

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Бакалавр

Освітній рівень

Покращення ефективності та надійності енергетичних систем через оптимізацію електромагнітної сумісності в інвертуючих перетворювачах

Назва теми

КвРТР.2021002.01.02 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 III курсу, група ТР1с-21-1


Підпис


Антон ЖЕЛНОВ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник:


Підпис, дата

Андрій СЕЛЬСЬКИЙ
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


«16» червня 2024р.

Хмельницький національний університет

Факультет _____
Кафедра інформаційних технологій
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

Желнову Антону Михайловичу

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

1. Тема роботи: Покращення ефективності та надійності енергетичних систем через оптимізацію електромагнітної сумісності в інвертуючих перетворювачах
- Керівник роботи: Сельський Андрій Анатолійович, к.ф.м.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):
огляд еволюції мереж мобільного зв'язку; ключові базові технології для мереж 5G та інших мереж; антена МІМО із збагаченням ізоляції для мобільної зв'язку 5G; моделювання антени МІМО із збагаченням ізоляції
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):
1. Блок схема перетворювача. 2. Принципова схема для створення результатів моделювання перетворювача. 3. Імітаційна модель перетворювача з врахуванням паразитних параметрів.

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

Студент

Науковий керівник

(підпис, дата)

Антон ЖЕЛНОВ

(підпис, дата)

Андрій СЕЛЬСЬКИЙ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Покращення ефективності та надійності енергетичних систем через оптимізацію електромагнітної сумісності в інвертуючих перетворювачах»

Автор роботи: Желнов Антон Михайлович.

Керівник роботи: Сельський Андрій Анатолійович, к.ф.м.н., доцент

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

Графічна частина: технічне креслення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ, DC/DC ПЕРЕТВОРЮВАЧІ, ІМПУЛЬСНІ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ, SPICE, КЛЕМА КОТУШКИ ІНДУКТИВНОСТІ, СИМУЛЯЦІЇ, ДИСКРЕТНІ КОМПОНЕНТИ, ВИМІРЮВАННЯ, ІЗОЛЯЦІЯ

Об'єктом дослідження є інвертуючий понижувальний/підвищувальний перетворювач та його електромагнітна сумісність

Мета кваліфікаційної роботи полягає в аналізі електромагнітної сумісності інвертуючого DC/DC перетворювача, зокрема впливу відсутності ізоляції між входом та виходом, за допомогою SPICE-моделювання та експериментальних вимірювань.

У даній кваліфікаційній роботі проведено аналіз електромагнітної сумісності інвертуючого понижувально/підвищувального перетворювача. Цей тип DC/DC перетворювача відрізняється тим, що одна клемка котушки індуктивності підключена до землі, а не до входу чи виходу перетворювача. Відсутність ізоляції між входом та виходом перетворювача розглядається з точки зору ЕМС. Була розроблена SPICE-модель для аналізу електромагнітних властивостей схеми. Проведено симуляції, які підтверджуються вимірюваннями на дискретній схемі. Крім того, в роботі проаналізовані інтегровані комерційно доступні перетворювачі, які демонструють електромагнітну сумісність, подібну до властивостей розробленої моделі.

01.06.2024 р.



ЗМІСТ

	<u>С.</u>
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП	5
1 ОГЛЯД DC/DC ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	7
1.1 Огляд і призначення DC-DC перетворювачів	8
1.1.1 Типи DC-DC перетворювачів	10
1.2 Понижувальні перетворювачі	12
1.2.1 Принцип дії понижувальних перетворювачів	12
1.2.2 Значення та застосування понижувальних перетворювачів	13
1.3 Підвищувальні перетворювачі	15
1.3.1 Принцип дії підвищувальних перетворювачів	15
1.3.2 Значення та застосування підвищувальних перетворювачів	16
1.4 Понижувально-підвищувальні перетворювачі	18
1.4.1 Принцип дії понижувально-підвищувальних перетворювачів	18
1.4.2 Значення та застосування понижувально-підвищувальних перетворювачів	19
1.5 Висновки до першого розділу	20
2 ТОПОЛОГІЯ ТА КЛЮЧОВІ КОМПОНЕНТИ DC/DC ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	21
2.1 Розгляд основних топологій DC/DC перетворювачів	21
2.1.1 Топологія схеми понижувальних перетворювачів	21
2.1.2 Топологія схеми підвищувальних перетворювачів	26
2.1.3 Топологія схеми понижувально-підвищувальних перетворювачів	31
2.2 Висновки до другого розділу	35
3 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕШКОД У ІНВЕРТУЮЧОМУ ПОНИЖУВАЛЬНО-ПІДВИЩУВАЛЬНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ	36

КВРТР.2021002.01.02 ПЗ								
Змк.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Покращення ефективності та надійності енергетичних систем через оптимізацію електромагнітної сумісності в інвертуючих перетворювачах Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркуців
Розроб.		Желнов А.М.		13.06.2024			2	68
Перевір.		Сельський А.А.		18.06.24				
Реценз.								
Н. Коопт.		Корсєцька Л.О.		18.06.24				
Затверд.		Мартинюк В.В.		18.06.24				
ХНУ, гр. ТР1с-21-1								

3.1 Електромагнітні перешкоди: від відкриття до сучасності.....	37
3.2 Вплив електромагнітних перешкод на електричні кола	39
3.3 Електромагнітні перешкоди в імпульсних джерелах живлення	41
3.4 Опис топології інвертуючого понижувально-підвищувального перетворювача	43
3.5 Вплив електромагнітних перешкод на інвертуючий понижувально-підвищувальний перетворювач.....	43
3.5.1 Шлях електромагнітних перешкод при закритому перемикачі	45
3.5.2 Шлях електромагнітних перешкод при розімкненому перемикачі	46
3.4 Висновки до третього розділу.....	47
4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПОВЕДІНКИ DC/DC ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	48
4.1 Розробка імітаційної моделі на різних рівнях деталізації.....	48
4.2 Удосконалення імітаційної моделі з урахуванням паразитних параметрів..	49
4.3 Дослідження перетворювача DC/DC на основі окремих компонентів	53
4.4 Експериментальне визначення та аналіз характеристик перетворювача.....	54
4.5 Математичне моделювання та комп'ютерне симулювання роботи перетворювача	58
4.6 Висновки до четвертого розділу.....	63
ВИСНОВКИ.....	64
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	65
ДОДАТОК А. Блок схема перетворювача.....	70
ДОДАТОК Б. Принципова схема для створення результатів моделювання перетворювача	71
ДОДАТОК В. Імітаційна модель перетворювача з врахуванням паразитних параметрів	72

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.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ВСТУП

У сучасному електротехнічному контексті імпульсні джерела живлення відіграють ключову роль у забезпеченні нормальної функціональності електронних систем. Завдяки їм електрична енергія може бути ефективно та надійно перетворена між різними рівнями напруги та струму, що дає змогу електронним пристроям працювати в різноманітних сценаріях, починаючи від переносних гаджетів та закінчуючи складними промисловими системами.

З огляду на широкий спектр потреб електронних систем у живленні, розробники використовують різноманітні концепції імпульсних джерел. Особливу важливість мають підвищувальні, понижувальні та зворотні перетворювачі, які забезпечують стабільне живлення та можливість зміни напруги для різних пристроїв. Інвертуючі перетворювачі, наприклад, широко використовуються для драйверів дисплеїв, забезпечуючи необхідні рівні напруги.

Перетворювачі DC/DC, які можуть регулювати рівень напруги та струму, відіграють важливу роль у задоволенні потреб сучасних електронних систем. Вони не лише забезпечують ефективне перетворення електричної енергії, але й дозволяють пристроям працювати на різних рівнях напруги, що розширює їхні можливості та застосування.

З огляду на значимість та актуальність імпульсних джерел живлення у сучасній електротехніці, одним із важливих аспектів стає їхній вплив на електромагнітну сумісність систем. Дослідження різних топологій імпульсних джерел живлення та їхнього впливу на електромагнітну сумісність стає ключовим для забезпечення якості та надійності електронних пристроїв у сучасному світі.

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метою даної кваліфікаційної роботи є аналіз електромагнітної сумісності інвертуючого понижувально-підвищувального перетворювача (DC/DC). Основні завдання охоплюють аналіз конструкції перетворювача, розробку моделі для проведення аналізу ЕМС та порівняння результатів симуляцій з експериментальними вимірюваннями.

Об'єктом дослідження є інвертуючий понижувальний/підвищувальний перетворювач (DC/DC), зокрема його електромагнітна сумісність.

Предметом дослідження є аналіз впливу конструкції перетворювача та його елементів на взаємодію з електромагнітним полем та вплив на його роботу та навколишнє середовище.

Це дослідження буде сприяти подальшому вдосконаленню та оптимізації перетворювачів DC/DC з метою підвищення їхньої електромагнітної сумісності та забезпечення безперебійної роботи електронних систем у різних умовах експлуатації.

					КВРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД DC/DC ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Сучасний світ електротехніки та електроніки невіддільно пов'язаний з поняттям силової електроніки. Ця міждисциплінарна область використовується для перетворення, керування та адміністрування електроенергії, і вона стає все більш важливою у зв'язку зі стрімким розвитком відновлюваних джерел енергії, електромобілів та технологій розумних мереж.

Силова електроніка розвивається задля створення ефективних, компактних та економічних методів перетворення електричної енергії між різними формами, що має ключове значення для забезпечення сталого розвитку сучасного енергетичного сектора. На сьогоднішній день, коли вимоги до збереження енергії та зменшення викидів вуглецю стають все більш суворими, роль силової електроніки стає критичною для досягнення цих цілей.

В даному розділі детально розглянуто основні принципи, функції та особливості силової електроніки, а також важливість її застосування в сучасному електротехнічному та електронному обладнанні.

Силова електроніка використовується для ефективного перетворення та керування електричною енергією за допомогою електричних перетворювачів на основі напівпровідникових комутаторів. Ця область технології відіграє важливу роль у сучасному електротехнічному обладнанні та промисловості, де вимагається ефективне та точне управління електричною енергією.

Перетворювачі живлення поділяються на кілька основних категорій [1], що серед яких DC/DC перетворювачі, AC/DC перетворювачі, перетворювачі DC/AC та перетворювачі змінного струму/змінного струму. DC/DC перетворювачі використовуються для зміни рівня напруги в електричних системах, тоді як AC/DC перетворювачі перетворюють змінний струм в постійний. Перетворювачі DC/AC, відомі також як інвертори, генерують змінний струм з постійного джерела напруги, тоді як перетворювачі змінного струму/змінного струму

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечують можливість регулювання частоти, фази, амплітуди та потужності змінного струму.

Кожен з перетворювачів складається з різноманітних електронних компонентів, таких як резистори, конденсатори, індуктори та напівпровідникові пристрої, такі як діоди, тиристори та транзистори. Застосування силової електроніки дозволяє підвищити ефективність, надійність та стабільність роботи електричних систем, що є критично важливим для забезпечення ефективного функціонування сучасних електричних мереж і пристроїв.

У даній роботі основна увага приділяється аналізу та дослідженню DC/DC перетворювачів. Ці перетворювачі відіграють ключову роль у сучасних електричних системах, забезпечуючи ефективне перетворення напруги і забезпечуючи стабільне живлення для різноманітних електронних пристроїв.

Дослідження DC/DC перетворювачів має велике практичне значення, оскільки вони застосовуються у різних галузях, серед яких електроніка автомобілів, сонячні енергетичні системи, медичні пристрої та багато інших. Враховуючи поширення використання відновлюваних джерел енергії та росту інтересу до електромобілів, вивчення та оптимізація характеристик DC/DC перетворювачів стає актуальною проблемою.

У цій роботі проведений аналіз різних аспектів DC/DC перетворювачів, зокрема їхньої структури, принципи роботи, електромагнітну сумісність, ефективність та інші важливі параметри. Результати цього дослідження допоможуть зрозуміти та вдосконалити процеси функціонування DC/DC перетворювачів та сприятимуть подальшому розвитку цієї ключової галузі силової електроніки.

1.1 Огляд і призначення DC-DC перетворювачів

Перетворювачі постійного струму є важливими електронними схемами, які відіграють вирішальну роль у сучасних системах керування живленням. Їх

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основною функцією є перетворення напруги джерела постійного струму (DC) з одного рівня на інший, забезпечуючи стабільну та ефективну подачу електроенергії до різних електронних пристроїв і систем. У програмах, де рівні вхідної напруги можуть коливатися через такі фактори, як розряд батареї з часом або зміни умов навантаження, перетворювачі постійного струму підтримують постійну вихідну напругу, забезпечуючи надійне живлення компонентів системи. Однією з суттєвих переваг перетворювачів DC-DC є їх чудова ефективність перетворення потужності. Використовуючи методи перемикання, вони можуть мінімізувати втрати потужності, пов'язані з резистивними елементами, такими як трансформатори або лінійні регулятори, які зазвичай виробляють тепло та витрачають енергію. Це призводить до кращої загальної ефективності та подовження терміну служби батареї в портативних пристроях. Крім того, перетворювачі DC-DC пропонують гнучкість для підвищення або зниження рівнів напруги, дозволяючи ефективно керувати розподілом електроенергії в електронних системах [4]. Вони також можуть забезпечувати гальванічну розв'язку, розділяючи вхідну та вихідну землю, щоб зменшити ризик заземлення та захистити чутливі компоненти від стрибків напруги та шуму.

Ще однією важливою особливістю перетворювачів постійного струму є точне регулювання напруги. Деякі перетворювачі можуть підтримувати точність вихідної напруги у вузькому діапазоні, як правило, з відхиленням менше 1%. Такий рівень точності життєво важливий для забезпечення належної роботи електронних пристроїв і систем, які вимагають стабільного живлення.

Перетворювачі постійного струму в постійний струм мають різні топології та конфігурації, що задовольняють широкий діапазон застосувань і вимог до потужності. Вони можуть бути розроблені як автономні пристрої, інтегровані у

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

великі системи керування живленням або вбудовані в окремі компоненти, такі як мікропроцесори чи мікроконтролери.

1.1.1 Типи DC-DC перетворювачів

Існує кілька типів перетворювачів DC-DC, кожен з яких має унікальну топологію схеми та характеристики [5]. Ці топології можна розділити на дві групи: неізолювані та ізолювані перетворювачі. Неізолювані перетворювачі мають спільну землю між входом і виходом, тоді як ізолювані перетворювачі забезпечують гальванічну розв'язку між землею входу і виходу. У цьому обговоренні зосереджено на неізолюваних перетворювачах, які далі класифікуються за кількома загальними топологіями:

1. Понижуючий перетворювач – Buck Converter (Step-Down Converter): він знижує вхідну напругу до нижчої вихідної напруги, одночасно збільшуючи вихідний струм. Він використовує серію перемикачів, котушку індуктивності та конденсатор для регулювання вихідної напруги шляхом регулювання робочого циклу перемикачів. Понижувальні перетворювачі зазвичай використовуються в програмах, які потребують нижчого рівня напруги, ніж вхідне джерело живлення, наприклад, пристрої з живленням від батарейок і регулювання напруги в комп'ютерних системах.

2. Підвищувальний перетворювач – Boost Converter (Step-Up Converter): Це підвищує вхідну напругу до вищої вихідної напруги, одночасно зменшуючи вихідний струм. Він використовує перемикачі, котушку індуктивності та конденсатор для управління передачею енергії, що призводить до збільшення вихідної напруги. Підвищувальні перетворювачі зазвичай використовуються в програмах, які вимагають вищої вихідної напруги, ніж вхідне джерело живлення, наприклад, драйвери світлодіодів живлення або підвищення напруги для портативних пристроїв.

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Понижувально-підвищувальний перетворювач – Buck-Boost Converter: це універсальна топологія, яка може підвищувати або зменшувати вхідну напругу залежно від робочого циклу перемикачів. Ця топологія поєднує в собі елементи як понижувальних, так і підвищувальних перетворювачів, що робить її придатною для додатків із змінною вхідною напругою або коли потрібні як підвищувальні, так і знижувальні перетворення. Понижувально-підвищувальні перетворювачі використовуються в таких додатках, як сонячні енергетичні системи та пристрої з акумуляторним живленням із змінними рівнями напруги.

4. Перетворювач Чука – Ćuk Converter: це розширена топологія, яка може забезпечити як підвищувальну, так і знижувальну перетворення напруги з низькими пульсаціями вхідного та вихідного струму. У ньому використовується комбінація котушок індуктивності та конденсаторів в унікальному розташуванні, що забезпечує високу ефективність і покращену продуктивність порівняно з іншими неізольованими перетворювачами. Перетворювачі Ćuk використовуються в конструкціях блоків живлення, які вимагають низьких пульсацій вихідної напруги та високої ефективності, таких як чутливі схеми аналогового або змішаного сигналу.

5. Перетворювач односторонньої первинної індуктивності – SEPIC Converter (Single-Ended Primary-Inductor Converter): це універсальна топологія, яка може виконувати як підвищувальну, так і знижувальну перетворення напруги. Він пропонує кілька переваг, зокрема безперервний вхідний і вихідний струми та здатність підтримувати стабільну вихідну напругу, навіть коли вхідна напруга близька до вихідної напруги або дорівнює їй. Перетворювачі SEPIC підходять для додатків, що вимагають гнучкого перетворення напруги з мінімальними перешкодами вхідного або вихідного струму, таких як автомобільні джерела живлення та зарядні пристрої для акумуляторів.

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Конвертер Зета – Zeta Converter: це менш поширена топологія, яка забезпечує функціональність, подібну до конвертера SEPIC, оскільки вона дозволяє як підвищувати, так і знижувати перетворення напруги. Він використовує унікальне розташування індукторів, конденсаторів і перемикачів, що забезпечує високу ефективність і гнучкість. Перетворювач Zeta використовується в додатках, де потрібне точне регулювання напруги та широкий діапазон вхідної та вихідної напруги, наприклад, джерела живлення телекомунікацій або системи керування батареями.

Кожна топологія DC-DC перетворювача має свої унікальні переваги, недоліки та компроміси. Вибір відповідного типу перетворювача для конкретного застосування залежить від конкретних вимог, таких як рівні вхідної та вихідної напруги, ефективність, регулювання навантаження та обмеження розміру. Знайомство з різними типами перетворювачів постійного струму є критичним для інженерів і дизайнерів, які працюють із силовою електронікою, оскільки це допомагає їм вибрати найбільш відповідну топологію для свого застосування.

1.2 Понижувальні перетворювачі

1.2.1 Принцип дії понижувальних перетворювачів

Понижуючий перетворювач, також відомий як понижуючий перетворювач, є популярною топологією в силовій електроніці, яка перетворює вищу вхідну напругу на нижчу вихідну напругу [6]. Це має вирішальне значення в різних додатках, від портативних пристроїв до автомобільних систем, де певні компоненти або підсистеми потребують нижчого рівня напруги для роботи. Основною перевагою понижувального перетворювача є його простота,

					КВРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

яка забезпечує ефективне перетворення напруги за допомогою відносно невеликої кількості компонентів.

Принцип дії понижувального перетворювача передбачає контрольовану передачу енергії від входу до виходу через перемикачі, котушку індуктивності та конденсатор. Перемикач високої сторони (зазвичай MOSFET) і перемикач низької сторони (зазвичай діод) використовуються в понижувальному перетворювачі для керування струмом, що протікає через індуктор. Регулюючи робочий цикл перемикача високої сторони, середню вихідну напругу можна регулювати пропорційно вхідній напрузі.

Коли перемикач високої сторони понижувального перетворювача ввімкнено, він дозволяє струму протікати через котушку індуктивності, яка зберігає енергію у своєму магнітному полі. Потім ця накопичена енергія передається на вихід, заряджаючи вихідний конденсатор і живлячи навантаження. Коли перемикач високої сторони вимикається, а перемикач низької сторони вмикається, магнітне поле індуктора слабшає, вивільняючи накопичену енергію та зберігаючи струм, що надходить до навантаження. Понижуючий перетворювач розроблено для роботи в системі керування із замкнутим циклом, де механізм зворотного зв'язку постійно порівнює вихідну напругу з опорною напругою, щоб переконатися, що вихідна напруга залишається стабільною та регульованою незалежно від змін у вхідній напрузі чи умовах навантаження.

1.2.2 Значення та застосування понижувальних перетворювачів

Понижувальні перетворювачі відіграють життєво важливу роль у численних застосуваннях у різних галузях промисловості завдяки їх ефективному перетворенню напруги, компактним розмірам і адаптивності. У

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

цьому розділі наведено деякі поширені застосування конвертерів доларів і наведемо приклади, які демонструють їх функціональність і значення [8].

Джерела живлення: Регульовані джерела живлення є одним із найпоширеніших застосувань для понижуючих перетворювачів. Вони використовуються в автономних і інтегрованих джерелах живлення, зокрема адаптери змінного і постійного струму, зарядні пристрої для акумуляторів і системи розподілу постійного струму. Щоб знизити вхідну напругу від мережі до нижчої напруги, достатньої для заряджання акумулятора ноутбука, наприклад, адаптер живлення ноутбука часто використовує понижуючий перетворювач.

Телекомунікації: понижувальні перетворювачі використовуються в телекомунікаційних системах для створення стійких шин напруги з низьким рівнем шуму для делікатних компонентів, зокрема радіочастотні (РЧ) схеми, мікроконтролери та процесори цифрових сигналів (DSP). Вони здатні ефективно перетворювати вхідну напругу вищої напруги, наприклад телекомунікаційна шина 48 В, на необхідні нижчі напруги окремих підсистем.

Автомобільна електроніка: сучасні автомобілі мають різноманітні електричні компоненти, які потребують точного керування напругою. Програми для понижуючих перетворювачів охоплюють керування живленням для інформаційно-розважальних систем, модулів керування двигуном (ЕСМ) і драйверів світлодіодних фар. Щоб забезпечити постійну яскравість і тривалий термін служби, драйвер автомобільних світлодіодних фар, наприклад, може використовувати понижуючий перетворювач, щоб підтримувати постійний струм через світлодіоди.

Системи відновлюваної енергії: понижувальні перетворювачі використовуються в системах сонячної та вітрової енергії для контролю вихідної напруги обладнання для збору енергії. Ефективність перетворення енергії

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

сонячних панелей або вітрових турбін можна оптимізувати за допомогою алгоритмів відстеження точки максимальної потужності (MPPT), що може значно підвищити загальну продуктивність системи відновлюваної енергії.

Портативні пристрої та пристрої з живленням від акумуляторів. Понижувальні перетворювачі часто використовуються в мобільних пристроях, зокрема смартфони, планшети та переносну електроніку, для ефективного керування енергоспоживанням багатьох компонентів. Знижуючи напругу батареї до рівня, необхідного для різних підсистем, вони можуть збільшити термін служби батареї та покращити продуктивність пристрою.

1.3 Підвищувальні перетворювачі

1.3.1 Принцип дії підвищувальних перетворювачів

Підвищувальний перетворювач (іноді його називають також "boost" перетворювачем) – це тип DC/DC перетворювача, який збільшує вхідну напругу на вихідному виводі. Принцип дії підвищувального перетворювача полягає в ефективному переносі енергії з джерела живлення на вихідне навантаження.

Основний принцип дії підвищувального перетворювача базується на принципі керованого перемикання елементів, таких як транзистори. В перетворювачі наявні ключові компоненти, такі як індуктивності, конденсатори і комутаційні елементи (частіше всього транзистори).

Процес роботи підвищувального перетворювача можна розглядати у наступних кроках:

- період увімкнення транзистора: Починається з увімкнення транзистора, що призводить до встановлення з'єднання між вхідним джерелом напруги і індуктивністю (часто індуктивності зазначають як "L" на схемах);

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- накопичення енергії в індуктивності: Під час увімкнення транзистора індуктивність починає накопичувати енергію у вигляді магнітного поля;
- період вимикання транзистора: Після певного часу транзистор вимикається, індуктивність продовжує постачати струм до навантаження через діод, розміщений паралельно з нею;
- збільшення вихідної напруги: Під час періоду вимикання транзистора, коли струм проходить через індуктивність, вихідна напруга збільшується через взаємодію індуктивності та конденсатора.

Цей процес дозволяє збільшувати вихідну напругу відносно вхідної, що робить підвищувальний перетворювач корисним для багатьох застосувань, де потрібне підвищення напруги, наприклад, у сонячних електростанціях або системах живлення для електроніки.

1.3.2 Значення та застосування підвищувальних перетворювачів

Підвищувальні перетворювачі широко використовуються в різних сферах застосування завдяки їх здатності підвищувати вхідну напругу. У цьому розділі обговорюватимуться деякі поширені програми та приклади підвищувальних перетворювачів у реальних сценаріях.

1. Джерела живлення: підвищувальні перетворювачі використовуються в джерелах живлення для отримання стабільної вищої вихідної напруги від джерела нижчої вхідної напруги, що робить їх корисними для портативних пристроїв і систем, що працюють від акумуляторів, де вхідна напруга може змінюватися через розряд акумулятора або інші фактори. Приклади охоплюють зарядні пристрої для ноутбуків, USB-адаптери живлення та портативні блоки живлення.

2. Світлодіодне освітлення: у системах світлодіодного освітлення підвищувальні перетворювачі використовуються для підтримки постійного

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

струму світлодіодної стрічки, забезпечуючи постійну яскравість, навіть коли вхідна напруга коливається. Це особливо актуально в автомобільних додатках, де напруга електричної системи автомобіля може змінюватися, а підвищувальний перетворювач забезпечує стабільне світлодіодне освітлення.

3. Системи сонячної енергії: підвищувальні перетворювачі відіграють вирішальну роль у системах сонячної енергії, особливо в контролерах відстеження точки максимальної потужності (MPPT). Перетворювач регулює свою вихідну напругу, щоб отримати максимальну потужність від сонячних панелей, збільшуючи напругу панелі для зарядки акумуляторів або подачі живлення в електричну мережу.

4. Електричні транспортні засоби: підвищувальні перетворювачі використовуються в електричних транспортних засобах для підвищення напруги від акумуляторної батареї до вищого рівня напруги, необхідного для різних електричних компонентів, таких як тяговий двигун, система кондиціонування повітря або гідропідсилювач керма. Це забезпечує ефективну подачу енергії та оптимальну продуктивність автомобіля.

5. Телекомунікації: підвищувальні перетворювачі використовуються в телекомунікаційних програмах для отримання стабільних вищих вихідних напруг із нижчих вхідних напруг, забезпечуючи надійну роботу радіочастотних (РЧ) передавачів, базових станцій та іншого комунікаційного обладнання.

6. Сенсорні системи: підвищувальні перетворювачі зазвичай використовуються в сенсорних системах для забезпечення стабільного джерела напруги для аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) та інших чутливих електронних компонентів. Це особливо важливо для сенсорних систем, що працюють у середовищах зі змінною вхідною напругою, наприклад систем віддаленого моніторингу, що живляться від батареї або пристроїв збору енергії.

						КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			17

1.4 Понижувально-підвищувальні перетворювачі

1.4.1 Принцип дії понижувально-підвищувальних перетворювачів

Понижувально-підвищувальний перетворювач – це тип перетворювача DC-DC, який може створювати вихідну напругу, яка є вищою або нижчою за вхідну напругу [10], що робить його універсальною топологією перетворення потужності для різних застосувань у силовій електроніці, де регулюється вхідна напруга та вихідна напруга. вимоги можуть відрізнятись.

Понижувально-підвищувальний перетворювач працює в двох різних режимах: «понижуючий», коли вихідна напруга нижча за вхідну, і «підвищувальний», коли вихідна напруга вища за вхідну. Перехід між цими двома режимами є плавним, що дозволяє перетворювачу підтримувати стабільну вихідну напругу за різних вхідних умов.

Понижувально-підвищувальний перетворювач працює за допомогою перемикача, як правило, транзистора, і діода, який контролює протікання струму через котушку індуктивності та конденсатор. Під час увімкненого стану перемикача енергія зберігається в індукторі, а під час вимкненого стану енергія передається на вихід через діод. Робочий цикл перемикача або відношення часу увімкнення до загального періоду циклу перемикачання визначає вихідну напругу перетворювача. Регулювання робочого циклу дозволяє контролювати та підтримувати вихідну напругу на потрібному рівні.

1.4.2 Значення та застосування понижувально-підвищувальних перетворювачів

Понижувально-підвищувальні перетворювачі – це універсальні пристрої для перетворення потужності, які знаходять застосування в широкому діапазоні застосувань, оскільки вони можуть підвищувати або знижувати вхідну напругу

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

для задоволення конкретних вихідних вимог. У цьому розділі розглядаються деякі типові застосування та приклади понижувальних перетворювачів.

Портативні електронні пристрої, такі як смартфони, ноутбуки та медичне обладнання, використовують батареї, які можуть розряджатися. Понижувально-підвищувальні перетворювачі забезпечують стабільну вихідну напругу для оптимальної продуктивності, навіть коли напруга батареї падає нижче бажаного рівня.

Системи збору енергії, такі як сонячні панелі та термоелектричні генератори, мають змінну вихідну напругу через умови навколишнього середовища. Понижувально-підвищувальні перетворювачі регулюють ці напруги, забезпечуючи стабільний вихід для вихідних навантажень або зарядки акумулятора.

Автомобільна електроніка має різні вимоги до напруги для різних систем, які можуть забезпечити понижувально-підвищувальні перетворювачі, підтримуючи стабільне джерело живлення. Це забезпечує надійну роботу навіть при змінній вхідній напрузі через коливання електричної системи автомобіля або напруги акумулятора.

Для належної роботи промислового та телекомунікаційного обладнання потрібні стабільні джерела живлення з жорсткими нормативами напруги. Понижувально-підвищувальні перетворювачі можуть підтримувати точні вихідні напруги навіть за наявності коливань вхідної напруги, викликаних перешкодами в лінії або змінами навантаження.

Понижувально-підвищувальні перетворювачі регулюють струм і напругу в системах світлодіодного освітлення, забезпечуючи постійну яскравість і подовжуючи термін служби світлодіодів. Ці перетворювачі можуть підтримувати широкий діапазон вхідної напруги від різних джерел живлення,

серед яких батареї, адаптери змінного/постійного струму та системи відновлюваної енергії.

1.5 Висновки до першого розділу

У даному розділі розглянуто основні аспекти силової електроніки, її значення в сучасному світі електротехніки та електроніки, а також розглянуто різні типи перетворювачів та їхні застосування. Розглянуто загальні принципи та особливості силової електроніки, а також важливість її застосування в сучасних електричних системах та пристроях. Розбір різних категорій перетворювачів надає чітке уявлення про різноманітність силової електроніки та її широкий спектр застосувань. Завдяки цьому дослідженню, можна краще зрозуміти та оптимізувати роботу DC/DC перетворювачів, що має велике значення в умовах постійного росту використання відновлюваних джерел енергії та електромобілів. Результати цього дослідження стануть важливим внеском у подальший розвиток силової електроніки та підвищення ефективності сучасних електротехнічних систем

					КВРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ТОПОЛОГІЯ ТА КЛЮЧОВІ КОМПОНЕНТИ DC/DC ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Топологія та ключові компоненти DC/DC перетворювачів становлять основу сучасної силової електроніки, яка відіграє критичну роль у перетворенні, керуванні та адмініструванні електроенергії. Опис цих елементів є важливим для розуміння принципів функціонування та проектування електронних пристроїв, які використовуються у широкому спектрі застосувань, від пристроїв живлення мобільних пристроїв до індустріальних систем автоматизації та енергоефективних технологій. У цьому розділі докладно розглянемо різні топології DC/DC перетворювачів, а також ключові компоненти, які входять до їхнього складу. Розуміння цих концепцій допоможе здійснити аналіз та оптимізацію роботи перетворювачів для досягнення кращої ефективності та надійності електронних систем.

2.1 Огляд основних топологій DC/DC перетворювачів

Топології DC/DC перетворювачів відіграють важливу роль у розумінні принципів функціонування та застосування силової електроніки. DC/DC перетворювачі є ключовими компонентами в електротехнічних системах, забезпечуючи ефективне перетворення електричної енергії на різних рівнях напруги [11].

2.1.1 Топологія схеми понижувальних перетворювачів

На схемі, що зображена на рисунку 2.1, наведено загальну структуру понижувального перетворювача. Він складається з джерела постійного струму

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(позначеного як E), перемикача S (зазвичай MOSFET або IGBT), діода D , LC-фільтра низької частоти та навантаження R . Транзистор зображений як перемикач S з маленькою стрілкою, що вказує напрямком струму через перемикач.

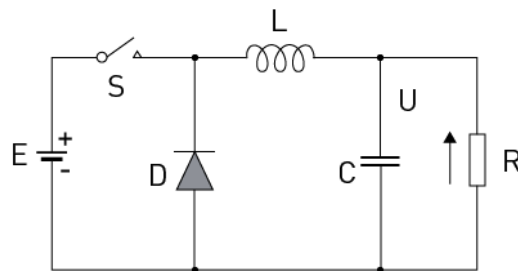


Рисунок 2.1 –Принципова схема понижувального перетворювача – інтервал $t_{увім}$

Коли перемикач S увімкнено, діод D стає зворотно поляризованим напругою живлення E , і напруга на індукторі стає рівною різниці між напругою живлення та напругою навантаження (рисунок 2.2):

$$u_L = E - U \quad (2.1)$$

Струм, що протікає через котушку індуктивності, буде лінійно зростати від мінімального до максимального значення (рисунок 2.3).

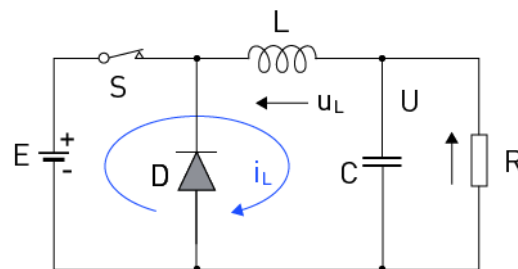


Рисунок 2.2 – Принципова схема понижувального перетворювача

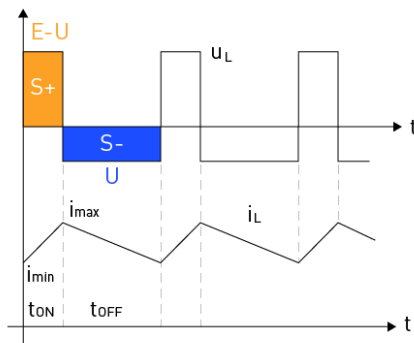


Рисунок 2.3 –Графік залежності напруги індуктивності та струму від часу

Коли перемикач S вимкнено, відбувається процес комутації, при якому струм індуктивності від джерела E переходить у діод D [12]. Цей процес показаний на рисунку 2.4. Для кращого розуміння процесу комутації необхідно враховувати, що обмотка індуктора складається з ряду котушок, розташованих одна біля одної, так що між ними існує не тільки магнітний зв'язок, а й ємнісний зв'язок, який представлений конденсатором C_p . За момент до вимикання (перемикач S) напруга на індукторі була

$$u_L = u_{C_p} = E - U \quad (2.2)$$

Після вимкнення перемикача S струм через котушку індуктивності залишається незмінним за напрямком і силою і замикається через конденсатор C_p (рисунок 2.4а). У наступний період конденсатор розряджається і заряджається в іншу сторону. Зворотна напруга діода становить

$$u_{Dr} = U + u_L = U + u_{C_p}, \quad (2.3)$$

і стає нульовим, коли напруга на конденсаторі C_p стає рівним напрузі навантаження в протилежному напрямку. У цей момент діод приймає на себе

струм індуктора (рисунок 2.4б), тому напруга на індукторі дорівнює напрузі навантаження

$$u_L = -U, \quad (2.4)$$

а струм через котушку індуктивності лінійно зменшується і досягає мінімального значення в кінці періоду (рисунок 2.3).

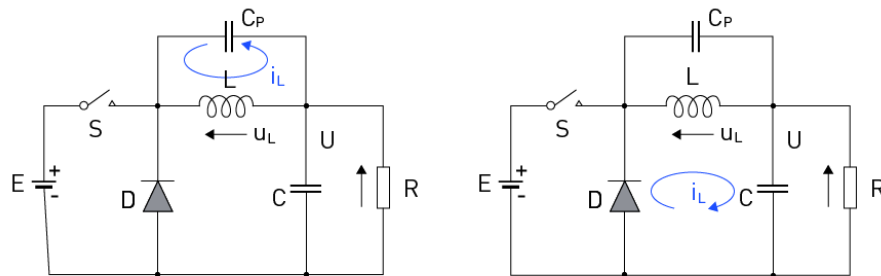


Рисунок 2.4 – Принципова схема понижувального перетворювача –
інтервал $t_{вимк}$

У сталому стані протягом одного циклу перемикання загальна зміна струму індуктора дорівнює нулю:

$$\Delta I_L = \frac{1}{L} \int_0^T u_L dt = 0 \Rightarrow \int_0^T u_L dt = 0 \quad (2.5)$$

Це означає, що в усталеному стані площа хвилі напруги на індукторі дорівнює нулю, тобто:

$$S_+ = S_- \Rightarrow (E - U) \cdot t_{увім} = U \cdot t_{вимк} \quad (2.6)$$

Середнє значення напруги навантаження (напруга на резисторі R) дорівнює:

$$U = E \cdot \frac{t_{увім}}{t_{увім} + t_{вимк}} = E \cdot \frac{t_{увім}}{T} = E \cdot d, \quad (2.7)$$

де d являє собою робочий цикл перемикача S.

Понижувальні перетворювачі використовують просту, але ефективну топологію схеми для зниження вхідної напруги до нижчої вихідної. Основними компонентами конвертера є:

1. Перемикач високої сторони – це керований напівпровідниковий пристрій, який з'єднує та від'єднує джерело вхідної напруги від решти схеми. Зазвичай це MOSFET або IGBT, який керується сигналом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для визначення робочого циклу та вихідної напруги.

2. Перемикач низького рівня – це інший електронний пристрій, який забезпечує протікання струму через індуктор у відповідному напрямку. У несинхронних понижуючих перетворювачах це, як правило, діод, а в синхронних понижуючих перетворювачах, як правило, MOSFET. Він також керується сигналом ШІМ, але з різницею фаз, що доповнює роботу перемикача високої сторони.

3. Котушка індуктивності служить елементом накопичення енергії, який допомагає згладити форму хвилі струму та підтримувати безперервний потік струму в колі. Значення індуктивності ретельно підібрано, щоб забезпечити бажаний режим провідності (безперервний або переривчастий) і мінімізувати пульсації вихідної напруги.

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Вихідний конденсатор фільтрує форму хвилі напруги, щоб зменшити пульсації напруги та забезпечити стабільну вихідну напругу для навантаження. Значення ємності, еквівалентного послідовного опору ($R_{екв}$) і еквівалентної послідовної індуктивності ($L_{екв}$) відіграють важливу роль у визначенні продуктивності перетворювача та якості вихідної напруги.

5. Схема керування генерує сигнали ШІМ для керування перемикачами високого та низького рівня, контролює вихідну напругу та регулює робочий цикл для регулювання напруги. Схеми керування можуть використовувати різні механізми зворотного зв'язку, такі як керування режимом напруги, керування режимом струму або розширені стратегії керування для оптимізації продуктивності та стабільності перетворювача.

Ці компоненти разом з деякими додатковими пасивними компонентами (такими як вхідні конденсатори та резистори для мереж зворотного зв'язку) утворюють основну топологію схеми понижувального перетворювача. Правильно вибравши та сконструювавши ці компоненти, понижуючий перетворювач може ефективно та ефективно знизити вхідну напругу до бажаної вихідної напруги для різних застосувань.

2.1.2 Топологія схеми підвищувальних перетворювачів

Підвищувальні перетворювачі – це різновид комутаційного перетворювача DC-DC [13], який ефективно підвищує (підвищує) вхідну напругу до вищої вихідної напруги. Таке перетворення напруги стає можливим завдяки накопиченню енергії в індукторі під час фази ввімкнення та передачі її навантаженню під час фази вимкнення. Програми силової електроніки, які потребують більшої вихідної напруги, ніж джерело вхідного сигналу, залежать, зокрема, від підвищувальних перетворювачів.

					КВРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Основний принцип роботи підвищувального перетворювача можна зрозуміти через наступні два етапи:

1. Період увімкнення (S1 закритий, S2 відкритий) : під час цього етапу вхідна напруга ($U_{вх}$) подається на котушку індуктивності (L), що призводить до лінійного збільшення струму через котушку індуктивності. Енергія, що зберігається в індукторі, накопичується, а діод (D) має зворотне зміщення, запобігаючи проходженню струму до навантаження. Струм індуктора можна виразити як:

$$\Delta I_L = \frac{U_{вх}}{L} \cdot t_{увім}, \quad (2.8)$$

де ΔI_L – зміна струму індуктивності, L – індуктивність, $t_{увім}$ – тривалість періоду увімкнення.

2. Період вимкнення (S1 відкритий, S2 закритий): Коли перемикач S1 розмикається, струм індуктивності повинен продовжувати протікати. Це змушує діод D стати прямим зміщенням, а котушка індуктивності віддає свою накопичену енергію навантаженню (R) і вихідному конденсатору (C). Протягом цього періоду напруга на індукторі (U_L) дорівнює різниці між вихідною напругою ($U_{вих}$) і вхідною напругою ($U_{вх}$). Струм індуктора лінійно зменшується, коли енергія передається навантаженню, і рівняння для струму індуктора виглядає так:

$$\Delta I_L = \frac{(U_{вих} - U_{вх})}{L} \cdot t_{вимк}, \quad (2.9)$$

де $t_{вимк}$ – тривалість періоду вимкнення.

					КВРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Прирівнявши рівняння струму індуктивності для обох каскадів і переставивши члени, можна отримати співвідношення перетворення напруги для підвищувального перетворювача:

$$U_{вих} = \frac{U_{вх}}{(1-D)}, \quad (2.10)$$

де D – робочий цикл, визначений як відношення часу ввімкнення ($t_{увім}$) до загального періоду перемикання (T), або

$$D = \frac{t_{увім}}{(t_{увім} + T_{вимк})}. \quad (2.11)$$

Це рівняння показує, що вихідною напругою можна керувати, регулюючи шпаруватість форми хвилі перемикання, враховуючи вищу вихідну напругу, ніж вхідна. У наступних розділах докладніше вивчимо топологію схеми, ключові компоненти, режими провідності, конструктивні міркування, ефективність і застосування підвищувальних перетворювачів, забезпечуючи повне розуміння їх роботи та використання в системах силової електроніки.

У даній топології перетворювача магнітна енергія індуктора використовується для передачі енергії від джерела постійного струму з нижчою напругою до напруги навантаження з вищою. Увімкнувши перемикач S , індуктор підключається до джерела постійного струму E (рисунок 2.5). Діод D має зворотне зміщення від напруги на навантаженні, яке живиться енергією від конденсатора. Під дією напруги E сила струму індуктора лінійно зростає від мінімального до максимального значення (рис. 2.7).

Після закінчення інтервалу $t_{увім}$ перемикач S вимикається. У наступному інтервалі часу ($t_{вимк}$) струм індуктора, який є результатом накопиченої магнітної

					КВРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергії, протікає через діод до навантаження, передаючи енергію від джерела постійного струму та індуктора до навантаження (рис. 2.6).

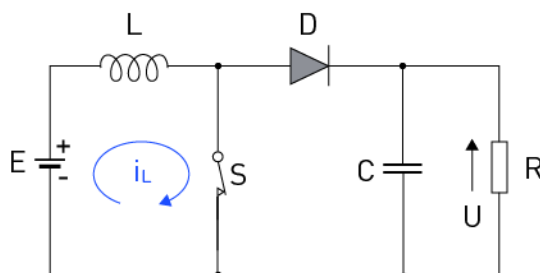


Рисунок 2.5 – Електрична схема підвищувального перетворювача – інтервал $t_{увім}$

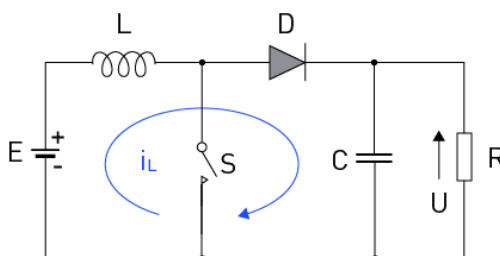


Рисунок 2.6 – Схема підвищувального перетворювача – інтервал $t_{вимк}$

У цей період напруга на індукторі змінює напрямок і стає рівною різниці між напругою на навантаженні та напругою живлення постійного струму [13]. Під дією цієї напруги струм індуктора зменшується від максимального до мінімального значення (рисунок 2.7). У сталому режимі середнє значення напруги на індукторі дорівнює нулю:

$$E \cdot t_{увім} = (U - E) \cdot t_{вимк}$$

$$\Rightarrow U = E \frac{1}{\frac{t_{вимк}}{t_{увім} + t_{вимк}}} = E \frac{1}{\frac{T - t_{увім}}{T}} = E \frac{1}{1 - \frac{t_{увім}}{T}} = E \frac{1}{1 - d} \quad (2.12)$$

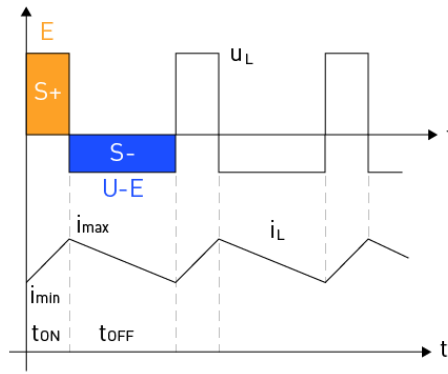


Рисунок 2.7 – Підвищувальний перетворювач – графік залежності напруги індуктивності та струму від часу

З попереднього рівняння видно, що напруга на навантаженні буде дорівнювати напрузі джерела постійного струму, якщо $d = 0$, і зростатиме зі збільшенням активної частини періоду (t_{yvim}), підтверджуючи, що це чоппер для підвищення напруги. Те саме рівняння також показує, що напруга на навантаженні буде нескінченно великою, якщо $d = 1$, що неможливо, оскільки робочий цикл, що дорівнює 1, означає, що $t_{yvim} = T$ або $t_{вимк} = 0$, що далі означає, що перемикач S ніколи не вимикається, і, отже, не відбуватиметься передача енергії від джерела постійного струму до навантаження, в результаті чого напруга навантаження буде дорівнювати нулю.

Підвищувальний перетворювач – це популярна і широко використовувана топологія перетворювача DC-DC, яка підвищує вхідну напругу до вищої вихідної. Основна топологія схеми підвищувального перетворювача складається з таких ключових компонентів:

Індуктор (L): індуктор, який накопичує та вивільняє енергію протягом циклів перемикання, є важливою частиною підвищувального перетворювача. Його основна робота полягає в збереженні накопичення енергії під час перетворення, одночасно контролюючи струм.

Перемикач (S): перемикач. Перемикач (зазвичай MOSFET або IGBT) відіграє вирішальну роль в управлінні передачею енергії між входом і виходом, чергуючи від'єднання та підключення індуктора до навантаження.

Діод (D): протягом часу вимкнення діод дозволяє струму протікати лише в одному напрямку в колі – до виходу. Коли перемикач розімкнутий, він зупиняє повернення струму на вхідну сторону.

Вихідний конденсатор (C): вихідний конденсатор відповідає за стабілізацію напруги на навантаженні та згладжування вихідної напруги. Він гарантує постійну вихідну напругу для навантаження та фільтрує високочастотні пульсації напруги.

Резистор навантаження (R): Резистор навантаження (R) символізує електричне навантаження, яке підключене та живиться від підвищувального перетворювача. Перетворювач повинен бути побудований, щоб дати цьому навантаженню необхідну напругу та струм.

Основну роботу підвищувального перетворювача можна підсумувати таким чином: протягом періоду ввімкнення індуктивність накопичує енергію від джерела вхідної напруги, тоді як діод запобігає проходженню струму до навантаження. Коли перемикач вимкнено, індуктор вивільняє свою накопичену енергію через діод, надаючи навантаженню напругу, вищу за вхідну. Вихідний конденсатор згладжує вихідну напругу, забезпечуючи стабільне живлення навантаження.

2.1.3 Топологія схеми понижувально-підвищувальних перетворювачів

Згідно з теорією роботи перетворювача, магнітна енергія, отримана від джерела постійного струму E , з часом накопичується в індукторі. Ця енергія протягом часу передається навантаженню. Напруга на навантаженні повинна мати полярність, зображену на рисунку 2.8, оскільки діод розташований певним

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

чином. Позитивна клемма напруги навантаження з'єднана з негативною клемою джерела постійного струму, вказуючи на те, що цей перетворювач виконує інверсію напруги на навантаженні. Це важлива функція конвертера, яка може обмежувати її використання.

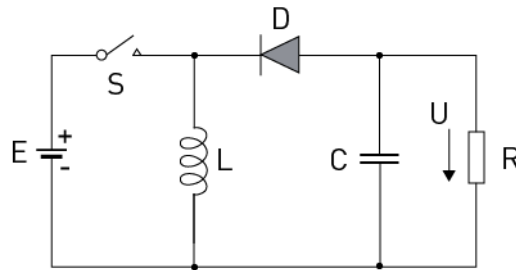


Рисунок 2.8 – Принципова схема понижувально-підвищувального перетворювача

Коли перемикач увімкнено (рисунок 2.9), індуктор підключається до джерела постійного струму E , що призводить до лінійного збільшення струму індуктора від мінімального до максимального значення (рисунок 2.11). Протягом цього часу діод має зворотне зміщення через суму напруги на навантаженні U та джерелі постійного струму E , і тому не проводить [14].

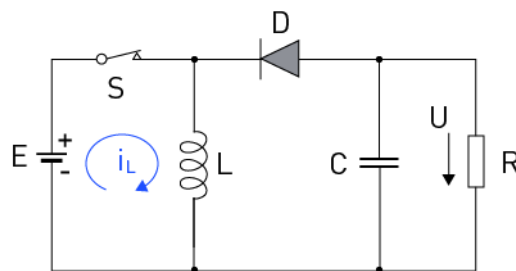


Рисунок 2.9 – Принципова схема понижувально-підвищувального перетворювача – інтервал $t_{увім}$

При вимкненому вимикачі через діод D (рисунок 2.10) встановлюється струм індуктивності, передаючи магнітну енергію індуктора навантаженню. Під впливом напруги навантаження U струм індуктора зменшується від максимального до мінімального значення, як показано на рисунку 2.11.

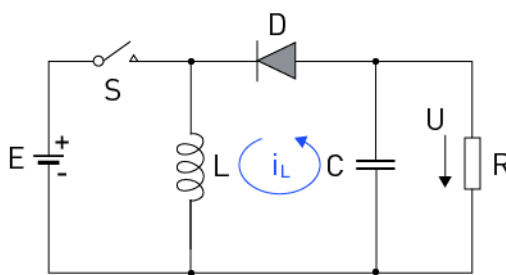


Рисунок 2.10 – Принципова схема понижувально-підвищувального перетворювача – інтервал $t_{вимк}$

У сталому стані середнє значення напруги на індукторі дорівнює нулю, що означає:

$$S_+ = E \cdot t_{увім} = S_- = U \cdot t_{вимк} \Rightarrow U = E \cdot \frac{t_{увім}}{t_{вимк}} \quad (2.12)$$

Таким чином, цей перетворювач може працювати як понижуючий або підвищуючий перетворювач ($t_{увім}/t_{вимк} = 0 \dots \infty$). Однак слід зазначити, що, як і у випадку з підвищуючим перетворювачем, функція підсилувача напруги обмежена втратами в колі.

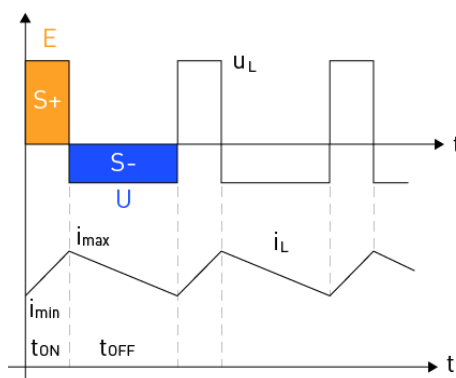


Рисунок 2.11 – Понижувально-підвищувальний перетворювач – графік залежності напруги та струму індуктивності від часу

Понижувально-підвищувальний перетворювач має певну схожість як з підвищуючим, так і з понижуючим перетворювачем у своїй топології схеми.

Нижче наведено деякі з основних частин понижувально-підвищувального перетворювача:

Перемикач (S): Зазвичай силовий транзистор, такий як MOSFET, регулює потік струму індуктора. Режими роботи перетворювача і вихідна напруга залежать від увімкненого і вимкненого станів перемикача.

Діод (D): коли перемикач знаходиться в положенні «вимкнено», він дозволяє струму протікати лише в одному напрямку, від індуктора до виходу. Вихідний конденсатор не може розряджатися назад до вхідного джерела завдяки діоду.

Індуктор (L): зберігає енергію під час увімкненого стану перемикача та віддає її на вихід під час вимкненого стану. Котушка індуктивності має вирішальне значення для згладжування вихідної напруги та струму.

Конденсатор (C): Цей компонент фільтрує та згладжує вихідну напругу, накопичуючи та вивільняючи енергію. Це допомагає підтримувати стабільну вихідну напругу, зменшуючи пульсації напруги та перехідні реакції.

Вхідні та вихідні фільтри : це додаткові компоненти, як правило, конденсатори або комбінації індуктор-конденсатор (LC), які використовуються для зменшення електромагнітних перешкод (EMI) і шуму на вході та виході перетворювача.

Топологію понижувально-підвищувального перетворювача можна налаштувати різними способами, а саме: з неінвертуючими конфігураціями, конфігураціями Сік і одностороннього первинного індукторного перетворювача (SEPIC). Кожна з цих установок має унікальні переваги з точки зору ізоляції входів і виходів, полярності напруги та ефективності.

Підсумовуючи, понижувально-підвищувальний перетворювач використовує критичні частини, а саме перемикач, діод, котушку індуктивності та конденсатор для контролю та підтримки вихідної напруги. Він поєднує в собі

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

долар і покращує топології конвертера. Різноманітні конфігурації понижувально-підвищувального перетворювача забезпечують особливі переваги, які налаштовані відповідно до потреб певної програми.

2.2 Висновки до другого розділу

У даному розглянуто основні топології цих перетворювачів, зокрема понижувальні, підвищувальні та понижувально-підвищувальні схеми. Кожна з цих топологій має свої особливості і принципи роботи, які важливо розуміти для успішного проектування та використання DC/DC перетворювачів у різних застосуваннях.

Топологія схеми понижувальних перетворювачів дозволяє знижувати напругу на виході порівняно зі входною напругою, що робить їх ідеальними для застосувань, де потрібна менша напруга на виході, ніж на вході.

Схеми підвищувальних перетворювачів дозволяють підвищувати напругу на виході, що є корисним для застосувань, де необхідна вища напруга на виході, ніж на вході.

Понижувально-підвищувальні перетворювачі дозволяють знижувати або підвищувати напругу на виході в залежності від потреб системи, що робить їх універсальними та досить гнучкими для різноманітних застосувань.

Цей розділ надає загальний огляд та розуміння ключових топологій DC/DC перетворювачів, що є важливим для подальшого дослідження та оптимізації їх ефективності та надійності.

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

3 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕШКОД У ІНВЕРТУЮЧОМУ ПОНИЖУВАЛЬНО-ПІДВИЩУВАЛЬНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Починаючи з 1865 року, коли Джеймс Клерк Максвелл вперше сформулював теорію електромагнітного поля, електротехнічна галузь пройшла шлях винайдень, розробок та впроваджень різноманітних електричних та електронних пристроїв, таких як бездротові засоби зв'язку, електричні машини та двигуни. Ці досягнення суттєво вплинули на наше повсякденне життя, зробивши електричні пристрої невід'ємною частиною нашого світу. Однак швидкий темп розвитку та широке використання електротехнічних виробів породили низку проблем, серед яких найбільш відчутними є електромагнітні перешкоди (ЕМІ), що можуть завдати шкоди як пристроям, так і людям.

Боротьба з електромагнітними випромінюваннями стала складною проблемою для інженерів та вчених. Джерелами ЕМІ можуть бути як природні явища, наприклад, атмосферні розряди та позаземні радіаційні випромінювання, так і створені людиною чинники, такі як лінії електропередачі, самозаймання та радіочастотні перешкоди. Перетворювачі постійного струму (DC-DC) відіграють важливу роль у різних електротехнічних пристроях та є одним із основних джерел електромагнітних перешкод.

Традиційні методи придушення ЕМІ, такі як фільтри та екранування, мають свої обмеження вартості, об'єму, ваги та ефективності. Тому потрібні нові теорії та методи для подолання цієї проблеми. Одним із перспективних напрямків є використання теорії хаосу та контролю хаосу для зменшення електромагнітних перешкод. Цей розділ має на меті оглянути сучасний стан придушення електромагнітних перешкод та висвітлити можливість

					КВРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

використання теорії хаосу в цій сфері, а також спонукати до подальших досліджень та розвитку в цій області.

3.1 Електромагнітні перешкоди: від відкриття до сучасності

Протягом періоду з 1855 по 1873 рік Джеймс Клерк Максвелл, шотландський фізик-теоретик і математик, відкрив класичну електромагнітну теорію, що об'єднала різні галузі електрики, магнетизму і оптики в одну послідовну теорію [15]. Його робота в електромагнетизмі стала визначною і відкрила нову еру в розвитку науки. У 1888 році німецький фізик Генріх Рудольф Герц першим експериментально підтвердив існування електромагнітних хвиль, що відкрило шлях для бурхливого розвитку радіотехнологій. З ростом мікроелектронних технологій і широкого впровадження електричних і електронних пристроїв з'явилися нові виклики, пов'язані з електромагнітними перешкодами, які можуть впливати на роботу пристроїв та здоров'я людей. Наприклад, виникла проблема з перешкодами радіосигналу, коли використовується пылосос у сусідній кімнаті, що ускладнює прийом радіо або телевізійний сигнал.

У кінці 1980-х років сталися п'ять аварій гелікоптерів Blackhawk через електромагнітний імпульс від дуже потужних радарів і радіопередавачів з електронними системами керування польотом [16]. Останні події, пов'язані зі стільниковими телефонами, зокрема перенаправлення рейсу Northwest Airlines через підозрілий стільниковий телефон пасажира та затримку рейсу British Airways через телефонний дзвінок на борту, що викликав серйозний страх серед пасажирів та екіпажу. Це призвело до заборони використання стільникових телефонів на борту літаків через їхній вплив на зв'язок та навігацію.

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

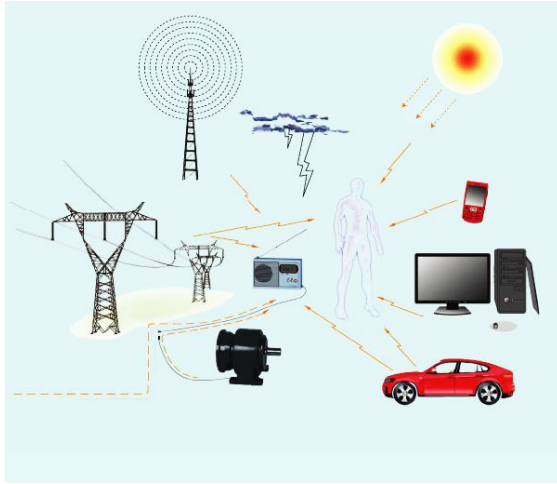


Рисунок 3.1 – Типове електромагнітне середовище

Існує безліч негативних прикладів, які підтверджують шкідливий вплив електромагнітних перешкод. Такі ситуації відомі та розповсюджені, іноді навіть використовуються навмисно як елементи електронної війни. З ростом електричних та електронних пристроїв стає дедалі актуальнішим питання контролю над електромагнітними перешкодами. Ця проблема стосується як приймачів/жертв електромагнітних випромінювань, так і джерел електромагнітних перешкод.

Джерелами електромагнітних перешкод можуть бути як природні явища, такі як блискавка в атмосфері, так і технологічні аспекти, такі як лінії електропередач та радіочастотні перешкоди. Для природних джерел важко знайти рішення, але для техногенних джерел потрібні відповідні заходи контролю.

У перетворювачах постійного струму велике значення має контроль електромагнітних перешкод, оскільки вони є основними джерелами електромагнітних випромінювань. Для цього використовуються різні методи, такі як фільтрація та екранування, хоча вони мають свої обмеження щодо вартості та ефективності.

Недавно винайдені теорія хаосу та методологія управління хаосом виявилися ефективними у боротьбі з електромагнітними перешкодами. Вони дозволяють розподіляти спектри вихідних сигналів по всьому діапазону частот, що допомагає зменшити електромагнітні перешкоди. Ці методи відрізняються від традиційних заходів тим, що зосереджуються на самій схемі пристрою, що може значно знизити витрати та об'єм.

3.2 Вплив електромагнітних перешкод на електричні кола

Електромагнітні перешкоди, або ЕМІ, можуть бути описані як небажані впливи, які виникають в електричних колах через електромагнітну провідність або випромінювання зовнішніх джерел. Ці порушення можуть перервати, заважати або погіршувати роботу схеми. Перешкоди виникають внаслідок взаємодії між джерелом випромінювання та приймачем через спільний шлях передачі сигналу [17].

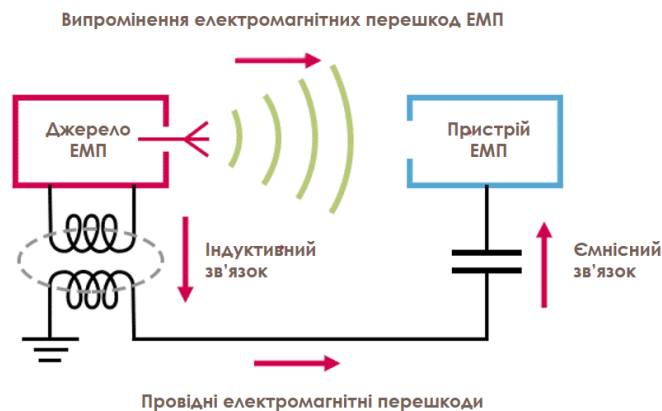


Рисунок 3.2 – Режими зв'язку електромагнітних перешкод

З точки зору частотного діапазону, електромагнітне випромінювання поділяється на провідні та випромінювані. Провідні ЕМІ виникають через фізичний контакт провідників, у той час як випромінювані виникають через

індукцію без прямого контакту провідників. Це можна порівняти з водою, яка тече у трубі, та світлом, яке випромінюється від лампи. На низьких частотах ЕМІ випромінюються через провідність, а на високих — через випромінювання. Провідні ЕМІ зазвичай спостерігаються у діапазоні частот від 10 кГц до 30 МГц і поділяються на синфазний (СМ) і диференціальний (DM) шуми залежно від напрямку провідності.

Синфазний шум і шум диференціального режиму є двома типами електромагнітних перешкод, які передаються через лінії електропередачі у різних напрямках. Емпірично встановлено, що на частотах нижче 5 МГц шумові струми переважно є диференціальними, тоді як на вищих частотах вони переважно є синфазними.

Випромінювані електромагнітні перешкоди можуть охоплювати як електричні, так і магнітні поля. Сила електричного поля залежить від напруги, робочої частоти та "ефективної довжини антени", тоді як сила магнітного поля залежить від струму, робочої частоти та "ефективної площі контуру антени".

Для мінімізації випромінюваних електромагнітних перешкод важливо максимально зблизити джерело шуму до його початкового джерела та навантаження, але це не завжди можливо з механічних причин.

Спостереження та оцінку електромагнітних перешкод можна проводити за допомогою вимірювання спектральної щільності потужності (PSD), яка вказує, як потужність сигналу розподіляється залежно від частоти. Наявність великих піків на частотах, кратних основній частоті, може свідчити про наявність електромагнітних перешкод. Нефільтровані шкідливі гармоніки вхідних і вихідних сигналів у перетворювачах можуть призвести до пошкодження джерела живлення та завадити роботі іншого обладнання, що може спричинити серйозні проблеми з електромагнітною сумісністю (EMC).

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Електромагнітні перешкоди в імпульсних джерелах живлення

У сучасному електротехнічному середовищі імпульсні джерела живлення відіграють ключову роль у забезпеченні потреб електронних систем. Вони забезпечують ефективне та надійне перетворення електричної енергії між різними рівнями напруги та струму, що дозволяє використовувати електронні пристрої в різноманітних застосуваннях.

Залежно від конкретних вимог до живлення та потреб систем, існує ряд різноманітних концепцій імпульсних джерел живлення, серед яких особливе місце займають підвищувальні, понижувальні та зворотні перетворювачі. Наприклад, для драйверів дисплеїв часто використовуються інвертуючі перетворювачі, які забезпечують стабільне живлення двох позитивних і однієї негативної ліній.

У цьому розділі буде розглянуто різні топології імпульсних джерел живлення та їх характеристики електромагнітної сумісності. Особлива увага буде приділена властивостям кожної топології та її впливу на взаємодію з іншими компонентами системи.

Імпульсні джерела живлення викликають електричні перешкоди через їх швидкі di/dt та dv/dt . Залежно від вимог до живлення та перетворення напруги існують різноманітні концепції імпульсних джерел живлення. Широко використовуються підвищувальні, понижувальні та зворотні перетворювачі. Інвертуюча топологія підвищення/збільшення частоти часто використовується в драйверах для дисплеїв. Дисплеї потребують двох позитивних і однієї негативної ліній живлення. Позитивні лінії живлення часто контролюються понижуючими перетворювачами, а негативні – інвертуючим понижуючим/підвищуючим перетворювачем [1].

Різні топології наведені на рисунку 3.3. Кожна топологія мала власні властивості електромагнітної сумісності [18]. Наприклад, характеристика

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

електромагнітних перешкод ізолюваних зворотно-ходових перетворювачів часто залежить від ємності між обмотками [2,3,4,5]. Для підвищувальних і понижуючих перетворювачів індуктивність ізолює або вхідну, або вихідну сторону від комутаційного шуму. У понижувальному перетворювачі найбільше шуму перемикання видно на вході [6], тоді як для підвищувального перетворювача положення котушки індуктивності спричиняє появу найбільшого шуму перемикання на виході [7]. Інвертуючий понижуючий/підвищувальний перетворювач використовує індуктор, підключений до землі. Таким чином, шум перемикання з'являється як на вході, так і на виході схеми.

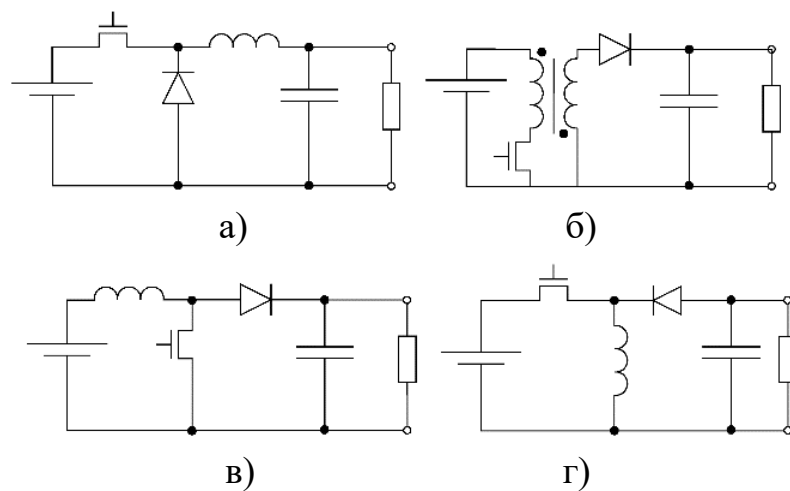


Рисунок 3.3 – Основна схема різних типів перетворювачів.

- а) – Понижувальний перетворювач; б) – Перетворювач зворотного ходу;
 в) – Підвищувальний перетворювач; г) – Інвертуючий понижувально-
 підвищувальний перетворювач

Автори дослідження [28] зосередились на моделюванні та зменшенні електромагнітних викидів, використовуючи крос-конденсатор та покращену макетну друковану плату. У цьому документі представлено аналіз провідних електромагнітних перешкод для конвертера такого типу. Дослідження ґрунтується на симуляціях та вимірюваннях конвертера, що виготовлений з дискретних компонентів, а також на інтегрованих комерційних конвертерах.

Отримані вимірювання та симуляції демонструють наявність двох визначених резонансів та ідентифікують компоненти та пов'язані паразити, що визначають частоти коливань під час увімкнення та вимикання.

3.4 Опис топології інвертуючого понижувально-підвищувального перетворювача

Інвертуючий понижувально-підвищувальний перетворювач створює негативну вихідну напругу з позитивного входу. Його величина може бути як вище, так і нижче величини вхідної напруги.

Основними елементами простої інвертованої топології пониження/підвищення на рисунку 3.3г є транзистор, що працює як перемикач, діод, котушка індуктивності, вихідний конденсатор та інтегральна схема контролера, яка генерує сигнал ШІМ із широтно-імпульсною модуляцією та керує затвором MOSFET. В літературі можна знайти інші, більш складні топології. Для високої потужності використовують синхронні понижувально-підвищувальні перетворювачі. Тут діоди замінено другим транзистором, що дозволяє зменшити втрати через діод. Також існують вдосконалені концепції для розширення діапазону напруги конвертера [33] або зниження пульсації вхідного струму [34]. Однак у цій роботі розглянуто базову топологію з метою розуміння фундаментального утворення резонансів в межах схеми.

3.5 Вплив електромагнітних перешкод на інвертуючий понижувально-підвищувальний перетворювач

Розширивши схему інвертуючого понижувально-підвищувального перетворювача набором паразитних компонентів (рисунку 3.4) різних пристроїв та плати, можна проаналізувати шляхи електромагнітних перешкод до входу та

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

виходу. Паралельна ємність індуктивності зазвичай менше 10 пФ і часто лише кілька пФ. Вона не відводить значущий струм на заземлення. Її значення менше, ніж ємність діоду. Це дозволяє електромагнітним перешкодам бути видимими як на вході, так і на виході [36].

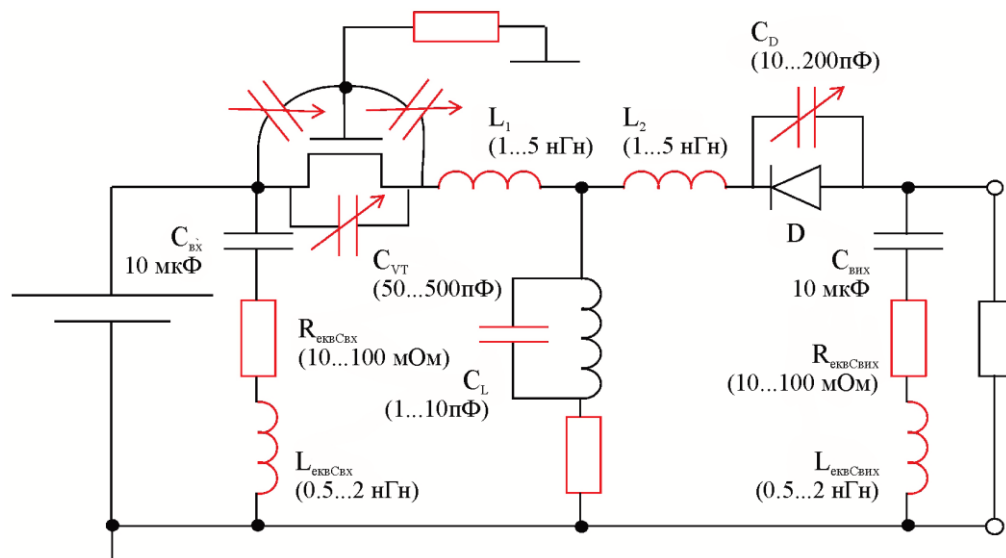


Рисунок 3.4 – Схема з паразитними компонентами

До схеми було додано наступні паразитні компоненти:

1. Ємність MOSFET у відкритому стані (від 50 пФ до 500 пФ).
2. Ємність діоду у відкритому стані (від 10 пФ до 200 пФ).
3. Індуктивність петлі, яка формується вхідним конденсатором, шляхом через транзистор до діода, через діод та вихідний конденсатор знову до земельної площини, розкладено на $L_{еквСвх}$, L_1 , L_2 , $L_{еквСвих}$.

4. Еквівалентна послідовна індуктивність $L_{екв}$ та еквівалентний послідовний опір $R_{екв}$ вихідного та вхідного конденсаторів дозволяють виникнення падіння напруги вздовж конденсатора, яке може викликати електромагнітні струми перешкод у підключених проводах. Це можуть бути струми диференційного режиму, проте, оскільки існують різні шляхи повернення, наприклад, вздовж дротів як вхідних, так і вихідних, ці струми

також можуть виявлятися як струми спільного режиму. Струми спільного режиму не розглядалися в цій роботі. У практичних застосуваннях для фільтрації використовуються кілька конденсаторів. У цьому випадку $L_{екв}$ та $R_{екв}$ в схемі повинні розумітися як об'єднана ефективна $L_{екв}$ та $R_{екв}$ паралельних конденсаторів.

5. Частоти перемикачання, розглянуті в цій роботі, знаходилися в діапазоні МГц. Комерційні ІС використовували частоти 1,2 МГц до 2,4 МГц.

Досліджувані перетворювачі були невеликими і мали номінальну потужність лише кілька ват. В роботі проведено лише односторонній аналіз, оскільки ці менші перетворювачі не є автономними друкованими платами з входом і виходом кабелю, а зазвичай інтегровані у великі друковані плати. Тому синфазні ефекти не є домінуючими в цих перетворювачах і не розглядаються в даній роботі.

Необхідно враховувати два резонанси:

- коли перемикач розімкнутий, він утворює конденсатор, а діод утворює провідний шлях;
- коли перемикач замкнутий, діод діє як конденсатор, а перемикач утворює провідний шлях.

3.5.1 Шлях електромагнітних перешкод при закритому перемикачі

Увімкнення MOSFET збільшує фазову напругу та змінює зміщення діода. Швидкий перехідний процес збуджує LC-структуру, яка утворюється індуктивністю петлі та ємністю діода (синя лінія на рисунку 3.5а). Цікаво, що основна котушка не була частиною цього шляху, якщо можна знехтувати її паразитною паралельною ємністю.

Увімкнення MOSFET збільшує фазову напругу та змінює зміщення діода. Швидкий перехідний процес збуджує LC-структуру, утворену індуктивністю

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

петлі та ємністю діода (синя лінія на рисунку 3.5а). Цікаво, що основний індуктор не був частиною цього шляху, якщо можна знехтувати його паразитною паралельною ємністю.

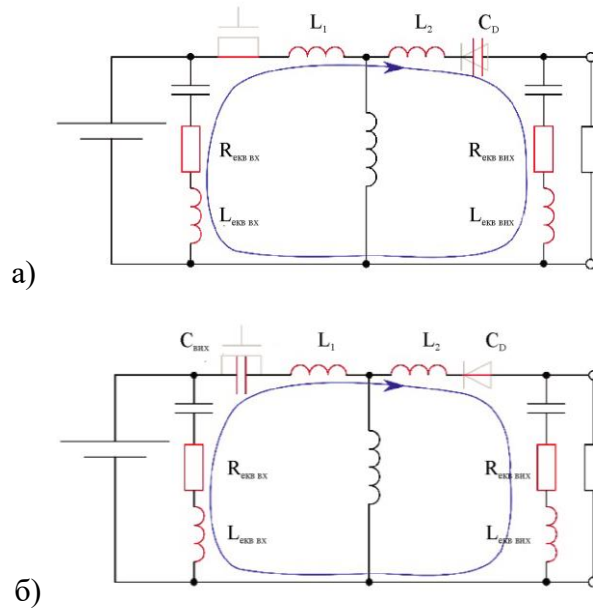


Рисунок 3.5 – Шлях електромагнітних перешкод під час

увімкнення та вимкнення: а) – шлях електромагнітних перешкод під час увімкнення; б) – шлях електромагнітних перешкод під час вимкнення

3.5.2 Шлях електромагнітних перешкод при розімкненому перемикачі

Резонансний контур відрізняється під час вимкнення (рисунок 3.5б). Два аспекти визначають відмінності між режимами увімкнення та вимикання:

- Індуктивності залишаються незмінними, але критична ємність змінюється від діода до MOSFET. Обидва є нелінійними.
- Часи зростання та падіння напруги зазвичай неоднакові, що призводить до різного збудження резонансів

3.4 Висновки до третього розділу

У даному розділі проведено докладний аналіз впливу електромагнітних перешкод на функціонування цього типу перетворювача. Зокрема, було розглянуто різні шляхи, які можуть впливати на генерацію електромагнітних перешкод у пристрої, зокрема, при закритому та розімкненому перемикачі. Виявлені фактори, що спричиняють появу перешкод, дозволять в подальшому здійснювати ефективні заходи для їх уникнення чи зменшення. Отримані результати мають важливе значення для практичного застосування і проектування інвертуючих понижувально-підвищувальних перетворювачів, сприяючи покращенню їхньої електромагнітної сумісності та стабільності роботи.

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						47
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПОВЕДІНКИ DC/DC ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

У сучасній електротехніці та електроніці перетворювачі DC/DC відіграють ключову роль у забезпеченні ефективного та надійного перетворення напруги для різноманітних пристроїв і систем. Моделювання та аналіз їх поведінки є невід'ємною частиною процесу їхнього проектування, оптимізації та вдосконалення.

У даному розділі зосереджена увага на моделюванні та аналізі поведінки перетворювачів DC/DC на різних рівнях: від математичного моделювання на основі рівнянь та перетворення функцій до комп'ютерного симулювання та експериментального вимірювання реальних пристроїв. Розглянуто як стандартні, так і складні моделі, зокрема моделі, що враховують паразитні параметри та неідеальності компонентів, які часто зустрічаються у реальних схемах.

Основна мета цього розділу – дослідити і вивчити поведінку перетворювачів DC/DC за допомогою моделювання на різних рівнях абстракції, щоб надати інженерам і дослідникам необхідні знання та інструменти для ефективного проектування та оптимізації цих пристроїв.

4.1 Розробка імітаційної моделі на різних рівнях деталізації

На початку наведено основну схему SPICE (симулятор електричних схем – Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) на рисунку 4.1 для введення у основну функцію [38]. В подальшому це було розширено для увімкнення паразитних компонентів з метою ілюстрації впливу електромагнітних перешкод.

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

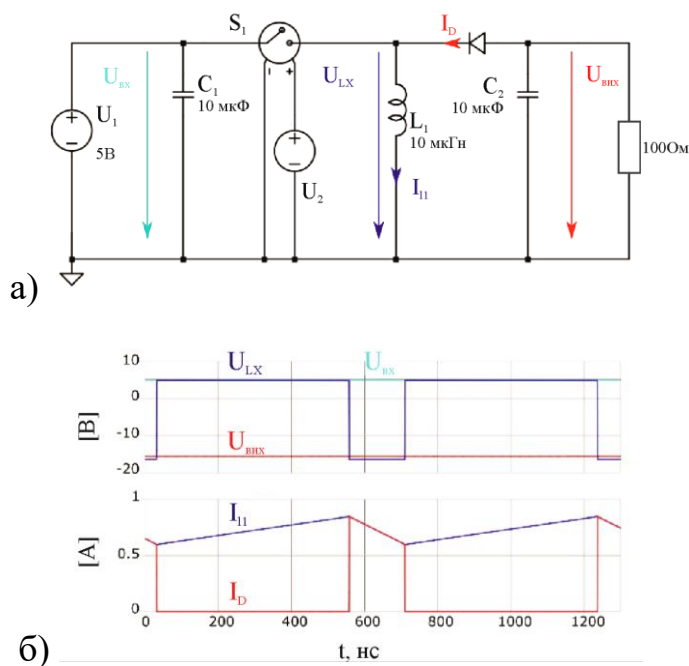


Рисунок 4.1 – Початкова модель конвертера з ідеальними компонентами:

а) – Принципова схема базового перетворювача; б) – Осцилограми напруги та струму основної схеми

На рисунку 4.1 показано, що транзистор та мікросхема контролера були замінені ідеальним комутатором SPICE, який керується джерелом імпульсної напруги. З урахуванням того, що всі компоненти та з'єднання були ідеальними, під час моделювання не виявлено жодних паразитних резонансів чи викидів. Результати моделювання та схема, показана на рисунку 4.1, ілюструють основний процес перемикання.

4.2 Удосконалення імітаційної моделі з урахуванням паразитних параметрів

На рисунку 5 показана розширена модель. Паралельно з перемикачем було додано конденсатор ємністю 100 пФ для імітації ємності стік-витік MOSFET. Для простоти використовувалася фіксована ємність перемикача. Була

використана модель PMOS транзистора. Крім того, додано реальну модель діода Шотткі (SL03), паразитну ємність котушки індуктивності, $L_{екв}$ і $R_{екв}$ конденсаторів, а також імпеданс траси. Розширена імітаційна модель показана на рисунку 4.2.

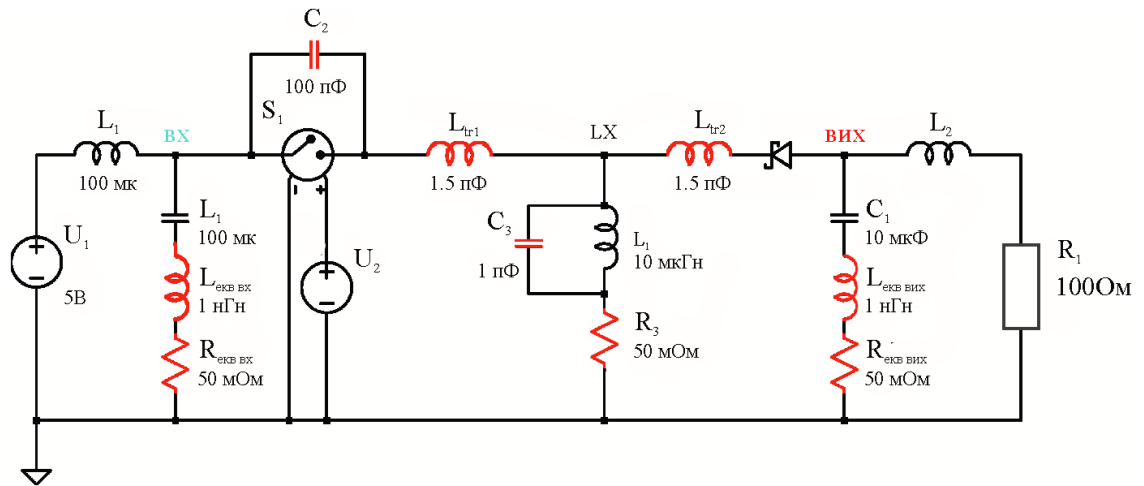


Рисунок 4.2 – Імітаційна модель з врахуванням паразитних параметрів

Під час увімкнення домінуючий резонанс формується ємністю діода та індуктивністю петлі $L_{ЛЛО}$ кола (збалансований лінійний лінійний опір), що є сумою L_1 , L_2 та $L_{екв}$ - і вихідних конденсаторів. Частоту можна розрахувати за допомогою виразу (4.1). Результати моделювання під час увімкнення та вимикання представлені на рисунку 4.3.

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{лло} \cdot C_D}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{5 \text{ мкГн} \cdot 31 \text{ пФ}}} = 404 \text{ МГц} \quad (4.1)$$

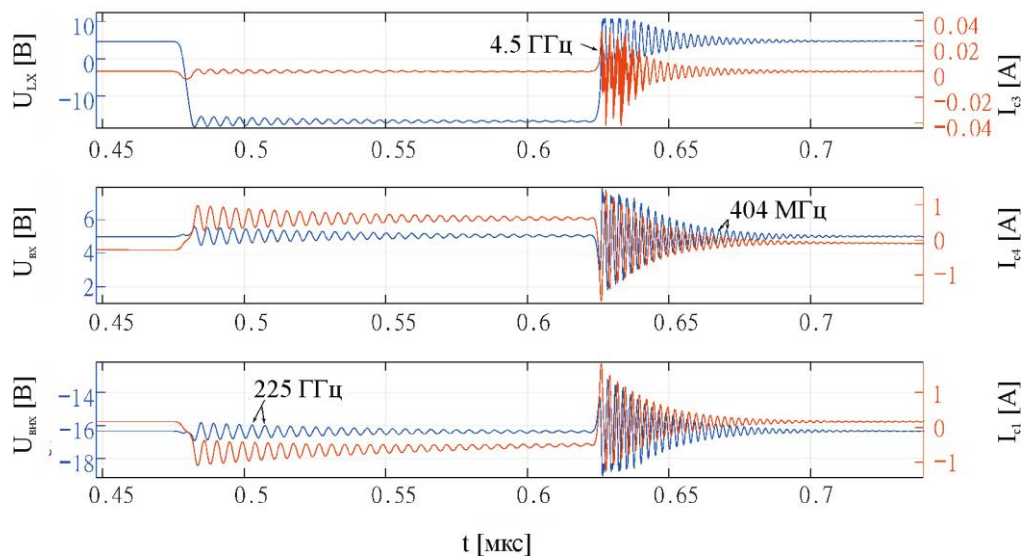


Рисунок 4.3 – Результати моделювання під час увімкнення та вимикання перетворювача, які враховують паразитні параметри

Під час вимикання виникає домінуючий резонанс, який формується ємністю перемикача та індуктивністю петлі. Частоту можна розрахувати за допомогою формули (4.2). Ця формула визначає частоту домінуючого резонансу в системі.

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{\text{лло}} \cdot C_{\text{перем}}}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{5 \text{ мкГн} \cdot 100 \text{ нФ}}} = 225 \text{ МГц} \quad (4.2)$$

Під час увімкнення виникає інший резонанс, який формується ємністю котушки індуктивності та індуктивністю петлі $L_{\text{лло}'}$, що утворюється $(L_{Tr1} + L_{\text{екв вх}}) \parallel (L_{Tr2} + L_{\text{екв вих}})$. Частота цього резонансу обчислюється за допомогою формули (4.3). Цей резонанс також відображений на рисунку 4.3.

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{\text{лло}'} \cdot C_{\text{індуктор}}}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{1.25 \text{ мкГн} \cdot 1 \text{ нФ}}} = 4.5 \text{ МГц} \quad (4.3)$$

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{осн} \cdot (C_{перем} + C_d)}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{10\text{мкГн} \cdot (100\text{пФ} + 31\text{пФ})}} = 4.4\text{МГц} \quad (4.4)$$

Ця частота є найвищою в колі. Найнижча резонансна частота в контурі виявилася під час режиму переривчастої провідності (рис. 4.4). Оскільки постійний струм не протікав через основний індуктор, транзистор і діод фактично діяли як конденсатори. В цьому випадку головний індуктор став частиною резонансів. Цікаво відзначити, що найвищі та найнижчі резонанси утворювалися тією самою петлею, проте всі індуктори трансформувалися в індуктори, а навпаки. Резонансна частота в режимі переривчастого струму обчислюється за допомогою формули (4.4)

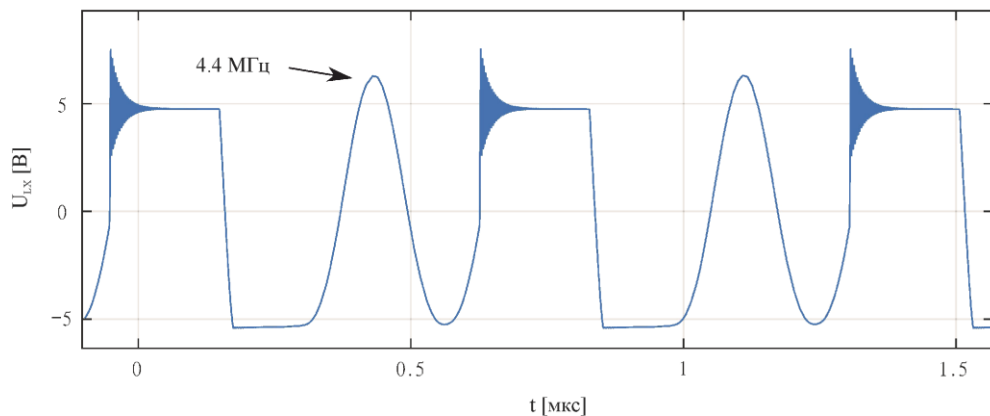


Рисунок 4.4 – Виміряні коливання в режимі переривчастого проведення струму

Напругу електромагнітних перешкод на вхідних і вихідних портах можна розрахувати за допомогою формули (4.5), де $L_{екв}$ і $R_{екв}$ є паразитними параметрами вхідного або вихідного конденсатора, $i_{ВЧ}$ – це струм у високочастотній петлі, а ω – кутова частота.

$$U = (j\omega L_{екв} + R_{екв}) \cdot i_{ВЧ} \quad (4.5)$$

4.3 Дослідження перетворювача DC/DC на основі окремих компонентів

Для підтвердження достовірності спостережень, отриманих під час моделювання, був зібраний перетворювач із дискретних компонентів, і проведені вимірювання. Модель SPICE була адаптована до компонентів, які використовуються в реальній схемі. Імітаційна модель SPICE наведена в Додатку А. Структура перетворювача була максимально простою, без використання будь-якого контуру керування для регулювання вихідної напруги. Збірка використовувала мінімальну площу (50 мм × 30 мм) на твердій площині заземлення.

З метою представлення основних процесів виникнення електромагнітних перешкод (EMI) у даній роботі було вибрано високошвидкісний драйвер затвора. Час наростання сигналу драйвера затвора від 20% до 80% становив 2,4 нс, а швидкість наростання під час зростаючого фронту складала 1,5 В/нс. Час спаду від 80% до 20% складав 1,8 нс, зі швидкістю наростання під час падіння -2 В/нс. Вихідний сигнал драйвера затвора змінювався від -3 В до 3 В. Джерело MOSFET було підключено до вхідного порту ($U_{ex} = 3$ В), що призвело до зростання напруги затвор-витік від -6 В до 0 В.

Для уникнення надмірного навантаження використовувався Р-канальний MOSFET. Обрано пристрої з низькою ємністю як для діода, так і для Р-канальних MOSFET, щоб підвищити значення dv/dt . Швидкість наростання від 20% до 80% на фазовому вузлі становила 2,62 В/нс під час зростаючого фронту та -1,75 В/нс під час падіння краю.

Перелік використаних компонентів представлено в таблиці 4.1.

Для ілюстрації характеристик електромагнітних перешкод та порівняння їх із симуляцією, були додані додаткові дискретні конденсатори для моделювання ємності діода та MOSFET під час як моделювання, так і

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимірювань. Також були введені додаткові індуктивності для спостереження резонансів у випадку зміни індуктивності петлі.

Таблиця 4.1 – Компоненти, що використовуються в схемі

Компонент	Номер деталі	Характеристики
MOSFET	ZXMP10A13FTA	$C_{OSS}=40$ пФ; $U_{DS}=-4$ В
Діод Шотткі	ZLLS350	$C_{Total}=5$ пФ; 4 В
Індуктивність	CDRH4D16FB/NP-100MC	$L=10$ мкГн
Вимикач затвора	IX4340N	$I_{вих}=\pm 5$ А

4.4 Експериментальне визначення та аналіз характеристик перетворювача

Для отримання конкретних параметрів та оцінки роботи перетворювача проводилися вимірювання його характеристик.

На рисунку 4.5 представлена основна конфігурація вимірювань, яка була впроваджена на міцній заземленій площині. Для фіксації струмів електромагнітних перешкод були використані лінійні мережні фільтри (LISN), розташовані на вході та виході. Мережа стабілізації опору лінії перехоплювала високочастотні сигнали перед тим, як вони могли потрапити до джерела чи навантаження. Замість цього радіочастотні (РЧ) струми були направлені в порт 50 Ом вимірювального пристрою.

Фазовий струм був перевірений через резистор з опором 1,8 кОм, завершений на вході осцилографа з опором 50 Ом. Вимірювання струму не проводилися, оскільки введення будь-якого струмового зонда могло б додати щонайменше кілька нГн до петлі. Використання осцилографа та спектрального аналізатора дозволяло провести вимірювання на портах напруги на вході $U_{вх}$, напруги на виході $U_{вих}$ та вихідної потужності $P_{вих}$. Коаксіальний кабель 50 Ом безпосередньо підключений до вимірювальних вузлів на друкованій платі.

Осцилограф має 4 канали, що дозволяло одночасно захоплювати сигнали в часовій області на різних портах. Ширина смуги осцилографа 4 ГГц дозволяла аналізувати дзвін сигналу та вимірювати його частоту під час увімкнення та вимкнення. Використовуваний спектральний аналізатор має лише один канал, тому вимірювання частотної області проводилися послідовно. Ширина смуги роздільної здатності (RBW) спектрального аналізатора була встановлена на 300 кГц для всіх вимірювань у частотній області. Драйвер затвора мав як позитивну, так і негативну напругу живлення. Від’ємна напруга живлення була встановлена на рівні -3 В, а позитивна була підключена до вхідної напруги перетворювача, щоб гарантувати, що транзистор був у повністю вимкненому стані. Таким чином, напруга затвор-витік MOSFET змінюється від 0 В до -6 В. Сигнал широкої імпульсної модуляції (ШІМ), який керує драйвером затвора, встановлюється на робочий цикл $d=50\%$ і частоту 3 МГц.

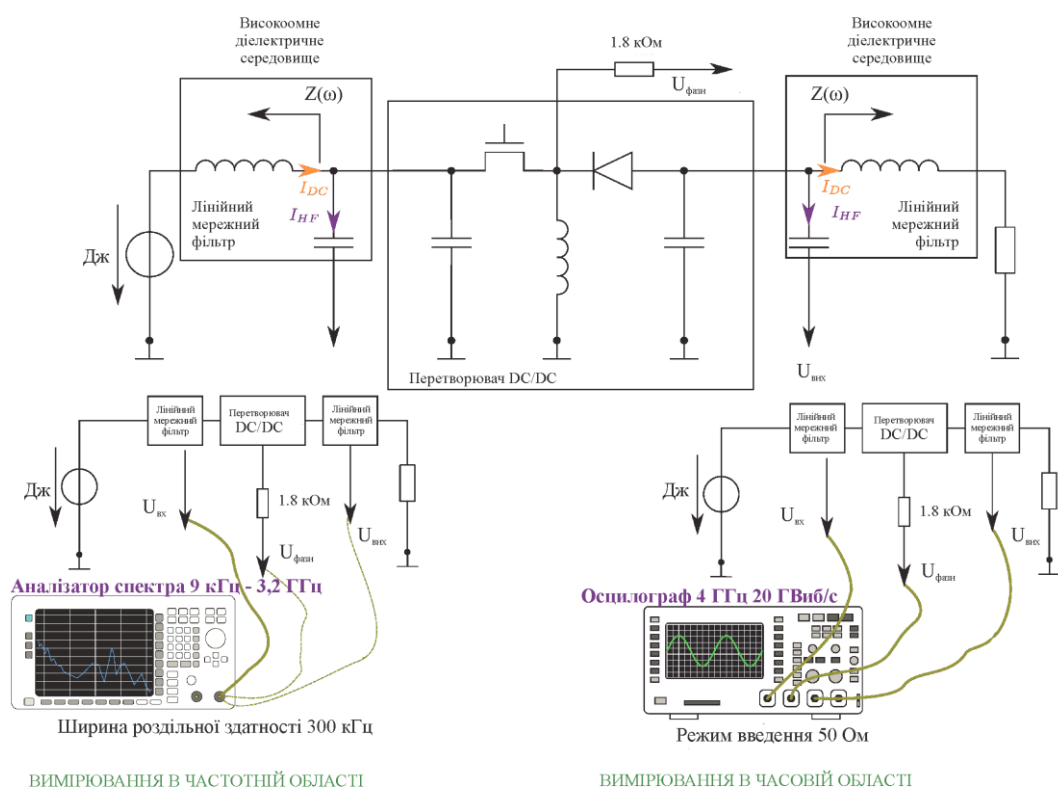


Рисунок 4.5 – Налаштування вимірювання

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

На рисунку 4.6 представлені результати вимірювань на фазовому вузлі перетворювача. Відображено сигнал у часовій області, його частотний спектр і спектрограму. Видно відмінність в частоті коливань при увімкненні та вимиканні. Домінуючі частоти також простежуються в даному часовому сигналі: 333 МГц при вимиканні та 645 МГц при увімкненні. Обидві частоти виявилися видимими як піки у частотному спектрі.

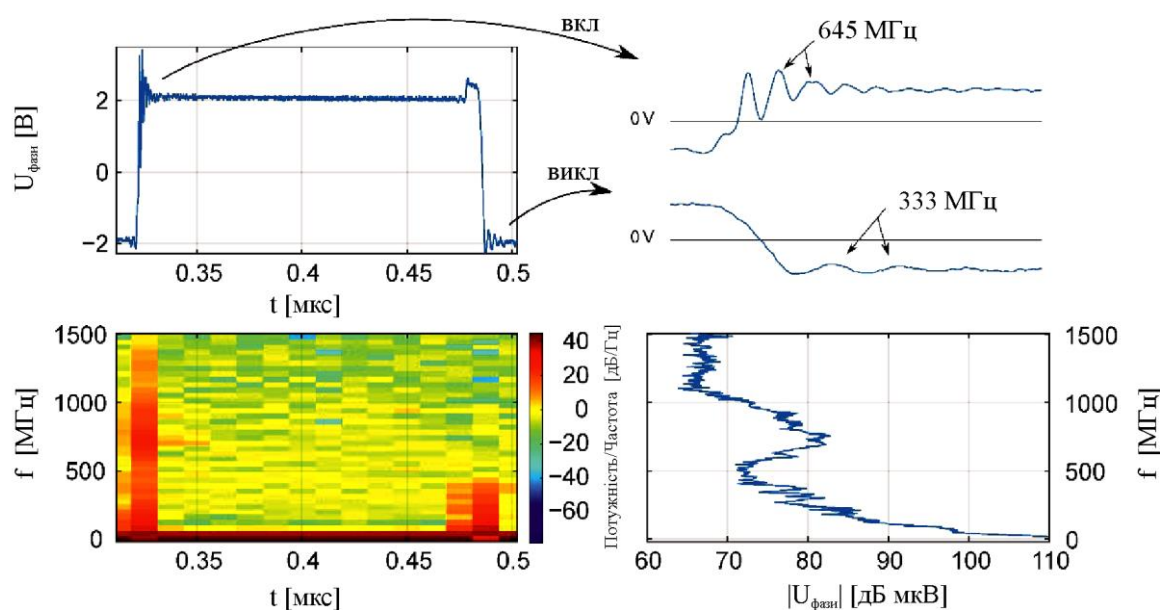


Рисунок 4.6 – Результати вимірювань на фазовому вузлі перетворювача

Для забезпечення доказів для аналізу двох основних контурів, що призводять до електромагнітних перешкод, конденсатори були додані паралельно до діода або MOSFET. Вплив ємності діода вивчався шляхом додавання різних конденсаторів паралельно до діода.

На рисунку 4.7 порівнюються частоти коливань з різними значеннями паразитності контуру. Використання (4.1) і (4.2), враховуючи результуючу ємність діода внаслідок паралельного з'єднання, призвело до розрахункових даних на рисунку 4.7. Частоти коливань під час увімкнення були зменшені, тоді як частоти під час вимкнення залишилися приблизно такими ж. Це підтверджує

шлях електромагнітних перешкод, розглянутий у розділі 3.3.1, і аналіз резонансу під час увімкнення, наведений у розділі 4.2.

Для подальшого розширення розглянено вплив різних компонентів та їхніх паразитних характеристик на електромагнітну сумісність (ЕМС) в перетворювачах. Зазначено, що висока електромагнітна сумісність є ключовою характеристикою для багатьох електронних пристроїв, оскільки це впливає на їхню працездатність та взаємодію з іншими системами.

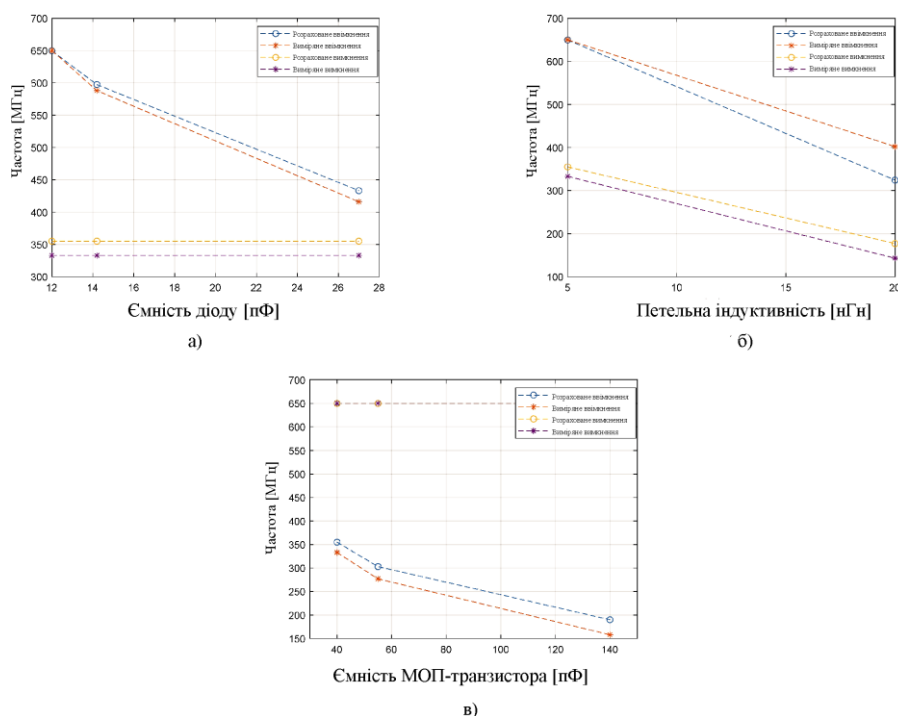


Рисунок 4.7 – Вплив паразитних параметрів схеми на частоту під час увімкнення та вимикання

Дані були отримані шляхом додавання додаткових конденсаторів на діод (рис. 4.7а), додаткових котушок індуктивності в контурі струму (рис. 4.7б), додаткових конденсаторів на MOSFET (рис. 4.7в). Це експериментальне дослідження спрямоване на визначення впливу додаткових компонентів на частоту розрахункових коливаний під час різних режимів роботи перетворювача.

Вплив індуктивності петлі досліджувався шляхом додавання котушки індуктивності 15 нГн послідовно до діода. Завдяки збільшеній індуктивності петлі обидва електромагнітні шляхи перешкод піддалися впливу, і обидва паразитні резонанси зазнали зміщення до нижчих частот (рис. 4.7). Обчислені результати на цьому на рисунку 4.7 знову були отримані з використанням виразів (4.1) і (4.2) з врахуванням результуючої індуктивності петлі.

Вплив ємності MOSFET можна відзначити, додавши різні номінали конденсаторів на стоку та витоку транзистора. У рисунку 4.7 представлено порівняння різних частот коливань з різними значеннями конденсатора. Розраховані дані були отримані за допомогою виразів (4.1) і (4.2) з урахуванням результуючої ємності MOSFET. Видно, що зі збільшенням значення конденсатора відбувається зниження частоти під час вимкнення. Частота під час увімкнення залишалася незмінною, що підтверджує аналіз, представлений у розділі 4.2, та шлях електромагнітних перешкод, розглянутий у розділі 3.3.2.

4.5 Математичне моделювання та комп'ютерне симулювання роботи перетворювача

Модель для імітації в SPICE була відповідно налаштована під використані компоненти та враховувала паразитні параметри друкованої плати. Результати моделювання на фазовому вузлі перетворювача, представлені на рисунку 4.8, порівнюються з вимірюваннями. Підвищення частоти до 650 МГц чітко спостерігається як в результатах моделювання, так і в вимірюваннях. Шип відображає дзвін при увімкненні. Частота вимкнення не виявлена під час моделювання через малу амплітуду та високі низькочастотні компоненти в сигналі.

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

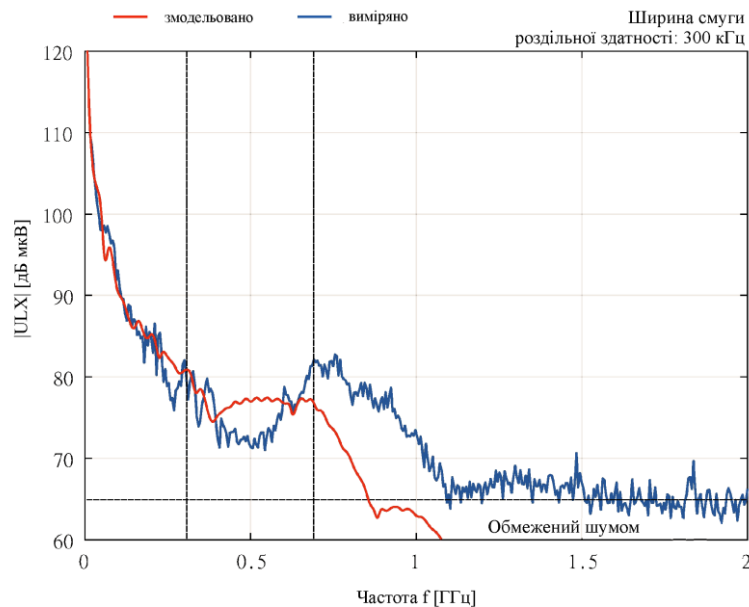


Рисунок 4.8 – Результати моделювання та вимірювання частотного спектру сигналу фазового вузла

Частотні спектри вхідних і вихідних портів, а також сигнали у часовій області показані на рисунку 4.9. Спектри вхідних і вихідних сигналів показують два піки при увімкненні (333 МГц) і вимкненні (645 МГц). Результати моделювання показують дещо вищі частоти. Змодельований і виміряний сигнали відповідають у часовій області. Попередній імпульс видно на вхідному порту перед увімкненням і вимиканням. Цей попередній імпульс генерується драйвером затвора, який не моделюється адекватно в імітаційній моделі. Цей передімпульс також спостерігається, коли вхідна напруга перетворювача встановлена на 0 В і струм із входу в схему перетворювача не тече. Діапазон частот вище 1 ГГц погано моделюється. Ось чому результати вимірювань і результати моделювання відрізняються в цій області.

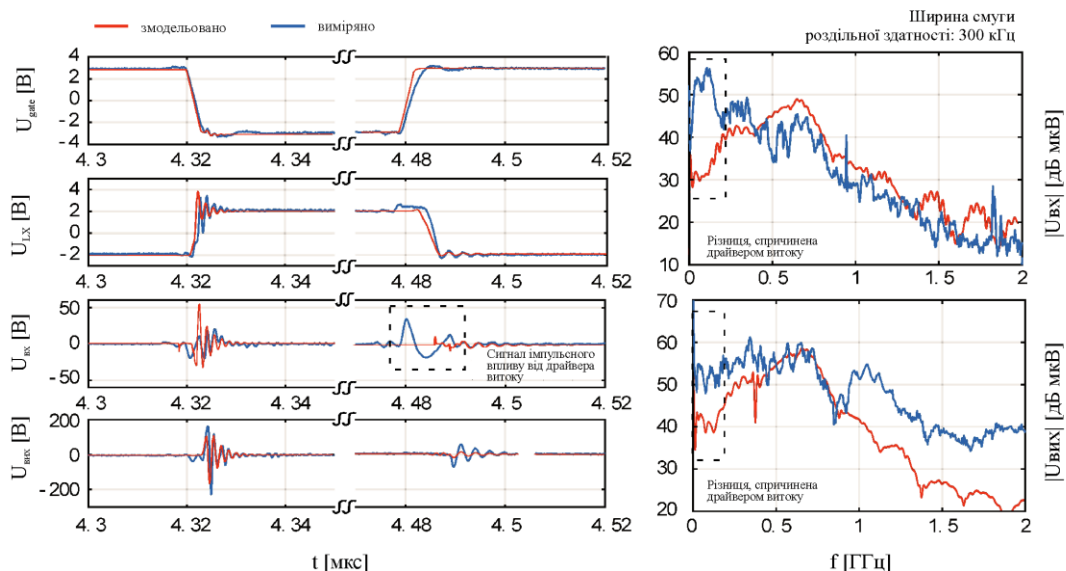


Рисунок 4.9 – Порівняння між вимірюванням (синім) і симуляцією (червоним). Драйвер затвора створює спектральний вміст і генерує відмінності в результатах моделювання та вимірювання на низькій частоті

Проведено подібні експерименти в моделюванні, як і в вимірюваннях. Ємності транзистора й діода, а також індуктивність контуру змінюються, щоб порівняти зміни в поведінці під час моделювання та вимірювання.

Основні ефекти, які спостерігаються під час вимірювання, також видно в моделюванні. Збільшуючи ємність на діоді, частота дзвінків при увімкненні зсувається до більш низьких значень частоти. Результати показані на рисунку 4.10.

Завдяки збільшенню ємності транзистора частота під час вимкнення була зміщена до нижчих частот. Результати моделювання показані на рисунку 4.10.

Збільшення індуктивності петлі вплинуло на частоту як під час увімкнення, так і під час вимкнення. Обидві частоти були зміщені до нижчих значень частоти. Результати показані на рисунку 4.10. Моделювання знову підтвердило шляхи електромагнітних випромінювань, отримані в розділі 3.3.

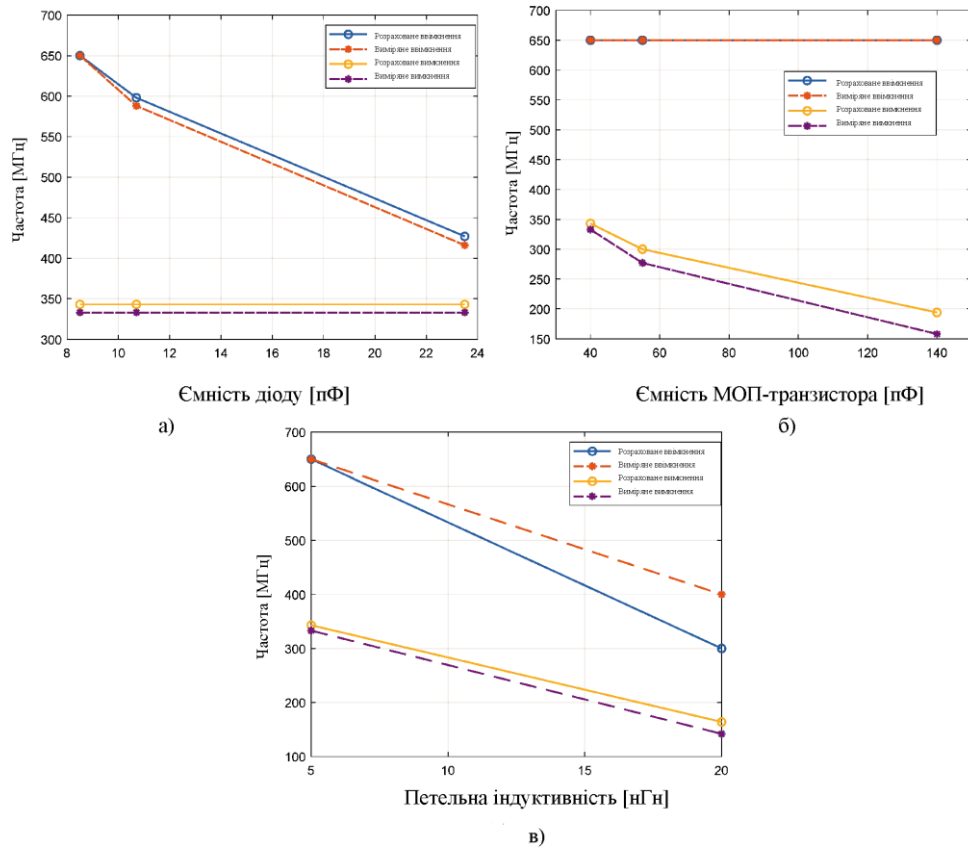


Рисунок 4.10 – Порівняння вимірювання та моделювання впливу паразитних елементів на частоту під час увімкнення та вимикання.

(а) Змодельована та виміряна частота з використанням різних значень ємності на діоді та (б) на MOSFET; (в) змодельована та виміряна частота з використанням різних значень індуктивності петлі

Струм електромагнітних перешкод можна оцінити за допомогою вимірної напруги електромагнітних перешкод на фазовому вузлі та паразитів уздовж шляху електромагнітних перешкод. Паразитні ємності діода ($5 \text{ пФ}@U_{Reverse}=4 \text{ В}$) і транзистора ($40 \text{ пФ}@U_{DS}=-4 \text{ В}$) наведено в таблиці даних. Еквівалентна послідовна індуктивність $L_{екв}$ вхідних і вихідних конденсаторів вимірювали за допомогою вимірювання параметра S_{12} . Налаштування вимірювання показано на рисунку 4.11. Налаштування були однаковими для вимірювання вхідних і вихідних конденсаторів. Конденсатор було підключено до землі, і S_{12} було виміряно від порту 1 до порту 2. Результати цих вимірювань

показано на рисунку 4.11. Оскільки необхідно оцінити $L_{екв}$ еквівалентної послідовної індуктивності конденсаторів, графік показує S_{12} у частотному діапазоні, де конденсатор демонстрував свою індуктивну поведінку. Еквівалентна послідовна індуктивність $L_{екв}$ вхідних конденсаторів становила приблизно 50 рН, а еквівалентна послідовна індуктивність $L_{екв}$ вихідних конденсаторів становила приблизно 400 рН. На вході і на виході з'єднали паралельно декілька конденсаторів. Отже, виміряну еквівалентну послідовну індуктивність $L_{екв}$ слід розуміти як ефективну еквівалентну послідовну індуктивність $L_{екв}$ конденсаторів, підключених паралельно. Існувала значна різниця між значеннями $L_{екв}$ еквівалентної послідовної індуктивності на вході та виході, оскільки на вході було паралельно підключено більше конденсаторів.

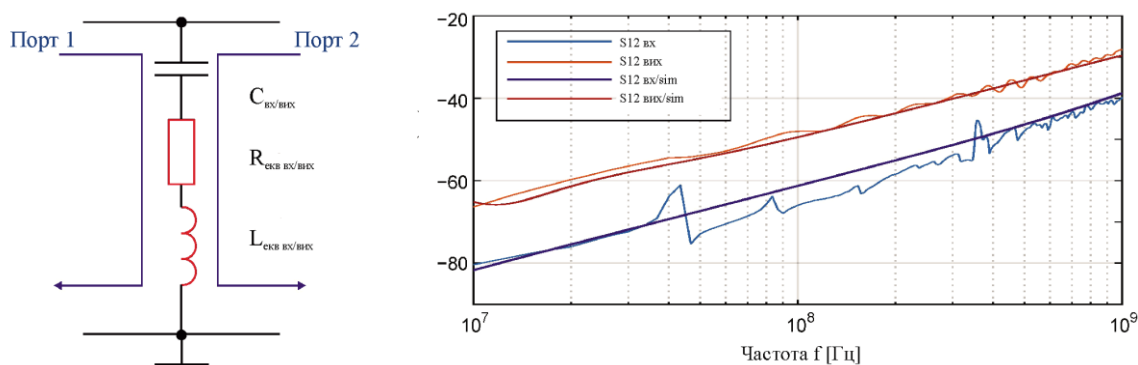


Рисунок 4.11 – Вимірювання параметра S_{12} для вхідного та вихідного конденсаторів з метою оцінки $L_{екв \text{ вх/вих}}$ взаємного впливу між входом та виходом. а) – Налаштування для вимірювання параметра S_{12} вхідного та вихідного конденсаторів. б) – Вимірювання параметра S_{12} для вхідного та вихідного конденсаторів

Індуктивності L_{Trace1} і L_{Trace2} були визначені на основі виміряних частот та відомих паразитів електронних компонентів. Резонансна частота під час увімкнення визначена за допомогою формули (4.1). Петельна індуктивність $L_{петля}$

представляє суму індуктивностей L_1 , L_2 та $L_{екв}$ еквівалентної послідовної індуктивності вхідного та вихідного конденсаторів. З цією інформацією можна приблизно оцінити значення L_1 і L_2 на рівні 2 нГн.

Проста імітаційна модель ілюструє основну поведінку та функції інвертора зі зниженням напруги та підвищенням потужності. Модель, яка враховує паразити в схемі, може відтворити основні резонанси, що виникають при увімкненні та вимиканні MOSFET. Вимірювання на схемі, розробленій з використанням дискретних компонентів, підтверджують теорії, вивчені під час моделювання. Вплив ємності MOSFET при увімкненні та ємності діода при вимкненні було підтверджено шляхом модифікації експериментальної схеми шляхом додавання конденсаторів паралельно діоду та MOSFET.

4.6 Висновки до четвертого розділу

У даному розділі наведено, як працюють перетворювачі DC/DC, які є важливими для електронних пристроїв. Використано моделювання, щоб краще зрозуміти їхню роботу на різних рівнях складності. Розглянуто, як можна створити модель перетворювача на комп'ютері та як вона може враховувати різні аспекти його роботи, такі як паразитні параметри. Також досліджено реальні перетворювачі, щоб перевірити, чи відповідають наші моделі реальності.

Дослідження показали, що під час роботи перетворювача можуть виникати електромагнітні перешкоди через два спеціальні резонанси. Це підтверджено за допомогою комп'ютерного моделювання.

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи проведено аналіз електромагнітної сумісності інвертуючого понижувально-підвищувального перетворювача, що мав на меті виявлення можливих джерел електромагнітних перешкод у пристрої. Результати показали, що на вхідній та вихідній стороні перетворювача можуть виникати сигнали електромагнітних перешкод через наявність двох збуджених резонансів. Один з них спостерігається під час увімкнення, а інший - під час вимикання пристрою. У обох випадках, виникають індуктивні петлі, зокрема конденсатор, МОП-транзистор, діод і розв'язувальні конденсатори. Ці знахідки підтверджують загальні особливості роботи таких перетворювачів та їх вплив на електромагнітну сумісність пристроїв.

Результати дослідження виконані як на практичному, так і на теоретичному рівні. Моделювання та експерименти з дискретних компонентів дозволили підтвердити отримані результати і визначити можливі шляхи оптимізації роботи перетворювачів. Це дозволить покращити ефективність та надійність електронних пристроїв, які використовують такі перетворювачі у своїй роботі.

Отже, кваліфікаційна робота має практичне значення для інженерної практики та розробки електронних пристроїв, а отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення та оптимізації перетворювачів DC/DC з метою поліпшення їхньої електромагнітної сумісності.

					КвРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Kadlimatti, V.; Bhat, S. Methodologies of Loop Offset Voltage Trimming for Inverting-Buck-Boost for AMOLED Display Application. In Proceedings of the 2020 9th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Bremen, Germany, 7–9 September 2020; pp. 1–4.
2. Patel, H.K. Flyback Power Supply EMI Signature and Suppression Techniques. In Proceedings of the 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, New Delhi, India, 12–15 October 2008; pp. 1–6.
3. Kong, P.; Lee, F.C. Transformer Structure and Its Effects on Common Mode EMI Noise in Isolated Power Converters. In Proceedings of the 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Palm Springs, CA, USA, 21–25 February 2010; pp. 1424–1429.
4. Kang, B.G.; Chung, S.K.; Won, J.S.; Kim, H.S. EMI Reduction Technique of Flyback Converter Based on Capacitance Model of Transformer with Wire Shield. In Proceedings of the 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), Seoul, Korea, 1–5 June 2015; pp. 163–169.
5. ie, L.; Ruan, X.; Ji, Q.; Ye, Z. Shielding-Cancelation Technique for Suppressing Common-Mode EMI in Isolated Power Converters. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2014, 62, 2814–2822.
6. Kam, K.; Pommerenke, D.; Centola, F.; Lam, C.W.; Steinfeld, R. EMC Guideline for Synchronous Buck Converter Design. In Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Austin, TX, USA, 17–21 August 2009; pp. 47–52.
7. Ibuchi, T.; Funaki, T. Experimental Evaluation on Noise Characteristics in SiC-Based Synchronous Boost Converter. In Proceedings of the 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), Amsterdam, The Netherlands, 27–30 August 2018; pp. 613–618.

					КВРTP.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

8. Kaewchai, J.; Khangern, W.; Nitta, S. Controlling Conducted EMI Emission on a Buck-Boost Converter Using Gate Controlled Circuit. In Proceedings of the 2002 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Beijing, China, 21–24 May 2002; pp. 541–544.
9. Ding, S.; Wang, F. A New Negative Output Buck–Boost Converter with Wide Conversion Ratio. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2017, 64, 9322–9333.
10. Valdez-Resendiz, J.E.; Sanchez, V.M.; Rosas-Caro, J.C.; Mayo-Maldonado, J.C.; Sierra, J.; Barbosa, R. Continuous Input-Current Buck-Boost DC-DC Converter for PEM Fuel Cell Applications. *Int. J. Hydrog. Energy* 2017, 42, 30389–30399.
11. Farkas, T.; Schlecht, M.F. Viability of Active EMI Filters for Utility Applications. *IEEE Trans. Power Electron.* 1994, 9, 328–337.
12. Farkas, T.; Schlecht, M.F. Viability of Active EMI Filters for Utility Applications. *IEEE Trans. Power Electron.* 1994, 9, 328–337.
13. Gravelle, L.B.; Wilson, P.F. EMI/EMC in Printed Circuit Boards—A Literature Review. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 1992, 34, 109–116.
14. Grial, A.; El Aroudi, A.; Martinez-Salamero, L.; Leyva, R.; Maixe, J. Current Control Technique for Improving EMC in Power Converters. *Electron. Lett.* 2001, 37, 274–275.
15. Hamill, D.C.; Deane, J.H.B.; Aston, P.J. Some Applications of Chaos in Power Converters. In Proceedings of the IEE Colloquium New Power Electronic Techniques, London, U.K., 23 May 1997; pp. 5/1–5/5.
16. Tan, K.; Hinberg, I.; Wadhvani, J. Electromagnetic Interference in Medical Devices: Health Canada's Past and Current Perspectives and Activities. In Proceedings of the IEEE International EMC Symposium, Montreal, Canada, 13–17 August 2001; pp. 1283–1288.
17. Ho, W.C.; Lee, C.K.; Liu, X.; Chan, P.K.W.; Hui, S.Y.R.; Lee, Y.S. A Hybrid EMI Filter with Ultra-Wide Bandwidth. In Proceedings of the 23rd Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Austin, TX, USA, 24–28 February 2008; pp. 676–681.

18. Khan, F.H.; Tolbert, L.M. 5 kW Multilevel DC-DC Converter for Hybrid Electric and Fuel Cell Automotive Applications. In Proceedings of the 42nd Annual Meeting IEEE Industry Applications Society Conference, New Orleans, LA, USA, 23–27 September 2007; pp. 628–635.

19. Ding, S.; Wang, F. A New Negative Output Buck–Boost Converter with Wide Conversion Ratio. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2017, 64, 9322–9333.

20. Kimmel, W.D.; Gerke, D.D. Using Grounding to Control EMI. *Med. Device Diagnostic Ind. Mag.* 1996, 72–78.

21. Kloeden, P.; Li, Z. Li-Yorke Chaos in Higher Dimensions: A Review. *J. Difference Equat. Applicat.* 2006, 12, 247–279.

22. Ladkin, P.B. Electromagnetic Interference with Aircraft Systems: Why Worry? [Online]. Available: <http://www.rvs.uni-bielefeld.de/publications/Incidents/DOCS/Research/Rvs/Article/EMI.html>

23. Lai, J.S.; Moon, S.R.; Kim, R.; Lin, F.Y.; Liu, Y.H.; Lin, M.H. A General-Purpose Three-Phase DC-DC Converter Building Block for Fuel Cell Applications. In Proceedings of the 33rd Annual Conference IEEE Industrial Electronics Society, Taipei, Taiwan, 5–8 November 2007; pp. 1639–1644.

24. Lawwhite, L.E.; Schlecht, M.F. Active Filters for 1-MHz Power Circuits with Strict Input/Output Ripple Requirements. *IEEE Trans. Power Electron.* 1987, 2, 282–290.

25. LaWhite, L.E.; Schlecht, M.F. Design of Active Ripple Filters for Power Circuits Operating in the 1–10 MHz Range. *IEEE Trans. Power Electron.* 1988, 3, 310–317.

26. Li, H.; Li, Z.; Halang, W.A. Calculation of Invariant Probability Density Distribution for Chaotic Map in DC-DC Converter and Its Applications. In Proceedings of the 51st International Wissenschaftliches Kolloquium zur Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Germany, 11 September 2006; pp. 363–364.

					КВРTP.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

27. Li, H.; Li, Z.; Halang, W.A.; Zhang, B.; Chen, G. Analyzing Chaotic Spectra of DC-DC Converters Using the Prony Method. *IEEE Trans. Circuits Syst. II* 2007, 54, 61–65.

28. Li, H.; Li, Z.; Tang, K.S.; Halang, W.A. A Chaotic Soft Switching PWM Boost Converter for EMI Reduction. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Cambridge, UK, 30 June–2 July 2008; pp. 341–346.

29. Li, H.; Tang, K.S.; Li, Z.; Halang, W.A. A Chaotic Peak Current-Mode Boost Converter for EMI Reduction and Ripple Suppression. *IEEE Trans. Circuits Syst. II* 2008, 55, 763–767.

30. Li, H.; Li, Z.; Halang, W.A. Reduktion Elektromagnetischer Störaussendungen Getakteter Gleichspannungswandler Mittels Chaotisch Modulierter Trägersignale. German Patent 10 2009 039 069.3, 2009.

31. Li, H.; Zhang, B.; Li, Z.; Zheng, Q.L.; Halang, W.A. Controlling DC-DC Converters by Chaos-Based Pulse Width Modulation to Reduce EMI. *Chaos Solitons Fractals* 2009, 42, 1378–1387.

32. Li, H.; Li, Z.; Zhang, B.; Wang, F.L.; Tan, N.L. The Stability of a Chaotic PWM for EMI Suppression. *Int. J. Circuit Theory Appl.* to be published.

33. Li, H.; Li, Z.; Halang, W.A.; Zhang, B.; Wang, F.L.; Tan, N.L. Design of Analogue Chaotic PWM for EMI Suppression. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* submitted for publication.

34. Li, W.H.; Lv, X.D.; Deng, Y.; Liu, J.; He, X.N. A Review of Non-Isolated High Step-Up DC/DC Converters in Renewable Energy Applications. In *Proceedings of the 24th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Washington, DC, USA, 15–19 February 2009; pp. 364–369.

35. Li, T.Y.; Yorke, J.A. Period Three Implies Chaos. *Am. Math. Mon.* 1975, 82, 985–992.

36. Lorenz, E.N. Deterministic Nonperiodic Flow. *J. Atmos. Sci.* 1963, 20, 130–141.

37. Mazumder, S.K.; Shenai, K. On the Reliability of Distributed Power Systems: A Macro-to Micro-Level Overview Using a Parallel DC-DC Converter. In

Proceedings of the IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, Queensland, Australia, 23–27 June 2002; Volume 2, pp. 809–814.

38. Palma, L.; Todorovic, M.H.; Enjeti, P. Design Considerations for a Fuel Cell Powered DC-DC Converter for Portable Applications. In Proceedings of the 21st Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Dallas, TX, USA, 19–23 March 2006; pp. 1263–1268.

39. Parker, W.H. Electromagnetic Interference: A Tutorial. In Proceedings of the IEEE Aerospace Applications Conference, Volume 3, Gaithersberg, MD, USA, Aspen, 3–10 February 1996; pp. 177–186.

40. Serrao, V.; Lidozzi, A.; Solero, L.; Di Napoli, A. Common and Differential Mode EMI Filters for Power Electronics. In Proceedings of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Ischia, Italy, 11–13 June 2008; pp. 918–923.

					КВРТР.2021002.01.02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

ДОДАТОК А
Презентаційні матеріали



ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ПОКРАЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ЧЕРЕЗ ОПТИМІЗАЦІЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ В ІНВЕРТУЮЧИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ



Виконав:
студент 3 курсу,
група ТР1с-21-1
Желнов А.М.

Науковий керівник:
к.ф.м.н., доцент
Сельський А.А.

МЕТА РОБОТИ:

дослідження електромагнітної сумісності інвертуючого DC/DC перетворювача без ізоляції між входом та виходом за допомогою моделювання та експериментів

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ:

є інвертуючий понижувальний/підвищувальний перетворювач та його електромагнітна сумісність

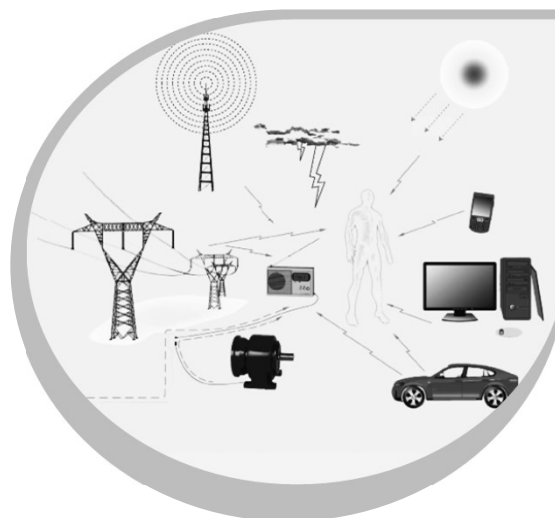
ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ:

є аналіз впливу конструкції перетворювача та його елементів на взаємодію з електромагнітним полем та вплив на його роботу та навколишнє середовище



АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ:

- обумовлена постійним розвитком електронної техніки та зростанням вимог до її функціональності, ефективності та надійності;
- необхідністю забезпечення високої електромагнітної сумісності в умовах зростаючого електромагнітного забруднення в середовищі;
- та активним застосуванням інвертуючих систем живлення в різних сферах, включаючи промисловість, медицину та транспорт



Імпульсні джерела живлення

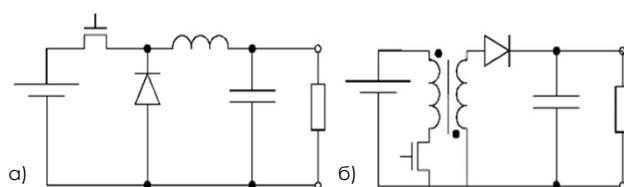
- це електронні пристрої, які використовуються для перетворення змінного електричного струму в постійний.

Вони широко використовуються в різних сферах застосування, від побутової електроніки до промислового обладнання.



Понижувальний перетворювач

Перетворювач зворотного ходу



Підвищувальний перетворювач

Інвертуючий понижувально-підвищувальний перетворювач

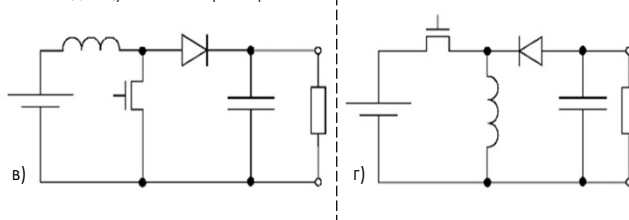


Рис. 1 – Топологія різних типів перетворювачів

Вплив електромагнітних перешкод на інвертуючий понижувально-підвищувальний перетворювач

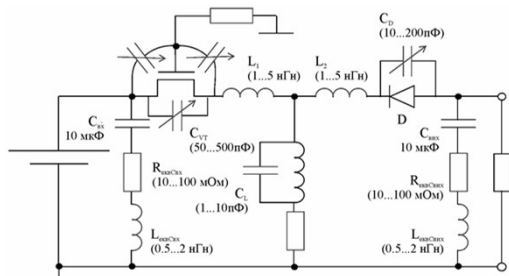
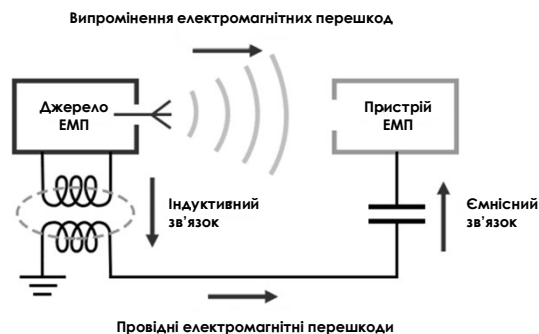


Рис. 2 – Схема з паразитними компонентами

Додані паразитні компоненти:

- Ємність MOSFET (open - від 50 пФ до 500 пФ)
- Ємність діода (open - від 10 пФ до 200 пФ)
- Індуктивність петлі - $L_{еквсвх}$, L_1 , L_2 , $L_{еквд}$
- Еквівалентна послідовна $L_{екв}$ і $R_{екв}$
- Частоти перемикання, в діапазоні МГц (1,2 МГц до 2,4 МГц)

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПЕРЕШКОДИ ЕМП



ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПЕРЕШКОДИ (ЕМП)

виникають, коли небажані електричні струми переривають передбачувані струми, які має приймати електронний пристрій.

Шлях електромагнітних перешкод

ДВА РЕЗОНАНСИ У РОБОТІ ПЕРЕТВОРЮВАЧА:

- Коли **перемикач розімкнутий**, він утворює конденсатор, а діод утворює провідний шлях.
- Коли **перемикач замкнутий**, діод діє як конденсатор, а перемикач утворює провідний шлях.

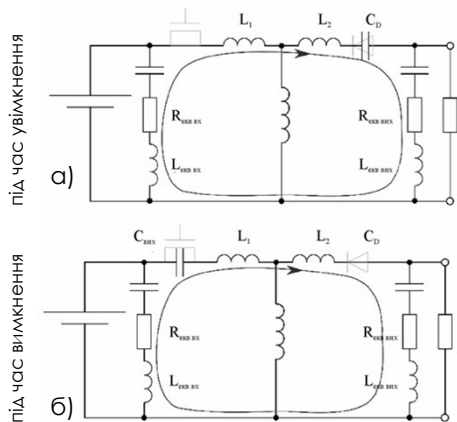
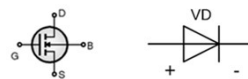


Рис. 3 – Шлях електромагнітних перешкод під час увімкнення та вимкнення

Зміна критичної ємності

- Індуктивності залишаються незмінними, але критична ємність змінюється від діода до МОН-транзистора. Обидва є нелінійними

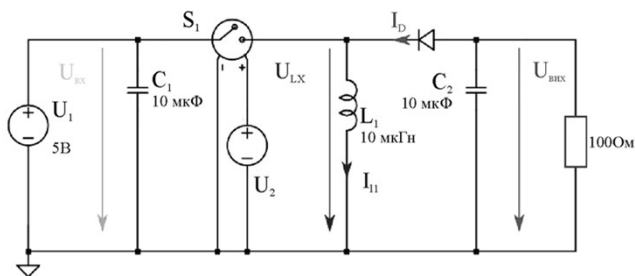


Різниця у часах зростання та падіння напруги

- Часи зростання та падіння напруги зазвичай неоднакові, що призводить до різного збудження резонансів

Розробка імітаційної моделі на різних рівнях деталізації

а) Принципова схема базового перетворювача:



б) Осцилограми напруги та струму основної схеми

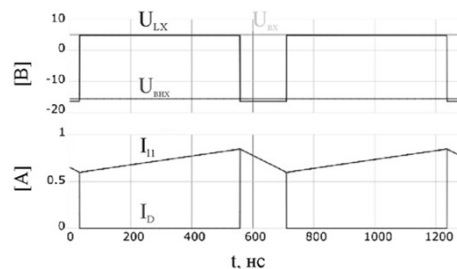


Рис. 4 – Початкова модель конвертера з ідеальними компонентами

Удосконалення імітаційної моделі з урахуванням паразитних параметрів

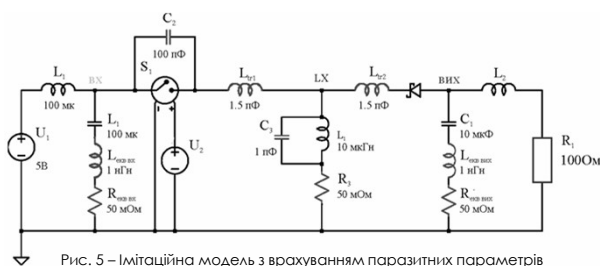


Рис. 5 – Імітаційна модель з врахуванням паразитних параметрів

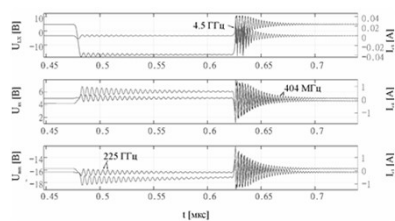


Рис. 6 – Результати моделювання під час увімкнення та вимкнення перетворювача, враховуючи паразитні параметри

Резонансна частота:

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{\text{ліній}} \cdot C_D}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{5 \text{ мкГн} \cdot 31 \text{ нФ}}} = 404 \text{ МГц} \quad (1)$$

Під час вимкнення виникає домінуючий резонанс, який формується ємністю перемикача та індуктивністю петлі. (2)

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{\text{ліній}} \cdot C_{\text{перем}}}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{5 \text{ мкГн} \cdot 100 \text{ пФ}}} = 225 \text{ МГц} \quad (2)$$

Під час увімкнення виникає інший резонанс, який формується ємністю котушки індуктивності та індуктивністю петлі

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{\text{ліній}} \cdot C_{\text{індуктор}}}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{1.25 \text{ мкГн} \cdot 1 \text{ нФ}}} = 4.5 \text{ МГц} \quad (3)$$

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{\text{осн}} \cdot (C_{\text{перем}} + C_d)}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{10 \text{ мкГн} \cdot (100 \text{ пФ} + 31 \text{ нФ})}} = 4.4 \text{ МГц} \quad (4)$$

Виміряні коливання в режимі переривчастого проведення струму

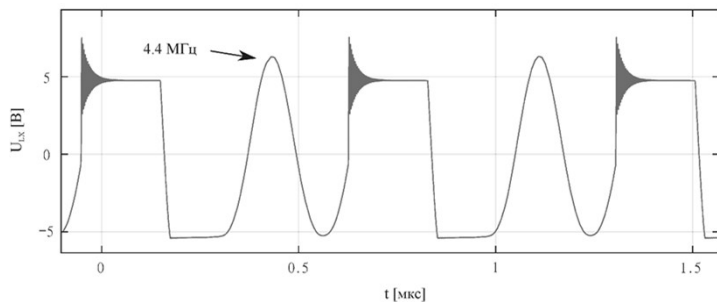


Рис. 7 – Виміряні коливання в режимі переривчастого проведення струму

Резонансна частота:

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{осн} \cdot (C_{перем} + C_d)}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{10 \mu\text{кГн} \cdot (100 \text{пФ} + 31 \text{пФ})}} = 4.4 \text{ МГц} \quad (4)$$

Напряга електромагнітних перешкод на вхідних і вихідних портах

$$v = (j\omega L_{екв} + R_{екв}) \cdot i_{зч} \quad (5)$$

Експериментальне визначення та аналіз характеристик перетворювача

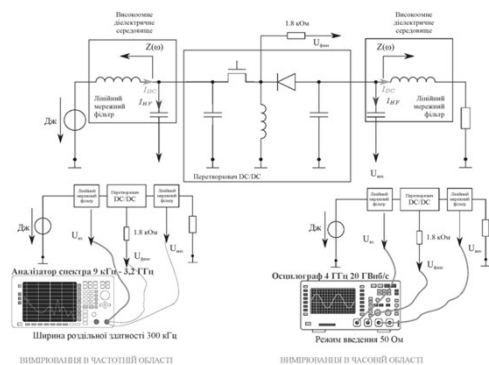


Рис. 9 – Налаштування вимірювання

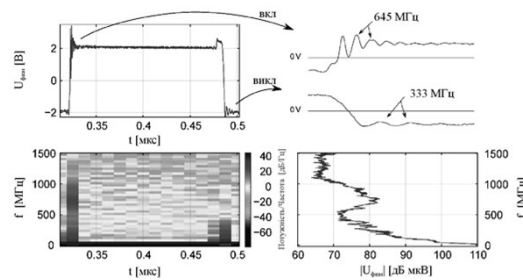


Рис. 10 – Результати вимірювань на фазовому вузлі перетворювача

- Властивості високошвидкісного драйвера затвора:**
 - Час наростання та спаду сигналу драйвера затвора.
 - Швидкість наростання сигналу під час зростаючого фронту та падаючого краю.
- Властивості джерела MOSFET:**
 - Зміна вихідного сигналу драйвера затвора і відповідна зміна напруги затвор-вітік.

Таблиця 1 – Компоненти, що використовуються в схемі

Компонент	Номер деталі	Характеристики
MOSFET	ZXMP10A13FTA	$C_{oss}=40$ пФ; $U_{DS}=-4$ В
Діод Шотткі	ZLS350	$C_{Total}=5$ пФ; 4 В
Індуктивність	CDRH4D16B/N P-100MC	$L=10$ мкГн
Вимикач затвора	IX4340N	$I_{Вих}=\pm 5$ А

Результати порівняння частот коливань з різними значеннями паразитності контуру

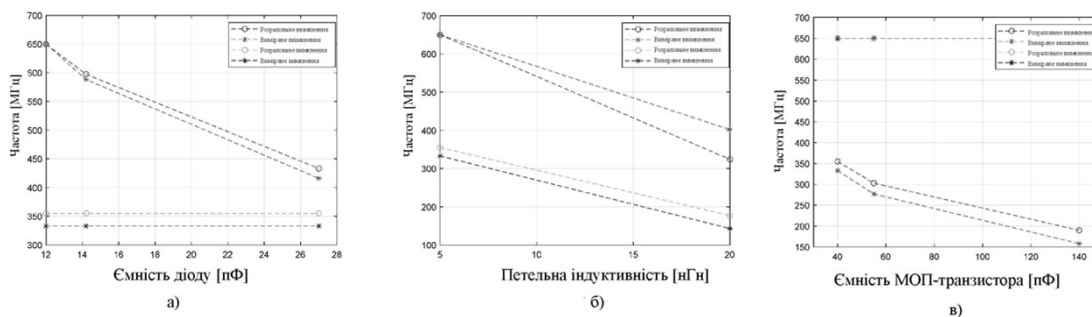


Рис. 11 – Вплив паразитних параметрів схеми на частоту під час увімкнення та вимикання

Математичне моделювання та комп'ютерне симулювання роботи перетворювача

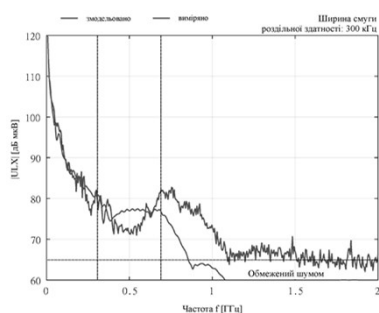


Рис. 12 – Результати моделювання та вимірювання частотного спектру сигналу фазового вузла

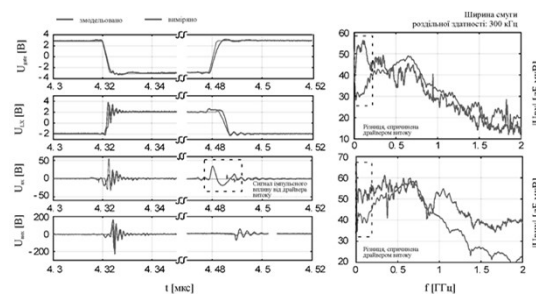


Рис. 13 – Порівняння вимірювань і симуляції

Драйвер затвора створює спектральний вміст і генерує відмінності в результатах моделювання та вимірювання на низькій частоті

Вимірювання паразитних елементів та їх вплив на електромагнітну сумісність

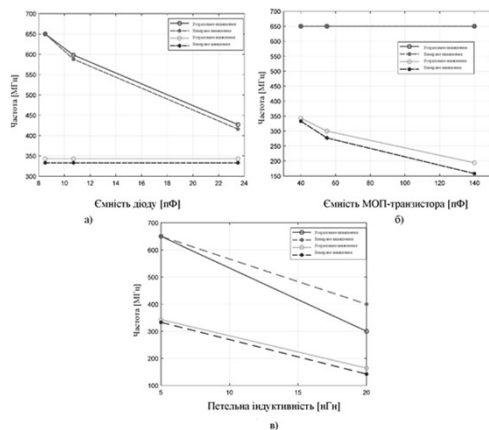
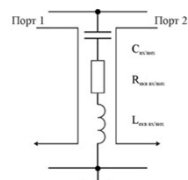


Рис. 14 – Порівняння вимірювання та моделювання впливу паразитних елементів на частоту під час увімкнення та вимикання



а) – Налаштування для вимірювання параметра S12 вхідного та вихідного конденсаторів

б) – Вимірювання параметра S12 для вхідного та вихідного конденсаторів

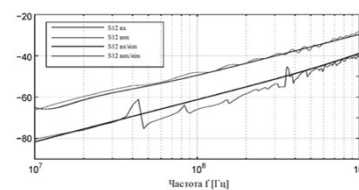
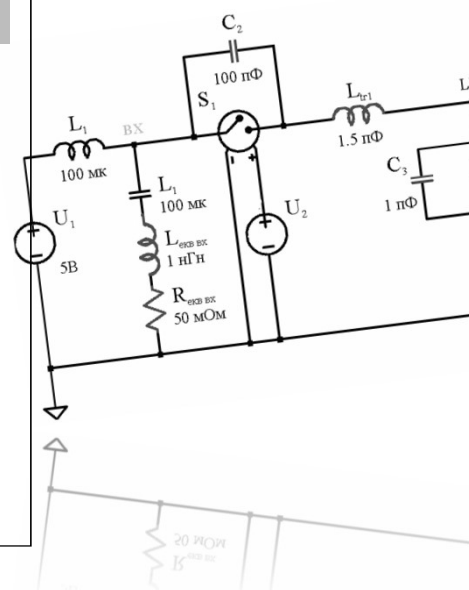


Рис. 15 – Вимірювання параметра S12 для вхідного та вихідного конденсаторів з метою оцінки Левк вх/вих взаємного впливу між входом та виходом

ВИСНОВКИ

- Аналіз показав наявність двох збуджених резонансів на вхідній та вихідній стороні перетворювача, що призводить до виникнення сигналів електромагнітних перешкод.
- Перший резонанс спостерігається під час увімкнення, а другий - під час вимикання пристрою. Ці резонанси виникають через утворення індуктивних петель, що включають конденсатор, МОП-транзистор, діод і розв'язувальні конденсатори.
- Отримані результати підтверджують загальні особливості роботи таких перетворювачів та їх вплив на електромагнітну сумісність пристроїв.
- Результати дослідження мають практичне значення для інженерної практики та розробки електронних пристроїв. Вони дозволяють виявити можливі шляхи оптимізації роботи перетворювачів для поліпшення їхньої електромагнітної сумісності.
- Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення та оптимізації перетворювачів DC/DC з метою підвищення їхньої електромагнітної сумісності.



РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Желнов Антон Михайлович

Тема роботи: Покращення ефективності та надійності енергетичних систем через оптимізацію електромагнітної сумісності в інвертуючих перетворювачах

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 69

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Метою кваліфікаційної роботи є аналіз електромагнітної сумісності інвертуючого DC/DC перетворювача, зокрема впливу відсутності ізоляції між входом та виходом, за допомогою SPICE-моделювання та експериментальних вимірювань. У даній роботі проведено огляд еволюції мереж мобільного зв'язку; ключові базові технології для мереж 5G та інших мереж; антена МІМО із збагаченням ізоляції для мобільної зв'язку 5G; моделювання антени МІМО із збагаченням ізоляції.
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 представлено огляд та призначення DC-DC перетворювачів, детально розглянуто їх типи, принципи дії та значення для різних застосувань з використанням сучасних наукових джерел та досліджень. У другому розділі описано основні топології DC/DC перетворювачів, включаючи понижувальні, підвищувальні та понижувально-підвищувальні схеми, з акцентом на використання новітніх напівпровідникових технологій та передових методів аналізу. Третій розділ присвячено дослідженню електромагнітних перешкод у інвертуючих понижувально-підвищувальних перетворювачах, розглянуто історію досліджень, вплив перешкод на електричні кола та імпульсні джерела живлення, а також описано топологію цих перетворювачів. У четвертому розділі виконано розробку імітаційних моделей на різних рівнях деталізації, удосконалено моделі з урахуванням паразитних параметрів, проведено дослідження на основі окремих компонентів, експериментально визначено та проаналізовано характеристики перетворювачів, здійснено математичне моделювання та комп'ютерне симулювання їх роботи.

4. Позитивні сторони роботи: Робота пропонує всебічний огляд та аналіз DC/DC перетворювачів, зокрема їх топологій, ключових компонентів та принципів дії. Використання сучасних методів моделювання та симулювання забезпечує високу точність і достовірність результатів, що підвищує практичну цінність дослідження для розробників та інженерів у галузі електроніки та енергетики.
5. Негативні сторони роботи: Деякі аспекти роботи могли бути розглянуті більш детально, зокрема, вплив різних типів навантажень на ефективність DC/DC перетворювачів. Також, обмежений обсяг експериментальних даних може знижувати загальну достовірність висновків.
6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає
7. Відгук про роботу в цілому: В цілому, кваліфікаційна робота виконана на високому технічному рівні та має безперечну актуальність у галузі сучасних технологій телекомунікацій. Робота відзначається комплексним підходом до дослідження DC/DC перетворювачів, використанням передових методів моделювання та симулювання, а також практичною значущістю отриманих результатів
8. Інші зауваження: немає
9. Оцінка кваліфікаційної роботи: Кваліфікаційна робота відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки добре (3,75/С), а її автору Желнову А.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

«14» червня 2024р.


підпис

Ім'я користувача:
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:
1016363712

Дата перевірки:
15.06.2024 19:12:44 EEST

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
16.06.2024 10:23:44 EEST

ID користувача:
100005862

Назва документа: Желнов_антиплагіат

Кількість сторінок: 68 Кількість слів: 11692 Кількість символів: 93680 Розмір файлу: 4.76 MB ID файлу: 1016169195

1592 слова позначені як "вилучені" та не враховуються у підрахунку слів

0.47%
Схожість

Найбільша схожість: 0.1% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1016169197)

0.27% Джерела з Інтернету 25 Сторінка 70

0.2% Джерела з Бібліотеки 3 Сторінка 70

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

0%
Вилучень

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

Немає вилучених Інтернет-джерел

0% Вилученого тексту з Бібліотеки 1 Сторінка 70

Модифікації

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

Замінені символи 186

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 3.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 12%

ID: 130878 Назва: БКР Покращення ефективності та надійності енергетичних сист Додано в БД: 2024-06-17 Автора: Антон ЖЕЛНОВ Керівники: Андрій СЕЛЬСЬКИЙ Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	83888	669	2998 (4%)	30 (4%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

Завідувачу кафедри АКІТтаР
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.
Желнова А.М.

ШБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курсу, групи ТР1е-21-1

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 ЕКСПЕРТНОЇ 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: Покращення ефективності та надійності енергетичних систем через оптимізацію електромагнітної сумісності в інвертуючих перетворювачах

Автор: Желнов Антон Михайлович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма: Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології

Науковий керівник: Сельський А.А., к.ф.м.н., доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	<u>Відповідає</u>
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). 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 та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені 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 загальноновживаних 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 0,47% і адресується до 25 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
Андрій СЕЛЬСЬКИЙ