

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

РОЗРОБКА СВІТЛОДІОДНОГО ДРАЙВЕРА З
РЕГУЛЮВАННЯМ ЯСКРАВОСТІ НА ОСНОВІ
РЕЗОНАНСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

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

«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Коробчук Д.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Зінь М.М.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

Завідувач
кафедри

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

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)

«14» жовтня 2024 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

Коробчуку Дмитрові Васильовичу

(Прізвище, Ім'я, По Батькові)

1. Тема роботи

Розробка світлодіодного драйвера з регулюванням яскравості на основі резонансного перетворювача

Керівник роботи

Зінь Мирослав Михайлович, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

- Затверджені наказом ректора від «11» жовтня 2024 року №4/7-988
2. Термін подання студентом завершеної роботи грудень 2024 року
3. Вихідні дані до роботи
- Розробити світлодіодний драйвер, що відповідає наступним вимогам: з цифровим управлінням, висока ефективність у широкому робочому діапазоні, ШІМ дімування з постійним струмом на виході, мінімізація компонентів для економії енергії. Провести моделювання та експериментальні дослідження для розробленого прототипу
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		
	Клепчик В.М., старший викладач		
Нормоконтроль	Коваль В.П. к.т.н., зав. кафедри ЕІ		

7. Дата видачі завдання 14 жовтня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	20.10.2024	
2	Аналітичний розділ	1.11.2024	
3	Розрахунково-дослідницький розділ	10.11.2024	
4	Проектно-конструкторський розділ	25.11.2024	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	29.11.2024	
6	Висновки	01.12.2024	
7	Оформлення пояснювальної записки	06.12.2024	
8	Оформлення графічної частини	12.12.2024	

Студент _____
(підпис)

Коробчук Д.В. _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Зінь М.М. _____
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Коробчук Д.В. Розробка світлодіодного драйвера з регулюванням яскравості на основі резонансного перетворювача

Стор.62; рис.37; табл.6; креслень - ; джерел -14; додатків - 0.

Метою кваліфікаційної роботи було розробка ефективної системи світлодіодного освітлення, шляхом розробки DC-DC перетворювача на основі LLC.

У першому розділі дається огляд літератури та теоретичної бази теми. Це також пояснює деякі концепції розуміння проблеми та деякі очікувані результати.

В другому розділі представлено бездротову систему комунікації освітленням у видимому діапазоні світла, призначену для "розумних будівель". Продемонстровано резонансний перетворювач постійного струму з цифровим керуванням LLC, призначений для білих світлодіодних світильників. Модуль використовує світлодіодний масив як для зовнішнього освітлення, так і для комунікації. Продемонстровано схему цифрової демодуляції, яка підтримує передачу даних зі змінною частотою.

У третьому розділі було змодельовано систему освітлення з резонансним перетворювачем LLC постійного струму з цифровим керуванням, а також представлено експериментальні результати. Представлено осцилограми при різних налаштуваннях димування. Коефіцієнт бітових помилок всієї системи повністю охарактеризовано в залежності від відстані та кута нахилу.

Ключові слова: резонансний перетворювача, система освітлення, комунікація, світлодіод.

ЗМІСТ

Реферат	3
ЗМІСТ	4
ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Аналіз освітлювальних систем та інтелектуальних освітлювальних модулів	9
1.2 Огляд традиційних світлодіодних драйверів	11
1.3 Аналіз комунікації видимим світлом	16
1.4 Змінна імпульсно-позиційна модуляція	17
1.5. Висновок до розділу	18
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	19
2.1 Проектування LLC резонансного перетворювача	19
2.2 LLC-резонансний перетворювач зі світлодіодним навантаженням	22
2.3 Аналіз втрат потужності перетворювача	26
2.4 Імпульсний режим LLC резонансного перетворювача реалізований ЗУПМ	28
2.5 Аналіз пульсацій вихідного струму та оптимізація вихідного конденсатора	32
2.6 Конструкція приймача сигналу видимого світла (ЗВД).	34
2.6.1 Фотодіод і аналоговий фільтр	34
2.6.2 Демодуляція змінної імпульсно-позиційної модуляції (ЗУПМ)	36
2.6 Висновки до розділу	38
3 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	39
3.1. Моделювання резонансного LLC перетворювача з цифровим керуванням	39
3.2 Експериментальні результати LLC перетворювача	44
3.3 Висновки до розділу	53
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	54

4.1 Охорона праці	54
4.1.1 Навчання з питань охорони праці	54
4.2. БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	57
4.2.1. Правові основи забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях та матеріальних втрат у будь-яких умовах обстановки.	57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	60
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	61

ВСТУП

Актуальність теми роботи. У сучасному світі інтелектуально-освітні системи залишаються дедалі популярнішими за рахунок вашої високої енергоефективності, тривалого терміну служби та здатності адаптуватися до умов навколишнього середовища. Світлодіоди, або LED, змінюють ключову роль у таких системах завдяки своїм численним перевагам, серед яких висока продуктивність, низьке енергоспоживання, тривалий ресурс роботи та можливість точного регулювання параметрів освітлення. Протест для повноцінного використання потенціалу світлодіодів необхідно встановити спеціалізовані драйвери, які забезпечують стабільну роботу світлодіодів, регулювання яскравості та збереження високої енергоефективності систем.

Одним із найбільш перспективних напрямів у розробці таких драйверів є використання резонансних перетворювачів. Ці пристрої мають низьку переваги в порівнянні з традиційними схемами, зокрема, здатність мінімізувати втрату енергії, знизити рівень електромагнітних хвиль, підвищити надійність і довговічність роботи. Використання резонансного перетворювача в драйвері для світлодіодів дозволяє досягти високого показника корисної дії навіть у разі зміни навантаження або роботи в нестабільних умовах. Інтеграція функцій регулювання яскравості на основі сучасних підходів до керування дозволяє створити систему, яка адаптується до потреб користувача. Освітлення може змінювати інтенсивність світлового потоку залежно від часу отримання, рівня зовнішнього освітлення або індивідуальних уподобань користувачів.

Розробка подібного драйвера є надзвичайно актуальною через швидке зростання попиту на інтелектуальні освітлювальні модулі в різних сферах людської діяльності. У житлових приміщеннях такі модулі сприяють створенню комфортних умов освітлення, зменшуючи навантаження на органи зору. У комерційних і промислових об'єктах вони підвищують ефективність виконання робочих процесів, забезпечуючи оптимальне освітлення залежно від конкретних завдань. У межах сучасної концепції "розумних міст" інтелектуально-освітні системи створюють ключову роль у зменшенні

споживання енергії, зменшенні викидів вуглекислого газу та раціональному використанні ресурсів.

Науковий і практичний потенціал цієї теми виявляється у вирішенні низки важливих завдань: створення високоефективних драйверів з мінімальними витратами енергії, інтеграція інтелектуальних функцій для адаптивного керування освітленням, а також забезпечення високої надійності й довговічності систем. Використання інноваційних технологій, зокрема резонансних перетворювачів, у поєднанні з новітніми підходами для регулювання яскравості дозволяє значно підвищити функціональність освітлювальних систем.

Мета і завдання роботи: є розробка ефективної системи світлодіодного освітлення, шляхом розробки DC-DC перетворювача на основі LLC.

Досягнення мети визначається вирішенням наступних завдань:

Розробити світлодіодний драйвер, що відповідає наступним вимогам: з цифровим управлінням, висока ефективність у широкому робочому діапазоні, ШІМ димування з постійним струмом на виході, мінімізація компонентів для зберігання енергії.

Об'єкт дослідження: процес регулювання електричних та світлових параметрів світлодіодної системи з використанням резонансного перетворювача LLC

Предмет дослідження: Техніко-енергетичні характеристики основних показників якості системи освітлення з використанням резонансного перетворювача LLC.

Наукова новизна отриманих результатів:

Удосконалено модель напівпровідникового перетворювача з резонансним перетворювачем постійного струму з цифровим керуванням LLC, призначений для білих світлодіодних систем освітлення, які використовують світлодіодний масив як для зовнішнього освітлення, так і для комунікації.

Практична цінність результатів дослідження полягає у створенні енергоефективної системи освітлення та бездротової комунікації для "розумних будівель" з використанням резонансного перетворювача LLC з цифровим

керуванням, який дозволяє ефективно регулювати освітлення та знижувати рівень енергоспоживання, підтримуючи широкий діапазон димування.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи і її результати доповідалися на XIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, 2024 р.)

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 Аналіз освітлювальних систем та інтелектуальних освітлювальних модулів

Стельові інтелектуальні освітлювальні модулі (IOM) є невід'ємною частиною концепції енергоефективного розумного будинку. Розумні модулі освітлення забезпечують високоефективне програмоване освітлення за допомогою світлодіодів, а також можуть діяти як мережеві сенсорні вузли для збору різноманітних локальних вимірювань, таких як навколишнє освітлення, температура, вологість тощо. Ці дані в режимі реального часу, які можна завантажувати в "хмару" для віддаленого моніторингу та управління, можуть призвести до значного підвищення комфорту, безпеки та енергоефективності в промислових і комерційних будівлях. У певних випадках IOM також можуть бути оснащені резервним акумулятором, щоб забезпечити тимчасове освітлення, сигналізацію та сенсорні функції під час надзвичайних ситуацій, а також евакуації.

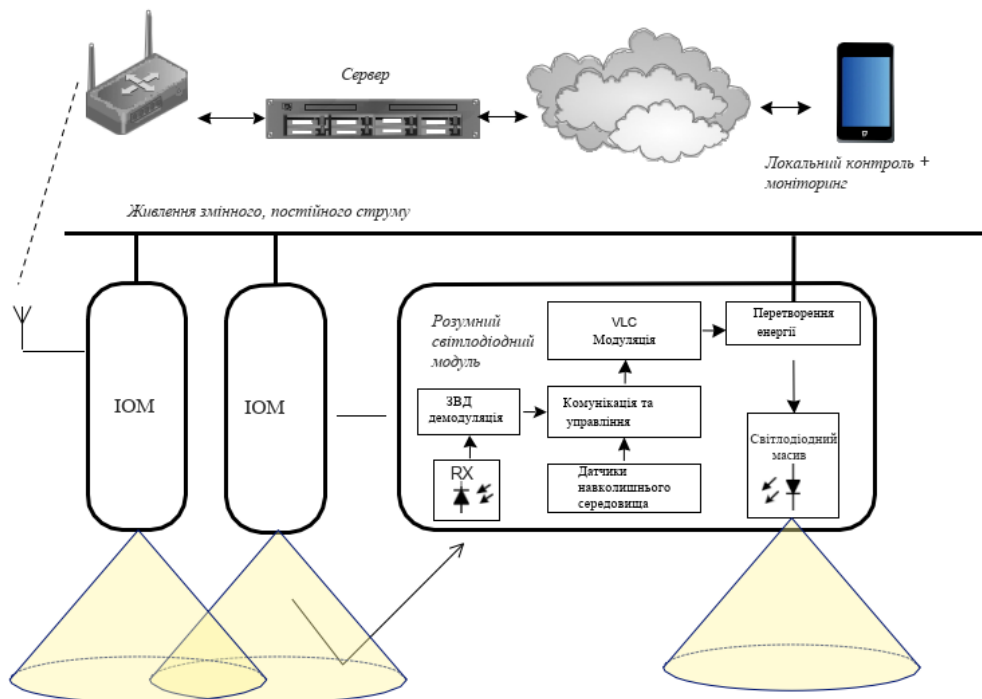


Рисунок 1.1 - Модуль розумного освітлення як невід'ємний компонент концепції розумної будівлі.

Система зв'язку в ІОМ може бути реалізована за допомогою (1) ліній електропередач (ЛЕП) [2, 3], (2) недорогого радіочастотного (РЧ) зв'язку короткого радіусу дії або (3) дротової низьковольтної послідовної шини. Базове порівняння восьми малопотужних радіочастотних технологій представлено в таблиці 1.1. Підтримувані мережеві протоколи для кожної технології показані в таблиці 1.2. У додатках ІОМ, враховуючи необхідність постійного світлового покриття, дальність зв'язку становить порядку 1-20 м, з пропускнуою здатністю 20-100 кбіт/с, сумісною з комірчастими та зірчастими мережами. З огляду на ці вимоги, чотирма найбільш підходящими технологіями є (1) ZigBee, яка добре відома в "розумних" будівлях, (2) ANT+, власна схема з низьким енергоспоживанням, (3) Bluetooth з низьким енергоспоживанням і (4) RF4CE, специфічна реалізація ZigBee для побутової електроніки. З'являється потреба в четвертому варіанті, який може уникнути фізичних проводів, а також переповненого радіочастотного діапазону з мінімальними додатковими витратами.

Таблиця 1.1 - Порівняння малопотужних радіочастотних схем зв'язку [4].

	Бездротова технологія							
Параметр	LE*	ANT+	ZigBee	RF4CE	WiFi	Nike+	IrDA	NFC
Площа друкованої плати (мм ²)	20	306	305	305	60	300	21	100
Дальність (м)	280	30	100	100	150	10	0.01	0.05
Пропускна здатність (кбіт/с)	305	20	100	100	6000	272	1000000	424
Піковий струм (мА)**	12.5	17		40	116	12.3	10.2	50

*LE: Bluetooth з низьким енергоспоживанням

**Пікове споживання струму при живленні модуля від одноелементної батареї.

Таблиця 1.2 - Підтримувані мережеві протоколи

	Бездротова технологія							
Параметр	LE*	ANT+	Zigbi.	RF4CE	WiFi	Nike+	IrDA	NFC
Трансляція	+	+	X	X	X	X	X	X
Сітка	+	+	+	+	X	X	X	X
Зірка	+	+	+	+	+	X	X	X
Сканування	+	+	+	+	X	+	X	X
Точка-точка	+	+	+	+	+	+	+	+

*LE: Bluetooth з низьким енергоспоживанням

1.2 Огляд традиційних світлодіодних драйверів

Світлодіоди високої яскравості (LED), як джерело світла нового покоління, в останні роки перебувають у центрі уваги дослідників завдяки своїй високій ефективності (понад 100 лм/Вт) і тривалому терміну служби порівняно з традиційними люмінесцентними лампами, лампами розжарювання високої інтенсивності (ВІ) і лампами розжарювання [5, 6]. Світлодіод складається з чіпа напівпровідникового матеріал, оброблений для створення Р-Н (позитивно-негативного) переходу. Коли Р-Н перехід знаходиться під прямим зміщенням, електрон випускає енергію у вигляді фотона, коли він рухається до дірки. Як показано в рівнянні (1.1), чим більша енергія випромінювання, E , тим менша довжина хвилі, λ_L , випромінюваного фотона:

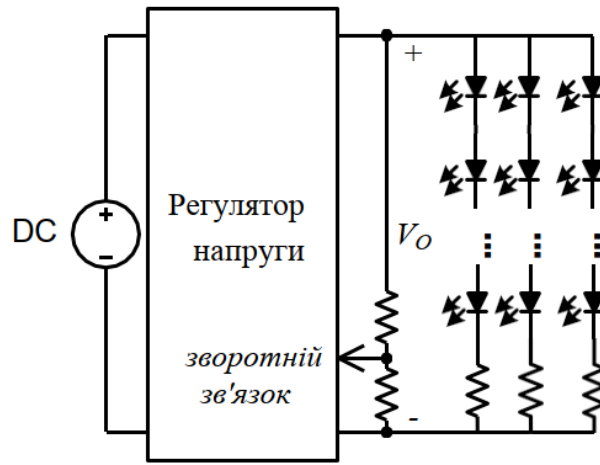
$$E = \frac{hc}{\lambda_L} \quad (1.1)$$

де $c = 3 \cdot 10^8$ м/с - швидкість світла у вакуумі, а $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - стала Планка.

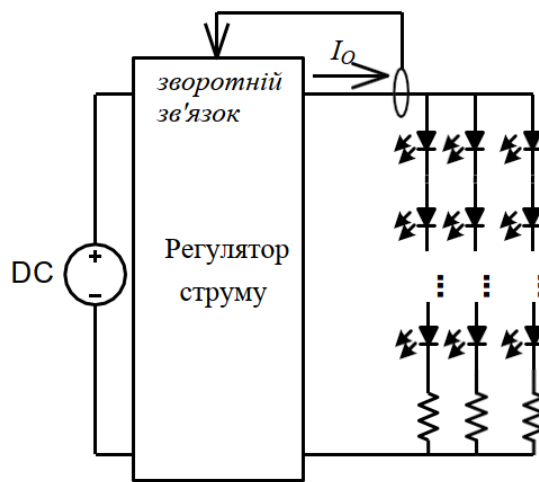
Довжина хвилі фотонів визначає колір світла. Наприклад, жовте світло має довжину хвилі 570-590 нм, синє - 450-495 нм. У світлодіодах різних кольорів використовуються різні типи напівпровідникових матеріалів. Червоні та інфрачервоні світлодіоди виготовляються з арсеніду галію, яскраво-сині - з GaN (нітриду галію). Для внутрішнього освітлення зазвичай використовуються потужні білі світлодіоди, які поділяються на два класи: (1) червоні, зелені та сині (RGB) білі світлодіоди та (2) білі світлодіоди на основі люмінофору. Білий світлодіод RGB складається зі світлодіодів трьох різних кольорів: червоного, зеленого та синього. Біле світло генерується завдяки правильному поєднанню кольорів. Білий світлодіод на основі люмінофору має синій світлодіод високої яскравості і шар жовтого люмінофору з покриттям. Жовтий люмінофор перетворює синє світло на жовте, тому при змішуванні з синім світло виглядає білим для людського ока.

Існує два найпоширеніші методи керування світлодіодною лампою: за допомогою постійної напруги або постійного струму, як показано на рис. 1.2. Згідно з характеристиками, показаними на рис. 1.3 [7], світловий потік має приблизно лінійну залежність від прямого струму. Отже, прямий струм визначає світлову віддачу. Вольт-амперна характеристика світлодіодної лампи, показана на рис. 1.4, свідчить про те, що невелика зміна напруги призводить до значної зміни прямого струму. Тому в якості драйвера світлодіода краще використовувати джерело постійного струму [8, 9].

Існує два методи регулювання яскравості світлодіодів: (1) регулювання вихідного струму і (2) регулювання яскравості за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), як показано на рис. 1.5 (а) і (б), відповідно. Регулювання вихідного струму не може точно контролювати відсоток дімування через нелінійну залежність між прямим струмом і світловим потоком, як показано на рис. 1.3, а також має проблему зсуву кольору [10].



(a)



(б)

Рисунок 1.2 - Світлодіоди, що працюють з (а) регульованою напругою і (б) регульованим струмом.

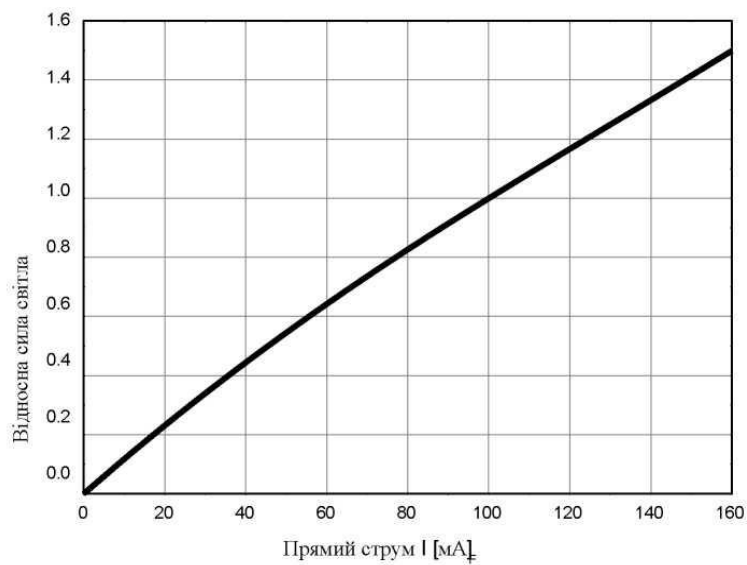


Рисунок 1.3 - Світловий потік світлодіода в залежності від прямого струму

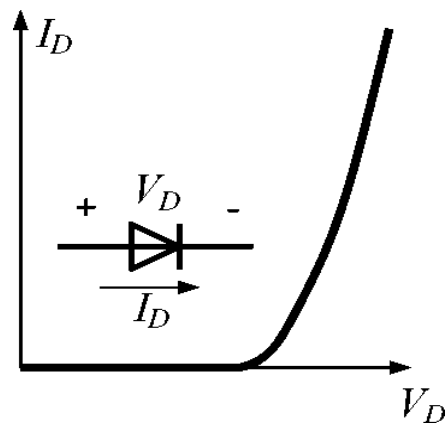


Рисунок 1.4 – ВАХ характеристика світлодіодів

ШІМ-дімування забезпечує постійний прямий струм, коли світлодіоди увімкнені, тому гарантує відсутність зміщення кольорів у світлі. Змінюючи робочий цикл ШІМ-сигналу дімування, GDM , можна реалізувати точне дімування.

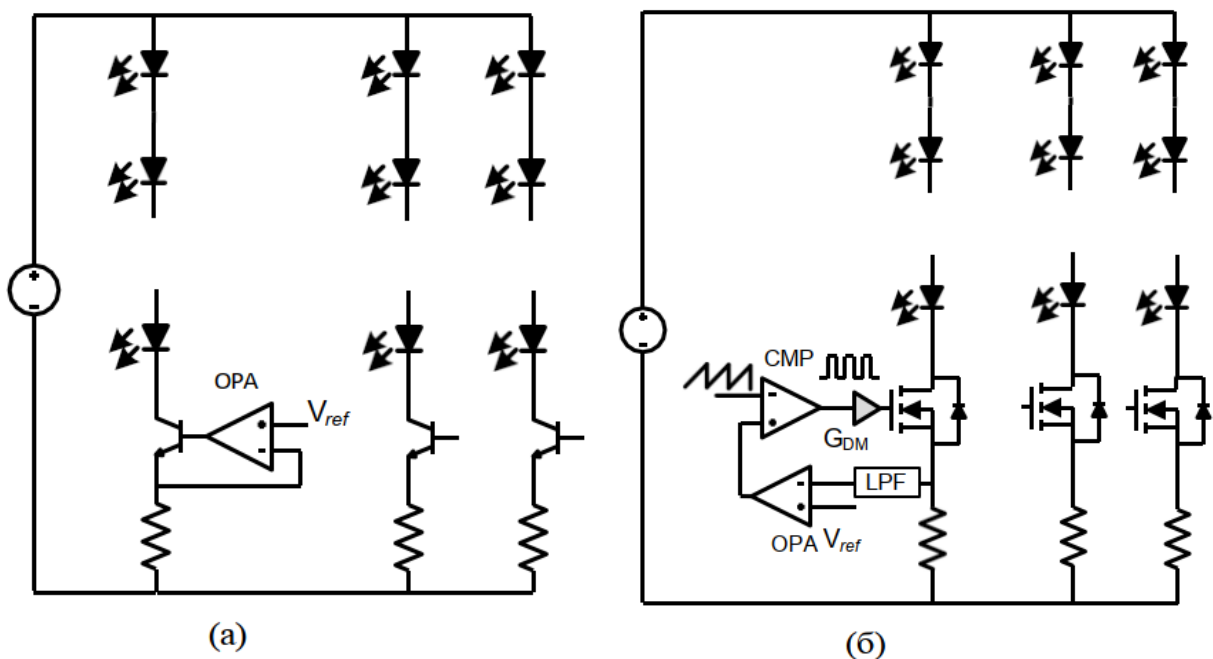
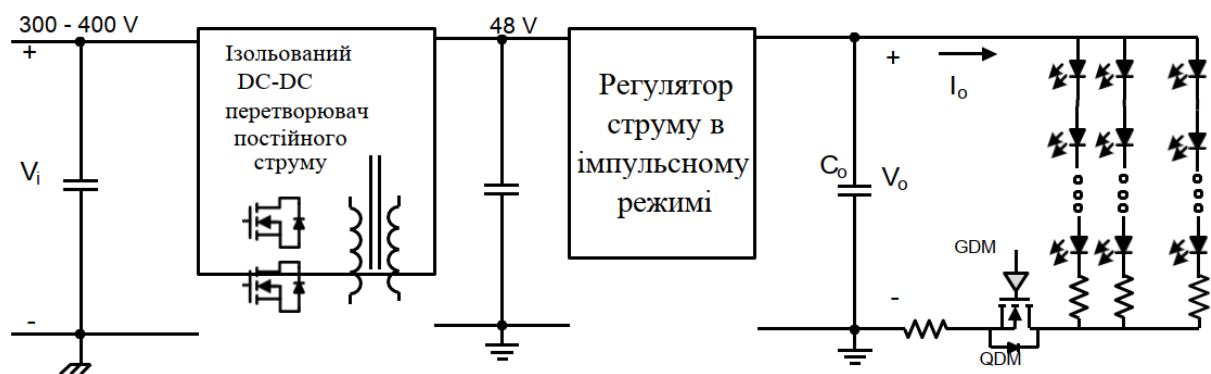
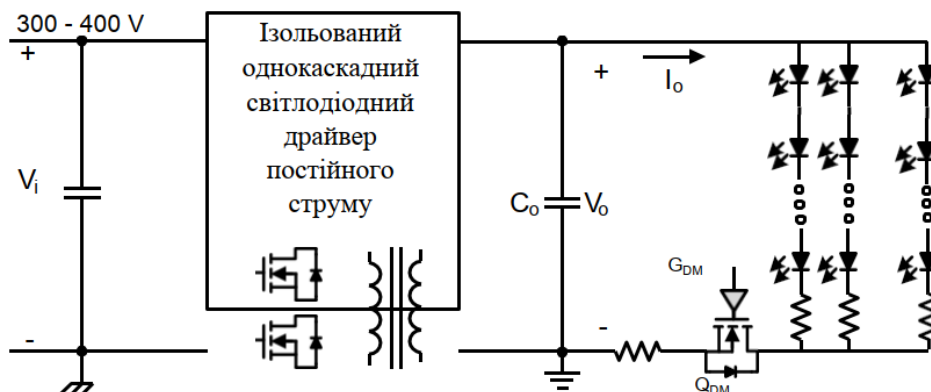


Рисунок 1.5 - (а) Дімування лінійним регулятором струму. (б) ШІМ-регулювання

Внутрішнє освітлення, на яке припадає 12% житлової та 27% комерційної енергії [11], є одним з найбільших компонентів споживання електроенергії в будівлі. ІОМ на основі світлодіодів є новою тенденцією [12, 13] для систем освітлення в "розумних" будівлях. Високовольтна шина постійного струму 400 В буде застосовуватися в майбутніх "розумних" будівлях для забезпечення електроенергією електрообладнання. Двоступеневий світлодіодний драйвер, який знижує високу напругу до 48 В постійного струму за допомогою фронтального перетворювача і керує світлодіодами за допомогою імпульсного регулятора струму, як показано на рис. 1.6(а). Для зменшення втрат потужності в цій двокаскадній архітектурі застосовують однокаскадні архітектури для зниження напруги і регулювання вихідного струму в одному перетворювачі, як показано на рис. 1.6(б), що зменшує складність системи і підвищує ефективність.



(а)



(б)

Рисунок 1.6 - (а) Двокаскадний світлодіодний драйвер. (б) Однокаскадний світлодіодний драйвер.

1.3 Аналіз комунікації видимим світлом

Зв'язок у видимому діапазоні (ЗВД) базується на модуляції світла у видимому діапазоні (385 нм - 780 нм) за допомогою світлодіодів для передачі даних, вбудованих в навколишнє освітлення. Видимий світловий зв'язок використовує високу швидкість перемикання сучасних світлодіодів високої яскравості, яка може досягати 10 МГц. Враховуючи поступове насичення радіочастотного спектру, додавання тисяч радіочастотних ІОМ 2,4 ГГц в будівлі створює проблеми через радіочастотні перешкоди та проблеми сприйнятливості. Спектральне перекриття каналів Zigbee і малопотужного Bluetooth обговорюється в [4]. Видимий світловий зв'язок за допомогою світлодіодів має кілька переваг: (1) відсутність перешкод для радіочастотних сигналів, (2) чітко визначені зони покриття для безпеки, (3) відсутність додаткових фізичних проводів і (4) незначні або нульові додаткові витрати, оскільки потужні світлодіодні передавачі вже присутні в ІОМ.

Минулі демонстрації ЗВД в основному були зосереджені на високошвидкісних (МГц) додатках зі звичайними драйверами, світлодіодними лампами потужністю менше 10 Вт і дальністю дії в кілька метрів. В [10] була продемонстрована система ЗВД зі швидкістю 40 Мбіт/с зі світлодіодним масивом потужністю 1,5 Вт на відстані 1 м. В [11] швидкість передачі даних була збільшена до 100 Мбіт/с на відстані 10 см за допомогою однієї світлодіодної лампи шляхом виявлення лише синьої складової світлодіода, а також застосування простого аналогового еквалайзера першого порядку.

У запропонованій ІОМ на рис. 1.1 переважна більшість вузлів покладається лише на ЗВД для передачі даних, в той час як ІОМ, обладнані радіочастотами, можуть використовуватися для передачі даних за межами офісних стін та інших перешкод. Необхідна пропускна здатність у системі ІОМ ЗВД набагато нижча, ніж у згаданих вище системах ЗВД з високою пропускною здатністю (МГц). Десятки кГц достатньо для передачі даних локальних датчиків. Однак, вимога до відстані в 10 разів вища (кілька метрів), і доступна потужність світлодіодів також набагато вища порівняно з існуючими дослідженнями ЗВД.

1.4 Змінна імпульсно-позиційна модуляція

Новий стандарт IEEE 802.15.7-2011 описує різноманітні високорівневі протоколи ЗВД для світлодіодних систем освітлення з регулюванням яскравості, такі як дімування за допомогою маніпулятора колірного зсуву (ДКЗ), дімування за допомогою маніпулятора увімкнення-вимкнення (ДУВ) та дімування за допомогою змінної імпульсно-позиційної модуляції (ЗУПМ). ДКЗ-діммінг підтримує ЗВД з використанням багатоколірних джерел світла, таких як червоні, зелені та сині (RGB) світлодіодні системи білого світла. Визначаючи колірні патерни як певні логічні комбінації, світлодіоди різних кольорів координуються для увімкнення та вимкнення для передачі даних. У цьому застосуванні це не є можливим, оскільки використовуються білі світлодіоди на основі люмінофору, які складаються з синього світлодіода і жовтого люмінофорного покриття, як показано на рис. 1.7.

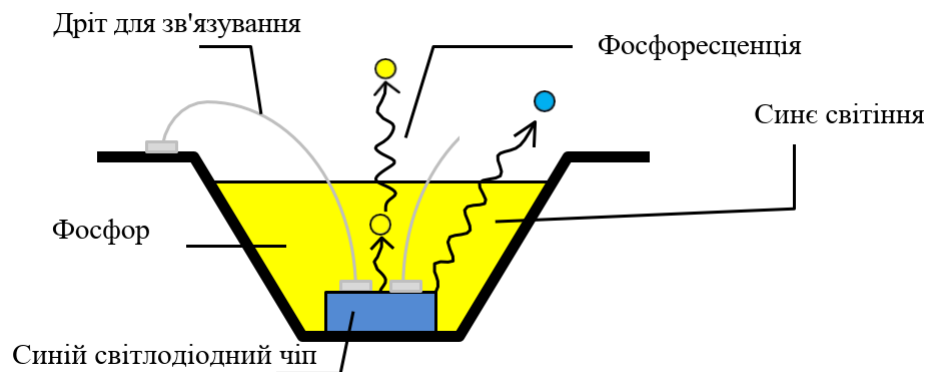


Рисунок 1.7 - Структура білого світлодіода, що складається з синього світлодіодного чіпа і жовтого люмінофора.

Люмінофорне покриття зазвичай виготовляється з легованого церієм ітрію алюмінієвого гранату (YAG:Ce). YAG:Ce поглинає синє випромінювання від синього світлодіода через дозволений перехід $4f^1 \rightarrow 5d^1$, а зворотний перехід $5d^1 \rightarrow 4f^1$ випромінює жовте світло. Жовте випромінювання люмінофора і синє світло, яке не поглинається люмінофорним покриттям, разом дають білий світловий потік. Процес повторного випромінювання у люмінофорному покритті має набагато довший час спаду світлового потоку - кілька сотень

наносекунд, порівняно з синім світлодіодним чіпом. Тому смуга пропускання люмінофорного покриття обмежена приблизно 2 МГц, що є однією з головних проблем при проектуванні системи ЗВД.

У [8] модуляція ДУВ передається симетричним символом з додатковими компенсаційними бітами для встановлення бажаного відсотка дімування, однак швидкість передачі даних обмежена через накладні витрати. ЗУПМ реалізується для керування середнім світловим потоком для керування дімуванням під час передачі даних, як показано на рис. 1.8. "0" та "1" представлені імпульсом на початку та в кінці періоду відповідно. Регулювання яскравості досягається регулюванням робочого циклу світлорегулятора.

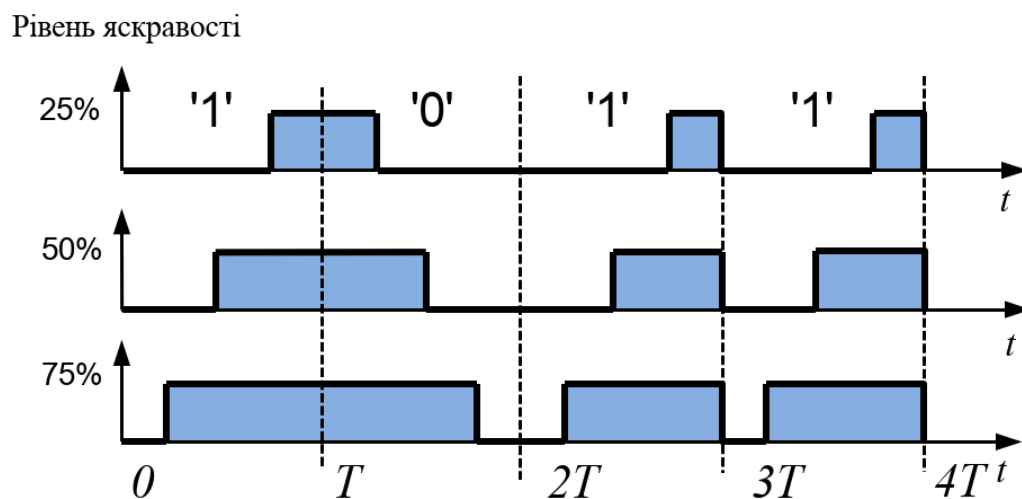


Рисунок 1.8: ЗУПМ модуляція для трьох рівнів дімування.

1.5. Висновок до розділу

У цьому розділі представлено аналіз традиційних і сучасних джерел світла, а також систем освітлення. Хоча більшість освітлювальних систем мають певні недоліки, впровадження світлодіодів забезпечує унікальні переваги. Світлодіоди вирізняються ефективністю, довговічністю та енергоощадністю, що робить їх перспективними для використання в різних сферах. Аналіз підкреслює важливість переходу до сучасних рішень, які поєднують якість освітлення та економічність.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Проектування LLC резонансного перетворювача

Схема резонансного DC-DC перетворювача LLC, як показано на рис. 2.1, відома своєю високою ефективністю в широкому діапазоні вхідної напруги завдяки переключенню за нульовою напругою (ПНН) на MOSFET на первинній стороні та переключенню за нульовим струмом (ПНС) на діодах на вторинній стороні. Він може живитися безпосередньо від шини постійного струму, що є новою тенденцією в інтелектуальних будівлях або розподілених енергосистемах постійного струму, або від звичайного неізольованого випрямляча з корекцією коефіцієнта потужності (ККП) з вихідною напругою 400 В. Детальна конструкція резонансних перетворювачів LLC широко висвітлюється в різних літературних джерелах. Трьома ключовими конструктивними параметрами є

$$\begin{aligned} f_r &= \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \\ L_n &= \frac{L_M}{L_r} \\ Q &= \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{\frac{8N^2}{\pi^2} R_L} \end{aligned} \quad (2.1)$$

де Q - добротність резонансної ємності, R_L - опір навантаження, N - число витків трансформатора LLC. Ці три параметри використовуються для отримання коефіцієнта перетворення напруги в усталеному режимі, M_v , як функції f_s . Резистивні навантаження і постійне регулювання вихідної напруги зазвичай передбачаються в традиційних застосуваннях LLC. Коефіцієнт перетворення постійної напруги перетворювача LLC може бути визначений як

$$M_V = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{L_n} - \frac{1}{L_n f_n^2}\right)^2 + Q^2 \left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)^2}} \quad (2.2)$$

де $f_n = \frac{f_s}{f_r}$ і f_s - частота комутації.

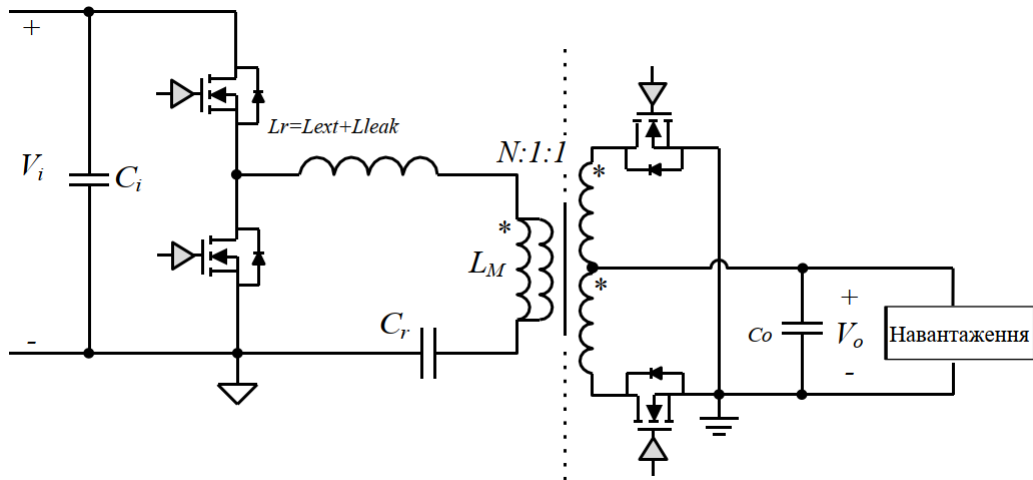


Рисунок 2.1 - Резонансний dc-dc перетворювач LLC з синхронним випрямлячем.

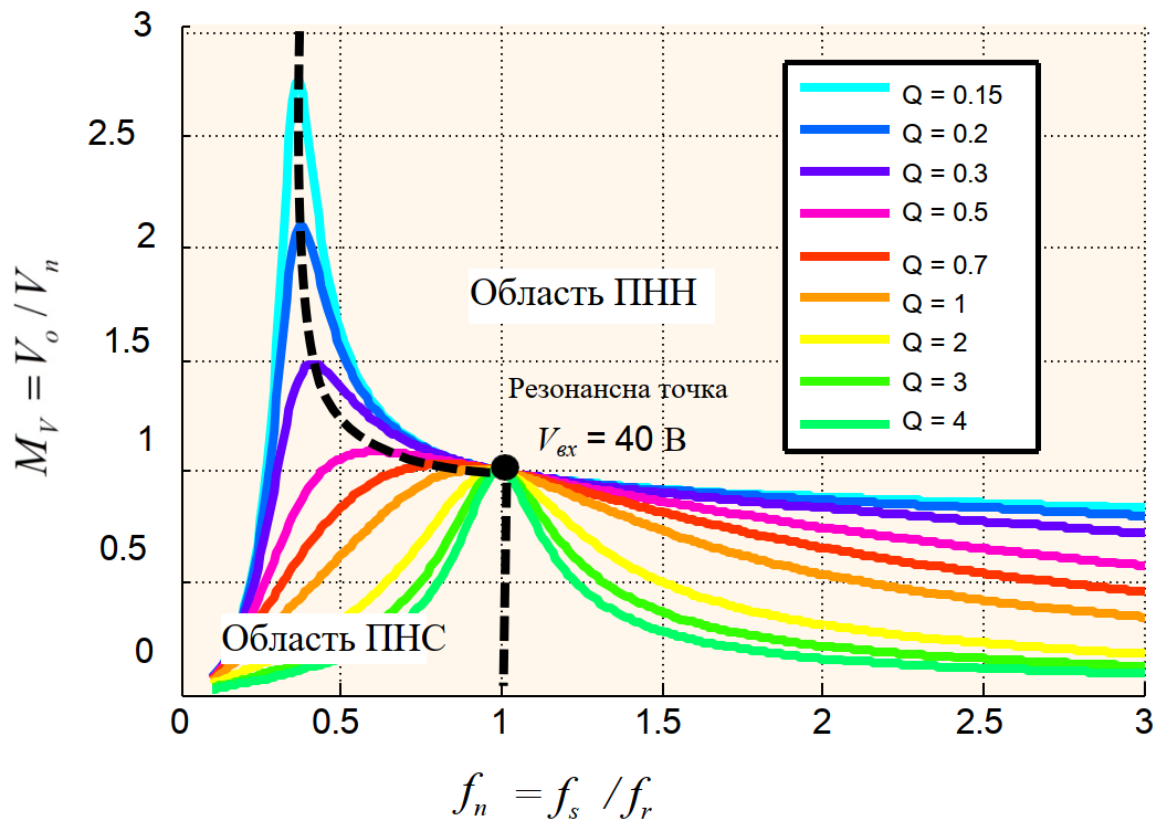


Рисунок 2.2: Коефіцієнт перетворення постійної напруги в стаціонарному режимі перетворювача LLC.

На рис. 2.2 показані вольт-амперні характеристики перетворювача постійної напруги LLC. Область ПНН - це область, де робоча частота вища за точку пікового коефіцієнта підсилення, і резонансний перетворювач LLC повинен працювати в цій робочій області. В області ПНН MOSFET на первинній стороні можуть досягти ПНН, а діод на вторинній стороні може досягти ПНС, якщо робоча частота, f_s , нижча за резонансну частоту, f_s . В області ПНС, як показано на рис. 2.2, MOSFET на первинній стороні працюють в умовах ПНС, що призводить до високих втрат при перемиканні, навіть до ненормального робочого стану, і цього слід уникати.

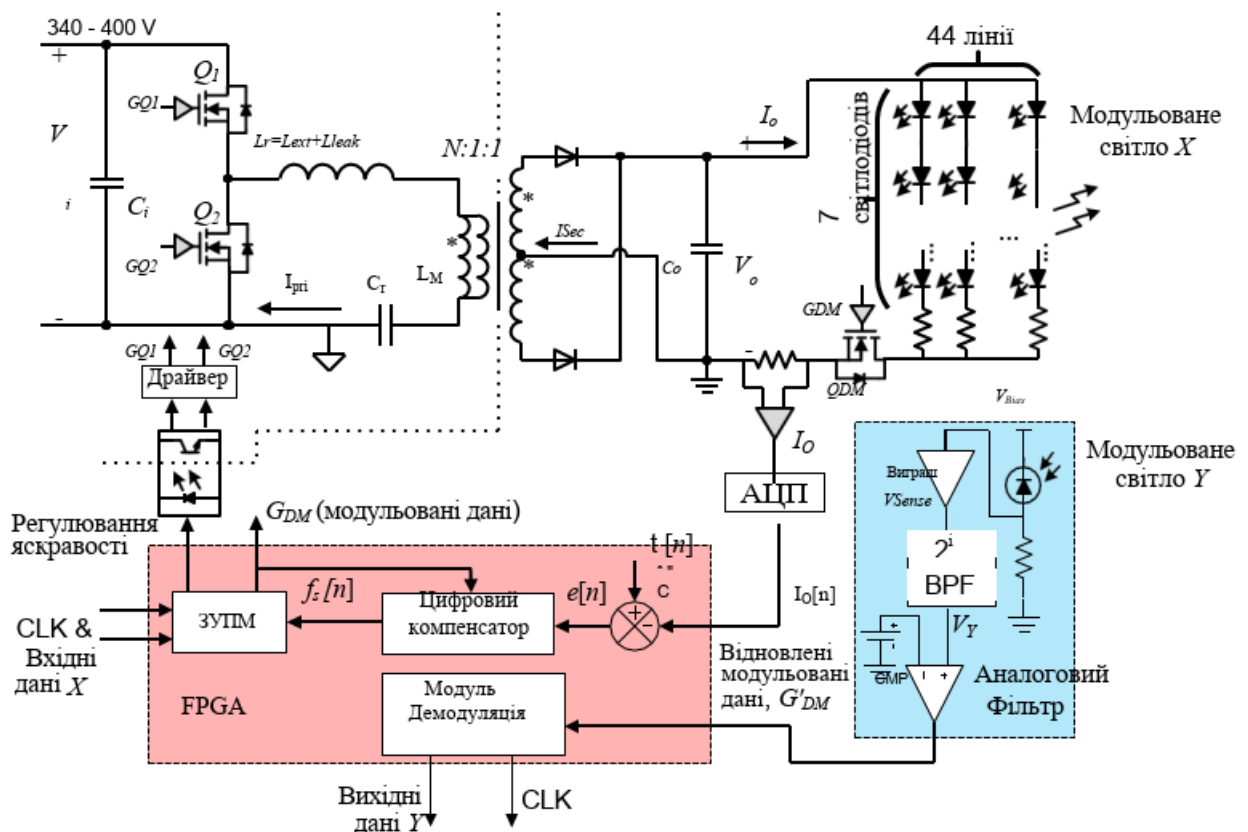


Рисунок 2.3 - Архітектура системи зв'язку у видимому діапазоні з перетворювачем постійного струму LLC.

Архітектура системи ЗВД, що використовується в цій роботі, показана на рис. 2.3, яка включає як передавач, так і приймач. Випрямляючі діоди на вторинній стороні використовуються для спрощення керування, а низькочастотний перемикач дімування Q_{DM} - для досягнення ШІМ дімування. Цифровий контролер, реалізований на FPGA, розміщений на низьковольтній

вторинній стороні. Це дозволяє уникнути передачі будь-яких чутливих аналогових сигналів зворотного зв'язку через ізоляційний бар'єр. Струмовий зворотний зв'язок, I_O , надсилається на контролер після того, як він перетворюється в цифровий сигнал, $I_O[n]$, в аналого-цифровому перетворювачі (АЦП). Потім формується цифровий сигнал помилки, $e[n]$, після порівняння з поточним опорним значенням, $I_{ref}[n]$, і надсилається до цифрового компенсатора для регулювання робочої частоти. Модуль ЗУПМ генерує сигнали керування перемикачами G_{Q1} , G_{Q2} і G_{DM} на основі рівня дімування, вхідних даних і робочої частоти. Приймач отримує світловий сигнал Y від іншого передавача, який намагається надіслати дані, і надсилає відновлені модульовані дані G_{DM} до модуля демодуляції в FPGA. Модуль цифрової демодуляції видає демодульовані дані DATA і тактовий сигнал clk .

2.2 LLC-резонансний перетворювач зі світлодіодним навантаженням

Світлодіодне навантаження, що використовується в цьому проекті, - це світильник 60*60 см, 80 Вт, як показано на рис. 2.4, з 44 лініями, що мають по 7 світлодіодів у кожній. Резонансна частота перетворювача LLC становить $f_r=500$ кГц.

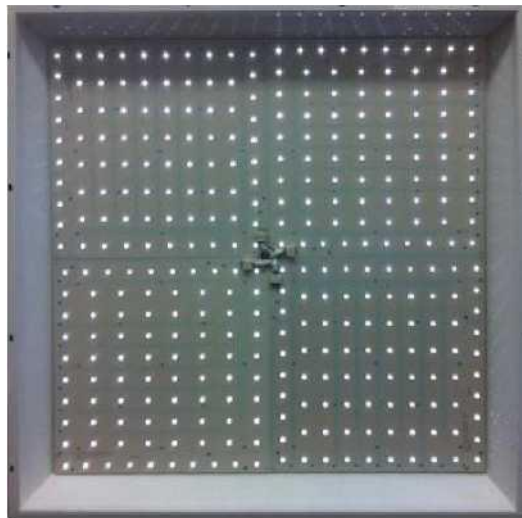


Рисунок 2.4 - Світлодіодний світильник розміром 60^60 см, потужністю 80 Вт.

Еквівалентний опір навантаження, R_L , отримано на основі прямолінійної моделі світлодіода, як показано на рис. 2.5:

$$R_L = \frac{V_{th} + R_d I_0}{I_0} \quad (2.3)$$

де V_{th} - порогова напруга світлодіода в прямолінійній моделі, R_d - малосигнальний опір світлодіода і I_0 - прямий струм.

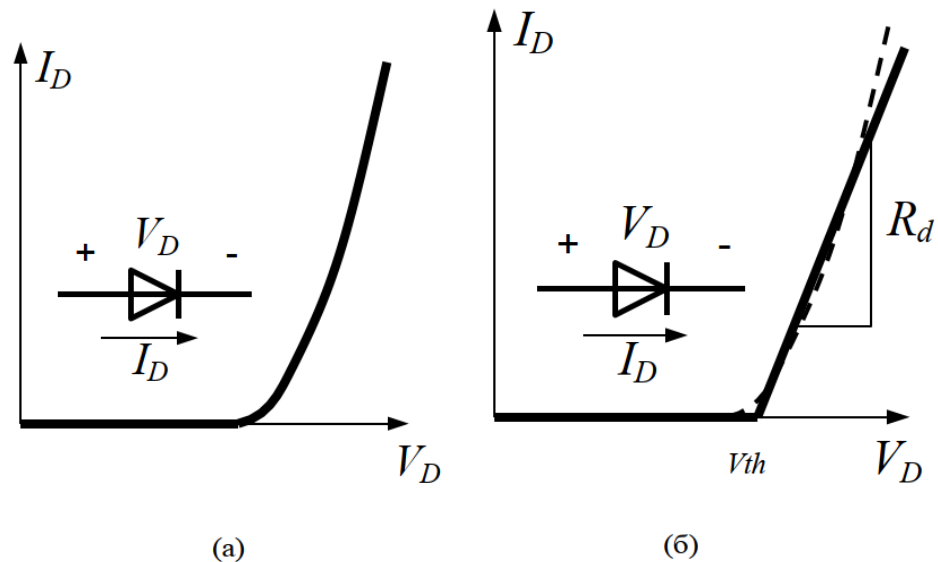


Рисунок 2.5 – Графіки (а) ВАХ характеристика світлодіода. (б) прямолінійна модель ВАХ характеристики світлодіода.

У цій роботі використовуються наступні значення: $V_{th}=17,85$ В, $R_d=1,33$ Ом, $I_0 = 3,5$ А, $N = 9$. Коефіцієнт перетворення постійної напруги в стаціонарному режимі перетворювача LLC в цьому проекті показано на рис. 2.6. Зауважте, що крива, показана на рис. 2.6, дійсна лише для повного струму на виході. До того, як прямий струм досягне 3,5 А, еквівалентний опір навантаження, R_L , є вищим завдяки прямолінійній моделі, що вказує на значно вищий коефіцієнт перетворення постійної напруги. Під час запуску, до того, як V_o досягне V_{th} , I_0 майже дорівнює 0, а R_L майже нескінченний, що означає фактор якості $Q \approx 0$. З (2.2), M_V для низької вхідної напруги і низької частоти комутації можна спростити як:

$$M_V = \frac{2NV_0}{V_i} = \frac{1}{1 + \frac{1}{L_n} - \frac{1}{L_n f_n^2}} \quad (2.4)$$

Це означає, що вихідна напруга, V_o , може досягти V_{th} за короткий час, порівняно з перетворювачем LLC з резистивним навантаженням.

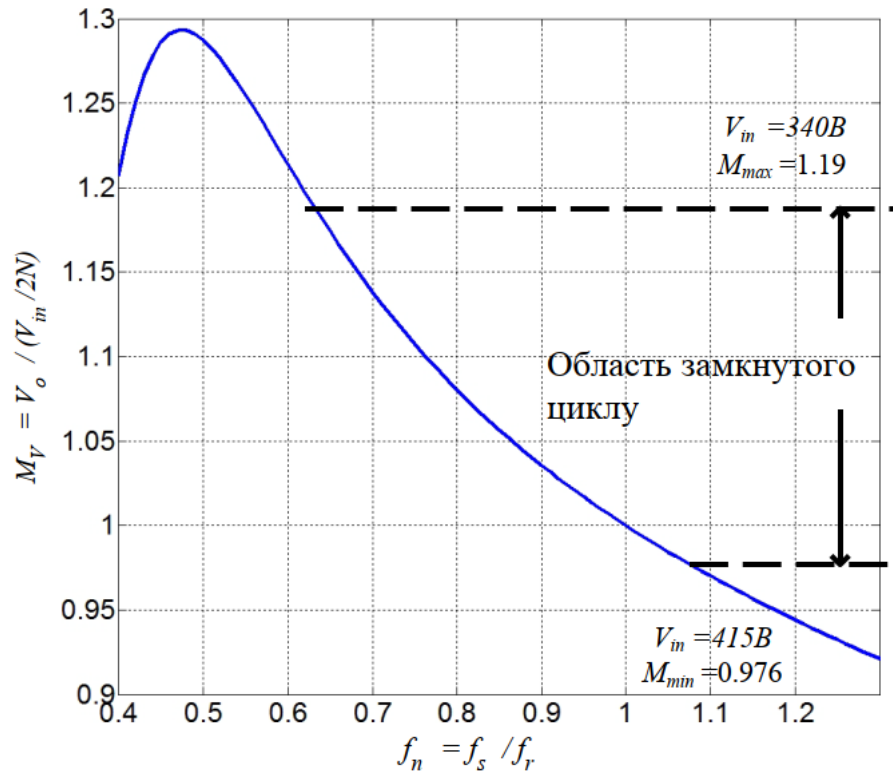


Рисунок 2.6 - Коефіцієнт перетворення постійної напруги перетворювача LLC (фактор якості $Q = 0,388$).

В освітлювальних приладах краще використовувати світлодіоди з постійним струмом для отримання постійної інтенсивності світла. Крім того, постійний струм є більш важливим у цій роботі, оскільки дані демодулюються з цифровомодульованого джерела світла. Тому якість світлового сигналу має значний вплив на відновлені дані, іншими словами, на коефіцієнт бітових помилок (КБП) системи. У цьому випадку необхідно працювати перетворювач на виході постійного струму і проектувати його на основі коефіцієнта перетворення постійного струму M_i та малосигнальних характеристик світлодіодів. Отримано нормовану характеристику коефіцієнта перетворення постійного струму LLC зі світлодіодним навантаженням, яку використано для

проектування резонансного в конвертері LLC. На основі (2) і (3) можна отримати рівняння для I_0 :

$$h = Q_{LED}^2 \left(f_n - \frac{1}{f_n} \right)^2 \quad (2.5)$$

$$k = \left[1 + \frac{1}{L_n} \left(1 - \frac{1}{f_n^2} \right) \right]^2 \quad (2.6)$$

$$\lambda = \frac{V_i}{2NV_{th}} \quad (2.7)$$

де Q_{LED} визначається наступним чином з використанням динамічного опору світлодіодного навантаження, R_d :

$$Q_{LED} = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{\frac{8N^2}{\pi^2} R_d} \quad (2.8)$$

Це дає вихідний струм

$$I_0 = \frac{V_{th}}{R_d} \cdot \frac{-k + \sqrt{k^2 - (k+h)(k-\lambda^2)}}{k+h} \quad (2.9)$$

Струм еталонного світлодіода, I_{ref} , становить

$$I_{ref} = \frac{V_{th}}{R_d} (\lambda_{V_i=400B} - 1) \quad (2.10)$$

Тоді коефіцієнт підсилення за струмом перетворювача LLC можна нормалізувати до I_{ref} як:

$$M_i = \frac{I_0}{I_{ref}} = \frac{1}{\lambda_{V_i=400B} - 1} \cdot \frac{-k + \sqrt{k^2 - (k+h)(k-\lambda^2)}}{k+h} \quad (2.11)$$

Сталий коефіцієнт перетворення постійного струму для перетворювача наведено на рис. 2.7. Він допомагає перевірити конструкцію резонансної ємності (фактор якості $Q = 0,388$, $L_r \approx 7$) і встановлює замкнутий діапазон робочих частот перетворювача на основі кривої розрахованої максимальної та мінімальної вхідної напруги, як показано на рис. 2.6. При зміні вхідної напруги, U_i , робоча частота, f_s , також підлаштовується до робочої точки $M_i = 1$, де вихідний струм I_0 дорівнює I_r .

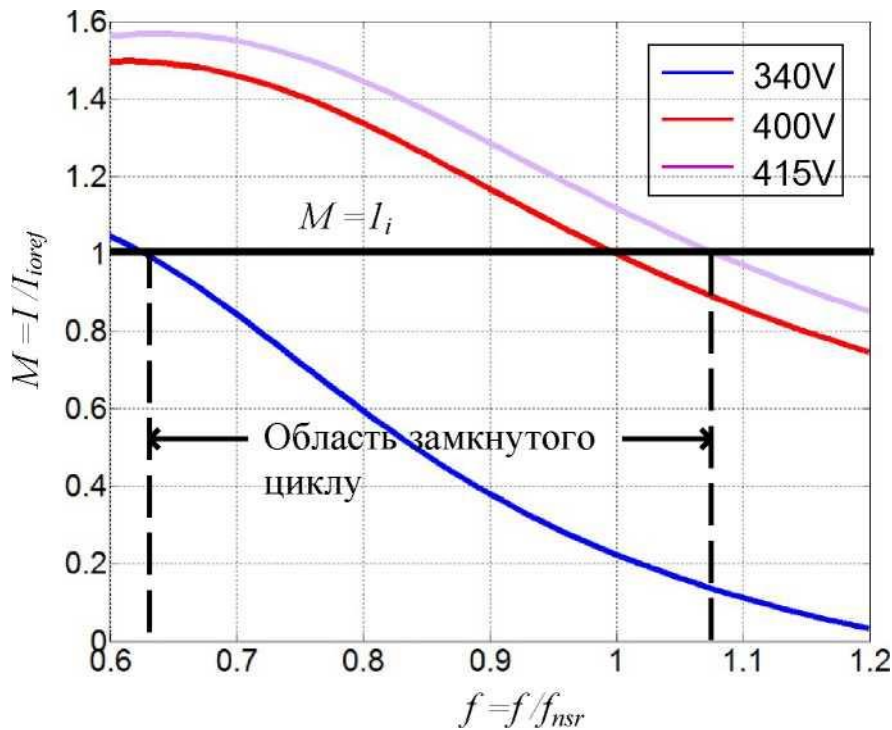


Рисунок 2.7 - Коефіцієнт перетворення постійного струму перетворювача LLC у сталому режимі.

2.3 Аналіз втрат потужності перетворювача

Завдяки характеристикам м'якого перемикання перетворювача LLC, втрати потужності при перемиканні значно зменшуються в порівнянні з напівмостовим DC-DC перетворювачем з жорстким перемиканням. Перемикачі на первинній стороні можуть досягти ПНН, коли вихідний конденсатор MOSFET розряджається під час неробочого часу, а низький струм вмикання та вимикання також застосовується для перемикача на високій та низькій стороні, Q_1 та Q_2 . Важко усунути втрати провідності випрямляючих діодів на вторинній стороні, але ПНС дозволяє уникнути проблеми зворотного відновлення. Існують також втрати в магнітних компонентах і втрати провідності в еквівалентному послідовному опорі (ESR) конденсаторів, і датчику струму. Вибрані компоненти наведені в таблиці. 2.1.

Домінуючі втрати потужності показані в табл. 2.2, а також на рис. 2.8. Втрати розраховано Для $f_s = 500$ кГц, $U_{in} = 400$ В, $U_{GS} = 10$ В, $T_j = 70$ С°

Сердечник трансформатора не має технічного паспорту, тому втрати в сердечнику трансформатора в табл. 2.2 оцінені на основі паспортних даних

іншого подібного осердя. Втрати через ESR керамічних конденсаторів та інші паразитні опори є незначними порівняно з основними втратами, розглянутими вище. Компоненти вибрані на основі принципу мінімізації втрат потужності. Понад 40% втрат потужності припадає на вторинний випрямляючий діод, який можна покращити, використовуючи синхронний випрямляч.

Таблиця 2.1 - Компоненти перетворювача LLC

Компонент	Назва	Параметри
Первинний бічний MOSFET	AOD4S60	600 В, 4 А, $R_{on} = 1,5 \text{ Ом}$, $t_f = 12 \text{ нс}$ $C_{LOSS} = 21 \text{ пФ}$
Вторинний бічний діод	STPS5L60S	60 В, 5А, $V_F = 0,53 \text{ В}$
Перемикач освітлення	AOD4180	80 В, $R_{on} = 11 \text{ мОм}$,
Резистор для вимірювання струму		30 мОм
Сердечник трансформатора	EE32/16/9 - 3F35	Н/Д
Резонансний сердечник індуктора	PQ26/25 - 3F35	Н/Д

Таблиця 2.2: Основні втрати електроенергії

Компонент	Втрати (Вт)
Втрати при перемиканні на первинній стороні MOSFET	0,73 (втрати при перемиканні)
Втрати провідності на первинній стороні MOSFET	0.28
Втрати провідності вторинної сторони діода	1.46
Втрати провідності диммерного перемикача	0.135
Втрати провідності резистора для вимірювання струму	0.368
Втрати в сердечнику індуктора	0.28
Втрати в осерді трансформатора	0.13

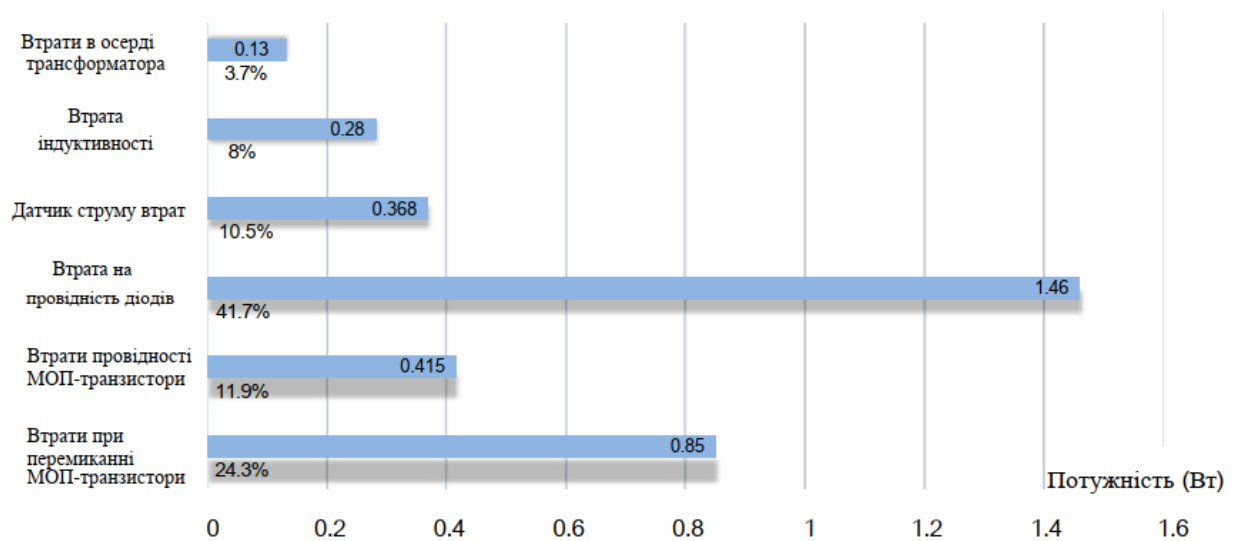


Рисунок 2.8 - Порівняння втрат потужності в перетворювачі LLC при $U_{in}=400$ В з повним навантаженням (100% дімування).

2.4 Імпульсний режим LLC резонансного перетворювача реалізований ЗУПМ

У цій роботі застосовано ШІМ-діммінг через низький колірний зсув і, що більш важливо, потребу у високошвидкісній модуляції для ЗВД. Частота димірування зазвичай встановлюється на рівні близько 200 Гц, що виходить за межі пропускну здатності людського ока. Але в цій роботі частота діммінгів, яка також є частотою імпульсів, f_{DM} , становить 1/10 частоти перемикання перетворювача, f_s , щоб забезпечити 9 рівнів діммінгів і розумну швидкість передачі даних 50 кбіт/с. Швидкість передачі даних 50 кбіт/с є більш ніж достатньою для застосування сенсорного вузла ІОМ.

Для резонансного перетворювача LLC резонансний струм на вторинній стороні, I_{sec} , досягає нуля в кінці кожного циклу перемикання, що робить імпульсний перетворювач LLC ідеальним кандидатом для драйверів світлодіодів з можливістю регулювання яскравості. Запропонована архітектура показана на рис. 2.3. Вимикач, який вмикається першим, повинен вимикатися останнім, щоб мінімізувати втрати потужності. Було запропоновано оптимізувати час увімкнення першого імпульсу, щоб уникнути зменшення струму в резонансному резервуарі. Узгодження сигналу затемнення G_{DM} і початку імпульсу, як показано на рис. 2.9, не є оптимальним з точки зору мінімізації коливань вихідного струму. Еквівалентна схема перетворювача при

початковому стані показана на рис. 2.10, при цьому струм намагнічування I_M починається з 0. Всі три складові L_r , C_r і L_M утворюють резонансний контур і під час першого імпульсу струм на вторинну сторону не передається. Тому, якщо в цей момент увімкнений диммер Q_{DM} , весь вихідний струм забезпечується вихідним конденсатором C_o і виникає долина у вихідній напрузі через розряд, що призводить до великих пульсацій вихідного струму як V_o і I_o показаних на рис. 2.9.

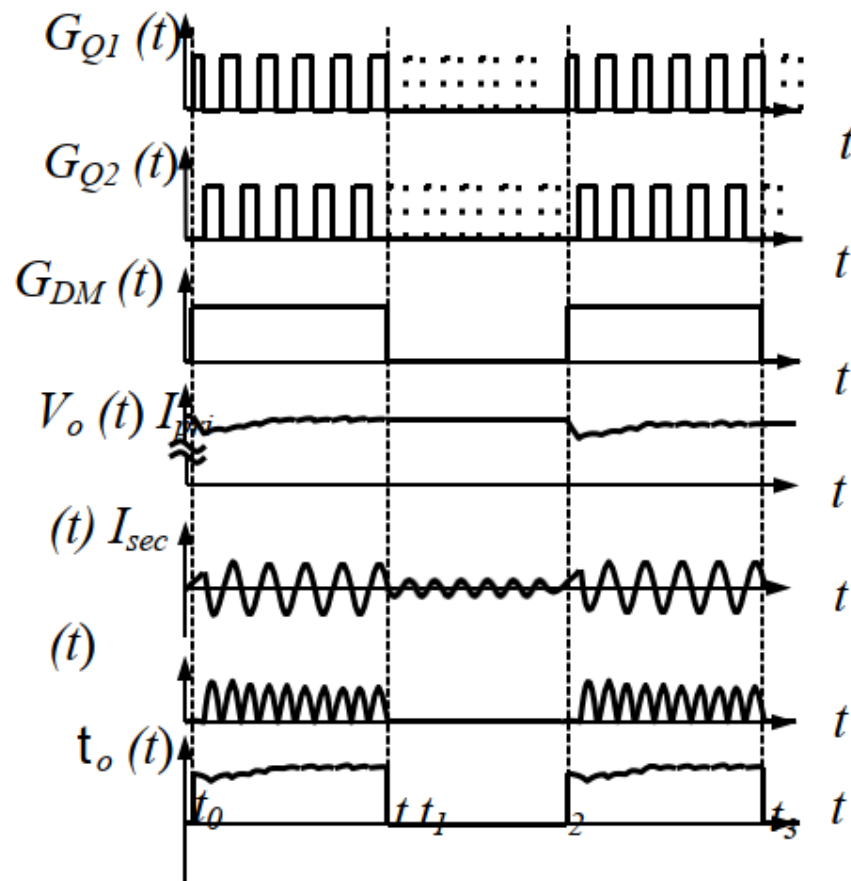


Рисунок 2.9 - Форми ключових сигналів в імпульсному режимі LLC перетворювача без попередньої оптимізації ширини імпульсу та затемнення сигналу.

В ідеалі, подача енергії від первинної сторони до світлодіодного навантаження повинна бути строго синхронізована, щоб мінімізувати розмір компонентів накопичувача енергії, C_o в даному випадку.

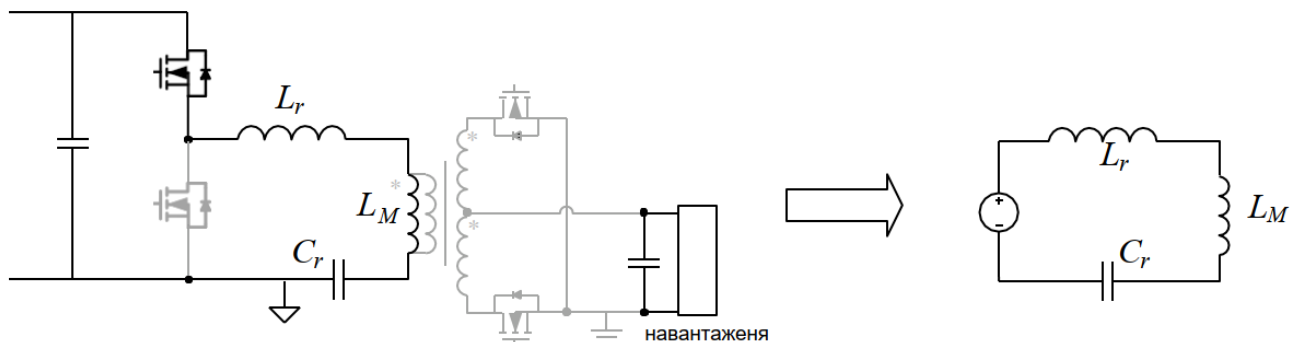
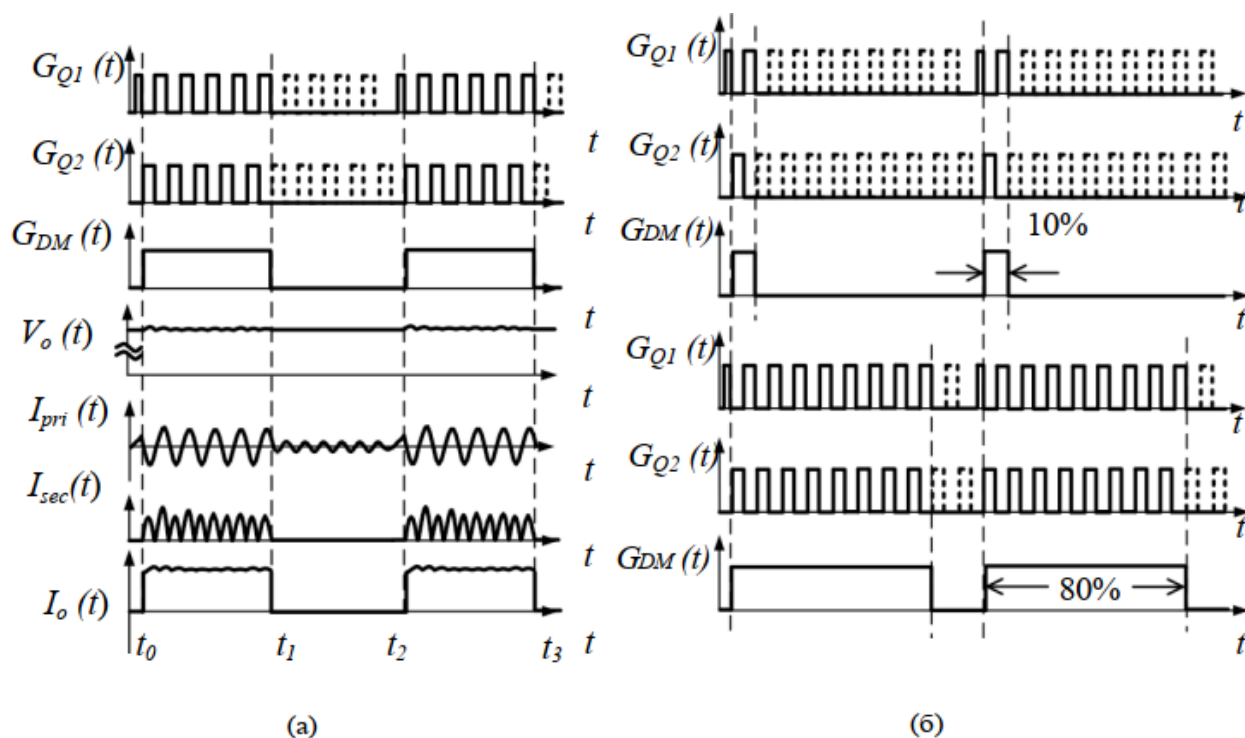


Рисунок 2.10 - Еквівалентна схема на початку імпульсу.

Отже, диммер слід вмикати на початку другого імпульсу, коли на вторинній стороні починає з'являтися випрямлений струм I_{Sec} . Ідеальні осцилограми з оптимізованим диммірувальним сигналом показані на рис. 2.11(а).

На рис. 2.11(б) показано, як досягти різного рівня димування, а на рис. 2.11(с) - реалізацію ЗУПМ. Заштрихованою лінією показано сигнал стробіювання, коли перетворювач не працює в пакетному режимі, він використовується для відображення часу пакетів. Хоча конвертер розрахований на роботу в діапазоні f_r , контур регулювання струму призводить до того, що на практиці f_s повільно змінюється через коливання напруги в мережі, а це означає, що швидкість передачі даних також змінюється відповідно до цього.



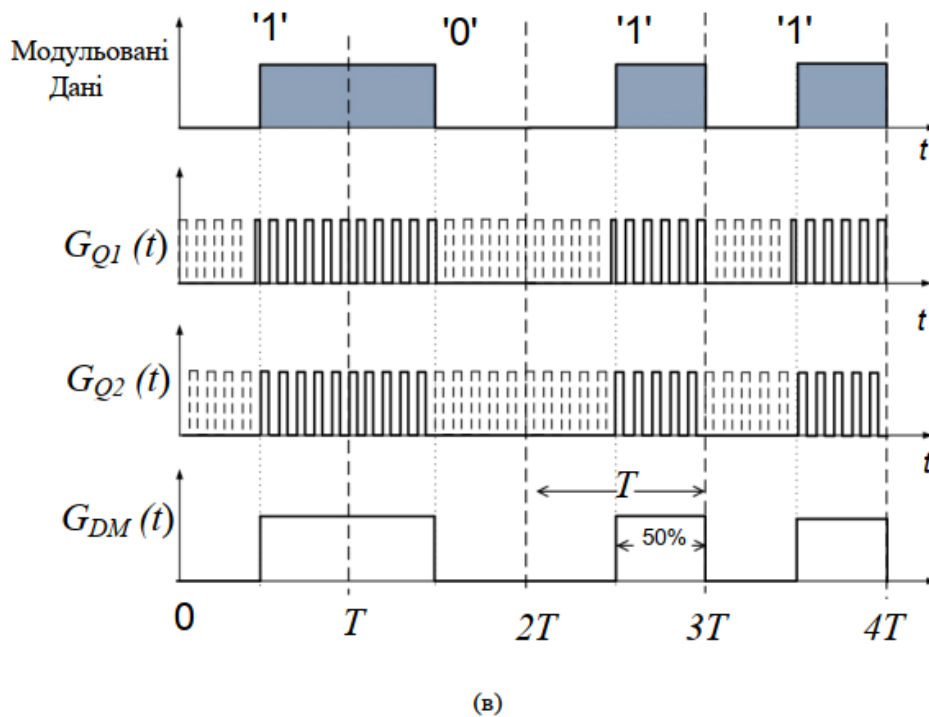


Рисунок 2.11 - (а) Форми ключових сигналів в імпульсному режимі LLC-перетворювача з оптимізацією першої ширини імпульсу та диммінгового сигналу. (б) Сплесковий режим для різних рівнів димування. (в) Реалізація ЗУПМ в диміруванні світлодіодів.

У стрибкоподібному режимі LLC перетворювача резонансний струм зменшується крок за кроком під час стрибка і ніколи не фіксується в потрібній робочій точці. Струм стискання призводить до великої варіації випрямленого струму на вторинній стороні, що призводить до великої варіації вихідної напруги V_o та струму I_o . Хоча метод може зменшити зменшення резонансного струму I_{Pri} і встановити його до сталого стану за мінімальний час, одним з обмежень є те, що намагнічуючий струм не може бути встановлений до сталого стану протягом перших двох імпульсів. Тому випрямлений струм на вторинній стороні не має однакової амплітуди. Одним із способів вирішення цієї проблеми є зменшення тривалості другого імпульсу, щоб струм намагнічування не падав занадто низько після другого імпульсу, що призводить до незбалансованого випрямленого струму у вторинній обмотці.

Від t_0 - t_1 перетворювач забезпечує постійний вихідний струм для світлодіодного навантаження. Цифровий компенсатор регулює вихідний струм шляхом адаптації f_s . Коли вимикач димування, Q_{DM} , вимкнений, стан

цифрового компенсатора фіксується до тих пір, поки Q_{DM} знову не замкнеться. Коли Q_{DM} і світлодіоди вимкнені з $t_1 - t_2$, вихідна напруга V_o , залишається майже постійною, оскільки навантаження відключено. Для того, щоб досягти розумної швидкості передачі даних, f_{DM} зміщується до 1/10 резонансної частоти LLC, f_r , що дозволяє регулювати яскравість в діапазоні від 10% до 90%, відповідно до цілого числа резонансних циклів в пачці. Подальше збільшення частоти дімування ускладнене через обмеження паразитної індуктивності вихідного дроту, ємності світлодіодного переходу і робочої частоти основного перетворювача.

2.5 Аналіз пульсацій вихідного струму та оптимізація вихідного конденсатора

Вихідний конденсатор завжди є основним слабким місцем перетворювача протягом усього терміну його служби. Правильна конструкція вихідного конденсатора може зменшити розмір вихідної ємності. Якщо вихідна ємність менше 50 мкФ, замість електролітичних конденсаторів можна використовувати керамічні конденсатори, які мають більший еквівалентний послідовний опір (ESR) і менший термін служби. У цьому підрозділі наведено аналіз пульсацій вихідного струму. У наступному аналізі передбачається, що перетворювач LLC є ідеальним (тобто без ESR, чутливих резисторів або паразитних елементів) і працює в резонансі, $f_s = f_r$. З літератури ми знаємо, що середньоквадратичний струм на стороні первинної обмотки I_{rms} може бути виражений як:

$$I_{rms} = \frac{1}{4\sqrt{2}} \frac{V_o}{NR_L} \sqrt{\frac{n^4 R_L^2 T_r^2}{L_m^2} + 4\pi^2} \quad (2.12)$$

$$= \frac{1}{4\sqrt{2}} \sqrt{\frac{n^4 V_o^2}{f_r^2 L_m^2} + 4\pi^2 \left(\frac{i_{load}}{n} \right)^2} \quad (2.13)$$

Резонансний струм первинної сторони I_{Pri} є:

$$i_{Pri} = \sqrt{2} I_{rms} \sin(2\pi f_r t + \phi) \quad (2.14)$$

в той час як ϕ представляє різницю фаз між резонансним струмом, i_{pri} , і струмом намагнічування, i_M . Для розрахунку пульсації вихідної напруги, ΔV_o , нам потрібно знати загальний заряд, Q_o , який інjektується на вихід в кожному циклі. Як показано на рис. 2.12, ми можемо легко оцінити Q_o без обчислення точного струму на вторинній стороні, i_{sec}

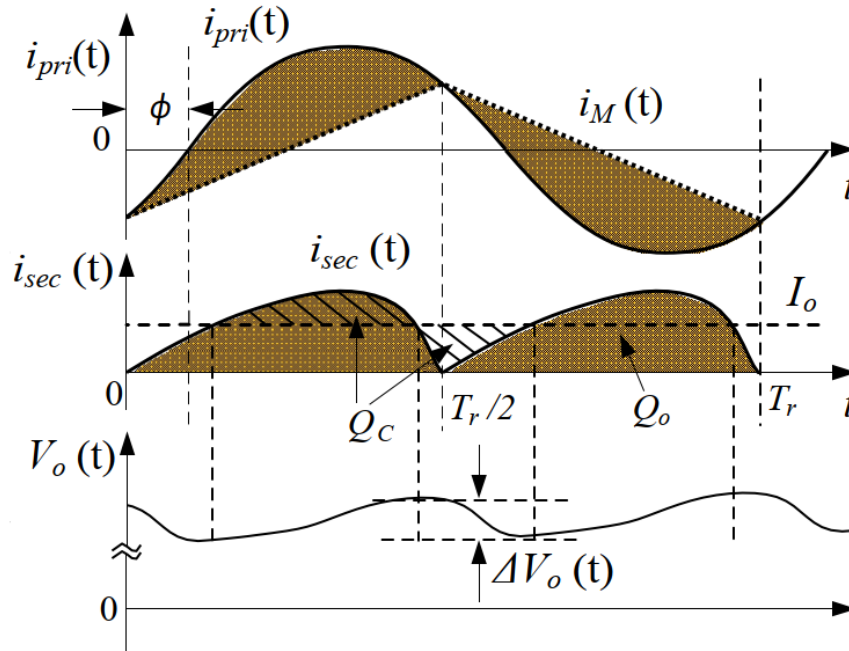


Рисунок 2.12 - Детальна осцилограма струму та вихідної напруги в перетворювачі LLC.

Виходячи з балансу нарахувань для C_o , маємо

$$Q_o = I_o \frac{T_r}{2} \quad (2.15)$$

Далі припустимо, що струм на вторинній стороні є випрямленою синусоїдою, що дає:

$$Q_c = 0.21Q_o \quad (2.16)$$

Тоді пульсація вихідної напруги, ΔV_o , може бути отримана за формулою:

$$\Delta V_0 = \frac{Q_c}{Q_0} \quad (2.17)$$

Велика вихідна ємність, C_0 , є одним з основних обмежень для терміну служби системи. Зазвичай вибирають танталові та алюмінієві електролітичні конденсатори через високу щільність і низьку вартість, але вони обидва мають відносно короткий термін служби і великий еквівалентний послідовний опір (ESR). Щоб мінімізувати C_0 , сигнал димування синхронізується зі спалахом, так що енергія спалаху безпосередньо передається на світлодіодне навантаження. Для світлодіодного освітлення прийнятні відносно великі пульсації вихідної напруги, якщо пульсації вихідного струму знаходяться в межах бажаного діапазону.

Припускаючи, що пульсація вихідного струму 10%, ΔI_0 є прийнятною, що відповідає 0,3 В ΔV_0 , враховуючи всі інші фактори, такі як ESR конденсатора, ΔV_0 може бути оцінена як 100 мВ. З (2.14) - (2.16) можна отримати ідеальне значення вихідного конденсатора

$$C_0 = \frac{Q_c}{\Delta V_0} = \frac{0.21 I_0 T_r}{\Delta V_0 2} = 7.82 \text{ мкФ} \quad (2.18)$$

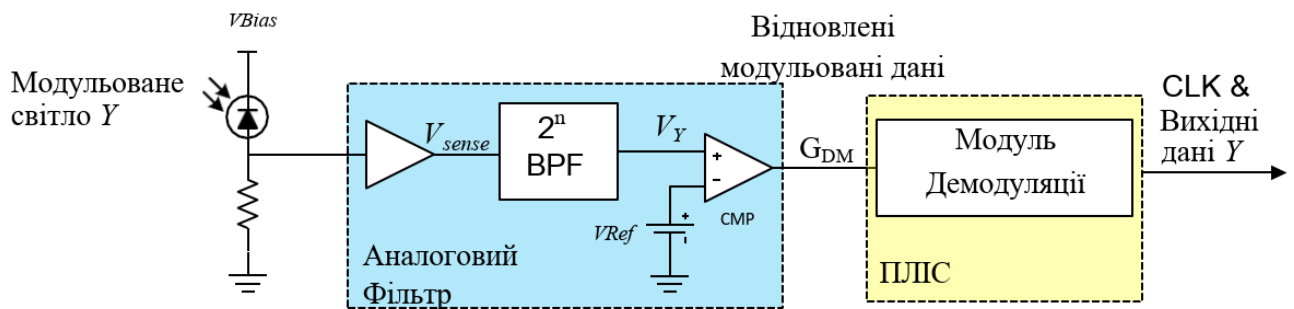
Фактичне значення вихідного конденсатора може відрізнятися від розрахованого через різний опір проводів і паразитний опір друкованої плати. Як показано в розрахунку, для світлодіодного модуля потужністю 80 Вт вихідний конденсатор становить лише близько 10 мкФ, що вказує на те, що ми можемо використовувати керамічні конденсатори для зменшення ESR і забезпечення більш тривалого терміну служби системи.

2.6 Конструкція приймача сигналу видимого світла (ЗВД).

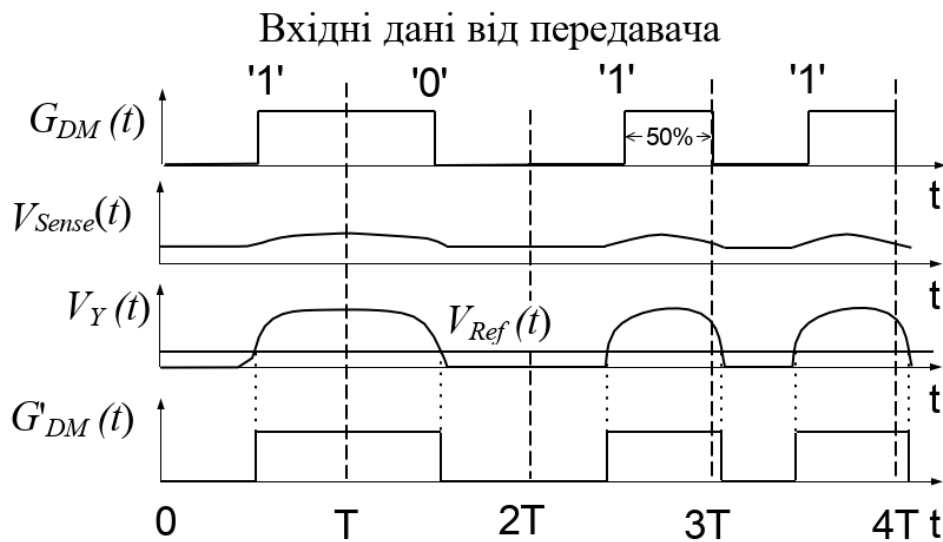
2.6.1 Фотодіод і аналоговий фільтр

Передня частина приймача ЗВД базується на недорогих аналогових компонентах, як показано на рис. 2.13(а). Припустимо, що світловий сигнал від іншого передавача надходить на фотодіод, і фотодіод перетворює світловий

сигнал в аналоговий. Аналоговий сигнал спочатку підсилюється для отримання V_{sense} , а потім смуговий фільтр і порівнюється з константою напруга для відновлення сигналу DM від сигналу затемнення з боку передавача, дімування, G_{DM} GDM . Ідеальні форми сигналу приймача показані на рис. 2.13(б). Хоча конвертер розрахований на роботу в діапазоні f_r , контур регулювання струму призводить до того, що на практиці f_s змінюється повільно, а це означає, що швидкість передачі даних також змінюється відповідно.



(a)



(б)

Рисунок 2.13 - (а) Архітектура приймача. (б) Ідеальна форма сигналу для схеми приймача.

Смуговий фільтр складається з фільтра високих частот Саллен-Кі другого порядку та фільтра низьких частот Саллен-Кі другого порядку, як показано на рис. 2.14. Смуга пропускання становить від 1 кГц до 500 кГц, що усуває низькочастотні компоненти постійного струму і 120 Гц, які вносяться денним

світлом та іншими люмінесцентними лампами, а також дозволяє уникнути втручання будь-якого високочастотного шуму.

Фільтр високих частот слід ставити на першому каскаді, щоб уникнути насичення сигналу за рахунок постійних складових у V_{Sense}

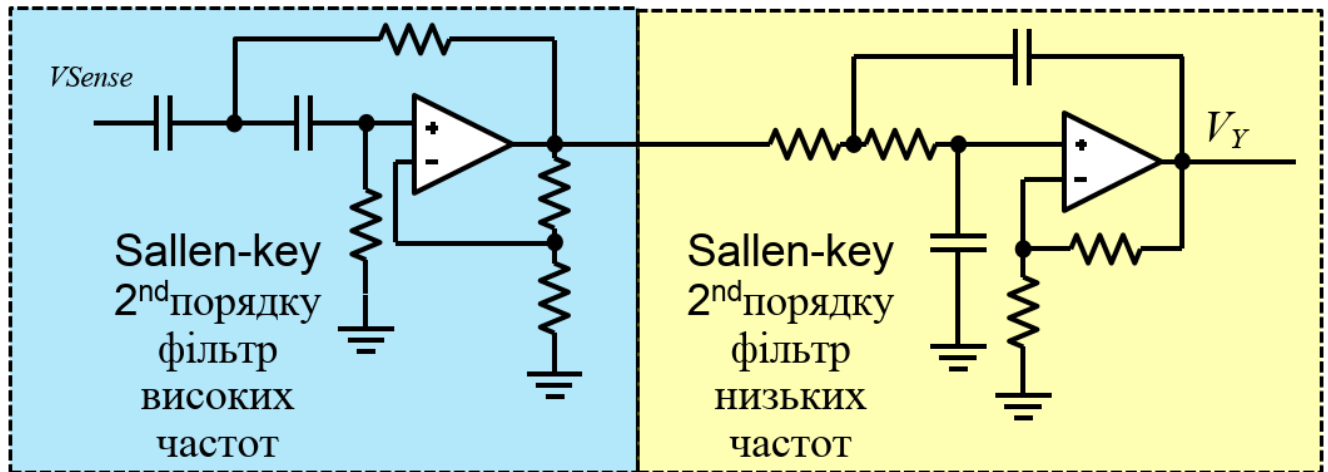


Рисунок 2.14 - Смуговий фільтр на основі фільтра високих частот Саллен-Кі 2^н порядку та фільтра низьких частот Саллен-Кі 2^н порядку.

2.6.2 Демодуляція змінної імпульсно-позиційної модуляції (ЗУПМ)

Більшість робіт, присвячених зв'язку у видимому діапазоні світлення (ЗВД), зосереджені на передавачах, без демонстрації схем демодуляції для відновлення даних. Одним з методів демодуляції синхросигналу та даних у ЗУПМ представлено в літературних джерелах, проте в них швидкість передачі даних фіксована. Природа замкненого перетворювача LLC призводить до змінної швидкості передачі даних у цьому додатку. Одним з варіантів є використання циклу із затримкою (DLL) для відновлення змінної тактової частоти передачі даних з G_{DM} на стороні приймача та вибірку даних на основі відновленого годинника, що додає складності системі.

У цій роботі пропонується простий метод демодуляції ЗУПМ-кодованого сигналу. Для схеми перемикання "високий-низький-високий (HLH)" є 8 можливих комбінацій для G_{DM} як показано на рис. 2.15. Для кожного шаблону, крім "000" і "111", ми можемо відновити певну коротку послідовність даних. Для даних "000" і "111" це можна визначити за останнім демодульованим бітом.

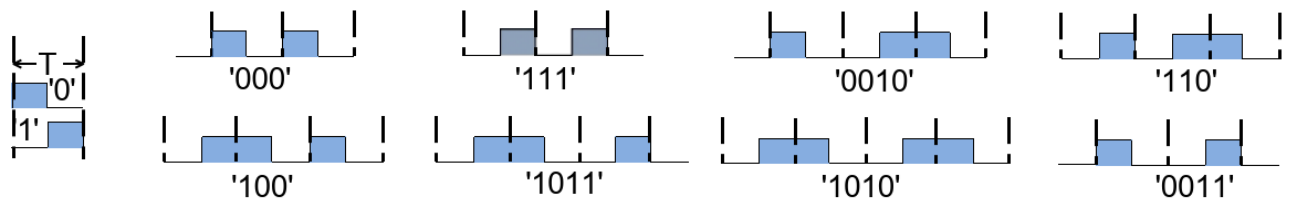


Рисунок 2.15 - Всі можливі варіанти "HLN" та відповідні дані.

Якщо останній біт "1" з попереднього шаблону "HLN", то наступні дані повинні бути "1", і навпаки. Кожного разу шаблон дає 3 або 4 біти даних, але тільки останні один або два є новими, перші два біти вже були передані з попереднього шаблону "HLN". У цьому випадку цей метод демодуляції також забезпечує характеристику самоперевірки, як показано на рис. 2.16. Кожного разу, коли шаблон "HLN" дає один або два нових біти, перші два біти повинні збігатися з останніми двома бітами попереднього шаблону, що забезпечує точність демодуляції.

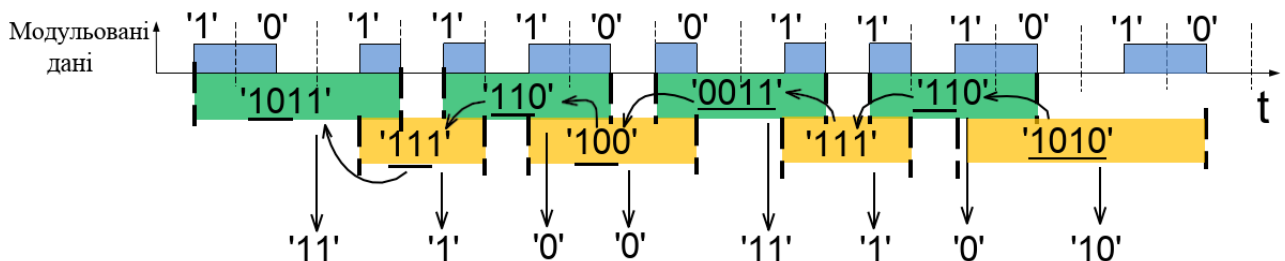


Рисунок 2.16 - Процес демодуляції та характеристики самоперевірки з використанням методу демодуляції шаблону "HLN".

Завдяки високочастотному тактовому генератору в FPGA легко визначити, чи є імпульс/долина вузьким, чи широким, поєднанням з двома вузькими імпульсами/долинами, що йдуть один за одним. Використовується внутрішній тактовий генератор 2 МГц. Якщо припустити, що система працює з рівнем дбмування 50% при швидкості передачі даних 50 кбіт/с, внутрішній тактовий генератор повинен відрховувати 20 для вузького імпульсу або долини і 40 для широкого. Однак через наявність тремтіння у відновленому сигналі G_{DM} необхідно встановити область допуску, як показано на рис. 2.17, щоб визначити тип імпульсу/долини, де s - опорний тактовий імпульс, а $count$ -

підрахована кількість високочастотних тактових імпульсів.. Тактова частота c (наприклад, 20, як згадувалося раніше) постійно оновлюється і усереднюється відповідно до підрахованої кількості count, щоб слідувати за повільною зміною швидкості передачі даних і зміною рівня димірування

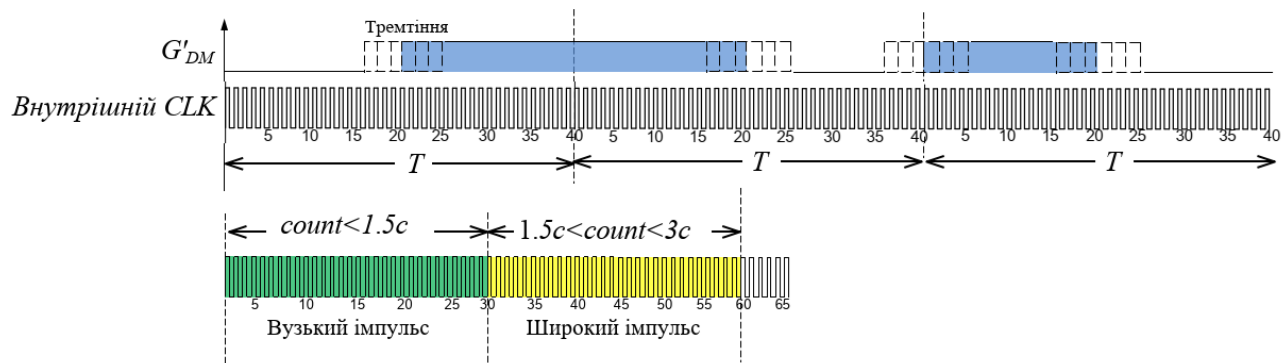


Рисунок 2.17 - Ефективна область для вузького/широкого імпульсу в методі демодуляції «HLH»

2.6 Висновки до розділу

У цьому розділі було представлено бездротову систему освітлення комунікація у видимому діапазоні світла, призначену для майбутніх "розумних будівель". Продемонстровано резонансний перетворювач постійного струму з цифровим керуванням LLC, призначений для білих світлодіодних світильників. Модуль використовує світлодіодний масив як для зовнішнього освітлення, так і для комунікації. Видимий світловий зв'язок реалізується з мінімальними додатковими витратами, завдяки роботі перетворювача LLC в імпульсному режимі, не створюючи видимих перешкод. Перетворювач працює з регульованим середнім струмом світлодіода шляхом регулювання частоти перемикавання, в той час як тривалість імпульсів регулюється для мінімізації збурень струму і мінімізації величини вихідного конденсатора. Для модуляції даних використовується модуляція положення імпульсів зі змінною частотою, яка підтримує широкий діапазон налаштувань дімування. Продемонстровано схему цифрової демодуляції, яка підтримує передачу даних зі змінною частотою.

3 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1. Моделювання резонансного LLC перетворювача з цифровим керуванням

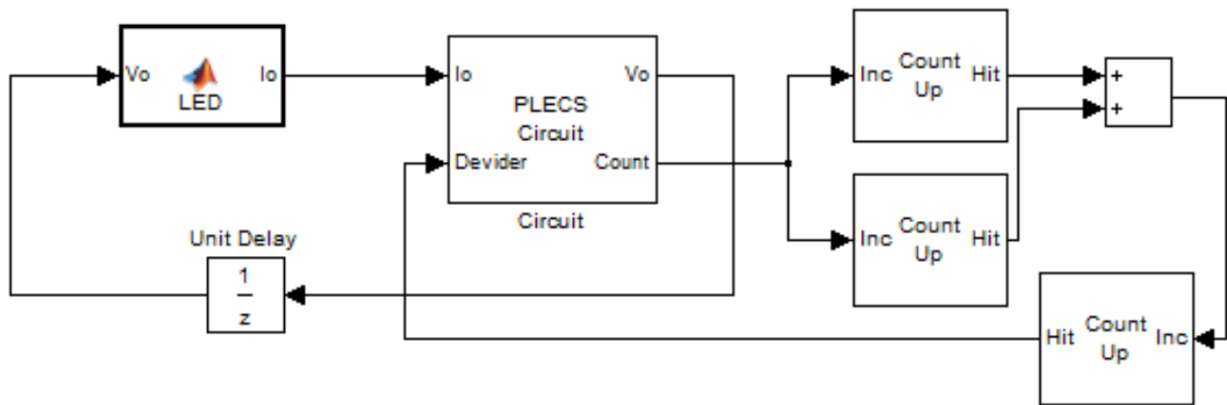
Моделювання замкненого контуру виконується в PLECS Blockset, інтегрованому з MATLAB/Simulink. Основні параметри системи наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Параметри перетворювача LLC змодельованні на базі Matlab-Simulink

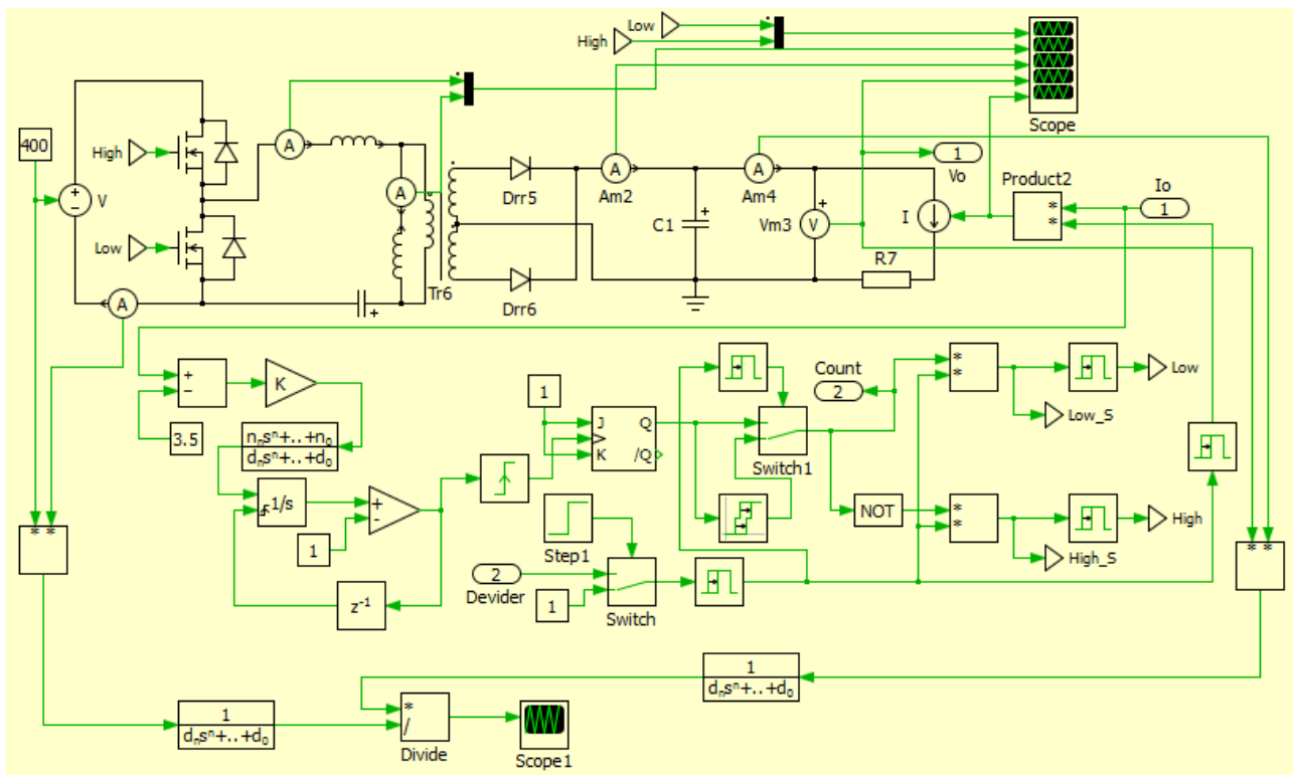
Розраховані параметри/компоненти	Параметр Значення	Одиниця
Вхідна напруга, $V_{вх}$	400	В
Вихідний струм, $I_{вих}$	3.5	А
Резонансний конденсатор, C_r	2	нФ
Резонансний індуктор, L_r	53.7	мкГн
Трансформаторна намагнічувальна котушка, L_M	332	мкГн
Вихідний конденсатор, C_o	20	мкФ

Блоки високорівневого моделювання показані на рис. 3.1(а). Для блоку світлодіодів використовується прямолінійна модель, описана в розділі 2. Блоки підрахунку використовуються для генерації спалаху. Детальна схема показана на рис. 3.1(б). Контролер базується на аналоговому управлінні, тоді як фактично перетворювач керується цифровим способом, що не викликає занепокоєння, оскільки основна увага при моделюванні приділяється не стабільності системи. Похибка вихідного струму після компенсації надсилається на інтегратор, і інтегратор скидається кожного разу, коли на

виході досягає межі, що досягається при імпульсній частотній модуляції (ІЧМ).
Всі паразитні параметри в напівпровідникових компонентах встановлюються на основі їх паспортів.



(a)

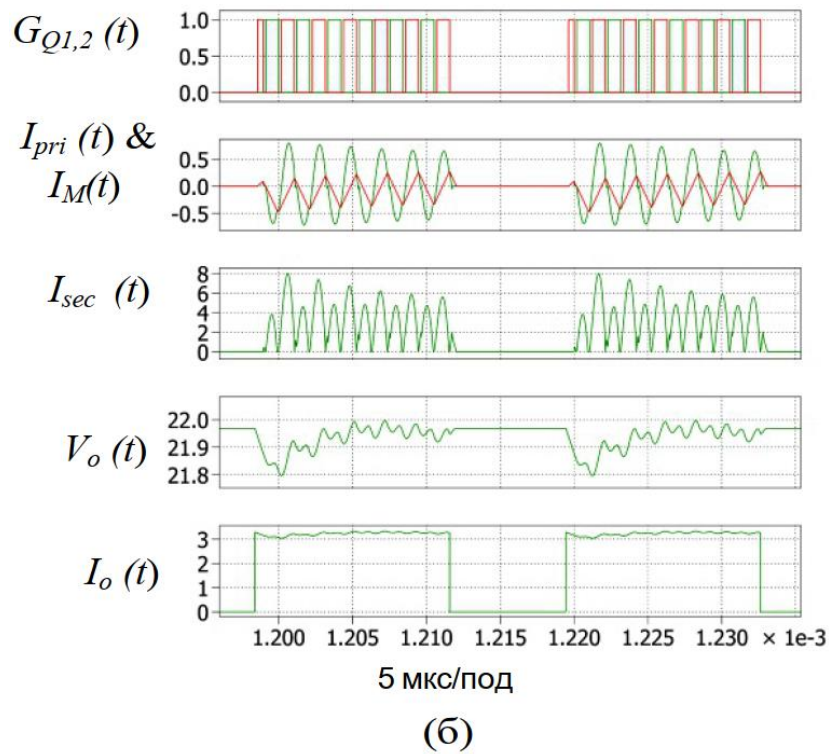
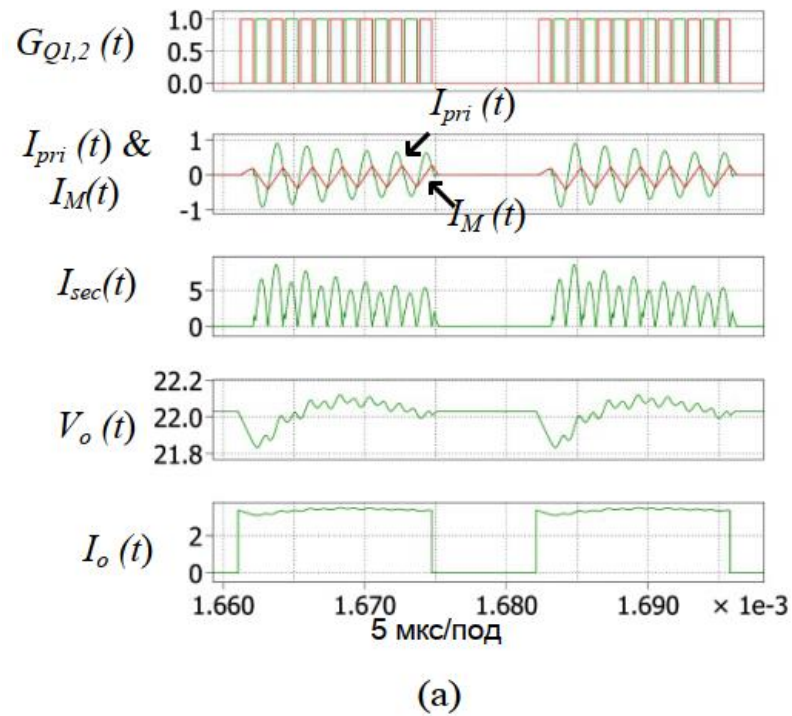


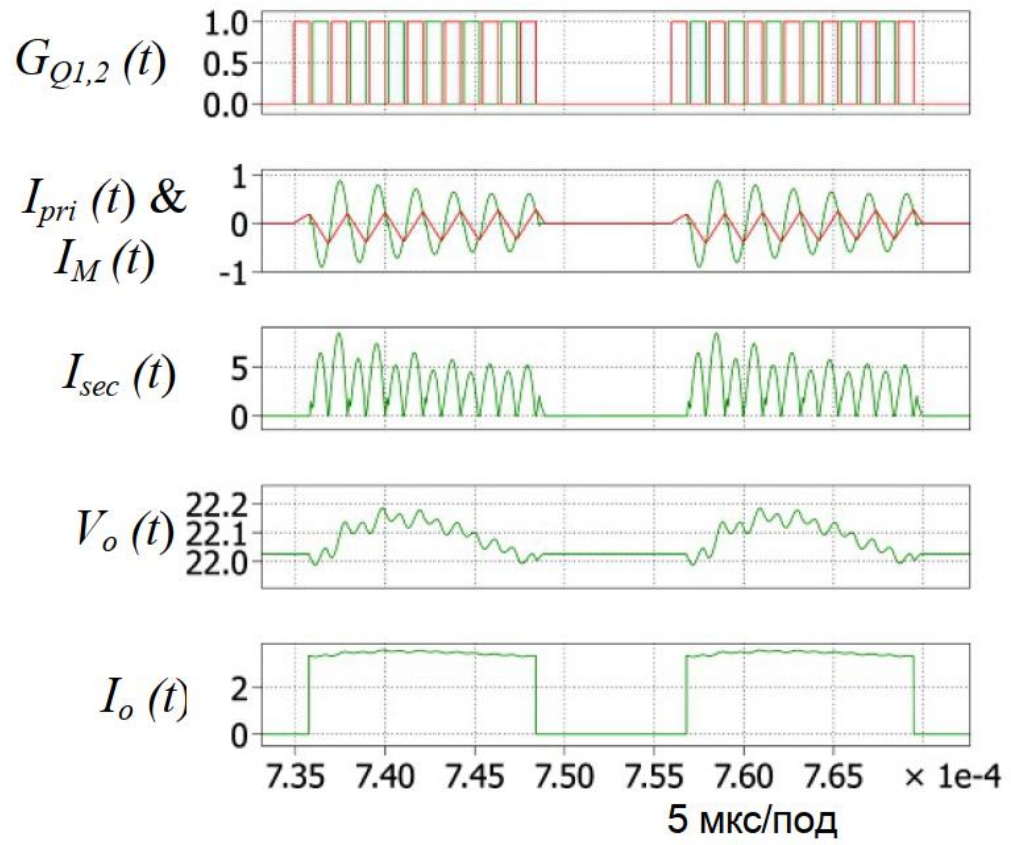
(б)

Рисунок 3.1 - (а) Блоки високорівневого моделювання. (б) Детальна схема моделювання в MATLAB/Simulink.

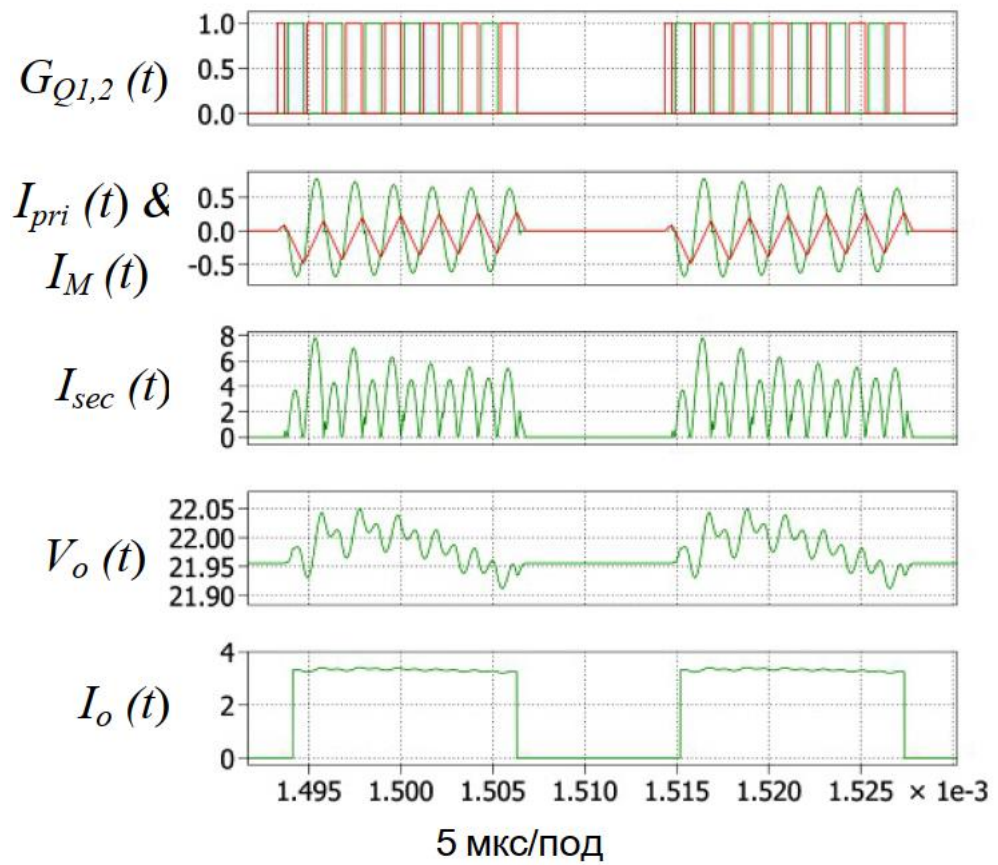
Результати моделювання для різних комбінацій синхронізації першого імпульсу та димірувального перемикача представлені на рис. 3.2. Основна

мета цього моделювання - підтвердити найкращий момент часу для першого імпульсу і сигналу димування, щоб мати мінімальні пульсації вихідної напруги і струму. На рис. 3.2(а) і (в) перший імпульс не оптимізовано, тоді як на рис. 3.2(б) і (г) використовується звужений перший імпульс. Перемикач димування вмикається разом з першим імпульсом.

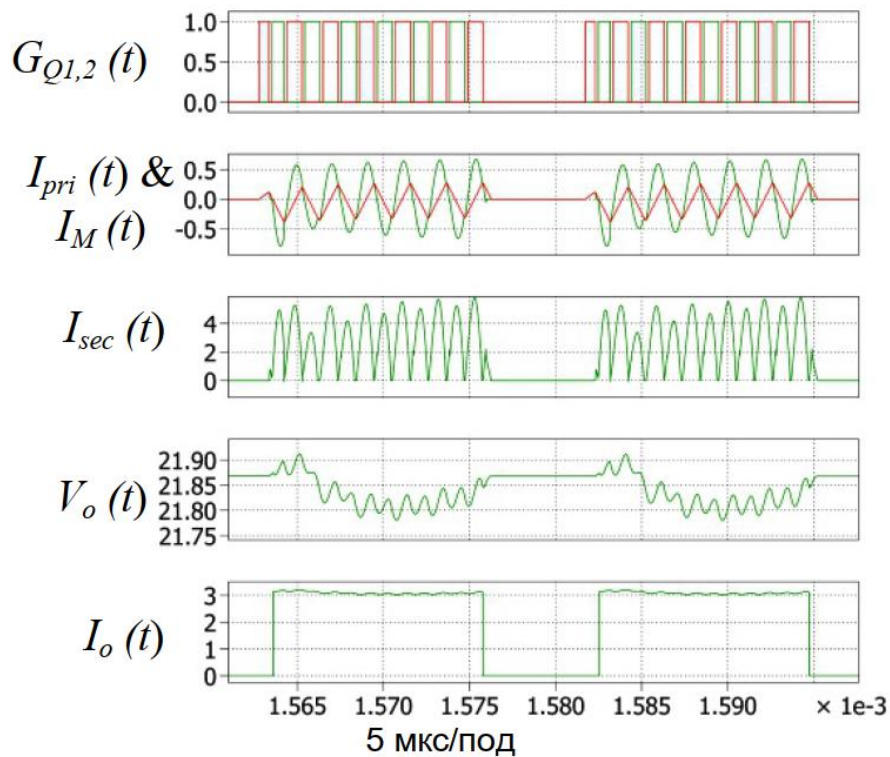




(В)



(Г)



(д)

Рисунок 3.2 - Результати моделювання для різних часових інтервалів першого імпульсу та диммірувального сигналу. (а) Неоптимізований стробируючий і затемнюючий сигнал. (б) Перший імпульс оптимізовано за шириною. (в) Оптимізовано синхронізацію диміруючого сигналу. (г) Оптимізовано як перший імпульс, так і сигнал затемнення. (д) Оптимізовано перші два імпульси і сигнал затемнення.

На рис. 3.2(а) і (б), а також на рис. 4.2(в), (г) і (д) оптимізовано час увімкнення світлорегулятора, світлорегулятор увімкнеться на початку другого імпульсу. На рис. 3.2(г) оптимізовано перші два імпульси для досягнення більш збалансованого випрямленого струму. Відповідні експериментальні результати представлені в наступному розділі. Як видно з результатів моделювання, рис. 3.2(г) і (д) дають найнижчі пульсації вихідної напруги, $\Delta V_o = 0,13$ В і пульсації струму, $\Delta I_o = 0,1$ А, тоді як рис. 3.2(д) є кращим через менший піковий струм 6 А на вторинній стороні, порівняно з 8 А на рис. 3.2(г).

З точки зору зв'язку, постійна швидкість передачі даних є кращою, оскільки вона спрощує вимоги блоку відновлення синхронізації та даних (CDR) на стороні приймача. Враховуючи, що замкнутий контур LLC перетворювача

базується на управлінні імпульсною частотною модуляцією, постійна швидкість передачі даних вимагає, щоб сигнал затемнення був асинхронним з імпульсом перетворювача. Симуляція на рис. 3.3 порівнює пульсації вихідної напруги та струму при синхронному та асинхронному сигналі димування. Найгірший випадок асинхронного сигналу димування, керованого LLC-перетворювачем, показано на рис. 3.3(б). Результати моделювання показують, що асинхронний сигнал димування призводить до 20-кратного збільшення пульсацій вихідної напруги ΔV_o та 15-кратного збільшення пульсацій вихідного струму ΔI_o , що підтверджує важливість використання синхронізованого імпульсного сигналу, а отже, і частотно-регульованого зв'язку у видимому діапазоні світла.

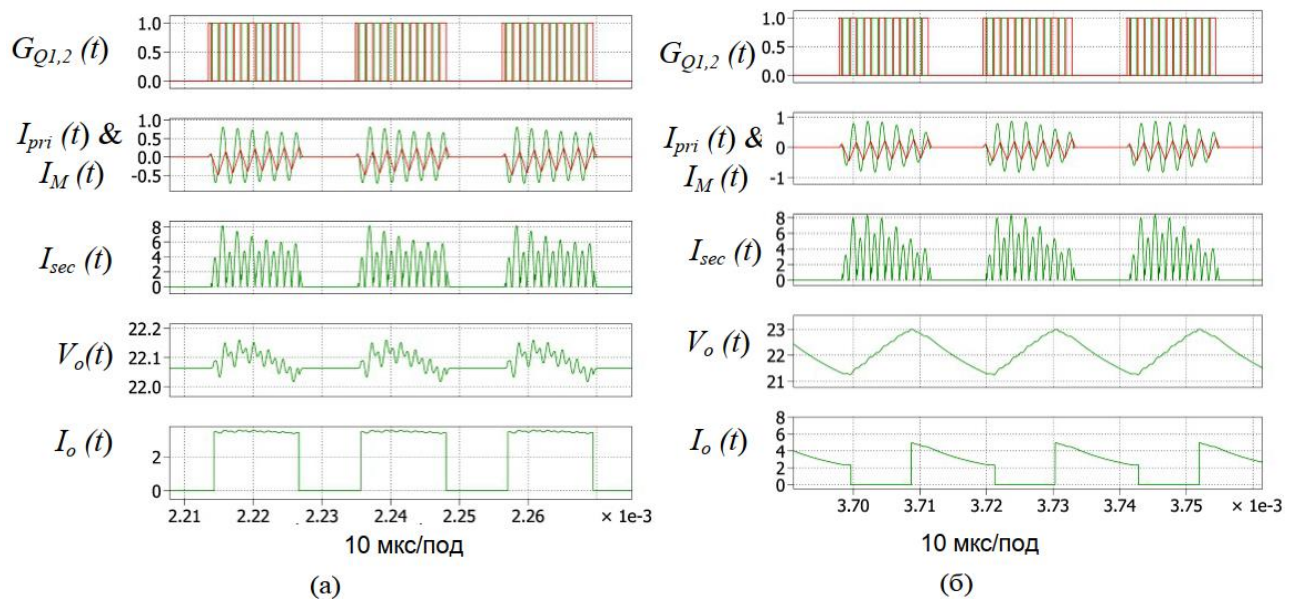


Рисунок 3.3 - (а) $C_o = 20 \mu\text{F}$, зсув синхронізації сигналу димування на 0 с, (б) $C_o = 20 \mu\text{F}$, зсув синхронізації сигналу димування на 10 мкс.

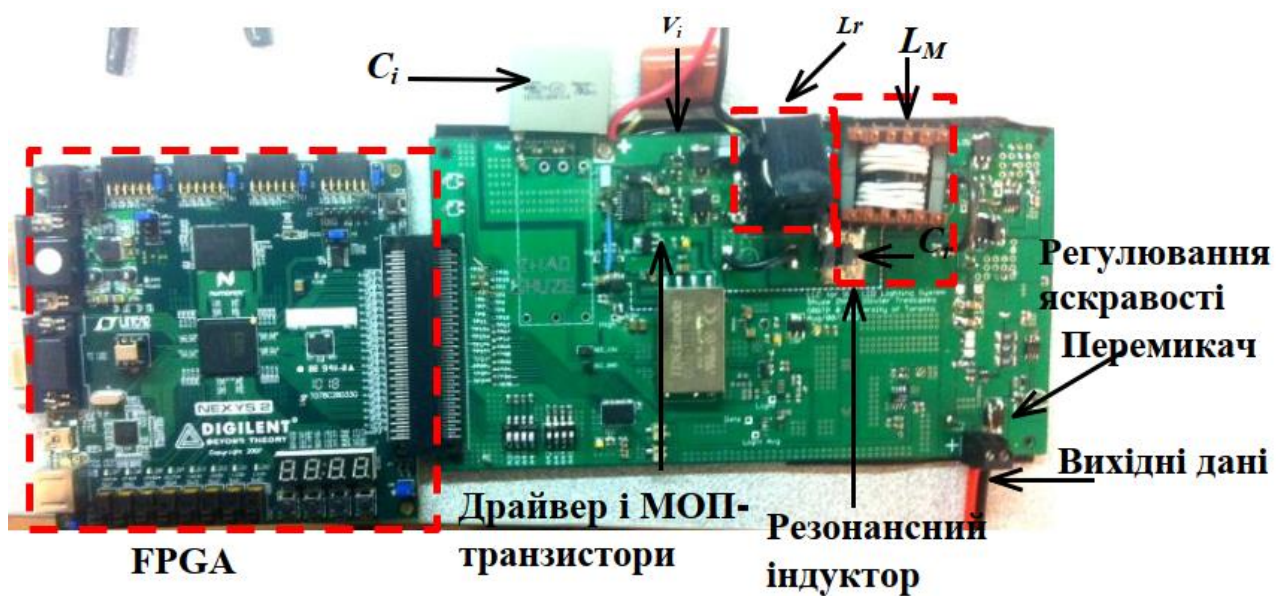
3.2 Експериментальні результати LLC перетворювача

Для перевірки запропонованої схеми LLC ЗВД було побудовано прототип ІОМ потужністю 80 Вт, показаний на рис. 2.3. Основні параметри системи наведено в табл. 3.2.

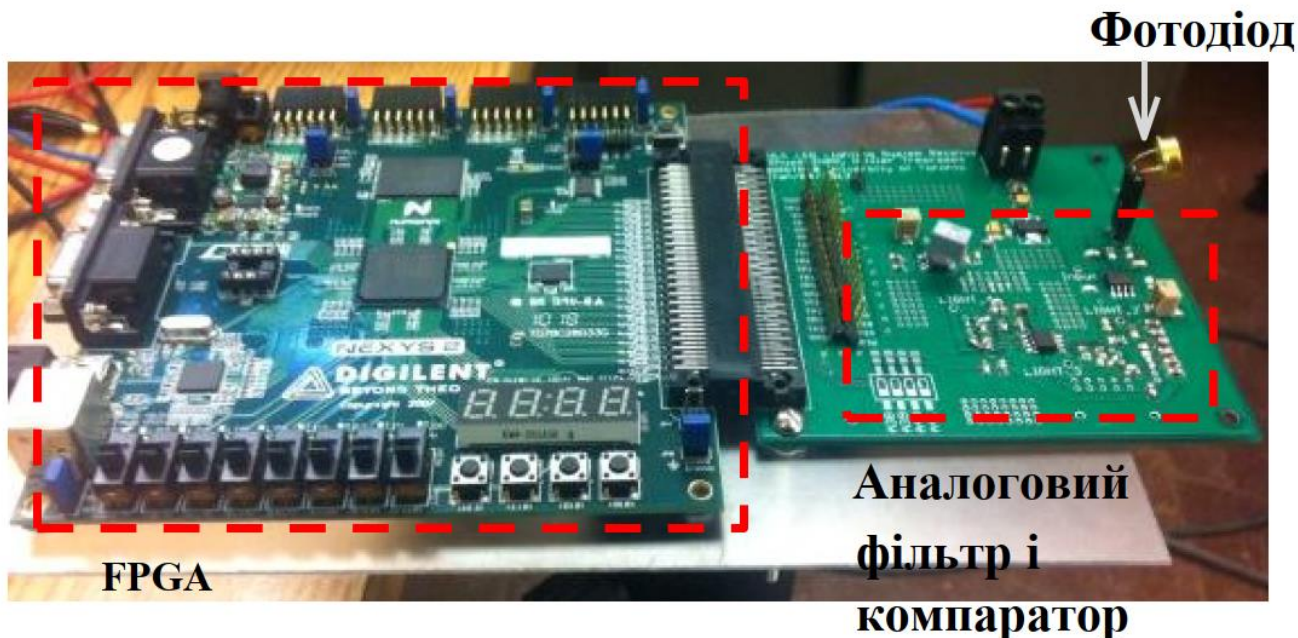
Таблиця 3.2 - Параметри резонансного LLC перетворювача

Розраховані параметри/компоненти	Значення	Одиниця
Вхідна напруга, V_i	340 - 400	В
Вихідна напруга, V_o	22,6 (номінальна)	В
Вихідний струм, I_o	3.5 (80 мА на кожному струну)	А
Резонансний конденсатор, C_r	2	нФ
Резонансний індуктор, L_{ext}	47.6	мкГн
Індуктивність витоку, L_{leak}	6.1	мкГн
Трансформаторна намагнічувальна котушка, L_M	332	мкГн
Кількість обертів, N	27:3:3	
Вихідний конденсатор, C_o	20	мкФ

Прототип має вигляд, як показано на рис. 3.4. Магнітні компоненти налаштовані для оптимізування розміру перетворювача. Цифрова компенсація для регулювання частоти і струму, управління синхронізацією і енкодер ЗВД реалізовані в цифровому контролері на базі FPGA. Прототип на основі дискретних компонентів розроблені, а плата FPGA є комерційним продуктом.



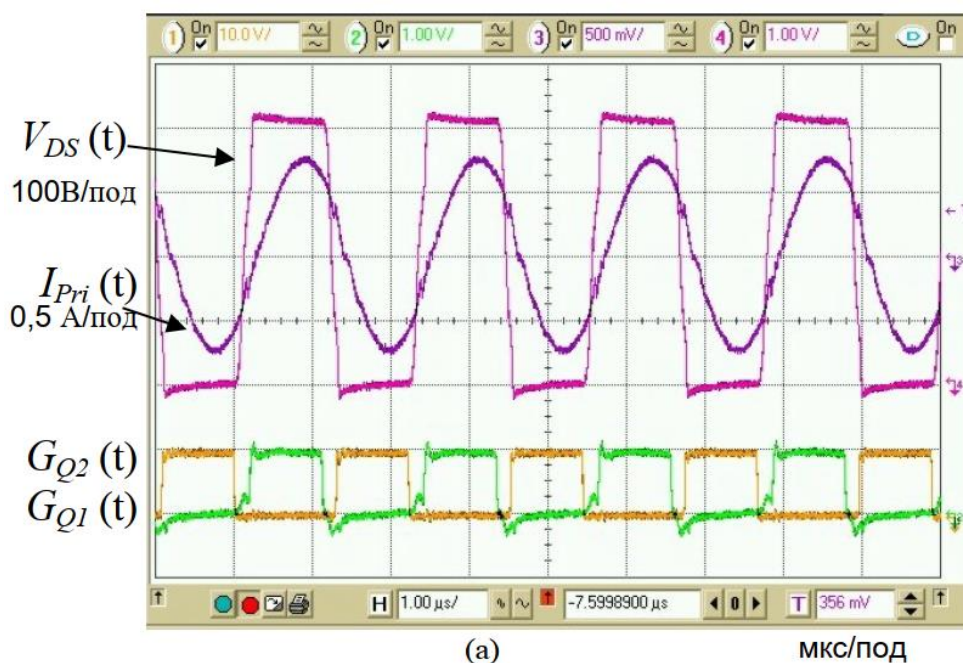
(a)



(б)

Рисунок 3.4 - (а) Перетворювач LLC та контролер FPGA і (б) приймач.

Основні осцилограми LLC-перетворювача при повному навантаженні світлодіодів (тобто без димування) для різних входних напруг U_i наведено на рис. 3.5. Виміряні осцилограми LLC-перетворювача для рівнів димування 30%, 50% та 70% за допомогою ЗУПІМ наведено на рис. 3.6 (а) - (в) відповідно. Осцилограми приймача, що відповідають рис. 3.6(а) - (в), показано на рис. 3.11(а) - (в), де приймач розміщено на відстані 3 м від світлодіодного модуля.



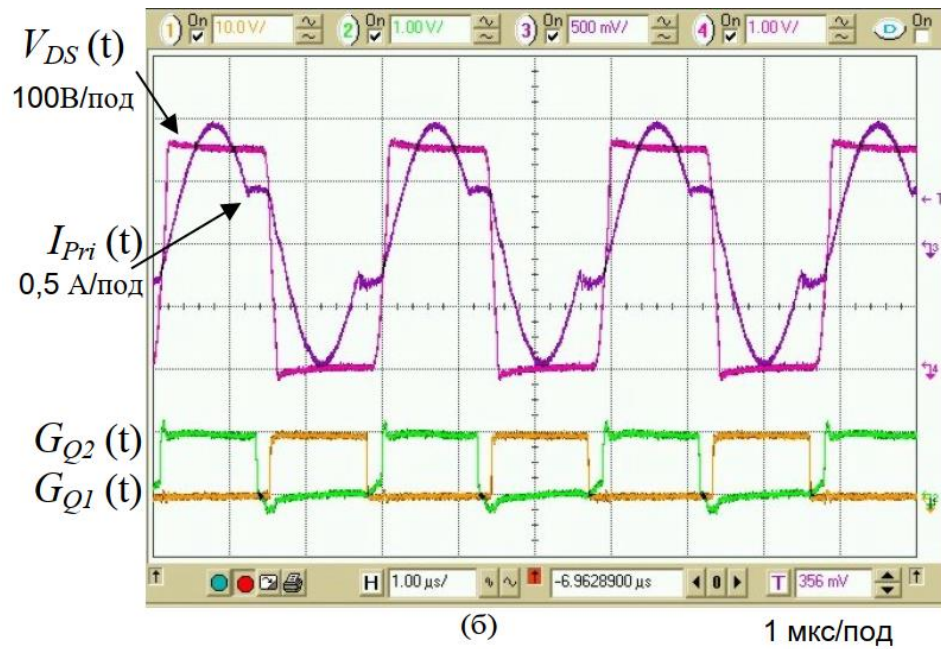
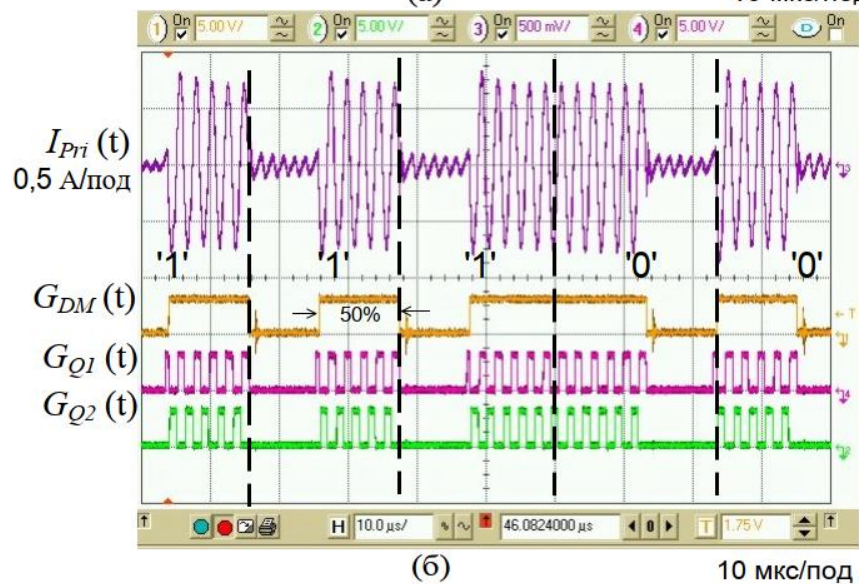
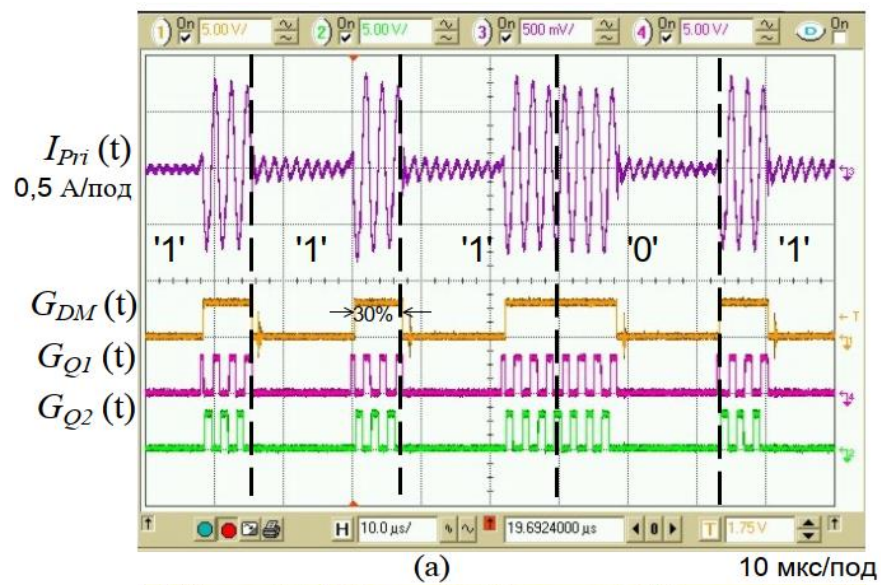


Рисунок 3.6 - Осцилограми перетворювача LLC для (а) $V_i = 400$ В і (б) $V_i = 340$ В.



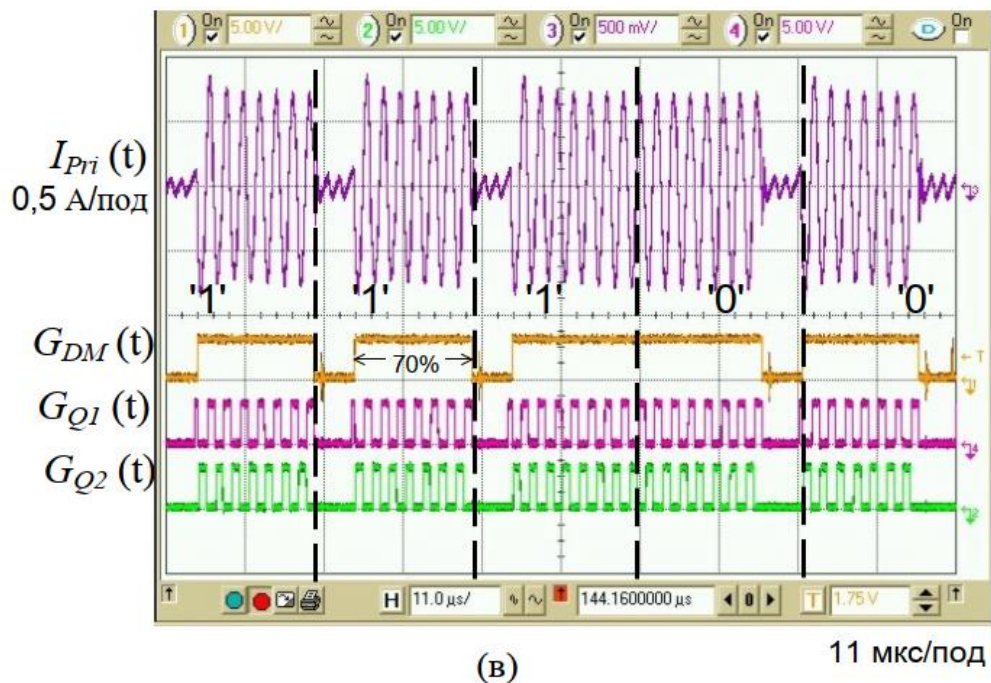


Рисунок 3.7 - Виміряні осцилограми перетворювача для рівня димування (а) 30%, (б) 50% та (в) 70%

Використовуючи синхронізацію, значення вихідного конденсатора можна мінімізувати, як зазначено в розділі 2. Тому доцільно використовувати керамічний конденсатор для C_o , який має меншу густину, але й менший ESR. Рис. 3.8 відповідає результатам моделювання, показаним на рис. 3.6. Як видно з рис. 3.8, пульсації вихідної напруги, ΔV_o , і пульсації вихідного струму ΔI_o , чітко мінімізуються при оптимізації часу керування сигналом димування.

Залежність ККД при повному навантаженні від вхідної напруги показано на рис. 3.9. Пікова ефективність 93,8% досягається за напруги $V_i = 370$ В. Ефективність при різних рівнях димування, виміряна при вхідній напрузі 400 В, показана на рис. 3.10. Ефективність падає за нижчих рівнів димування через деяке постійне споживання енергії в схемі (наприклад, мікросхеми, невеликий модуль допоміжного живлення). Втрати при перемиканні перемикача димування також вносять свій внесок у втрату потужності.

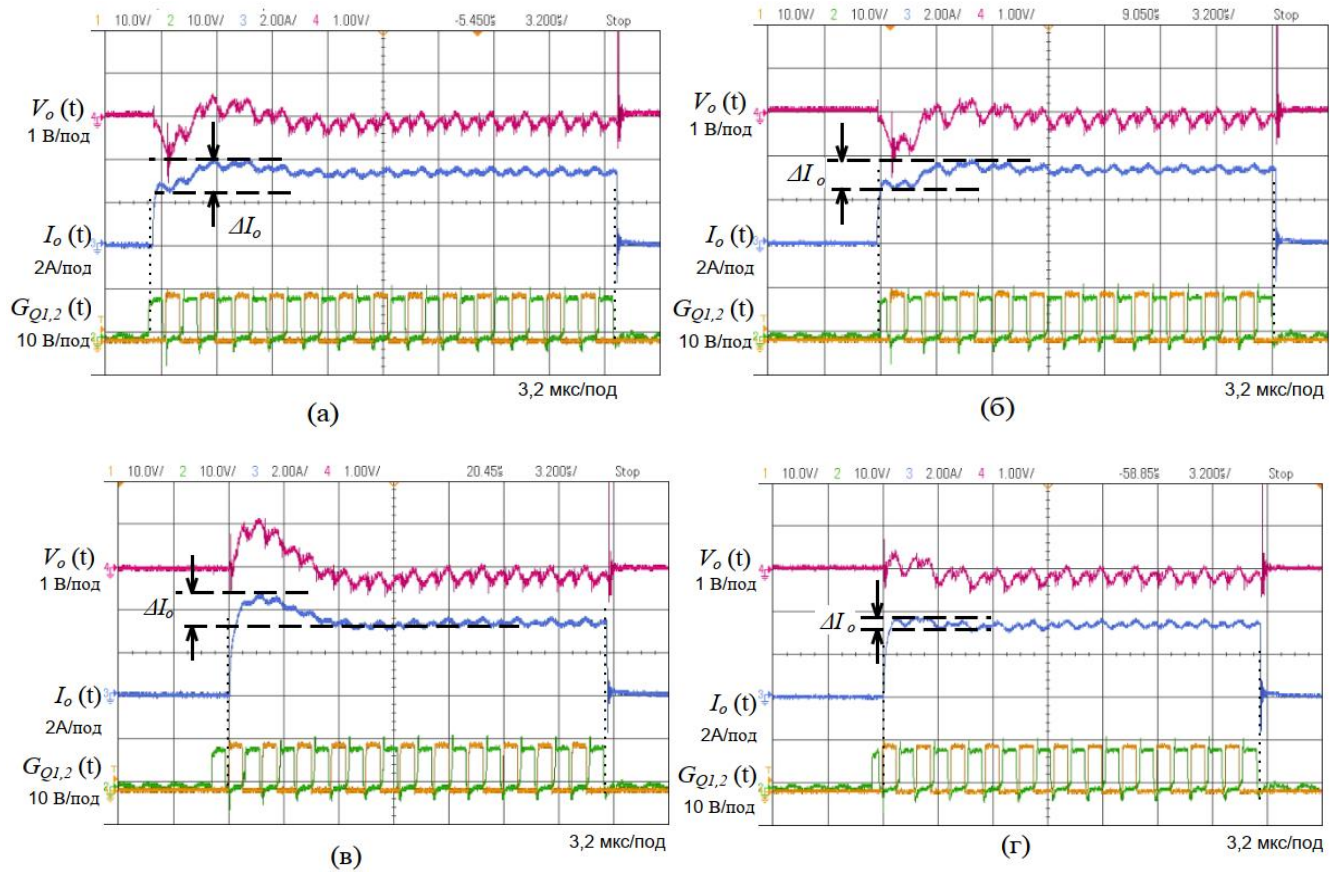


Рисунок 3.8 - Форма пульсацій вихідної напруги ΔV_o та вихідного струму I_o для різних часових інтервалів першого імпульсу та диммірувального сигналу. (а) Неоптимізований сигнал стробіювання та затемнення, (б) оптимізовано ширину першого імпульсу, (в) оптимізовано час сигналу затемнення і (г) оптимізовано перший імпульс і сигнал затемнення.

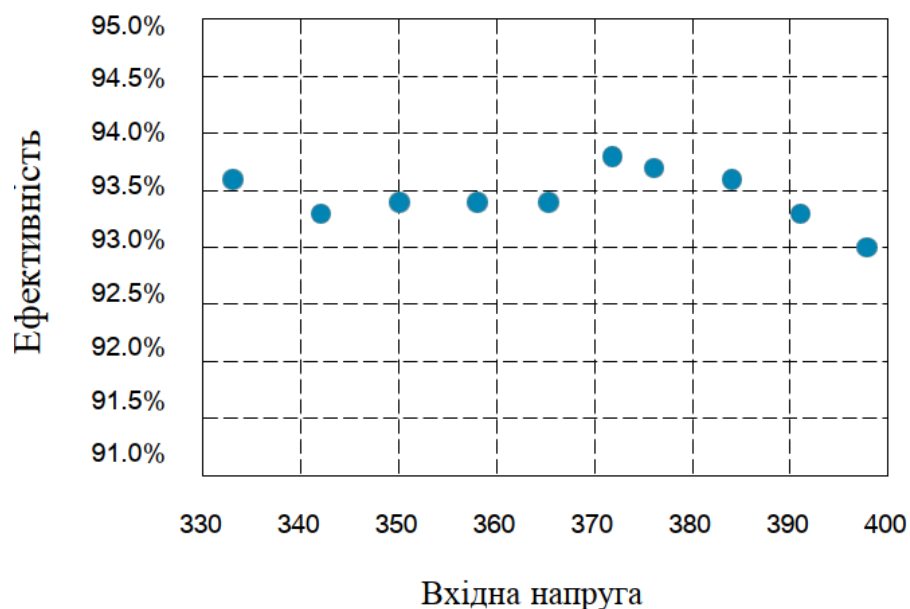


Рисунок 3.9 - Виміряна ефективність при повному навантаженні в залежності від вхідної напруги.

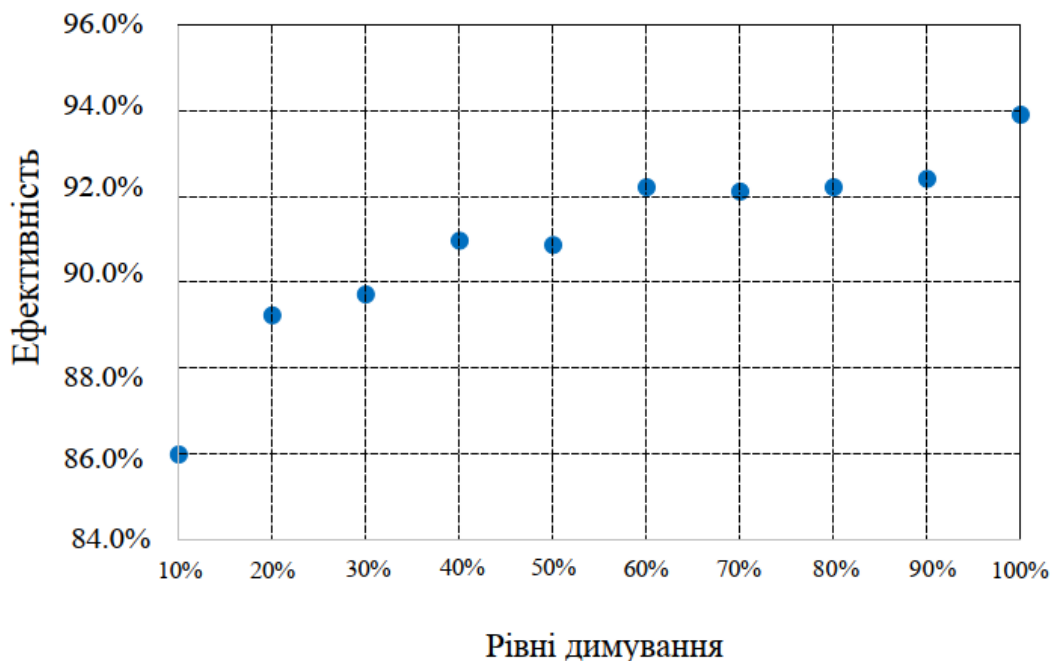


Рисунок 3.10 - Виміряна ефективність при різних рівнях димування.

Обмежений час наростання при V_Y , що видно на рис. 3.11, пояснюється паразитною індуктивністю кола світлодіода, ємністю переходу фотодіода та обмеженням смуги пропускання підсилювача першого каскаду. Швидкість передачі даних, R_b , завжди дорівнює $1/10$ частоти перемикання LLC, f_s . Перетворювач був спроектований на резонансну частоту 500 кГц, але фактична резонансна частота прототипу становить 470 кГц. Коли перетворювач LLC працює в резонансній точці, $f_s = 470$ кГц, $R_b = f_{DM} = f_s / 10 = 470/10 = 47$ кбіт/с. При $V_i = 340$ В, $f_s = 333$ кГц швидкість передачі даних становить $R_b = 33,3$ кбіт/с. Відновлений сигнал димування G_{DM} і вихід блоку демодуляції, DATA і CLK показано показує, що вивід DATA передає один біт демодульованих даних на передньому фронті CLK.

Вимірний коефіцієнт бітових помилок (КБП) всієї системи ЗВД показано на рис. 3.12(а) як функцію відносного кута і відстані між передавачем і приймачем при 50% рівні затемнення, при цьому тест КБП проводився у великій кімнаті з нормально увімкненими флуоресцентними лампами. Для тестування КБП використовується логічний аналізатор. Дані з виводів DATA і CLK записуються і виводяться у файл. Після обробки файлу на ПК фактичні дані витягуються і порівнюються з попередньо встановленою послідовністю

даних в передавачі, щоб отримати вимірний КБП системи. Дані є псевдовипадковою двійковою послідовністю (PRBS), що генерується регістром зсуву лінійного зворотного зв'язку (LFSR) у FPGA.

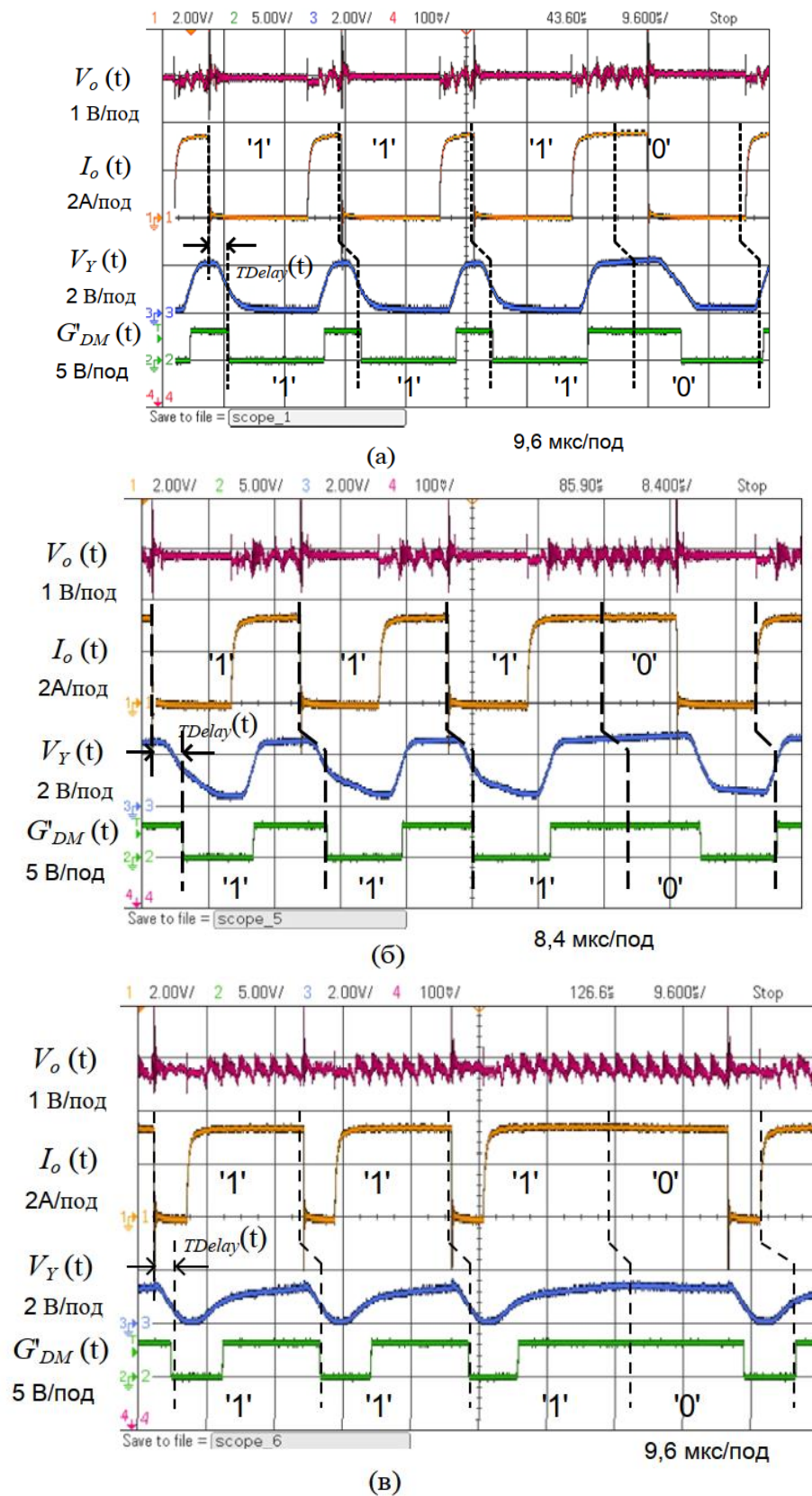


Рисунок 3.11 - Форма сигналу приймача для відповідних умов рис. 3.7 при рівнях затемнення (а) 30%, (б) 50% і (в) 70%

Вимірний КБП при різних рівнях димування показано на рис. 3.12(б). Система має найкращий показник КБП при рівні димування 50%, коли імпульс і долина сигналу димування мають однакову ширину. КБП трохи вищий при 30% і 70% рівнях затемнення через вужчі імпульси або долини сигналу затемнення G_{DM} , які вносять більше помилок у процес демодуляції.

Через обмеження пам'яті вимірального обладнання мінімальна межа виявлення КБП становить $8 \cdot 10^{-7}$, що відповідає 1 помилці в загальній кількості $1,25 \cdot 10^6$ біт. Тести КБП повторювалися до тих пір, поки в деяких точках не було зафіксовано 5 помилкових бітів. Мінімальний КБП $1 \cdot 10^{-7}$ було виміряно на відстані 4,5 м. Інтерпольований двовимірний розподіл КБП показано на рис. 3.13. Система досягає значення КБП нижче 10^{-5} для більшої частини двовимірної площини. Найнижчий показник КБП досягається на висоті 3-5 м, що зазвичай є висотою стелі, і значно зростає нижче 2 м через насичення контуру приймача.

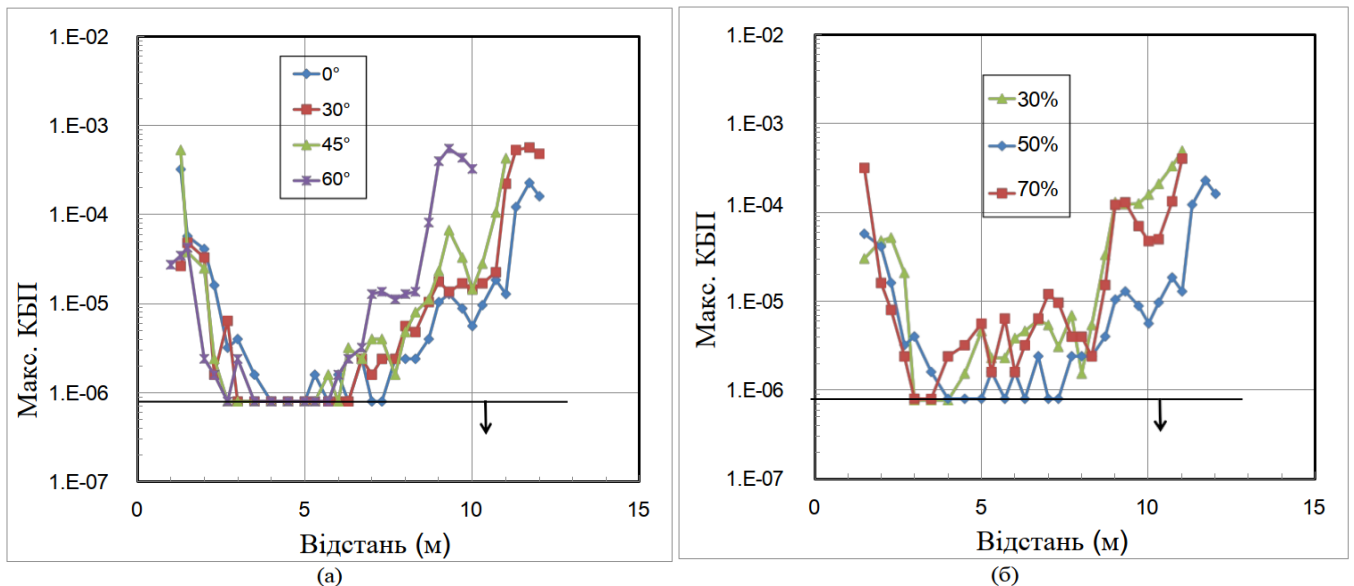


Рисунок 3.12 - Вимірний КБП для $V_i = 400$ В при (а) різних кутах між світлодіодним модулем і приймачем при 50% затемненні і (б) при різних рівнях затемнення.

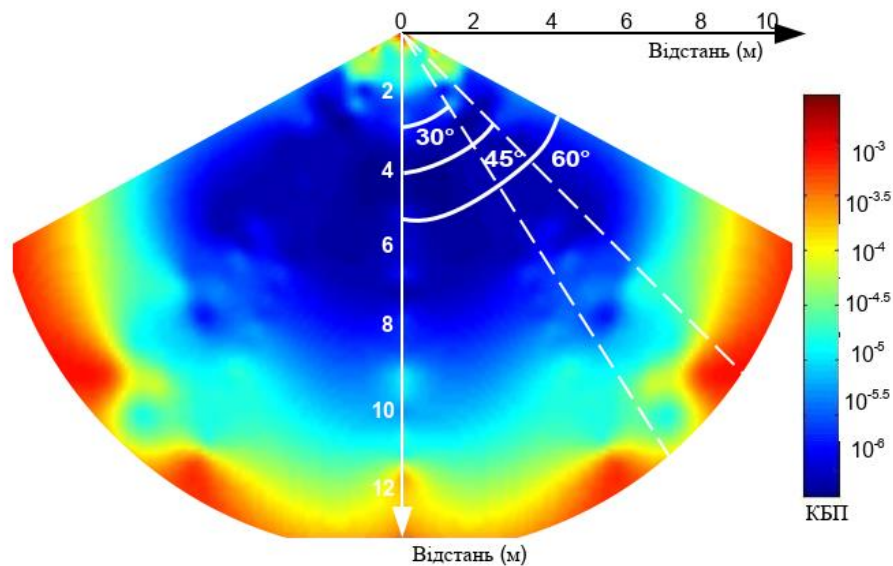


Рисунок 3.13 - 2-вимірний графік коефіцієнта бітових помилок (КБП) системи ЗВД

3.3 Висновки до розділу

У цьому розділі представлено змодельовану систему освітлення з резонансним перетворювачем LLC постійного струму з цифровим керуванням, а також експериментальні результати. З яких видно, що перетворювач досягає пікового ККД 93,8% і перевищує 93% ККД у всьому діапазоні вхідної напруги. Завдяки впровадженню комунікації з використанням видимого світла в імпульсному перетворювачі LLC, світлодіодний модуль освітлення може працювати на 9 рівнях димірування, не впливаючи на передачу даних. Оптимізований час перемикання забезпечує мінімальні збурення вихідного струму, що в подальшому гарантує постійну інтенсивність світлового потоку і стабільний сигнал зв'язку. Виміряні осцилограми при різних налаштуваннях димування показують, що дані успішно приймаються повністю. Пропускна здатність зв'язку 50 кбіт/с є достатньою для цільової програми розумного будинку, а коефіцієнт бітових помилок менше 10^{-5} , який досягається в широкій зоні покриття. Коефіцієнт бітових помилок всієї системи повністю охарактеризовано в залежності від відстані та кута нахилу.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці

4.1.1 Навчання з питань охорони праці

Організацію навчання та перевірки знань з питань охорони праці працівників при підготовці, перепідготовці, підвищенні кваліфікації на підприємстві здійснюють працівники служби кадрів або інші спеціалісти, яким керівником підприємства доручена організація цієї роботи.

Підготовка працівників для виконання робіт з підвищеною небезпекою здійснюється лише в закладах освіти (ЗО), які одержали в установленому порядку ліцензію Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України та дозвіл Державного нагляду з охорони праці на проведення такого навчання. При підготовці працівників для робіт з підвищеною небезпекою дисципліна загального курсу «Охорона праці» вивчається в обсязі не менше ніж 30 год., а специфічні питання з охорони праці, пов'язані з виконанням робіт з підвищеною небезпекою, вивчаються в курсах спеціальних дисциплін і органічно поєднуються з вивченням технології виробництва.

Для решти робіт підготовка, перепідготовка працівників за професіями можуть здійснюватися як в ЗО, так і на підприємстві. При цьому дисципліна загального курсу «Охорона праці» вивчається в обсязі не менше ніж 20 год. Робочі навчальні плани і програми підготовки, перепідготовки, підвищення кваліфікації працівників розробляють на підприємстві на основі типових навчальних планів і програм, затверджених Міністерством освіти і науки, молоді та спорту з погодженням з Держнаглядохоронпраці. Навчальні плани та програми підготовки та перепідготовки працівників повинні передбачати теоретичне і практичне (виробниче) навчання з курсу «Охорона праці».

Працівники, яких приймають на роботу, проходять на підприємстві попереднє спеціальне навчання і перевірку знань з питань охорони праці стосовно конкретних робіт, які вони виконуватимуть. Попереднє спеціальне навчання і перевірка знань працівників за його результатами проводиться одноразово до початку самостійної роботи, а також у разі перерви в роботі

понад 1 рік. Періодичні перевірки знань працівників проводяться в терміни, встановлені відповідними міжгалузевими і галузевими нормативними актами, але не рідше 1 разу на рік.

На підприємствах для перевірки знань працівників з питань охорони праці наказом керівника створюються постійно діючі комісії. Головами комісій призначаються заступники керівників підприємств, в обов'язки яких входить організація роботи з охорони праці, а в разі потреби створення комісій в окремих структурних підрозділах їх очолюють керівники відповідних підрозділів чи їх заступники.

Перед перевіркою знань працівників з питань охорони праці на підприємстві організовуються заняття: лекції, семінари та консультації. Перелік питань для перевірки знань з охорони праці з урахуванням специфіки виробництва складають члени комісії з перевірки знань з питань охорони праці, погоджує служба охорони праці і затверджує керівник підприємства.

Посадові особи і спеціалісти зобов'язані проходити попередню і періодичну перевірку знань з охорони праці до початку виконання своїх обов'язків, а також періодично один раз на 3 роки, проходять навчання і перевірку знань з питань охорони праці.

Одним з розділів «Типового положення про навчання з питань охорони праці» є інструктажі з питань охорони праці.

За характером і часом проведення інструктажі з питань охорони праці поділяються на вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий.

Усі працівники, яких приймають на постійну чи тимчасову роботу і при подальшій роботі, повинні проходити на підприємстві навчання в формі інструктажів з питань охорони праці, надання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також з правил поведінки та дій при виникненні аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих.

Вступний інструктаж проводиться спеціалістом служби охорони праці, а в разі відсутності на підприємстві такої служби – іншим фахівцем, на якого наказом по підприємству покладені ці обов'язки. Вступний інструктаж проводиться в кабінеті охорони праці або в приміщенні, що спеціально для

цього обладнане, з використанням сучасних технічних засобів навчання, навчальних та наочних посібників за програмою розробленою службою охорони праці з урахуванням особливостей виробництва. Запис про проведення вступного інструктажу робиться в журналі реєстрації вступного інструктажу, який зберігається в службі охорони праці або в працівника, що відповідає за проведення вступного інструктажу, а також у документі про прийняття працівника на роботу.

Первинний інструктаж проводиться індивідуально або з групою осіб одного фаху за діючими на підприємстві інструкціями з охорони праці відповідно до виконуваних робіт, а також з урахуванням вимог орієнтовного переліку питань первинного інструктажу.

Повторний інструктаж проводиться індивідуально з окремим працівником або з групою працівників, які виконують однотипні роботи, за обсягом і змістом переліку питань первинного інструктажу, але не рідше: на роботах з підвищеною небезпекою – один раз на 3 місяці; для решти робіт – один раз на 6 місяців.

Позаплановий інструктаж проводиться індивідуально з окремим працівником або з групою працівників одного фаху. Обсяг і зміст позапланового інструктажу визначаються в кожному окремому випадку залежно від причин і обставин, що спричинили потребу його проведення. Наприклад, при введенні в дію нових або переглянутих нормативних актів про охорону праці, а також при внесенні змін та доповнень до них; при зміні технологічного процесу, заміні або модернізації устаткування, приладів та інструментів, матеріалів та інших факторів, що впливають на стан охорони праці; при порушеннях працівником вимог охорони праці, що можуть призвести або призвели до травм, аварій, пожеж тощо; при виявленні особами, які здійснюють нагляд за охороною праці, незнання вимог безпеки стосовно робіт, що виконуються працівником; при перерві в роботі більш ніж на 30 календарних днів – для робіт з підвищеною небезпекою, а для решти робіт – понад 60 днів.

Цільовий інструктаж проводиться індивідуально з окремим працівником або з групою працівників. Обсяг і зміст цільового інструктажу визначається залежно від виду робіт, що ними виконуватимуться.

Первинний, повторний, позаплановий і цільовий інструктажі проводить безпосередній керівник робіт (начальник виробництва, цеху, дільниці, майстер). Ці види інструктажу завершуються перевіркою знань у вигляді усного опитування або за допомогою технічних засобів, а також перевіркою набутих навичок безпечних методів праці. Знання перевіряє особа, яка проводила інструктаж. При незадовільних результатах перевірки знань, умінь і навичок щодо безпечного виконання робіт після первинного, повторного чи позапланового інструктажів для працівника протягом 10 днів додатково проводяться інструктаж і повторна перевірка знань. При незадовільних результатах і повторної перевірки знань питання щодо працевлаштування працівника вирішується згідно з чинним законодавством. При незадовільних результатах перевірки знань після цільового інструктажу допуск до виконання робіт не надається. Повторна перевірка знань при цьому не дозволяється.

Про проведення первинного, повторного, позапланового та цільового інструктажів особою, якою проводився інструктаж, вноситься запис до журналу реєстрації інструктажів з питань охорони праці. При цьому обов'язкові підписи як того, кого інструктували, так і того, хто інструктував. Сторінки журналу реєстрації повинні бути пронумеровані, журнали прошнуровані і скріплені печаткою.

4.2. БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.2.1. Правові основи забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях та матеріальних втрат у будь-яких умовах обстановки.

Територія України, її населення, як і території та населення інших країн світу, на жаль, не убезпечені від ризику надзвичайних ситуацій природного й техногенного характеру, які можуть зумовити людські втрати і заподіяти значної матеріальної шкоди.

В законодавстві України надзвичайною ситуацією (НС) вважають порушення нормальних умов життя й діяльності людей на об'єкті або території, спричинене аварією, катастрофою, стихійним лихом, епідемією, епізоотією, епіфітотією, великою пожежею, застосуванням засобів ураження, що призвели або можуть призвести до людських і матеріальних втрат.

Відповідно до причин походження подій, що можуть зумовити виникнення надзвичайної ситуації на території України, розрізняють надзвичайні ситуації:

- техногенного характеру – транспортні аварії (катастрофи), пожежі, неспровоковані вибухи чи їх загроза, аварії з викидом (загрозою викиду) небезпечних хімічних, радіоактивних, біологічних речовин, раптове руйнування споруд і будівель, аварії на інженерних мережах і спорудах життєзабезпечення, гідродинамічні аварії на греблях, дамбах тощо;

- природного характеру – небезпечні геологічні, метеорологічні, гідрологічні, морські та прісноводні явища, деградація ґрунтів чи надр, природні пожежі, зміна стану повітряного басейну, інфекційна захворюваність людей, сільськогосподарських тварин, масове ураження сільськогосподарських рослин хворобами чи шкідниками, зміна стану водних ресурсів і біосфери тощо;

- соціально-політичного характеру – пов'язані з протиправними діями терористичного і антиконституційного спрямування: здійснення або реальна загроза терористичного акту (збройний напад, захоплення та утримання важливих об'єктів, ядерних матеріалів, систем зв'язку і телекомунікацій, напад чи замах на екіпаж повітряного або морського судна), викрадення (спроба викрадення) чи знищення суден, захоплення заручників, встановлення вибухових пристроїв у громадських місцях, викрадення або захоплення зброї, виявлення застарілих боєприпасів тощо;

- військового характеру – пов'язані з наслідками застосування зброї масового ураження, під час яких виникають вторинні фактори ураження населення внаслідок зруйнування атомних і гідроелектростанцій, складів і

сховищ радіоактивних та токсичних речовин і відходів, нафтопродуктів, вибухівки, транспортних та інженерних комунікацій тощо.

Відповідно до територіального поширення обсягів заподіяних або очікуваних економічних збитків, кількості людей, які загинули, за кваліфікаційними ознаками визначають чотири рівні надзвичайних ситуацій – загальнодержавний, регіональний, місцевий та об’єктовий.

Правове регулювання забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях має комплексний характер і поєднує норми різних галузей права. Але відносини, які виникають під час здійснення виконавчо-розпорядчої та іншої діяльності щодо забезпечення безпеки за надзвичайних ситуацій здебільшого регулюються адміністративно-правовими нормами.

Правову основу забезпечення безпеки за надзвичайних ситуацій складають різні нормативно-правові акти, які регулюють процедури та відповідальність у разі виникнення надзвичайних ситуацій. До таких актів належать:

- Конституція України: вона містить основні положення щодо захисту життя, здоров’я та майна громадян у разі надзвичайних ситуацій;
- закони про цивільний захист та захист населення від надзвичайних ситуацій: ці закони визначають порядок організації та забезпечення захисту населення від надзвичайних ситуацій, а також встановлюють правові норми для управління ними;
- постанови відповідних органів управління: державні органи можуть ухвалювати постанови та накази, які містять конкретні вимоги щодо підготовки до надзвичайних ситуацій та реагування на них;
- міжнародні угоди та конвенції: кгоди, укладені Україною з іншими країнами або міжнародними організаціями, також можуть містити положення щодо забезпечення безпеки за надзвичайних ситуацій.

Ці нормативно-правові акти встановлюють правила та процедури для забезпечення безпеки в разі надзвичайних ситуацій і визначають відповідальність за їх виконання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

З проведених досліджень можна зробити наступні висновки.

Представлено бездротову систему освітлення комунікація у видимому діапазоні світла, призначену для майбутніх "розумних будівель". Продемонстровано резонансний перетворювач постійного струму з цифровим керуванням LLC, призначений для білих світлодіодних світильників. Модуль використовує світлодіодний масив як для зовнішнього освітлення, так і для комунікації. Видимий світловий зв'язок реалізується з мінімальними додатковими витратами, завдяки роботі перетворювача LLC в імпульсному режимі, не створюючи видимих перешкод. Для модуляції даних використовується модуляція положення імпульсів зі змінною частотою, яка підтримує широкий діапазон налаштувань дімування. Продемонстровано схему цифрової демодуляції, яка підтримує передачу даних зі змінною частотою.

Змодельовано систему освітлення з резонансним перетворювачем LLC постійного струму з цифровим керуванням, а також представлено експериментальні результати. З яких видно, що перетворювач досягає пікового ККД 93,8% і перевищує 93% ККД у всьому діапазоні вхідної напруги. Завдяки впровадженню комунікації з використанням видимого світла в імпульсному перетворювачі LLC, світлодіодний модуль освітлення може працювати на 9 рівнях димування, не впливаючи на передачу даних. Оптимізований час перемикання забезпечує мінімальні збурення вихідного струму, що в подальшому гарантує постійну інтенсивність світлового потоку і стабільний сигнал зв'язку. Виміряні осцилограми при різних налаштуваннях дімування показують, що дані успішно приймаються повністю. Пропускна здатність зв'язку 50 кбіт/с є достатньою для цільової програми розумного будинку, а коефіцієнт бітових помилок менше 10^{-5} , який досягається в широкій зоні покриття. Коефіцієнт бітових помилок всієї системи повністю охарактеризовано в залежності від відстані та кута нахилу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. J. Tsao, "Solid-state lighting: lamps, chips, and materials for tomorrow," *Circuits and Devices Magazine, IEEE*, vol. 20, no. 3, 2004.
2. K. H. Loo, Y. Lai, S. C. Tan, and C. Tse, "Stationary and adaptive color-shift reduction methods based on the bilevel driving technique for phosphor-converted white leds," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 7,
3. S. Zhao, K. Cao, S. Firwana, A. Swaris, R. Content, and O. Trescases, "Failsafe smart led module with thermal management, string current balancing and commutation for lifetime extension," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012 IEEE, pp. 4246-4253, 2012.
4. Z. Wang, R. Yang, and L. Wang, "Intelligent multi-agent control for integrated building and micro-grid systems," in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 2011 IEEE PES, pp. 1-7, Jan. 2011.
5. K. I. Hwu, Y. T. Yau, and L.-L. Lee, "Powering led using high-efficiency step-down converter," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 47, no. 1, pp. 376-386, 2011.
6. Електропривід рухомої опромінювальної установки / Андрійчук, В. А., Наконечний, М. С., Філюк, Я. О., Костик Л. М., Козак І.Р. // Вісник Хмельницького національного університету: 2023. — №6. — С. 44-48.
7. Андрійчук В.А. Дослідження світлодіодних джерел світла у випадку імпульсного живлення / Андрійчук В.А., Наконечний М.С., Осадца Я.М., Філюк Я.О. // Технічна електродинаміка, 2021. — №1. — Стор. 68-72. <https://doi.org/10.15407/techned2021.01.068>.
8. W. Feng, F. Lee, and P. Mattavelli (Guest AE), "Optimal trajectory control of LLC resonant converters for LED PWM dimming," 2013.
9. Kinetics of narrow-spectrum LED glow under pulsed power / Volodymyr Andriichuk, Myroslav Nakonechnyi, Yaroslav Filiuk // *Semiconductor physics, quantum electronics and optoelectronics*, 2023. — Vol 26, P. 230-235. DOI: <https://doi.org/10.15407/spqeo26.02.230>
10. Дослідження кінетики свічення світлодіодних джерел світла / Андрійчук, В. А., Наконечний, М. С., і Філюк, Я. О., Костик Л. М., Осадца, Я.

М. // Вісник Хмельницького національного університету: 2023. — Том 1. — №5. —С.

11. Андрійчук, В. А., Костик, Л. М., Філюк, Я. О., & Наконечний, М. С. (2024). Дослідження перехідних процесів в електричному колі з світлодіодами. Technical Electrodynamics/Tekhnichna Elektrodynamika, (2). <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.087>

12. Microprocessor Control of the Electric Drive of Variable Radiation Installation and Ensuring of Operation Reliability // Andriychuk V., Kostyk, L., Filiuk Ya., Nakonechnyi M., Babiuk S. (2024). Science and Innovation, 2024. 20(5). Pp.62–70. ISSN 2409-9066

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.