

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії

Паперовська Сніжана Романівна

**Мікропроцесорний регулятор струму для
потужних світлодіодів / Microprocessor current
regulator for powerful LEDs**

спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія
освітньо-професійна програма – Комп'ютерна інженерія

Випускна кваліфікаційна робота

Виконав: студент групи КІ-41
Паперовська Сніжана Романівна

Науковий керівник
І.Р. Паздрій

АНОТАЦІЯ

Паперовська С.Р. Мікропроцесорний регулятор струму для потужних світлодіодів. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія», освітньо-професійна програма. Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2025

Робота написана обсягом 60 сторінок і містить 19 рисунків, 1 таблиці, 2 додатки та 28 джерел за переліком посилань. Обсяг графічного матеріалу 2 аркуші формату А3.

Метою дипломного проекту є реалізація мікропроцесорного регулятора струму для потужних світлодіодів.

В ході написання дипломного проекту проаналізовані аспекти живлення світлодіодів, показано важливість регулювання струму, а не напруги. Зростання струму призводить до зростання споживаної потужності і теплової енергії, що призводить до виходу з ладу світлодіода.

У результаті написання дипломного проекту пропонується мікропроцесорний регулятор струму для потужних світлодіодів. Основною перевагою запропонованого рішення є енергоефективність, що досягається використанням вихідного каскаду, який працює у двох режимах. Цифрове керування забезпечує встановлення та стабілізацію струму. Запропоноване рішення містить недорогі електронні компоненти завдяки використанню в схемі недорогого мікроконтролера сімейства AVR8. Мікроконтролер виконує необхідні функції. Також, без модифікації схеми, програмно можуть бути змінені параметри керування. Схема є альтернативою широкому спектру спеціалізованих малопотужних інтегральних схем, дозволяє значно збільшити допустимий вихідний струм.

Завдяки модульній конструкції мікроконтролера можна розширити його функціональність.

Ключові слова: СВІТЛОДІОД, ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР.

ANNOTATION

Paperowska S.R. Microprocessor current controller for high-power LEDs. – Manuscript.

Qualification work for obtaining the educational degree of 'bachelor' in the specialty 123 'Computer Engineering', educational and professional program. Western Ukrainian National University, Ternopil, 2025.

The work is written with a volume of 60 pages and contains 19 figures, 1 tables, 2 appendices, and 28 sources as per the list of references. The volume of graphic material is 2 sheets of A3 format.

In the course of writing the diploma project, the aspects of LED power supply were analyses, and the importance of regulating current rather than voltage was shown. An increase in current leads to an increase in power consumption and thermal energy, which leads to LED failure.

As a result of this thesis project, a microprocessor-based current regulator for high-power LEDs is proposed. The main advantage of the proposed solution is energy efficiency, which is achieved by using an output stage that operates in two modes. Digital control provides current setting and stabilization. The proposed solution contains inexpensive electronic components due to the use of an inexpensive microcontroller of the AVR8 family in the circuit. The microcontroller performs the required functions. Also, without modifying the circuit, the control parameters can be changed by software. The circuit is an alternative to a wide range of specialized low-power integrated circuits, and allows for a significant increase in the permissible output current.

Thanks to the modular design of the microcontroller, its functionality can be expanded.

Keywords: LED, SOURCE OF POWER, SHIFT-PULSE MODULATION, MICROCONTROLLER.

ЗМІСТ

Вступ	9
1 Стан проблемної області	12
1.1 Відомі рішення	12
1.2 Формування вимог	19
1.3 Аналіз технічного завдання та постановка задач	23
2 Схеми для живлення і керування потужними світлодіодами	25
2.1 Перетворювачі постійного струму	25
2.2 Імпульсні понижувальні перетворювачі	28
2.3 Порівняння блоків живлення світлодіодів постійного струму	31
3 Мікропроцесорний регулятор струму потужних світлодіодів	34
3.1 Опис мікропроцесорного регулятора струму світлодіодів	34
3.2 Результати експериментів	38
3.3 Рекомендації щодо застосування	43
Висновки	46
Список використаних джерел	47
Додаток А Техніко-економічне обґрунтування проекту	49
Додаток В Світлокопія публікації	59

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ РЕГУЛЯТОР СТРУМУ ДЛЯ ПОТУЖНИХ СВІТЛОДІВ	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Паперовська С.					8	
Перевір.		Паздрій І.Р.						
Консульт.		Савка Н.Я.						
Н. контр.		Дубчак Л.О.						
Затверд.		Дубчак Л.О.				ЗУНУ. ФКІТ. КІ - 41		

ВСТУП

Основною метою при проектуванні будь-якого джерела світла є досягнення максимально можливої світлової віддачі при мінімально можливих виробничих витратах. Дизайнери зосереджуються переважно на оптимізації оптичних, теплових і механічних параметрів. При проектуванні електролюмінесцентного освітлення також важливо пам'ятати про вибір схеми керування та живлення, яку зазвичай називають драйвером [1]. Схема мікропроцесорного контролера струму потужного світлодіода повинна мати достатню потужність за напругою та струмом, тобто забезпечувати регулювання напруги та струму в усьому робочому діапазоні світлодіодів. Крім того, схеми драйверів повинні правильно реагувати на ряд факторів, таких як:

- внутрішні природні - зміна робочої температури світлодіодів, яка має значний вплив на якість світла, що виробляється світлодіодами;
- зовнішні ненавмисні - коливання напруги живлення і невеликі перенапруги можуть дуже швидко перегоріти світлодіоди;
- зовнішні навмисні - регулювання рівня світлового потоку.

Ці параметри мають значний вплив на роботу всього світильника, але на етапі проектування відходять на другий план. Світлодіодний мікропроцесорний контролер струму потужного світлодіода має найбільш складну і запутану структуру з усіх компонентів світильника. Тому він найбільш схильний до пошкоджень і суттєво впливає на термін служби твердотільних джерел світла. Грамотно підібрана система управління і живлення істотно впливає на ефективність і якість світла всього світильника, а також забезпечує безпеку користувача, наприклад, за рахунок відділення напруги мережі від інших елементів світильника. Драйвери також можуть передбачати захист від перенапруги, короткого замикання або перегріву [2].

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зростання сфер застосування світлодіодів зумовлене здешевленням не лише самих світлодіодів, а й драйверів до них. Розробкою мікросхем драйверів для світлодіодів займається компанія Semiconductor Components Industries LLC, яка є частиною корпорації ON Semi. Мікросхеми цього типу мають позначення з префіксами NSI, NCL, NUD, NLSF, NCP. Зокрема, серія драйверів NCL30xxx, створена підрозділом ON Semi, призначена для застосування у світлодіодних освітлювальних приладах з низьким, середнім і високим рівнем потужності.

Один із головних способів підвищення ефективності пристроїв - це поліпшення ККД імпульсних перетворювачів, які використовуються в джерелах живлення світлодіодних світильників. При проектуванні схем керування для світильників із мережевим живленням вирішальне значення мають зростання ККД та потужності. Важливим елементом у створенні потужних і ефективних джерел живлення є впровадження технології корекції коефіцієнта потужності (ККП). У сучасних джерелах живлення великої потужності зазвичай використовується активна ККП, яка підвищує енергоефективність і знижує рівень електромагнітних завад у мережі.

Суть корекції полягає в наближенні форми вхідного струму до синусоїдальної, що дозволяє оптимізувати передачу енергії від мережі.

В Європі освітлювальне обладнання має відповідати стандарту IEC61000-3-2 Class C, який регламентує допустимий рівень гармонік у споживаному струмі для систем потужністю від 25 Вт [3]. Ці вимоги охоплюють до 39-ї гармоніки включно. Крім того, нормативи щодо ККП включені до специфікацій комерційного освітлення Energy Star® Solid State Lighting Luminaire.

Використання коефіцієнта корекції потужності також обумовлене вимогами електромагнітної сумісності. Стандарт IEC 61000-3-2 визначає допустимі рівні гармонік та значення коефіцієнта потужності для джерел живлення понад 50 Вт, охоплюючи всі види освітлювального обладнання [3]. Отже, актуальним є створення мікропроцесорного контролера струму потужних світлодіодів. Схема по-

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

винна мати достатню потужність за напругою та струмом, тобто забезпечувати регулювання напруги та струму в усьому робочому діапазоні світлодіодів.

Об'єкт дослідження - процес живлення потужних світлодіодів.

Предмет дослідження - мікропроцесорні регулятори струму живлення потужних світлодіодів.

Мета кваліфікаційної роботи - реалізація мікропроцесорного контролера струму для потужних світлодіодів.

Для реалізації завдання необхідно :

- провести огляд існуючих рішень систем живлення для потужних світлодіодів;
- обрати оптимальну конфігурацію мікропроцесорного регулятора струму для потужних світлодіодів;
- запропонувати схему його ввімкнення;
- провести дослідження характеристик світлодіода;
- провести тестування запропонованої схеми мікропроцесорного регулятора струму для потужних світлодіодів.

Результати досліджень були представлені у вигляді тез доповіді на конференції «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі». Копії цих тез наведено у додатку В.

Кваліфікаційна робота складається із трьох розділів.

Перший розділ представляє аналіз відомих рішень живлення високопотужних світлодіодів за допомогою інтегральних драйверів, а також аналіз ринку спеціалізованих інтегральних світлодіодних драйверів.

У другому розділі запропоновані схеми ввімкнення мікросхем, за допомогою яких можна створювати блоки живлення для потужних світлодіодів.

Третій розділ присвячений реалізації мікропроцесорного контролера струму для потужних світлодіодів, а також тестуванню запропонованої схеми на предмет оцінювання вихідного струму при різних вхідних напругах.

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 СТАН ПРОБЛЕМНОЇ ОБЛАСТІ

1.2 Відомі рішення

Тема живлення високопотужних світлодіодів є актуальною та неодноразово розглядалася в професійних колах. Багато провідних світових виробників включають у свій асортимент інтегральні драйвери для світлодіодів. Зрозуміло, що розвиток цієї галузі не стоїть на місці, і на сьогодні можна виокремити три ключові етапи еволюції інтегральних драйверів світлодіодів.

Перший етап характеризувався використанням традиційних схем стабілізації струму, які функціонували у вузькому діапазоні вхідної напруги від 6В до 24В. Це створювало певні труднощі та додаткові витрати при організації живлення світлодіодів від мережі.

Наступний етап розвитку драйверів приніс суттєве розширення діапазону вхідних напруг – від 8В до 450В. Завдяки цьому стало можливим мінімізувати витрати на підключення до мережі. Проте якість стабілізації струму залишала бажати кращого, а також залишалося відкритим питання про надійність роботи мікросхем у випадку відсутності навантаження або короткого замикання.

Таким чином, інтегральні драйвери світлодіодів пройшли помітну еволюцію, спрямовану на підвищення їхньої ефективності та зручності використання в різних умовах.

Потужні світлодіоди повинні живитися силою струму до 1,2...1,25 А. Найбільшою популярністю користуються світлодіоди з силою струму 350...700 мА. Залежність між силою струму, що протікає через світлодіод і інтенсивністю його освітлення є лінійною або близькою до лінійної. Перевищення максимального прямого струму діода викликає його швидке зношення, тому важливо використовувати джерело живлення зі стабілізованим струмом. Залежно від типу напівпровідникового переходу падіння напруги на ньому варіюється. Тому живлення діода доречно проводити від джерела струму. Імпульсні схеми

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

найкраще підходять для живлення потужних світлодіодів. Для їх побудови використовуються індукційні або ємнісні імпульсні перетворювачі. Лінійні системи використовуються рідше через їх більш низький ККД.

На ринку доступні як блоки живлення, так і мікропроцесорні регулятори струму світлодіодів. Блоки живлення використовуються для стабілізації струму, що протікає через діод, з урахуванням перепадів температури. При цьому важливим параметром є струм, що протікає через діод, адже від нього залежить інтенсивність світла.

Іншими параметрами світлодіодних блоків живлення є напруга живлення (вхідна) і вихідна напруга, яка використовується для живлення декількох діодів, з'єднаних послідовно. Можна вибрати джерела живлення з пониженням напруги, підвищенням напруги живлення та підвищенням напруги до рівня вищого за вхідну напругу.

Спеціалізовані світлодіодні блоки живлення мають відповідні виходи, які вказують на виникнення несправності, наприклад, поломки (або відсутності) світлодіода. Ці системи зазвичай оснащені схемами захисту від перенапруги і короткого замикання, які відключають вихідну напругу при перевищенні максимальної температури системи.

Мікропроцесорні регулятори струму використовуються для керування яскравістю освітлення, генерації світлових ефектів і для корекції інтенсивності освітлення окремих діодів зі збірки. У більшості потужних світлодіодних стрічках такі функції реалізовані. Як правило, мікропроцесорні регулятори струму мають низький струм керування (наприклад, до 100 мА і менше). Якщо застосування вимагає використання такого контролера для управління діодами з більш високим струмом, то додатковий силовий каскад повинен бути включений у вигляді спеціального світлодіодного блоку живлення. Більшість силових світлодіодних блоків живлення мають дозвільні входи, аналогові або цифрові, завдяки яким можна контролювати інтенсивність живлення світлодіода шляхом підключення сигналу від ШІМ-модулятора до виходу контролера. Слід звертати увагу на

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

максимальне значення частоти ШІМ-сигналу, яке може бути вказано як вхід дозволу на електроживлення.

На ринку існує велика кількість спеціалізованих інтегральних світлодіодних драйверів, описаних у різних публікаціях [4 - 7], проте здебільшого це відносно малопотужні схеми.

Однією з перших компаній, що досягла значних результатів у цій галузі, вважається американська компанія Supertex, яка розробила мікросхему HV9910, а згодом - її покращену версію HV9910B [8]. Згодом, у процесі еволюції інтегральних драйверів для світлодіодів, з'явилися технічні аналоги цієї безперечно вдалої розробки.

Supertex пропонує схеми для керування MOSFET-транзисторами, за допомогою яких можна створювати блоки живлення для потужних світлодіодів. На рисунку 1.1 показана схема найновішого DC-DC підвищувального перетворювача для живлення світлодіодів із зовнішнім MOSFET-транзистором - мікросхема HV9919B [8].

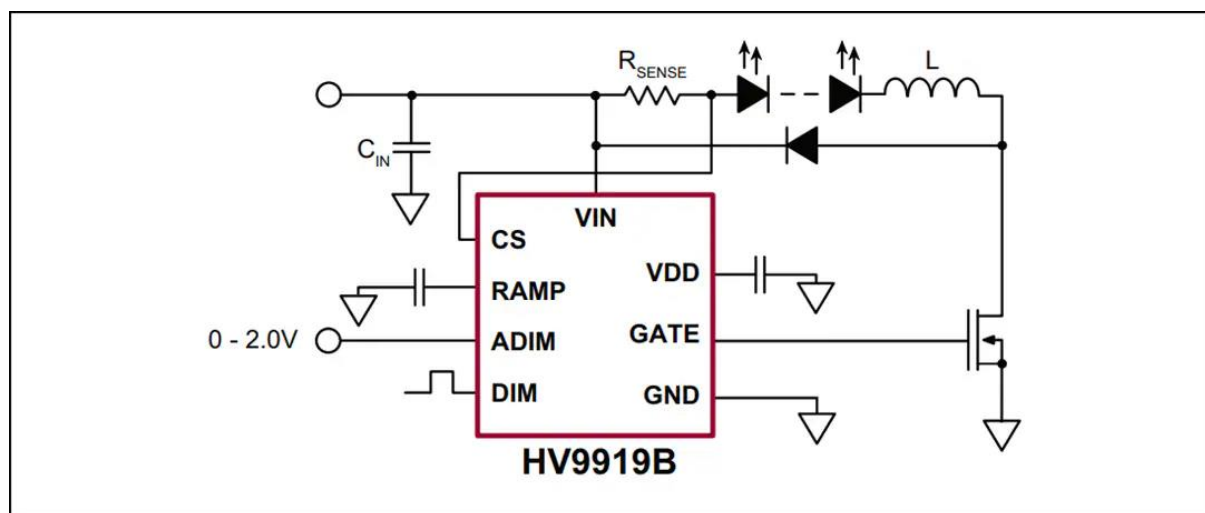


Рисунок 1.1 – Підвищувальний перетворювач

для живлення світлодіодів HV9919B

Мікросхема має максимальну робочу частоту 2 МГц і живиться від напруги 4,5...40 В. Зовнішній MOSFET-транзистор вибирається відповідно до напруги живлення і бажаного струму, що протікає через світлодіоди. Це встановлюється за

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

допомогою послідовного резистора RSENSE. Схема має можливість регулювання інтенсивності світіння світлодіодів за допомогою зовнішнього ШІМ-сигналу (вхід DIM) або аналогового сигналу в діапазоні 0...2 В (вхід ADIM).

Цікавою є також мікросхема HV9910B, яку можна живити постійною напругою до 450 В. Як і мікросхема HV9919, вона має можливість підключення зовнішнього ШІМ-сигналу або аналогового сигналу 0...250 мВ для керування інтенсивністю світіння світлодіодів. Схеми HV9911 і HV9912 - це інвертори, які можуть працювати в топологіях «бак», «буст», «бак-буст» або SEPIC. Ці мікросхеми мають ідентичну конфігурацію виводів і можуть використовуватися як взаємозамінні в залежності від вхідної напруги.

Мікросхема HV9911 працює при напрузі живлення до 250 В, а HV9912 - до 90 В. Можливості регулювання інтенсивності світіння світлодіодів подібні до можливостей мікросхем HV9919 і HV9910B. Схеми мають захист від перенапруги та перевантаження по струму. Несправність сигналізується на виході FAULT і вихідні ланцюги відключаються. Виникнення несправності зберігається у внутрішньому перериванні, яке може бути скинуте лише після повторного ввімкнення схеми.

Схема живлення, призначена для потужних RGB-світлодіодів - це HV9982. Це DC-DC перетворювач з трьома каналами. Керування інтенсивністю світіння кожного каналу здійснюється аналогічно до одноканальних систем компанії за допомогою ШІМ або аналогових сигналів. Живлення схеми здійснюється напругою до 40 В.

З появою світлодіодних технологій на сучасному рівні розвитку комерційного освітлення, особливо у сфері LED-освітлювальних рішень, функціональні можливості мікросхеми HV9910B перестали відповідати вимогам масового виробництва високоякісних освітлювальних пристроїв. У зв'язку з цим компанія розробила більш інноваційну мікросхему HV9961, яку можна вважати представником третього покоління інтегрованих драйверів для світлодіодів.

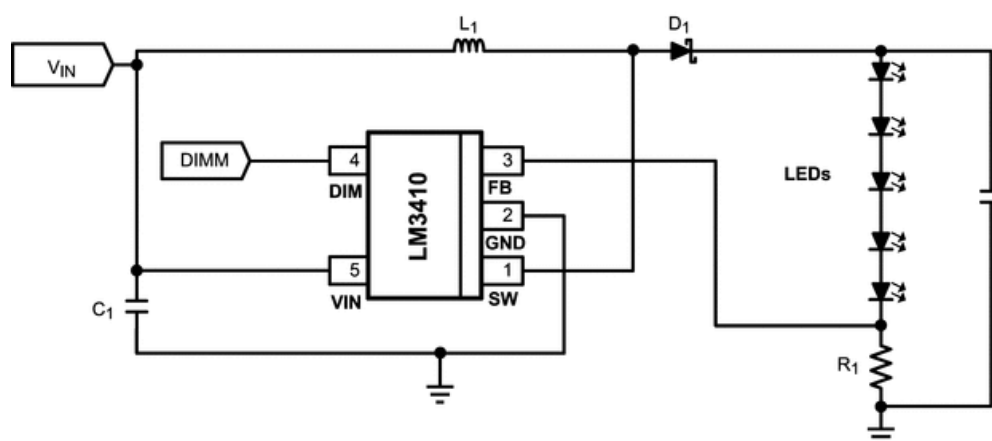
					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Асортимент понижуючих DC/DC перетворювачів із вхідною напругою понад 40 В налічує близько 120 різновидів мікросхем, що відрізняються такими характеристиками:

- підтримка вхідної напруги до 100 В;
- здатність забезпечувати струм вихідний до 5 А;
- наявність як класичних, так і синхронних типів понижуючих перетворювачів;
- відповідність стандарту АЕС-Q100 для використання в автомобільній електроніці;
- варіанти з фіксованою або регульованою частотою комутації;
- підтримка синхронізації зовнішньої.

Схеми для живлення і керування потужними світлодіодами пропонують багато компаній.

Перетворювачі постійного струму в постійний струм фірми National Semiconductor LM3410 - це індукційний перетворювач імпульсного підсилення для живлення 1...5 світлодіодів [9]. Допустимий струм, що протікає через діоди, складає 2,8 А. Частота перемикавання, в залежності від версії системи, становить 525 кГц або 1,6 МГц. Коло живиться від мережі напругою 2,7...5,5 В, а максимальна вихідна напруга становить 24 В. Приклад використання діодного



блоку
живлення
показаний
на
рисунку 1.
2.

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Рисунок 1.2 – Джерело живлення потужних світлодіодів з використанням LM3410

Ще одна цікава схема для живлення потужних світлодіодів — LM3405A [10]. Схема має вбудований транзистор NMOS (опір каналу 300 мВ). Частота перемикання становить 1,6 МГц. Він також має схему захисту від перевантаження по струму та відключення живлення при перевищенні допустимої температури. Максимальний вихідний струм становить 1 А, але тільки для пристроїв пакету eMSOP. Чіпи пакету SOT23 можуть видавати всього 400 мА. На рисунку 1.3 показаний приклад використання системи живлення потужного світлодіода з діодним струмом 1 А [10].

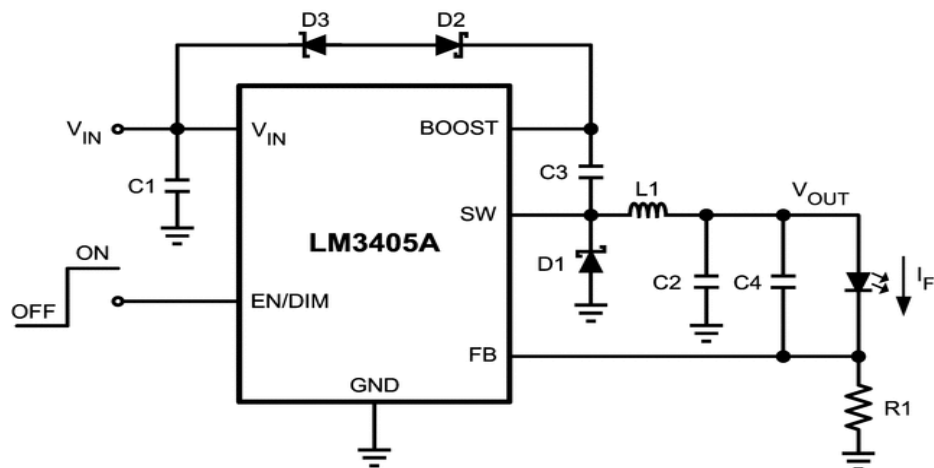


Рисунок 1.3 – Джерело живлення потужних світлодіодів з використанням LM3405

Для застосувань, що вимагають більших струмів, можна використати мікросхему LM3433 від National Semiconductor. Ця мікросхема може керувати діодами з необхідним струмом понад 6 А. На неї подається напруга в діапазоні від 9В до 14 В відносно анода діода (інвертуючий перетворювач). Для керування

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

інтенсивністю світіння світлодіодів використовуються дві клеми: вхід дозволу EN і вхід DIM для сигналу від зовнішнього ШІМ-модулятора (частоти вище 30 кГц).

Мікросхема LM3433 є джерелом живлення для світлодіодів, з широкими можливостями захисту, керованим драйвером затвора MOSFET (MOSFET-транзистора) [11]. Схема має захист від зниженої вхідної напруги, перевантаження по струму, перенапруги та теплового вимкнення. Вона також може автоматично вимикатися через заданий час після виникнення несправності. Час відключення залежить від ємності конденсатора, підключеного до входу TIMR. Коли напруга на клемі TIMR перевищує 1,24 В (після виникнення неспр

авнос

ті),

схема

встан

овлю

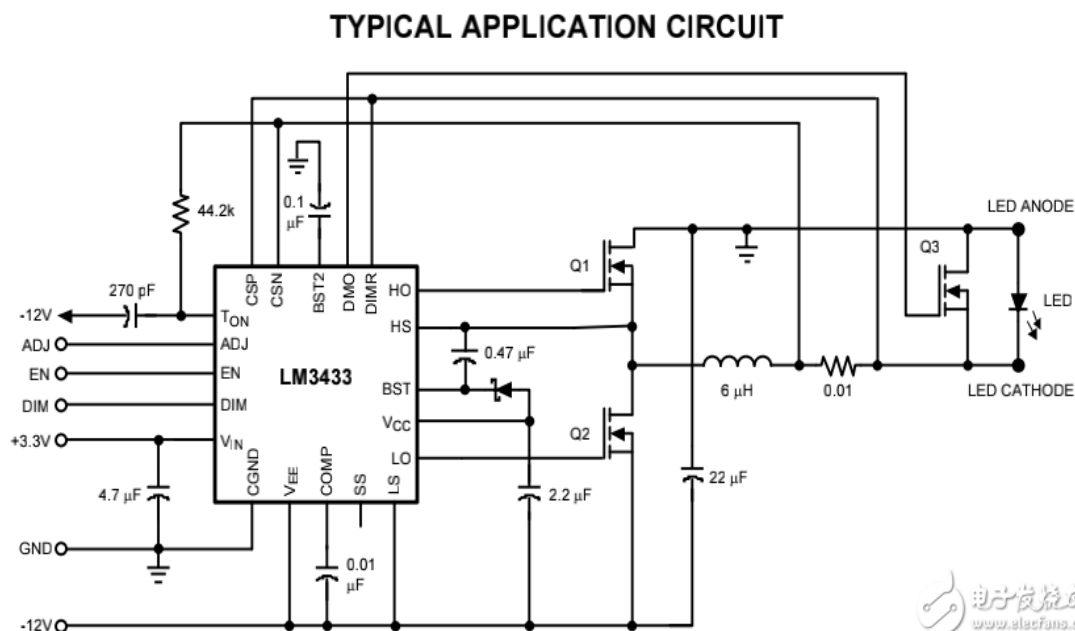
є

прапо

рець

FLT

на



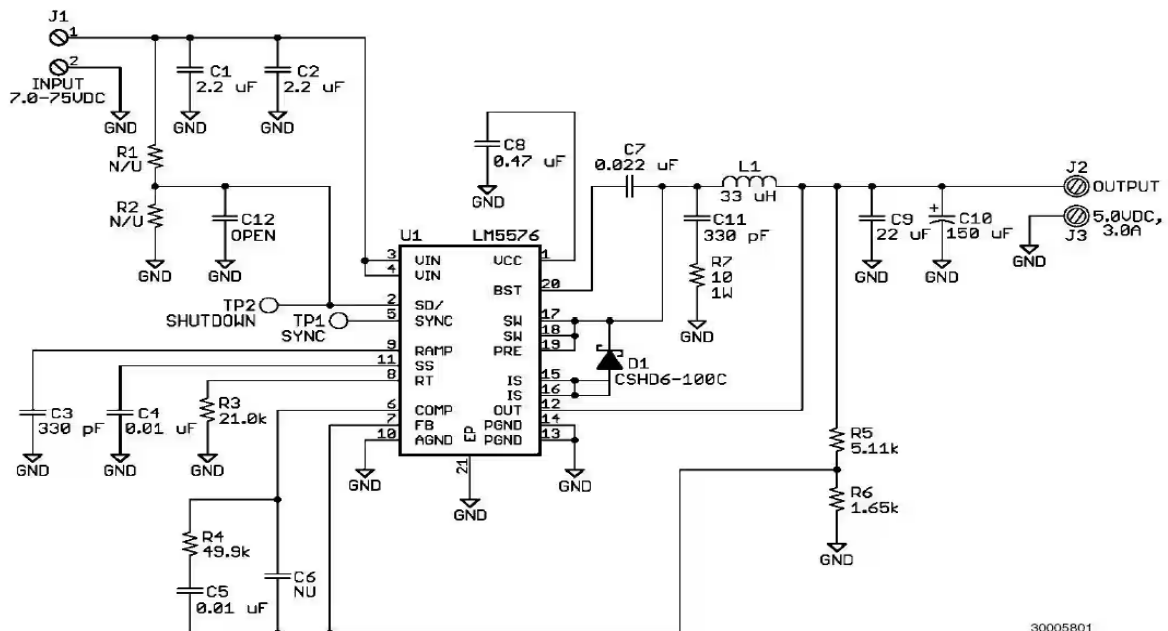
високому рівні. Схема застосування мікросхеми LM3433 при струмі до 14 А, що протікає через світлодіодну структуру, показана на рисунку 1.4 [11].

Рисунок 1.4 – Схема застосування мікросхеми LM3433

Ще ширшим діапазоном вхідних напруг від 6 В до 75 В вирізняється мікросхема LM5576. Це дозволяє використовувати її для створення джерел живлення з вихідним струмом до 3 А. На рисунку 1.5 показана схема застосування мікросхеми LM5576 [12].

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

У пристрій вбудований MOSFET із каналом опором 175 мОм. Перетворювач працює в режимі керування за струмом з емуляцією пікового значення, що забезпечує добру стабілізацію при зміні навантаження без ускладнення схеми компенсації.



схеми LM5576

LM5576 підтримує налаштування частоти перетворення в межах від 50 до 500 кГц, а також часу плавного запуску за допомогою зовнішніх елементів. Для підвищення відповідності нормам ЕМС можливе тактування від зовнішнього генератора. Мікросхема оснащена захистом від перевантаження по струму та перегріву. Також доступна версія для автомобільної промисловості, сертифікована за стандартом AEC-Q100 grade 1.

1.2 Формування вимог

					Арк.	
					19	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	

Джерело живлення є однією з найдорожчих складових світлодіодного світильника. У той час як ціни на світлодіоди постійно знижуються, вартість драйверів майже не змінюється. У результаті саме джерело живлення може складати до 50–70% загальної вартості виробу. Це спонукає виробників все частіше відмовлятися від стандартних рішень на користь розробки власних драйверів. Однак створення сучасного джерела живлення — це складне завдання, яке потребує високої кваліфікації та досвіду. Компанія Infineon пропонує рішення на основі концепції Digital Power, що значно полегшують цей процес. Завдяки цим компонентам і засобам розробки інженери можуть швидко створювати якісні, недорогі драйвери з заданими характеристиками.

Концепція Digital Power, завдяки своїм очевидним перевагам, отримала широке впровадження серед провідних світових виробників мікросхем для джерел живлення. В її основі лежить поєднання аналогової силової частини з цифровими методами керування. Такий підхід дозволяє ефективно вирішити низку проблем, характерних для суто аналогових рішень.

Найбільш суттєвий недолік традиційних аналогових систем полягає в їх жорстко фіксованому алгоритмі роботи, який визначається схемотехнікою пристрою. Робочі параметри таких систем тісно пов'язані з фізичними властивостями елементів, що ускладнює адаптацію до змін зовнішніх умов. Як наслідок, аналогові пристрої здатні працювати в оптимальному режимі лише в обмеженому діапазоні умов.

Інакше кажучи, для забезпечення стабільних характеристик при суттєвих змінах умов експлуатації необхідно або змінювати параметри компонентів, або повністю переробляти схему. Це робить аналогові рішення менш гнучкими порівняно з цифровими.

Цифрове керування дає змогу не лише задавати необхідні параметри й режими роботи ще на етапі проєктування, але й змінювати їх безпосередньо під час експлуатації. При цьому апаратна частина джерела живлення залишається незмінною, а корекція функціоналу відбувається шляхом налаштування цифрового

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

контролера. Це кардинально змінює сам підхід до розробки: інженеру більше не потрібно довго працювати з макетами та паяльником, підбираючи компоненти — достатньо провести налаштування на рівні програмної моделі.

Отже, проєктування ефективного джерела живлення для світлодіодів - це складне інженерне завдання. Однак використання мікросхем із широким діапазоном вхідної напруги дозволяє значно спростити розробку, зменшуючи або навіть усуваючи потребу в додаткових елементах захисту. Такі мікросхеми мають ще кілька важливих переваг:

- забезпечують повторне використання вже готових рішень;
- дозволяють створювати складні схеми з від'ємними напругами та широким вхідним діапазоном;
- зменшують кількість зовнішніх компонентів, що спрощує захисні кола.

Повторне використання перевірених рішень особливо актуальне, оскільки створення джерела живлення — багатоступеневий процес, що включає вибір елементної бази, проєктування схеми з урахуванням ЕМС та розробку друкованої плати. Помилка на будь-якому етапі може призвести до необхідності повної переробки. Саме тому інженери прагнуть максимально використовувати вже надійно випробувані вузли, часто просто копіюючи схеми й топологію в нові проєкти.

Застосування мікросхем живлення з широким діапазоном вхідних напруг дозволяє зробити проєктовані рішення більш універсальними — одна й та сама схема та топологія плати можуть використовуватись у пристроях з різними рівнями живлення. Наприклад, джерело живлення, спроектоване для автомобільної мережі на 12 В, може без значних змін працювати і в системах вантажного транспорту (24 В), телекомунікаційного обладнання (48–75 В) чи промислової автоматики (24 В).

Можливість багаторазового використання однакових блоків робить такі рішення ідеальними для побудови каскадних систем. У каскадній архітектурі можна застосовувати однакові модулі, створені на базі мікросхем із широким

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вхідним діапазоном - як у послідовному, так і в паралельному підключенні. У послідовному варіанті лише перший блок під'єднується до основної шини живлення, тоді як у паралельному - всі модулі отримують живлення напряму. При цьому конструктивно блоки майже не відрізняються, змінюються лише значення деяких зовнішніх компонентів.

Уніфікація схем для різних пристроїв має ряд переваг:

- скорочує час розробки, оскільки немає потреби щоразу створювати нову схему або плату;
- зменшує витрати на проєктування та виготовлення;
- обмежує кількість різних компонентів у виробництві;
- спрощує монтаж і обслуговування пристроїв.

Крім того, використання одних і тих самих мікросхем дозволяє повторно застосовувати вже перевірені параметри пайки, шаблони трафаретів тощо.

Деякі понижуючі DC/DC перетворювачі також підтримують створення джерел живлення з від'ємною вихідною напругою через інвертовану схему включення. Важливо пам'ятати, що різниця між вхідною та вихідною напругою не повинна перевищувати максимально допустимий вхідний діапазон мікросхеми - чим він ширший, тим більший запас надійності має система. Дискретні компоненти не забезпечують ідеального захисту.

Варистори та захисні діоди не мають чіткої прямолінійної вольт-амперної характеристики, а напруга їх спрацювання залежить від рівня завад. Ефективність таких елементів визначається їх типом і параметрами. Плавкі та самовідновлювані запобіжники мають обмежену швидкодію, а пасивні схеми загалом характеризуються великою кількістю компонентів і труднощами при реалізації компактних рішень.

На відміну від них, активні захисні схеми використовують додаткові транзистори й спеціалізовані мікросхеми. У випадках перенапруги або перевантаження ці транзистори вимикаються, розриваючи ланцюг живлення та оберігаючи основні елементи. Такі схеми здатні витримувати тривалі імпульси

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

завад і забезпечують вищий рівень захисту. Однак за це доводиться платити - вони збільшують складність, габарити і вартість пристрою.

На відміну від пасивного підходу, в активних схемах при перенапрузі відбувається примусове відключення живлення, і без наявності механізму автоматичного перезапуску пристрій може залишитись знеструмленим.

Використання мікросхем із широким діапазоном вхідної напруги у багатьох випадках дозволяє відмовитися від складних захисних схем. Часто єдиним необхідним елементом є діод, який захищає від імпульсів від'ємної полярності.

Це забезпечує:

- високий рівень стійкості до електромагнітних завад;- зменшення кількості компонентів;
- зниження вартості;
- можливість реалізації більш компактних пристроїв.

У разі підвищених вимог до захисту можна застосовувати комбіновані методи, що поєднують переваги різних підходів.

1.3 Аналіз технічного завдання та постановка задач

Дослідження функціонування світлодіодних джерел світла показало, що для їх ефективної роботи необхідне живлення стабілізованим або обмеженим струмом. Застосування потужних резисторів для обмеження струму супроводжується значними енергетичними втратами. Щоб уникнути таких втрат, доцільно використовувати мікропроцесорний регулятор струму.

Метою кваліфікаційної роботи є створення мікропроцесорного регулятора струму для потужних світлодіодів з використанням мікроконтролера сімейства AVR типу ATmega8

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

АТmega8 добре підходить для створення джерел живлення завдяки своїм численним перевагам: невелика кількість виводів і зовнішніх компонентів, перемикання ключів при нульовій напрузі без необхідності налаштовувати частоту, покращені теплові умови роботи силових елементів, полегшене фільтрування завдяки фіксованій частоті та вдосконаленому режиму комутації.

Мікропроцесорний регулятор струму для потужних світлодіодів повинен містити аналого-цифровий перетворювач А/С, цифровий компаратор КС, задавач опорного слова і генератор прямокутних сигналів з регульованим заповненням ШІМ. В якості генератора ШІМ використати внутрішній апаратний блок восьми-розрядного лічильника мікроконтролера АТmega8. Вбудований аналого-цифровий перетворювач мікроконтролера, що працює за методом послідовного наближення, налаштувати на 8-розрядну роботу. Такої роздільної здатності достатньо для забезпечення 255 рівнів значень струму для живлення світлодіода. Цифровий компаратор і задавач еталонного слова реалізувати програмно. Запропонований мікропроцесорний регулятор струму для потужних світлодіодів має підтримувати діапазон потужності від 6 Вт до 10 Вт при вихідній напрузі від 2В до 10 В. Для навантаження забезпечити вихідний струм до 2 А.

Для реалізації проекту необхідно виконати такі етапи:

- провести огляд існуючих рішень систем живлення для потужних світлодіодів;
- обрати оптимальну конфігурацію мікропроцесорного регулятора струму для потужних світлодіодів;
- запропонувати схему його ввімкнення;
- провести дослідження характеристик світлодіода;
- провести тестування запропонованої схеми мікропроцесорного регулятора струму для потужних світлодіодів;- оцінити вихідний струм при різних вхідних напругах.

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

2 СХЕМИ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ І КЕРУВАННЯ ПОТУЖНИМИ СВІТЛОДІОДАМИ

2.1 Перетворювачі постійного струму

Виробником потужних джерел живлення для світлодіодів постійного струму є також компанія SiTI. Однією з таких мікросхем є DD311, яка призначена для живлення світлодіодів струмом до 1 А. На рисунку 2.1 показаний приклад використання мікросхеми D311.

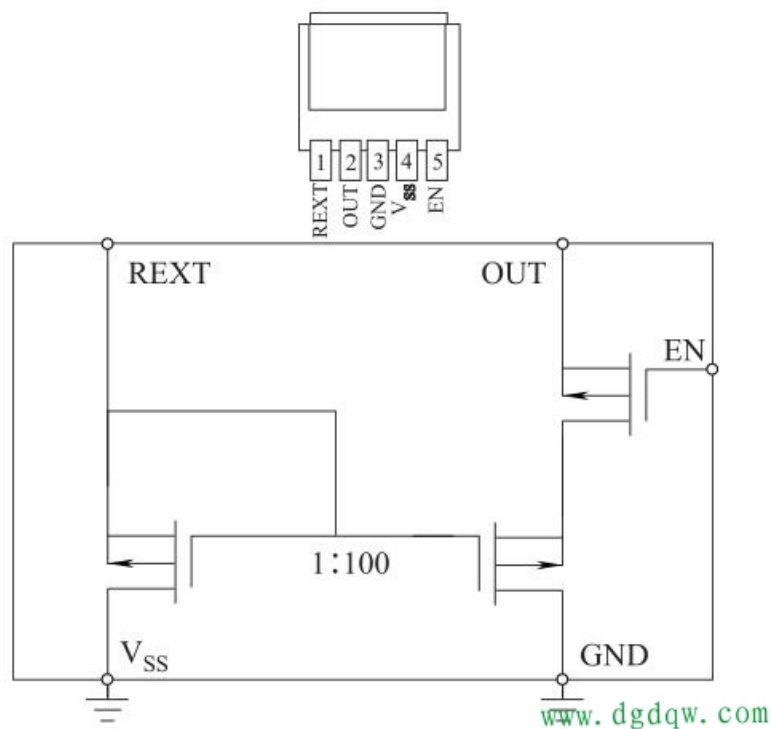


Рисунок 2.1 – Приклад використання мікросхеми D311

Вихідний струм світлодіода I_{LED} залежить від вхідного струму I_{REF} (вхід REXT). Вихідний струм у 100 разів більший за нього. Опорний струм I_{REF} задається за допомогою резистора REXT. Ця схема має вхід дозволу EN, за допомогою якого можна керувати інтенсивністю світіння світлодіодів за допомогою ШІМ-сигналу. Максимальна частота ШІМ-сигналу становить 1 МГц. Однак максимальна вихідна напруга схеми становить 33 В.

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Мікросхема з більш широкими функціональними можливостями - це DD312. Як і мікросхема DD311, це джерело живлення світлодіодів постійного струму з струмовою потужністю 1 А (максимальна вхідна/вихідна напруга 18 В) з входом дозволу EN. Мікросхема DD312 має розширену систему діагностики. Це пов'язано з тим, що вона оснащена захистом від короткого замикання, відключенням навантаження (без світлодіода) і виявленням перегріву. Виникнення несправності сигналізується на виході ALARM (тільки в корпусі SOP8).

Мікросхема DD313 є функціональним еквівалентом мікросхеми DD312 для керування групою з трьох світлодіодів, наприклад, RGB-світлодіодів. Має незалежні виходи увімкнення, опорного струму та струму для кожного RGB-каналу. Виникнення перегріву схеми або відсутність одного з діодів сигналізується на єдиному виході ALARM. Максимальний сумарний вихідний струм мікросхеми - 0,5 А.

Серед виробників потужних джерел живлення для світлодіодів постійного струму є також фірма Micrel. В асортименті продукції фірми Micrel є також мікросхеми живлення світлодіодів. Одна з них - DC-DC перетворювач MIC3230/1/2, що підвищує напругу (boost). Він призначений для живлення однієї або декількох збірок послідовно з'єднаних потужних світлодіодів.

Вхідна напруга схеми становить 6...42 В. Мікросхема MIC3230/1/2 може видавати до 70 Вт. Вона працює на фіксованій частоті перемикавання 400 кГц (MIC3232) або на регульованій від 109...950 кГц (MIC3230/1).

Мікросхема MIC3231 має можливість розмивати спектр вихідного сигналу для мінімізації електромагнітних завад (ЕМІ). Ця схема ідеально підходить для вуличного освітлення або освітлення будівель.

Як і схеми інших виробників, джерела живлення MIC323х мають можливість включати зовнішній ШІМ-сигнал. Вони також мають схеми захисту від перенапруги і температурний перемикач.

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Другим джерелом живлення світлодіодів, що нас цікавить, є MIC4682. MIC4682 - це простий у використанні понижуючий імпульсний стабілізатор напруги. Він має програмовану межу струму, яка забезпечує 10% точність обмеження струму в усьому діапазоні робочих температур. Точне обмеження струму робить MIC4682 ідеальним для застосувань з постійною напругою і постійним струмом, таких як прості зарядні пристрої для акумуляторів. Точне обмеження струму також дає розробникам можливість встановити максимальний вихідний струм нижче номінального струму насичення котушки індуктивності. Це дозволяє використовувати найменші можливі індуктори для конкретного застосування, заощаджуючи цінний простір і вартість.

Це понижуючий перетворювач напруги з фіксованою частотою перемикання 200 кГц. Максимальний вихідний струм, якого можна досягти за допомогою MIC4682, становить 2 А. Мікросхема має вбудований обмежувач струму 0,4...2 А, що регулюється зовнішнім резистором. Типова схема застосування цієї мікросхеми показана на рисунку 2.2.

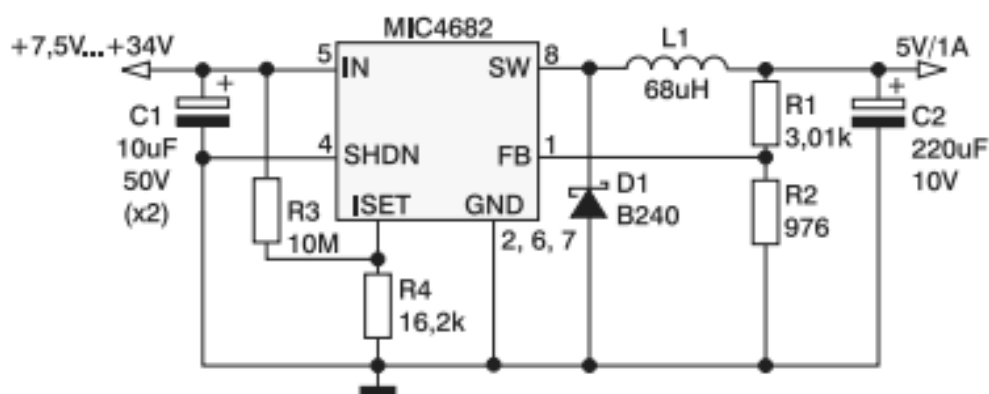


Рисунок 2.2 – Приклад використання мікросхеми MIC4682

Мікросхему виготовлено в корпусі SOIC-8 з покращеними можливостями розсіювання тепла. Виводи 2, 6 і 7 виконані з одного металевого елемента, що знаходиться в тепловому контакті з напівпровідниковою структурою.

MIC4682 є досить надійним пристроєм. Діапазон вхідної напруги від 4 до 34 В дозволяє безпечно використовувати MIC4682 в системах, де можливі

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

перехідні процеси напруги. Додаткові функції захисту включають циклічне обмеження струму і вимкнення при перегріванні. MIC4682 випускається в термооптимізованому корпусі SOIC-8, що дозволяє досягти безперервного вихідного струму 2А. MIC4682 вимагає мінімальної кількості зовнішніх компонентів і може працювати з використанням стандартної серії котушок індуктивності. Компенсація забезпечується внутрішньо для швидкої перехідної характеристики і простоти використання. MIC4682 доступний у 8-контактному силовому корпусі SOIC з діапазоном температур переходу від -40°C до +125°C.

Іншим джерелом живлення постійного струму для потужних світлодіодів є MIC2299. Він може жити до двох послідовно з'єднаних світлодіодів струмом 1 А. Схема являє собою підвищувальний перетворювач з частотою перемикання 2 МГц, що працює за підвищувальною топологією. Вона може живити світлодіоди від одного або двох літій-іонних елементів (напруга живлення 2,5...10 В). Перевагою схеми є невелика кількість необхідних зовнішніх компонентів. Робоча температура цього джерела живлення -40...125°C.

2.2 Імпульсні понижувальні перетворювачі

Хорошим прикладом джерела живлення для світлодіодів від фірми Eхar є імпульсний понижуючий перетворювач SP7600. Він може працювати з напругою 4,5...29 В. Максимально досяжний струм діода - 2 А. Перетворювач працює на частоті перемикання 1,2 МГц. Обмеження струму встановлюється зовнішнім резистором R_s (рис. 7). Вивід FB є входом внутрішнього кола зворотного зв'язку, що стабілізує струм діода. Схема має ідентичну розводку виводів з іншими схемами живлення світлодіодів Eхar XRP7603 і XRP7603 LED, які можуть жити світлодіоди з максимальним струмом 500 мА і 1 А відповідно. Ці схеми мають захист від короткого замикання та схеми плавного пуску.

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мікросхема SP7685 - це джерело живлення світлодіодів з режимом Flash. У цьому режимі на світлодіод протягом короткого інтервалу подається струм, що перевищує номінальний. Максимальний час роботи в режимі Flash мікросхеми SP7685 становить 3,6 с. У режимі Flash мікросхема живить світлодіоди струмом до 1,2 А, а в безперервному режимі (так званий режим Torch) - до 400 мА (при цьому ККД досягає 94%). На рисунку 2.3 показаний приклад використання мікросхеми SP7685.

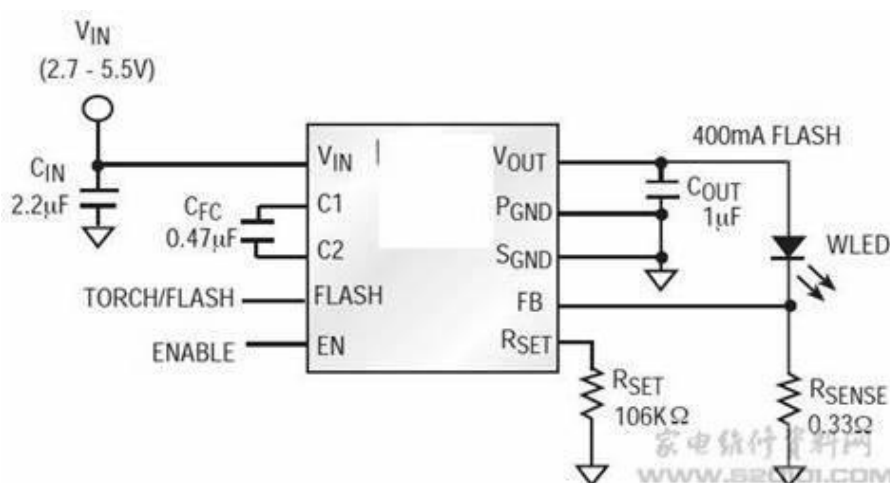


Рисунок 2.3 – Приклад використання мікросхеми SP7685

Перевагою схеми є її невеликий розмір і невелика кількість необхідних зовнішніх компонентів. Схема має захист від перевантаження, температурний захист і обмежувач вихідної напруги. Вона може працювати як у підвищувальному, так і в понижувальному режимах.

Фірма Diodes Incorporated має ряд джерел живлення для світлодіодів, які донедавна виробляла компанія Zetex. Компанія пропонує DC-DC (підвищувальні) перетворювачі ZXLD132х з силою струму 0,7 А (ZXLD1322), 1 А (ZXLD1321) і 1,5 А (ZXLD1320).

На рисунку 2.4 показаний приклад використання мікросхеми ZXLD1320. ZXLD1320 живиться від напруги 4...18 В, ZXLD1321 - від 1,2...12 В, а ZXLD1322 - від 2,5...15 В. Струм діода встановлюється в діапазоні 10...100% від максимального вихідного струму за допомогою зовнішнього резистора.

Мікросхеми ZXLD132x мають входи для температурної компенсації зміни струму. Зміна напруги на виводі TADJ в діапазоні 50...75 мВ призводить до того, що від струму діода віднімається струм корекції. Якщо напруга падає нижче 50 мВ, вихідний струм діода буде менше 10% від номінального, а при напрузі вище 75 мВ корекція не відбувається. Підключення резистора послідовно з термістором до входу TADJ дозволяє вибрати порогову температуру. Схема має внутрішній температурний захист з пороговою температурою 150°C.

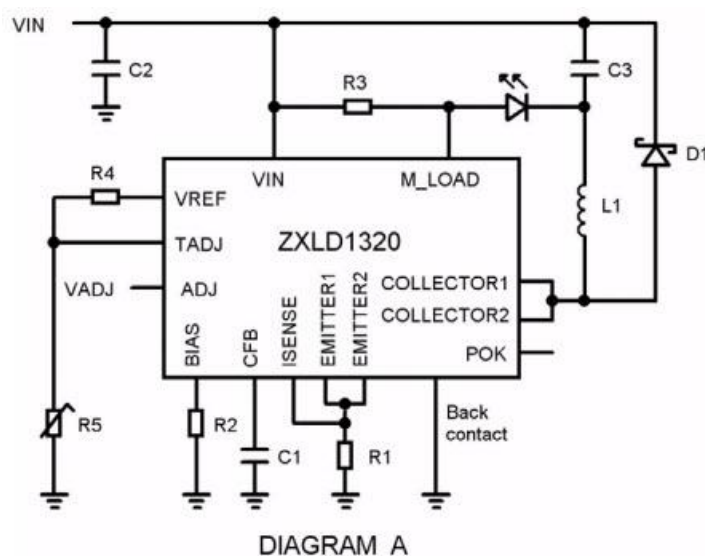


Рисунок 2.4 – Приклад використання мікросхеми ZXLD1320

Простіші схеми з меншою кількістю виводів - ZXLD135x і ZXLD136x. Вони виконані в корпусах TSOT23-5 з п'ятьма виводами. Вони відрізняються в основному максимальним вихідним струмом, який становить 350 мА для мікросхем ZXLD135x і 1 А для мікросхем ZXLD136x.

Блоки живлення світлодіодів, побудовані на цих мікросхемах, вирізняються простотою конструкції. На рисунку 2.5 показаний приклад використання мікросхеми ZXLD1366.

Вихідний струм регулюється зміною напруги, що подається на вивід ADJ. Змінюючи напругу, що подається на цю клему в межах 0,3...2,5 В, можна змінювати вихідний струм в діапазоні 25...200% від номінального. Щоб вимкнути

струм діода, необхідно подати напругу менше ніж 0,2 В на вивід ADJ. У звичайному режимі роботи, наконечник ADJ може бути нікуди не прикріплений (плаваючий), так що струм діода буде залежати від величини резистора, підключеного до входу Isense.

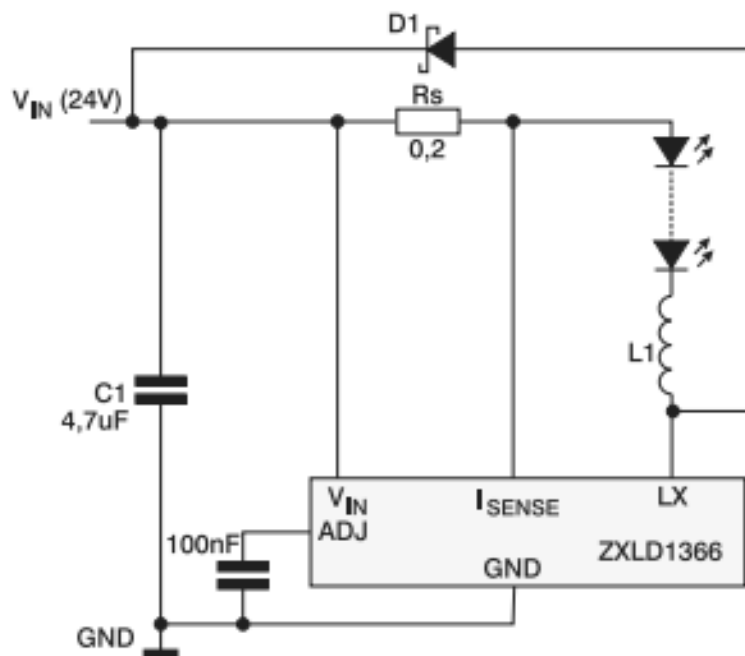


Рисунок 2.5 – Основна схема блоку живлення світлодіодів зі схемою ZXLD1366

2.3 Порівняння блоків живлення світлодіодів постійного струму

Фірма Infineon пропонує джерело живлення для світлодіодів TLE 4242 G з силою струму до 0,5 А, призначене в першу чергу для автомобільного освітлення. Це джерело живлення постійного струму з входом для сигналу ШІМ-модулятора, за допомогою якого можна керувати інтенсивністю світіння підключених світлодіодів. Схема має захист від перевантаження, короткого замикання, зміни полярності живлення і температурний захист. Вихід ST сигналізує про відсутність навантаження на виході керування світлодіодами. Джерело живлення TLE 4242 G живиться постійною напругою 4,5...42 В (вхідні ланцюги допускають напругу в

діапазоні -42...45 В). Струм, що протікає через діоди, регулюється резистором, увімкненим послідовно між катодом світлодіода (останнього в ланцюзі) і землею.

На рисунку 2.6 показано порівняння блоків живлення світлодіодів постійного струму. Використання спеціального джерела живлення дозволяє забезпечити захист від перевищення допустимого струму світлодіодів (схеми зліва).

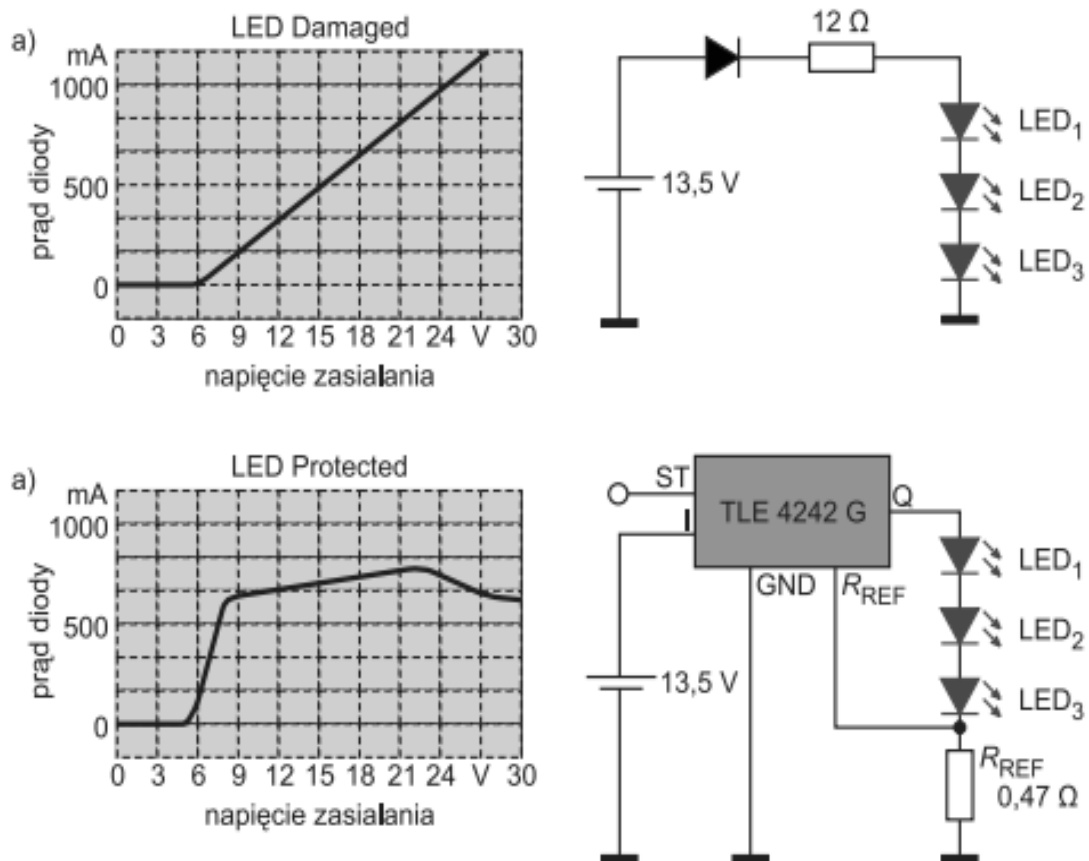


Рисунок 2.6 – Порівняння постійного струму джерел живлення світлодіодів:

а) з використанням дискретних елементів, б) з використанням спеціалізованого джерела живлення TLE 4242 G

В асортименті Linear Technology варто звернути увагу на мікросхему LTM8040. Це джерело живлення для світлодіодів з силою струму від 35 мА до 1 А, що характеризується невеликими розмірами корпусу LGA15×9×2,82 мм.

Мікросхема живиться від постійної напруги 4...36 В. Керування здійснюється за допомогою зовнішнього ШІМ-модулятора.

Приклад схеми живлення світлодіода показано на рисунку 2.7.

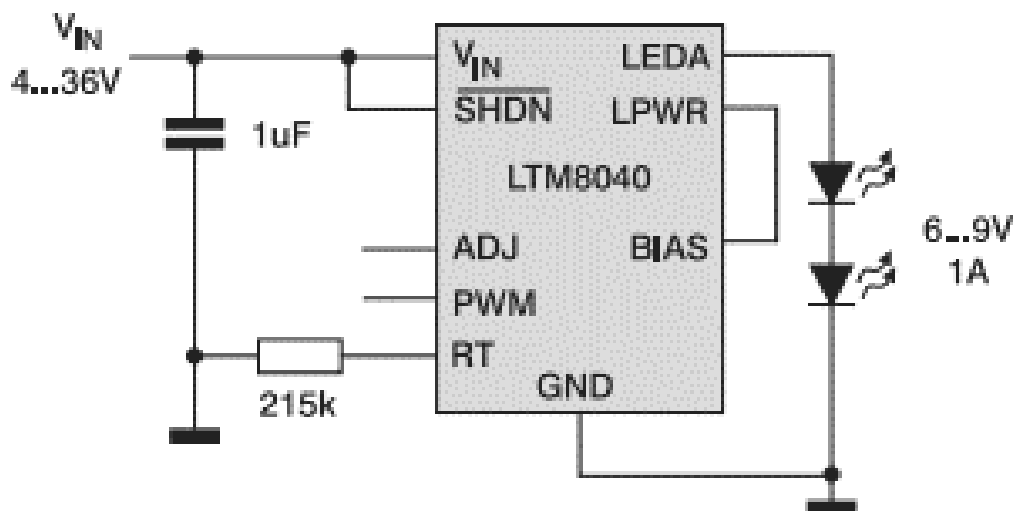


Рисунок 2.7 – Схема застосування мікросхеми LTM8040

Ще одна цікава схема - LM3410, джерело живлення світлодіодів з силою струму до 1,5 А. Струм, що протікає через світлодіоди, може модулюватися зовнішнім ШІМ-сигналом (можлива зміна інтенсивності світіння світлодіодів 5000:1 - частота перемикання ШІМ 100 Гц).

На рисунку 2.8 показана схема ввімкнення цієї схеми. Вона має схему захисту відкритого світлодіода. Вона може працювати в режимі буст або буст, а також в режимі *buck-boost*.

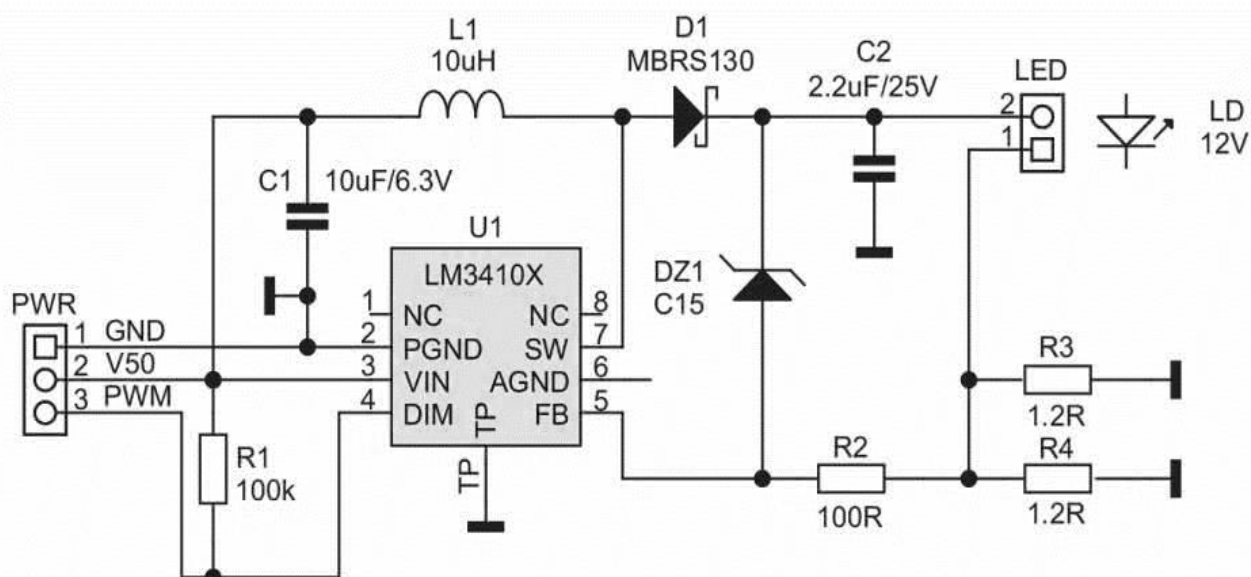


Рисунок 2.8 – Основна схема блоку живлення світлодіодів зі схемою LM3410

3 МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ РЕГУЛЯТОР СТРУМУ ПОТУЖНИХ СВІТЛОДІОДІВ

3.1 Опис мікропроцесорного регулятора струму світлодіодів

Надзвичайно важливою частиною системи освітлення є системи живлення та керування. Завдяки цим системам можна жити як окремі світлодіоди, так і набори, що складаються з багатьох елементів, можна регулювати яскравість світіння, стабілізувати яскравість, коригувати результуючий колір наборів RGB-світлодіодів. На ринку існує велика кількість спеціалізованих інтегральних світлодіодних драйверів, проте здебільшого це відносно малопотужні схеми.

Живлення потужних світлодіодів, всупереч дедалі поширенішій думці серед інженерів-електронників, не має нічого спільного з додатковими твердженнями. Однак це неправда, оскільки правила живлення потужних світлодіодів такі ж, як і для класичних малопотужних світлодіодів.

Потужні світлодіоди вимагають відносно високого струму, до 1700 мА, а найпопулярніші моделі на ринку працюють при 120, 350, 700 і 1000 мА. Залежність між яскравістю світла і силою струму, що протікає через конструкцію, зазвичай лінійна (або майже лінійна). Деякі типи діодів можуть працювати при струмах, що перевищують номінальний, без різкого прискорення їх деградації. Більшість діодів не мають такого запасу міцності, в результаті чого перевищення максимального струму провідності призводить до їх швидкого зносу. Це перша причина, чому кращим методом живлення потужних діодів є стабілізація струму, що протікає через їхні структури.

Друга причина - досить крута характеристика $I = f(U)$, що означає, що невеликі коливання напруги живлення мають великий вплив на яскравість світлодіода і підвищують ризик перевищення безпечного струму для світлодіодної конструкції.

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Останнім аргументом на користь струмового живлення потужних світлодіодів є зміна напруги провідності діода в залежності від температури структури, яка суттєво змінюється під час роботи. Тому для підтримання максимально допустимого струму провідності за допомогою стабілізованого джерела живлення необхідно відстежувати температуру корпусу діода і коригувати її значення відповідно до рекомендацій виробника.

Найбезпечніший спосіб живлення потужних світлодіодів - це живлення зі стабілізацією струму. Більшість світлодіодів на ринку можна живити імпульсами струму, що перевищують рекомендований струм провідності, за умови, що середній струм не перевищує зазначений в документації.

Спрощена схема мікропроцесорного регулятора струму світлодіодів наведена на рисунку 3.1.

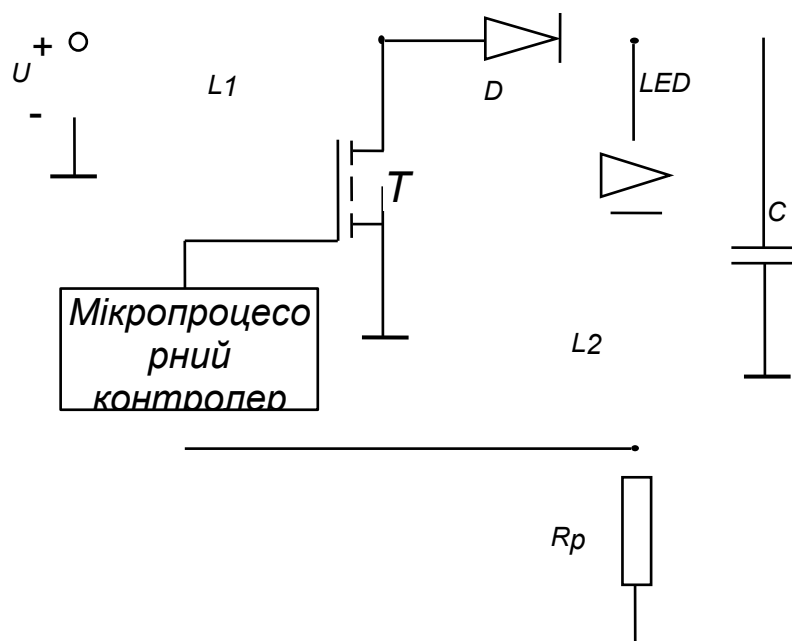


Рисунок 3.1 – Спрощена схема мікропроцесорного регулятора струму світлодіода

Схема складається з трьох блоків: підвищувального перетворювача, мікропроцесорного контролера (МПК) і ланцюга зворотного зв'язку. Підсилювальний перетворювач складається з індуктивності L , MOSFET транзистора T , діода D і фільтруючого конденсатора C . Крім того, індуктивність L_s використовується для найкращої фільтрації струму, що живить набір або світлодіод.

Для того, щоб забезпечити керування транзистором безпосередньо з порту мікроконтролера, було використано транзистор, спеціально адаптований до рівнів напруги TTL-схем (IRF-транзистор серії IRLZ). Сигнал зворотного зв'язку, пропорційний до струму світлодіода, знімається з вимірювального резистора R_p . Для усунення високочастотних шумів сигналу, що впливають на точність АЦП, у колі зворотного зв'язку використано фільтр нижніх частот FDP. Додаткова послідовна індуктивність L_s фільтрує струм світлодіода, завдяки чому досягається постійний вихідний струм, незважаючи на імпульсний режим роботи. Подача постійного струму на світлодіод в освітлювальних приладах (без мерехтіння) важлива для багатьох застосувань, серед інших причин, пов'язаних зі здоров'ям [2].

Структурна схема мікропроцесорного контролера (МПК) показана на рисунку 3.2.

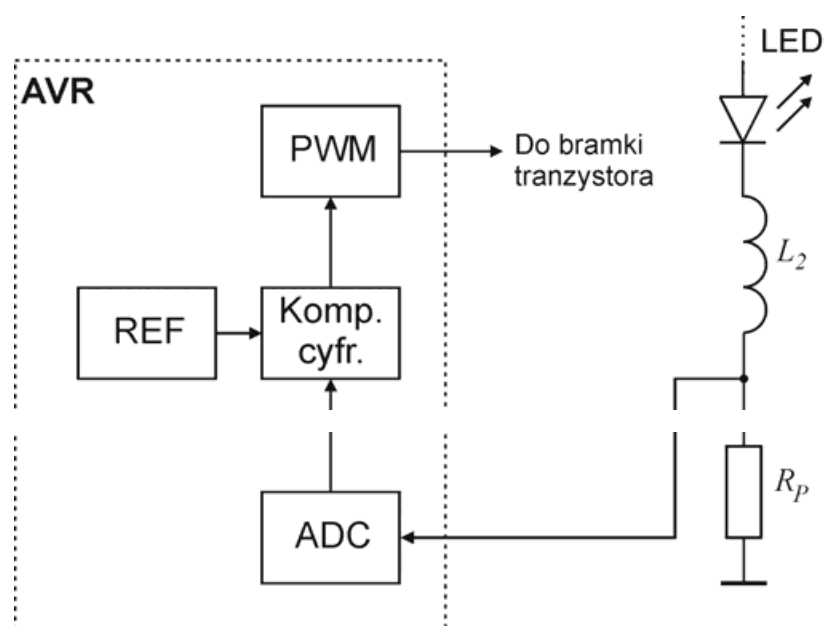


Рисунок 3.2 – Структурна схема мікропроцесорного контролера та його розташування в системі керування.

Мікропроцесорний контролер (МПК) складається з чотирьох основних блоків:

- аналого-цифрового перетворювача А/С;
- цифрового компаратора КС;
- задавача опорного слова SREF;
- генератора прямокутних сигналів з регульованим заповненням ШІМ.

Окремі блоки реалізовані програмно та апаратно за допомогою мікроконтролера сімейства AVR типу ATmega8 [3].

В якості генератора ШІМ використовується внутрішній апаратний блок восьмирозрядного лічильника TCNT2 мікроконтролера ATmega8.

Вбудований аналого-цифровий перетворювач мікроконтролера, що працює за методом послідовного наближення, налаштований на 8-розрядну роботу. Такої роздільної здатності виявилось цілком достатньо і забезпечило 255 рівнів значень струму для живлення світлодіода. Цифровий компаратор і задавач еталонного слова були реалізовані програмно.

Принцип роботи мікропроцесорного регулятора струму світлодіода полягає в наступному.

Падіння напруги на вимірювальному резисторі, пропорційне до струму світлодіода, фільтрується (усунення шумів - підвищення точності перетворення) і перетворюється в цифрову форму. Восьмибітне значення слова, що відповідає необхідному значенню струму світлодіода, встановлюється за допомогою задавача еталонного слова, керованого користувачем за допомогою сигналів + і -. У найпростішому випадку в якості опорних сигналів поточного значення можна використовувати імпульси від моностабільних кнопок.

Програмний цифровий компаратор порівнює два восьмибітних слова і керує ШІМ-генератором таким чином, щоб значення вихідного струму залишалось

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

постійним (заданим користувачем) незалежно від коливань напруги живлення. При виявленні відхилення (похибки) струму живлення світлодіода від заданого значення мікроконтролер автоматично збільшує або зменшує коефіцієнт заповнення імпульсів, що керують ключовим транзистором джерела живлення, що викликає бажану корекцію значення струму світлодіода.

3.2 Результати експериментів

Для експериментальної перевірки запропонованої схеми був використаний стенд, який складається з:

- регульованого джерела живлення NDN DF1730SL20A;
- чотириканального осцилографа Tektronix типу TDS3014;
- двох тестерів струму Tektronix типу TCP202;
- стандартних тестерів напруги.

В якості навантаження використовувався білий світлодіод потужністю 10 Вт. Вольт-амперна характеристика використаного світлодіода показана в таблиці 1 і на рисунку 3.3.

Таблиця 1: Вольт-амперна характеристика досліджуваного світлодіода

№ п/п	U, В	I, А
1	2,92	0,02
2	3,24	0,10
3	3,44	0,20
4	3,71	0,40
5	3,89	0,60
6	4,05	0,80
7	4,20	1,00
8	4,47	1,50
9	4,59	1,75
10	4,75	2,00

Після дослідження характеристик світлодіода було проведено тестування всієї схеми. Наведені осцилограми отримані з наступними параметрами:

- частота ШІМ сигналу: 16 кГц,
- індуктивність $L = L_s = 170$ мкГн,
- опір вимірювального резистора $R_p = 0,45$ Ом,
- ємність фільтрації $C = 220$ мкФ.

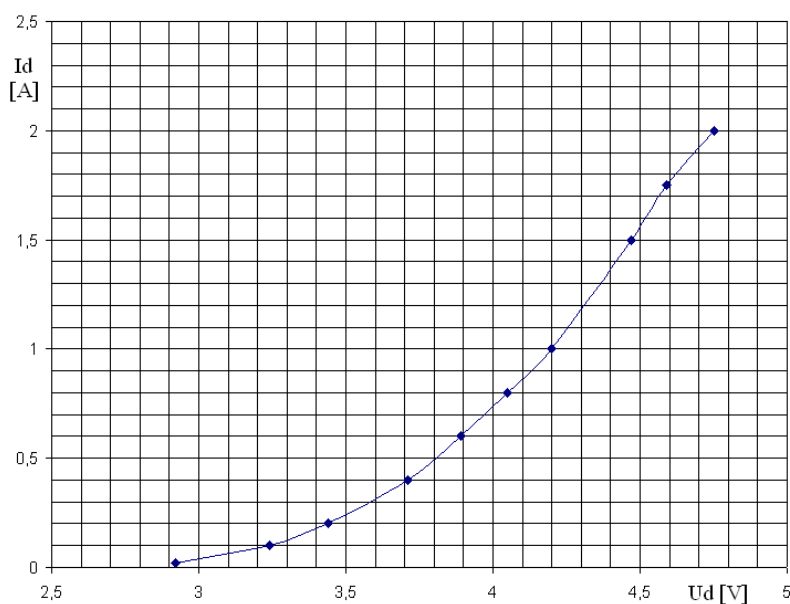


Рисунок 3.3 – Вольт-амперна характеристика досліджуваного світлодіода

На рисунках 3.4, 3.5 і 3.6 показано осцилограми керуючих напруг транзистора Т і струмів світлодіода та індуктивності L при заданому вихідному струмі (рівному 1 А) і трьох різних входних напругах.

Варто зазначити, що зміна входної напруги автоматично змінює коефіцієнт заповнення керуючого імпульсу і підтримує значення струму світлодіода на фіксованому рівні. Зміна входної напруги на практиці відбувається, наприклад, через зміну освітленості фотоелектричних панелей, що живлять, або через розрядження батарей живлення. Подача постійного струму, незалежно від зміни

вхідної напруги, бажана практично в кожній системі. У кожному з випадків, проаналізованих під час випробувань, рівень пульсацій струму світлодіодів, з практичної точки зору, є мізерно малим.

У представленому діапазоні зміни вхідної напруги (від 4,3 В до 6,1 В) коефіцієнт заповнення форми сигналу керування автоматично змінюється від 5 % до 60 %. Будь-яка зміна вхідної напруги в представленому діапазоні призведе до зміни коефіцієнта заповнення, що призведе до підтримання струму діода на постійному рівні. Діапазон зміни коефіцієнта заповнення імпульсів і допустимих змін вхідної напруги залежить від вибору параметрів схеми перетворювача і очікуваного значення струму навантаження (струму живлення світлодіода).

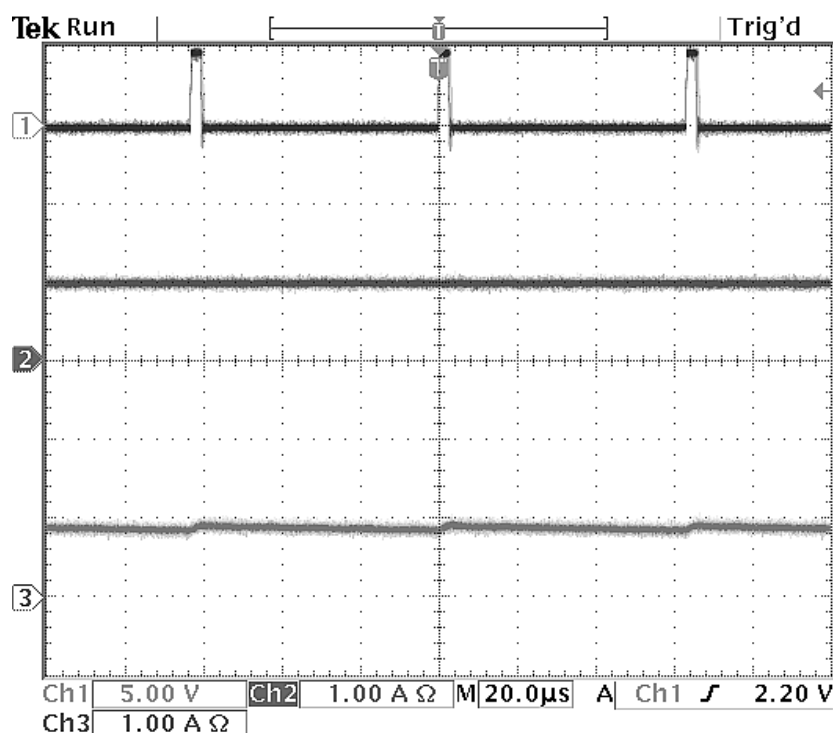


Рисунок 3.4 – Форма сигналу керування транзистором (канал 1), струм світлодіода (канал 2), струм індуктивності L (канал 3), при вхідній напрузі 6,1 В

Динаміка досліджуваної схеми достатня для того, щоб користувач не зміг помітити зміни яскравості світла при зміні вхідної напруги, при цьому точне вимірювання часу відгуку на даному етапі досліджень не проводилося.

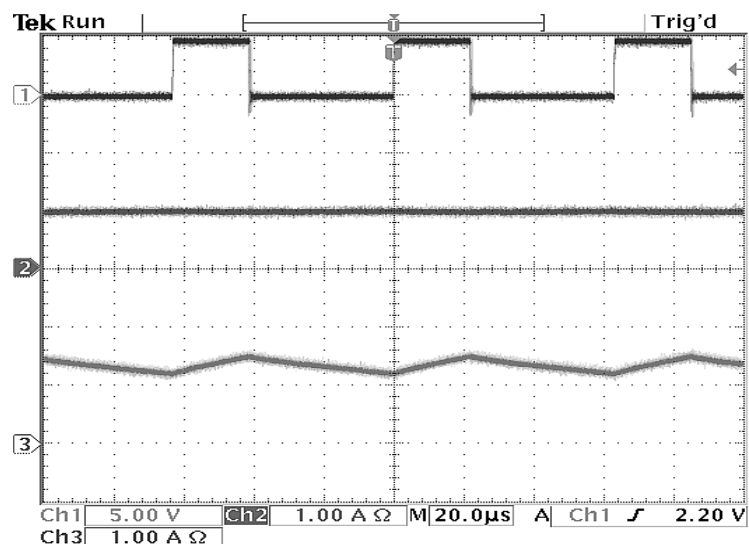


Рисунок 3.5 – Осцилограми керування транзистором (канал 1), струму світлодіода (канал 2), струму індуктивності L (канал 3), при напрузі 4,8В

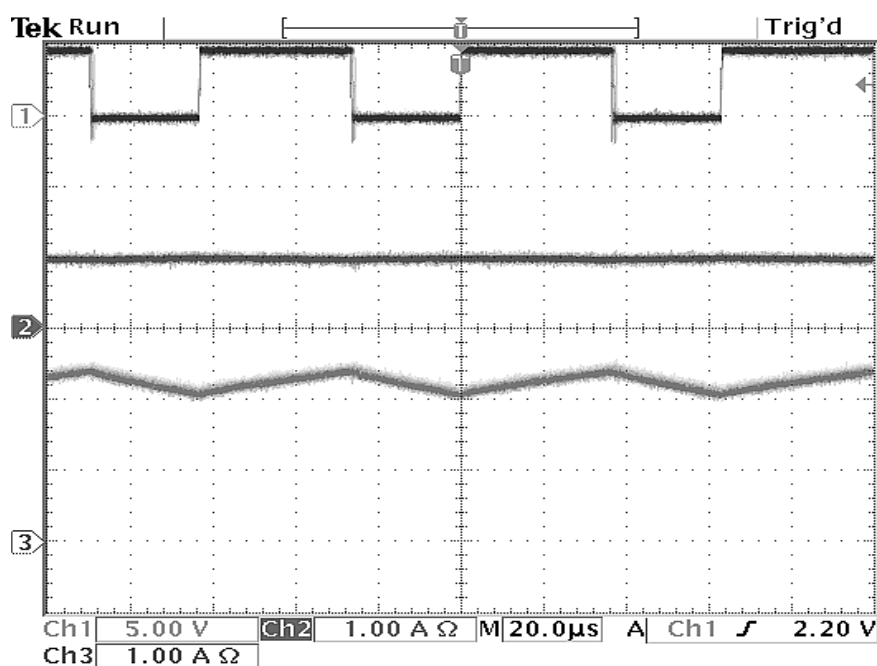


Рисунок 3.6 – Осцилограми керування транзистором (канал 1), струму світлодіода (канал 2), струму індуктивності L (канал 3), при вхідній напрузі 4,3В

Завдяки підвищувальній схемі перетворювача система живлення світлодіода коректно працює при напругах живлення, близьких до падіння напруги на діоді.

Аналогічні осцилограми напруги і струму для заданого струму діода 2 А наведено на рисунках 3.7 і 3.8 При роботі схеми з більшими струмами навантаження можна значно зменшити значення вимірювального резистора R_p без зниження точності керування. Таким чином, найкраще підбирати резистор R_p під конкретне навантаження.

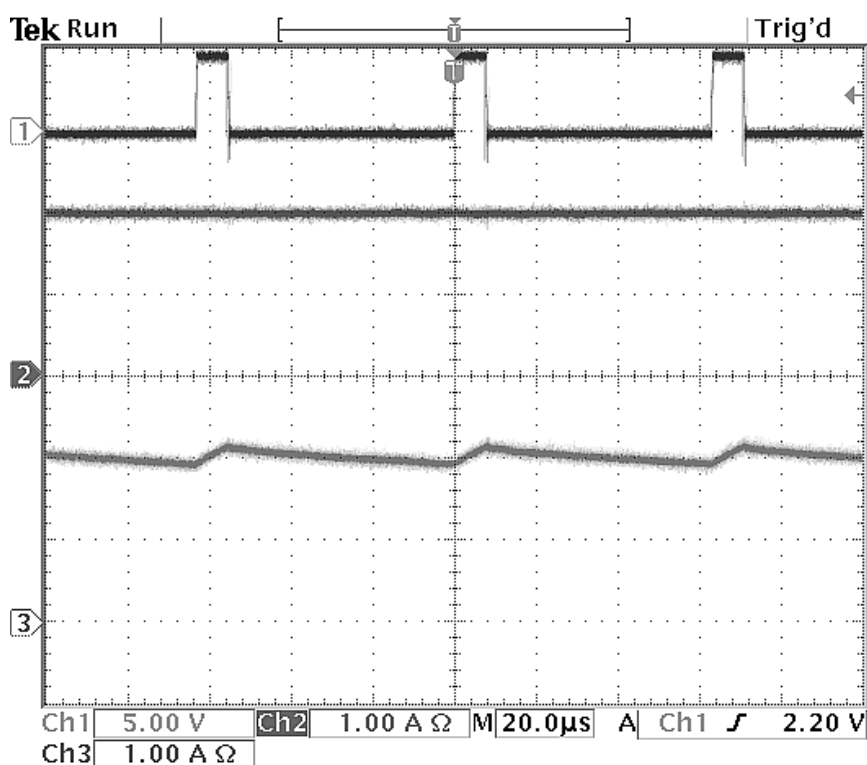


Рисунок 3.7 – Осцилограми сигналу керування транзистором (канал 1), струму світлодіода (канал 2), струму індуктивності L (канал 3), при вхідній напрузі 9 В

Крім параметрів перетворювача, на динаміку системи впливають час обробки аналого-цифрового перетворювача, час обробки програмного забезпечення (арифметичні операції, програмні цикли, умови тощо) та вихідна частота генератора ШІМ.

Допустимий діапазон вхідних напруг, який гарантує коректну роботу системи, залежить від параметрів перетворювача, особливо L , C , частоти ключів і вимірювального опору R_p . Ці параметри можна оптимізувати для досягнення бажаного струму діода в заданому діапазоні зміни вхідної напруги.

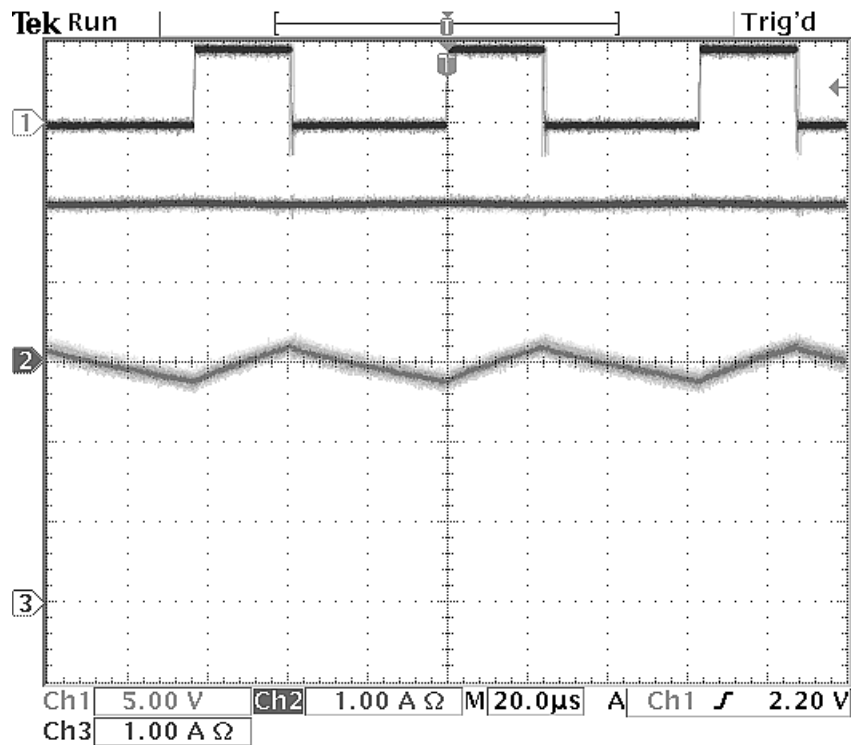


Рисунок 3.7 – Осцилограми сигналу керування транзистором (канал 1), струму світлодіода (канал 2), струму індуктивності L (канал 3), при вхідній напрузі 7,9 В

3.3 Рекомендації щодо застосування

Завдяки використанню мікропроцесора запропонована схема є набагато універсальнішою, ніж спеціалізовані інтегральні драйвери світлодіодів. Представлений контролер може бути використаний, серед іншого:

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

- в домашніх освітлювальних установках,
- для підсвічування об'єктів,
- для освітлення музейних та виставкових експозицій,
- в багатофункціональних автомобільних лампах.

Програмованість системи дозволяє:

- вмикати і вимикати освітлення в будь-який час (навіть відповідно до дня тижня або пори року);
- автоматично підлаштовуватися під зовнішні умови освітлення (потрібен додатковий сенсор);
- підтримувати постійну інтенсивність освітлення незалежно від старіння джерела світла (потрібен додатковий датчик);
- створювати складні світлові ефекти або сцени.

У випадку з автомобільними фарами, один світлодіодний блок може виконувати кілька функцій. Залежно від яскравості, один світлодіодний блок може функціонувати як стоп-сигнал, габаритні вогні або габаритні ліхтарі. Якщо використовуються RGB-світлодіоди і ефект змішування кольорів досягається за рахунок керування сигналами з різним коефіцієнтом заповнення, можна досягти додаткових функцій, таких як зміна кольору (наприклад, для показчиків повороту або ліхтарів заднього ходу).

Використання програмованого контролера також може бути важливим з точки зору енергоефективності освітлення. Не вся потужність системи освітлення повинна використовуватися в кожній ситуації і, крім того, час використання освітлення можна регулювати, що призводить до економії споживання електроенергії на освітлення.

					КР.KI.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

ВИСНОВКИ

1. Результати експериментів підтвердили очікувану працездатність схеми. Запропоноване рішення містить недорогі електронні компоненти завдяки використанню в схемі керування недорогого мікроконтролера сімейства AVR8. Мікроконтролер виконує більшість необхідних функцій. Крім того, без модифікації схеми, параметри керування можуть бути змінені програмно або адаптовані до необхідних параметрів застосування.

2. Схема є серйозною альтернативою широкому спектру спеціалізованих малопотужних ІС, дозволяючи значно збільшити допустимий вихідний струм шляхом вибору ключового транзистора.

3. Живлення світлодіодів постійним струмом, досягнуте в представленому рішенні, серед іншого, за рахунок використання додаткової фільтруючої індуктивності, дозволяє усунути небажане мерехтіння.

4. Завдяки підвищувальній конфігурації запропонована система живлення може бути використана в портативних пристроях, що живляться від батарейок і фотоелементів, або в додатках, що використовують ланцюжки діодів, з'єднаних послідовно або послідовно – паралельно.

5. Завдяки модульній конструкції контролера можна розширити його функціональність, наприклад, реалізувати плавний пуск, який полягає в плавному досягненні заданого значення струму в запрограмований користувачем час.

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sadowski P. Zasilanie diod LED. Elektroinstalator, №11, 2006. s. 64–66.
2. Materiały informacyjne Mean Well Europe B. V. 2012.
3. ДСТУ EN IEC 61000-3-2:2019 Електромагнітна сумісність. Частина 3-2. Норми. Норми на емісію гармонік струму (для сили вхідного струму обладнання не більше ніж 16 А на фазу) (EN IEC 61000-3-2:2019, IDT; IEC 61000-3-2: 2018)
4. Gołaszewski M. Układy zasilania diod LED dużej mocy. Elektronika Praktyczna, №5, 2009. s. 73–80.
5. Grodzki L.: Constant-current Driving of the LEDs' group, Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 86, 2010, Nr 10 , p.203-205.
6. Wojtkowski W., Karpiuk A.: Sześciokanałowy sterownik diod LED z interfejsem 12C, Pr. Inst. Elektrotech. - R.57, z.245, 2010. s.49-56.
7. Grodzki L.: Wybrane aspekty impulsowego i stałoprądowego sterowania diodami LED. Przegląd Elektrotechniczny, R. 88, 2012, Nr 3a, s.74-77.
8. Hysteretic, Buck, High Brightness LED Driver with High-Side Current Sensing HV9910 [Електронний ресурс] / Режим доступу: www.manua.ls/microchip/hv9919b/manual
9. Constant-Current Boost and SEPIC LED Driver with Internal Compensation LM3410 [Електронний ресурс] / Режим доступу: www.ti.com/product/LM3410
10. Constant Current Buck Regulator for Powering LEDS datasheet LM3405 [Електронний ресурс] / Режим доступу: www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3405.pdf
11. LED Driver Evaluation Board LM3433 [Електронний ресурс] / Режим доступу: www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/217853/NSC/LM3433.html
12. LM5576/-Q1 SIMPLE SWITCHER® 75 V, 3 A Step-Down Switching Regulator [Електронний ресурс] / Режим доступу: www.ti.com/product/LM5576

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

13. Łukasz Putz, Milena Kurzawa. Budowa i działanie układów sterująco-zasilających zintegrowanych w lampach Led. Electrical Engineering. No 92, 2017. s. 227 - 238

14. Bogusz J. Zasilanie diod LED, Elektronika Praktyczna, No 9, 2014. s. 56–73.

15. Karta katalogowa przetwornicy ADP1610 firmy Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/en/products/adp1610.html>.

16. Karta katalogowa przetwornicy BP5847W firmy Rohm Semiconductors. URL: <https://www.rohm.com//brochure>.

17. Karta katalogowa przetwornicy LM3405A firmy Texas Instruments. URL: <https://www.ti.com/product/LM3405A>

18. Karta katalogowa przetwornicy ZXLD1366 firmy Diodes Incorporated. URL: <https://www.diodes.com/part/view/ZXLD1366>.

19. Priscak D. Zasilanie wysokonapięciowych diod LED HVHB. Elektronika Praktyczna, s. 64–66, No1, 2013.

20. Putz Ł. Requirements of using the LED lamps Power supplies / Proceedings of XV International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering, p. 44, Terchova (Slovakia), 9–12.09.2014 r.

21. Putz Ł. Wpływ zasilaczy i układów sterujących na działanie elektroluminescencyjnych źródeł światła / Materiały XXXV Międzynarodowej Konferencji z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, s. 67–68, Ustroń, 23–26.05.2012r.

22. Sobesto K. Zasilanie diod LED małej mocy – nowe spojrzenie. Oświetlenie LED, 01/2012. s. 22–23.

23. Паперовська С.Р. Функціонування системи керування та живлення потужних світлодіодів \ Матеріали науково-практичної конференції молодих вчених і студентів «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (ІКСМ-2025). Тернопіль, 2025. С. 107-109.

24. Методичні вказівки до оформлення курсових проектів, звітів про проходження практики, випускних кваліфікаційних робіт для студентів

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

спеціальності «Комп'ютерна інженерія» / І.В. Гураль, Л.О. Дубчак / Під ред. О.М. Березького. Тернопіль: ТНЕУ, 2019. 33 с.

25. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Техніко-економічне обґрунтування розробки комп'ютерних систем»/ Н.Я. Савка, І.Р. Паздрій / Під ред. О.М. Березького. Тернопіль: ТНЕУ, 2019. 40 с.

26. Положення про організацію освітнього процесу Західноукраїнському національному університеті. Тернопіль, 2020.

27. Загальні методичні рекомендації з підготовки, оформлення, захисту та оцінювання кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) і другого (магістерського) рівнів. Тернопіль: ЗУНУ, 2024. 83 с.

28. Методичні вказівки до випускних кваліфікаційних робіт освітнього рівня “Бакалавр” спеціальності “Комп'ютерна інженерія”/ О.М. Березький, Г.М. Мельник, Л.О. Дубчак, Ю.М. Батько / Під ред. О.М. Березького. Тернопіль: ЗУНУ, 2023. 52 с.

					КР.КІ.10660334.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		