

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Світлодіодний драйвер на основі резонансного конденсаторного перетворювача**

Виконав(ла): студент 6 курсу, групи ЕТм
спеціальності 141

«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

(підпис) Костів А.Ю.
(прізвище та ініціали)

Керівник (підпис) Філюк Я.О.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль (підпис) Коваль В.П.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри (підпис) Коваль В.П.
(прізвище та ініціали)

Рецензент (підпис) Микитишин А.Г.
(прізвище та ініціали)

Тернопіль 2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 202_ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Костіву Анатолію Юрійовичу
(Прізвище, Ім'я, По Батькові)

1. Тема роботи Світлодіодний драйвер на основі резонансного конденсаторного перетворювача

Керівник роботи Філюк Ярослав Олександрович, к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «12» Листопада 2025 року № 4/7-966

2. Термін подання студентом завершеної роботи Грудень 2025 року

3. Вихідні дані до роботи технічні характеристики світлодіодного навантаження
Електричні характеристики вхідної мережі. Вимоги до технічних характеристик драйвера.
Електричні характеристики вхідної мережі.

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

1. Аналітичний розділ

2. Розрахунково-дослідницький розділ

3. Проектно-конструкторський розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці. Безпека в надзвичайних ситуаціях	Гурик О. Я. к.т.н., доцент		
	Теслюк В.М., проректор з АГРБ		
Нормоконтроль	Коваль В. П. к.т.н., зав. кафедри ЕІ		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ		
2	Аналітичний розділ		
3	Розрахунково-дослідницький розділ		
4	Проектно-конструкторський розділ		
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях		
6	Висновки		
7	Оформлення пояснювальної записки		
8	Оформлення графічної частини		

Студент

(підпис)

Костів А.Ю.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Філюк Я.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Костів А. Ю. Світлодіодний драйвер на основі резонансного конденсаторного перетворювача.

Стор.65; рисунок 36; табл. 2 ; джерел -14; додатків - 0.

Метою кваліфікаційної роботи було розроблення та дослідження світлодіодного драйвера на основі резонансного конденсаторного перетворювача зі змінною індуктивністю, який забезпечує ефективне та незалежне керування струмом світлодіодних навантажень.

Розроблено резонансний перетворювач із перемиканням конденсаторів зі змінною індуктивністю для живлення світлодіодних навантажень. Запропоновано керування струмом, що забезпечує широкий діапазон дімування та роботу в режимі ZVS. Виконано розрахунок основних елементів і показано можливість застосування схеми в енергоефективних мультимедійних і багатовихідних світлодіодних системах..

Виконано імітаційне моделювання світлодіодного драйвера на основі резонансного перетворювача із перемиканням конденсаторів зі змінною індуктивністю в середовищі PSIM. Розроблено моделі світлодіодного навантаження та змінного індуктора, що забезпечують адекватне відтворення реальної роботи системи. Результати моделювання підтвердили роботу перетворювача в режимі ZVS, широкий діапазон дімування, стійкість до змін вхідної напруги та незалежне регулювання струмів у багатовихідній світлодіодній системі.

Ключові слова: резонансний перетворювач, змінна індуктивність, світлодіодний драйвер, керування струмом.

ЗМІСТ

Реферат	3
ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Принцип роботи та структура світлодіода	8
1.1.1 Живлення світлодіодів від джерела постійного струму	12
1.2 Драйвери для світлодіодних ламп	14
1.3 Методи та схеми дімування	17
1.4 Висновок до розділу	19
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	20
2.1 Резонансні перетворювачі із перемиканням конденсаторів (РППК)	20
2.1.1 Підвищувальний режим РППК зі змінним індуктором	23
2.2 Проектування компонентів перетворювача	31
2.2.1 Розрахунок резонансного конденсатора	32
2.2.2 Розрахунок вихідного конденсатора	34
2.2.3 Розрахунок діапазону індуктивності змінного струму	35
2.2.4 Мультиватна та багатовихідна система	36
2.2.5 Контроль зміщення обмотки змінного індуктора	39
2.3 Висновки до розділу	41
3 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	42
3.1 Світлодіодний драйвер та аналіз схем моделювання	42
3.1.1. Світлодіодне моделювання	43
3.1.2 Моделювання змінної індуктивності	46
3.2 Результати моделювання драйвера світлодіодів	49
3.3 Висновки до розділу	56
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	57
4.1 Охорона праці	57
4.1.1. Техніка безпеки при експлуатації електромереж	57

4.2. БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	59
4.2.1 Дослідження стійкості роботи у надзвичайних ситуаціях підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі	59
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	64

ВСТУП

Актуальність теми роботи Стрімкий розвиток світлодіодних технологій зумовлює зростання вимог до систем їх електроживлення, зокрема щодо енергоефективності, надійності, електромагнітної сумісності та можливості гнучкого керування світловим потоком. Традиційні імпульсні перетворювачі напруги, що застосовуються у світлодіодних драйверах, часто характеризуються підвищеними комутаційними втратами, значними електромагнітними завадами та обмеженим діапазоном дімування. Особливо актуальною є проблема незалежного керування струмом у багатовихідних світлодіодних системах. У цьому контексті перспективним напрямом є використання резонансних конденсаторних перетворювачів, які забезпечують м'яке перемикання силових ключів і зниження втрат. Застосування змінної індуктивності як керуючого елемента дозволяє реалізувати струмове керування без зміни частоти комутації, що спрощує систему керування та підвищує стабільність роботи. Тому дослідження світлодіодного драйвера на основі резонансного конденсаторного перетворювача є актуальним з наукової та практичної точок зору.

Мета і завдання роботи: метою роботи є розроблення та дослідження світлодіодного драйвера на основі резонансного конденсаторного перетворювача зі змінною індуктивністю, який забезпечує ефективне та незалежне керування струмом світлодіодних навантажень.

Досягнення мети визначається вирішенням наступних завдань:

1. Проаналізувати принципи роботи резонансних перетворювачів із перемиканням конденсаторів;
2. Розробити структуру світлодіодного драйвера та обґрунтувати вибір методу керування;
3. Виконати розрахунок основних елементів перетворювача;
4. Створити імітаційну модель системи;
5. Дослідити її статичні та динамічні характеристики.

Об’єкт дослідження: процеси перетворення та регулювання електричної енергії в резонансному конденсаторному перетворювачі при живленні світлодіодних навантажень.

Предмет дослідження: Техніко-енергетичні характеристики світлодіодного драйвера на основі резонансного конденсаторного перетворювача.

Наукова новизна отриманих результатів: Удосконалено світлодіодний драйвер на основі резонансного конденсаторного перетворювача з керуванням вихідним струмом шляхом зміни резонансної індуктивності без зміни частоти комутації. Розроблено та обґрунтовано метод струмового керування, який забезпечує роботу перетворювача в режимі комутації при нульовій напрузі (ZVS) у широкому діапазоні дімування.

Практична цінність результатів дослідження Запропонована схема світлодіодного драйвера дозволяє реалізувати мультиватні та багатовихідні системи без ускладнення апаратної частини та без зміни частоти комутації. Запропонований підхід до струмового керування на основі змінної індуктивності спрощує реалізацію багатовихідних світлодіодних систем і забезпечує незалежне регулювання кожного навантаження..

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи і її результати доповідалися на Міжнародній науково-технічній конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій “, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль, 2025 р.) [1].

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 розділів, висновків та переліку посилань.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Принцип роботи та структура світлодіода

Перші спроби людини створити лампу штучного світла відбулися, ймовірно, близько 70 000 років тому, хоча перша електрична лампа (вугільна дугова лампа) була розроблена лише в XIX столітті, у 1801 році [1, 2]. Найвизначніша еволюція, що призвела до зародження світлотехнічної промисловості, відбулася з появою лампи розжарювання у 1874 році, яку створили Генрі Вудворд і Метью Еванс. Пізніше вони продали свій патент у США Томасу Едісону, який вважається «батьком» електричної лампочки [3]. У 1879 році він запатентував нову версію лампи розжарювання, яка згодом стала основою масового виробництва лампочок потужністю 16 Вт, що могли працювати близько 1500 годин [1].

Згодом було розроблено дедалі більше типів ламп розжарювання, що призвело до появи нових і більш ефективних технологій, доступних сьогодні. До них належать галогенні лампи, газорозрядні лампи, флуоресцентні лампи, а також нові та перспективні світлодіодні лампи. Світлодіодне освітлення, яке зазвичай називають твердотільним (Solid-State Lighting, SSL).

Світло — це особлива форма електромагнітного випромінювання, що поширюється в певному напрямку і здатна збуджувати зорову систему людини [4]. Оскільки світло є дуже загальним поняттям, його зазвичай характеризують з точки зору фізичних явищ і характеристик такими параметрами: світловий потік, світловіддача, освітленість, індекс передавання кольору (CRI), колірна температура (СТ), корельована колірна температура (CCT), а також підтримання світлового потоку та термін служби.

Щодо механізмів, які використовуються для виробництва видимого світла, найпоширенішими є розжарювання, що є окремим випадком теплового випромінювання, і люмінесценція. Світлодіоди, на відміну від більшості джерел світла, є напівпровідниковими приладами, в яких світло генерується за

рахунок люмінесценції. Люмінесценція, на відміну від розжарювання, де світло виникає внаслідок нагрівання, є формою випромінювання холодного тіла, або, точніше, механізмом випромінювання електромагнітного випромінювання тілом унаслідок збудження електронів, спричиненого зовнішнім агентом [2].

Люмінесценція може проявлятися в декількох формах, однак у цій роботі увагу зосереджено на світлодіодах, які працюють на основі механізму електролюмінесценції. Цей механізм полягає у випромінюванні світла в результаті дії електричного поля на певну речовину. Перше відоме повідомлення про електролюмінесценцію датується 1907 роком. Вважається, що перший світлодіод був винайдений у 1920 році, проте лише у 1968 році відбулося перше масове виробництво світлодіодів компанією Monsanto та представлення їх компанією Hewlett-Packard [9].

Початково світлодіоди мали низьку ефективність генерації світла і були доступні лише в жовто-зеленому, помаранчевому та червоному діапазонах, що обмежувало їх використання індикаторними застосуваннями, такими як сигнальні лампи та алфавітно-цифрові дисплеї. Лише у 1993 році з'явилися перші високояскраві сині світлодіоди (HB LED) на основі InGaN, здатні випромінювати світло у всьому видимому спектрі. Їх винайшов Шуджі Накамура, який отримав Нобелівську премію з фізики у 2014 році «за винахід ефективних синіх світлодіодів, що дозволило створити яскраві та енергозберігаючі джерела білого світла». Сьогодні більшість світлодіодів виготовляються на основі напівпровідникових сполук InGaAlP та InGaN.

Світлодіод — це діод, здатний випромінювати світло. Його електричний символ наведено на рисунку 1.1, а типова вольт-амперна характеристика — на рисунку 1.2. Процес генерації світла у світлодіоді показано на рисунку 1.3.

Серцевиною світлодіода є чіп напівпровідникового матеріалу, легованого домішками для створення р–п-переходу, який дозволяє електричному струму текти лише в одному напрямку — від анода до катода. Електролюмінесценція в світлодіоді є результатом випромінювальної рекомбінації пари електрон–дірка через заборонену зону напівпровідника у світловипромінюючому шарі, коли р–

n-перехід збуджується протіканням електричного струму [2]. Типова конструкція високояскравого світлодіода наведена на рисунку 1.4.



Рисунок 1.1 – Світлодіод як діод, що випромінює світло

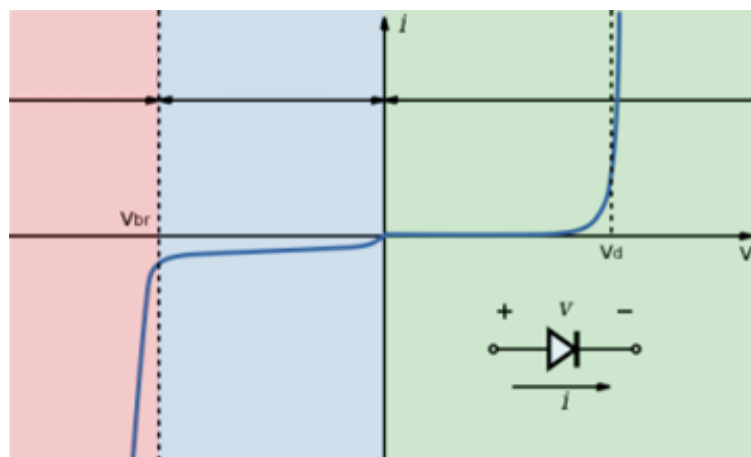


Рисунок 1.2 – Типова вольт-амперна характеристика діода

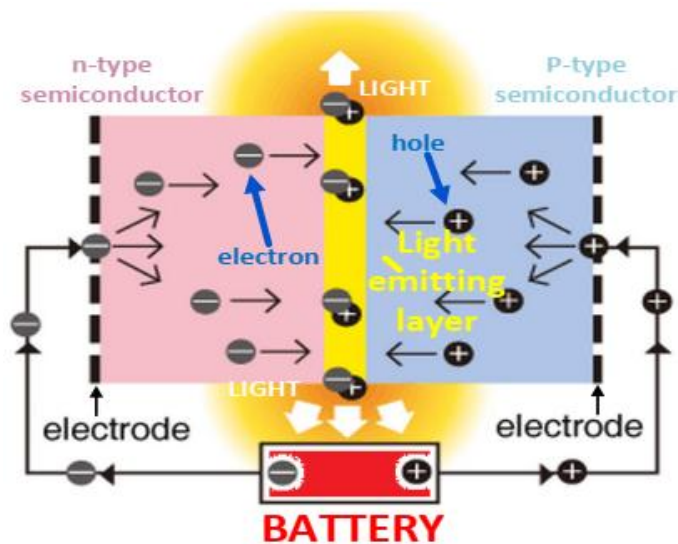


Рисунок 1.3 – Генерація світла у світлодіоді

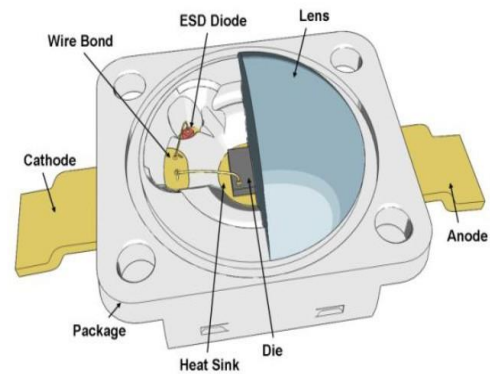
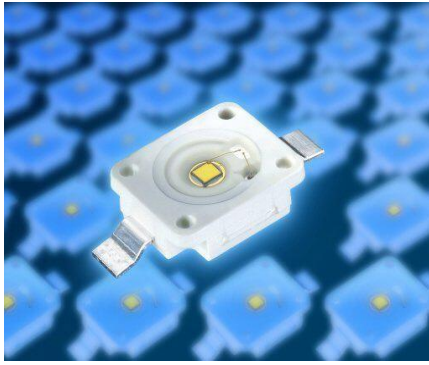


Рисунок 1.4 – Конструкція високояскравого світлодіода

Типовими загальними елементами з яких складається один світлодіод, є світлодіодний чіп або матриця, термоматеріали та радіатори, оптичні елементи, механічні та електричні елементи. Залежно від того, з чого виготовлений світлодіод і як він сконфігурований, колір світла, що виробляється, відрізняється. Насправді, світлодіоди, доступні сьогодні, мають надзвичайно високу гнучкість для численних застосувань, і тому їх можна класифікувати на основі їхньої природи: органічні пристрої (OLED) або неорганічні пристрої (неорганічні напівпровідники). Неорганічні світлодіоди, найпоширеніший тип, можна класифікувати за номінальною потужністю або корпусом наступним чином [2]:

- Світлодіоди малої та середньої потужності (< 1 Вт), в основному для неосвітлювальних цілей, таких як сигналізація.
- Світлодіоди потужністю 1 Вт - також відомі як силові світлодіоди або світлодіоди високої яскравості (P-LED або HB-LED), здебільшого використовуються для освітлення і є найефективнішим типом на сьогоднішній день, до 303 лм/Вт [9].
- Потужні світлодіоди (> 5 Вт), розроблені для подолання добре відомої проблеми, а саме відносно високої вартості світлового потоку через велику кількість окремих світлодіодів, необхідних для досягнення певного світлового потоку, особливо в додатках з високою потужністю.
- Інші: світлодіоди змінного струму, які підключаються безпосередньо до мережі змінного струму [6], і високовольтні світлодіоди,

призначені для використання в додатках, в яких перетворення енергії з мережевої напруги до декількох вольт може призвести до серйозних обмежень ефективності або продуктивності [9].

1.1.1 Живлення світлодіодів від джерела постійного струму

Шини розподільчого електроживлення постійного струму напругою 48 В для силового телекомунікаційного обладнання вже багато років широко використовуються в усьому світі і довели свою надійність, безпечність та економічну ефективність. Саме тому цей стандартний рівень напруги чітко визначений як Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів (ETSI), так і Американським національним інститутом стандартів (ANSI).

Одним з мотивів універсального стандарту 48 В постійного струму є те, що він дозволяє працювати на провіднику під напругою з мінімальним ризиком отримання травм і без застосування заходів безпеки. Це практична перевага, коли електрики працюють на значній відстані від джерела напруги і тому не можуть його відключити.

На рисунку 1.5 показана проста схема традиційної телекомунікаційної системи розподілу електроенергії низької напруги, яка широко використовувалася протягом багатьох років і все ще використовується сьогодні.

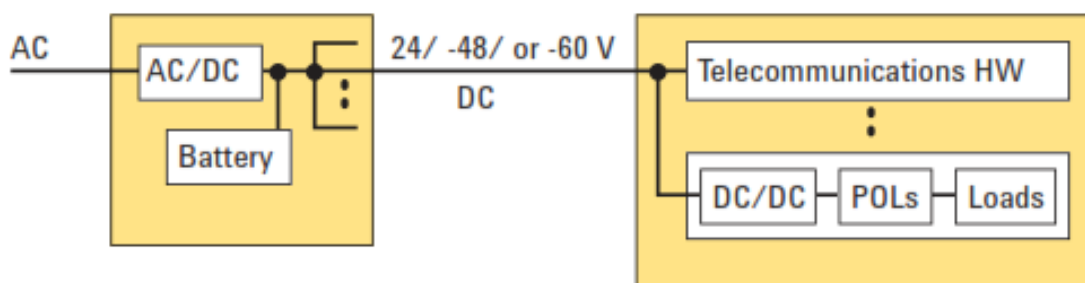


Рисунок 1.5 – Типовий телекомунікаційний низьковольтний розподіл живлення постійного струму.

Зазвичай змінний струм з електромережі перетворюється випрямлячами на постійний струм, який зазвичай зберігається в акумуляторах. Ці батареї

служать джерелом живлення для шини постійного струму, яка в подальшому живить все обладнання постійного струму.

У системах розподілу електроенергії постійного струму 48 В рівень напруги не є жорстко регламентованим через низку факторів, таких як той факт, що оскільки ці шини майже завжди підтримуються безпосередньо акумуляторною батареєю відповідної напруги, межі нормальної робочої напруги визначаються станом заряду батареї для нормальної роботи [5-7]. Таким чином, фактичний діапазон напруги вище і нижче зазначених рівнів визначається галузевими стандартами, такими як Північноамериканська міжнародна електротехнічна комісія (IEC) 60950 та Європейський інститут телекомунікаційних стандартів (ETSI).

Шина 48 В, як правило, найчастіше використовується в існуючих і нових установках, оскільки вона відповідає максимальним критеріям 60 В постійного струму для безпечної роботи з наднизькою напругою [8]. Однак на сьогодні вже є кілька випадків використання більш високих значень напруги, наприклад, 380 В постійного струму для живлення центрів обробки даних, а також інших.

Що стосується більшості світлодіодних ламп, то однією з тонких перешкод, з якою їм доводиться стикатися, є те, що схеми драйверів для цих пристроїв повинні мати можливість перетворення напруги змінного струму (зазвичай однофазної: 230 В змінного струму в Європі і 115 В змінного струму в США) в низьку напругу постійного струму. Хоча цей процес досить простий, він збільшує вартість і може значно знизити ефективність перетворення енергії всього пристрою керування світлодіодами.

Пряме підключення світлодіодів до живлення 48 В постійного струму дозволяє:

- підвищити безпеку;
- забезпечити гнучкість і ефективність;
- знизити грошові витрати;
- спростити електропроводку та захист пристроїв;

- зменшити ризик іскроутворення, пожежі та ураження електричним струмом;
- полегшити інтеграцію з альтернативними джерелами енергії, такими як сонячні або вітрові системи [10].

1.2 Драйвери для світлодіодних ламп

Світлодіоди є особливим типом джерел світла, які суттєво відрізняються від традиційних джерел своєю природою роботи. Для розробки задовільної світлодіодної лампи необхідно врахувати кілька важливих аспектів, що дозволяють подолати основні виклики, зокрема забезпечити високу ефективність і тривалий термін служби.

Однією з головних проблем є подолання типової різниці між терміном служби світлодіодів та терміном служби драйверів. З одного боку, сам світлодіод може працювати понад 100 000 годин [11, 12], а з іншого – поширені схеми драйверів мають обмежений термін служби через використання електролітичних конденсаторів. Вони мають високе співвідношення ємність/(вартість), але зазвичай працюють не довше 10 000 годин за суворих температурних умов [9].

Отже, драйвер світлодіода повинен бути спроектований так, щоб забезпечити хорошу ефективність при низьких значеннях ємності, що дозволяє використовувати неелектролітичні конденсатори [10]. Крім того, завдяки використанню сучасних електронних компонентів драйвери світлодіодів демонструють високу продуктивність з розширеними функціональними можливостями: змінний діапазон вхідної напруги, регулювання яскравості та кольору світіння, а також допоміжні схеми захисту. Такі драйвери повинні залишатися економічно привабливим рішенням при високій продуктивності.

Основні проблеми при розробці драйверів світлодіодних ламп безпосередньо пов'язані з фотометричними, електричними та тепловими характеристиками світлодіодів:

Фотометричні характеристики: існує високолінійна залежність між струмом світлодіодів і випромінюваним ними світловим потоком [2].

Електричні характеристики: невеликі коливання напруги на світлодіодах призводять до значних коливань струму [7].

Теплові характеристики: основною проблемою є вплив варіацій температури р-n переходу світлодіода, що сильно впливає на напругу та ефективний опір мікросхеми. При збільшенні температури р-n переходу зростає струм, що, у свою чергу, підвищує температуру переходу. Це може призвести до виходу з ладу світлодіодів або драйверів, якщо не застосувати схему контролю струму.

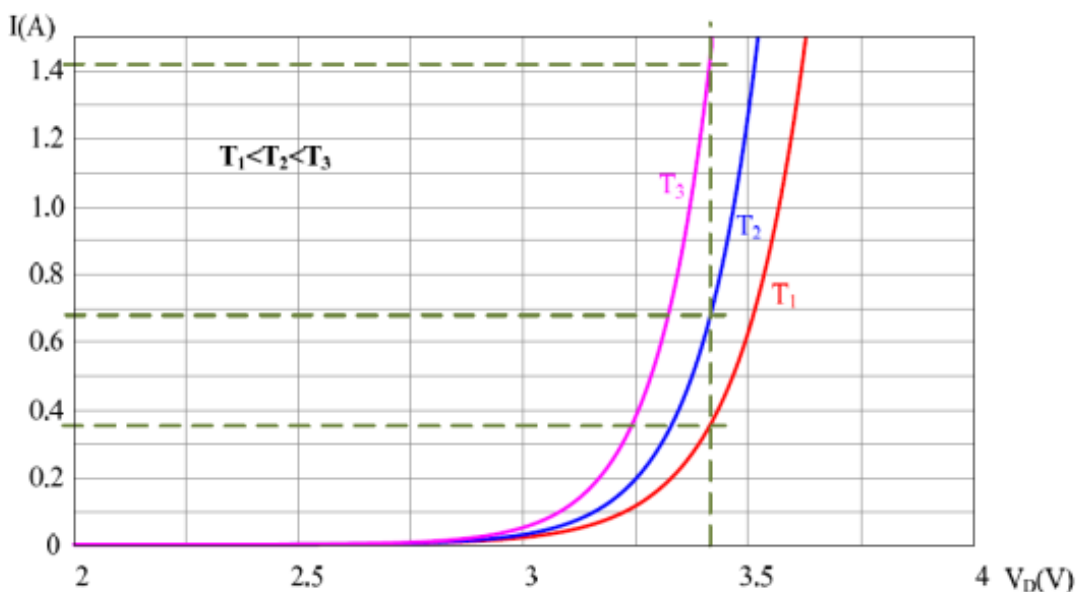


Рисунок 1.6 – Вплив температури переходу на вольт-амперну характеристику світлодіода

На рисунку 1.6 показано вольт-амперні характеристики одного світлодіода для трьох різних температур переходу, що демонструє небажаний зсув прямого струму світлодіода.

Отже, для подолання трьох вищезгаданих проблем, світлодіодні лампи повинні живитися від джерел струму, або, принаймні, мати функцію обмеження струму [7]. Крім того, що стосується теплових характеристик, важливим

аспектом, який слід враховувати при проектуванні світлодіодної лампи або системи світлодіодного освітлення, є розробка належної системи тепловідведення. Очевидно, що така система є обов'язковою для того, щоб відводити надлишкове тепло і забезпечувати довший термін служби світлодіодної лампи. Наприклад, на рисунок 1.7 коротко показано, як температура переходу світлодіода впливає на термін служби, що підтверджує, що бажано використовувати світлодіоди з якомога нижчою температурою переходу, щоб гарантувати довший термін служби.

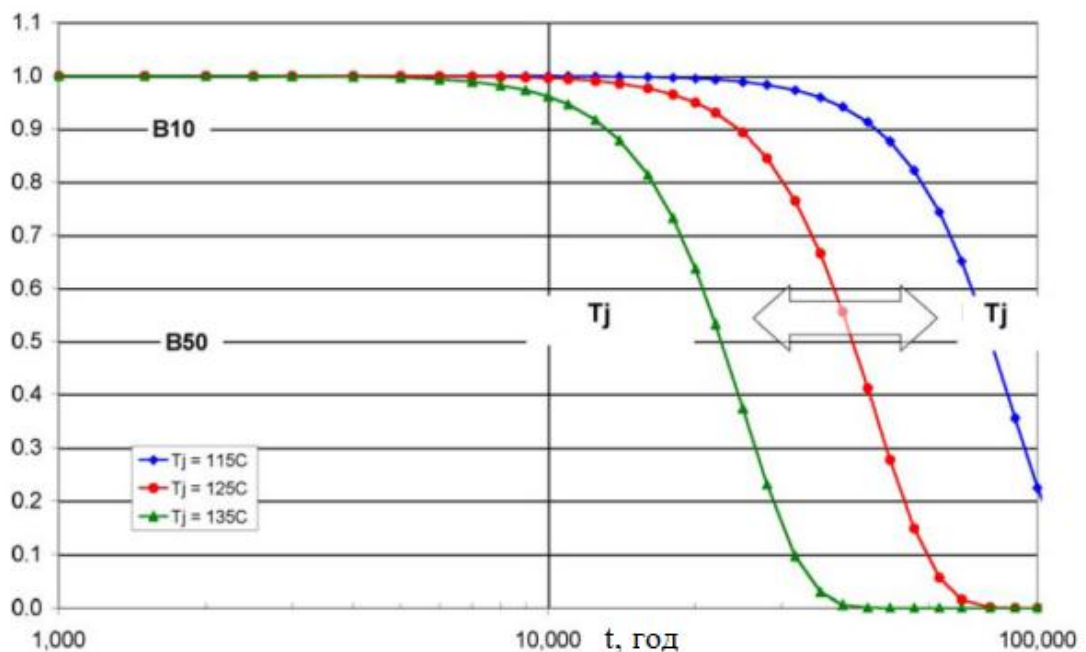


Рисунок 1.8 – Збереження світлового потоку залежно від температури переходу світлодіода

Існує безліч можливих топологій, залежно від типу використовуваних перетворювачів електроенергії. Як правило, необхідна схема визначається в основному вхідною напругою живлення і характеристиками прямої напруги світлодіодів [2, 6]. Отже, кожна схема має свої переваги і недоліки, і очевидно, що її правильний вибір сильно залежить від конкретних вимог застосування. Як правило, від мережі змінного струму, тобто від електромережі, схема драйверів світлодіодів повинна містити фільтр електромагнітних перешкод, а потім

випрямляч і каскад корекція коефіцієнта потужності (PFC), щоб відповідати відповідним міжнародним стандартам. Враховуючи не тільки ці стандарти, але й сферу застосування (живлення від мережі змінного струму), світлодіоди можуть постачатися з трьома різними типами архітектури драйверів: однокаскадними, двокаскадними або інтегрованими:

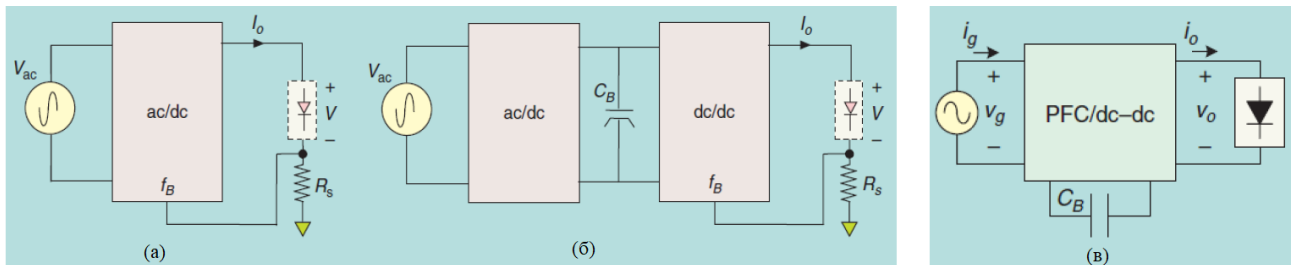


Рисунок 1.9 - (а) Однокаскадні (б) Двокаскадні (в) Інтегровані каскади, архітектури драйверів світлодіодів змінного струму.

Найбільш поширеною є архітектура на рисунку 1.9 (б), де за каскадом PFC (AC/DC) зазвичай слідує другий каскад, який відповідає не тільки за живлення світлодіодів і керування їхнім струмом, але й виконує роль джерела струму, оскільки, як зазначалося раніше, світлодіоди повинні житися від джерела струму [7].

У літературі також зустрічаються складні та більш досконалі інтегровані схеми, які мають всі попередні вимоги в єдиній інтегрованій архітектурі, як показано на рисунок 1.9 (в); Інтеграція каскадів корекції коефіцієнта потужності та драйверів світлодіодів призводить до надійного та економічно ефективного рішення.

1.3 Методи та схеми дімування

Що стосується світлодіодних ламп, за винятком дуже низьких рівнів дімування, їхня напруга суттєво не змінюється. Таким чином, потужність лампи, а отже, і рівень світлового потоку, можна просто змінювати, керуючи струмом лампи, завдяки їхній високолінійній залежності. До цього часу

запропоновані методи дімування використовували різні параметри керування, які безпосередньо впливають на струм лампи. Ці методи широко розповсюджені і, як правило, є найпоширенішими:

- ❖ Прості змінні резистори, напівпровідники або інтегральні схеми, включені послідовно зі світлодіодами, також відомі і послідовні або шунтові регулятори, які є найбільш простими і економічно вигідними рішеннями, але і найбільш неефективними [2].

- ❖ Регулювання напруги на шині постійного струму, яке здатне забезпечити плавне і широке регулювання дімування, однак вимагає додаткового каскаду живлення, який здатний живити каскад постійного струму змінною напругою постійного струму [11].

- ❖ Застосування імпульсних перетворювачів: ШІМ - управління за допомогою частоти перемикання (f_s) або керування фазовим зсувом. Цей тип керування, незважаючи на те, що він досить складний, а іноді навіть дуже заплутаний для аналізу, є, мабуть, найпоширенішою технікою завдяки своїй стійкості та надійності. Зазвичай керуючою змінною є частота комутації, що, як правило, призводить до вищих рівнів гармонік струму, які спричиняють високі електромагнітні перешкоди. Цей невід'ємний недолік вимагає включення додаткового каскаду, а саме каскаду корекції коефіцієнта потужності, щоб відповідним стандартам, забезпечувати безпеку і надійність тощо.

Для подолання більшості попередніх проблем, пропонується інший метод регулювання яскравості, а саме - використання змінної котушки індуктивності, недисипативного компонента [8]. Цей метод, незалежно від того, чи використовується він спеціально для регулювання яскравості, чи для інших, ґрунтується на простій передумові: керування контуром через зміну резонансної частоти, а не через зміну робочої частоти перетворювача. Дуже важливо ще раз підкреслити, що поки що не існує жодного комерційно доступного освітлювального приладу, який би використовував цей тип керування. Як зазначалося раніше, концепція змінної індуктивності не є новою, але до останніх кількох років їй приділялося мало уваги. Таким чином,

застосування цієї концепції для керування яскравістю світлодіодних ламп вважається новою, інноваційною та перспективною технікою. Змінна котушка індуктивності застосовується до перетворювача, який нагадує прямий перетворювач, не тільки з метою дімування світлодіодної лампи, але й для вирівнювання струму в паралельних колах світлодіодів. Інші прототипи, що використовують подібні магнітні регулятори, а саме магнітні підсилювачі, в світлодіодних драйверах, також були знайдені в літературі, однак основне призначення регулятора в цих роботах - подолання деяких проблем, що зустрічаються в традиційних багатовихідних перетворювачах [7], а саме досягнення корекції коефіцієнта потужності без необхідності використання додаткового каскаду, а не безпосередньо для дімування.

1.4 Висновок до розділу

У розділі розглянуто еволюцію джерел освітлення та обґрунтовано переваги світлодіодів як сучасних енергоефективних джерел світла. Описано принцип роботи світлодіода на основі електролюмінесценції та його конструктивну будову. Проаналізовано фотометричні, електричні й теплові характеристики, які зумовлюють необхідність живлення світлодіодів від стабілізованого джерела струму. Розглянуто особливості живлення від шин постійного струму 48 В та їх переваги з точки зору безпеки й ефективності. Проаналізовано основні архітектури драйверів світлодіодних ламп і методи дімування, а також виявлено їхні обмеження. Обґрунтовано доцільність використання методу регулювання яскравості на основі змінної індуктивності як перспективного напрямку подальших досліджень.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Резонансні перетворювачі із перемиканням конденсаторів (РППК)

По суті, перетворювачі із перемиканням конденсаторів ППК - це DC-DC перетворювачі, які використовують лише перемикачі та конденсатори, де останні використовуються як накопичувачі енергії, "переміщуючи" заряди в них і з них, щоб забезпечити необхідне значення вихідної напруги. Щодо співвідношення вихідної та вхідної напруги, три основні схеми ППК з різними комбінаціями перемикачів і конденсаторів. Їх можна розділити на ППК дільник (понижуючий), інвертор або мультиплікатор (підвищуючий). Теоретично, підвищувальна РППК може забезпечити будь-яке фіксоване співвідношення напруг в залежності від кількості комутованих конденсаторних комірок, що використовуються в його структурі, тобто $V_{outideal} = (n+1) \cdot V_{in}$, де n - кількість перемикаючих конденсаторних (ПК) комірок. Ця цікава і дуже корисна функція зображена на рисунку 2.1:

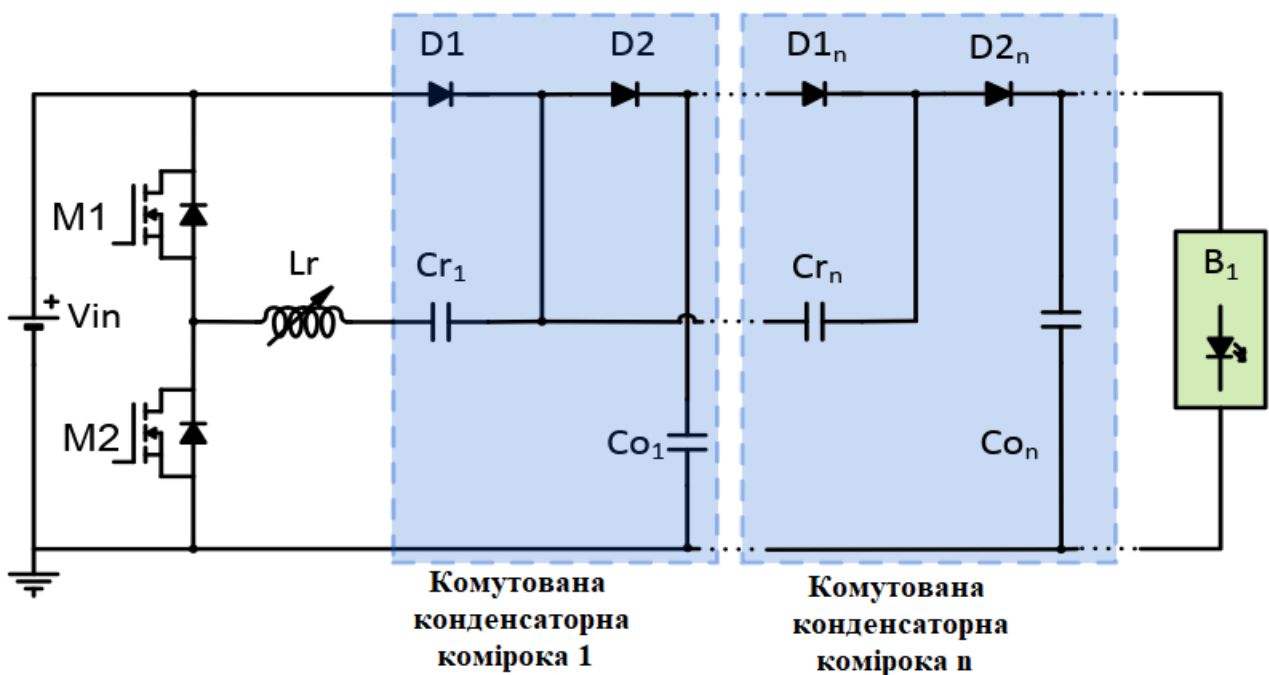


Рисунок 2.1 - Резонансний перетворювач із перемиканням конденсаторів з n-режимом.

Іншими словами, шляхом каскадування n комірок з перемикаючими конденсаторами співвідношення вихідної/вхідної напруги можна збільшити в $n+1$ разів. РППК були розроблені для подолання основних недоліків нерезонансних ППК, які через погане регулювання навантаження та низьку ефективність характеризуються жорстким перемиканням з високими стрибками струму, що призводить до високого рівня електромагнітних завад та низького номінального терміну служби через потребу у великих електролітичних конденсаторах. Ці проблеми обмежують їх використання до застосувань з низькими рівнями потужності. На рисунках 2.2, 2.3 показано традиційну підвищувальну РППК і запроповану схему цієї роботи, яка, базується на традиційній схемі з резонансною котушкою індуктивності, заміненою на змінну котушку індуктивності:

Робота запропонованої схеми (рисунок 2.3) дуже схожа на традиційну. Новизна запропонованої схеми полягає в регулюванні вихідної потужності за рахунок керування зарядом, що протікає через резонансну ємність, а саме за рахунок зміни її характеристичного опору Z_c (через L_r).

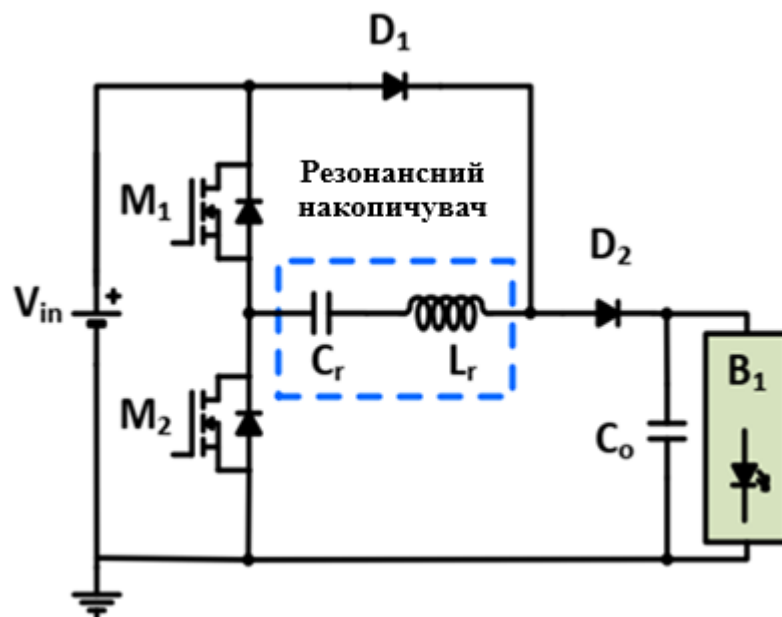


Рисунок 2.2 - Звичайний подвійний режим РППК

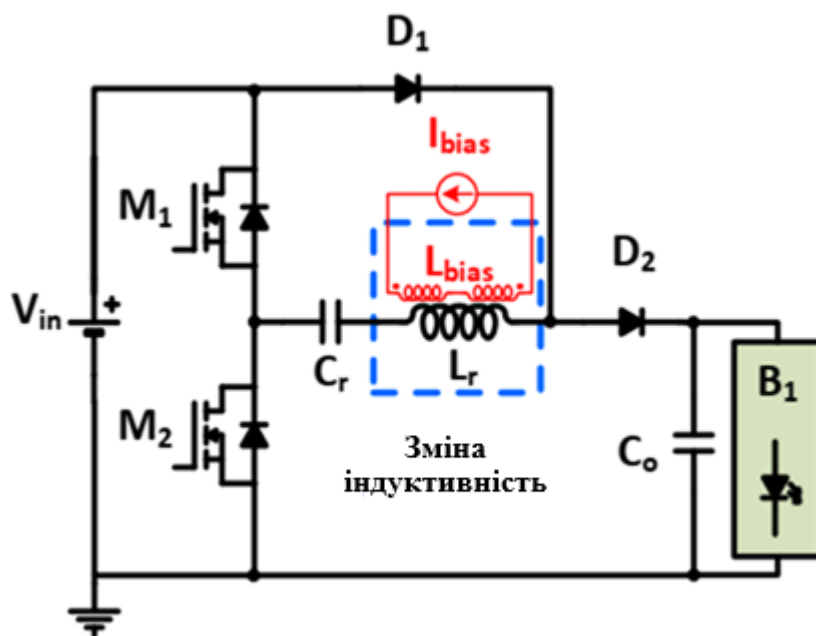


Рисунок 2.3 - Запропонований подвійний режим роботи РППК

Що стосується регулювання навантаження ППК, де передача енергії в основному досягається шляхом керування процесом заряджання та розряджання комутованих конденсаторів, то найчастіше застосовуються такі методи:

- ШІМ - керування робочим циклом одного ключа або всіх ключів. Цей тип техніки, однак, показує, що діапазон вихідної напруги залишається вузьким, і це досягається за рахунок зниження ефективності перетворювача. Крім того, методи, засновані на цій технології, можуть спричинити збільшення втрат при перемиканні та увімкненні через жорстке перемикання та великий піковий струм, який є джерелом ЕМІ, що призводить до зниження ефективності перетворення.
- Просто змінюючи частоту перемикання f_s - цей метод стикається з тими ж недоліками, що і попередній метод. Крім того, загальновідомо, що зміна частоти перемикання перетворювачів викликає труднощі при проектуванні фільтрів.
- Керування фазовим зсувом - цей метод, ймовірно, забезпечує найкращу продуктивність, однак він є досить складним і заплутаним, вимагає більшої кількості компонентів і найбільш важливо, вихідна напруга може мати

досить високі небажані пульсації. Останнього недоліку цього методу достатньо для обґрунтування того, що його не можна застосовувати для живлення світлодіодних навантажень, оскільки для цього типу навантажень малі коливання напруги провокують великі коливання струм.

Для подолання недоліків попередніх методів пропонується новий метод керування РППК. Його застосування до ППК є новим та інноваційним, проте, як вже згадувалося раніше, його можна знайти в рівні техніки щодо керування напівмостовими резонансними та прямими перетворювачами. На відміну від описаних в літературі методів, які базуються на керуванні вихідною напругою, запропонований метод базується на керуванні струмом, що виправдано типом навантаження (світлодіоди).

2.1.1 Підвищувальний режим РППК зі змінним індуктором

Вибране значення вхідної напруги (V_{in}) перетворювача становить 48 В, що є стандартним значенням, яке може бути забезпечене акумуляторною батареєю, каскадом корекції коефіцієнта потужності або джерелом безперервної напруги.

Що стосується перемикачів, то, незважаючи на те, що частота перемикання та робочий цикл задані як постійні, ці параметри можна варіювати, якщо є бажання використовувати їх для подальших стратегій керування. Узагальнена схема запропонованої схеми та обрані умовні позначення її струмів і напруг показані, відповідно, на рисунок 2.4 та рисунок 2.5:

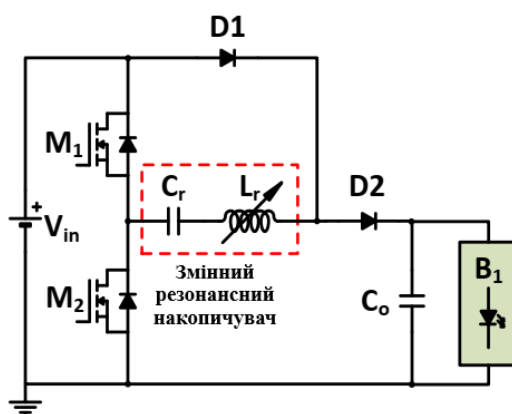


Рисунок 2.4 - Режим нарощування РППК

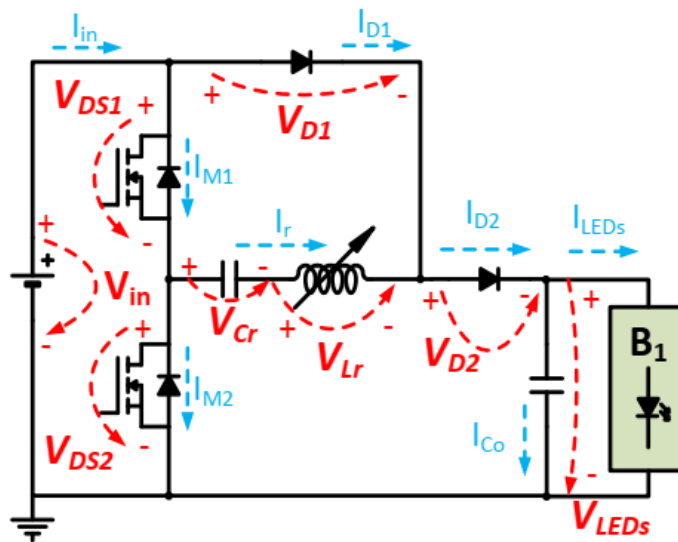


Рисунок 2.5 - Режим підвищення РППК - умовне позначення струмів та напруг

Розглядаючи роботу схеми в усталеному режимі, її можна описати шістьма станами, як показано на рисунку 2.6. Як зазначалося раніше, частота перемикання була обрана на рівні 100 кГц, постійною і вищою за резонансну частоту, щоб природним чином досягти ZVS в мосфетах, таким чином зменшуючи втрати на перемикання, що, в свою чергу, мінімізує відповідні електромагнітні завади і підвищує загальну ефективність перетворювача. Зазвичай, коли резонансний контур спроектований таким чином, щоб працювати з ZVS на фіксованій частоті, легше досягти широкого діапазону дімування та мінімізувати споживання реактивної потужності. Роботу перемикачів з ZVS під час перехідних процесів увімкнення можна легко підтвердити, подивившись на рисунок 2.8. Щодо обраних силових ключів, а саме Mosfets, то вони налаштовані на почергове увімкнення та вимкнення з робочим циклом 50%. Використання антипаралельних діодів з вільним ходом з мосфетами є обов'язковим, оскільки резонансний період більший за період перемикання, а це означає, що в кінці кожного напівперіоду перемикання в резонансній котушці індуктивності накопичується енергія, а отже, її струм відмінний від нуля. Якби не використовувався діод з вільним затвором, ця

невивільнена енергія пошкодила б і зруйнувала б (внутрішнє іскріння) силові мосфети під час перемикання стадій.

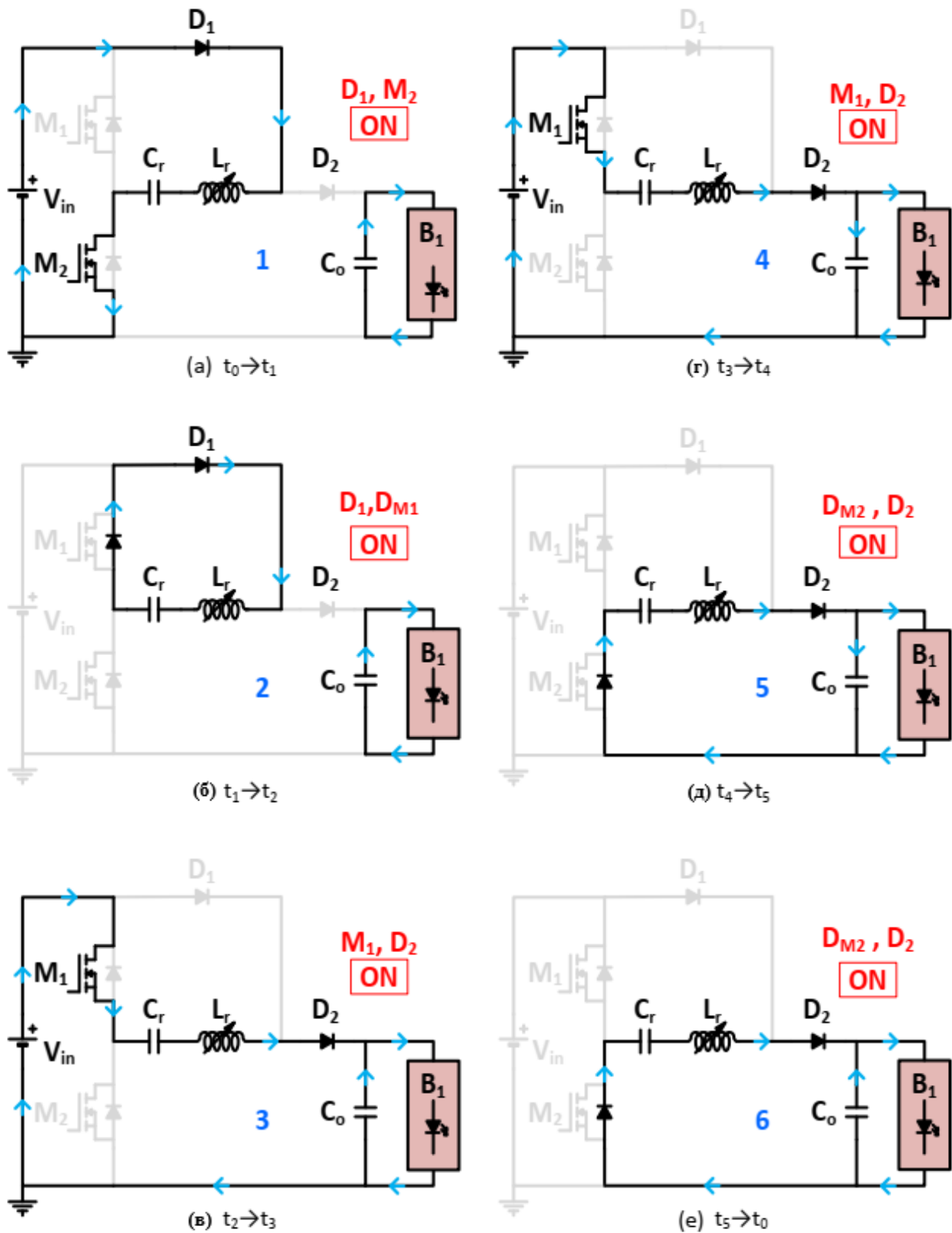


Рисунок 2.6 - Стаціонарна еквівалентна схема РППК (а) Стадія 1 (б) Стадія 2 (в) Стадія 3 (г) Стадія 4 (д) Стадія 5 (е) Стадія 6

В ідеалі, за умови дотримання вищезгаданих умов, кожен перемикач (що складається з мосфета з антипаралельним діодом) вимикається, коли його струм все ще позитивний (і має максимальне значення), і вмикається, коли його струм негативний (і має мінімальне значення), що означає, що вільний діод буде проводити струм з моменту подачі імпульсу на його затвор і до тих пір, поки струм (сток - джерело) не впаде до нуля. В такому стані, завдяки не тільки діодам, що вільно обертаються, а також тому, що $f_s > f_r$ гарантується, що мосфети починають проводити при нульовій напрузі та струмі, що в ідеалі, під час переходів увімкнення, комутаційними втратами в мосфетах можна знехтувати. Цей момент відповідає моменту $t=t_2$ на рисунок 2.7.

Важливо відзначити, що в цьому випадку, починаючи з $f_s > f_r$, фазовий кут резонансного струму менше 0° , що означає, що струм відстає від напруги, таким чином, резонансний контур поводить себе як індуктивне навантаження.

Згідно з основним принципом роботи, а також з огляду на рисунок 2.8, вплив змінного індуктора (ЗІ) у всьому діапазоні дімування, найбільше проявляється в амплітуді резонансного струму I_r і, відповідно, в середньому струмі світлодіодів $I_{LEDsavaa}$. Точніше, за рахунок зміни резонансної індуктивності, середньоквадратичне амплітудне значення резонансного струму також буде змінюватися, що, в свою чергу, призведе до зміни середнього значення струму, що подається на світлодіодну лампу - імпеданс резонансного контуру змінюється для того, щоб контролювати бажану точку спрацьовування світлодіодної лампи.

Для того, щоб почати більш глибокий аналіз роботи схеми, не втрачаючи загальності і розглядаючи одну точку роботи, необхідно зробити наступні припущення:

- ❖ всі комутаційні пристрої (силові мосфети та діоди) є ідеальними, тобто не мають падіння напруги увімкненого стану або опору;
- ❖ вихідний конденсатор C_0 настільки великий, що пульсаціями вихідної напруги $V_{LEDsavg}$ нехтуємо і він спочатку заряджається до потрібного середнього значення вихідної напруги;

- ❖ пульсаціями вихідного струму також нехтуємо, тому вважаємо його джерелом постійного струму ;
- ❖ вхідна напруга перетворювача V_{in} є ідеальною, тобто постійною і з нульовим послідовним опором;

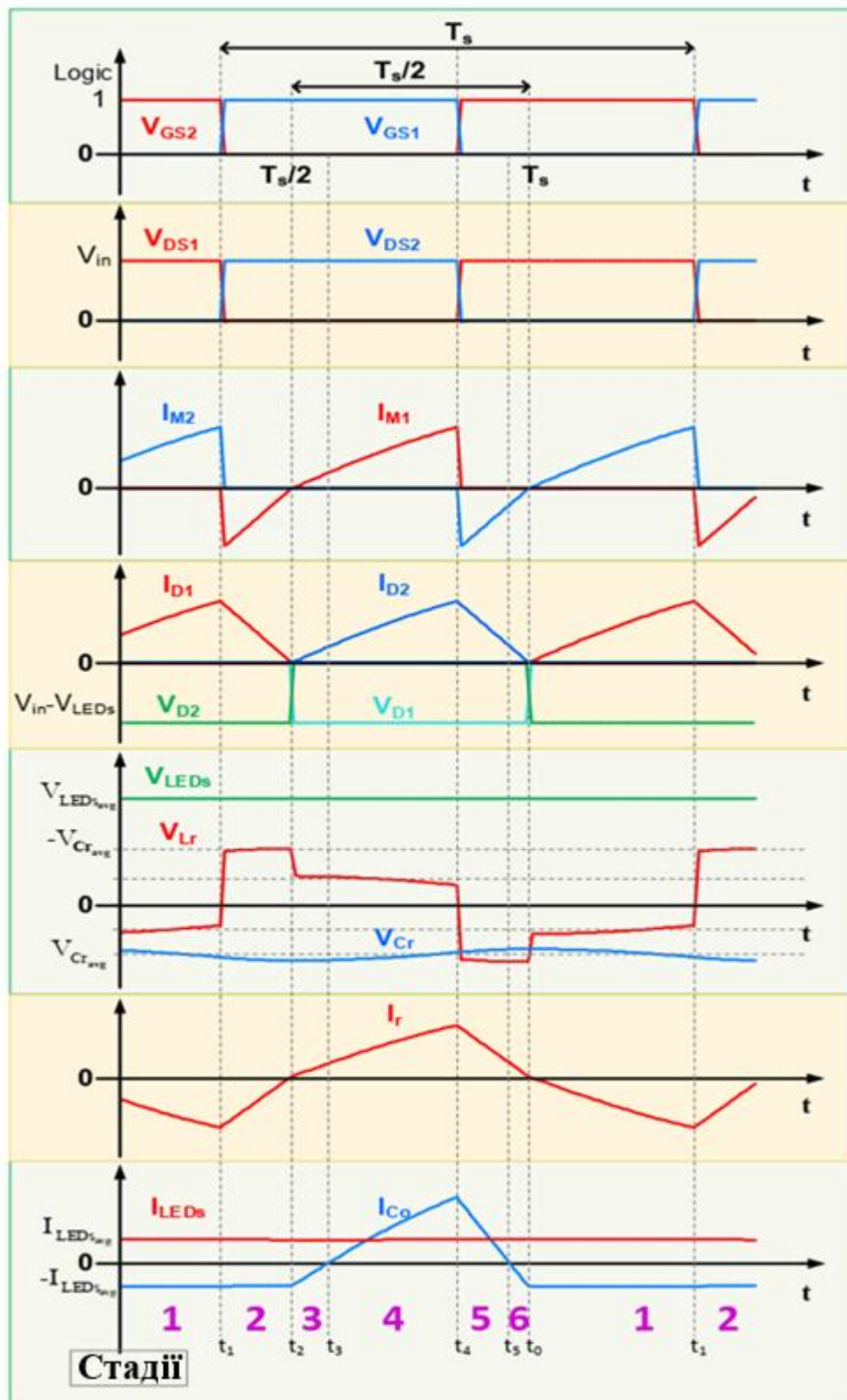


Рисунок 2.7 - Теоретичні осцилограми ступінчастої РППК

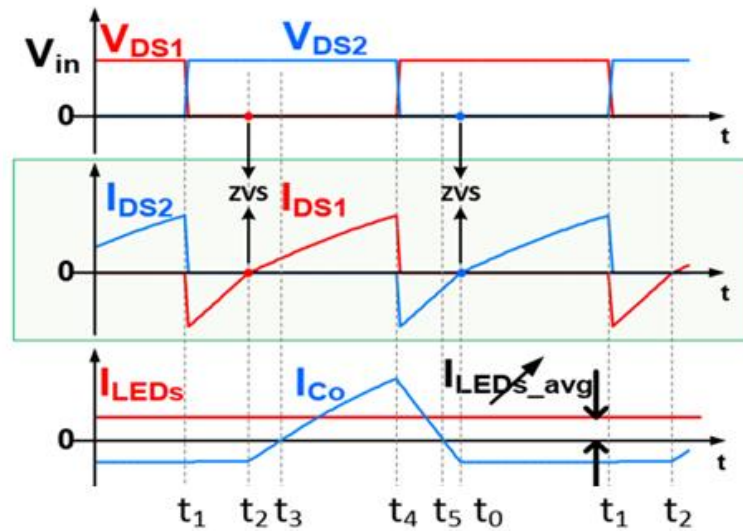


Рисунок 2.8 - ZVS та вплив змінного індуктора на РППК



Рисунок 2.9 - Осцилограми з лінійними апроксимаціями

Етап 1 (рисунок 2.6 (а): $t=t_0 \sim t_1$). На цьому етапі перемикач M2 перебуває в увімкненому стані. Резонансний конденсатор заряджається вхідною напругою V_{in} у майже резонансний (синусоїдальний) спосіб до $t=t_1$. На цій стадії немає енергія, що передається в навантаження через резонансний контур, а тому вихідний конденсатор C_0 відповідає за постачання енергії до навантаження протягом цього часу. Як $i_r(t_0) = 0$ та $i_r(t_0) = 0$, а також на t_0 напруга на резонансному конденсаторі досягає мінімуму. Рівняння та розв'язки стадії:

$$V_{in} + v_{L_r} + v_{C_r} = 0 \Leftrightarrow -V_{in} - v_{L_r} \quad (2.1)$$

$$i_{C_0} + I_{LEDs_{avg}} = 0 \quad (2.2)$$

$$i_r(t) = \frac{-v_{C_r} t_0 - V_{in}}{\omega_0 \cdot L_r} \cdot \sin \omega(t - t_0) \quad (2.3)$$

$$v_{C_r}(t) = V_{C_{r_{avg}}} - \frac{\Delta V_{C_r}}{2} \cdot \cos \omega(t - t_0) \quad (2.4)$$

де $\omega_0 = 1/\sqrt{L_r C_r}$ (кутова резонансна частота), ΔV_{C_r} - є пульсацією напруги резонансного конденсатора, $V_{C_{r_{avg}}}$ його середня напруга, R_{LEDs} статичний опір світлодіодної стрічки в заданій робочій точці.

Етап 2 (рисунок 2.6 (б): $t=t_1 \sim t_2$). Вимикач М1 вмикається при $t=t_1$. Через роботу каскаду 1, а також через те, що резонансний період більший за період комутації, резонансний струм не встигає досягти нульового значення, тому $i_r(t_1) \neq 0$. Отже, антипаралельний діод М1 (Mosfet 1) проводить від $t=t_1$, поки резонансний струм не впаде до нуля на $t=t_2$. Аналогічно до стадія 1, на цій стадії резонансний струм продовжує заряджати C_r , зокрема, поки він не впаде до нуля, а вихідний конденсатор все ще живить навантаження. Рівняння каскаду та його розв'язки:

$$v_{L_r} + v_{C_r} = 0 \Leftrightarrow V_{C_r} = -v_{L_r} \quad (2.5)$$

$$i_{C_0} + I_{LEDs_{avg}} = 0 \quad (2.6)$$

$$i_r(t) = i_r(t_1) \frac{v_{C_r}(t_1)}{\omega_0 \cdot L_r} \cdot \sin \omega(t - t_1) \quad (2.7)$$

де $i_r(t_1)$ - мінімальне значення резонансного струму, оскільки момент t_1 джерело вхідної напруги більше не заряджає резонансний накопичувач. Разом стадії 1 і 2 тривають половину циклу перемикання $T_s/2$, що відповідає періоду часу, протягом якого заряджається резонансний конденсатор.

Етап 3 (рисунок 2.6 (б)): $t=t_2 \sim t_3$. На $t=t_2$ резонансний конденсатор перестає заряджатися, тобто досягає свого максимального значення заряду, а отже:

$$v_{C_r}(t_2) = V_{C_r \text{ min}} = V_{C_r \text{ avg}} - \Delta V_{C_r} / 2 \quad (2.8)$$

У цьому рівнянні напруга на резонансному конденсаторі відноситься до мінімальної, а не до максимальної через обрану конвенцію для напруги цього конденсатора, і $i_r(t_2) = 0$. На цьому етапі енергія, накопичена в резонансному конденсаторі C_o , віддається в навантаження через діод D_2 , а також оскільки енергія накопичується у вихідному конденсаторі, тому резонансний струм зростатиме. Рівняння каскаду такі:

$$-V_{in} + v_{L_r} + v_{C_r} + V_{LEDs_{avg}} = 0 \Leftrightarrow v_{C_r} = V_{in} - v_{L_r} - V_{LEDs_{avg}} \quad (2.9)$$

$$i_r + i_{C_0} = I_{LEDs_{avg}} \quad (2.10)$$

$$i_r(t) = \frac{V_{in} - v_{C_r}(t_2) - I_{LEDs_{avg}}}{\omega_0 \cdot L_r} \cdot \sin \omega(t - t_2) \quad (2.11)$$

Етап 4 (рисунок 2.6 (б)): $t=t_3 \sim t_4$. На цьому етапі схема працює так само, як і на етапі 3, тобто резонансний струм продовжує збільшувати свою амплітуду. Єдиною відмінністю є вихідний конденсатор C_o , який повністю розряджається за $t=t_3$, а отже, на цьому етапі він буде заряджатися:

$$i_r = i_{C_0} + I_{LEDs_{avg}} \quad (2.12)$$

Етап 5 (рисунок 2.6 (б)): $t=t_4 \sim t_5$. На цій стадії резонансний конденсатор відповідає за живлення навантаження, а також за часткову зарядку вихідного конденсатора. Вхідна напруга більше не з'єднана з рештою кола, тому резонансний струм починає зменшуватися через зменшення заряду в

резонансному конденсаторі. Таким чином, протягом усього циклу перемикання резонансний струм досягає свого максимуму для $t=t_4$. Рівняння стадії мають наступний вигляд:

$$v_{L_r} + v_{C_r} + V_{LEDs_{avg}} = 0 \Leftrightarrow v_{C_r} = -v_{L_r} - V_{LEDs_{avg}} \quad (2.13)$$

$$i_r = i_{C_0} + I_{LEDs_{avg}} \quad (2.14)$$

$$i_r(t) = i_r(t_4) + \frac{-v_{C_r}(t_4) - V_{LEDs_{avg}}}{\omega_0 \cdot L_r} \cdot \sin \omega(t - t_4) \quad (2.15)$$

де $i_r(t_4)$ - максимальне значення резонансного струму, оскільки момент t_4 джерело вхідної напруги більше не з'єднане з навантаженням через резонансну ємність.

Етап 6 (рисунок 2.6 (б): $t=t_5 \sim t_0$). На цьому етапі схема працює так само, як і на етапі 5, тобто резонансний струм продовжує зменшувати свою амплітуду. Єдина відмінність полягає у вихідному конденсаторі C_o , який становить повністю заряджений на $t=t_5$, а тому на цьому етапі його енергія буде віддаватися навантаженню:

$$i_r + i_{C_0} = I_{LEDs_{avg}} \quad (2.16)$$

2.2 Проектування компонентів перетворювача

Конструкція перетворювача реалізується в залежності від бажаного рівня струму світлодіода. Початкові вибрані параметри перетворювача є наступними:

- Середня вхідна напруга: $V_{in} = 48 \text{ В}$;
- Середній струм світлодіодної стрічки: $I_{LEDs-avg} = 0,1 \text{ А} \sim 0,35 \text{ А}$;
- Середня напруга світлодіодної стрічки: $V_{LEDsavg} = 60 \text{ В} \sim 64 \text{ В}$;

- Частота перемикавання: $f_s = 100$ кГц (нижче резонансної частоти для забезпечення природного перемикавання нульової напруги - ZVS), робочий цикл 50% для обох перемикачів.

Проектування компонентів перетворювача є досить емпіричним, що означає, що до нього підходять на основі припущень, обраних за емпіричними критеріями.

Основними компонентами, які вимагають глибокого проектування, є конденсатори та резонансна котушка індуктивності (змінна котушка індуктивності). Перший конденсатор, також відомий як комутований конденсатор, знаходиться в резонансній ємності і використовується для передачі енергії. Другий конденсатор - це конденсатор вихідного фільтра. Пульсації напруги на них впливають на ефективність перетворення енергії, а також на стабільність вихідної напруги для першого конденсатора.

2.2.1 Розрахунок резонансного конденсатора

Кількість заряду, що надходить до C_r в процесі заряджання (етапи 1 і 2), має дорівнювати кількості заряду, що витікає з нього в процесі розряджання (етапи 3, 4, 5 і 6). Припускаючи, що вихідний конденсатор ідеальний, інтеграл його струму (дорівнює кількості заряду, що вливається і виливається з нього) повинен дорівнювати нулю протягом одного циклу перемикавання, а струми перетворювача під час процесу розрядки можуть бути пов'язані наступним чином:

$$i_r(t) = i_{C_0}(t) + i_{LEDs}(t) \quad (2.17)$$

Отже, кількість заряду, що витікає з резонансного конденсатора C_r в процесі розрядки ($\Delta Q_{r_{discharge}}$), від $t_2 = T_s/2$ до $t_0 = T_s$, повинна дорівнювати кількості заряду, що надходить до навантаження за один цикл комутації (ΔQ_{C_0}).

$$\Delta Q_{r_{discharge}} = \Delta V_{C_r} \cdot C_r = \frac{T_s}{4} \cdot I_{r_max} \quad (2.18)$$

$$\Delta Q_{C_0} = I_{LEDs_avg} \cdot T_s \quad (2.19)$$

де ΔV_{C_r} - пульсація напруги на резонансному конденсаторі, а T_s - період циклу перемикавання. З двох попередніх рівнянь випливають наступні співвідношення:

$$\Delta Q_{r_{discharge}} = \Delta Q_{C_0} \Leftrightarrow \frac{T_s}{4} \cdot I_{r_max} = I_{LEDs_avg} \cdot T_s \Leftrightarrow \Delta V_{C_r} \cdot C_r = I_{LEDs_avg} \cdot T_s \quad (2.20)$$

$$I_{r_max} = 4I_{LEDs_avg} \quad (2.21)$$

Вибираючи пульсацію напруги конденсатора 20% від вхідної напруги (48 В·0,2), що дорівнює 9,6 В, частоту комутації 100 кГц і максимальний необхідний струм світлодіодів 0,35 А, то значення C_r можна розрахувати і становить 0,365 мкФ. Тому було обрано комерційне значення 0,47 мкФ, за допомогою якого можна перерахувати пульсації напруги для цього значення конденсатора.

Оскільки ця ємність підтримується постійною протягом усього діапазону дімування, пульсації напруги можна розрахувати також для мінімального рівня дімування, що відповідає струму світлодіодів 0,1 А. Результати наведені в таблиці 2.1:

Таблиці 2.1 – Розраховані значення елементів перетворювача

I_o	C_r	ΔV_{Cr}
0,35 А	0,47 мкФ	7,45 В
0,10 А	0,47 мкФ	2,13 В

2.2.2 Розрахунок вихідного конденсатора

Конденсатор вихідного фільтра також можна визначити з наступного співвідношення:

$$\Delta Q_{C_0} = \Delta V_{C_0} \cdot C_0 = \int_{T_s}^{3 \cdot T_s / 2} i_{C_0}(t) dt \quad (2.22)$$

Протягом процесу заряджання, від $t_0 = T_s$ до $t_2 + T_s/2$, струм, що протікає через вихідний конденсатор, дорівнює струму, що протікає через світлодіоди навантаження:

$$i_{C_0}(t) = i_{LEDs}(t) \quad (2.23)$$

Тоді як під час процесу розрядки струм через вихідний конденсатор можна подати через (2.17) наступним чином:

$$i_{C_0}(t) = i_r(t) - i_{LEDs}(t) \quad (2.24)$$

Вважаючи струм у світлодіодах постійним, тобто з нехтуванням пульсаціями, і підставляючи (2.24) в (2.22) протягом періоду розряду, отримаємо:

$$\Delta Q_{C_0} = \frac{1}{\Delta V_{C_0}} \cdot \int_{T_s}^{3 \cdot T_s / 2} (i_r(t) - i_{LEDs}(t)) dt \leftrightarrow C_0 = \frac{\frac{T_s}{2} \cdot (3 I_{LEDa_{avg}})}{2} \quad (2.25)$$

Підставимо (2.24) в (2.25), і після кількох кроків отримаємо (2.26):

$$C_0 = \frac{3 \cdot T_s \cdot I_{LEDa_{avg}}}{\Delta V_{C_0} \cdot 4} \quad (2.26)$$

З попереднього рівняння вже можна визначити величину вихідного конденсатора. Як правило, в перетворювачах такого типу відсоток пульсацій вихідної напруги зазвичай не повинен перевищувати 1%. Тому для цієї роботи обраний відсоток становить 0,5% від максимальної теоретичної середньої вихідної напруги ($64 \text{ В} = 20 \text{ світлодіодів} \cdot 3,2 \text{ В}$ - паспортних даних виробника номінальна напруга одного світлодіода становить приблизно 3,2 В). Таким чином, використовуючи обраний рівень пульсацій, частоту перемикання 100 кГц і максимальне середнє значення струму світлодіодів (0,35 А), отримано 10 мкФ.

2.2.3 Розрахунок діапазону індуктивності змінного струму

Проектування діапазону змінного індуктора (ЗІ) базується на визначенні двох статичних значень індуктивності, а саме мінімального та максимального необхідних значень. Було встановлено, що перетворювач, обраний для цієї роботи, працює тільки в режимі ZVS ($f_s < f_r$), принцип роботи якого значно відрізняється від принципу роботи в режимі ZVS, отже, всі етапи роботи та математичні співвідношення для обох типів роботи є різними. Тому математичне співвідношення, яке може бути використане для визначення необхідної величини резонансного індуктора, довелося вивести для роботи ZVS. На додаток до припущень, тобто ідеальних компонентів, необхідно встановити ще декілька:

- конденсатора є достатньо великими, щоб їхніми пульсаціями напруги можна було знехтувати. Тому вихідну напругу v_{LEDs} можна вважати джерелом постійної напруги V_{LEDs_avg} , а напругу на резонансному конденсаторі v_{Cr} можна аналогічно вважати постійної напруги V_{Cr+avg}

- f_s є достатньо високим, щоб задовольнити (принаймні частково) умову $f_s \gg f_r$ так, щоб зміни резонансного струму (i_r) можна було апроксимувати як лінійні з часом.

Аналогічно до класичної процедури, прийнятої в аналізі перетворювачів, попереднє рівняння струму може бути апроксимоване як лінійне. Крім того, за

умови, що воно дорівнює нулю на t_2 . У точці t_4 джерело вхідної напруги V_{in} більше не з'єднане з джерелом вихідної напруги $V_{LEDsavg}$ резонансною ємністю, отже, це момент часу, коли резонансний струм досягає свого максимального значення.

Необхідні значення індуктивності для максимального і мінімального рівнів дімування можна просто отримати, ввівши бажане значення струму світлодіода $I_{LEDsavg}$ (і відповідну йому напругу $V_{LEDsavg}$). Таким чином, для максимального і мінімального рівнів дімування змінна індуктивність L_r повинна бути в діапазоні 38,1 мкГн ~140,6 мкГн (ці значення були отримані з програми Mathcad, яка використовувалася для розв'язання). За допомогою цих значень, а також значення резонансного конденсатора, визначеного раніше, можна визначити діапазон зміни резонансної частоти для всього діапазону дімування, як показано нижче:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r \cdot C_r}} \quad (2.27)$$

Таким чином, резонансна частота знаходиться в діапазоні від $\approx 19,58$ кГц до 37,61 кГц, що відповідає мінімальному і максимальному рівням дімування відповідно. Таким чином, зрозуміло, що перетворювач не буде працювати поблизу резонансу, як хотілося б, оскільки частота перемикавання встановлена на 100 кГц.

2.2.4 Мультиватна та багатовихідна система

Термін "мульти-ватний" відноситься до певного типу електронних пристроїв, які здатні жити різні однотипні навантаження, не вимагаючи жодних фізичних змін в апаратному забезпеченні. Властивість мультиватності є основною перевагою, оскільки вона гарантує що до драйвера можна підключати різні світлодіодні модулі, від різних виробників тощо, не змінюючи при цьому апаратне забезпечення.

З точки зору властивостей мультивиходів, суттєвою перевагою є ступінь свободи в регулюванні виходів. Не вимагаючи додаткових схем управління або компонентів, всі виходи можуть бути спроектовані для забезпечення рівного або різного співвідношення вхідної та вихідної напруги, що в поєднанні з поточним контролем, який здійснює ЗІ L_{rn} , призводить до незалежності в регулюванні кожного з них тобто, вихід 1 може спроектований як n -ступінчастий підвищувальний РППК, а вихід 2 - як n -ступінчастий понижувальний РППК, де n - бажана вихідна/вхідна напруга кожного. Таким чином, як зазначалося раніше, оскільки ми можемо спроектувати кожен вихід для забезпечення різного рівня напруги, живлення різної кількості світлодіодів, світлодіодів з різними електричними характеристиками, різних моделей, виробників та партій, а також RGB-світлодіодів більше не буде проблемою. Додатковою проблемою, яку можна вирішити за допомогою цієї схеми, є досягнення вирівнювання струмів контурів у багаторядних світлодіодних світильниках. Для цього кожний контур світлодіодів повинна бути підключена до окремого виходу, а опорне значення струму має бути однаковим для кожного виходу. Ця стратегія також може бути застосована до різних світлодіодних ламп, для яких одна лампа підключається до різних виходів.

На рисунок 2.10 показано підвищувальний РППК у двох можливих варіантах з декількома виходами, які можна просто досягти шляхом каскадного з'єднання декількох комірок, кожна з яких зображена в червоному прямокутнику. Важливо відзначити, що кожна вихідна комірка може бути замінена, за бажанням, на іншу схему для досягнення інших співвідношень вихідної/вхідної напруги, тобто понижувальних, 1:1 або дробових співвідношень напруги. Основна відмінність між двома версіями з декількома виходами полягає в кількості використовуваних діодів $D1$.

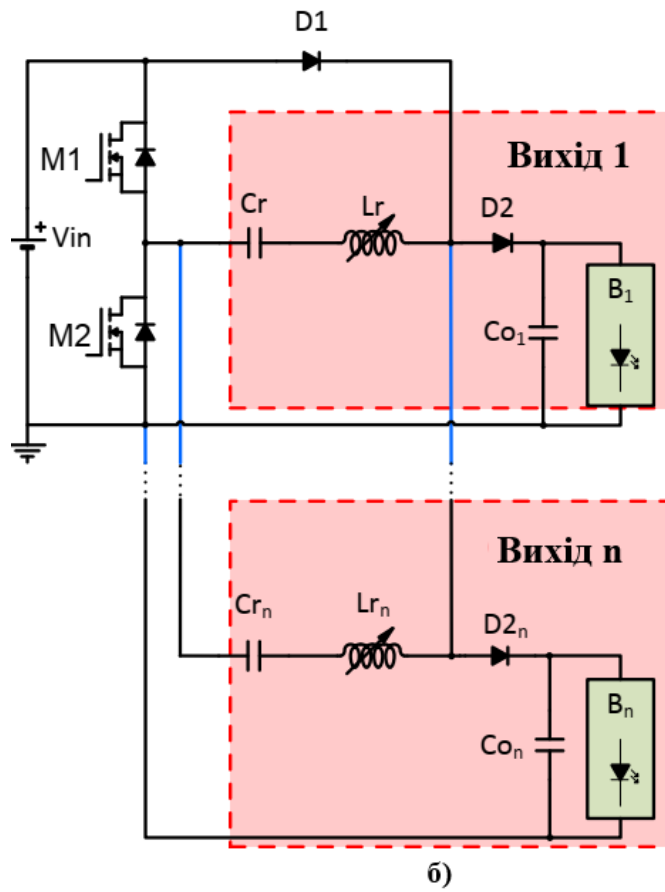
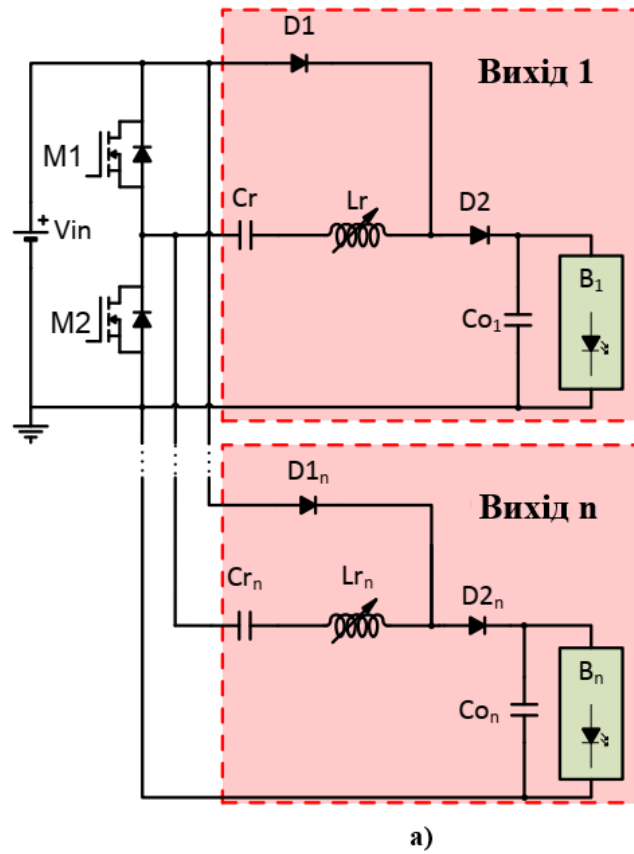


Рисунок 2.10 - Підвищувальний РППК у двох можливих варіантах з декількома виходами. (а) Схема 1 (б) Схема 2

У схеми 1 в кожній вихідній комірці використовується один діод D_{1n} , в той час як в схеми 2 використовується один діод $D1$ незалежно від кількості вихідних комірок, і тому в схеми 2 діод $D1$ повинен в n разів більше значення струму, ніж діод D_{1n} в схемі 1, де n - кількість вихідних комірок. Для даної роботи було прийнято схему 1.

2.2.5 Контроль зміщення обмотки змінного індуктора

Для керування обмоткою зсуву (обмоткою постійного струму) ЗІ можна застосувати кілька рішень. Найбільш прийнятним рішенням для керування обмоткою зсуву є відокремлений і регульований DC-DC перетворювач за допомогою мікроконтролера (як правило, використання мікроконтролера забезпечує меншу кількість компонентів). При роботі в замкнутому контурі керування DC-DC перетворювач забезпечує підтримання постійного струму на своєму виході шляхом компенсації можливих змін інших параметрів, таких як вхідна напруга, опір навантаження, тактова частота, резонансні елементи і т.д. Незважаючи на більш високу вартість і кількість компонентів, він є найбільш надійним, міцним і гнучким, не тільки тому, що в наш час майже обов'язковим є використання цифрового керування, але й тому, що можна знайти DC-DC перетворювачі з ефективністю перетворення потужності понад 99%. Недоліками цього рішення є, знову ж таки, збільшення вартості та складності, а також можлива перешкода для деяких застосувань, в яких обмежений простір/об'єм може бути обмежуючим фактором. Найвигіднішими типами DC-DC перетворювачів, які можуть бути використані для керування обмоткою зміщення ЗІ, є прямий перетворювач і перетворювач типу понижаючого.

Більш простим і альтернативним рішенням є використання простих комерційних стабілізаторів напруги (наприклад, LM7805 і LM7815, стабілізатори напруги 5 В і 15 В відповідно) в якості регуляторів струму. Беручи до уваги дуже низький рівень потужності, що зазвичай обробляється обмоткою зсуву, навіть якщо стабілізатор напруги має низький ККД, це не матиме значного впливу на ефективність всієї системи, що робить його простим

і економічно ефективним рішенням. Основним недоліком цього рішення є обмеження/ліміти цих стабілізаторів напруги, наприклад, їх максимальна вхідна напруга зазвичай становить 40 В, що означає, що за обставин коли неможливо отримати напругу постійного струму нижче або дорівнює 40 В, це рішення не може бути застосоване, якщо тільки не використовується додатковий перетворювач для забезпечення необхідного значення напруги. Це саме той випадок, оскільки єдине доступне джерело живлення постійного струму забезпечує 48 В постійного струму, і з цієї причини це рішення далі не обговорюватиметься.

З точки зору тестування прототипу, дослідження та простоти, в цій роботі не використовувався окремий DC-DC перетворювач, а його роль виконувало просте аналогове джерело струму, кероване напругою, яке було розроблено з використанням декількох класичних компонентів та зовнішнього джерела живлення 5 В постійного струму. Схему цього рішення показано нижче:

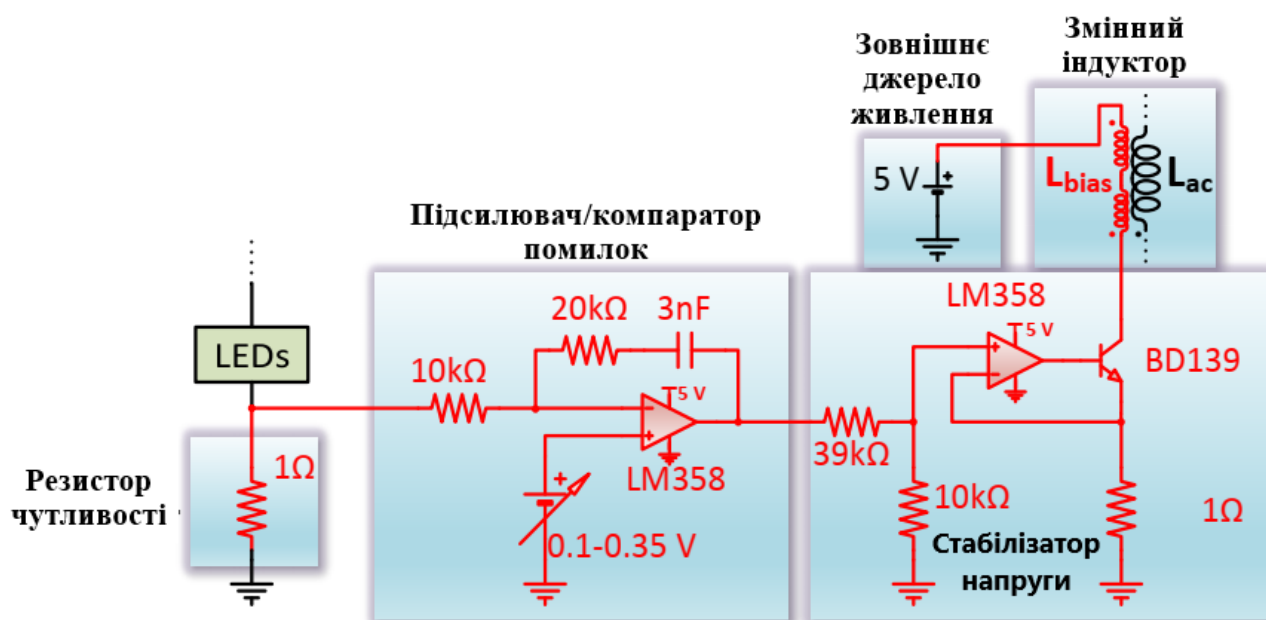


Рисунок 2.11 - Джерело струму, кероване напругою

Попередній контролер можна описати просто: чутливий резистор використовується послідовно з навантаженням світлодіодів і порівнюється з еталонним значенням, яке задається вручну. Отримана похибка потім

використовується в слідкуванні за напругою, щоб гарантувати, що транзистор, який включений послідовно з обмоткою зміщення ЗІ, буде працювати в активній області або, іншими словами, як джерело, кероване напругою, а не як перемикач. Необхідний струм ($\approx 0 \text{ А} - 0,4 \text{ А}$) обмотки зміщення забезпечується за допомогою джерела живлення. Коли струм світлодіодів змінюється, спрацьовує компенсатор і відповідно змінюється струм керування (в обмотці зміщення ЗІ), щоб підтримувати струм світлодіодів на заданому значенні. Наприклад, чим більший струм керування, тим менша індуктивність обмотки змінного струму і тим вищі вихідна напруга, струм і потужність РППК.

2.3 Висновки до розділу

У розділі розроблено та детально проаналізовано резонансний перетворювач із перемиканням конденсаторів зі змінною індуктивністю, призначений для живлення світлодіодних навантажень. Обґрунтовано вибір принципу керування струмом як найбільш доцільного для світлодіодних систем, що забезпечує широкий діапазон дімування та високу ефективність. Виконано розрахунок основних елементів перетворювача, визначено діапазон зміни резонансної індуктивності та підтверджено можливість роботи в режимі ZVS. Показано перспективність запропонованої схеми для мультиватних і багатовихідних систем..

3 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Світлодіодний драйвер та аналіз схем моделювання

Програмне забезпечення PSIM було обрано для моделювання РППК разом з ЗІ та світлодіодною лампою, оскільки воно просте у використанні, швидке і має гнучке представлення керування. Навіть без попереднього досвіду роботи з програмним забезпеченням CAD, можна побудувати схему і отримати результати за лічені хвилини, зберігаючи при цьому відмінну точність моделювання. Це робить його особливо бажаним для моделювання систем силових електронних перетворювачів при виконанні багатоциклового моделювання. Імітаційні випробування, проведені під час цієї роботи, проводилися в умовах замкненого контуру. Імітаційна модель драйвера світлодіода для 2 виходів представлено на рисунку 3.1

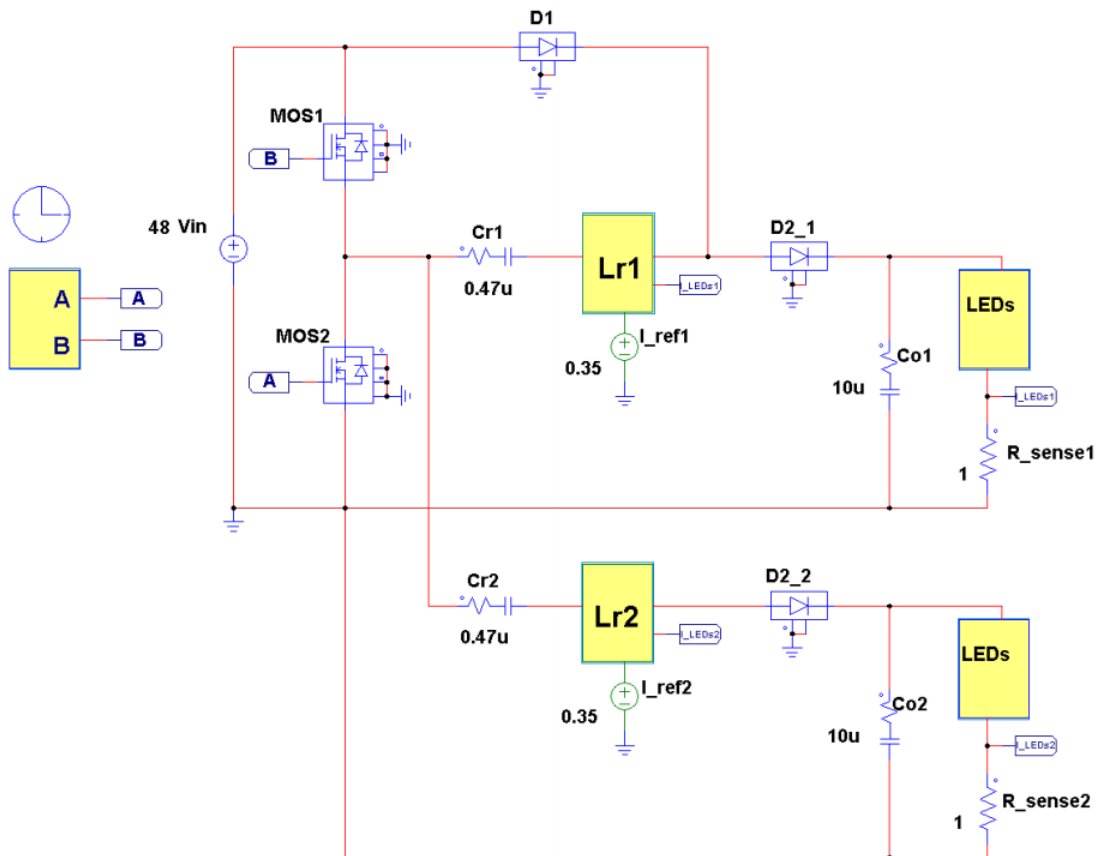


Рисунок 3.1 - Імітаційна модель драйвера світлодіода для 2 виходів

3.1.1.Світлодіодне моделювання

Світлодіодна лампа була змодельована в PSIM за допомогою моделі, яка показана на рисунку 3.2

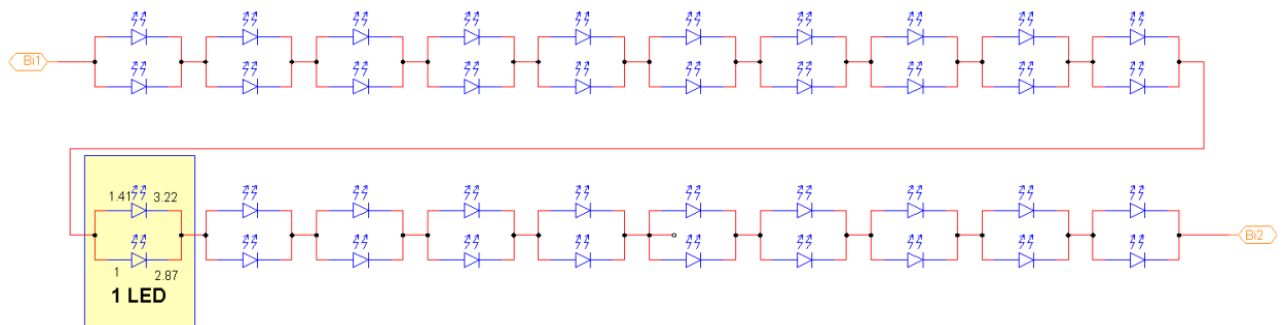


Рисунок 3.2 - Модель світлодіодної лампи PSIM

Схема в жовтому прямокутнику на рисунку 3.2 - це модель для одного світлодіода. Два світлодіоди, з'єднані паралельно, представляють подвійну кусково-лінійну модель. Модель лампи складається з ланцюжка з 20 послідовно з'єднаних світлодіодів. Кожен світлодіод базується на вбудованій моделі, наданій базою даних PSIM. Параметри для моделі світлодіодів отримано за допомогою процедури проектування, для якої отримано криві, що задовольняють вид $y = mx + b$:

$$I_{fn} = r_n \cdot V_{fn} + b_n \quad (3.1)$$

де I_{fn} - еквівалентний динамічний опір, виражений в [Ом], для точки n , а b - просто (спеціально в цьому випадку) "віртуальна" ордината в початку рівняння. Це пов'язано з тим, що для значень напруги нижче порогової напруги світлодіода струм дорівнює нулю. Координати ключових точок наведено на рисунок 3.3 (б). Для даного випадку спочатку визначається нахил ($r1$) відрізка зеленої лінії, що знаходиться між V_{F1} і V_{F2} . Параметри моделі, включаючи виміряні та розраховані, наведені в наступній таблиці:

Модель з одним світлодіодом, що використовується в PSIM, показана на попередньому рисунку. Для того, щоб правильно спроектувати перетворювач

потужності, необхідно було змодельовати навантаження світлодіодів, щоб можна було описати його характеристики для різних умов навантаження в усьому діапазоні дімування. У цій роботі використовується проста модель світлодіода, розроблена за допомогою методу множинних кусково-лінійних рівнянь, як згадувалося раніше. Модель базується на суперпозиції багатоконтурної еквівалентної схеми, в якій контури утворені джерелом постійної напруги V_f , послідовним опором R_f та ідеальним діодом. Перший крок для розробки відповідної моделі полягав у проведенні експериментальних випробувань, а саме, збору декількох значень прямої напруги для декількох значень струму на одному світлодіоді, від компанії OSRAM. За даними виробника, цей світлодіод не може працювати при менших значеннях струму, ніж 0,1 А, а номінальне значення струму становить 0,35 А, тому діапазон дімування для даної роботи обрано між цими двома значеннями (0,1 А $\rightarrow$ 0,35 А), який і буде використано для побудови кусково-лінійної моделі. Вольт-амперна характеристика одного світлодіода, надана виробником, показана на рисунок 3.3 (а), а виміряні та змодельовані вольт-амперні характеристики - на рисунок 3.3 (б). Синя крива представляє експериментальні значення ВАХ, отримані для досліджуваного світлодіода, а крива ВАХ, що складається з зеленого і фіолетового відрізків ліній, представляє змодельовану, побудовану криву для одного світлодіода в PSIM. Відповідні точки з вимірної кривої виділені червоним кольором. Вони використовуються для визначення двокомпонентних лінійних відрізків (проста подвійна лінійна регресія). Насправді, для обраного діапазону дімування кусково-лінійна апроксимація була б потрібна лише в інтервалі між точками V_{F1} і V_{F2} на рисунок 3.3 (б), однак процес реалізовано урахуванням інтервалу між точками V_{F0} і V_{F3} . Такий підхід прийнято тому, що для моделювання використовується вбудована лінійна модель світлодіода в PSIM, яка потребує лише двох вхідних значень, а саме: світлодіода порогова напруга V_f та еквівалентний динамічний опір R_D .

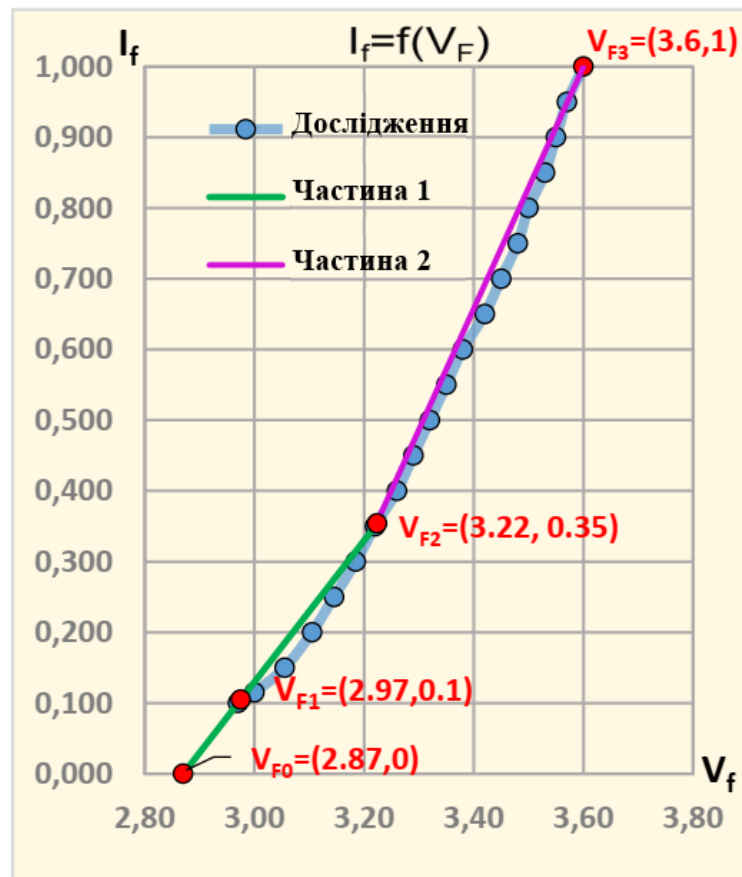
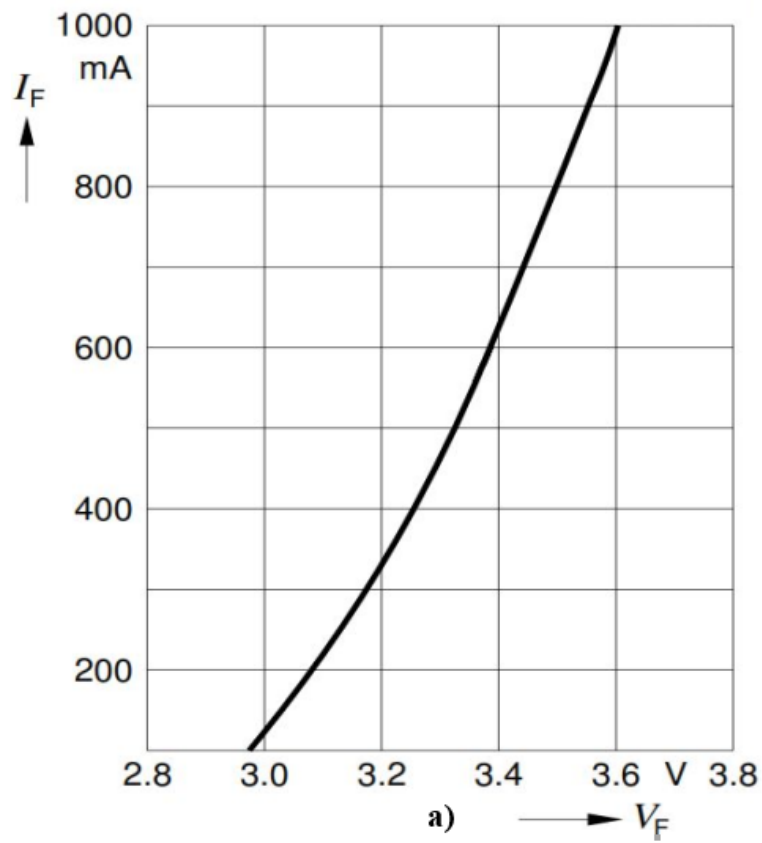


Рисунок 3.3 - Вольт-амперна характеристика світлодіодів: а) з технічного паспорту виробника; (б) Виміряно та змодельовано в PSIM

Після вибору точок на вимірній кривій (V_{F1} , V_{F2} і V_{F3}) розраховується модельна крива. Спочатку розраховуються необхідні значення V_f і R_D , що відповідають зеленому відрізку на попередньому рисунку. Потім той самий процес застосовується для отримання фіолетового відрізка.

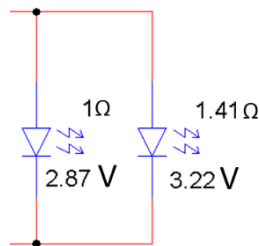


Рисунок 3.4 - Модель PSIM з одним світлодіодом

Таблиця 3.1 - Параметри двох лінійних моделей

V_{F0}	2.87 V	I_{F0}	0 A		
V_{F1}	2.97 V	I_{F1}	0,10 A	r_1	1 Ом
V_{F2}	3.22 V	I_{F2}	0,35 A	r_2	1.41 Ом
V_{F3}	3.60 V	I_{F3}	1 A		

На рис. 3.4 показано отриману модель для одного світлодіода на основі розрахункових значень, наведених у таблиці 3.1. Остаточне порівняння кривої, побудованої на основі моделювання (зелена та фіолетова лінії на рис. 3.3 (б), з кривою, виміряною для реального світлодіода (синя крива на рис. 3.3 (б), показує хорошу збіжність результатів моделювання та реальних результатів. Досягнуто цілком прийнятний рівень точності, що гарантує, що моделювання буде достатньо наближеним до реальної поведінки реальних світлодіодів при підключенні до перетворювача та ігноруванні будь-яких вторинних ефектів зміни температури..

3.1.2 Моделювання змінної індуктивності

Моделювання особливо корисне, коли ми маємо справу з нелінійною поведінкою, яку не можна легко врахувати аналітично, як у нашому випадку. Оскільки ЗІ є нелінійною, вона може дуже сильно впливають на деякі

параметри перетворювача, такі як пусковий струм, величина пульсацій струму навантаження, малі функції передачі сигналу та інші.

Для моделювання магнітного регулятора використовувалося те саме програмне забезпечення, що й для моделювання перетворювача - PSIM, яке має нелінійну модель магнітопроводу. Однак його адаптація до нашого конкретного застосування і наявних магнітопроводів виявилася дуже складною, якщо не практично неможливою. Тому в PSIM було розроблено просту і динамічну модель ЗІ, і її схему показано на рисунку 3.5:

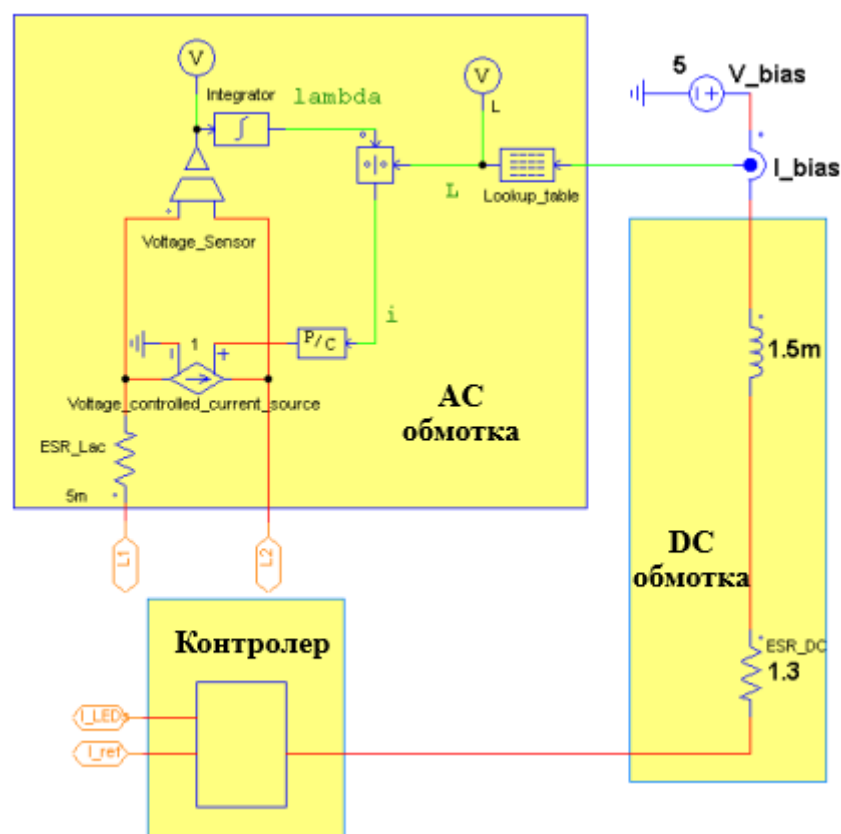


Рисунок 3.5 - Модель змінного індуктора

Модель базується на малосигнальній характеристиці ЗІ, побудованій експериментально, яку було отримано після проведення деяких експериментальних вимірювань. Отримана модель аж ніяк не є досконалою, а саме тому, що вона не враховує втрати в осерді, температурні ефекти, ефект повітряних проміжків, частотну залежність проникності, ефект гістерезису та

інші. Тим не менш, вона є незамінною імітаційного аналізу її застосування на світлодіодному драйвері.

Апроксимація одновимірної функції за допомогою заданого методу пошуку, який було обрано як метод інтерполяції-екстраполяції. Цей метод виконує лінійну інтерполяцію та екстраполяцію входів, де входами є значення постійного струму керування. У найпростішому підході, струм керування постійного струму є входом і отримується за допомогою датчика струму в обмотці постійного струму (зсуву). Використовуючи вказаний метод, блок Lookup Table автоматично визначає значення індуктивності.

Обмотка постійного струму просто імітується за допомогою еквівалентного послідовного опору (ESR_DC) 1,3 Ом, який, у свою чергу, вмикається послідовно з котушкою індуктивності 1,5 мГн. Обмотка живиться від джерела напруги 5 В і керується за допомогою простого джерела струму, керованого напругою, яке активує NPN-транзистор, наприклад, зібраний з декількох логічних і пасивних компонентів, як показано на рисунку 3.6:

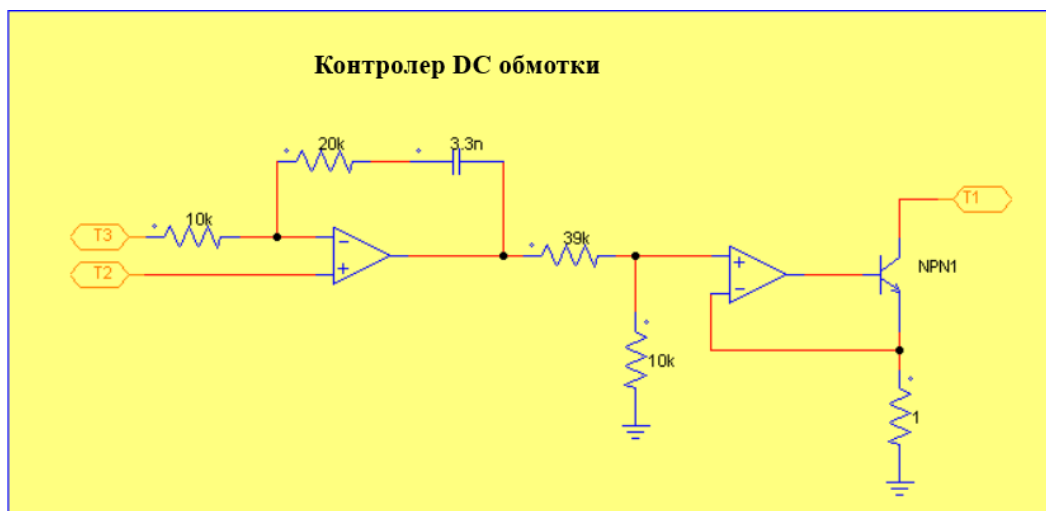


Рисунок 3.6 - Модель контролера DC обмотки

По суті, це класичний аналоговий ПІ-регулятор, за яким слідують сліdkуючий за напругою. В даному випадку датчик струму вимірює струм світлодіода, а підсилювач помилок порівнює це значення еталонним значенням, після чого формує необхідний вихідний сигнал для керування ЗІ. На входи ПІ-

регулятора T3 і T2 подається струм світлодіодів і поточне опорне значення відповідно. Опорне значення налаштовується вручну в залежності від бажаного значення струму світлодіодів. Стабілізатор напруги використовується для того, щоб забезпечити роботу транзистора в активній області протягом усього бажаного діапазону регулювання.

Обмотка змінного струму просто моделюється за допомогою джерела струму, керованого напругою (V_{CCS}), ввімкненого послідовно з еквівалентним послідовним опором (*ESR_Lac* на схемі). У цій обмотці резонансний струм протікає від негативної клеми до позитивної клеми V_{CCS} (той самий напрямок стрілки на схемі).

Коли згадується "струм індуктивності", то мається на увазі струм, що протікає через обмотку струму ЗІ. Для того, щоб отримати і контролювати струм індуктивності, спочатку вимірюється його напруга за допомогою датчика напруги (*Voltage _sensor* на схемі), а потім інтегрується. Після отриманий параметр ділиться на задане значення індуктивності і таким чином отримується струм індуктивності.

Для досягнення більшої точності результатів моделювання, тобто максимального наближення до практичних результатів, після того, як прототип був побудований, було введена характеристика великого сигналу ЗІ, яка замінила раніше введену характеристику малого сигналу (спочатку моделювання проводилося з використанням даних, які були отримані в результаті аналізу характеристики малого сигналу ЗІ).

3.2 Результати моделювання драйвера світлодіодів

Основні стаціонарні осцилограми перетворювача, отримані в результаті моделювання, можна спостерігати з рисунок 3.7 по рисунок 3.12. Крім того, з результатів, показаних на рисунок 3.13 і рисунок 3.14, видно дуже хорошу і швидко реакцію щодо стабільності/продуктивності системи при моделюванні небажаних подій. Крім того, і це найважливіше, з результатів, показаних на

рисунок 3.15 і рисунок 3.16, доведено, що струм на кожній світлодіодній стрічці регулюється незалежно та ефективно. Тобто регулювання струму однієї лінії не впливає на струм іншої лінії.

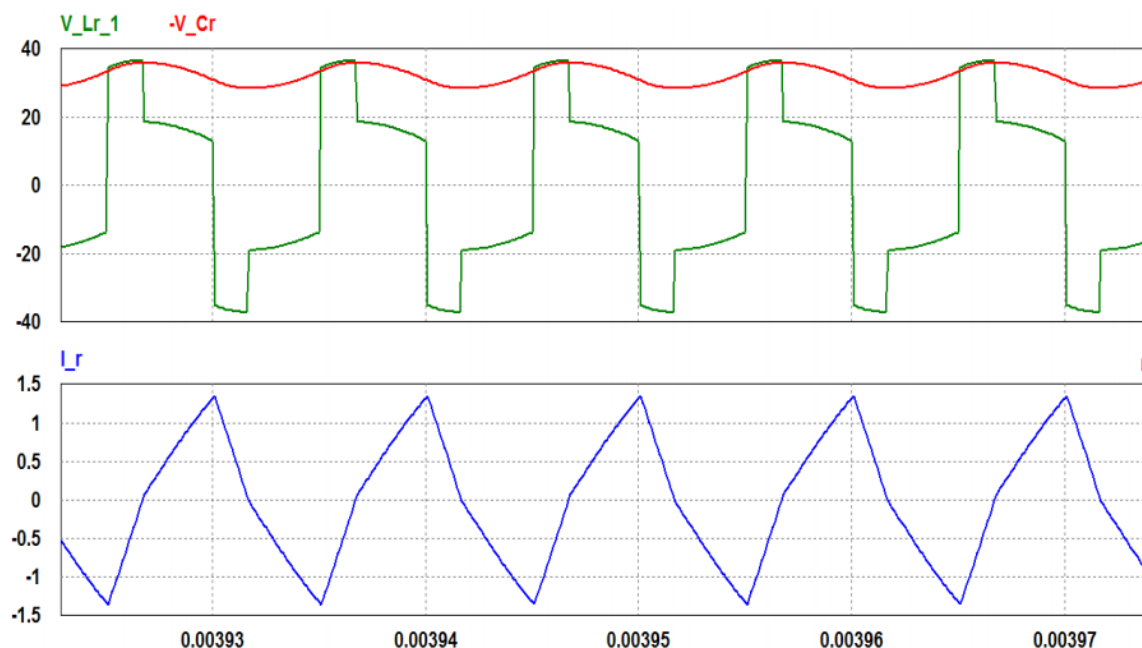


Рисунок 3.7 – Напруга ЗІ, напруга резонансного конденсатора та струм резонансного контуру (відповідно зелена, червона та синя криві) при максимальному рівні дімування $I_{LEDs}=0,35$ А.

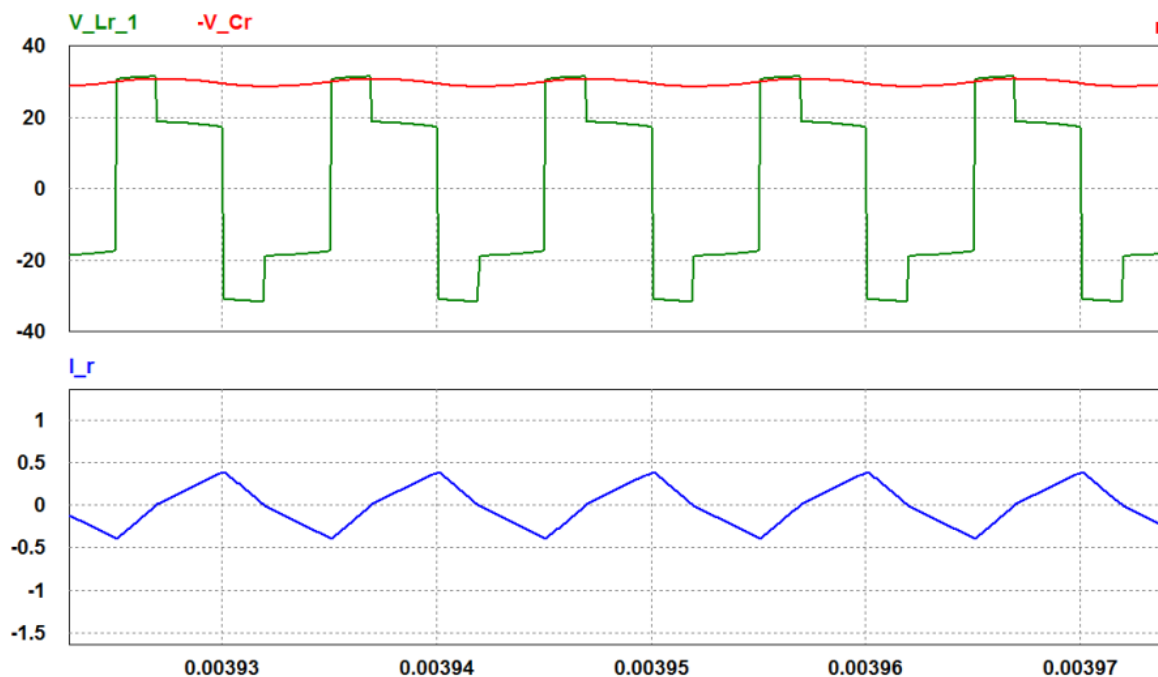


Рисунок 3.8 - Напруга ЗІ, напруга резонансного конденсатора і струм резонансного контуру (відповідно зелена, червона і синя криві) при мінімальному рівні дімування $I_{LEDs}=0,1$ А.

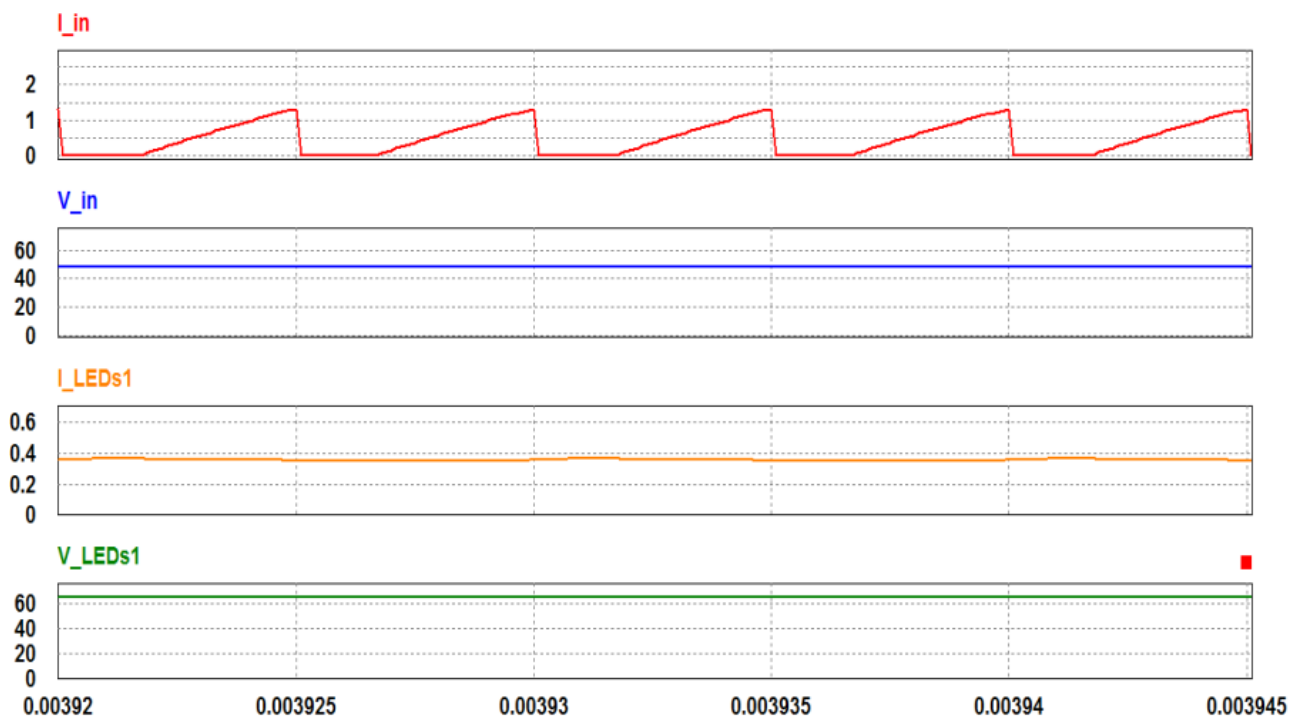


Рисунок 3.9 – Вхідний струм і напруга РППК, а також струм і напруга світлодіодного контуру 1 (червоні, сині, помаранчеві та зелені хвильові форми відповідно) при максимальному рівні димування $I_{LEDs}=0,35$ А.

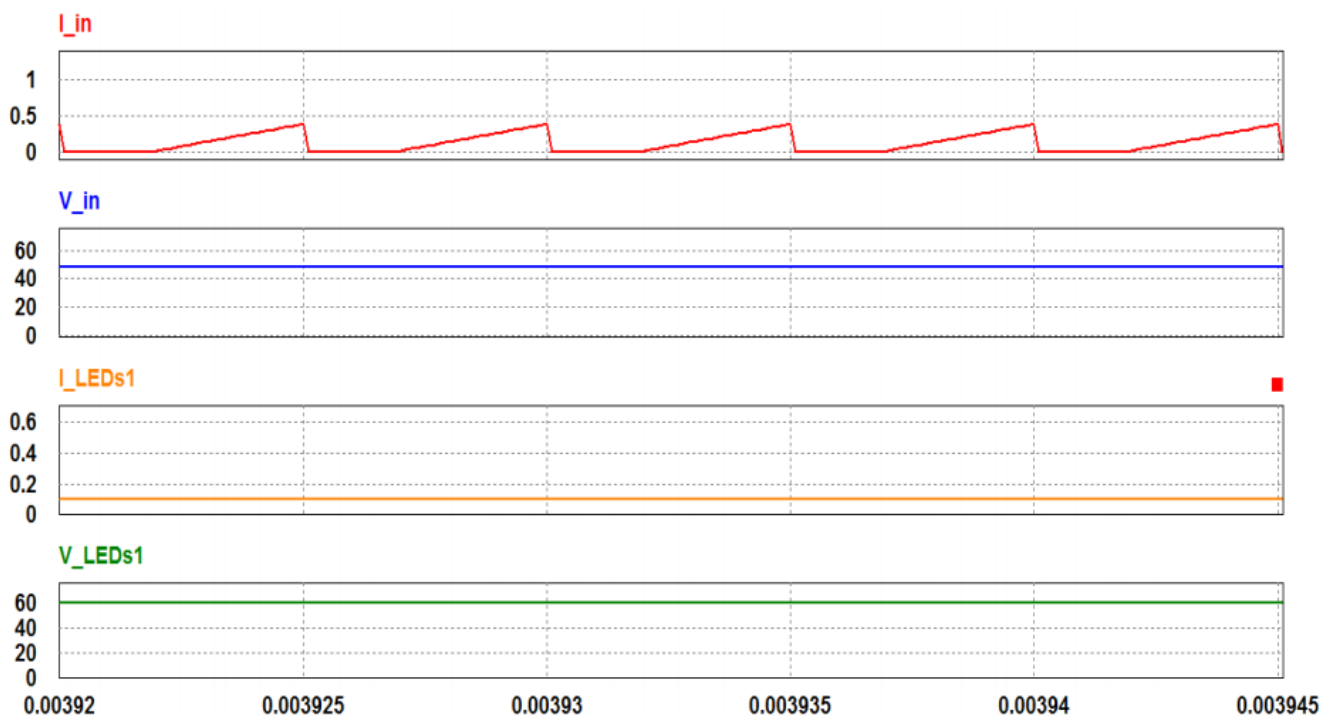


Рисунок 3.10 - Вхідний струм і напруга РППК, а також струм і напруга світлодіодного контуру 1 (червоні, сині, помаранчеві та зелені хвильові форми відповідно) при мінімальному рівні димування $I_{LEDs}=0,1$ А.

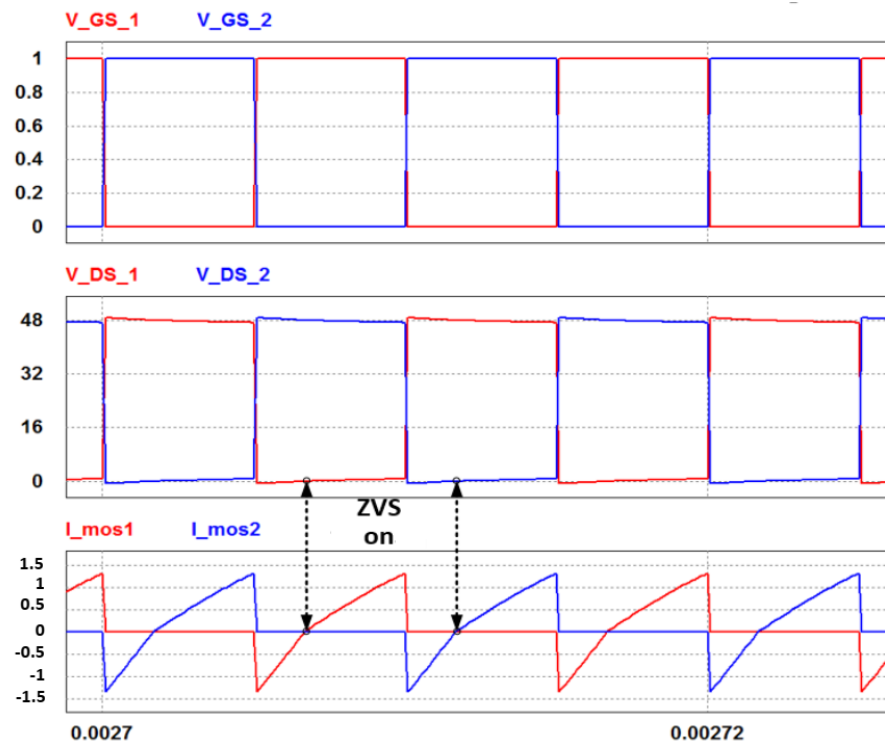


Рис. 3.11 - Увімкнення польових транзисторів: напруги затвор-витік, напруги сток-витік та струми сток- витік, відповідно при максимальному рівні дімування $I_{LEDs}=0,35$ А

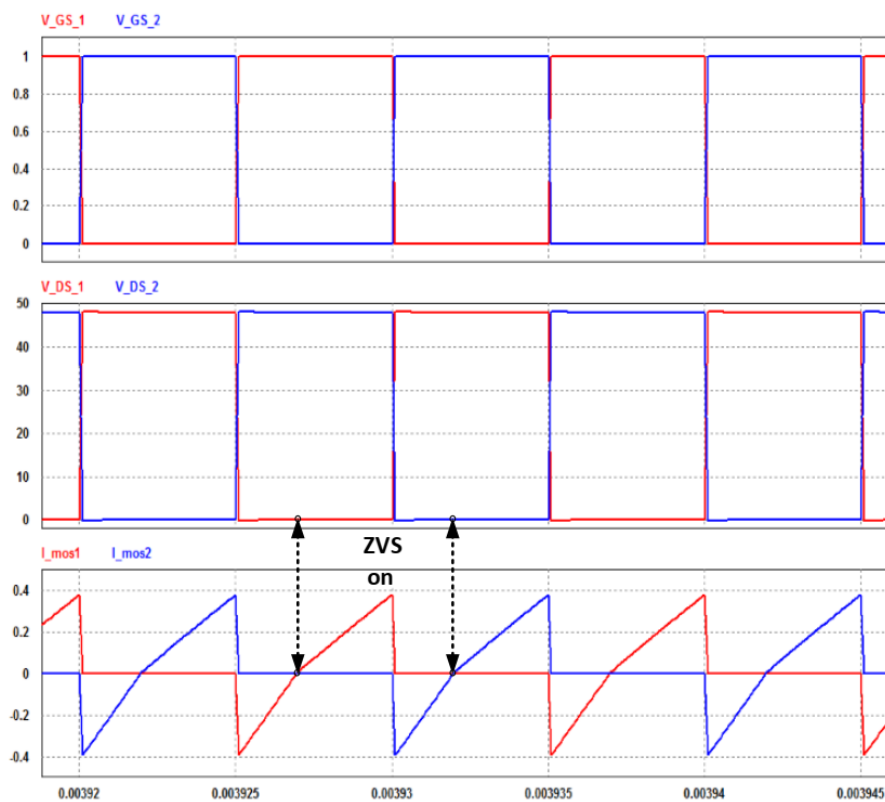


Рис. 3.13 - Увімкнення польових транзисторів: напруги затвор-витік, напруги сток-витік та струми сток- витік, відповідно при мінімальному рівні дімування $I_{LEDs}=0,1$ А.

Результати моделювання динамічної поведінки РППК, коли він починає працювати в номінальних умовах, показані нижче:

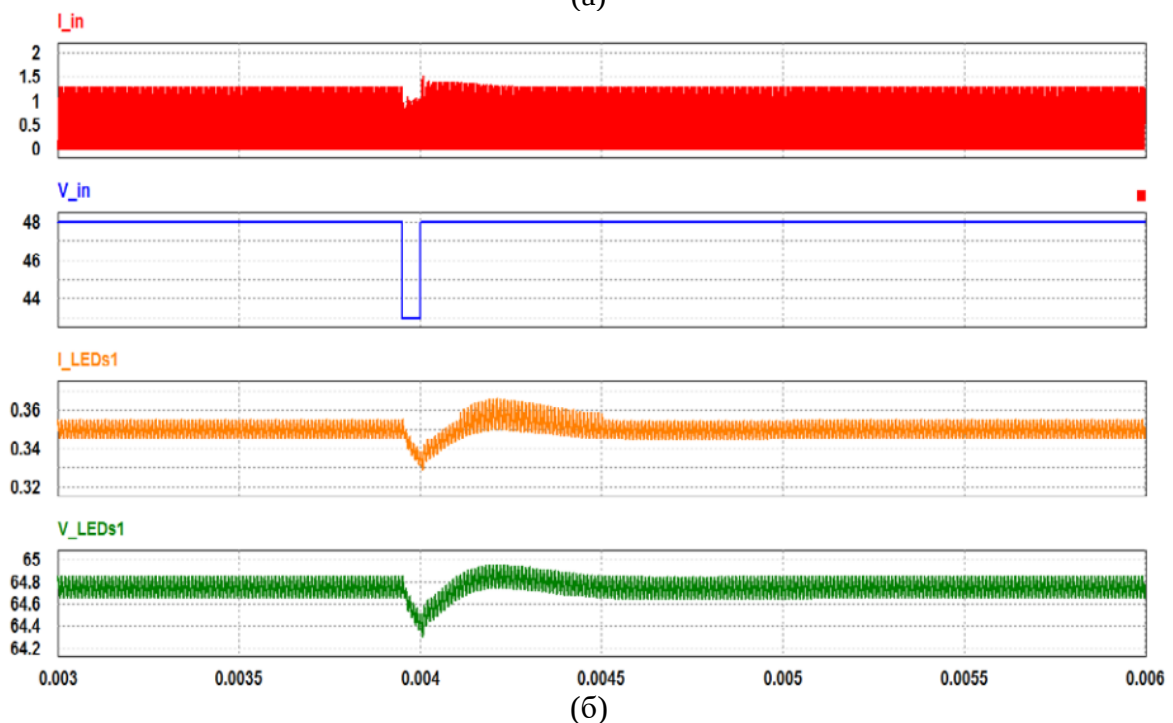
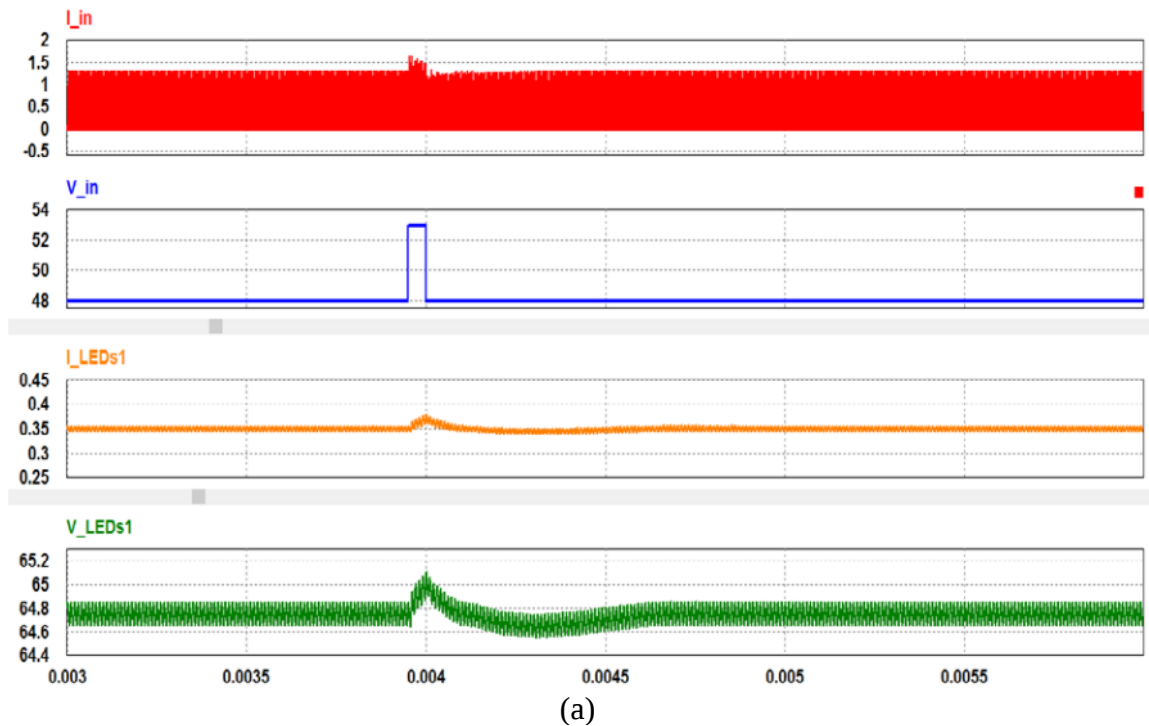


Рисунок 3.13 - Динамічна характеристика РППК: вхідний струм та напруга (червона та синя осцилограми відповідно), а також струм та напруга світлодіодного контуру 1 (помаранчева та зелена осцилограми відповідно) (а) при кроці вхідної напруги 5 В, 0,05 мс, (б) при кроці вхідної напруги -5 В, 0,05 мс.

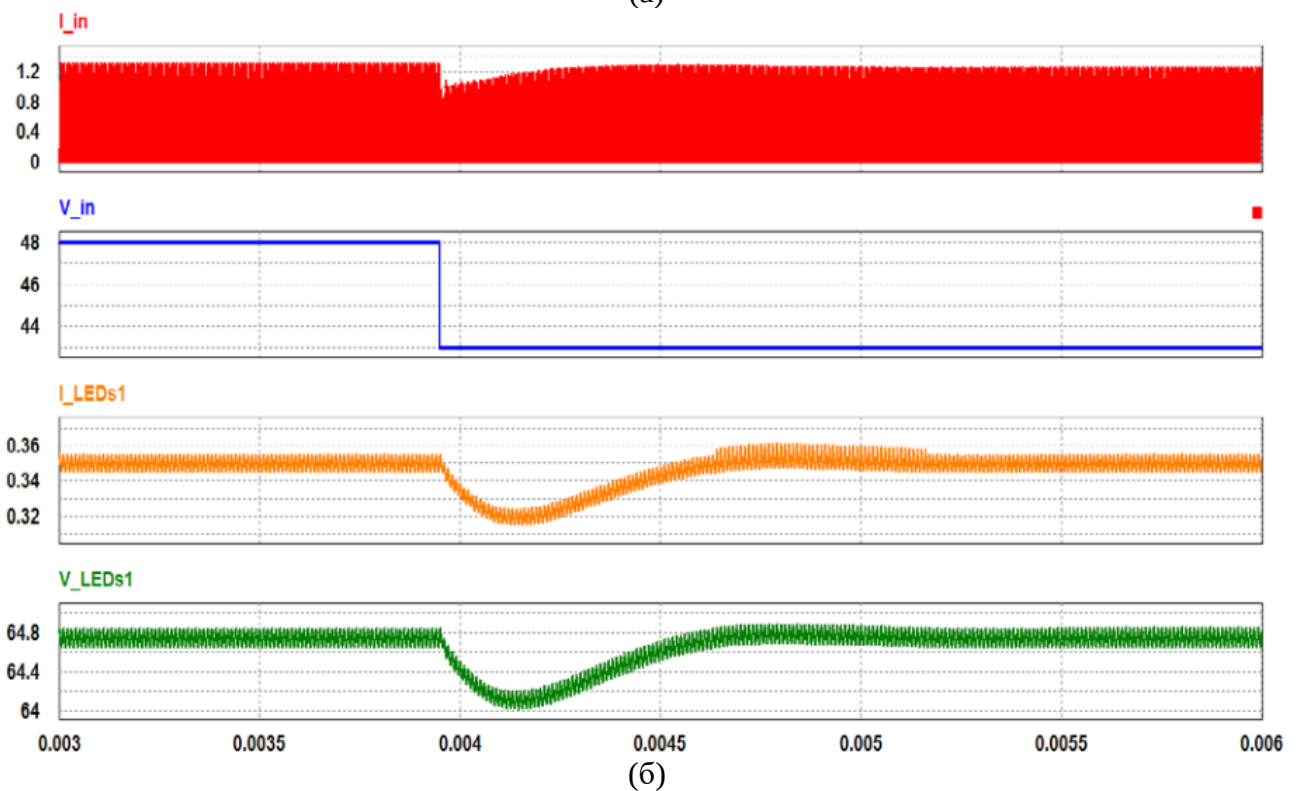
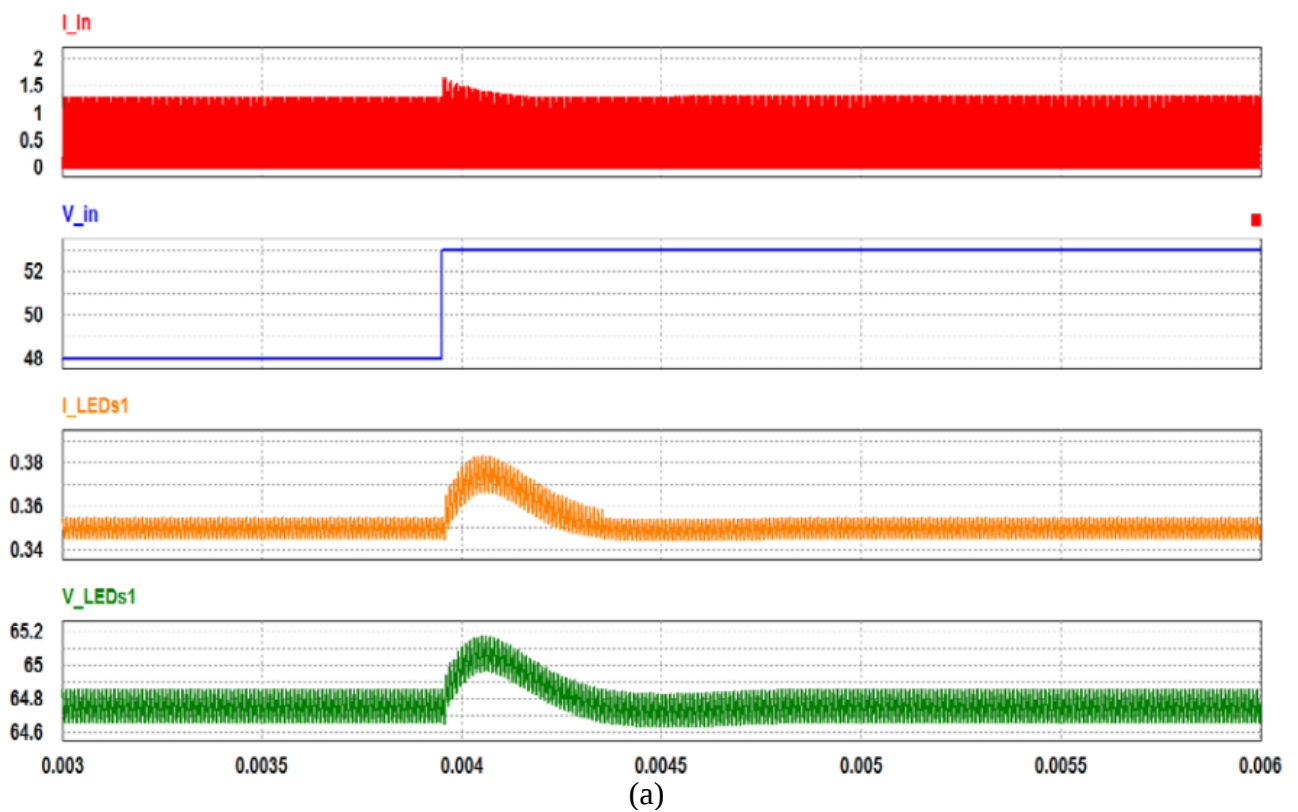


Рисунок 3.14 - Динамічна характеристика РППК: вхідний струм та напруга (червона та синя осцилограми відповідно), а також струм та напруга світлодіодного контуру 1 (помаранчева та зелена осцилограми відповідно) (а) при поступовому збільшенні вхідної напруги з 48 В до 53 В (б) при поступовому зменшенні вхідної напруги з 48 В до 43 В

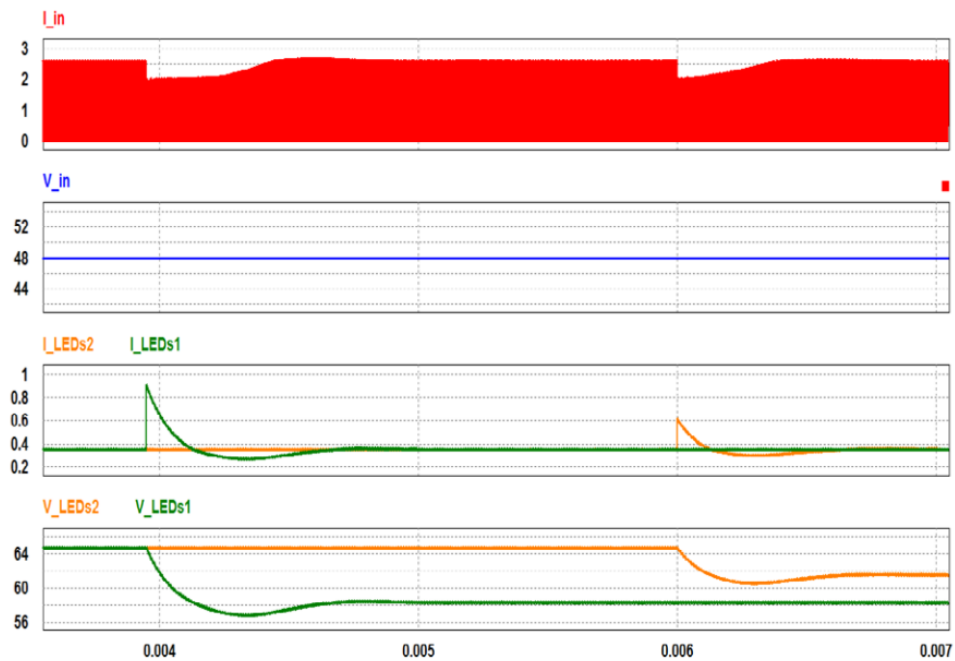


Рисунок 3.15 - Динамічна реакція РППК: Вхідний струм і напруга (червоні та сині хвильові форми, відповідно), струми світлодіодних контурів 1 і 2 (третій графік - зелені та помаранчеві хвильові форми відповідно) та напруги світлодіодних контурів 1 і 2 (четвертий графік - зелені та помаранчеві криві відповідно), де вихідна напруга контура 1 була зменшена на 6,4 В шляхом короткого замикання двох світлодіодів, а вихідна напруга контура 2 була зменшена на 3,2 В шляхом короткого замикання одного світлодіода.

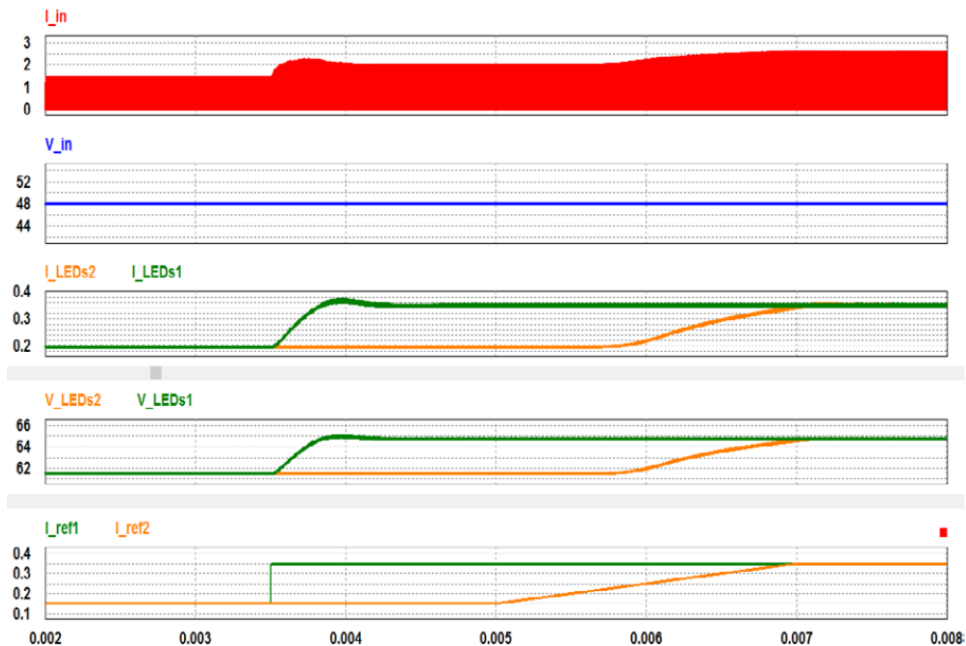


Рисунок 3.16 - Динамічна характеристика РППК: вхідний струм та напруга (червона та синя криві, відповідно), струми світлодіодних контурів 1 та 2 (3-й графік - зелена та помаранчева криві, відповідно), напруги світлодіодних

контурів 1 та 2 (4-й графік - зелена та помаранчева криві, відповідно) та вихідні опорні струми 1 та 2 (5-й графік - зелена та помаранчева криві, відповідно) змінювались в межах від 0,1 А до 0,35 А за допомогою ступінчастого підвищення та 2 мс часу відповідно.

Динамічну поведінку РППК до ПК у навантаженні та до зміни опорного вихідного струму (для кроку) можна побачити на рисунок 3.15 та рисунок 3.16, відповідно.

3.3 Висновки до розділу

У цьому розділі проведено імітаційне моделювання світлодіодного драйвера на основі резонансного перетворювача із перемиканням конденсаторів зі змінною індуктивністю в середовищі PSIM. Для підвищення достовірності результатів розроблено модель світлодіодної лампи на основі експериментальних вольт-амперних характеристик, а також динамічну модель змінного індуктора, що враховує його нелінійну поведінку. Отримані результати моделювання підтвердили коректність обраних принципів керування та працездатність запропонованої схеми у всьому діапазоні дімування. Показано, що перетворювач стабільно працює в режимі комутації при нульовій напрузі (ZVS), що забезпечує зниження комутаційних втрат та електромагнітних завад. Аналіз статичних і динамічних характеристик засвідчив високу швидкодію системи, стійкість до змін вхідної напруги й навантаження, а також незалежне та ефективне регулювання струмів у багатовихідній світлодіодній системі.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці

4.1.1. Техніка безпеки при експлуатації електромереж

До обслуговування електрообладнання допускаються особи не молодше 18 років, які не мають медичних протипоказань, що заважають виконанню робіт, що отримали вступний і первинний інструктажі на робочому місці, виробниче навчання, перевірку знань.

Електромонтер повинен знати схему електропостачання об'єктів виробництва, повинен мати навички прийомів технічних методів обслуговування електроустановок. Він забезпечується усіма засобами індивідуального захисту та спецодягом. Інструменти і засоби захисту повинні бути випробувані, справні та використовуються за призначенням.

При експлуатації діючих електроустановок застосовують електрозахисті засоби та запобіжні пристосування. Ручне включення і відключення устаткування напругою понад 1000 В необхідно виконувати в діелектричних рукавичках, колошах або на килимку. Відключення виконують таким чином: відключають роз'єднувачі, знімають плавкі вставки запобіжників, від'єднують привод мережі. Після вивішування плаката перевіряють відсутність напруги на відключеній ділянці мережі. В оперативному журналі роблять запис про відключення. Включення проводять тільки після відмітки в журналі про закінчення робіт із зазначенням відповідальної особи.

Безпека виконання забезпечується також організаційними заходами. До них відноситься оформлення роботи нарядів, оформлення допуску до роботи, нагляд під час виконання роботи.

Наряд є письмовим дозволом на роботу в електроустановках, що визначає місце, час, початок і закінчення робіт; умови безпечного його проведення, склад бригади та осіб, відповідальних за безпеку. Без наряду по усному чи письмовому розпорядженню, але з обов'язковим записом в журналі

можуть виконуватися такі роботи, як прибирання приміщень до огороження електрообладнання, чистка кожухів, доливка масла в підшипники, догляд за колекторами, контактними кільцями, щітками, заміна запобіжників. При роботі з електроустановками напругою до 1000 В без зняття напруги необхідно: захистити розташовані поблизу робочого місця інші струмовідні частини, що знаходяться під напругою, до яких можливий випадковий дотик; працювати в діелектричних калошах або стоячи на ізолюючій підставці, або на діелектричному килимі; застосовувати інструмент з ізолюючими рукоятками (у викруток, крім того, повинен бути ізольований стрижень), за відсутності такого інструменту користуватися діелектричними рукавичками.

При виконанні робіт без зняття напруги на струмовідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно: тримати ізолювальні частини засобів захисту за рукоятки до обмежувального кільця; розташовувати ізолюючі частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмоведучими частинами двох фаз чи замикання на землю; користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям.

При виявленні порушення лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту користування ними має бути негайно припинене.

Щозмінні огляди електрообладнання та мереж повинен проводити черговий електрик. При огляді слід звертати увагу на наступне: відсутність змін стану електрообладнання при його функціонуванні; ступінь корозії, фарбування труб, кріпильних елементів; справність введів проводів та кабелів в електроустановку; справність заземлюючих пристроїв; наявність попереджувальних плакатів та знаків маркування на вибухонебезпечному електрообладнанні; наявність всіх передбачених конструкцією болтів, що кріплять елементи оболонки (вони повинні бути добре затягнуті); потрапляння на електрообладнання бризок, крапель і пилу.

При виявленні ненормальної роботи силового трансформатора черговий електромонтер повинен вивести його з роботи з обов'язковим дотриманням усіх заходів особистої безпеки, використовуючи необхідні засоби індивідуального захисту. Таке відключення проводиться при: сильному нерівномірному шумі і потріскуванні всередині трансформатора; ненормальному і постійно зростаючому нагріванні трансформатора при номінальному навантаженні і роботі пристроїв охолодження; викид масла з розширювача або розриві діафрагми вихлопної труби; течі масла з пониженням його рівня нижче мінімально допустимого.

При цьому робиться запис в оперативному журналі і повідомляється відповідальному за електрогосподарство.

Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів і правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів вимагають проводити регулярні огляди та ремонт електромереж, а також вимірювання опору та ізоляції.

4.2. БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.2.1 Дослідження стійкості роботи у надзвичайних ситуаціях підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі

Під стійкістю роботи об'єктів електротехнічної і світлотехнічної галузі розуміють його спроможність в умовах надзвичайної ситуації випускати продукцію в запланованому обсязі та номенклатурі, а при отриманні середніх руйнувань або порушенні зв'язків з кооперації та поставок відновлювати виробництво у мінімальні терміни.

Під стійкістю роботи об'єктів, які безпосередньо не виробляють матеріальні цінності розуміють їх спроможність виконувати свої функції в умовах НС.

На стійкість роботи об'єктів електротехнічної та світлотехнічної галузі в умовах НС впливають наступні фактори:

- надійність захисту робітників та службовців;
- спроможність інженерно-технічного комплексу об'єкта протистояти у визначеному ступеню уражаючих факторів стихійного лиха, аварій, катастроф та сучасних видів зброї;
- захищеність об'єкта від вторинних уражаючих факторів (пожеж, вибухів, зараження отруйними речовинами);
- надійність системи забезпечення об'єкта всім необхідним для виробництва (сировиною, паливом, комплектуючими вузлами і деталями, електроенергією, водою, газом та іншим);
- стійкість та безперервність керування виробництвом та ЦО;
- підготовленість об'єкта до ведення РіНР та робіт щодо порушеного виробництва.

Захист робітників та службовців досягається чотирма основними способами:

- укриття людей в захисних спорудах;
- проведення евакуаційних заходів;
- радіаційно-хімічний захист;
- медичний і біологічний захист.

Надійно захистити виробничий персонал об'єкта можливо лише при комплексному використанні усіх основних способів захисту.

Захист виробничих фондів полягає у підвищенні протидії будинків, споруд і конструкції об'єкта до уражаючих факторів та захисті технологічного обладнання, верстатів, систем і комунікацій та інших засобів, що формують основу виробничого процесу.

Створення надійних систем електро-, водо- та теплозабезпечення об'єктів:

- а) підвищення стійкості електрозабезпечення:
 - розподіл схеми електромереж на незалежно працюючі частини;
 - закілювання електромереж та підключення їх до декількох джерел енергозабезпечення;

- створення резерву дизельних електростанцій;

б) підвищення стійкості систем водопостачання:

- водопостачання від двох незалежних джерел, одне з яких підземне;

- захист вододжерел та резервуарів чистої води;

- створення обвідних (байпасних) ліній навколо водонапірних веж;

в) підвищення стійкості систем газу, тепло- та паливо- забезпечення:

- розподільні газопроводи робити підземними та передбачати їх кільцювання;

- газорозподільні станції та опорні пункти обвідних газопроводів передбачати в підземному варіанті;

- встановлювати в основних вузлових точках систем автоматичні вимикаючі пристрої, які спрацьовують при аваріях.

Підвищення протипожежної стійкості:

- максимальне скорочення запасів палива та вибухонебезпечних речовин;

- проведення профілактичних протипожежних заходів;

- підготовка сил і засобів пожежогасіння.

Створення стійкості системи матеріально-технічного постачання. На об'єктах електротехнічної і світлотехнічної галузі створюють запаси сировини, палива, комплектуючих вузлів і деталей, обладнання, які дозволяють продовжувати роботу на випадок дезорганізації постачання.

Створення стійкості системи керування:

- підготовка ПУ (захищених);

- забезпечення ПУ засобами зв'язку;

- використання автоматизованої системи керування. Підготовка до прискороного (негайного) відновлення порушеного виробництва;

- розробка необхідної технічної та технологічної документації;

- створення запасів матеріальних засобів для встановлення робіт;

- розробка розрахунків сил і засобів для відновлюючих робіт;

- визначення вірогідної черговості робіт по відновленню виробництва з урахуванням наявних ресурсів та місцевих умов.

Крім того, на стійкість роботи підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі буде впливати наявність підготовленої робочої сили.

Підвищення надійності та оперативності керування виробництвом:

- створення на об'єкті стійкої системи зв'язку;
- висока підготовка керівного складу;
- своєчасне прийняття вірних рішень та постановка завдань підлеглим у відповідності до обстановки, що склалася.

Підвищення стійкості роботи об'єкта електротехнічної та світлотехнічної галузі досягається завчасним проведенням комплексу інженерно-технічних, технологічних та організаційних заходів, які спрямовані на максимальне зниження дії уражаючих факторів і створення умов для ліквідації наслідків НС.

Інженерно-технічні заходи – це комплекс робіт, що забезпечують підвищення стійкості виробничих будинків і споруд, обладнання, комунально-енергетичних, систем.

Технологічні заходи забезпечують підвищення стійкості роботи об'єкті шляхом зміни технологічного процесу, що сприяє спрощенню виробництва продукції та усуває можливість виникнення вторинних уражаючих факторів.

Організаційні заходи передбачають розробку і планування дій керівного командно-начальницького складу штабу, служб і формування ЦО про захист робітників і службовців.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

З проведених досліджень можна зробити наступні висновки.

Проаналізовано резонансний перетворювач із перемиканням конденсаторів зі змінною індуктивністю, призначений для живлення світлодіодних навантажень. Обґрунтовано доцільність застосування керування струмом, що забезпечує стабільну роботу світлодіодів у широкому діапазоні дімування та зменшення пульсацій вихідних параметрів. Проведено поетапний аналіз роботи перетворювача, виконано розрахунок резонансного та вихідного конденсаторів, а також визначено необхідний діапазон зміни індуктивності для забезпечення режиму ZVS. Показано, що запропонована схема характеризується високою енергоефективністю, зниженими комутаційними втратами та придатністю до реалізації мультиватних і багатовихідних світлодіодних систем.

Проведено імітаційне моделювання світлодіодного драйвера на основі резонансного перетворювача із перемиканням конденсаторів зі змінною індуктивністю в середовищі PSIM. Для підвищення достовірності результатів розроблено модель світлодіодної лампи на основі експериментальних вольт-амперних характеристик, а також динамічну модель змінного індуктора, що враховує його нелінійну поведінку. Отримані результати моделювання підтвердили коректність обраних принципів керування та працездатність запропонованої схеми у всьому діапазоні дімування. Показано, що перетворювач стабільно працює в режимі комутації при нульовій напрузі (ZVS), що забезпечує зниження комутаційних втрат та електромагнітних завад. Аналіз статичних і динамічних характеристик засвідчив високу швидкодію системи, стійкість до змін вхідної напруги й навантаження, а також незалежне та ефективне регулювання струмів у багатовихідній світлодіодній системі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Данцев, О. О., Костів, А. Ю., Ткачук, А. Ю., & Філюк, Я. О. (2025). Високоєфективний світлодіодний драйвер на основі резонансного перетворювача. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 27.
2. Андрійчук, В. А., Наконечний, М. С., Філюк, Я. О., Осадца, Я. М., & Костик, Л. М. (2025). Диференціальний час життя нерівноважних носіїв у світлодіодах на основі ііі-нітриду галію. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 8-9.
3. Філюк, Я., Андрійчук, В., Наконечний, М., Костик, Л., & Осадца, Я. (2025). Аналіз параметрів імпульсного живлення та потоку випромінювання світлодіодних джерел світла. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences, 349(2), 28-32..
4. Андрійчук, В. А., Костик, Л. М., Наконечний, М. С., & Філюк, Я. О. (2024). Кінетика спадання світлового потоку при імпульсному живленні світлодіодів. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 5-6..
5. Z. Junming, X. Lianghui, W. Xinke, and Q. Zhaoming, "A Precise Passive Current Balancing Method for Multioutput LED Drivers," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 26, pp. 2149-2159, 2011..
6. Іванунь, В. В., & Філюк, Я. О. (2024). Шляхи підвищення енергоефективності та надійності автомобільної світлотехніки. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 99.

7. C. Branas, F. J. Azcondo, and J. M. Alonso, "Solid-State Lighting: A System Review," *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, vol. 7, pp. 6-14, 2013.
8. Андрійчук, В. А., Костик, Л. М., Філюк, Я. О., & Наконечний, М. С. (2024). Дослідження перехідних процесів в електричному колі з світлодіодами. *Technical Electrodynamics/Tekhnichna Elektrodynamic*,(2). <https://doi.org/10.15407/techned2024>, 2..
9. Смосяк, Р. В., Заболотний, О. П., Щербій, М. М., & Філюк, Я. О. (2023). Світлодіодний драйвер із підвищеним терміном служби. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 261-261..
10. Andriichuk, V. A., Nakonechnyi, M. S., & Filiuk, Y. O. (2023). Kinetics of narrow-spectrum LED glow under pulsed power. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 26(2), 230-235.
11. Андрійчук, В., Наконечний, М., Філюк, Я., Костик, Л., & Осадца, Я. (2023). Дослідження кінетики свічення світлодіодних джерел світла. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 325(5 (1)), 9-15..
12. Andriichuk, V., Nakonechyi, M., Filiuk, Y., Osadtsa, Y., & Xinzhong, G. (2021, December). Kinetics of LEDs white lighting under pulse power supply. In *Proceedings of the International Conference „Advanced applied energy and information technologies 2021”*, 2021 (pp. 33-39). TNTU, Zhytomyr «Publishing house „Book-Druk «» LLC..
13. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.
14. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.