

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Бакалавр

Освітній рівень

Резонансний перетворювач для систем зарядки акумуляторів

Назва теми

КвРТР.2020008.01.06 ПЗ

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Шифр і назва

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Шифр і назва

Освітня програма «Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології»

Назва

Виконав:

студент IV курсу, група ТР1-20-1


Підпис

Віталій МИХАЙЛОВСЬКИЙ

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник:


Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер:


Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

Зав. кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих
технологій та робототехніки:


Підпис

Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ


«21» червня 2024р.

Хмельницький, 2024

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКИТтаР

 Валерій МАРТИНЮК

« 10 » січня 2024 р

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Михайловському Віталію Миколайовичу

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

1 Тема роботи: Резонансний перетворювач для систем зарядки акумуляторів

Керівник роботи: Корецька Людмила Олександрівна, к.т.н., доцент

Затверджено наказом по університету від «15» лютого 2024р. №8


2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру 01 червня 2024 року


3 Вихідні дані до роботи: схема технологічного процесу, технічне завдання

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): тенденції та перспективи резонансних перетворювачів в автономних джерелах живлення; теоретичний огляд резонансних перетворювачів LLC; топологія та конструкція резонансного перетворювача LLC; моделювання резонансного перетворювача LLC





5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):

1. Схема резонансного перетворювача LLC. 2. Блок-схема приводу затвора пристрою GaN. 3. Імітаційна модель резонансного перетворювача LLC

Завдання отримав 

Керівник 

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7 Дата видачі завдання 10 січня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на кваліфікаційну роботу	10.01.2024р.	виконано
2.	Складання індивідуального плану на кваліфікаційну роботу	15.01.2024р.	виконано
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	10.02.2024р.	виконано
4.	Написання другого розділу	26.03.2024р.	виконано
5.	Написання третього розділу	15.04.2024р.	виконано
6.	Написання четвертого розділу	30.04.2024р.	виконано
7.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до кваліфікаційної роботи	10.05.2024р.	виконано
8.	Оформлення кваліфікаційної роботи	15.05.2024р.	виконано
9.	Рецензування кваліфікаційної роботи	20.05.2024р.	виконано
10.	Презентаційні матеріали за результатами виконання кваліфікаційної роботи	28.05.2024р.	виконано

Здобувач


(підпис, дата)

Науковий керівник


(підпис, дата)

Віталій МИХАЙЛОВСЬКИЙ

Людмила КОРЕЦЬКА

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Резонансний перетворювач для систем зарядки акумуляторів»

Автор роботи: Михайловський Віталій Миколайович.

Керівник роботи: Корецька Людмила Олександрівна, к.т.н., доцент

Пояснювальна записка: 69 сторінок, 27 рисунків, 1 таблиця, 40 джерел.

Графічна частина: технічне креслення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: РОЗУМНЕ ВІДСТЕЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ, ЧАСТОТНА МОДУЛЯЦІЯ, ШИРОКО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ, РЕЖИМ ПЕРЕРИВЧАСТОЇ РОБОТИ, РЕЗОНАНСНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ LLC НА ОСНОВІ GaN, ЗАРЯДКА АКУМУЛЯТОРА ЛЕГКИХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.

Об'єктом дослідження є резонансний перетворювач LLC на основі GaN, що використовується для швидкої зарядки акумуляторів легких електромобілів.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у розробці та впровадженні нового алгоритму інтелектуального відстеження ефективності для резонансного перетворювача LLC на основі GaN, який дозволяє покращити ефективність заряджання акумуляторів в умовах різного навантаження.

У даній кваліфікаційній роботі проаналізовано режими заряджання та зміну ефективності під час зарядки батареї. Викладено теоретичні основи резонансного перетворювача LLC на основі GaN та деталі його конструкції. Досліджено та змодельовано три стратегії керування перемиканням: метод частотної модуляції, метод широтно-імпульсної модуляції та метод переривчастого режиму роботи. Результати моделювання та реалізації цих стратегій підтверджують ефективність запропонованого алгоритму. Запропонований метод SET дозволив підвищити ефективність на 20% для умов низького навантаження резонансного перетворювача LLC на основі GaN, що значно покращує процес зарядки акумуляторів легких електромобілів.

01.06.2024 р.



ЗМІСТ

	С.
ЗМІСТ.....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП.....	5
1 ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ В АВТОНОМНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЖИВЛЕННЯ.....	8
1.1 Тенденції щільності потужності в автономних джерелах живлення.....	8
1.2 Проблеми та перспективи мініатюризації автономних джерел живлення.....	11
1.3 Переваги використання резонансних перетворювачів.....	14
1.4 Висновки до першого розділу	19
2 ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ LLC.....	21
2.1 Швидка зарядка як ключовий аспект	21
2.2 Типологія та опис резонансних перетворювачів.....	22
2.3 Порівняння топологій подвійного активного мостового перетворювача ШІМ та резонансного перетворювача LLC/CLLC.....	29
2.4 Контроль стану низького навантаження.....	32
2.5 Висновки до другого розділу	33
3 ТОПОЛОГІЯ ТА КОНСТРУКЦІЯ РЕЗОНАНСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА LLC.....	35
3.1 Резонансний перетворювач LLC як зарядний пристрій для акумулятора.....	35
3.2 Запропонована топологія та інтервали роботи.....	38
3.3 Конструкція перетворювача LLC	43
3.3 Конструкція трансформатора.....	47
3.4 Висновки до третього розділу	50

КвРТР.2020008.01.06 ПЗ

№	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		Лит.	Арк.	Аркушів
зроб.		Мизайтовський В.М.		11.06.24	Резонансний перетворювач для систем зарядки акумулятора Пояснювальна записка			
ревір.		Корецька Л.О.		11.06.24			2	68
перев.						ХНУ, гр. ТР1-20-1		
Контр.		Корецька Л.О.		11.06.24				
перев.		Мартинюк В.В.		11.06.24				

4 МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗОНАНСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА LLC	50
4.1 Режим роботи зі звичайною частотною модуляцією	52
4.2 Режим роботи з широтно-імпульсною модуляцією	55
4.3. Режим переривчастої роботи	57
4.4 Висновки до четвертого розділу	61
ВИСНОВКИ.....	63
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	65
ДОДАТОК А. Схема резонансного перетворювача LLC	69
ДОДАТОК Б. Блок-схема приводу затвора пристрою GaN	70
ДОДАТОК В. Імітаційна модель резонансного перетворювача LLC	71

					КВРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

DC	– direct current
DSP	– процесори цифрових сигналів
ECM	– електромагнітна сумісність
EMC	– електромагнітну сумісність
IGBT	– Insulated-gate bipolar transistor
MOSFET	– metal-oxide-semiconductor field-effect transistor
MPPT	– відстеження точки максимальної потужності
SPICE	– симулятор електричних схем – Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
АЦП	– аналого-цифрових перетворювачі
ЕРС	– електрорушійна сила
ЕС	– енергетичні системи
ККД	– коефіцієнт корисної дії
РЧ	– радіочастота
LISN	– Лінійний мережний фільтр з роз'ємом для вимірювання

					КВРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ВСТУП

З розвитком мобільності та зростанням впливу вдосконалень в електричних та гібридних електромобілях, дослідження проблем акумуляторів набувають все більшої важливості та актуальності. Життєвий цикл акумуляторів, процес заряджання та оцінка їх працездатності вирішуються завдяки новим методам та технологіям. Швидка або прискорена зарядка є ключовим фактором для підвищення привабливості електромобілів. На сьогоднішній день довгий час заряджання є однією з основних причин обмеженого поширення електромобілів. Скорочення часу заряджання можливе завдяки використанню потужніших джерел зарядки та високоефективних електронних схем живлення. Дослідники працюють над створенням менших та легших зарядних пристроїв з високою ефективністю.

Швидка зарядка акумуляторів, особливо літій-іонних, є головною метою сучасних розробників силової електроніки. Нові методи та топології схем постійно пропонуються для вдосконалення процесу швидкої зарядки. У цьому контексті резонансні перетворювачі LLC займають важливе місце завдяки своїй високій щільності потужності, високому ККД, компактному розміру та легкій конструкції. Завдяки своїм унікальним властивостям, вони здатні передавати електроенергію постійного струму з максимальною ефективністю в обох напрямках - від мережі до батареї та від батареї до мережі.

У даній кваліфікаційній роботі запропоновано інтелектуальний алгоритм відстеження ефективності (SET) для резонансного перетворювача LLC на основі GaN, який використовується для швидкої зарядки акумуляторів легких електромобілів. Для забезпечення відстеження ефективності перетворювача протягом усього циклу заряджання батареї, включаючи як фазу швидкої зарядки постійним струмом, так і фазу повільної зарядки постійною напругою,

					КВРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

застосовуються традиційні методи частотної модуляції, ШІМ та дискретного режиму роботи.

Однією з ключових проблем сучасних електромобілів є тривалий час заряджання акумуляторів, що значно знижує їх привабливість для споживачів. З огляду на значимість та актуальність цієї проблеми, важливо розробляти нові методи та технології, які дозволять скоротити час заряджання та підвищити ефективність процесу.

Однією з ключових переваг резонансного перетворювача LLC на основі GaN є його висока щільність потужності, високий коефіцієнт корисної дії (ККД), компактний розмір та легка конструкція. Ці характеристики роблять його ідеальним рішенням для швидкої зарядки акумуляторів легких електромобілів.

З огляду на значимість та актуальність даної проблеми, метою даної кваліфікаційної роботи є розробка та впровадження інтелектуального алгоритму відстеження ефективності для резонансного перетворювача LLC на основі GaN, який дозволяє покращити ефективність заряджання акумуляторів при різних навантаженнях.

Об'єктом дослідження є процес заряджання акумуляторів легких електромобілів за допомогою резонансного перетворювача LLC на основі GaN.

Предметом дослідження є алгоритми відстеження ефективності та стратегії керування перемиканням для резонансного перетворювача LLC на основі GaN.

Ця кваліфікаційна робота спрямована на розробку та впровадження інтелектуального алгоритму SET, що дозволить покращити ефективність заряджання акумуляторів легких електромобілів в умовах різного навантаження, використовуючи переваги резонансного перетворювача LLC на основі GaN.

Результати цієї кваліфікаційної роботи демонструють ефективність запропонованого інтелектуального алгоритму відстеження ефективності для

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

резонансного перетворювача LLC на основі GaN. Запропонований метод дозволив досягти збільшення ефективності на 20% для умов низького навантаження, що значно покращує процес зарядки акумуляторів легких електромобілів. Дослідження показали, що використання традиційних методів частотної модуляції, ШІМ та переривчастого режиму роботи в поєднанні з новим алгоритмом SET забезпечує оптимальне керування процесом заряджання, підвищуючи ефективність і зменшуючи час заряджання.

					КВРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ В АВТОНОМНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЖИВЛЕННЯ

З моменту появи електроніки потреби користувачів стабільно спрямовували розвиток до зменшення розмірів і ваги електронного обладнання. Ця тенденція, безсумнівно, вплинула й на системи електропостачання, які є важливими компонентами для забезпечення належної роботи пристроїв.

Практично будь-яке електронне обладнання виграє від зменшення розмірів і ваги джерел живлення. У мобільних додатках, таких як транспорт, це безпосередньо веде до економії палива або збільшення робочого діапазону. Користувачі оцінюють портативне обладнання, яке стає меншим, легшим і водночас потужнішим, як додаткову перевагу. Навіть у стаціонарних додатках зменшення розмірів і ваги блоків живлення є вигідним: це забезпечує більше місця для основних функцій установки та знижує загальні витрати на володіння, спрощуючи та пришвидшуючи процеси встановлення та обслуговування.

1.1 Тенденції щільності потужності в автономних джерелах живлення

У джерелах живлення ця тенденція виявляється у постійному попиті на вищу ефективність і щільність потужності, які завжди йдуть разом. ККД – це співвідношення вихідної потужності блоку живлення до потужності, яку він споживає від джерела вхідного сигналу, при цьому різниця між ними (втрата потужності) перетворюється на тепло.

Щільність потужності – це показник якості (FOM), який оцінює компактність блоку живлення. Його можна визначити по-різному в залежності від основної мети проектування, зазвичай як співвідношення номінальної потужності до об'єму ($\text{Вт}/\text{см}^3$) або ваги ($\text{Вт}/\text{кг}$), або інших масштабованих

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

еквівалентних одиниць. Незалежно від того, чи розглядаємо ми об'ємне чи гравіметричне визначення, тенденція щільності потужності полягає в «упакуванні більшої потужності в меншому просторі».

Попри те, що прогрес у технології інтеграції схем значно зменшив розміри та вагу всіх електронних пристроїв, рівень мініатюризації блоків живлення загалом не підтримував такий же темп.

Різні типи перетворювачів потужності, такі як перетворювачі змінного струму в постійний, перетворювачі постійного струму, точкові навантаження, та модулі регуляторів напруги, демонструють різну швидкість мініатюризації. У цьому контексті увага зосереджується на перетворювачах змінного та постійного струму, тобто на тих, які використовуються в джерелах живлення, що працюють від лінії розподілу змінного струму, так званих автономних блоках живлення.

Як показано на рисунку 1.1, тоді як технологія інтегральних схем розвивається згідно із законом Мура, подвоюючи щільність транзисторів приблизно кожні два роки, за останні п'ятдесят років автономним джерелам живлення потрібно було в середньому близько десятиліття для подвоєння своєї щільності потужності [1]. Причини такої повільної швидкості будуть коротко розглянуті далі.

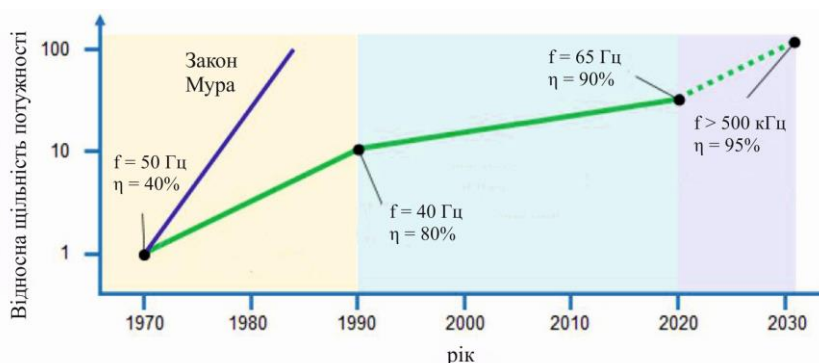


Рисунок 1.1 – Еволюція щільності потужності в типових комерційних автономних джерелах живлення

Ця гонка за вищою щільністю потужності почалася з епохального переходу від лінійних до імпульсних джерел живлення, який відбувся наприкінці 1960-х років завдяки появі високовольтних біполярних силових транзисторів (BJT) та розробці феритів з малими втратами.

Лінійні джерела живлення (рисунок 1.2) не мають значних можливостей для збільшення щільності потужності, оскільки їх розмір і вага в основному зумовлені громіздким ізоляційним трансформатором лінійної частоти, зробленим із шарів кремнієвого заліза, і радіатором. Що стосується радіатора, можливості для його зменшення обмежені через низький ККД лінійних джерел живлення, який визначається лише вхідною та вихідною напругами [2].

Навпаки, комутаційна технологія не потребує мережевого частотного трансформатора (рисунок 1.2) і вимагає менших радіаторів (або взагалі обходиться без них у деяких випадках) завдяки вищому ККД і, відповідно, меншому тепловиділенню.

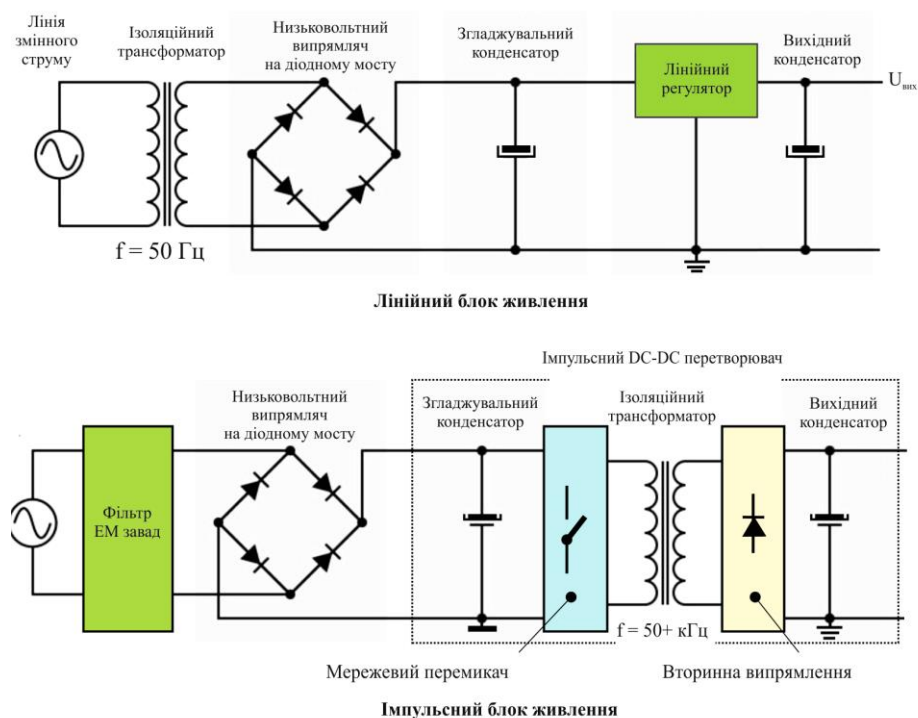


Рисунок 1.2 – Перехід від лінійної до комутаційної технології призвів до значного зменшення розмірів і ваги автономних блоків живлення

Після початкового швидкого зростання завдяки переходу від лінійного до комутаційного режиму, який став проривним моментом, за останні тридцять років щільність потужності в автономних джерелах живлення збільшувалася повільно, зі швидкістю менш ніж 10% на рік. Це відбувалося попри важливі технологічні досягнення, такі як впровадження високовольтних силових МОП-транзисторів, які замінили біполярні силові транзистори, та досягнення в силовій магнетиці.

Такий повільний прогрес у підвищенні щільності потужності також можна пояснити зміною пріоритетів: на початку дев'яностих років швидке поширення споживчої електроніки та підвищена увага до екологічних проблем призвели до введення вимог і правил щодо ефективності при низькому навантаженні та споживанні в режимі очікування. Це спрямувало зусилля наукових досліджень і розробок на відповідність цим новим стандартам, які вимагали підвищення ефективності в усьому діапазоні навантажень, а не лише при повному навантаженні, як цього вимагають цільові показники щільності потужності.

1.2 Проблеми та перспективи мініатюризації автономних джерел живлення

Сьогодні стрімке зростання портативного обладнання знову звернуло увагу на щільність потужності. З появою широкозонних матеріалів, таких як SiC і GaN, індустрія джерел живлення, схоже, стоїть на порозі ще одного періоду швидкого збільшення щільності потужності, навіть для автономних джерел живлення.

Чому автономні джерела живлення (приклад показано на рисунку 1.3) так важко мініатюризувати? Безпечна ізоляція (щоб запобігти небезпеці ураження електричним струмом), час утримування (потрібен резервуар енергії для підтримання роботи обладнання під час короткочасних перерв напруги в мережі

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

змінного струму) та вимоги до електромагнітної сумісності (ЕМС) (щоб не впливати негативно на роботу іншого електронного обладнання і не піддаватися негативному впливу інших пристроїв чи електричних явищ), а також високі напруги, які вони повинні перемикати, створюють значні перешкоди для мініатюризації [3].

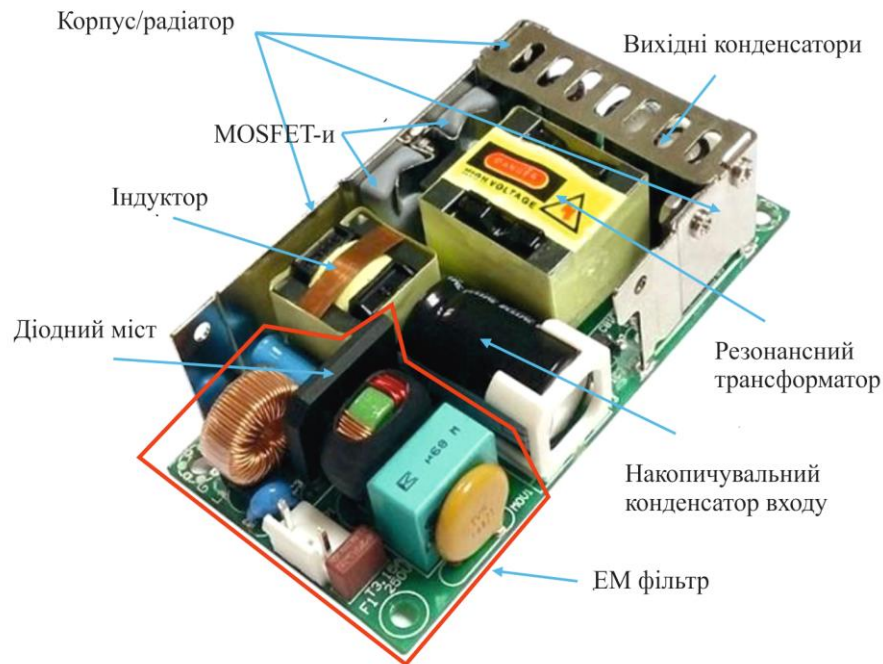


Рисунок 1.3 – Автономне джерело живлення з великими компонентами

Попри прагнення зробити блоки живлення меншими та легшими, кінцева технічна вимога полягає в підвищенні їх ефективності. Причина проста: обробка заданої потужності в меншому об'ємі призводить до меншої площі поверхні для охолодження та обмеженого простору для радіаторів.

Цю проблему можна розглядати й з іншої точки зору: покращення теплового дизайну для полегшення відведення тепла. Однак ця стратегія має свої межі. Вентилятори можна використовувати лише в деяких додатках (наприклад, живлення телекомунікаційного обладнання, серверів, комп'ютерів АТХ/PS2) і не підходять для інших (наприклад, адаптерів змінного/постійного струму та

зарядних пристроїв для мобільного обладнання) з очевидних причин, пов'язаних із користуванням. Інкапсульовані джерела живлення можуть отримати переваги від наповнювачів та інших механічних засобів для полегшення теплообміну, але існують нормативні обмеження на температуру дотику, тобто на максимальну температуру поверхні корпусу. Зрештою, для збільшення щільності потужності необхідно виробляти якомога менше тепла, що іншими словами означає прагнути до високої ефективності.

Технологія комутаційного режиму ґрунтується на зберіганні та/або передачі енергії через магнітні (індуктивні) компоненти, що призводить до зменшення значень індуктивності та, відповідно, до зменшення розміру цих пристроїв, а іноді і ємнісних резервуарів енергії. Збільшення частоти перемикання є ключовим напрямом для досягнення менших розмірів блоків живлення. На жаль, це принципово вірно лише до певної міри, і він суперечить вимогам високої ефективності.

Втрати при комутації та електромагнітні перешкоди (ЕМІ) збільшуються зі зростанням частоти перемикання, тому будь-яка спроба знизити втрати за рахунок швидшої частоти перемикання призведе до збільшення ЕМІ. Це вимагатиме більш потужних фільтрів або інших засобів, які необхідно зберігати в межах встановлених нормативних обмежень. Звичайно, сповільнення частоти перемикання для зниження електромагнітних перешкод погіршує ефективність через збільшення втрат. Це вказує на необхідність в системах перетворення з низьким рівнем збільшення втрат при комутації з частотою та низьким рівнем випромінювання електромагнітних перешкод, щоб відповідати нормативним вимогам без потреби у громіздких фільтрах для підтримки високої щільності потужності.

ШІМ-перетворювачі з жорстким перемиканням (які включають класичні пристрої перемикання потужності, такі як понижуючі, підвищуючі тощо, а також

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

їх ізольовані версії зворотного та прямого перетворення) можуть працювати дуже ефективно, проте це не відноситься до високих частот перемикавання. Термін "жорстке перемикавання" використовується для опису процесу перемикавання в силових пристроях (силових перемикачах і випрямлячах) цих перетворювачів. Це називається жорстким перемиканням через значні піки розсіювання потужності, що виникають при одночасному високому значенні напруги та струму під час переходу між станами. Ці піки відбуваються з частотою перемикавання, тому чим вища частота, тим більшою буде середня розсіювана потужність [4].

Детальний вибір конструкції та компонентів може допомогти знайти компроміс між ефективністю та електромагнітним випромінюванням, але просте підвищення частоти перемикавання та ретельне проектування перетворювача не є достатнім: для досягнення високої щільності потужності необхідно переглянути всі етапи перетворення потужності для досягнення високої ефективності та низького рівня електромагнітних перешкод через використання вищих частот перемикавання.

1.3 Переваги використання резонансних перетворювачів

Причина великого інтересу, який завжди викликали резонансні перетворювачі, полягає в тому, що вони, очевидно, вирішують усі проблеми, пов'язані зі звичайними перетворювачами ШІМ з жорстким перемиканням, пропонуючи значні переваги, підсумовані в наступному списку [5]:

- м'яке перемикавання (перемикавання нульової напруги, ZVS та/або перемикавання нульового струму, ZCS) значно зменшує втрати при перемиканні та енергію, необхідну для керування силовими перемикачами;
- плавні форми сигналу з відносно низьким напруженням dv/dt або di/dt , що зменшує навантаження на компоненти живлення;

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- паразитні елементи є частиною схеми обробки електроенергії: вони працюють для ефективного перетворення електроенергії, а не проти; отже, немає потреби в демпферних і затискних схемах для обмеження небажаних і небезпечних стрибків напруги та струму, які неминуче призводять до додаткових втрат потужності;

- низький рівень електромагнітних перешкод завдяки плавній формі хвилі та меншому шуму, створюваному паразитними елементами; вимоги до фільтрації менш вимогливі;

- завдяки всім перерахованим вище перевагам легше досягти високої ефективності, високої частоти комутації та високої щільності потужності.

Однак взаємодія з резонансними перетворювачами не є простим завданням:

1. Резонансні перетворювачі функціонують зовсім по-іншому від ШІМ-перетворювачів. Вони можуть мати кілька режимів роботи, що ускладнює їх аналіз як статичної, так і динамічної передачі. Нелінійні характеристики як статичних, так і динамічних функцій передачі часто виходять за межі простих математичних моделей. Це разом з різноманітністю топологій у світі резонансних перетворювачів може вимагати від розробників проведення детального дослідження перед вибором конкретної технології та режиму роботи для відповідності конкретним вимогам.

2. В більшості випадків їхні переваги супроводжуються значними недоліками, такими як великі пікові напруги або струми, широкий діапазон робочих частот тощо.

3. Резонансні перетворювачі можуть бути оптимізовані для високої ефективності в обмеженому діапазоні робочих умов. Однак досягнення стабільної ефективності при широкому спектрі навантажень та вхідних напруг є складним завданням і, в деяких випадках, практично неможливим.

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Значні реактивні струми можуть циркулювати в контурі перетворювача, навіть при відсутності навантаження, що може призводити до низької ефективності при частковому навантаженні.

5. Інструменти симуляції, такі як PSpice, LTspice, SIMetrix, допомагають в перевірці, але не надають повного розуміння загальної поведінки та не є ефективними для швидкої оптимізації.

Більше того, існують фактори, що обмежують використання високих частот та високої щільності потужності, які резонансні перетворювачі можуть лише частково зменшити або взагалі не вирішують [6]:

1. Вихрові струми в феритових сердечниках та ефекти "шкірного" і "зовнішнього" електричного поля в мідних провідниках є основними джерелами втрат у силових трансформаторах, які суттєво зростають зі збільшенням частоти перемикачів. Хоча резонансні форми можуть допомагати трохи, це не вирішує проблему повністю.

2. Для перетворювачів, що безпосередньо підключені до лінії живлення, резонансна робота не зменшує вимог до ізоляції та не дозволяє зменшити розміри вхідних фільтрів і об'ємних конденсаторів.

3. Навіть якщо резонансні перетворювачі менш чутливі до електромагнітних перешкод, паразитні елементи у складі фільтрів (такі як еквівалентний послідовний опір ESR та еквівалентна послідовна індуктивність ESL конденсаторів, а також наскрізна ємність індукторів і дроселів) роблять фільтрацію ЕМІ неефективною на високих частотах.

4. Зі збільшенням частоти перемикачів зростає шум, створений комутаційними пристроями, що ставить під загрозу ефективність конвертера.

5. Втрати провідності і керування в комутаційних пристроях також є проблемою, яку неможливо повністю усунути, але вони менш критичні завдяки

новим технологіям комутаційних пристроїв із SiC і GaN, які працюють ближче до ідеального комутатора, ніж традиційні кремнієві пристрої.

Серед багатьох резонансних топологій, що виникли за півстоліття історії резонансного перетворення в літературі та промисловості, за останнє десятиліття з'явилася топологія, яка стала домінуючою: резонансний перетворювач LLC. Він став основою живлення для широкого спектру електронного обладнання, що працює від мережі змінного струму (рисунок 1.4). Це включає споживчі пристрої (настільні комп'ютери, все в одному ПК, телевізори, потужні адаптери змінного та постійного струму та зарядні пристрої для портативних ПК), освітлювальне обладнання (вуличні та промислові світильники, потужні LED драйвери), телекомунікаційні системи, сервери і обчислювальні центри в хмарі, медичне обладнання, зарядні станції для електромобілів і джерела живлення з відкритою рамою [7].



Рисунок 1.4 – Типові джерела живлення з використанням резонансного перетворювача LLC

Завжди, коли потужність наближається до сотень ват і необхідно використовувати ефективні перетворювачі без зворотного ходу, або навіть на

						КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			17

нижчих рівнях потужності, коли важливі ефективність і обмеження розміру, резонансний перетворювач LLC виявляється найбільш вигідним вибором.

На менших рівнях потужності (до 500 Вт), найпоширенішою є напівмостова реалізація, в той час як на великих рівнях потужності розробники віддають перевагу повномостовій схемі. Проте немає жорсткої межі, оскільки вибір залежить від конкретних вимог системи та умов експлуатації.

У деяких випадках резонансний перетворювач LLC дозволяє створювати сучасне обладнання, яким ми користуємося сьогодні, наприклад, телевізори з плоским екраном з внутрішнім джерелом живлення. В інших випадках він замінює інші топології, наприклад, у блоках живлення настільних комп'ютерів, де він практично заміщує прямий перетворювач, або у блоках живлення телекомунікацій, де він зміцнює переваги повного моста зі зсувом фази.

Існують інші топології резонансного перетворення зі сприятливими характеристиками, про які ми згадували раніше. Чому ж резонансний перетворювач LLC здобув такий успіх? За думкою автора, найбільш обґрунтованою короткою відповіддю є те, що перетворювач LLC забезпечує ці переваги на найнижчому рівні проектних компромісів. Іншими словами, він пропонує високі властивості без серйозних недоліків: можливість працювати як підвищуючий, так і знижуючий перетворювач, обмежену напругу на напівпровідникових пристроях і співвідношення первинного та вторинного струмів лише трохи більше одиниці. Крім того, широкий діапазон вихідної потужності, включаючи умови холостого ходу, можна керувати з відносно вузькими змінами робочої частоти і завжди підтримувати режим м'якого перемикання для всіх напівпровідникових пристроїв. Щоб підсилити ці переваги, всі ці доброякісні властивості можна отримати майже безкоштовно, додавши індуктор до звичайного послідовного резонансного перетворювача LC,

						КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
							18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

а цей індуктор можна реалізувати просто шляхом введення повітряного зазору в силовий трансформатор.

Розглядаючи цей випадок, виглядає дивно, що промисловість витратила так багато часу, щоб прийняти цю топологію: вона була вперше описана в літературі у 1988 році, але її широке використання почалося лише в середині 2000-х років. Безсумнівно, є кілька причин для цього, і вони виходять за рамки цієї дискусії. За думкою автора, ймовірно, не було очевидно, що значні переваги, які може забезпечити ця топологія за таку низьку вартість, пов'язані з значним струмом намагнічування в силовому трансформаторі, і тому вона протягом довгого часу залишалася непоміченою [8].

Важливо зауважити, що резонансний перетворювач LLC, хоча і вважається найкращим рішенням для резонансного перетворення навіть сьогодні, має деякі недоліки порівняно з іншими резонансними топологіями. Один з них - складність: існує принаймні шість корисних режимів роботи, а також інші, які не є практично використовуваними або їх взагалі слід уникати. Це дуже нелінійна система, і її динамічні властивості дуже складно математично описати. Після теоретичного проектування потрібна значна кампанія моделювання, щоб отримати максимальну ефективність в практичному застосуванні. Однак переваги резонансного перетворювача LLC були настільки привабливими, що професіонали в області енергетики відчували силу волі йти через криву навчання, щоб відчути всі його переваги.

1.4 Висновки до першого розділу

У першому розділі було розглянуто основні тенденції та виклики, пов'язані з підвищенням щільності потужності в автономних джерелах живлення. Зокрема, ми зосередилися на еволюції від лінійних до комутаційних технологій, що сприяло значному зменшенню розмірів та ваги блоків живлення. Незважаючи

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

на значний прогрес у цій галузі, темпи мініатюризації залишаються відносно повільними через ряд технічних обмежень та змін у пріоритетах індустрії.

Також досліджено основні переваги використання резонансних перетворювачів, які можуть забезпечити значні переваги у підвищенні ефективності та зниженні втрат енергії. Проте їх впровадження також супроводжується численними викликами, що вимагають детального аналізу та оптимізації.

Загалом, розвиток автономних джерел живлення та впровадження нових технологій, таких як широкозонні матеріали SiC і GaN, відкриває нові перспективи для подальшого зменшення розмірів і ваги електронного обладнання. Однак для досягнення стабільної ефективності в широкому спектрі робочих умов необхідні подальші дослідження та інновації.

					КВРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
						20
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2 ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ LLC

Дослідження акумуляторних технологій для автомобілів стають все більш актуальними та нагальними. Проблеми, пов'язані з акумуляторами, такі як їх життєвий цикл, процес заряджання та оцінка працездатності, вирішуються за допомогою нових методів та інноваційних технологій. Одним із ключових аспектів, який впливає на популярність електромобілів, є швидкість зарядки. На сьогоднішній день тривалий час заряджання є однією з основних причин обмеженого поширення електромобілів.

2.1 Швидка зарядка як ключовий аспект

Для скорочення часу заряджання необхідні більш потужні джерела живлення та високоефективні електронні схеми. Дослідники активно працюють над створенням менших і легших зарядних пристроїв з винятково високою ефективністю. Швидка або прискорена зарядка акумуляторів, особливо літій-іонних, є головною метою сучасних розробників силових електронних схем. Постійно пропонуються нові методи та топології схем для поліпшення процесу швидкої зарядки.

У цьому контексті резонансні перетворювачі LLC відіграють важливу роль завдяки своїм унікальним характеристикам, таким як висока щільність потужності, високий коефіцієнт корисної дії (ККД), компактний розмір та легка конструкція. Ці перетворювачі здатні передавати електроенергію постійного струму з максимальною ефективністю в обох напрямках – від мережі до батареї та від батареї до мережі. Завдяки цим властивостям резонансні перетворювачі

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

LLC є оптимальним рішенням для реалізації швидкої зарядки акумуляторів електромобілів [9].

Таким чином, у даній кваліфікаційній роботі пропонується новий інтелектуальний алгоритм відстеження ефективності (SET) для резонансного перетворювача LLC на основі GaN. Цей алгоритм спрямований на підвищення ефективності процесу заряджання акумуляторів легких електромобілів, що є важливим кроком на шляху до ширшого впровадження електричних транспортних засобів.

2.2 Типологія та опис резонансних перетворювачів

Резонансні перетворювачі є спеціальним типом перетворювачів, які використовують контур бака для активного визначення потоку потужності між входом та виходом. Вони відрізняються від квазірезонансних перетворювачів, де резервуарний контур лише створює умови для м'якого перемикавання (ZVS або ZCS), не беручи участі в передачі потужності.

Інакше кажучи, у резонансних перетворювачах селективні властивості контуру бака (який реагує головним чином на сигнали з частотою, близькою до його резонансної, і значно менше на інші частоти) використовуються для регулювання амплітуди струмів і напруг у перетворювачі, що в кінцевому результаті визначає кількість потужності, переданої від джерела живлення до навантаження.

Таким чином, резонансні перетворювачі відрізняються синусоїдальними або кусково синусоїдальними формами струмів і напруг. Низький рівень вищих гармонік у формах хвиль та можливість досягнення м'якого перемикавання для всіх комутаційних пристроїв роблять їх сприятливими для зниження електромагнітних перешкод і відмінними кандидатами для конструкцій з високою щільністю потужності.

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сімейство резонансних перетворювачів має широкий спектр варіантів, що може бути важко узагальнити. Однак більшість з них можна включити до категорії "резонансний інвертор" [10]. Це система, яка перетворює постійну напругу в змінну напругу з низьким рівнем гармонік і надає живлення змінного струму для навантаження за допомогою випрямляча та фільтра низьких частот, як зображено на рисунку 2.1. Існують різні типи інверторів, які відрізняються комутаційними мережами та характеристиками резервуарного контуру, такими як кількість включених реактивних елементів і їх конфігурація [16]. Для обмеження аналізу в межах практичного використання будуть робитися певні припущення.

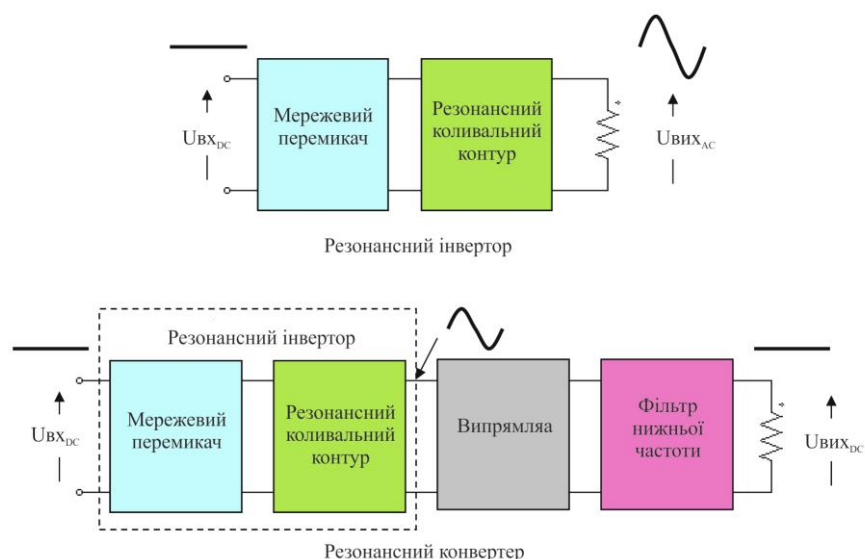


Рисунок 2.1 – Структурна схема резонансного інвертора та резонансного перетворювача

Основне у тому, що комутаційна мережа з'єднана з джерелом напруги та навантаженням, яке керує колом резервуара, може споживати або напругу, або струм. Ця мережа симетрично керується за напругою та часом, що створює напругу прямокутної форми. Потік потужності регулюється за допомогою частотної модуляції, а саме зміною частоти прямокутної хвилі ближче до або подалі від резонансної частоти контуру бака.

Варто відзначити, що в деяких випадках комутаційну мережу потрібно з'єднувати з колом резервуара через блокуючий конденсатор постійного струму, щоб зберігати вольт-секундний баланс між індуктивними компонентами резервуара та уникнути їх насичення. В інших випадках один конденсатор контуру бака може виконувати роль блокуючого конденсатора постійного струму.

Ці обмеження характеризують мережі комутаторів напівмостом і повним мостом. В термінології підсилювачів потужності комутаційні інвертори, що використовують такий тип комутаційної мережі, називаються резонансними інверторами класу D.

Упорядкування та структура контуру резервуара визначають статичні та динамічні характеристики інвертора чи перетворювача. Порядок контуру резервуара визначається кількістю включених реактивних елементів. Важливо відзначити, що під час циклу перемикання порядок контуру резервуара може змінюватися за певних умов, що називається мультирезонансом і може призводити до мультирезонансного інвертора чи перетворювача. В іншому випадку, якщо такі зміни не відбуваються, перетворювач вважається однорезонансним.

На інтуїтивному рівні зрозуміло, що більший порядок схеми резервуара веде до більшої кількості можливих конфігурацій. Однак не всі ці потенційні конфігурації є практично застосовними, а ті, які використовуються на практиці, ще менше.

Наприклад, з двома реактивними елементами (резервуар 2-го порядку) існує теоретично вісім можливих конфігурацій [11], але лише чотири з них можуть працювати з джерелом напруги. Зазвичай використовуються дві основні конфігурації, показані на рисунку 2.2: резонансний резервуар LC у серії (а) та резонансний резервуар LC паралельно (б).

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

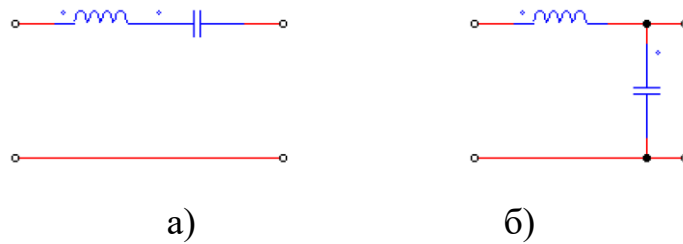


Рисунок 2.2 – Двоелементні схеми резервуарів:
а) – послідовна LC і б) – паралельна LC

За умови трьох реактивних елементів (схема резервуара 3-го порядку) можна вибрати з тридцяти шести можливих конфігурацій, проте лише п'ятнадцять з них є практично застосовними для використання з джерелом напруги. На рисунку 2.3 показані дві найбільш поширені схеми резервуарів: LCC, яка використовує одну котушку індуктивності та два конденсатори з вихідним портом, паралельно до одного конденсатора (а), і її подвійна конфігурація, LLC, що використовує дві котушки індуктивності та один конденсатор з вихідним портом, паралельно до однієї котушки індуктивності (б).

Важливо відзначити, що схема резервуара LCC на рисунку 2.3а є основою для інверторів, які часто використовуються у електронних баластах для газорозрядних ламп [12].

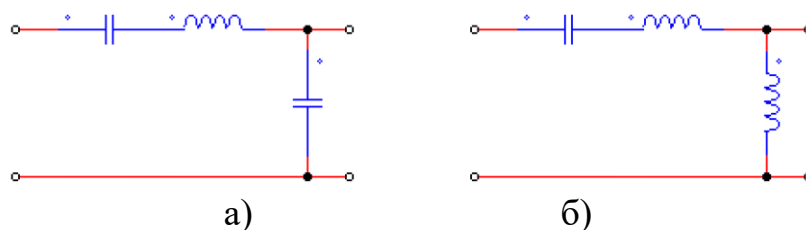


Рисунок 2.3 – Триелементні схеми резервуарів: а) –LCC і б) –LLC

З чотирма реактивними елементами (схеми бака 4-го порядку) можливі 182 різні конфігурації, але тільки близько шістдесят з них можуть бути практично застосовані. Застосування схем резервуарів четвертого порядку досить рідке і

обмежене обраною кількістю придатних конфігурацій. Вони найчастіше використовуються для того, щоб врахувати вплив паразитних елементів, які можуть перетворити резервуари 3-го порядку в 4-й порядок через включення таких компонентів, як ємність переходу або внутрішня ємність обмотки.

Як було зазначено раніше, для будь-якого резонансного інвертора існує пов'язаний резонансний перетворювач постійного струму, який отримується шляхом випрямлення та фільтрації вихідного сигналу інвертора. Ці інвертори на основі напівмостових або повних мереж комутатора зазвичай створюють резонансні перетворювачі класу D [13].

У самостійному режимі блок випрямляча буде з'єднаний з резонансним інвертором через трансформатор для забезпечення необхідної ізоляції відповідно до правил безпеки. Блок випрямляча може бути налаштований як двопівперіодний випрямляч з необхідним розміщенням центрального відводу вторинної обмотки трансформатора, або як гребневий випрямляч, який не вимагає відводів. Перший варіант підходить для високих струмів при низькій напрузі на виході, другий варіант – навпаки, для високої напруги при малих струмах на виході.

Що стосується фільтра низьких частот, його конфігурація залежить від структури контуру резервуара. Якщо контур резервуара налаштований для навантаження з споживанням напруги, фільтр складатиметься лише з конденсаторів. У випадку навантаження з споживанням струму, використовується згладжувальний фільтр типу LC. Усі можливі конфігурації випрямляча та фільтра низьких частот представлені на рисунку 2.4.

Для спрощення на рисунку 2.4 діоди показані як випрямлячі. Проте в реальних додатках діоди часто замінюються на МОП-транзистори, які керуються так, щоб імітувати поведінку діодів, що відомо як синхронне випрямлення. Використання синхронного випрямлення дозволяє значно знизити втрати на

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

провідність, пов'язані з випрямленням, що суттєво підвищує загальну ефективність системи.

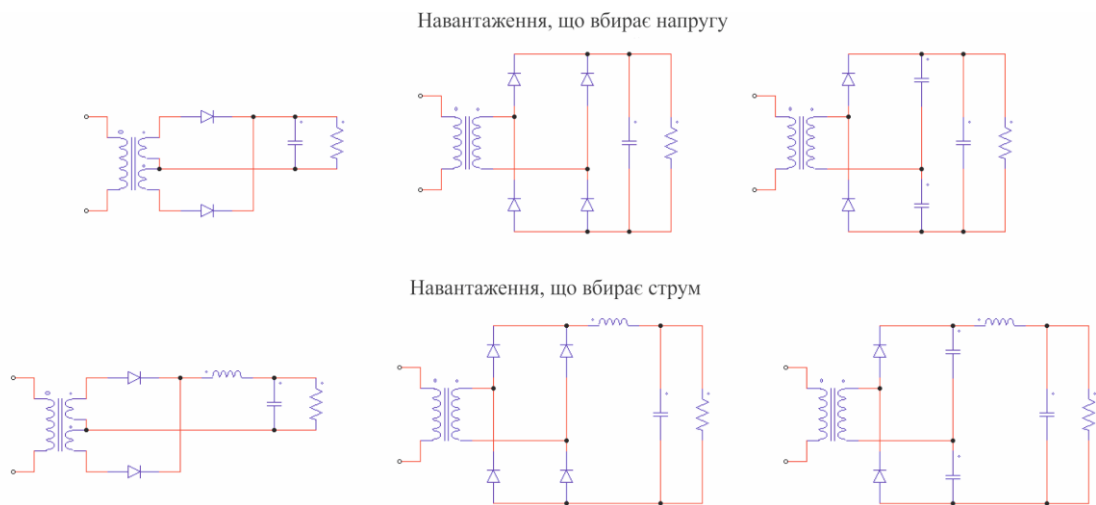


Рисунок 2.4 – Комбінації випрямляча з трансформаторним зв'язком і фільтра низьких частот

Синхронні випрямлячі є особливо корисними в системах з високими струмами, де втрати на провідність можуть значно знизити ефективність. Заміна діодів на керовані МОП-транзистори забезпечує менші втрати енергії, особливо при низьких напругах та високих струмах, що робить їх незамінними у сучасних високоефективних джерелах живлення.

Таким чином, правильний вибір та налаштування компонентів фільтра низьких частот та випрямляча є критично важливими для досягнення високої ефективності резонансного перетворювача.

Синхронне випрямлення (SR) приносить кілька викликів, але також відкриває нові можливості. Правильне синхронізування SR MOSFET дозволяє використовувати фазове зсувне керування для покращення функцій перетворювача або навіть забезпечення двонаправленого потоку енергії.

Резонансні резервуари серії LC та паралельного типу, зображені на рисунку 2.2, є основою відповідних резонансних перетворювачів другого порядку. Ці перетворювачі представлені на рисунку 2.5 у їхній напівмостовій конфігурації та детально розглянуті в літературі [7].

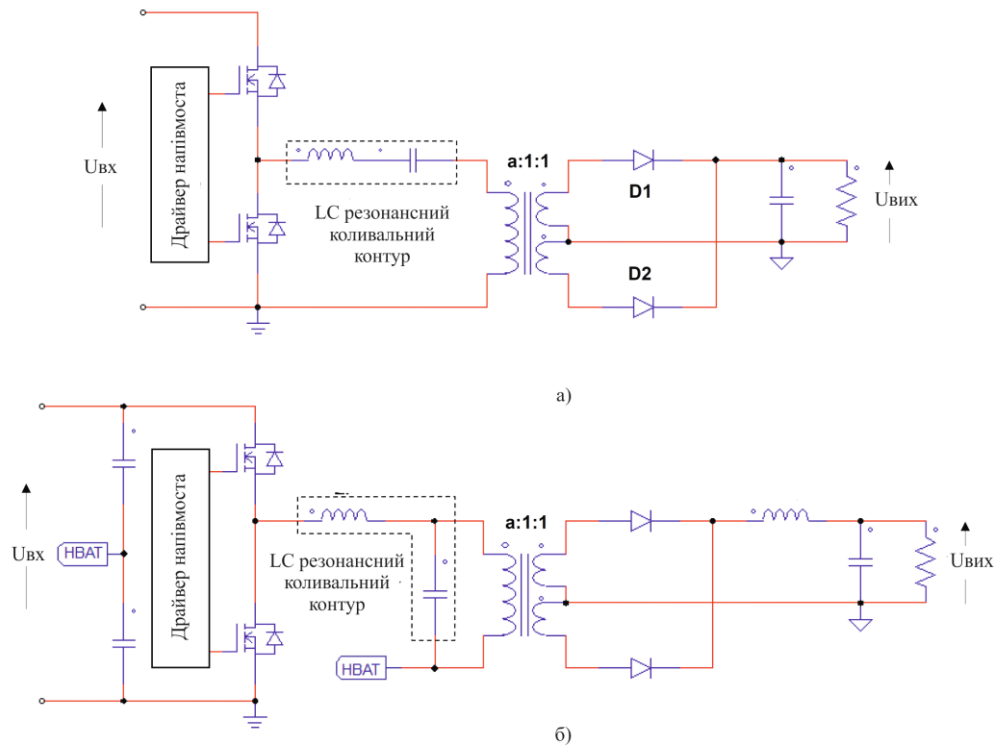


Рисунок 2.5 – Резонансні перетворювачі 2-го порядку:

а) – послідовна LC і б) – паралельна LC

В резонансному перетворювачі серії LC, резонансний конденсатор C_r також виконує функцію блокуючого конденсатора постійного струму. У паралельному резонансному перетворювачі LC, два вхідних конденсатори C_b мають великі значення, що створює жорстку точку, напруга якої дорівнює половині вхідної напруги ($U_{вх}/2$). Вони блокують постійну складову прямокутної хвилі, створену напівмостом, тому напруга на C_r є чистим змінним струмом.

Варто зазначити, що синхронне випрямлення дозволяє суттєво зменшити втрати на провідність, покращуючи загальну ефективність системи. Цей підхід особливо ефективний у застосуваннях з високими струмами та низькими

напругами, де втрати на діодах можуть бути значними. Заміна діодів на керовані МОП-транзистори забезпечує значне підвищення ефективності, особливо при високих навантаженнях.

Таким чином, правильна інтеграція синхронного випрямлення та оптимальне налаштування компонентів резонансного контуру є ключовими для досягнення високої ефективності в резонансних перетворювачах.

2.3 Порівняння топологій подвійного активного мостового перетворювача ШІМ та резонансного перетворювача LLC/CLLC

Здатність до двонаправленого потоку енергії, висока ефективність та щільність потужності, а також великий коефіцієнт підсилення роблять топології подвійного активного мостового перетворювача ШІМ (рис. 2.6) і резонансного перетворювача LLC/CLLC (рис. 2.7) особливо привабливими для систем заряджання акумуляторів. Ці топології вже досліджувалися в ряді наукових робіт, які вивчають їхні можливості та особливості [13]. Порівняння цих двох топологій відносно їхніх переваг і недоліків є предметом активних обговорень серед науковців [14].

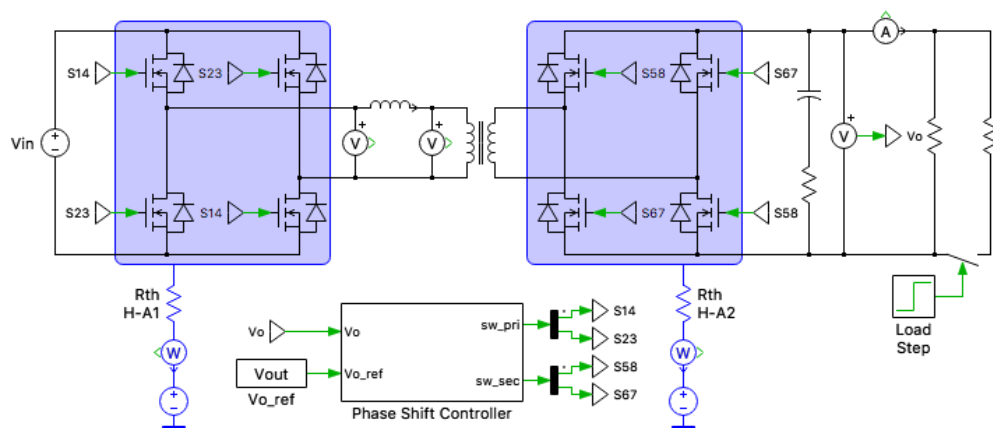


Рисунок 2.6 – Подвійний активний мостовий перетворювач ШІМ

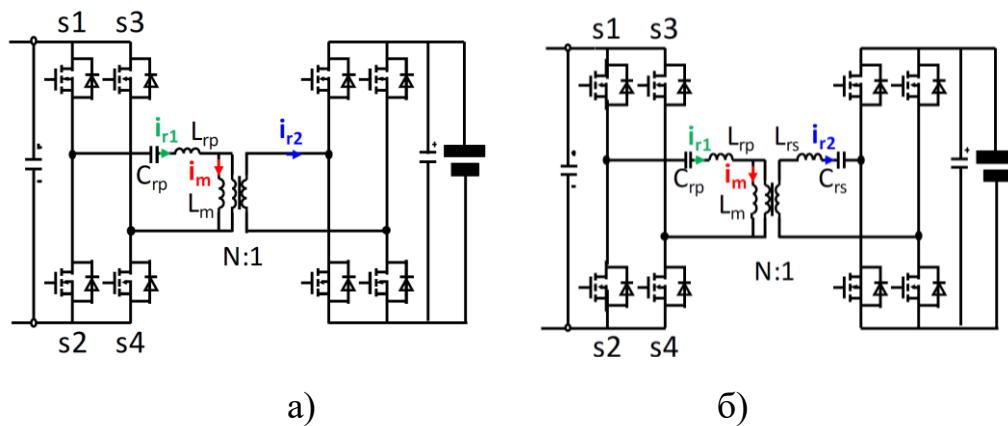


Рисунок 2.7– Резонансний перетворювач: а) – LLC; б) – CLLC

Ці топології стають особливо важливими у контексті систем заряджання акумуляторів через їхню спроможність ефективно керувати енергійним потоком в обидва напрямки. Перетворювачі LLC/CLLC здатні до ефективно роботи як у режимі заряджання, так і у режимі розряджання, забезпечуючи оптимальну ефективність та довговічність акумуляторів. Відтак, ці технології стають невід'ємною складовою сучасних систем заряджання електричних транспортних засобів та є предметом постійного інтересу для дослідників у цій галузі.

Подвійний активний мостовий перетворювач, завдяки своїй простій конструкції, дозволяє легко керувати за допомогою стандартного методу ШІМ [15]. В той же час, резонансні перетворювачі LLC і CLLC контролюються за допомогою частотної модуляції, що робить їхні конструктивні особливості взаємозамінними, за винятком резонансних схем бака [16]. Деталі конструкції цих перетворювачів ретельно розглядаються в проектних інструкціях від виробників напівпровідників [17].

Резонансні перетворювачі LLC і CLLC знаходять широке застосування в розумних електромережах та автомобільних системах [18]. В літературі зустрічаються різноманітні дослідження щодо резонансних перетворювачів LLC, зокрема, топології матричних перетворювачів, які поєднують в собі

випрямляч та корекцію коефіцієнта потужності (PFC) з резонансними перетворювачами LLC [19].

Ці технології виявляються дуже перспективними у контексті електронних систем, особливо у зв'язку з розвитком та впровадженням сучасних автомобільних програм та розумних електромереж.

Зазвичай, напруга акумулятора може змінюватися в значному діапазоні під час процесу заряджання. Багато наукових досліджень присвячені модифікації топології схем або управлінню резонансними перетворювачами LLC шляхом введення додаткових компонентів з метою підвищення їхньої ефективності [20]. Наприклад, для забезпечення високої ефективності роботи резонансного перетворювача LLC може використовуватися метод відстеження ефективності за допомогою збурення та спостереження [21].

Ці дослідження відкривають шляхи для пошуку нових підходів та розвитку більш ефективних методів управління резонансними перетворювачами для оптимізації їхньої роботи під час заряджання акумуляторів.

Використання комутаційних компонентів GaN з низькими втратами є одним з ключових методів для підвищення ефективності перетворювачів DAB і LLC. Останнім часом порівняння компонентів GaN і SiC для комутації стало однією з найактуальніших тем у галузі силової електроніки [22].

Використання синхронного випрямлення є ще одним ефективним способом підвищення ефективності резонансних перетворювачів LLC. Цей метод передбачає активацію затворів комутаційних компонентів на вторинній стороні, коли вони використовуються для проведення негативного струму через перемикачі, а саме через їх корпусні діоди. Регулювання часу керування комутаційними компонентами вторинної сторони здійснюється в залежності від вимірної напруги сток-виток або струму витік-витік [21]. Крім того, були проведені дослідження з модуляції частоти перемикання перетворювачів LLC за

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

допомогою синхронного випрямлення [22]. Ці дослідження вказують на постійне покращення методів і технологій, що використовуються в силовій електроніці, з метою досягнення більшої ефективності та надійності перетворювачів енергії.

Оптимальна точка роботи перетворювача LLC відзначається тим, що резонансний струм у ньому має чисто синусоїдальну форму. Для забезпечення високої ефективності роботи перетворювача LLC в усьому діапазоні напруги акумулятора, вхідна напруга ($V_i n$) має варіюватися відповідно до рівня напруги батареї, щоб забезпечити постійну роботу перетворювача LLC у режимі резонансу [23]. В літературі також згадується використання різних топологій PFC та заміна резонансного перетворювача на топології DC/DC за допомогою впровадження стратегії змінної напруги в ланцюгу постійного струму [24]. Ці підходи свідчать про постійний пошук оптимальних рішень у силовій електроніці з метою досягнення найвищої продуктивності та ефективності роботи електронних перетворювачів

2.4 Контроль стану низького навантаження

Стан низького навантаження виникає при зниженні зарядного струму акумулятора, який може бути виявлений за допомогою середнього вхідного струму або моніторингу напруги керуючого сигналу [25]. Рішення щодо методу контролю вибирається відповідно до вимог і умов.

Струм намагнічування резонансного перетворювача LLC при роботі з низьким навантаженням призводить до додаткових втрат потужності. Це досягається шляхом регулювання часу затримки між сигналами перемикання двох фазних гілок первинного повного моста, щоб забезпечити оптимальну робочу точку високої ефективності. Існує також значна кількість літератури, присвячена цьому методу [26]. Умови легкого навантаження резонансного перетворювача LLC є предметом інтенсивних досліджень з контролю фазового зсуву [27].

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Використання пакетного режиму або DOM є одним з найбільш зручних методів роботи перетворювачів постійного та постійного струму, і було проведено кілька досліджень з його використанням [28]. Дослідження щодо оптимізації часу ввімкнення та вимкнення є важливими для контролю вихідної напруги та струму перетворювача [29]. Перехід резонансного перетворювача LLC у режим "вимкнено" є також важливою проблемою для керування пусковим струмом та підвищення його ефективності [30].

Дослідження комбінацій двох або трьох методів роботи резонансного перетворювача LLC становить одну з цікавих тем для досягнення високоефективної роботи. Використання управління мертвим часом та режимів переривчастої роботи в спільному використанні сприяє розробці нової гібридної техніки керування. Крім того, широко відомий метод частотної модуляції застосовується в різноманітних умовах роботи резонансних перетворювачів LLC, в той час як контроль мертвого часу може бути використаний для оптимізації процесу зарядки батареї у стані низького навантаження.

2.5 Висновки до другого розділу

У даному розділі проведено огляд теоретичних основ резонансних перетворювачів LLC, розглянуто ключові аспекти швидкої зарядки, представлено типологію та детальний опис резонансних перетворювачів. Окрім цього, здійснено порівняння топологій подвійного активного мостового перетворювача ШІМ та резонансного перетворювача LLC/CLLC, зосереджуючись на їхніх перевагах та недоліках у різних умовах експлуатації. Розглянуто методи контролю стану при низькому навантаженні, які забезпечують ефективну роботу резонансних перетворювачів при різних рівнях навантаження. Аналіз включає порівняння ефективності, надійності та інших ключових параметрів, що дозволяє глибше зрозуміти особливості та потенціал використання резонансних перетворювачів у сучасних електронних системах.

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

3 ТОПОЛОГІЯ ТА КОНСТРУКЦІЯ РЕЗОНАНСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА LLC

У даному дослідженні розроблено новий метод, спрямований на досягнення найвищої доступної ефективності для перетворювача LLC Switch (GaN). Цей новий підхід ставить за мету відстеження ефективності перетворювача в різних умовах навантаження під час швидкої зарядки акумулятора. Основною метою розглянутого алгоритму є нагляд за ефективністю та відповідне коригування режиму роботи перетворювача в залежності від контрольованої ефективності та стану навантаження. Для досягнення максимально можливої ефективності були реалізовані три різні режими роботи. Запропонований інтелектуальний алгоритм відстеження ефективності можна описати як схему «моніторуй і змінуй». Таким чином, протягом всього процесу зарядки перетворювач може підтримувати ефективність на максимально високому рівні.

3.1 Резонансний перетворювач LLC як зарядний пристрій для акумулятора

Перетворювачі LLC відзначаються численними перевагами, що робить їх надзвичайно популярними для використання у ізольованих зарядних пристроях. Вони вирізняються великою ефективністю, що дозволяє оптимізувати споживання енергії, а також високою щільністю потужності, що забезпечує компактні розміри пристрою. Низька напруга перемикачів забезпечує економію електроенергії та знижує втрати в системі. Крім того, широкий діапазон регулювання вихідної потужності дозволяє пристрою працювати з різноманітними навантаженнями, що робить його більш гнучким у застосуванні. Відносно просте управління функціями забезпечує зручне та ефективне

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

користування пристроєм без складних налаштувань. Таким чином, перетворювачі LLC є передовим вибором для ізольованих зарядних пристроїв, надійно відповідаючи потребам сучасного ринку та споживачів.

В сучасному світі системи швидкої зарядки акумуляторів та бортові зарядні пристрої для електромобілів в основному використовують резонансні перетворювачі LLC через їх високу ефективність і потужність. Однак, при роботі з низькими рівнями вихідної потужності і низьким вихідним струмом, особливо на високих частотах перемикання, регулювання вихідної напруги стає викликом, що може призвести до значного зниження ефективності.

Традиційні характеристики заряджання батареї через перетворювач LLC представлені на рисунку 3.1. Через різні умови навколишнього середовища та тривалість заряджання, проміжок часу подано як одиницю, де одиничний час символізує кінець процесу заряджання.

Під час зарядки постійним струмом напруга батареї спочатку зростає майже лінійно, а коефіцієнт корисної дії (ККД) підвищується за рахунок наближення до номінальної робочої точки перетворювача. Вихідна напруга перетворювача регулюється для збереження зарядного струму під зростаючою напругою. Однак приблизно при 80% рівні заряду батареї процедура змінюється, і заряджання переходить до області постійної напруги, де зарядний струм зменшується через загальний заряд, переданий батареї. Щоб забезпечити спадний струм, знижується вихідна напруга перетворювача LLC.

Для зменшення вихідної напруги частота перемикання LLC перетворювача збільшується, коли процес зарядки наближається до завершення, при цьому ККД LLC перетворювача також істотно знижується.

Підвищення ефективності роботи резонансного перетворювача LLC досягається, коли вихідна потужність досягає максимального рівня. Однак збільшення частоти перемикань призводить до зменшення ефективності, як

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

показано на рисунку 3.1. Виявлено, що ефективність перетворювача LLC становить менше 75% за чверть загального часу заряджання. Це свідчить про значні втрати енергії під час процесу заряджання.

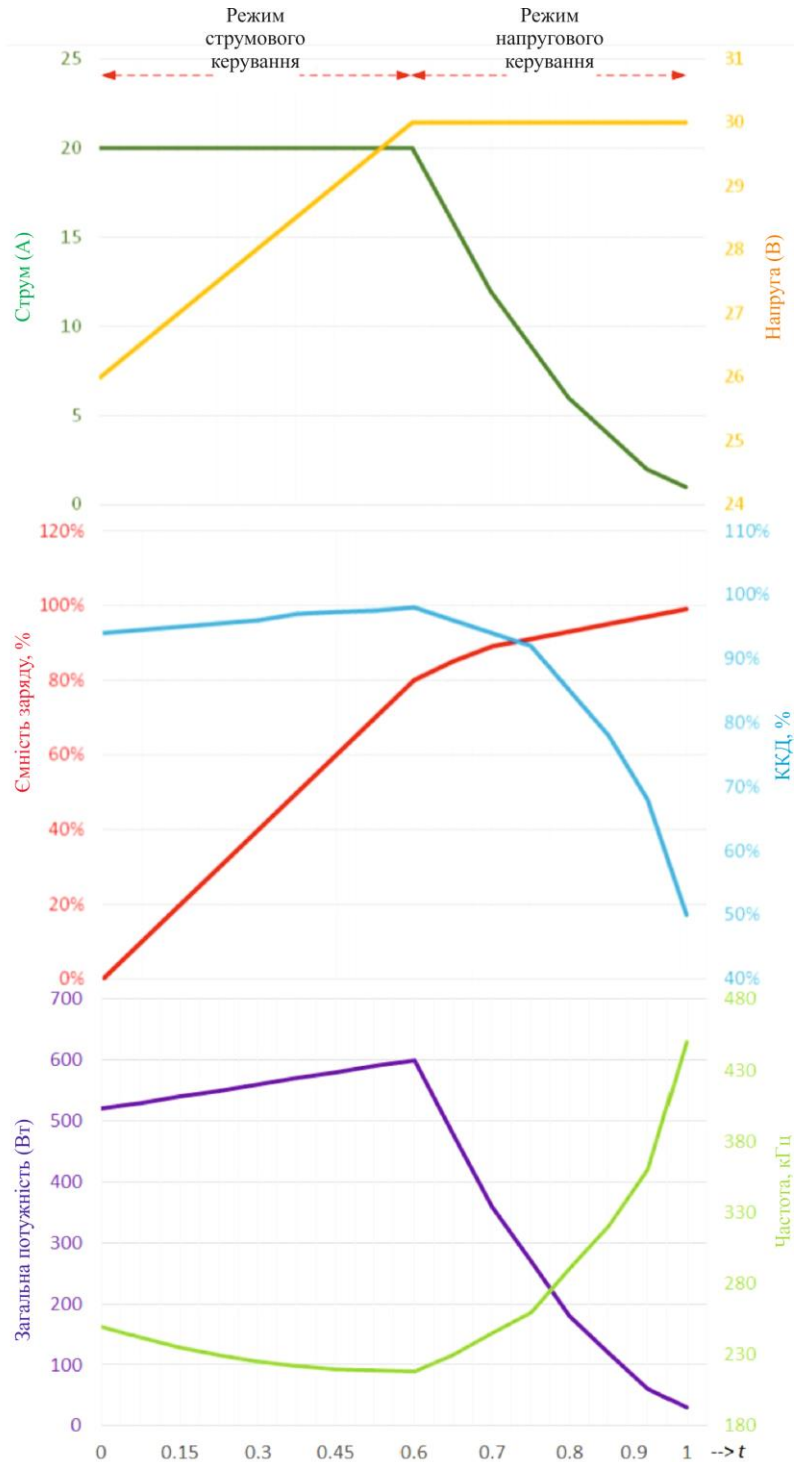


Рисунок 3.1 – Профіль заряду батареї резонансного перетворювача LLC

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

При збільшенні частоти робоча точка перетворювача переміщується в позарезонансну область. Однак головною метою є досягнення вищої ефективності при легкому навантаженні, яке включає важливу частину процесу заряджання батареї. Це становить основну мету представленого дослідження.

Отже, основна концепція цього дослідження полягає в досягненні максимально можливої ефективності для загальної робочої області перетворювача LLC під час заряджання акумулятора.

3.2 Запропонована топологія та інтервали роботи

У даній роботі використовується традиційна повномостова топологія резонансного перетворювача LLC з впровадженням силових транзисторів GaN, як показано на рисунку 3.2. Розроблено процес швидкого заряджання для акумуляторної батареї легкого електромобіля, який можна реалізувати в лабораторних умовах. На вторинній стороні застосовується інша топологія мосту, що забезпечує синхронну та двонаправлену роботу. Трансформатор LLC з'єднує первинну та вторинну сторони, забезпечуючи необхідну індуктивність для виконання резонансної операції. Резонансний контур діє як фільтр гармонік, налаштований за допомогою змінної частоти перемикавання.

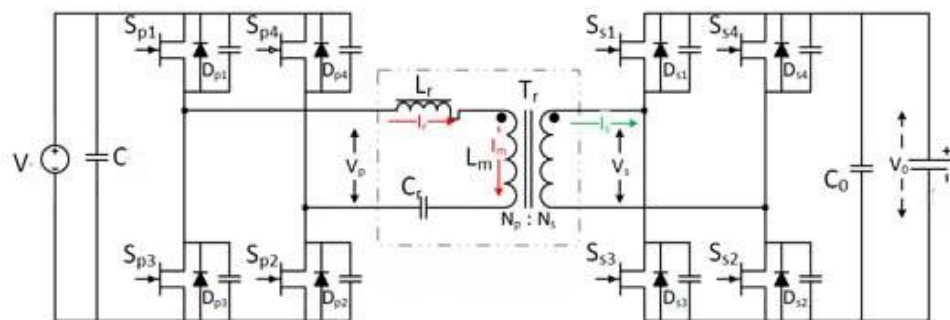


Рисунок 3.2 – Топологія резонансного перетворювача LLC

На рисунку 3.3 показано шість робочих інтервалів перетворювача LLC та відповідні форми сигналів. Кожен з цих інтервалів має вплив на загальну продуктивність перетворювача.

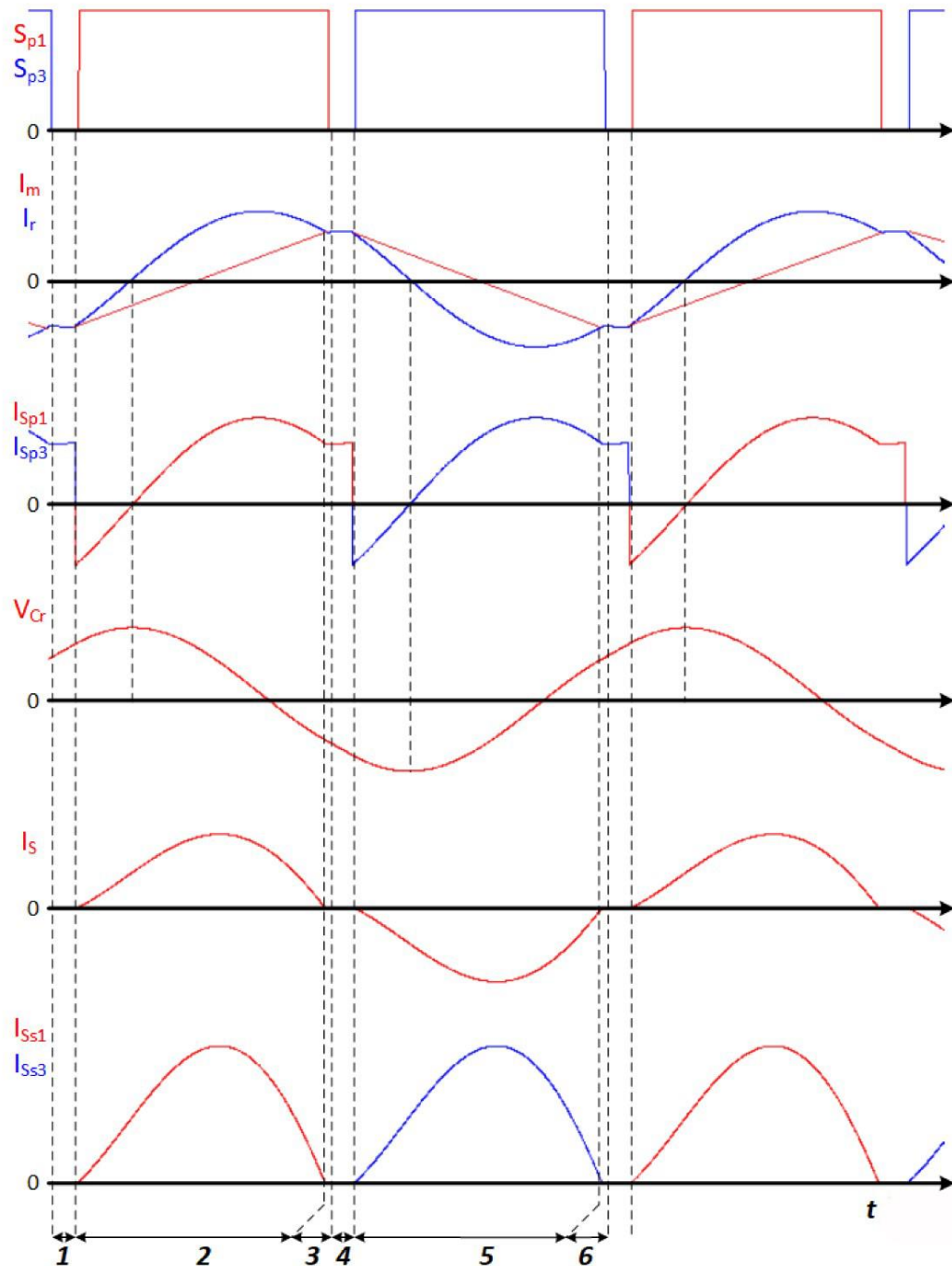


Рисунок 3.3 – Осцилограми резонансного перетворювача LLC і шість (6) інтервалів роботи

Інтервал-1 охоплює час простою для транзисторів, протягом якого потужність не передається на вторинну обмотку. У цей період первинний струм заряджає кінцеві ємності S_{P3} і C_{P4} , тоді як ємності C_{P1} і C_{P2} розряджаються. Після завершення процесу заряджання та розряджання первинний струм проходить через D_{P1} і D_{P2} , забезпечуючи перемикання на нульовій напрузі (ZVS). На рисунку 3.4 показано передачу потужності під час інтервалу-1.

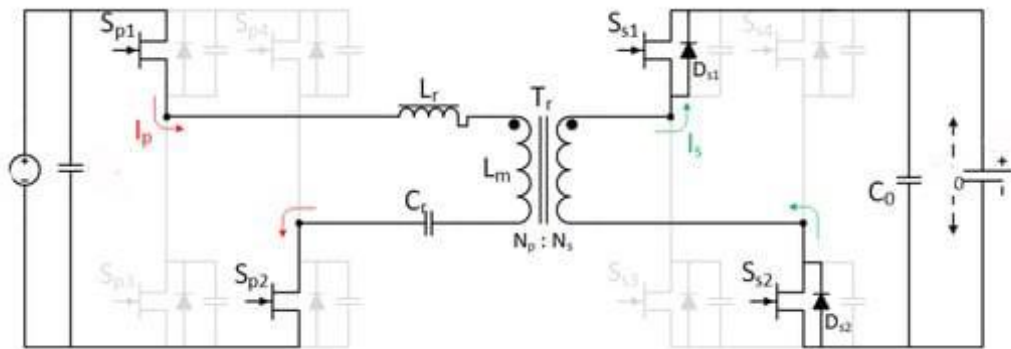


Рисунок 3.4 – Топологія резонансного перетворювача LLC під час інтервалу-1

В інтервалі-2 перемикачі C_{P1} і C_{P2} увімкнені, і потік потужності через трансформатор зображено на рисунку 3.5. Первинний струм змушений комутувати з негативного на позитивний завдяки прикладеній позитивній напрузі. Тим часом на вторинній стороні увімкнені D_{S1} і D_{S2} , щоб забезпечити навантаження постійною напругою. Прикладена до первинної сторони напруга постійного струму викликає лінійно зростаючий струм намагнічування через L_m . Через C_r і L_r виникає явище електричного резонансу, що спричиняє синусоїдальний струм у первинній обмотці. Коли струм намагнічування перевищує струм обмотки, передача потужності припиняється, і інтервал-2 завершується.

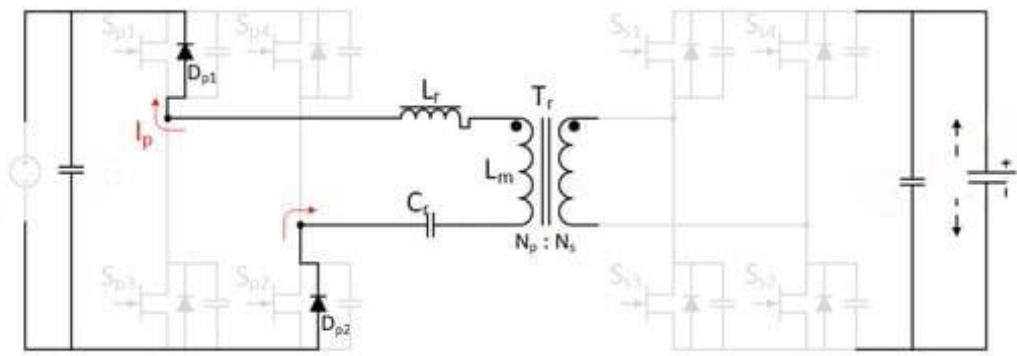


Рисунок 3.5 – Топологія резонансного перетворювача LLC під час інтервалу-2

На інтервалі-3 вторинний струм I_s не сприяє зарядженню конденсатора вихідного фільтра, а передача потужності завершується припиненням струмового резонансу. Первинний струм, який тепер дорівнює струму намагнічування, продовжує зростати, поки S_{p1} і S_{p2} не вимикаються, що завершує цей інтервал. Потік потужності для інтервалу-3 показано на рисунку 3.6.

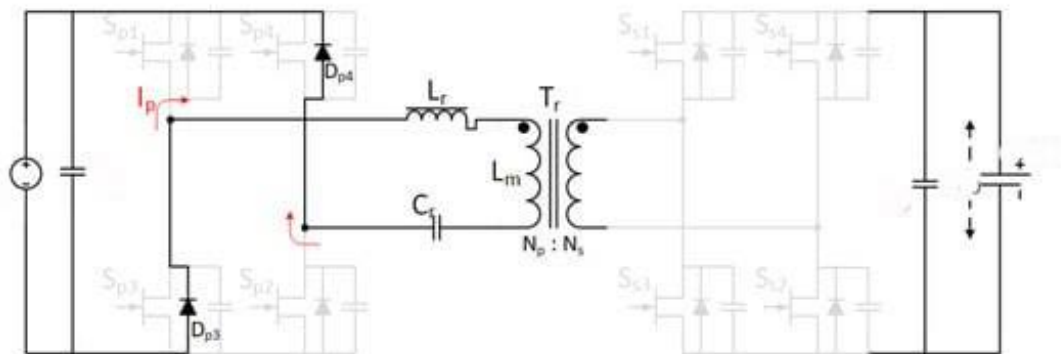


Рисунок 3.6 – Топологія резонансного перетворювача LLC під час інтервалу-3

Інтервал-4 охоплює час простою для пари S_{p3} і S_{p4} , протягом якого не відбувається передача потужності, як показано на рисунку 3.7. Первинний струм заряджає кінцеві ємності S_{p1} і S_{p2} , тоді як ємності S_{p3} і S_{p4} розряджаються. Після

процесу заряджання та розряджання первинний струм спрямовується через D_{P3} і D_{P4} , забезпечуючи роботу з перемиканням нульової напруги.

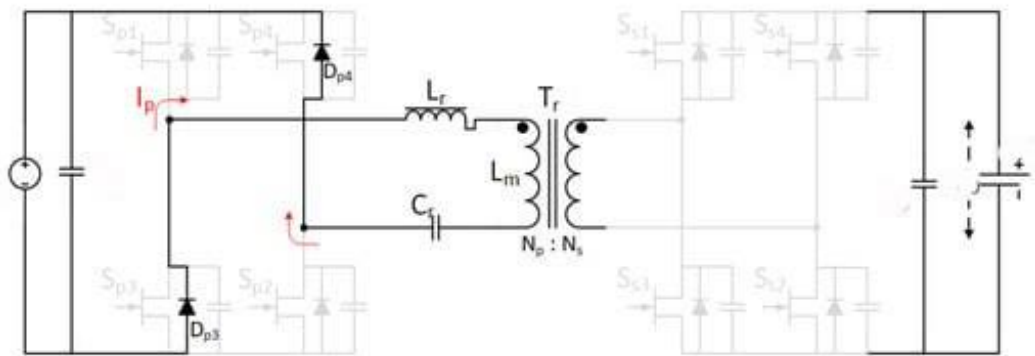


Рисунок 3.7 – Топологія резонансного перетворювача LLC під час інтервалу-4

Для інтервалу-5 пара S_{P3} і S_{P4} вмикається, і потужність передається на вторинну обмотку. Через прикладену негативну напругу до первинної обмотки трансформатора струм змушений змінюватися з позитивного на негативний. По суті, інтервал-5 є аналогом інтервалу-2 для транзисторів S_{P3} і S_{P4} , а потік потужності показано на рисунку 3.8.

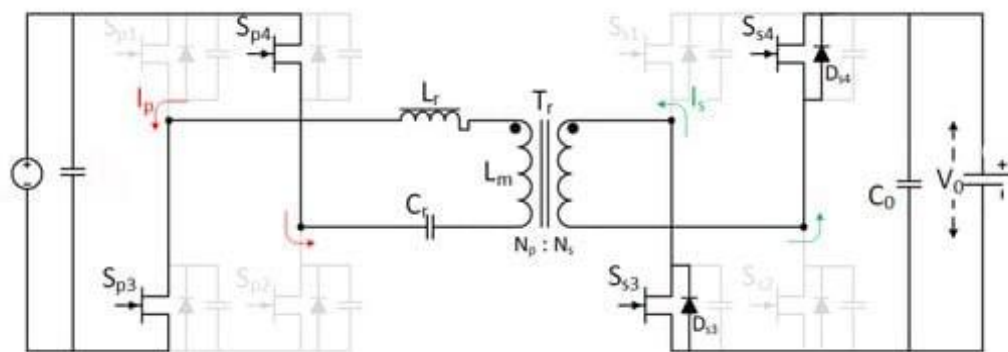


Рисунок 3.8 – Топологія резонансного перетворювача LLC під час інтервалу-5

На інтервалі-6, через коливання первинного струму, синусоїдальний струм падає нижче струму намагнічування, що дозволяє струму намагнічування

домінувати. Струм зростає до нуля, поки S_{P3} і S_{P4} не переходять у вимкнений стан. Завдяки плавному згасанню вторинного струму, D_{S3} і D_{S4} також плавно вимикаються. Інтервал завершується вимкненням S_{P3} і S_{P4} . Потік потужності показано на рисунку 3.9.

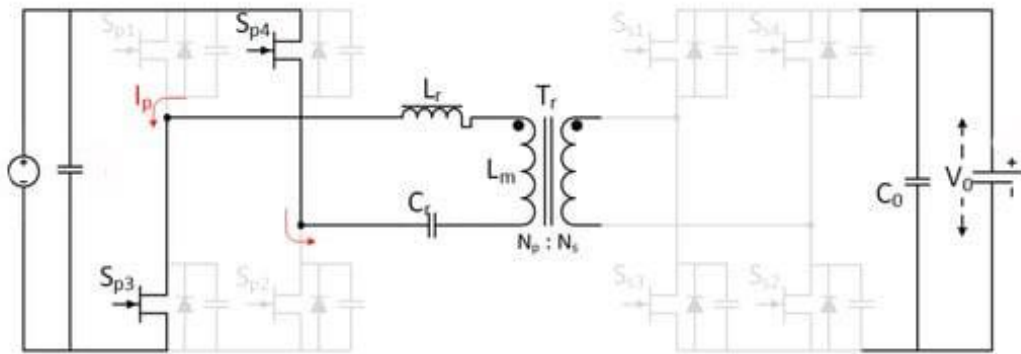


Рисунок 3.9 – Топологія резонансного перетворювача LLC під час інтервалу-6

Ці інтервали в сукупності визначають загальну продуктивність перетворювача LLC, впливаючи на його ефективність, стабільність та здатність до обробки різних навантажень. Кожен з них відіграє важливу роль в забезпеченні високоефективного та надійного процесу перетворення енергії.

3.3 Конструкція перетворювача LLC

Через складну схему імпедансу резонансного перетворювача LLC, резонансна робота визначається двома умовами, кожна з яких відповідає певній резонансній частоті. Перша умова характеризується нескінченним опором навантаження, що відповідає роботі без навантаження або розімкнутого контуру, і резонансна частота f_{R1} визначається рівнянням (3.1). Друга резонансна частота f_{R2} відповідає нульовому опору навантаження, що ілюструє роботу в умовах короткого замикання, і визначається рівнянням (3.2).

$$f_{R1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} . \quad (3.1)$$

$$f_{R2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_m)C_r}} . \quad (3.2)$$

Теоретично, перша частота застосовується для умов легкого навантаження, тоді як друга – для умов сильного навантаження. Проте, у більшості випадків неефективно працювати в околі першої частоти через низьке значення імпедансу, що призводить до високого струму. Коефіцієнт підсилення напруги резонансного перетворювача LLC визначається рівнянням (3.3).

$$M_g = \frac{n \cdot U_0}{U_{ex}} . \quad (3.3)$$

Нормована частота визначається як відношення частоти перемикання до резонансної частоти, як зазначено у рівнянні (3.4).

$$f_n = \frac{f_{sw}}{f_0} . \quad (3.4)$$

Нормалізована індуктивність L_n наведена в рівнянні (3.5).

$$L_n = \frac{L_m}{L_r} . \quad (3.5)$$

Коефіцієнт якості перетворювача змінюється залежно від навантаження і визначається у рівнянні (3.6).

					КВРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q_e = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{R_e} \quad (3.6)$$

Рівняння підсилення резонансного перетворювача LLC наведено у рівнянні (3.7).

$$M_g = \left| \frac{L_n \cdot f_n^2}{[(L_n + 1) \cdot f_n^2 - 1] + j[(f_n^2 - 1) \cdot f_n \cdot Q_e \cdot L_n]} \right| \quad (3.7)$$

Еквівалентний резистор навантаження резонансного перетворювача LLC R_e , подано у рівнянні (3.8).

$$R_e = \frac{8 \cdot n^2}{\pi^2} \cdot \frac{U_0}{I_0} \quad (3.8)$$

Коефіцієнт якості перетворювача змінюється від 1,8 при максимальному навантаженні до 0,2 при мінімальному навантаженні.

Нормована індуктивність L_n дорівнює 26, що є значно вищим, ніж зазвичай для перетворювачів LLC. Однак це значення дозволяє більш широко варіювати коефіцієнт підсилення при роботі поза резонансом, забезпечуючи більш універсальний перетворювач для спеціальних програм заряджання акумулятора. З урахуванням цих параметрів характеристики підсилення перетворювача можна отримати як функцію частоти перемикання, як показано на рисунку 3.10: фіксоване підсилення для змінного навантаження на резонансній частоті.

					КВРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

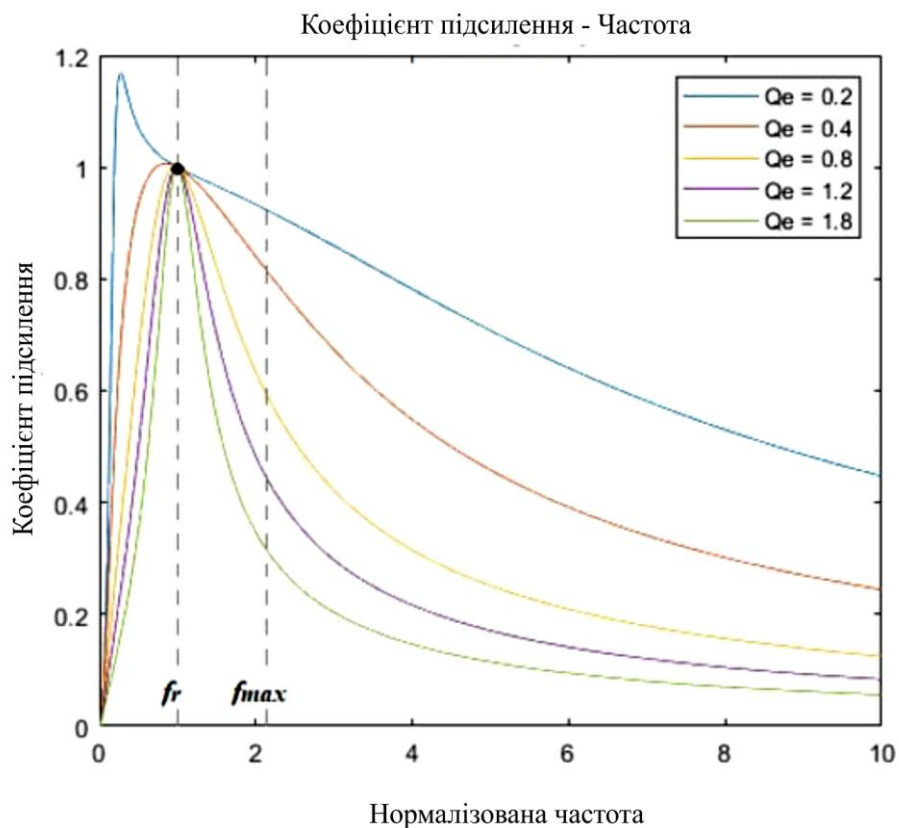


Рисунок 3.10 – Графіки залежності підсилення від частоти для резонансного перетворювача LLC

Основні параметри запропонованого перетворювача LLC наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Конструктивні параметри резонансного перетворювача LLC

Параметр	Значення
Загальна потужність – P_0	600 Вт
Вхідна напруга – $U_{вх}$	200 В DC
Вихідна напруга – $U_{вих}$	25.9 В–29.4 В DC
Резонансний конденсатор – C_r	22 нФ
Індуктор витоку трансформатора як резонансний індуктор – L_r	24.2 мкГн
Індуктор намагнічування трансформатора – L_m	630 мкГн
Коефіцієнт трансформації трансформатора – n	6.15
Сердечник трансформатора	0Т45530ЕС
Перемикач Primar Side GaN	4 × GS66508Т

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

GaN перемикач вторинної сторони	4 × GS61008T
Вихідний конденсатор – C_0	560 мкФ
Вхідний конденсатор – $C_{вх}$	560 мкФ

Вихідна напруга на затворі GaN перемикаючих елементів має бути на рівні приблизно +6 В постійного струму та -3 В постійного струму. У даній роботі розроблена схема приводу затвора для GaN-пристроїв, яка показана на рисунку 3.11. Напівмостова комутаційна схема живлення побудована, а конструкція печатної плати розроблено з урахуванням вказівок, наведених у заявці [33].

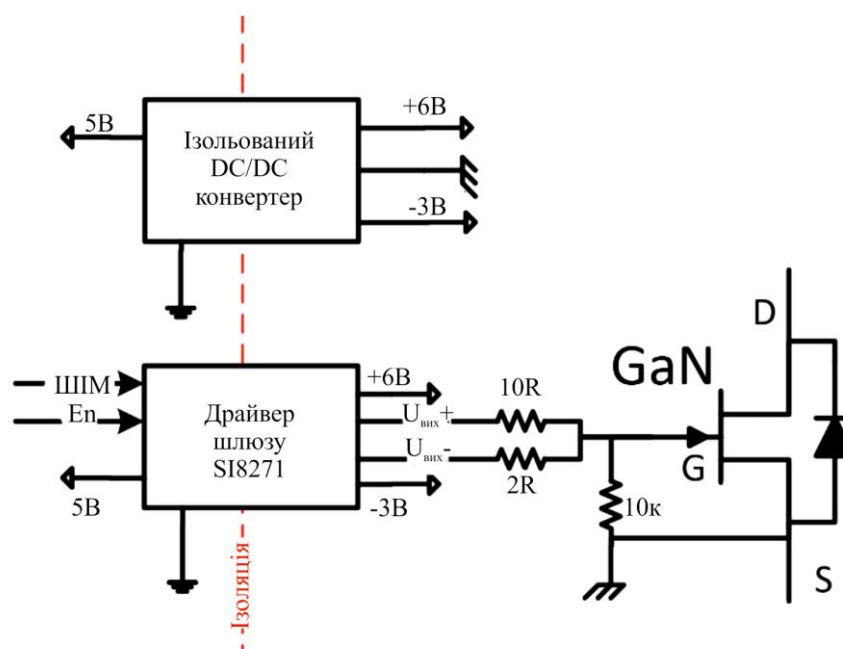


Рисунок 3.11 – Блок-схема приводу затвора пристрою GaN

3.3 Конструкція трансформатора

Трансформатор є критичним компонентом резонансного перетворювача LLC і безпосередньо впливає на його ефективність. Його конструкція відрізняється від звичайних трансформаторів. Для забезпечення необхідної індуктивності для резонансної роботи, трансформатор спеціально проектується

так, щоб мати додаткову індуктивність на витоці і невелику індуктивність на намагнічуванні. Це забезпечує еквівалентну індуктивність, що сприяє резонансній роботі. Таким чином, розділення первинної та вторинної обмоток, а також додавання значного повітряного зазору до феромагнітного сердечника, є основними вимогами до конструкції трансформатора.

Використовується спеціальний феромагнітний сердечник [34], і проектування трансформатора здійснюється відповідно до наступного критерію.

$$W_a A_c = \frac{P_{вих} D_{ста}}{K_t B_{max} f}, \quad (3.9)$$

де $W_a A_c$ – добуток площі вікна і площі сердечника, $P_{вих}$ – вихідна потужність, $D_{ста}$ – щільність струму, K_t – константа топології сердечника та B_{max} – максимальна щільність магнітного потоку відповідно. Кількість витків в первинній та вторинній обмотках обчислюється застосуванням закону Фарадея до первинної напруги прямокутної форми.

$$N_p = \frac{U_{вх}}{4 \cdot B_{max} \cdot A_e \cdot f}. \quad (3.10)$$

$$N_s = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} \cdot N_p, \quad (3.11)$$

де N_p – кількість витків в первинній обмотці, $U_{вх}$ – вхідна напруга, A_e – площа поперечного перерізу, f – частота, N_s – кількість витків у вторинній обмотці та $U_{вих}$ – вихідна напруга. Довжина повітряного зазору, що додається до феромагнітного сердечника, обчислюється за допомогою вказаних рівнянь.

					КВРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L_{нов} = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_e}{k_L} \quad (3.12)$$

$$k_L = \frac{L_m}{N_p^2} \quad (3.13)$$

де $L_{нов}$ – довжина повітряного проміжку, k_L – необхідний коефіцієнт індуктивності та L_m – індуктивність намагнічування відповідно. Розрахункові параметри розробленого LLC резонансного перетворювального трансформатора наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Розрахункові параметри LLC резонансного перетворювального трансформатора

Параметр	Значення
Довжина потоку – L_e	123 мм
Площа поперечного перерізу – A_e	420 мм ²
Коефіцієнт індуктивності – A_L	9860 нГн
Максимальна щільність потоку – $U_{вх}$	420 мТ
Виток первинної обмотки – N_p	13 поворотів
Виток вторинної обмотки – N_s	2 оберти
Необхідний коефіцієнт індуктивності – k_L	3730 нГн
Довжина повітряного зазору – $L_{нов}$	0,14 мм

Основна структура трансформатора подана на рисунку 3.12. Для конструкції намотування використовується літц-дріт, що є бажаним для подолання проблем ефекту шкіри та ефекту близькості.

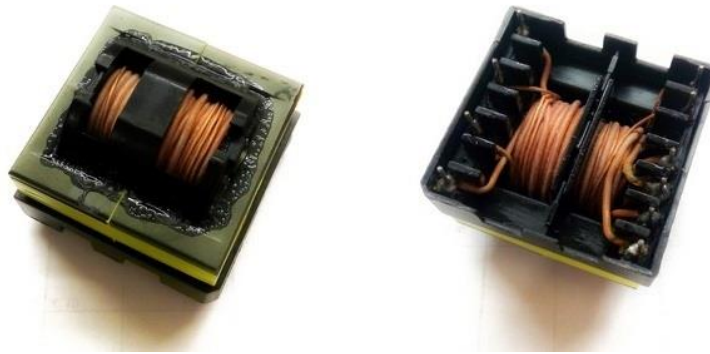


Рисунок 3.12 – Конструкція обмотки трансформатора резонансного перетворювача LLC

3.4 Висновки до третього розділу

У даному розділі проведено дослідження топології та конструкції резонансного перетворювача LLC як зарядного пристрою для акумулятора. Представлено новий метод, спрямований на досягнення найвищої доступної ефективності для перетворювача LLC Switch (GaN). Розглянуто алгоритм, який дозволяє відстежувати ефективність перетворювача в різних умовах навантаження під час швидкої зарядки акумулятора, з метою коригування режиму роботи для досягнення максимально можливої ефективності.

Детально описано три різні режими роботи, реалізовані для підтримки високої ефективності протягом всього процесу зарядки. Проаналізовано запропоновану топологію та інтервали роботи перетворювача, а також конструктивні особливості, зокрема конструкцію трансформатора.

4 МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗОНАНСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА LLC

Для підвищення продуктивності резонансного перетворювача LLC на базі GaN протягом всього процесу заряджання батареї використовуються три основних методи: звичайний метод частотної модуляції (FM), метод одноімпульсного широтно-імпульсного модулювання (S-PWM) та метод роботи в режимі розриву (DOM). Кожен із цих методів має свої особливості та переваги, що дозволяє оптимізувати ефективність роботи перетворювача в різних умовах навантаження.

Звичайний метод частотної модуляції (FM) – цей метод полягає у зміні частоти перемикання перетворювача для регулювання його вихідної потужності. Частотна модуляція дозволяє досягти оптимальної ефективності за рахунок адаптації до змінних умов навантаження. Основна перевага методу FM полягає у простоті реалізації та можливості зниження втрат на перемикання.

Метод одноімпульсного широтно-імпульсного модулювання (S-PWM) – передбачає використання одиночних імпульсів для керування перетворювачем. Цей метод корисний для забезпечення високої ефективності в обмеженому діапазоні робочих умов. При використанні S-PWM можна досягти значного зниження втрат на перемикання, проте ефективність цього методу залежить від коефіцієнта заповнення імпульсів. При зниженні коефіцієнта заповнення нижче 75% виникає значна втрата ефективності через резонанс між індуктивністю намагнічування та резонансним конденсатором.

Метод роботи в режимі розриву (DOM) – передбачає переривчасту роботу перетворювача, що дозволяє знизити втрати на перемикання за рахунок роботи в певних інтервалах часу. Проте пусковий струм, який виникає при кожному початку перемикання, призводить до додаткових втрат ефективності. Подальший аналіз цього методу передбачає використання адаптивної частотної модуляції для зменшення пускового струму та досягнення оптимальної ефективності.

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Модель резонансного перетворювача LLC, розроблена у програмному забезпеченні PSIM 9.0, наведена на рисунку 4.1. Ця модель дозволяє детально досліджувати роботу перетворювача в різних режимах та оцінити ефективність запропонованих методів керування. Параметри, використані в цій моделі, наведені у таблиці 4.1, що включає характеристики індуктивних і ємнісних компонентів, а також умови навантаження.

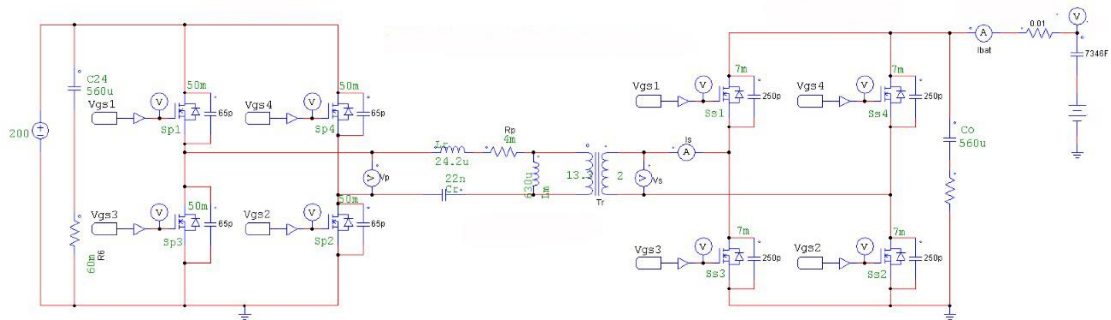


Рисунок 4.1 – Імітаційна модель резонансного перетворювача LLC

Для генерації сигналів перемикання використовується підмодель генератора, яка керується напругою, що вводиться, як зображено на рисунку 4.2. Цей генератор відтворює необхідні сигнали для керування роботою перетворювача, забезпечуючи оптимальний режим його функціонування.

Блок-схема досліджуваної установки наведена на рисунку 4.3. Ця блок-схема представляє собою організацію компонентів та їх взаємозв'язок у рамках експериментального дослідження.

Напруга на вході постійного струму подається з трансформатора змінного струму, який використовується разом із мостовим випрямлячем. Струм, що циркулює в резонансному резервуарі, контролюється ізольованим датчиком струму з полосою пропускання 2 МГц. Напруги вимірюються за допомогою 4-канального осцилографа з частотою дискретизації 100 МГц та з використанням датчиків диференціальної напруги 2 кВ.

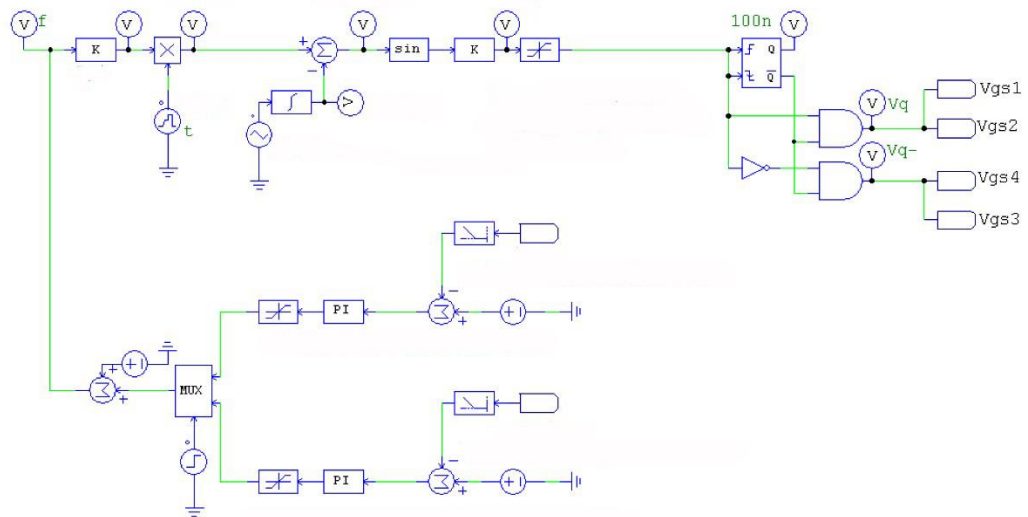


Рисунок 4.2 – Підмодель генератора, керованого напругою, для моделювання резонансного перетворювача LLC

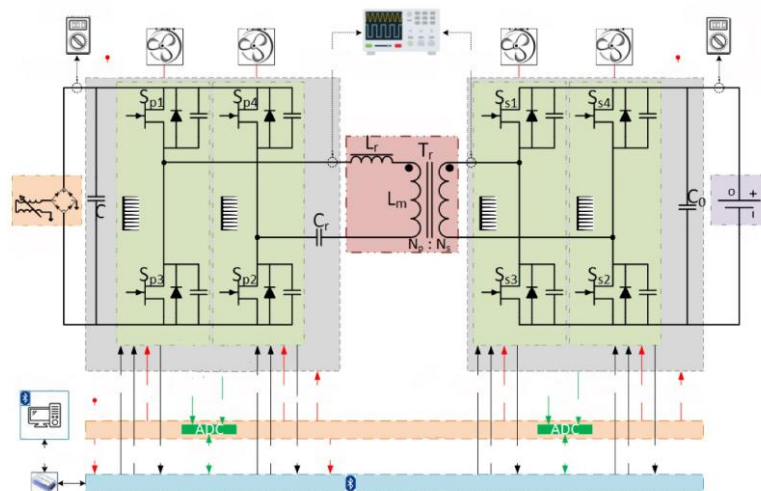


Рисунок 4.3 – Блок-схеми досліджуваної установки

4.1 Режим роботи зі звичайною частотною модуляцією

У цьому розділі представлено результати моделювання резонансного перетворювача LLC на базі GaN під час процесу заряджання батареї. Основною метою є аналіз продуктивності перетворювача та визначення оптимальних режимів роботи для підвищення ефективності. Використання трьох основних

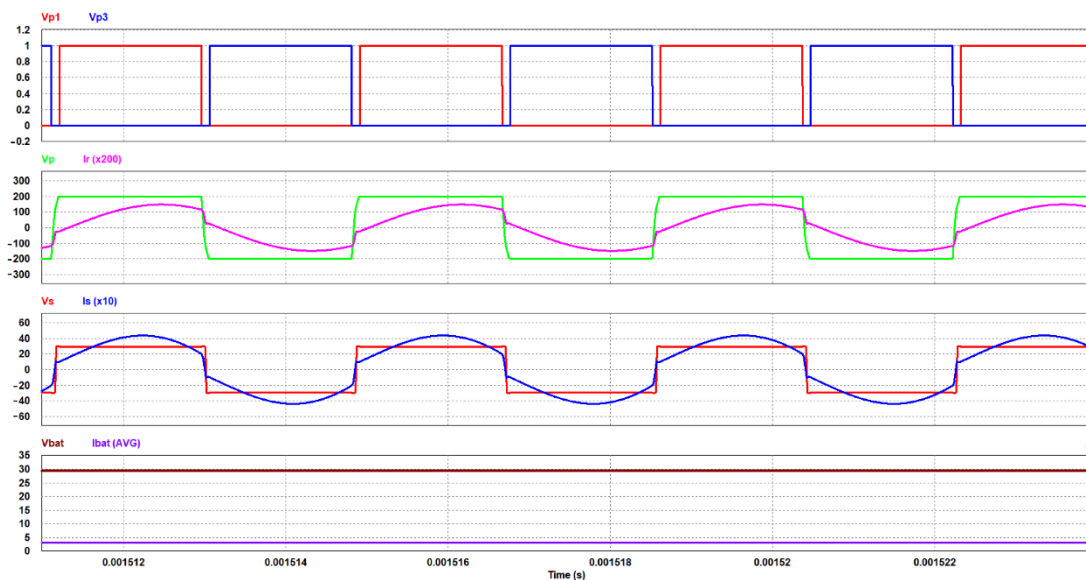


Рисунок 4.5 – Резонансний перетворювач LLC частотної модуляції

моделювання: $U_{\text{ВХ}} = 29.4 \text{ В}$, $I_{\text{ВХ}} = 3 \text{ А}$, $f_{\text{SW}} = 270 \text{ кГц}$

Експериментальні дані ефективності, отримані при різних умовах навантаження, представлені в таблиці 4.1. Як і очікувалося, для умов легкого навантаження, тобто зниженого струму зарядки, ККД перетворювача також неминуче знижується.

Таблиця 4.1 – Дані ефективності традиційної частотної модуляції

f_{sw} , кГц	$U_{\text{ВХ}}$	$I_{\text{ВХ}}$	$U_{\text{ВНХ}}$	$I_{\text{ВНХ}}$	ККД
196	200	2.90	26.84	19.60	88,9%
218	200	2.83	27.50	20.61	98,1%
270	200	2.20	22.20	16.68	81,9%
312	200	1.50	16.85	12.65	68,3%
196	200	2.50	27.36	16.90	90,3%
218	200	2.50	28.10	17.60	96,6%
270	200	2.00	23.53	14.75	84,4%
312	200	1.43	18.40	11.49	70,9%
196	200	2.13	28.10	14.06	90%
218	200	2.13	28.50	14.30	93%
270	200	1.76	25.20	12.65	87,6%
312	200	1.29	20.28	10.19	76,5%
196	200	1.65	28.90	10.82	91%
218	200	1.66	29.15	10.92	92,5%

f_{sw} , кГц	$U_{вх}$	$I_{вх}$	$U_{вих}$	$I_{вих}$	ККД
270	200	1.46	26.90	10.10	89,4%
312	200	1.16	22.90	8.58	80,5%
196	200	1.18	29.70	7.49	89,8%
218	200	1.17	29.75	7.51	90,6%
270	200	1.08	28.35	7.00	87%
312	200	0,92	25,67	6.20	81,2%
196	200	0,62	30.25	3.83	85%
218	200	0,61	30.30	3,86	87,3%
270	200	0,59	29.50	3.65	82,7%
312	200	0,55	28.30	3.40	80%

4.2 Режим роботи з широтно-імпульсною модуляцією

На рисунку 4.6 представлені результати моделювання, що включають первинний струм і напругу, а також струм і напругу на батареї, для коефіцієнта завантаження 75% на резонансній частоті, при зарядному струмі, який менше 3 А. Моделювання проводилося для оцінки поведінки перетворювача в умовах часткового навантаження, що дозволяє аналізувати ефективність роботи системи в режимах зниженого навантаження.

При такому режимі роботи резонансний перетворювач демонструє майже чистий синусоїдальний первинний струм, що свідчить про високу якість сигналу та зниження втрат на вищих гармоніках. Первинна напруга залишається стабільною, що важливо для забезпечення надійної роботи перетворювача.

Струм на батареї також показує стабільність та поступове збільшення до необхідного рівня, що сприяє оптимальному процесу заряджання. Напруга на батареї зберігає необхідний рівень, що є ключовим показником ефективності роботи перетворювача під час заряджання. Такі результати свідчать про здатність перетворювача підтримувати високу ефективність навіть при знижених навантаженнях, що є важливим для тривалого терміну служби батареї та зменшення втрат енергії.

Ці результати демонструють, що резонансний перетворювач LLC на базі GaN може ефективно працювати в широкому діапазоні навантажень,

забезпечуючи високу якість заряджання та мінімізуючи енергетичні втрати. Подальші дослідження зосереджуватимуться на покращенні алгоритмів керування та адаптації методів для досягнення ще більшої ефективності та надійності системи.

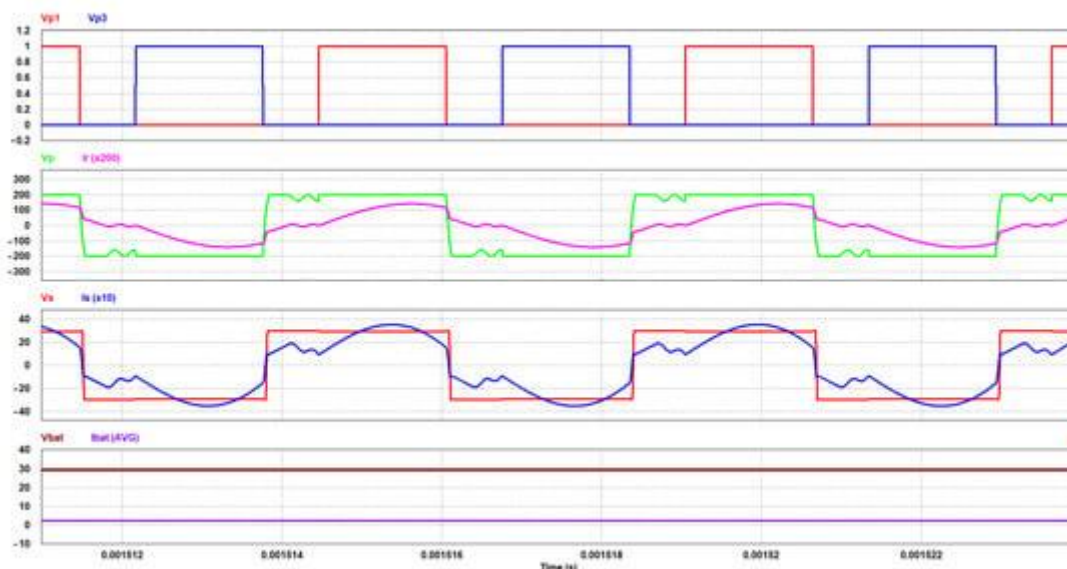


Рисунок 4.6 – Резонансний перетворювач LLC ШІМ моделювання

$$U_{\text{вих}} = 29.4 \text{ В}, I_{\text{вих}} = 2.3 \text{ А}, f_{\text{sw}} = 218 \text{ кГц}, 75\% \text{ навантаження ШІМ}$$

Результати експериментальних даних ефективності при різних режимах навантаження представлені у таблиці 4.2. Основна увага була зосереджена на аналізі ефективності перетворювача LLC на базі GaN при різних коефіцієнтах завантаження. Загальні висновки показують, що ефективність системи значно знижується при коефіцієнтах завантаження нижче 75%. Це являє собою значний виклик для підтримання оптимальних умов роботи перетворювача.

Детальні експериментальні дані показали, що при коефіцієнтах завантаження, що не перевищують 75%, спостерігається різке падіння ефективності. Це може бути пояснене зміною режиму роботи перетворювача, зокрема його частоти або коефіцієнта заповнення випрямляча. Такі умови є менш

оптимальними для перетворювача LLC, оскільки вони призводять до збільшення втрат і зниження ефективності конверсії енергії.

Отже, на підставі цих даних рекомендується уникати роботи перетворювача при коефіцієнтах заповнення, які не досягають 75%, щоб забезпечити стабільну та ефективну роботу системи. Це є ключовим аспектом для досягнення оптимальної продуктивності та тривалості служби перетворювача LLC в практичних застосуваннях.

Таблиця 4.2 – Дані ефективності режиму ШІМ

Частка часу	$U_{вх}$	$I_{вх}$	$U_{вих}$	$I_{вих}$	ККД
75%	200	0,57	29.80	3.70	87,7%
50%	200	0,50	27.00	3.40	82,3%
25%	200	0,26	17.85	2.22	61,5%

4.3. Режим переривчастої роботи

У переривчастому режимі роботи первинний струм проходить через резонансну частоту протягом певної кількості періодів, після чого його потік припиняється на певну кількість періодів, і цей процес циклічно повторюється. Таким чином, можна описати цей процес як переривчасту роботу струму в резонансі. Цей підхід відрізняється від стандартного ШІМ і іноді називається інтегральним керуванням. Ключовим аспектом є контроль вихідної напруги та струму: якщо напруга зарядження падає нижче попередньо встановленого рівня, первинний струм подається протягом іншої кількості періодів для підтримки вихідної напруги на стабільному рівні. Ця операція аналогічна пакетній роботі в імпульсних джерелах живлення.

На рисунку 4.7 представлені результати моделювання, включаючи дані про первинний струм і напругу, а також струм і напругу батареї, для коефіцієнта навантаження 25% у режимі переривчастої роботи, що відповідає струму заряджання менше 2 А.

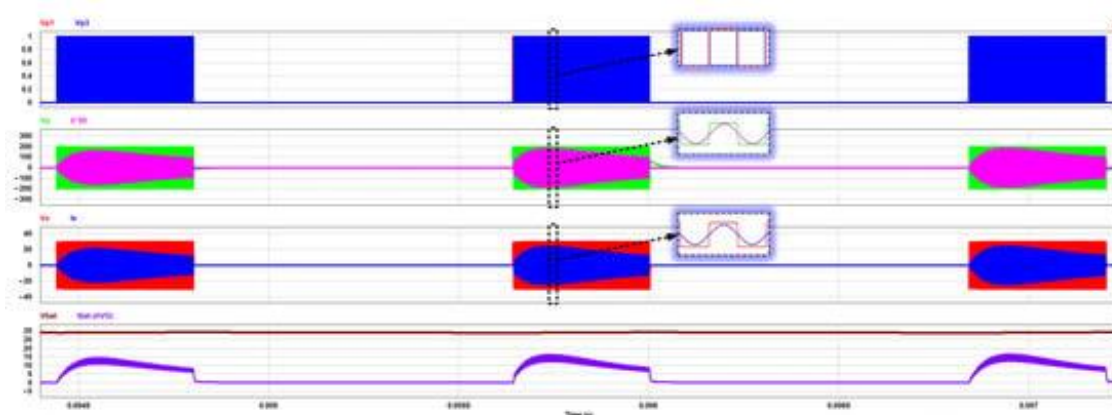


Рисунок 4.7 – Моделювання режиму переривчастої роботи резонансного перетворювача LLC $U_{\text{вих}} = 29.4 \text{ В}$, $I_{\text{вих}} < 2 \text{ А}$, $f_{\text{sw}} = 218 \text{ кГц}$, навантаження режиму переривчастої роботи 25%

Дані про ефективність в залежності від режиму переривчастої роботи наведено в таблиці 4.3. Як видно, ефективність залишається в діапазоні від 84% до 88% для низьких коефіцієнтів заповнення режиму переривчастої роботи. Зазвичай режим переривчастої роботи ефективно використовується для зарядних струмів, які не перевищують 2 А. Головна проблема в роботі з режимом переривчастої роботи полягає в ефективному контролі та регулюванні вихідної напруги. В цьому режимі лише вихідний струм контролюється для подолання будь-яких перехідних процесів на виході. Навіть при резонансному перемиканні, яке передбачає високу динаміку, загальна робота схеми має більш повільну динаміку. Тому пусковий струм під час режиму переривчастої роботи не створює неприємностей або високих перехідних процесів на вихідному порту. Однак для великих потужних перетворювачів LLC та малих вихідних конденсаторів може бути необхідне ефективне керування пусковим струмом.

Таблиця 4.3 – Дані ефективності режиму переривчастої роботи

Частка часу	$U_{\text{вх}}$	$I_{\text{вх}}$	$U_{\text{вих}}$	$I_{\text{вих}}$	ККД
75%	200	0,59	29.60	3.79	87,8%
50%	200	0,57	28.70	3.74	86,7%
25%	200	0,52	27.20	3.50	84,4%

Проведений аналіз результатів, які представлені в таблиці 4.1, таблиці 4.2 і таблиці 4.3 для різних режимів перемикання, підтверджує переваги одиночних режимів ШІМ і режиму переривчастої роботи для зарядних струмів, що не перевищують 3 А. Для зарядних струмів 3 А і менше, ефективність Резонансного перетворювача LLC менша за 75%, як зображено на рисунку 3.1. Використання одноразових стратегій перемикання ШІМ і режиму переривчастої роботи дозволяє підтримувати ефективність на рівні понад 80%, як показано на рисунку 4.8. Для режиму зарядки постійним струмом Резонансний перетворювач LLC працює в звичайному режимі резонансу, що забезпечує максимальну потужність заряджання. Для підтримки зарядного струму на рівні 20 А частота перемикання змінюється з 250 кГц до 218 кГц. Потім, для переходу до зарядки постійної напруги, частота перемикання збільшується для отримання менших зарядних струмів, а контроль напруги починається з зарядного струму 4 А, що призводить до зниження ефективності до 85%.

У діапазоні від 2 А до 4 А зарядного струму використовується ШІМ, що забезпечується від 100% до 75% ШІМ шляхом фіксації частоти перемикання на постійному рівні 218 кГц. У випадку, коли зарядний струм зменшується, частота перемикання залишається на рівні 218 кГц, і активується керування DOM. Для зарядних струмів менше 2 А застосовується повний режим переривчастої роботи. Ця операція дозволяє повністю зарядити акумулятор без втрати ефективності заряджання нижче рівня 80%. Підвищення ефективності, досягнуте за допомогою режимів ШІМ і переривчастої роботи, представлено на рисунку 4.9. Особливо при низьких зарядних струмах спостерігається збільшення ефективності на 20%.

На рисунку 4.9 видно, що можна отримати максимальне збільшення ефективності на 25% при зарядці з низькою потужністю, хоча це важкий режим для резонансних перетворювачів загалом. Механізм переходу між режимами роботи простий і легко реалізується. Робота в режимі ШІМ корисна лише для

					КВРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обмеженого робочого діапазону. Якщо коефіцієнт заповнення становить менше 75% за півперіоду, значна втрата ефективності відбувається через резонанс між індуктивністю намагнічування та резонансним конденсатором. У режимі переривчастої роботи пусковий струм, що виникає при кожному початку перемикавання, призводить до додаткової втрати ефективності.

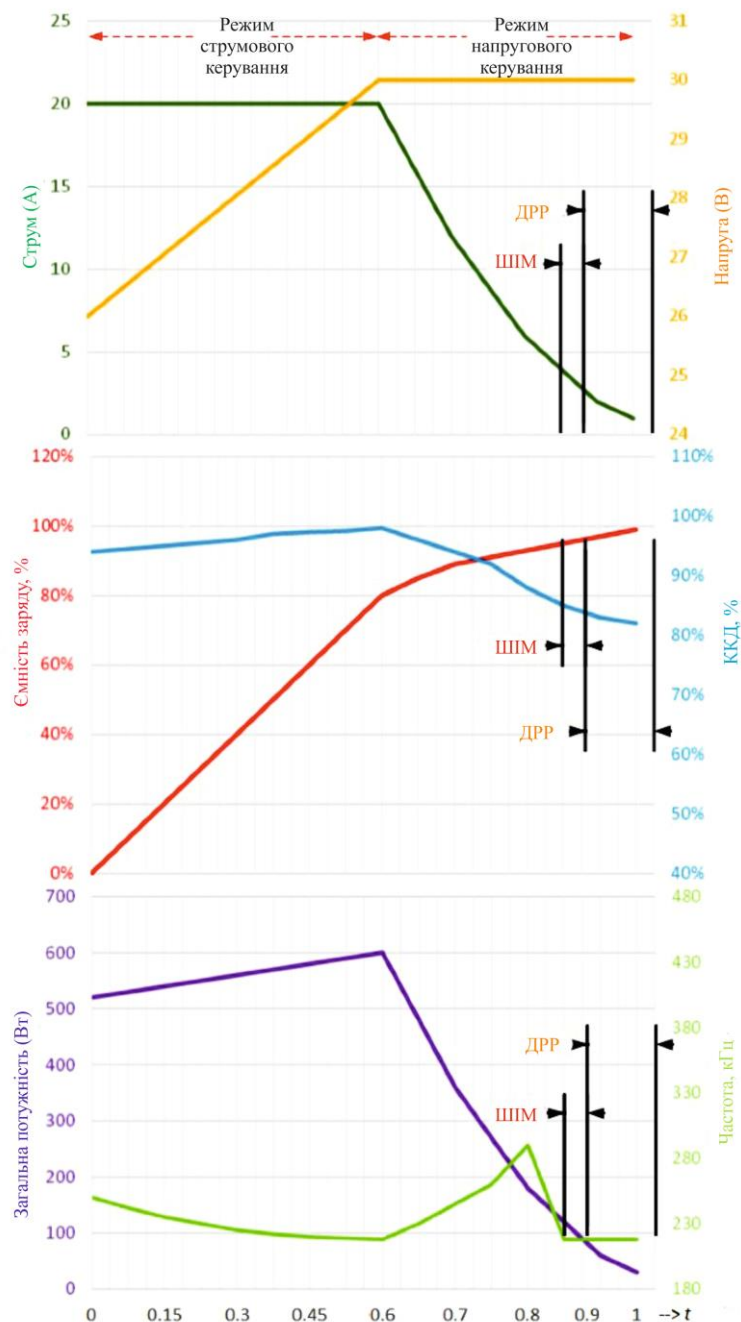


Рисунок 4.8 – Профіль заряду батареї резонансного перетворювача LLC з додаванням ШИМ і режиму переривчастої роботи

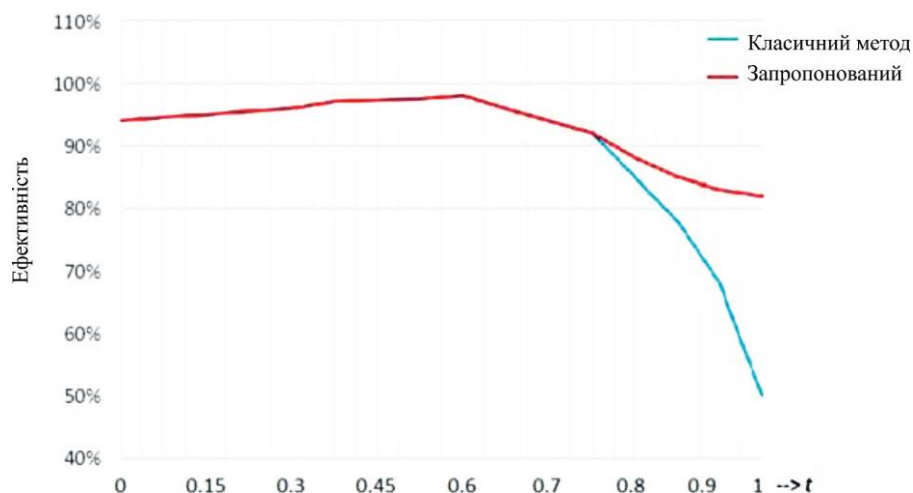


Рисунок 4.9 – Порівняння ефективності класичних та запропонованих методів

У майбутніх дослідженнях планується додатковий аналіз роботи переривчастої роботи, а також використання адаптивної частотної модуляції для зменшення пускового струму для досягнення оптимальної ефективності. Це дозволить покращити продуктивність перетворювача в умовах змінного навантаження та забезпечити стабільну роботу при різних режимах заряджання батареї.

Таким чином, запропонований інтелектуальний алгоритм відстеження ефективності можна описати як схему «моніторуй і змінюй». Протягом всього процесу зарядки перетворювач може підтримувати ефективність на максимально високому рівні, адаптуючи свій режим роботи в залежності від поточного стану навантаження та контрольованої ефективності.

4.4 Висновки до четвертого розділу

У даному розділі проведено симуляційне дослідження та експериментальну роботу для підвищення продуктивності резонансного перетворювача LLC на базі GaN протягом всього процесу заряджання батареї.

Було розглянуто три основні методи роботи: звичайну частотну модуляцію, одноімпульсну широтно-імпульсну модуляцію та режим дискретної роботи. Дослідження показало, що максимальне збільшення ефективності на 25% можна досягти при зарядці з низькою потужністю. Проаналізовано механізми переходу між режимами роботи, виявлено їхні переваги та обмеження. Зокрема, робота в режимі ШІМ виявилася ефективною лише для обмеженого діапазону, а режим переривчастої роботи супроводжується втратами ефективності через пусковий струм. В майбутніх дослідженнях планується детальніше вивчити режим переривчастої роботи та застосування адаптивної частотної модуляції для зменшення пускового струму та досягнення оптимальної ефективності.

					КВРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі було розглянуто сучасні технології та методи підвищення ефективності резонансного перетворювача LLC на базі GaN під час процесу заряджання акумуляторів. Проведено докладний аналіз основних тенденцій у мініатюризації та комутаційних технологіях, що дозволило значно зменшити розміри та вагу блоків живлення, але залишилося відкритими питання швидкості цього процесу через технічні обмеження та зміни в пріоритетах промисловості.

Особлива увага приділена використанню резонансних перетворювачів, які можуть суттєво підвищити ефективність та зменшити втрати енергії. Втім, впровадження таких технологій також супроводжується значними викликами, що вимагають детального аналізу та оптимізації в різних умовах експлуатації.

В роботі детально описано теоретичні основи резонансних перетворювачів LLC, їхні типології та ключові аспекти швидкої зарядки акумуляторів. Порівняно топології звичайного перетворювача ШІМ з резонансними перетворювачами LLC/CLLC, з'ясовано їхні переваги та недоліки в різних умовах роботи.

Крім того, представлено новий метод керування режимами роботи резонансного перетворювача LLC під час заряджання акумуляторів з використанням GaN технологій. Експериментальні та симуляційні дослідження підтвердили можливість досягнення значного підвищення ефективності на 25% за рахунок оптимізації режимів роботи. Механізм переходу між трьома різними режимами роботи простий і легкий у реалізації.

Робота в режимі ШІМ корисна лише для обмеженого робочого діапазону. Якщо коефіцієнт заповнення становить менше 75% за півперіоду, значна втрата ефективності відбувається через резонанс між індуктивністю намагнічування та резонансним конденсатором.

У режимі переривчастої роботи пусковий струм, що виникає при кожному початку перемикавання, призводить до додаткової втрати ефективності. У

					КвРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

майбутніх дослідженнях планується додатковий аналіз роботи переривчастої роботи, а також використання адаптивної частотної модуляції для зменшення пускового струму для досягнення оптимальної ефективності.

Шляхом використання методів багаторежимної комутації та відповідних стратегій керування, які підтверджуються моделюванням та експериментальними даними, можна забезпечити широкий робочий діапазон ефективності. Це дозволяє досягти значного підвищення ефективності на 25%, що має високе значення для критично важливих додатків, таких як зарядка акумулятора.

У результаті досягнення широкого робочого діапазону ефективності метод багаторежимної комутації та методи керування застосовуються для перемикання між згаданими режимами та пояснюються моделюванням та експериментальними результатами. Можна забезпечити максимальне підвищення ефективності на 25%, що є досить високим показником для критично важливих до ефективності додатків, таких як зарядка акумулятора

Отже, використання резонансних перетворювачів LLC на базі GaN може дати значний вигравш у продуктивності та енергоефективності в сучасних електронних системах. Проте важливим аспектом є подальше дослідження і розвиток для оптимізації роботи цих перетворювачів під різними умовами експлуатації, щоб забезпечити їхню стабільну та надійну роботу у реальних додатках.

					КВРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Електроніка і мікросхемотехніка: У 4-х т. / [В. І. Сенько, М. В. Панасенко, Є. В. Сенько та ін.]. – Київ : Обереги, 2000. – Т.1.: Елементна база електронних пристроїв. – 300 с.
2. Contemporary frequency converters in electric drive systems : tutorial / M.V. Zagirnyak, T.V. Korenkova, A.P. Kalinov, A. I. Gladyr, V.G. Kovalchuk. – 2nd edition, revised and corrected – Kharkiv : Publisher “Tochka”, 2017. – 206 p
3. Шавьолкін О. О. Перетворювальна техніка: навч. посібник / О. О. Шавьолкін, О. М. Наливайко. – Краматорськ : Донбаська ДМА, 2008. – 328 с.
4. Bose Bimal K. Power Electronics and AC Drives. – Prentice Hall PTR, 2002. – 711 p.
5. Bose Bimal K. Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. – Elsevier, 2006. – 917 p.
6. J. Kolar et al., "PWM Converter Power Density Barriers". 2007 Power Conversion Conference - Nagoya, 2007, pp. P-9-P-29.
7. J. Blanchard, "The History of Electrical Resonance". Bell System Technical Journal. U.S.: American Telephone & Telegraph Co. 20 (4): 415–433, 1941.
8. P. J. Baxandall, "Transistor sine-wave LC oscillators, some general considerations and new developments," Proc. IEE, vol. 106, Pt. B, suppl. 16, pp. 748-758, May 1959.
9. F. C. Schwarz, "An Improved Method of Resonant Current Pulse Modulation for Power Converters", IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, vol. IECI-23, no. 2, pp. 133-141, May 1976.
10. R. L. Steigerwald, "A Comparison of Half Bridge Resonant Converter Topologies", IEEE Trans. on Power Electronics, pp. 174-182, 1988.
11. Y. Furukawa, K. Morita, T. Yoshikawa, "A high efficiency 150 W dc-dc converter", Proceedings of Intelec 94, Vancouver, BC, Canada, pp. 148-154, 1994
12. J. F. Lazar, R. Martinelli, "Steady-state Analysis of the LLC Resonant Converter", IEEE APEC' 1, pp. 728-735, 2001
13. I. Batarseh, "Resonant Converter Topologies with Three and Four Energy Storage Elements", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 9 N. 1, pp. 64-73, Jan 1994
14. J. B. Fedison, M. Fornage, M. J. Harrison, D. R. Zimmanck, "Coss related energy loss in power MOSFETs used in zero-voltage-switched applications," Proc. IEEE A C'14, pp. 1 -156, 2014.

					КВРТР.2020008.01.06 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

15. D. Costinett, . ane, D. Maksimovic, “Circuit-oriented modeling of nonlinear device capacitances in switched mode power converters”, C M L’12, pp. 1-8, 2012.
16. A. Kats, G. Ivensky, S. Ben-Yaakov, “Application of ntegrated Magnetics in resonant Converters,” roc. A C’ , pp. 2 -930, 1997.
17. S. De Simone, C. Adragna, C. pini, “Design guideline for magnetic integration in LLC resonant converters”, DAM’ 8, pp. -957, 2008
18. W.S. Choi, S.M Young, D.W. Kim, “Analysis of M T failure modes in LLC resonant converter”, T L C , pp. 1 – 6, 2009.
19. Liu, . hou, A. Xiong, J. eng, J. ing, “A novel recise Design Method for LLC eries esonant Converter”, INTELEC'06, pp 1-6, 2006
20. N. Shafiei, M. A. Saket and M. Ordonez, "Time domain analysis of LLC resonant converters in the boost mode for battery charger applications", ECCE’1 , pp. 4157-4162, 2017
21. M. . Menke et al. “Analysis and Design of the LLC L D Driver used on tate-Space Representation Direct Time-Domain Solution”, Trans. on Power Electronics, Vol. 35, No. 12, pp. 12686-12701, Dec 2020
22. G. R. Chilukuri, D. Chatterjee, . Mallik, . apat, “Discrete-Time Modeling ramework for Analysis of LLC Converters over a ide requency ange”, Proc. A C’22, pp. 267-273, 2022.
23. S. De Simone, C. Adragna, C. Spini and G. Gattavari, "Design-oriented steady-state analysis of LLC resonant converters based on FHA," SPEEDAM’06, pp. 200-207, 2006
24. “Analysis and Design of LLC Resonant Converter with Integrated Transformer”, A C’07, pp. 1630-1635, 2007
25. C. Adragna, De imone, C. pini, “A design methodology for LLC resonant converters used on inspection of resonant tank currents”, A C’08 pp. 1361-1367, 2008
26. B. C. Kim, K. B. Park, C. E. Kim, G. . Moon, “Load sharing characteristic of two-phase interleaved LLC resonant converter with parallel and series input structure,” CC ’ . pp. 750-753, 2009
27. “Analysis and Design of Two-Phase Interleaved LLC Resonant Converter Considering Load Sharing”, CC ’ , pp. 1141-1144, 2009
28. E. Orietti, P. Mattavelli, G. Spiazzi, C. Adragna, . attavari, “Two-phase interleaved LLC resonant converter with current controlled inductor,” C ’ , pp. 298-304, 2009.

29. Z. Hu, Y. Qiu, Y. . Liu, . C. en, “A control strategy and design method for interleaved LLC converters operating at variable switching frequency,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 8. pp. 4426-4437, 2014.
30. E. Orietti, P. Mattavelli, G. Spiazzi, C. Adragna, . attavari, “Analysis of multi-phase LLC resonant converters”, C ’ , pp. 464-471, 2009
31. R. Gadelrab, F. C. Lee, Q. Li, “Three-Phase Interleaved LLC Resonant Converter with ntegrated lanar Magnetics for Telecom and erver Application”, IEEE APEC’2 , pp. 512-519, 2020.
32. S. A. Arshadi, M. Ordonez, W. Eberle, M. Craciun, C. otting, “Three-phase LLC battery charger: Wide regulation and improved light-load operation. IEEE Trans. Power Electron., vol. 36, pp. 1519–1531, 2020.
33. Q. Cao, Z. Li, H. Wang*, "Wide voltage gain range LLC dc/dc topologies: state-of-the-art," in Proc. International Power Electronics Conference (ECCE Asia), Niigata, Japan, May 2018, pp. 100-107.
34. C. H. Chang, E. C. Chang, C. A. Cheng, H. L. Cheng, S. C. Lin, "Small-signal Modeling of LLC Resonant Converters Based on Extended Describing Function," in 2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control, Tiachung, 2012.
35. S. Tian, F. C. Lee, Q. Li, “ equivalent Circuit Modeling of LLC resonant Converter,” IEEE APEC’16, pp. 1608-1615, 2016.
36. Y. Hsieh and F. C. Lee, “Accurate mall- ignal Model for LLC resonant Converters,” IEEE ECCE’1 , pp. 660-665, 2019.
37. C. Adragna, “Time-shift control of LLC resonant converters”, C M urope 2 1 , pp. 661- 666, 2010.
38. C. Adragna, D. Ciam ellotti, M. Dell’ ro, . allenda, “Digital implementation and performance evaluation of a Time-shift-controlled LLC resonant half-bridge converter”, A C’14, pp. 2074-2080, 2014
39. L. Li, . Mac Donald, “A novel LLC resonant controller with est-in-class transient performance and low stand y power consumption”, A C’18, pp. 489-493, 2018.
40. R. Yang, B. Mac Donald, Y. L. Li, “Investigation on the mall ignal Characteristic ased on the LLC y rid ysteretic Charge Control”, C Transactions on ower Electronics and Applications, Vol. 4, No. 2, pp. 128-142, June 2019.

ДОДАТОК А
Презентаційні матеріали

Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

ТЕМА

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

РЕЗОНАНСНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ СИСТЕМ ЗАРЯДКИ АКУМУЛЯТОРІВ

Виконав:
здобувач 4 курсу, група ТР1-20-1
Віталій **МИХАЙЛОВСЬКИЙ**

Науковий керівник:
к.т.н., доцент
Людмила **КОРЕЦЬКА**

Основні аспекти дослідження

Зарядка акумулятора – це процес зворотної електрохімічної реакції, яка відновлює заряд батареї



Вона дозволяє накопичувати енергію у вигляді хімічних сполук, що згодом може бути використана для живлення електричних пристроїв. Цей процес є критично важливим для електромобілів, де швидкість та ефективність заряджання можуть впливати на зручність та практичність їхнього використання.

2

Мета роботи

полягає в розробці та впровадженні нового алгоритму інтелектуального відстеження ефективності для резонансного перетворювача LLC на основі GaN

Об'єкт дослідження

резонансний перетворювач LLC на основі GaN, призначений для швидкої зарядки акумуляторів легкових електромобілів

Актуальність теми

полягає у важливості швидкої зарядки акумуляторів легкових електромобілів, що є ключовим фактором для їхнього поширення і використання

Резонансний перетворювач для систем зарядки акумуляторів



Роль резонансних перетворювачів LLC у швидкій зарядці акумуляторів

СЛАЙД

Проблема

Тривалий час заряджання

- Необхідність потужніших джерел живлення
- Високоєфективні електронні схеми
- Створення компактних зарядних пристроїв

Рішення

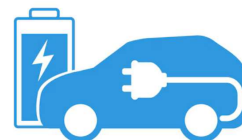
Резонансні перетворювачі LLC

- Висока щільність потужності
- Високий ККД
- Компактний розмір та легка конструкція

Переваги

- Максимальна ефективність передачі електроенергії
- Двонапрямкова передача (мережа ↔ батарея)

Запропонований алгоритм є важливим кроком до ширшого впровадження електромобілів, оскільки він допомагає зменшити час зарядки та підвищити ефективність зарядного процесу



3

Резонансний перетворювач LLC як зарядний пристрій для акумулятора

LLC перетворювачі

Основні переваги LLC перетворювачів

- 01 Висока ефективність:** Оптимізація споживання енергії
- 02 Велика щільність потужності:** Компактний розмір пристрою
- 03 Низька напруга перемикання:** Економія електроенергії, зниження втрат
- 04 Широкий діапазон регулювання потужності:** Гнучкість у застосуванні
- 05 Просте управління:** Зручне користування без складних налаштувань

Виклики при низькій потужності:
Зниження ефективності на високих частотах перемикання

- **Зарядка постійним струмом:** Лінійне зростання напруги батареї, підвищення ККД
- **Перехід до постійної напруги:** Зниження зарядного струму після 80% рівня заряду
- **Підвищення частоти перемикань:** Зниження вихідної напруги і ККД на завершальних етапах зарядки
- **Зниження ефективності:** Менше 75% ефективності за чверть часу заряджання

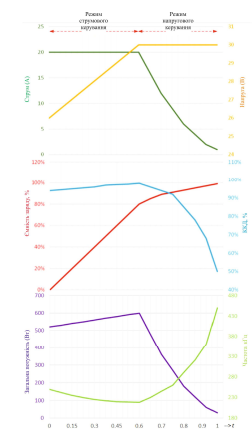


Рис. 1 – Характеристики заряджання батареї через перетворювач LLC

4

Запропонована топологія та інтервали роботи

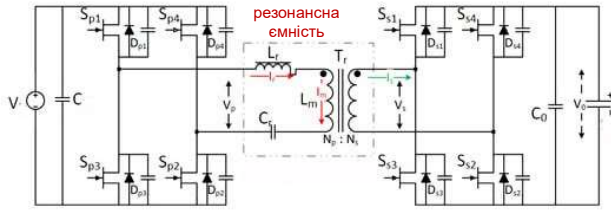


Рис.2 – Топологія резонансного перетворювача LLC

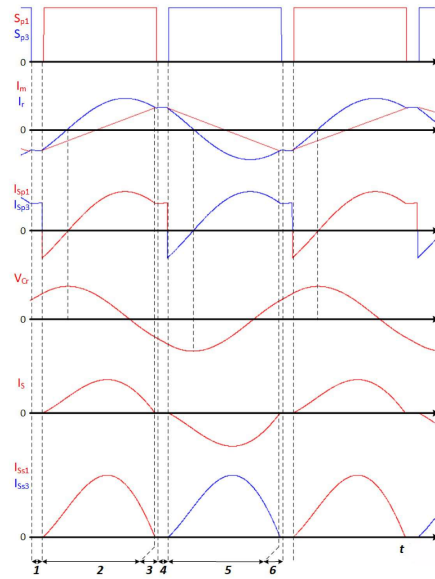


Рис. 3 – Осцилограми резонансного перетворювача LLC і шість (6) інтервалів роботи

СЛАЙД

5

Запропонована топологія та інтервали роботи

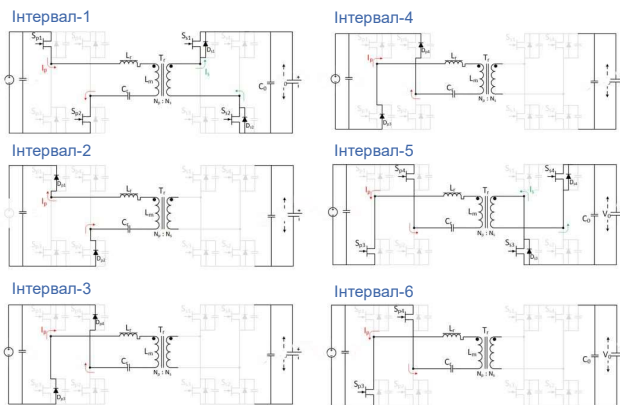


Рис. 4 – Топологія резонансного перетворювача LLC під час шести ів роботи

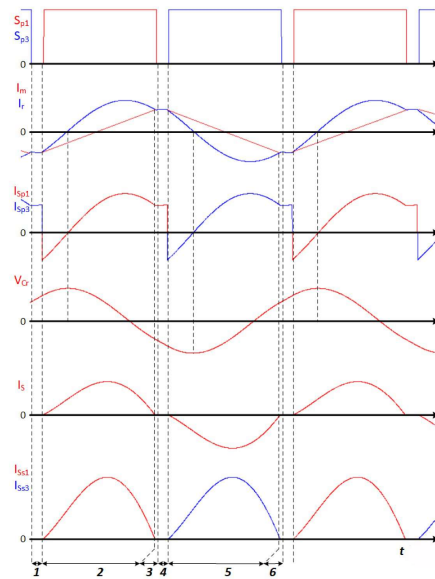


Рис. 3 – Осцилограми резонансного перетворювача LLC і шість (6) інтервалів роботи

СЛАЙД

6

Резонансні умови та параметри резонансного перетворювача LLC

- Резонансна частота при нескінченному опорі навантаження $f_{R1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$ (1)
- Резонансна частота при нульовому опорі навантаження $f_{R2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_m)C_r}}$ (2)
- Коефіцієнт підсилення напруги резонансного перетворювача LLC $M_g = \frac{n \cdot U_0}{U_{ex}}$ (3)
- Нормована частота резонансного перетворювача LLC $f_n = f_{sw} / f_0$ (4)
- Нормалізована індуктивність резонансного перетворювача LLC $L_n = L_m / L_r$ (5)
- Коефіцієнт якості перетворювача LLC $Q_e = \frac{\sqrt{L_r / C_r}}{R_e}$ (6)
- Еквівалентний Rn резонансного перетворювача LLC $R_e = \frac{8 \cdot n^2 \cdot U_0}{\pi^2 \cdot I_0}$ (7)
- Рівняння підсилення резонансного перетворювача LLC $M_g = \left| \frac{L_n \cdot f_n^2}{[(L_n + 1) \cdot f_n^2 - 1] + j[(f_n^2 - 1) \cdot f_n \cdot Q_e \cdot L_n]} \right|$ (8)

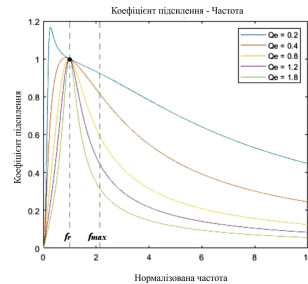


Рис.5 – Графіки залежності підсилення від частоти для резонансного перетворювача LLC

Значення коефіцієнта якості:

- Максимальне навантаження: **Qe = 1.8**
- Мінімальне навантаження: **Qe = 0.2**

L_n = 26 - це значення дозволяє більш широко варіювати коефіцієнт підсилення при роботі поза резонансом

Залежність коефіцієнта якості від навантаження

Основні параметри перетворювача LLC та схема приводу затвора для GaN-пристроїв

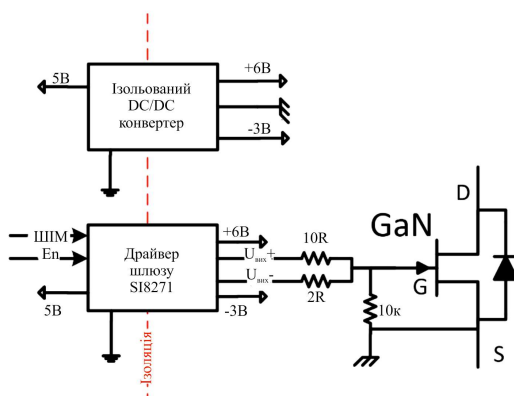


Рис. 8 – Блок-схема приводу затвора пристрою GaN

Табл. 1 – Конструктивні параметри резонансного перетворювача LLC

Параметр	Значення
Загальна потужність – P ₀	600 Вт
Вхідна напруга – U _{вх}	200 В DC
Вихідна напруга – U _{вих}	25.9 В–29.4 В DC
Резонансний конденсатор – C _r	22 нФ
Індуктор витоку трансформатора як резонансний індуктор – L _r	24.2 мкГн
Індуктор намагнічування трансформатора – L _m	630 мкГн
Коефіцієнт трансформації трансформатора – n	6.15
Сердечник трансформатора	0T45530EC
Перемикач GaN	4 × GS66508T
GaN перемикач вторинної сторони	4 × GS61008T
Вихідний конденсатор – C ₀	560 мкФ
Вхідний конденсатор – C _{вх}	560 мкФ

СЛАЙД

Конструкція трансформатора

Конструкція трансформатора

Закон Фарадея для обчислення кількості витків в трансформаторі LLC

$$\text{кількість витків у первинній обмотці} \quad N_p = \frac{U_{ex}}{4 \cdot B_{max} \cdot A_c \cdot f} \quad (9)$$

$$\text{кількість витків у вторинній обмотці} \quad N_s = \frac{U_{вх}}{U_{ex}} \cdot N_p \quad (10)$$

Обчислення довжини повітряного зазору у феромагнітному сердечнику

$$\text{довжина повітряного проміжку} \quad L_{пов} = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_c}{k_L} \quad (11)$$

$$\text{необхідний коефіцієнт індуктивності} \quad k_L = \frac{L_m}{N_p^2} \quad (12)$$

Табл. 2 – Розрахункові параметри LLC резонансного перетворювача трансформатора

Параметр	Значення
Довжина потоку – L_c	123 мм
Площа поперечного перерізу – A_c	420 мм ²
Коефіцієнт індуктивності – A_L	9860 нГн
Максимальна щільність потоку – U_{ex}	420 мТ
Виток первинної обмотки – N_p	13 поворотів
Виток вторинної обмотки – N_s	2 оберти
Необхідний коефіцієнт індуктивності – k_L	3730 нГн
Довжина повітряного зазору – $L_{пов}$	0,14 мм

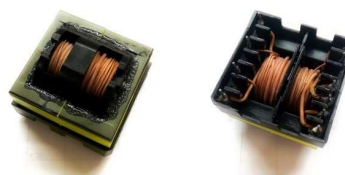


Рис. 9 - Конструкція обмотки трансформатора резонансного перетворювача LLC

9

Моделювання резонансного перетворювача LLC

Моделювання

Ця модель дозволяє детально досліджувати роботу перетворювача в різних режимах та оцінити ефективність запропонованих методів керування.



Рис. 10 - Імітаційна модель резонансного перетворювача LLC



Методи керування резонансним перетворювачем LLC на базі GaN:

- частотна модуляція,
- одноімпульсна широтно-імпульсна модуляція ШІМ
- робота в режимі розриву

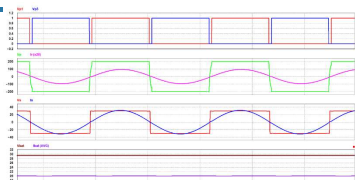
Табл.3 – Дані ефективності традиційної частотної модуляції

f_{sw} , кГц	$U_{вх}$	$I_{вх}$	$U_{вхх}$	$I_{вхх}$	ККД
196	200	2.90	26.84	19.60	88,9%
218	200	2.83	27.50	20.61	98,1%
270	200	2.20	22.20	16.68	81,9%
312	200	1.50	16.85	12.65	68,3%
196	200	2.50	27.36	16.90	90,3%
218	200	2.50	28.10	17.60	96,6%
270	200	2.00	23.53	14.75	84,4%
312	200	1.43	18.40	11.49	70,9%
196	200	2.13	28.10	14.06	90%
218	200	2.13	28.50	14.30	93%
270	200	1.76	25.20	12.65	87,6%
312	200	1.29	20.28	10.19	76,5%
196	200	1.65	28.90	10.82	91%
218	200	1.66	29.15	10.92	92,5%
270	200	1.46	26.90	10.10	89,4%
312	200	1.16	22.90	8.58	80,5%
196	200	1.18	29.70	7.49	89,8%
218	200	1.17	29.75	7.51	90,6%
270	200	1.08	28.35	7.00	87%
312	200	0.92	25.67	6.20	81,2%
196	200	0.62	30.25	3.83	85%
218	200	0.61	30.30	3.86	87,3%
270	200	0.59	29.50	3.65	82,7%
312	200	0.55	28.30	3.40	80%

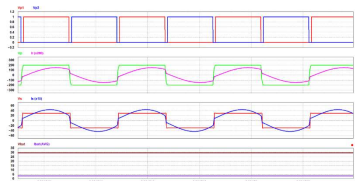
10

Результати моделювання та ефективність у режимі роботи зі звичайною частотною модуляцією

СЛАЙД



$U_{\text{вих}} = 29.4 \text{ В}; I_{\text{вих}} = 20 \text{ А}; f = 218 \text{ кГц}$



$U_{\text{вих}} = 29.4 \text{ В}, I_{\text{вих}} = 3 \text{ А}, f = 270 \text{ кГц}$

Рис. 11 – Резонансний перетворювач LLC частотної модуляції моделювання

Табл.3 – Дані ефективності традиційної частотної модуляції

f_{sw} , кГц	$U_{\text{вх}}$	$I_{\text{вх}}$	$U_{\text{вих}}$	$I_{\text{вих}}$	ККД
196	200	2.90	26.84	19.60	88,9%
218	200	2.83	27.50	20.61	98,1%
270	200	2.20	22.20	16.68	81,9%
312	200	1.50	16.85	12.65	68,3%
196	200	2.50	27.36	16.90	90,3%
218	200	2.50	28.10	17.60	96,6%
270	200	2.00	23.53	14.75	84,4%
312	200	1.43	18.40	11.49	70,9%
196	200	2.13	28.10	14.06	90%
218	200	2.13	28.50	14.30	93%
270	200	1.76	25.20	12.65	87,6%
312	200	1.29	20.28	10.19	76,5%
196	200	1.65	28.90	10.82	91%
218	200	1.66	29.15	10.92	92,5%
270	200	1.46	26.90	10.10	89,4%
312	200	1.16	22.90	8.58	80,5%
196	200	1.18	29.70	7.49	89,8%
218	200	1.17	29.75	7.51	90,6%
270	200	1.08	28.35	7.00	87%
312	200	0.92	25.67	6.20	81,2%
196	200	0.62	30.25	3.83	85%
218	200	0.61	30.30	3.86	87,3%
270	200	0.59	29.50	3.65	82,7%
312	200	0.55	28.30	3.40	80%

11

Результати моделювання та ефективність у режимі роботи з широко-імпульсною модуляцією

СЛАЙД



$U_{\text{вих}} = 29.4 \text{ В}, I_{\text{вих}} = 2.3 \text{ А}, f_{\text{sw}} = 218 \text{ кГц}$

Рис.12 – Резонансний перетворювач LLC ШІМ моделювання

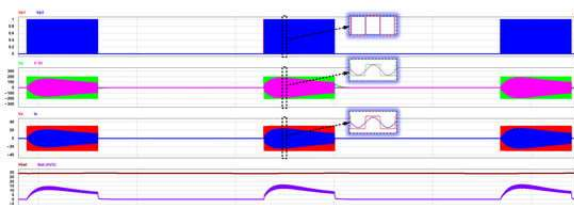
75% навантаження ШІМ

Табл.4 – Дані ефективності режиму ШІМ

Частка часу	$U_{\text{вх}}$	$I_{\text{вх}}$	$U_{\text{вих}}$	$I_{\text{вих}}$	ККД
75%	200	0,57	29.80	3.70	87,7%
50%	200	0,50	27.00	3.40	82,3%
25%	200	0,26	17.85	2.22	61,5%

12

Результати моделювання та ефективність у режимі дискретної роботи



$U_{\text{вих}} = 29.4 \text{ В}$, $I_{\text{вих}} < 2 \text{ А}$, $f = 218 \text{ кГц}$

Рис.13 – Моделювання режиму дискретної роботи резонансного перетворювача LLC навантаження режиму дискретної роботи 25%

Табл.5 – Дані ефективності режиму дискретної роботи

Частка часу	$U_{\text{вх}}$	$I_{\text{вх}}$	$U_{\text{вих}}$	$I_{\text{вих}}$	ККД
75%	200	0,59	29.60	3.79	87,8%
50%	200	0,57	28.70	3.74	86,7%
25%	200	0,52	27.20	3.50	84,4%

Ефективність:

- Ефективність в діапазоні 84% - 88% для низьких коефіцієнтів заповнення в режимі переривчастої роботи.
- Ефективне використання для зарядних струмів до 2 А.

13

СЛАЙД

Аналіз результатів для різних режимів перемикання

Переваги режимів ШІМ та дискретної роботи:

- Для зарядних струмів $\leq 3 \text{ А}$ ефективність перетворювача LLC нижче 75% (Рис.1).
- Застосування ШІМ та режиму дискретної роботи дозволяє підтримувати ефективність на рівні понад 80% (рис. 14)

Підвищення ефективності:

- Ефективність режимів ШІМ та переривчастої роботи покращена на 20% при низьких зарядних струмах

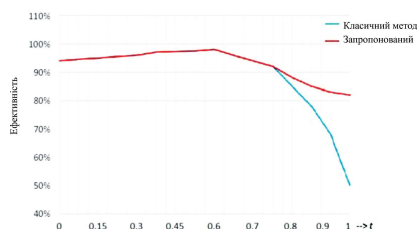


Рис.15 – Порівняння ефективності класичних (ЧМ) та запропонованих методів

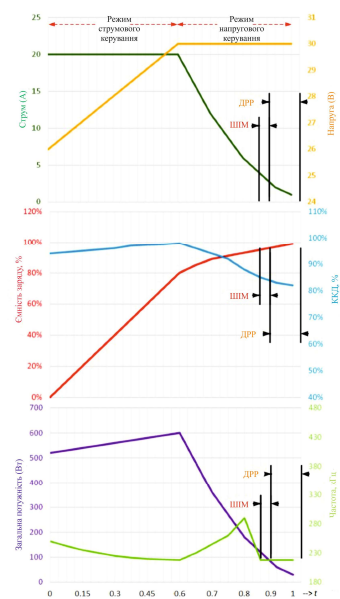


Рис.14 – Графік ефективності для режимів ШІМ та переривчастої роботи

14

СЛАЙД

Висновки

- Детально описано теоретичні основи резонансних перетворювачів LLC, їх типології та ключові аспекти швидкої зарядки акумуляторів.
- Порівняння звичайних перетворювачів ШІМ з резонансними перетворювачами LLC/CLLC виявило їхні переваги та недоліки в різних умовах роботи.
- Представлено новий метод керування режимами роботи резонансного перетворювача LLC з використанням GaN технологій.
- Експериментальні та симуляційні дослідження підтвердили можливість досягнення підвищення ефективності на 25% за рахунок оптимізації режимів роботи.
- Робота в режимі ШІМ корисна лише для обмеженого діапазону. Ефективність знижується при коефіцієнті заповнення менше 75% через резонанс між індуктивністю намагнічування та резонансним конденсатором.
- У режимі переривчастої роботи пусковий струм призводить до додаткових втрат ефективності.
- Планується додатковий аналіз режиму переривчастої роботи та використання адаптивної частотної модуляції для зменшення пускового струму і досягнення оптимальної ефективності.

Висновки

ДЯКУЮ
ЗА УВАГУ!

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Резонансний перетворювач для систем зарядки акумуляторів

Тема роботи: Михайловський Віталій Миколайович

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 66

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Мета кваліфікаційної роботи полягає у розробці та впровадженні нового алгоритму інтелектуального відстеження ефективності для резонансного перетворювача LLC на основі GaN, який дозволяє покращити ефективність заряджання акумуляторів в умовах різного навантаження. У даній кваліфікаційній роботі проаналізовано режими заряджання та зміну ефективності під час зарядки батареї.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Кваліфікаційна робота відповідає виданому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: У відповідності до технічного завдання у першому розділі розглянуто сучасні тенденції у використанні резонансних перетворювачів LLC в автономних системах живлення. У другому розділі розглянуто теоретичні основи резонансних перетворювачів LLC. Обґрунтування принципів роботи резонансного перетворювача LLC на основі індуктивності, конденсаторів та опору. Огляд топології та функціональної схеми резонансного контуру перетворювача LLC. Третій розділ присвячений розгляду різних топологій і конструкцій резонансних перетворювачів LLC. У четвертому розділі зосереджено на процесі моделювання та симуляції резонансних перетворювачів LLC. Проведено порівняння результатів симуляцій з експериментальними даними для підтвердження точності математичних моделей.
4. Позитивні сторони роботи: Можливість підвищити ефективність на 20% для умов низького навантаження резонансного перетворювача LLC на основі GaN, що значно покращує процес зарядки акумуляторів легких електромобілів.
5. Негативні сторони роботи: Робота могла б бути більш детальною у розгляді можливих переїкод та обмежень, що можуть виникнути під час практичного впровадження.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає

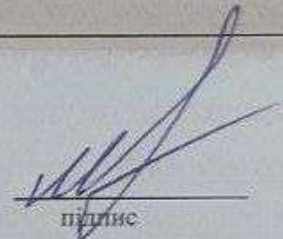
7. Відгук про роботу в цілому: Результати цієї кваліфікаційної роботи демонструють ефективність запропонованого інтелектуального алгоритму відстеження ефективності для резонансного перетворювача LLC на основі GaN. Запропонований метод дозволив досягти збільшення ефективності на 20% для умов низького навантаження, що значно покращує процес зарядки акумуляторів легких електромобілів. Дослідження показали, що використання традиційних методів частотної модуляції, ШІМ та переривчастого режиму роботи в поєднанні з новим алгоритмом SET забезпечує оптимальне керування процесом заряджання, підвищуючи ефективність і зменшуючи час заряджання.

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка кваліфікаційної роботи: Кваліфікаційна робота відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки добре (3,75/С), а її автор Михайловський В.М., присвоєння кваліфікації бакалавра зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка»

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

«17» червня 2024р.



підпис

Ім'я користувача:
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:
1016384886

Дата перевірки:
24.06.2024 09:37:27 EEST

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
24.06.2024 09:45:12 EEST

ID користувача:
100005862

Назва документа: Михайловський_антиплагіат

Кількість сторінок: 69 Кількість слів: 11719 Кількість символів: 92136 Розмір файлу: 10.98 MB ID файлу: 1016195832

1185 слів позначені як "вилучені" та не враховуються у підрахунку слів

0.96% Схожість

Найбільша схожість: 0.18% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1016169195)

0.86% Джерела з Інтернету

81

Сторінка 71

0.38% Джерела з Бібліотеки

15

Сторінка 71

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

0.06% Вилучень

Деякі джерела вилучено автоматично (фільтри вилучення: кількість знайдених слів є меншою за 8 слів та 0%)

Немає вилучених Інтернет-джерел

0.06% Вилученого тексту з Бібліотеки

12

Сторінка 71

Модифікації

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

Замінені символи

72

Mon Jun 24 08:50:22 EEST 2024, Федула Микола Васильович, Хмельницький національний університет, ХНУ

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 0.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. **Помилки в документах: 8%**

ID: 132325 Назва: БКР Резонансний перетворювач Додано в БД: 2024-06-24 Автора: В. Михайловський Керівники: Людмила Корецька Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	78200	584	393 (1%)	7 (1%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

Завідувачу кафедри АКІТ та Р
д-ру техн. наук, проф. Мартиноку В. В.

Михайловський В. М.

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи ТР1-20-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

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

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

03.06.2024

дата



підпис

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

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

Назва: Резонансний перетворювач для систем зарядки акумуляторів

Автор: Віталій МИХАЙЛОВСЬКИЙ

Спеціальність: 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології»

Науковий керівник: к.т.н., доц. Людмила КОРЕЦЬКА

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

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

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 0,96% і адресується до 81 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи



Валерій МАРТИНЮК

Денис МАКАРИШКІН

Людмила КОРЕЦЬКА