 - 100 нФ ±10% - 50V	1	
C6	F43PR3500ZD00K - 0,5 нФ ±10% - 220V	1	
<i>Індуктивність</i>			
L1	744773022 - 2,2 мкГн ±20%	1	
<i>Діод</i>			
D1	Nexperia PMEG2010ER	1	
<i>MOSFET-транзистор</i>			
D3	IPA60R380C6 (Infineon)	1	

ДП.ДС - 11.07.000 СП				
Змін	Арк	№ докум	Підпис	Дата
Розроб.	Тарасенко Д.В.			
Перев.	Бондаренко О.Ф.			
Н.контр	Батрак Л.М.			
Затв.	Бондаренко О.Ф.			
Перелік компонентів				
		Літера	Аркуш	Аркушів
			1	1
НТУУ "КПІ"				

S U M M A R Y

This diploma project focuses on the development and improvement of a DC-powered LED lighting system, primarily designed for use in high-speed railway transport. The system is based on a modular structure comprising a constant current driver and a circular LED module, intended to replace or enhance existing lighting solutions in Intercity-type trains. The relevance of this work stems from the need to increase system efficiency, reliability, and electromagnetic safety in modern transport environments.

The core objective of the project is to modernize the existing LED lighting system by replacing critical components, optimizing the schematic structure, and introducing a high-performance driver based on the HV9961 integrated circuit. This allows for improved current control, reduced component count, enhanced thermal stability, and an increase in overall luminous efficacy.

Research methods include the analysis of current industry solutions, literature review, simulation and modeling in electronic CAD software, calculation of power elements, and circuit-level validation. The project thoroughly examines the physical principles of LED operation, justifies the choice of a buck-type converter topology, and explores the behavior of power semiconductors under various operating modes.

The system integrates a multi-stage architecture:

- An input protection and filtering module for voltage stabilization;
- A buck-type DC-DC converter for efficient voltage step-down;
- A high-accuracy current regulation stage based on the HV9961 controller;
- An LED load board with a fixed-brightness circular LED configuration;
- A protection system that includes overcurrent, thermal, and short-circuit safeguards.

One of the key contributions of the project is the detailed calculation of the power stage, including the inductor, output capacitor, sense resistors, and switching MOSFET. Real

components are selected from manufacturers such as Vishay, Infineon, and Murata, ensuring practical applicability.

From the practical standpoint, the improved system provides a higher power factor, consistent light output, and reduced electromagnetic interference, making it suitable for demanding use in rolling stock. The proposed design also supports scalability and integration into wider DC-based power distribution systems, which are increasingly adopted in railway and industrial sectors.

The project includes a comprehensive list of design documents such as a functional schematic diagram, a full PCB layout in Sprint Layout format, calculation spreadsheets, and simulation results. It also presents a visual comparison between traditional lighting and the developed DC system in terms of power loss and maintenance requirements.

The technological solutions implemented in the project are in line with global trends toward energy-efficient and DC-based infrastructure. By focusing on reliability, long-term operation, and safety under transport conditions, this system has the potential for integration into future smart transport networks.

In conclusion, the diploma project "DC-Powered LED Lighting System for Railway Transport" presents a robust and forward-looking solution for enhancing lighting technologies in high-reliability domains. It demonstrates how modern driver ICs and thoughtful power electronics design can improve both efficiency and performance in real-world applications.