

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

Бакалавр

Освітній рівень

Інверторний DC-DC перетворювач для відновлювальної енергетики

Назва теми

КПТР.210150.01.05 ПЗ

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Шифр і назва

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Шифр і назва

Освітня програма «Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі»

Назва

Виконав:

здобувач 4 курсу, група ТР2-21-1



підпис

Павло КОВАЛЬЧУК

Ініціали, прізвище

Керівник: д-р техн. наук, професор



підпис

Юлій БОЙКО

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, професор



підпис

Сергій ПІДЧЕНКО

Ініціали, прізвище

«9» червня 2025р.

Хмельницький, 2025

Хмельницький національний університет

Факультет	<u>інформаційних технологій</u>
Кафедра	<u>телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій</u>
Освітній рівень:	<u>бакалавр</u>
Галузь знань:	<u>17 Електроніка та телекомунікації</u>
Спеціальність:	<u>172 Телекомунікації та радіотехніка</u>
Освітня програма:	<u>Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедрою ТМІТ

Сергій ПІДЧЕНКО

«10» лютого 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

КОВАЛЬЧУК Павло Сергійович

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

1 Тема роботи: Інверторний DC-DC перетворювач для відновлювальної енергетики

Керівник роботи: БОЙКО Юлій Миколайович, д-р техн. наук, професор

Затверджено наказом по університету від «07» лютого 2025р. № 20

2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру 02 червня 2025 року

3 Вихідні дані до роботи: Інверторний DC-DC перетворювач, технічне завдання

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Огляд DC-DC перетворювачів у відновлювальній енергетиці та сучасних системах живлення. Аналіз запропонованої схеми та технічних рішень інверторного DC-DC перетворювача. Аналіз роботи та характеристик запропонованого інвертного DC-DC перетворювача. Експериментальні дослідження та результати моделювання інвертного DC-DC перетворювача

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

1. Запропонований перетворювач з подвоювачем напруги. 2. Моделювання перетворювача фазового зсуву. 3. Форма вихідного сигналу перетворювача фазового зсуву. 4. Імітаційна схема запропонованого перетворювача. Вихідні сигнали запропонованого DC-DC перетворювача

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційного проекту: «Інверторний DC-DC перетворювач для відновлювальної енергетики»

Автор проекту: КОВАЛЬЧУК Павло Сергійович

Керівник проекту: БОЙКО Юлій Миколайович, д-р техн. наук, професор.

Пояснювальна записка: 68 сторінок, 13 рисунків, 3 таблиці, 40 джерел.

Графічна частина: технічні креслення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ІНВЕРТОРНИЙ DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ФАЗОЗСУВНИЙ ПОВНИЙ МОСТОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ПОДВОЮВАЧ НАПРУГИ, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, КОЕФІЦІЄНТ ПІДСИЛЕННЯ НАПРУГИ, ТРАНСФОРМАТОР, ККД.

Об'єктом дослідження є інверторний DC-DC перетворювач для відновлюваної енергетики.

Мета кваліфікаційного проекту полягає в розробці та оптимізації DC-DC перетворювача із подвоєною вихідною напругою для підвищення ефективності перетворення енергії в системах відновлюваної енергетики.

Кваліфікаційний проект присвячений дослідженню та вдосконаленню роботи DC-DC перетворювача із подвоєною вихідною напругою, що дозволяє досягти вищого коефіцієнта підсилення напруги порівняно з традиційними рішеннями. Виконано аналіз електричних характеристик, досліджено вплив коефіцієнта витків у розділювальному трансформаторі на щільність потужності, а також проведено порівняння ефективності перетворення для різних конфігурацій.

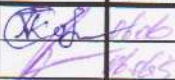

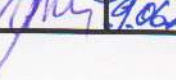

02.06.2025 р.



Поз.	Формат	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
			Документація загальна		
1	A4	КПТР.210150.01.05 ПЗ	Пояснювальна записка	1	68 арк.
			Документація графічна		
2	A3	КПТР.210150.01.05 E1	Інверторний DC-DC перетворювач для відновлювальної енергетики		
			Структурна блок-схема інверторного DC-DC перетворювача	1	
3	A3	КПТР.210150.01.05 E3	Інверторний DC-DC перетворювач для відновлювальної енергетики		
			Принципова електрична схема та часові діаграми роботи	1	
4	A3	КПТР.210150.01.05 E3	Інверторний DC-DC перетворювач для відновлювальної енергетики		
			Імітаційна модель класичного фазозсувного перетворювача	1	
5	A3	КПТР.210150.01.05 E3	Інверторний DC-DC перетворювач для відновлювальної енергетики		
			Імітаційна модель класичного запропонованого DC-DC перетворювача	1	
			КПТР.210150.01.05 ВП		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	
Розроб.		Ковальчук П.С.		12.02.25	
Перевір.		Бойко Ю. М.		12.02.25	
Н. контр.		Стецюк В.І.		12.02.25	
Затв.		Підченко С.К.		12.02.25	
			Інверторний DC-DC перетворювач для відновлювальної енергетики	Лім.	Аркуш
					Аркушіє
			Відомість проекту		1
					1
				ХНУ, гр. ТР2-21-1	

ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП	5
1 ОГЛЯД DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ У ВІДНОВЛЮВАЛЬНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ ТА СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ ЖИВЛЕННЯ.....	7
1.1 Значення DC-DC перетворювачів у системах відновлюваної енергетики .	7
1.2 Основні типи DC-DC перетворювачів	13
1.3 Аналіз переваг та недоліків різних топологій DC-DC перетворювачів	14
1.4 Фазозсувні повномостові DC-DC перетворювачі.....	15
1.5 Висновок до першого розділу	17
2 АНАЛІЗ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СХЕМИ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ІНВЕРТОРНОГО DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	19
2.1 Призначення та структурна схема запропонованого інвертного DC-DC перетворювача	19
2.2 Основні компоненти та принцип роботи фазозсувного повномостового DC-DC перетворювача.....	21
2.2.1 Повномостова інверторна схема.....	22
2.2.2 Трансформатор	22
2.2.3 Випрямляч на вторинній стороні	23
2.2.4 Фільтр для згладжування пульсацій	24
2.3 Переваги та застосування фазозсувного повномостового DC-DC перетворювача	25
2.3.1 Переваги фазозсувного повномостового перетворювача.....	25
2.3.2 Застосування фазозсувного повномостового перетворювача.....	27

КПТР.210150.01.05									
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Інверторний DC-DC перетворювач для відновлювальної енергетики Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Акронім	
		Ковальчук П.С.		14.06.25					
		Бойко Ю.М.		14.06.25				2	71
		Стецюк В.І.		14.06.25					
		Підченко С.К.		14.06.25					
					ХНУ, гр. ТР2-21-1				

2.4 Висновок до другого розділу	29
3 АНАЛІЗ РОБОТИ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ЗАПРОПОНОВАНОГО ІНВЕРТНОГО DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	30
3.1. Формування режимів роботи DC-DC перетворювача.....	30
3.2. Аналіз роботи перетворювача в різних режимах перемикання	32
3.3 Аналіз передачі потужності та резонансних процесів у перетворювачі... ..	41
3.4. Вплив подвоювача напруги на характеристики перетворювача.....	44
3.4.1 Зменшення розміру і об'єму розділового трансформатора	44
3.4.2 Підвищення ефективності завдяки зміні схеми випрямляча.....	45
3.4.3 Вплив подвоювача напруги на стабільність вихідної напруги	46
3.5. Оцінка динамічних характеристик та ККД перетворювача	47
3.6 Висновок до третього розділу.....	52
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ІНВЕРТНОГО DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА	53
4.1 Моделювання схеми з перетворювачем фазового зсуву в PSpice.....	53
4.2 Результати моделювання запропонованого DC-DC перетворювача	58
4.3 Висновок до четвертого розділу.....	64
ВИСНОВКИ.....	65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	67

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

DC	–	постійний струм
AC	–	змінний струм
SMPS	–	імпульсне джерело живлення
PSFB	–	фазозсувний повномостовий перетворювач
ZVS	–	перемикання за нульової напруги
ZCS	–	перемикання за нульового струму
ККД	–	коефіцієнт корисної дії
MOSFET	–	транзистор з метал-оксид-напівпровідниковою структурою
PV	–	фотоелектричний (сонячний) елемент
EMI	–	електромагнітні завади
PSpice	–	програмне середовище моделювання електронних схем

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Розвиток відновлюваних джерел енергії є важливим напрямом сучасної енергетики. Оскільки альтернативні джерела, такі як сонячна та вітрова енергетика, генерують нерегульовану електричну енергію, необхідні ефективні пристрої перетворення електроенергії для забезпечення стабільної роботи електроспоживачів. Одним із ключових компонентів таких систем є інверторний DC-DC перетворювач, який забезпечує необхідний рівень вихідної напруги та підвищує ефективність енергетичної системи.

У сучасній силовій електроніці широкого застосування набули імпульсні джерела живлення, що забезпечують стабільну постійну напругу для різних промислових пристроїв. Проте традиційні джерела живлення на основі технології жорсткого перемикачання мають значні втрати на перемикачання силових ключів, що призводить до низького коефіцієнта корисної дії. Для подолання цих недоліків застосовують методи м'якого перемикачання, зокрема перемикачання за нульової напруги та перемикачання за нульового струму.

Серед різних методів м'якого перемикачання особливе місце займає повномостовий перетворювач фазового зсуву. Він широко використовується у високовольтних і високопотужних додатках завдяки простій конструкції та можливості реалізації комутації за нульової напруги. У цій топології індуктивність витоку трансформатора та вихідна ємність силових ключів застосовуються для досягнення режиму перемикачання за нульової напруги, що зменшує втрати енергії та підвищує ефективність роботи системи. Проте традиційний PSFB-перетворювач має обмеження щодо реалізації перемикачання за нульової напруги у всьому діапазоні навантаження та вхідної напруги, що вимагає додавання зовнішнього індуктора для покращення роботи пристрою.

Однією з основних проблем стандартного DC-DC -перетворювача є необхідність підвищення коефіцієнта трансформації для досягнення високого

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

посилення напруги, що призводить до збільшення розмірів трансформатора та зменшення щільності потужності. Крім того, зі збільшенням кількості витків вторинної обмотки зростає індуктивність виток трансформатора, що негативно впливає на його ефективність.

У даній кваліфікаційному проекті запропоновано модифіковану структуру фазозсувного повного мостового перетворювача з подвоювачем напруги. Додавання схеми подвоєння напруги дозволяє збільшити вихідну напругу без необхідності підвищення коефіцієнта трансформації. Крім того, у запропонованій топології між джерелом напруги та подвоювачем напруги вводиться зовнішня індуктивність, що не лише запобігає коливанням струму, але й виконує функцію резонансного індуктора для розширення діапазону роботи в режимі перемикавання за нульової напруги. Таким чином, вирішується проблема недостатньої ефективності традиційного DC-DC перетворювача.

Запропонована схема розглядається як перспективне рішення для інверторних систем відновлюваної енергетики. У роботі проведено детальний аналіз роботи перетворювача, представлено результати моделювання в середовищі Pspice. Отримані результати підтверджують доцільність використання запропонованого підходу для підвищення ефективності систем перетворення електроенергії у відновлюваній енергетиці.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ У ВІДНОВЛЮВАЛЬНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ ТА СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ ЖИВЛЕННЯ

1.1 Значення DC-DC перетворювачів у системах відновлюваної енергетики

Відновлювана енергетика відіграє ключову роль у сучасній електроенергетиці, забезпечуючи сталий розвиток та зменшення впливу на довкілля. Проте використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергетика, пов'язане з проблемами непостійності генерованої напруги. Саме тому важливою складовою електроенергетичних систем є DC-DC перетворювачі, які забезпечують узгодження рівнів напруги, стабілізацію параметрів електроенергії та підвищення загальної ефективності системи.

DC-DC перетворювачі виконують кілька важливих функцій у системах відновлюваної енергетики:

- **Регулювання напруги:** сонячні панелі та вітрогенератори можуть виробляти змінну напругу залежно від погодних умов. DC-DC перетворювачі забезпечують стабільність напруги для подальшого перетворення або зберігання.

- **Максимальне використання потужності (MPPT):** більшість сучасних інверторних систем містять алгоритми відстеження точки максимальної потужності (MPPT), що покращує ефективність використання енергії.

- **Підключення до мережі та зберігання енергії:** у системах накопичення енергії DC-DC перетворювачі використовуються для заряджання акумуляторів або конденсаторних накопичувачів із максимальним ККД.

Таким чином, використання вискоефективних DC-DC перетворювачів у системах відновлюваної енергетики дозволяє значно підвищити ефективність передачі та використання енергії, що особливо важливо для автономних та мережевих рішень.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відновлювана енергетика відіграє ключову роль у сучасній електроенергетиці, забезпечуючи сталий розвиток та зменшення впливу на довкілля. Основними джерелами відновлюваної енергії є:

- Сонячна енергія – генерується за допомогою фотоелектричних панелей, які виробляють постійний струм (DC).
- Вітрова енергія – зазвичай генерується у вигляді змінного струму (AC), який після випрямлення може бути перетворений у DC для подальшого використання.
- Гідроенергетика та біоенергетика – можуть виробляти електроенергію у вигляді AC або DC залежно від технології генерації.

Проте використання відновлюваних джерел енергії пов'язане з проблемами непостійності та нелінійності генерованої напруги. Для ефективної інтеграції таких джерел до електроенергетичних систем необхідні перетворювачі електроенергії, серед яких DC-DC перетворювачі займають ключову роль.

1.1.1 Функції DC-DC перетворювачів у відновлюваній енергетиці

DC-DC перетворювачі виконують кілька ключових функцій у системах відновлюваної енергетики, забезпечуючи ефективне перетворення та стабілізацію електричної енергії. Однією з головних функцій є регулювання рівня напруги, оскільки сонячні панелі та вітрові генератори генерують змінну напругу, що залежить від умов навколишнього середовища. Перетворювачі дозволяють підвищувати або знижувати напругу до необхідного рівня, що особливо важливо для узгодження параметрів енергії з навантаженням або системою накопичення. Крім того, DC-DC перетворювачі використовуються у схемах ізольованого та неізольованого перетворення, що визначає їхнє застосування в автономних або мережевих системах.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ще однією важливою функцією є максимізація ефективності використання енергії, що досягається за допомогою алгоритмів МРРТ (відстеження точки максимальної потужності). Завдяки цьому пристрої можуть автоматично налаштовувати параметри роботи, щоб отримувати максимальну потужність від відновлюваного джерела. Також DC-DC перетворювачі застосовуються у системах накопичення енергії, забезпечуючи ефективний процес заряджання акумуляторів і оптимальний розподіл енергії між генератором, сховищем та споживачем. Таким чином, використання DC-DC перетворювачів є необхідною умовою для підвищення надійності та продуктивності сучасних відновлюваних енергетичних систем.

DC-DC перетворювачі виконують кілька важливих функцій у системах відновлюваної енергетики:

1. Регулювання напруги:

- Сонячні панелі та вітрогенератори можуть виробляти змінну або непостійну напругу залежно від погодних умов.
- DC-DC перетворювачі забезпечують стабільність напруги для подальшого перетворення або зберігання.
- Наприклад, фотоелектрична панель може генерувати напругу в діапазоні 18-40 В, тоді як акумулятор потребує постійні 24 В або 48 В.

2. Забезпечення максимальної потужності (МРРТ - Maximum Power Point Tracking):

- Напруга та струм сонячних панелей змінюються залежно від рівня освітленості.
- DC-DC перетворювачі з алгоритмами МРРТ автоматично підбирають оптимальну точку роботи, що дозволяє отримати максимально можливу потужність від джерела.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Використання MPPT дозволяє збільшити ефективність на 20-30% у порівнянні з традиційними методами.

3. Підключення до мережі та зберігання енергії:

- DC-DC перетворювачі використовуються для заряджання акумуляторів у системах зберігання енергії.

- Забезпечують оптимальне узгодження між джерелом енергії (сонячною панеллю, вітрогенератором) та навантаженням або мережею.

- Вони також можуть виконувати функції підвищення або зниження напруги, що необхідно для інтеграції відновлюваних джерел у локальні або централізовані мережі.

4. Поліпшення якості енергопостачання:

- Використання DC-DC перетворювачів зменшує рівень пульсацій напруги та струму, що покращує роботу електричних пристроїв.

- Запобігає небажаним перенапругам і провалам напруги, що критично для чутливої електроніки.

- Підвищення загальної ефективності системи

- Сучасні DC-DC перетворювачі мають високий ККД (до 95-98%) і мінімізують втрати енергії при її передачі та зберіганні.

- Зменшують нагрівання компонентів, що важливо для автономних систем.

1.1.2 Класифікація DC-DC перетворювачів у відновлюваній енергетиці

DC-DC перетворювачі в системах відновлюваної енергетики класифікуються за різними критеріями, такими як принцип роботи, рівень ізоляції та тип регулювання напруги. За принципом роботи перетворювачі поділяються на знижувальні (Buck), підвищувальні (Boost) та комбіновані (Buck-Boost, Cuk, SEPIC, Zeta). Знижувальні перетворювачі використовуються для

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зниження вихідної напруги до рівня, необхідного для навантаження, що особливо важливо в системах накопичення енергії. Підвищувальні топології збільшують напругу, що дозволяє ефективніше використовувати джерела з низькою напругою, такі як сонячні панелі. Комбіновані топології забезпечують можливість як підвищення, так і зниження напруги, що робить їх універсальними для різних сценаріїв роботи.

DC-DC перетворювачі, що використовуються у відновлюваній енергетиці, поділяються на три основні класи:

1. Знижувальні (Buck-converter) – зменшують напругу, наприклад, з 48 В до 24 В або 12 В для зарядки акумуляторів.
2. Підвищувальні (Boost-converter) – збільшують напругу, наприклад, з 12 В до 48 В для живлення електромереж.
3. Інверторні або двонаправлені (Buck-Boost, Cuk, SEPIC, Zeta-конвертери) – можуть як підвищувати, так і знижувати напругу, що особливо корисно для гібридних систем.

За рівнем ізоляції DC-DC перетворювачі поділяються на ізольовані та неізольовані. Ізольовані перетворювачі, такі як фазозсучні повномостові (PSFB), напівмостові (Half-Bridge) та зворотні (Flyback, Forward), мають гальванічну розв'язку між входом і виходом, що забезпечує підвищену безпеку та зменшення електромагнітних завад. Вони часто використовуються в мережевих інверторних системах та автономних енергетичних комплексах. Неізольовані перетворювачі, зокрема Buck, Boost та Buck-Boost, мають вищий ККД завдяки меншій кількості силових компонентів і застосовуються в системах із безпосереднім підключенням до навантаження. Таким чином, вибір конкретного типу DC-DC перетворювача визначається вимогами до напруги, потужності та рівня безпеки в конкретному енергетичному застосуванні.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

На рисунку 1.1 представлено типову схему інтеграції DC-DC перетворювачів у відновлюваних енергетичних системах. Основним джерелом енергії може бути фотоелектрична панель, вітровий генератор або акумуляторний блок, що генерує нестабільну напругу. DC-DC перетворювач використовується для узгодження рівня напруги між джерелом та навантаженням, забезпечуючи оптимальні умови для зберігання або подальшого перетворення енергії. Наприклад, у сонячних електростанціях перетворювач стабілізує вихідну напругу панелі перед зарядкою акумуляторів або подачею енергії на інвертор, що генерує змінний струм (AC) для живлення мережі.

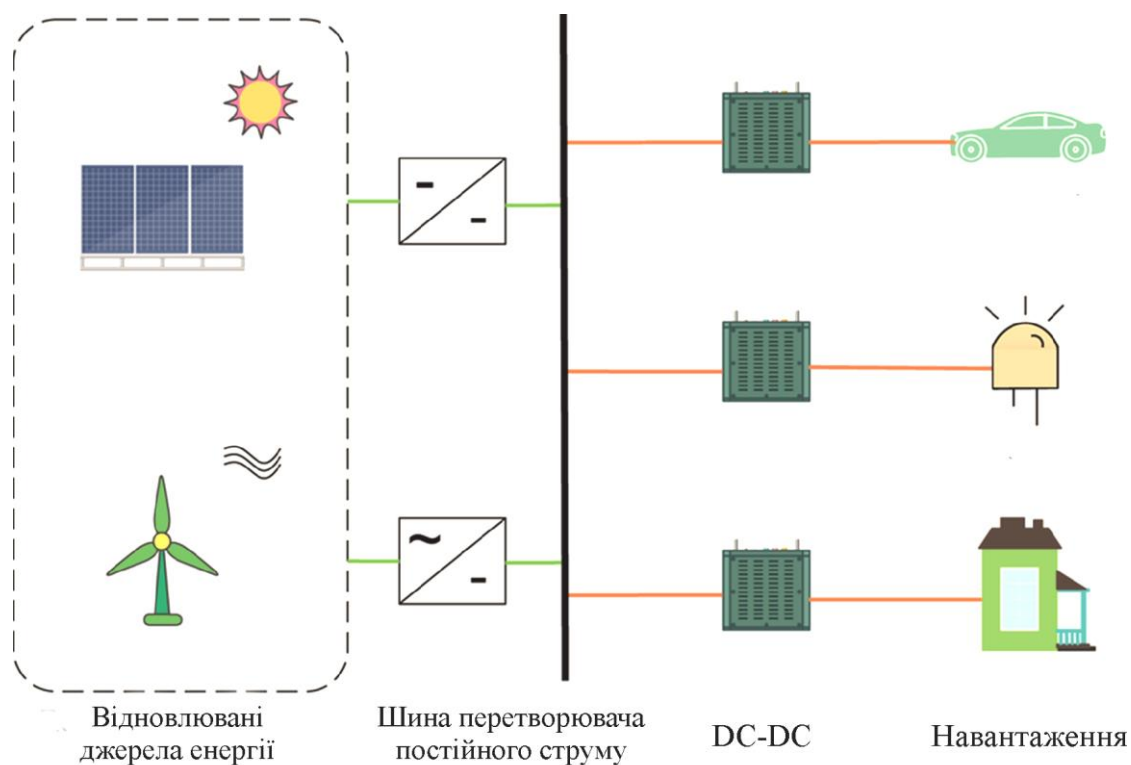


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення систем відновлюваної енергії

Використання DC-DC перетворювачів у системах відновлюваної енергетики значно підвищує ефективність енергопередачі та зменшує втрати. Це особливо важливо в автономних системах, де стабільність електроживлення

відіграє критичну роль. Такі перетворювачі також можуть містити алгоритми MPPT (Maximum Power Point Tracking), що дозволяють максимізувати потужність, отриману від джерела, шляхом динамічного регулювання вхідного опору. Таким чином, DC-DC перетворювач не лише покращує якість електропостачання, але й сприяє ефективному використанню енергії, знижуючи залежність від традиційних джерел живлення.

1.2 Основні типи DC-DC перетворювачів

DC-DC перетворювачі відіграють важливу роль у системах відновлюваної енергетики, забезпечуючи ефективне узгодження рівнів напруги між джерелом та навантаженням. Вони дозволяють адаптувати вихідну напругу генераторів (сонячних панелей, вітротурбін) до вимог системи накопичення або кінцевого споживача. Вибір відповідної топології перетворювача залежить від таких параметрів, як діапазон вхідної напруги, необхідний рівень вихідної напруги, ККД, габарити та вартість компонентів.

Залежно від принципу роботи та функціональних можливостей, DC-DC перетворювачі поділяються на декілька основних типів. Понижуючі (Buck) перетворювачі використовуються для зменшення рівня напруги, що актуально для систем живлення електронних пристроїв. Підвищуючі (Boost) перетворювачі, навпаки, збільшують напругу, що є критичним для фотоелектричних систем, де напруга сонячної панелі може бути нижчою за необхідну для роботи акумуляторів або інверторів. Понижуючо-підвищуючі (Buck-Boost) топології забезпечують універсальність, оскільки дозволяють як знижувати, так і підвищувати напругу. Інвертуючі (Cuk) перетворювачі змінюють полярність напруги, що може бути необхідним у спеціалізованих схемах живлення.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Таким чином, кожен тип DC-DC перетворювача має свою нішу застосування та впливає на ефективність роботи відновлюваних джерел енергії. Розуміння їх принципів роботи та особливостей допомагає інженерам проектувати оптимальні системи енергопостачання з максимальною продуктивністю.

1.3 Аналіз переваг та недоліків різних топологій DC-DC перетворювачів

Вибір відповідної топології DC-DC перетворювача має велике значення для забезпечення ефективності та стабільності роботи систем відновлюваної енергетики. Різні типи перетворювачів мають свої переваги та обмеження, що визначають їхню область застосування. Наприклад, у фотоелектричних системах може знадобитися підвищення напруги для ефективного використання накопичувальних пристроїв або підключення до інверторів, тоді як у системах електроживлення електронних пристроїв важливим є стабільне пониження напруги.

Основними факторами, які впливають на вибір топології, є рівень ККД, складність реалізації, електромагнітні перешкоди, стабільність вихідної напруги та вартість компонентів. Наприклад, Buck-перетворювачі є найефективнішими для зниження напруги, але не можуть підвищувати її. Boost-перетворювачі дозволяють отримувати вищу напругу на виході, але при цьому можуть бути нестабільними при змінному навантаженні. Buck-Boost-перетворювачі забезпечують універсальність, але мають складнішу систему керування та вищі втрати енергії. Cuk-перетворювачі відрізняються хорошими електромагнітними характеристиками, проте мають більш складну конструкцію.

Кожна топологія DC-DC перетворювачів має свої унікальні характеристики (таблиця 1.1), які визначають їхню область застосування.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Характеристики та особливості різних топологій DC-DC перетворювачів

Тип перетворювача	Переваги	Недоліки
Buck	Висока ефективність, проста схема	Працює тільки як понижуючий
Boost	Підвищує напругу, ефективний для фотоелектричних панелей	Висока чутливість до змін навантаження
Buck-Boost	Гнучкість у регулюванні напруги	Вищі втрати, складність керування
Cuk	Інвертує напругу, забезпечує менші електромагнітні перешкоди	Більш складна схема

Таким чином, вибір конкретної топології залежить від вимог до конкретного застосування. Якщо пріоритетом є висока ефективність і простота реалізації, то Buck або Boost-перетворювачі можуть бути найкращим варіантом. У випадках, коли необхідно змінювати напрямок напруги або поєднувати функції підвищення і пониження, варто розглянути Buck-Boost або Cuk-топології.

1.4 Фазозсувні повномостові DC-DC перетворювачі

Фазозсувні повномостові (PSFB, Phase-Shifted Full-Bridge) перетворювачі є одним із найефективніших рішень для високовольтних DC-DC перетворень, що широко застосовуються у промислових джерелах живлення, електромобільних зарядних пристроях, відновлюваній енергетиці та телекомунікаційних системах. Основною особливістю PSFB є використання фазозсувного керування для досягнення м'якого перемикання транзисторів у режимі нульової напруги (ZVS,

Zero Voltage Switching), що суттєво знижує втрати енергії під час комутації. Це дозволяє PSFB працювати з високим ККД навіть при значних навантаженнях, забезпечуючи оптимальну передачу потужності при мінімальних втратах.

На відміну від традиційних повномостових перетворювачів, які можуть мати значні комутаційні втрати через жорстке перемикання, фазозсувні перетворювачі дозволяють зменшити навантаження на силові ключі завдяки регульованому фазозсуву імпульсів керування. Цей підхід забезпечує поступове перемикання транзисторів, що не тільки покращує ефективність роботи, а й подовжує термін служби компонентів, зменшуючи їхнє нагрівання. Додатковою перевагою PSFB є можливість використання резонансних схем для подальшого зменшення комутаційних втрат, що робить їх ідеальними для високочастотних додатків, де мінімізація енергетичних втрат є критичною.

У відновлюваній енергетиці фазозсувні повномостові перетворювачі використовуються для підключення фотоелектричних панелей та акумуляторних систем до основних електромереж або автономних навантажень. Їхня здатність працювати в широкому діапазоні вхідних і вихідних напруг дозволяє ефективно адаптувати вихідні параметри до потреб конкретної системи. Наприклад, у фотоелектричних системах PSFB може використовуватися для передачі енергії з масивів сонячних панелей у системи зберігання, забезпечуючи стабільність напруги та мінімізацію втрат під час зарядки акумуляторів.

Основними особливостями фазозсувних повномостових перетворювачів є:

- використання фазозсувного керування для мінімізації втрат на комутацію;
- підвищена ефективність при високих потужностях, що робить їх оптимальним рішенням для промислових застосувань;
- можливість роботи у широкому діапазоні навантажень, що важливо для відновлюваної енергетики;

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- зменшення електромагнітних перешкод (ЕМІ), що покращує електромагнітну сумісність системи.

Незважаючи на всі переваги, PSFB мають певні обмеження, пов'язані з необхідністю використання додаткових індуктивних елементів для забезпечення м'якого перемикавання. Це ускладнює конструкцію та збільшує габарити пристрою. Також важливим фактором є необхідність складніших алгоритмів керування, що підвищує вимоги до мікроконтролерів або цифрових сигнальних процесорів, які використовуються для регулювання роботи перетворювача.

Таким чином, фазозсувні повномостові перетворювачі є одним із найефективніших рішень для високопотужних DC-DC систем, що використовуються в промислових та відновлюваних енергетичних застосуваннях. Вони поєднують переваги м'якого перемикавання, високої ефективності та стабільності роботи, що робить їх ідеальними для застосування в системах з високими вимогами до енергоефективності. Проте при їх розробці необхідно враховувати складність конструкції та необхідність оптимізації параметрів комутації для досягнення максимальної продуктивності.

1.5 Висновок до першого розділу

У підсумку, DC-DC перетворювачі відіграють критично важливу роль у відновлюваній енергетиці, забезпечуючи узгодження рівнів напруги, підвищення стабільності роботи систем та максимальне використання виробленої енергії. Завдяки різноманіттю топологій, таких як Buck, Boost, Buck-Boost, Cuk та фазозсувні повномостові перетворювачі (PSFB), можливо ефективно керувати процесами передачі, зберігання та споживання електроенергії в автономних і мережевих системах.

Сучасні технології, включаючи високочастотне керування та м'яке комутування, дозволяють значно покращити енергетичну ефективність та

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надійність відновлюваних енергосистем. Використання фазозсувних повномостових перетворювачів забезпечує зменшення комутаційних втрат та підвищену ефективність у високопотужних системах, що робить їх перспективним рішенням для інтеграції у сонячну та вітроенергетику. Таким чином, подальший розвиток технологій DC-DC перетворення сприятиме підвищенню ефективності та надійності сучасних систем відновлюваної енергетики

					КПТР.210150.01.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

2 АНАЛІЗ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СХЕМИ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ІНВЕРТОРНОГО DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА

У сучасних системах перетворення електроенергії часто використовуються повномостові фазозсувні перетворювачі (PSFB), які відзначаються високою ефективністю та зниженими комутаційними втратами. Одним із важливих аспектів удосконалення таких схем є оптимізація розмірів і ваги силових компонентів, зокрема трансформаторів. У запропонованій схемі перетворювача PSFB замість традиційної діодної випрямної схеми на вторинній стороні трансформатора використовується подвоювач напруги. Це дозволяє зменшити струм у вторинному колі та підвищити ефективність всієї системи.

2.1 Призначення та структурна схема запропонованого інвертного DC-DC перетворювача

Запропонована конструкція фазозсувного повномостового перетворювача (PSFB), подана на рисунку 2.1, є вдосконаленим варіантом традиційного PSFB-конвертера, призначеним для підвищення енергетичної ефективності та зменшення розмірів силових компонентів. Основною інженерною ідеєю є впровадження схеми подвоювача напруги на вторинній стороні трансформатора замість звичайного мостового або повного діодного випрямляча.

Таке рішення дозволяє досягти ряду технічних переваг:

- Зменшення габаритів трансформатора за рахунок зниження кількості витків у вторинній обмотці, що досягається завдяки підвищеній вихідній напрузі, яку формує подвоювач;
- Підвищення ефективності перетворення шляхом зниження струмів у вторинному ланцюзі, що зменшує втрати на провідність і покращує загальну продуктивність системи;

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Оптимізація теплових режимів роботи силових компонентів, зокрема діодів і конденсаторів, за рахунок зменшення струмових навантажень;
- Підвищення питомої потужності перетворювача, що є критично важливим для сучасних джерел живлення високої щільності.

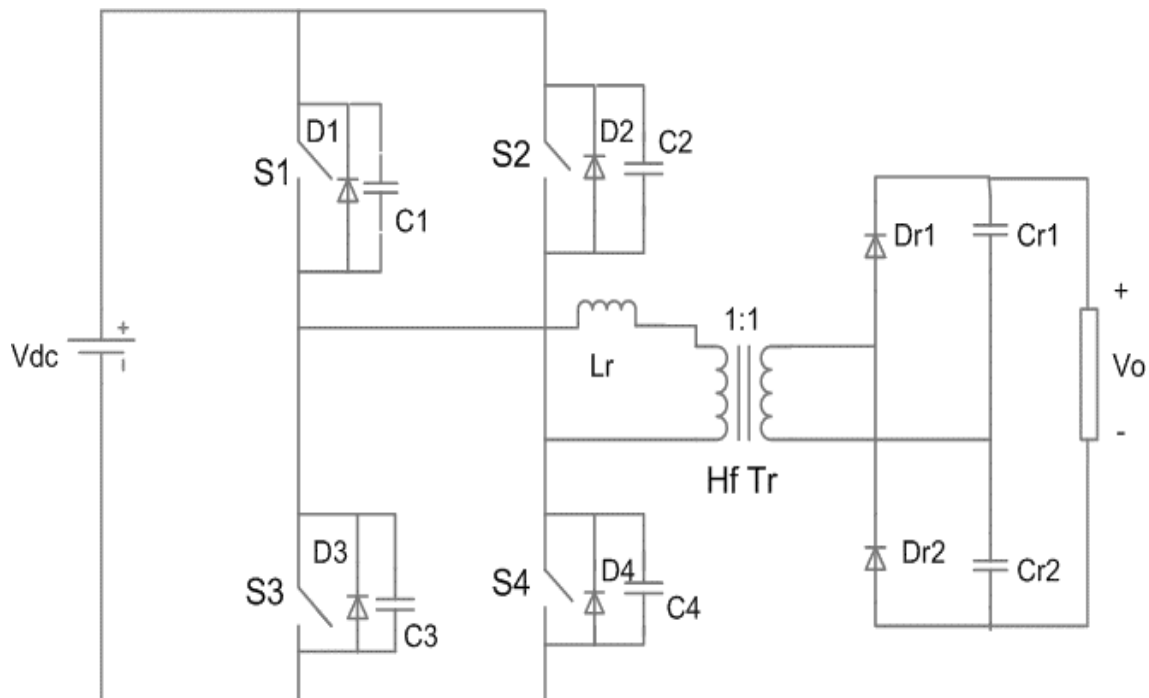


Рисунок 2.1 – Запропонований перетворювач з подвоювачем напруги

Структурно перетворювач складається з таких основних елементів:

- Повномостового інвертора, утвореного чотирма силовими ключами (S1–S4), що керуються із заданим фазовим зсувом для забезпечення умов резонансної комутації;
- Розділового трансформатора, який забезпечує гальванічну ізоляцію між первинною та вторинною сторонами схеми, а також передавання енергії;
- Резонансного елемента L_r , який виконує роль обмеження струму перемикання та формує умови для комутації з нульовою напругою (ZVS);

- Схеми подвоювача напруги, яка включає випрямні діоди ($Dr1$, $Dr2$) та накопичувальні конденсатори ($Cr1$, $Cr2$), і яка формує вихідну постійну напругу, що перевищує амплітудне значення вторинної змінної напруги трансформатора;
- Фільтруючого елемента на виході, який згладжує пульсації та забезпечує стабільність вихідної напруги.

Використання подвоювача напруги дозволяє реалізувати високу вихідну напругу без збільшення навантаження на трансформатор, що істотно покращує співвідношення між потужністю і масогабаритними показниками пристрою. Такий підхід є особливо доцільним у високочастотних перетворювачах, де компактність, ефективність та зниження електромагнітних завад мають вирішальне значення.

Таким чином, запропонована структурна схема забезпечує реалізацію енергоефективного та компактного перетворювача, що може бути застосований у телекомунікаційних системах живлення, промислових електронних пристроях та інших високопродуктивних електронних джерелах живлення.

2.2 Основні компоненти та принцип роботи фазозсувного повномостового DC-DC перетворювача

Фазозсувний повномостовий перетворювач (PSFB) – це один із типів DC-DC перетворювачів, який використовує фазовий зсув між керуючими сигналами ключів для досягнення ефективного та надійного перетворення енергії з високим рівнем ефективності. Його основна перевага полягає в тому, що він дозволяє досягти м'якого перемикавання з нульовим напругою (Zero Voltage Switching – ZVS), що значно знижує комутаційні втрати та дозволяє працювати на високих частотах комутації, знижуючи таким чином розміри і вагу компонентів.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2.1 Повномостова інверторна схема

Повномостова інверторна схема (H-bridge) є основним елементом фазозсувного перетворювача. Вона складається з чотирьох ключів (перемикачів), зазвичай це MOSFET або IGBT, які організовані у формі мосту:

- Основний принцип роботи: У перетворювачі з повномостовою інверторною схемою, два пари діагональних ключів (S1, S2 та S3, S4) керуються так, щоб лише одна пара ключів була замкнена в будь-який момент часу. Ключі S1 та S4 або S2 та S3 працюють одночасно, що дозволяє змінювати полярність вихідної напруги, подаючи її на первинну обмотку трансформатора.

- Зсув фази: Фазовий зсув між керуючими сигналами діагональних пар ключів (S1–S4 і S2–S3) визначає тривалість перекриття провідності ключів. Це зсув змінює тривалість перехідних процесів, дозволяючи зменшити час, коли кілька ключів одночасно проводять струм (так звані мертві зони). Це знижує втрати енергії через коротке замикання і дозволяє здійснювати м'яку комутацію, що є критично важливим для досягнення високої ефективності.

- Зміна тривалості перекриття провідності: Фазовий зсув дозволяє контролювати кількість енергії, що передається в навантаження, забезпечуючи стабільність вихідної напруги при змінних навантаженнях і вхідних напругах. Це важливо для застосувань, де вхідна напруга або навантаження можуть сильно коливатися.

2.2.2 Трансформатор

Трансформатор є ключовим компонентом в схемі PSFB, і його роль полягає в подальшому перетворенні напруги та забезпеченні ізоляції між вхідною та вихідною лініями.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Роль трансформатора: Трансформатор перетворює високочастотний імпульс на первинній обмотці в напругу на вторинній обмотці. Вихідна напруга визначається співвідношенням кількості витків між первинною та вторинною обмотками. При цьому важливо, щоб трансформатор мав низьку індуктивність розсіювання, оскільки висока індуктивність може призвести до втрат енергії, особливо на високих частотах.

- Особливості конструкції: Для забезпечення максимальної ефективності і мінімізації втрат на високих частотах, трансформатор в PSFB часто використовує феритові сердечники, що дозволяють працювати при значно вищих частотах комутації, порівняно з традиційними трансформаторами з залізними сердечниками.

- Подвоювач напруги: У деяких варіантах схем PSFB може бути використано подвоювач напруги на вторинній стороні трансформатора, що дозволяє збільшити вихідну напругу без збільшення кількості витків у трансформаторі. Це є важливим для застосувань, де потрібна висока вихідна напруга, наприклад, у системах для живлення потужних споживачів.

2.2.3 Випрямляч на вторинній стороні

Випрямляч на вторинній стороні трансформатора виконує важливу функцію перетворення змінного струму (AC), що виникає на виході трансформатора, в постійний струм (DC).

- Типи випрямлячів: В залежності від конструкції, на вторинній стороні трансформатора можуть використовуватися різні типи випрямлячів — одно- або трифазні, з використанням діодів або MOSFET, залежно від потужності та вимог до ефективності.

- Важливість м'якого випрямлення: З метою зменшення втрат на діодах і забезпечення максимальної ефективності, в PSFB часто використовуються м'які

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

випрямлячі, де діоди працюють з мінімальними втратами, що забезпечує ефективне перетворення.

- Регулювання вихідної напруги: Випрямляч, разом з фазовим зсувом ключів, дозволяє регулювати рівень вихідної постійної напруги, що є критичним для різноманітних застосувань, від джерел живлення до зарядних станцій для акумуляторних батарей.

2.2.4 Фільтр для згладжування пульсацій

Для того, щоб вихідна напруга була стабільною і без пульсацій, необхідно використовувати фільтри. Пульсації на виході виникають через комутацію ключів та перетворення напруги.

- Конденсаторні фільтри: Найбільш поширеним методом згладжування є використання конденсаторів на виході перетворювача, що дозволяють зменшити високочастотні пульсації, залишаючи постійну складову напруги. Чим більша є ємність фільтруючих конденсаторів, тим менші пульсації на виході, але важливо враховувати, що великі конденсатори збільшують вартість та розміри пристрою.

- Індуктивні фільтри: Додатково можуть використовуватися індуктивності для згладжування пульсацій. Індуктивності допомагають обмежити швидкість зміни струму, що зменшує високочастотні коливання.

- Роль фільтрів у системах з високою потужністю: В системах високої потужності, де перетворювачі працюють з великою струмовою навантаженістю, фільтри особливо важливі для збереження стабільності вихідної напруги і зменшення високочастотних шумів, що можуть негативно впливати на інші компоненти або чутливі системи.

Таким чином, фазозсувний повномостовий перетворювач є складною схемою, в якій кожен компонент має свою важливу роль у досягненні

					КПТР.210150.01.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

ефективного перетворення енергії. Технічні особливості, такі як фазовий зсув, трансформатор з подвоювачем напруги, випрямлячі та фільтри для згладжування пульсацій, забезпечують високий рівень ефективності та стабільності роботи пристрою навіть за складних умов роботи.

2.3 Переваги та застосування фазозсувного повномостового DC-DC перетворювача

Фазозсувний повномостовий перетворювач є одним із найефективніших типів перетворювачів енергії, і його використання набуває дедалі більшої популярності завдяки численним перевагам, таким як висока ефективність, зниження електромагнітних завад та висока щільність потужності. Далі розглянемо ці переваги та застосування PSFB більш детально.

2.3.1 Переваги фазозсувного повномостового перетворювача

Однією з основних переваг фазозсувного перетворювача є здатність працювати з нулевим напругою при перемиканні. Це означає, що перехід через нульову точку напруги відбувається при перемиканні ключів, що знижує комутаційні втрати, які виникають у традиційних перетворювачах, де ключі можуть перемикатися при високих напругах і струмах. Такий процес зменшує втрати енергії при перемиканні, що має суттєвий вплив на загальну ефективність роботи пристрою.

Завдяки високій ефективності при великих потужностях, перетворювач PSFB є дуже привабливим для застосувань, де важливим є енергозбереження і зниження теплових втрат.

У традиційних перетворювачах енергії, де ключі перемикаються при високих напругах і струмах, можуть виникати сильні електромагнітні завади.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вони виникають через швидкі зміни напруги і струму при перемиканні, що створює високочастотні шумові імпульси, здатні впливати на роботу інших електронних систем.

Як фазозсувний повномостовий перетворювач знижує електромагнітні завади:

- М'яка комутація: Завдяки технології перемикання з нульовим напругою, перемикання ключів відбувається в умовах, коли напруга на ключах мінімальна, що знижує утворення шумів під час перемикання.

- Низька швидкість змін: Завдяки фазовому зсуву між ключами в PSFB, зміни струму і напруги відбуваються більш поступово, що зменшує величину і частоту електромагнітних імпульсів.

- Покращена ізоляція: Високоякісні трансформатори з низькими індуктивними втратами також сприяють зменшенню електромагнітних завад за рахунок ефективної ізоляції.

Ці характеристики роблять PSFB привабливим вибором для застосувань, де важлива мінімізація електромагнітних перешкод, особливо в чутливих до ЕМІ системах.

Ще однією значною перевагою PSFB є його здатність працювати на високих частотах комутації, що дозволяє знизити розміри і вагу компонентів системи. Технологія перемикання з нульовим напругою дає змогу працювати на частотах від десятків до сотень кілогерців без значних втрат енергії, що дозволяє зменшити розміри трансформаторів та фільтрів.

Переваги високих частот комутації:

- Менші розміри компонентів: Робота на високих частотах дозволяє використовувати менші трансформатори і конденсатори, що зменшує розміри і вагу системи.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Вища щільність потужності: Завдяки високій частоті комутації, потужність може бути зосереджена в компактному корпусі без втрати ефективності. Це дає можливість створювати більш потужні пристрої при зменшеному обсязі.

- Покращена тепловіддача: Менші компоненти знижують рівень теплових втрат, оскільки поверхні для відведення тепла є більш ефективними при малих розмірах.

Це є особливо важливим для застосувань, де економія місця та зменшення ваги є критичними.

2.3.2 Застосування фазозсувного повномостового перетворювача

1. Системи відновлюваної енергетики

В системах відновлювальної енергетики, таких як сонячні та вітрові електростанції, часто застосовуються перетворювачі для перетворення змінного струму в постійний (DC-DC) або зворотний перехід (DC-AC). PSFB є ідеальним вибором для таких систем завдяки своїй високій ефективності, здатності працювати в широкому діапазоні вхідних напруг і мінімізації втрат енергії.

Застосування фазозсувного повномостового перетворювача у відновлювальній енергетиці:

- Оптимізація перетворення енергії: PSFB дозволяє максимально ефективно використовувати енергію, вироблену відновлювальними джерелами, завдяки високій ефективності та здатності працювати при змінних вхідних напругах.

- Зниження теплових втрат: Відновлювальні джерела енергії, як правило, працюють при змінних умовах навантаження, і зниження втрат енергії при таких коливаннях критичне для підтримки стабільної роботи всієї системи.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У телекомунікаційних системах, де постійно необхідно забезпечувати надійне джерело живлення для великої кількості обладнання, фазозсувні перетворювачі можуть використовуватися для перетворення змінного струму в постійний з високою ефективністю та мінімальними втратами.

Застосування фазозсувного повномостового перетворювача в телекомунікаціях:

- Покращена енергоефективність: Випрямлячі на основі PSFB дозволяють знижувати споживану потужність при високих навантаженнях, що знижує витрати на енергоспоживання.

- Надійність: Завдяки високій ефективності і мінімізації теплових втрат, такі системи можуть працювати довше без потреби в частих обслуговуваннях або заміні компонентів.

Застосування фазозсувного повномостового перетворювача у системах зарядки акумуляторів, зокрема для електричних транспортних засобів та автономних джерел живлення, є надзвичайно вигідним завдяки здатності перетворювача працювати з високими ефективностями та підтримувати стабільний заряд при змінних вхідних умовах.

Застосування фазозсувного повномостового перетворювача для зарядки акумуляторів:

- Інтелектуальне управління зарядом: фазозсувного повномостового перетворювача дає можливість точно контролювати процес заряджання акумулятора, що дозволяє максимально ефективно використовувати електроенергію і продовжувати термін служби акумулятора.

- Висока енергоефективність: У зарядних станціях для акумуляторів PSFB дозволяє знижувати втрати енергії, забезпечуючи швидке і ефективне заряджання при мінімальних теплових втрат.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фазозсувний повномостовий перетворювач є високоефективним, надійним і компактним рішенням для різноманітних промислових застосувань. Його здатність працювати з нульовим напругою при перемиканні, знижувати електромагнітні завади та забезпечувати високу щільність потужності робить його ідеальним для використання в таких областях, як відновлювальна енергетика, телекомунікаційні системи та зарядка акумуляторів.

2.4 Висновок до другого розділу

У даному розділі було проведено детальний аналіз запропонованої схеми фазозсувного повномостового перетворювача та обґрунтовано вибір його структурної організації і технічних рішень. Розглянуто основне призначення перетворювача, а також детально описано його ключові компоненти, включаючи повномостову інверторну схему, високочастотний трансформатор, випрямляч на вторинній стороні та фільтр для згладжування пульсацій вихідної напруги.

Крім того, були розглянуті основні переваги цього типу перетворювачів, серед яких: висока ефективність, низький рівень електромагнітних завад та можливість роботи на високих частотах комутації. Також наведено основні сфери застосування PSFB-перетворювачів - від систем відновлюваної енергетики до телекомунікаційного обладнання та систем зарядки акумуляторів.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує доцільність використання фазозсувного повномостового перетворювача в сучасних енергетичних і телекомунікаційних системах, а також створює підґрунтя для подальшого моделювання і дослідження його роботи в програмному середовищі.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 АНАЛІЗ РОБОТИ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ЗАПРОПОНОВАНОГО ІНВЕРТНОГО DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА

3.1. Формування режимів роботи DC-DC перетворювача

У сучасних високоефективних системах перетворення електроенергії широке застосування знаходять повномостові фазозсувні перетворювачі (PSFB), які забезпечують зниження комутаційних втрат та покращення загальної ефективності роботи. Одним із напрямів удосконалення таких пристроїв є зменшення габаритів і маси силових компонентів, зокрема трансформатора, без зниження показників продуктивності.

У запропонованій схемі фазозсувного повномостового перетворювача (рис. 2.1) на виході використовується не стандартна діодна схема випрямлення, а топологія з подвоювачем напруги. Такий підхід дозволяє зменшити струми у вторинному ланцюзі, покращити ефективність енергопередачі та знизити втрати, пов'язані з провідністю та комутацією.

Для спрощення математичного опису роботи перетворювача у сталому режимі вводиться ряд припущень:

- силові ключі (S1–S4) є ідеальними, тобто не мають втрат при перемиканні і характеризуються миттєвим переходом між станами;
- паразитні ємності ключів (C1–C4), а також внутрішні діоди (D1–D4) мають однакові характеристики;
- вихідна напруга вважається сталою протягом повного комутаційного циклу, що дозволяє зосередитися на аналізі перехідних процесів.

Робочий цикл фазозсувного повномостового перетворювача (PSFB) із подвоювачем напруги на вторинній стороні трансформатора складається з послідовності комутаційних процесів, що відбуваються у сталому режимі. Для

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аналітичного опису та подальшого моделювання його роботи повний період перемикання умовно поділяється на шість основних режимів.

Кожен із цих режимів визначається характерною комбінацією станів силових ключів, паразитних ємностей, внутрішніх діодів, а також напрямком енергетичних потоків через індуктивні та ємнісні елементи кола. Такий підхід дозволяє відобразити ключові перехідні процеси, що визначають ефективність перетворювача, зокрема реалізацію комутації з нульовою напругою для зниження втрат.

Узагальнений опис режимів забезпечує основу для подальшого глибшого аналізу, спрямованого на оптимізацію параметрів схеми та врахування впливу паразитних елементів на динаміку роботи пристрою.

Робота перетворювача в цих режимах забезпечує мінімальні втрати при перемиканні завдяки реалізації умов комутації з нульовою напругою, що є важливим для підвищення енергоефективності системи.

Наявність паразитних елементів, зокрема ємностей силових ключів та індуктивності розсіювання трансформатора, суттєво впливає на динаміку комутаційних процесів. Основні ефекти, спричинені цими параметрами:

- виникнення перенапруг на ключах у моменти перемикання;
- збудження резонансних процесів, що можуть як покращувати, так і ускладнювати реалізацію перемикання з нульовим напругою;
- вплив на тривалість процесів заряду/розряду, що визначає момент комутації і ступінь втрат.

Таким чином, правильне формування та аналіз режимів роботи перетворювача дає змогу не лише якісно описати робочий цикл пристрою, але й забезпечити оптимальне проектування ключових елементів схеми з урахуванням паразитних впливів. Це є передумовою для ефективної реалізації перетворювача з подвоювачем напруги у складі сучасних систем живлення.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2. Аналіз роботи перетворювача в різних режимах перемикання

Для повного розуміння принципу дії фазозсувного повномостового перетворювача (PSFB) із подвоювачем напруги необхідно проаналізувати його роботу в кожному з характерних режимів перемикання. Кожен з цих режимів визначається комбінацією станів силових ключів, змінами напруг на паразитних ємностях, напрямком струму через трансформатор та активністю випрямляючих елементів. Такий аналіз дозволяє виявити особливості передавання енергії, умови реалізації комутації з нульовою напругою, а також оцінити вплив паразитних параметрів на динаміку роботи пристрою. У подальших підпунктах детально розглянуто послідовність процесів, що відбуваються у кожному з шести основних режимів одного напівперіоду перемикання.

Режим I: $t_0 - t_1$

У цьому режимі відбувається передача активної потужності від джерела до вторинної сторони через ключі S1 і S4, рисунок 3.1. Це початковий етап роботи перетворювача, коли джерело живлення починає подавати енергію на первинну обмотку трансформатора. У цей момент S1 і S4 знаходяться в увімкненому стані, що дозволяє потужності потрапляти до трансформатора. На вторинній стороні транзистори S1 і S4 керують діодами Dr1, який знаходиться в увімкненому стані. Таким чином, на вторинній стороні формується необхідний струм, який заряджає конденсатор Cr1. Цей процес заряджання відбувається за допомогою струму $i_{Dr1}(t)$, що передає енергію до навантаження через випрямлений діод.

Крім того, в цьому режимі важливим є забезпечення ефективного перенесення енергії з мінімальними втратами. Завдяки роботі ключів у режимі жорсткої провідності, комутаційні втрати на цьому етапі мінімальні, оскільки напруга на ключах низька в момент їх включення. Струм у первинній обмотці

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

трансформатора поступово зростає, відображаючи передачу енергії на вторинну сторону. У цей період накопичується енергія в магнітному полі трансформатора та конденсаторі C_{r1} , яка буде використана в подальших фазах для підтримки стабільного рівня вихідної напруги та живлення навантаження.

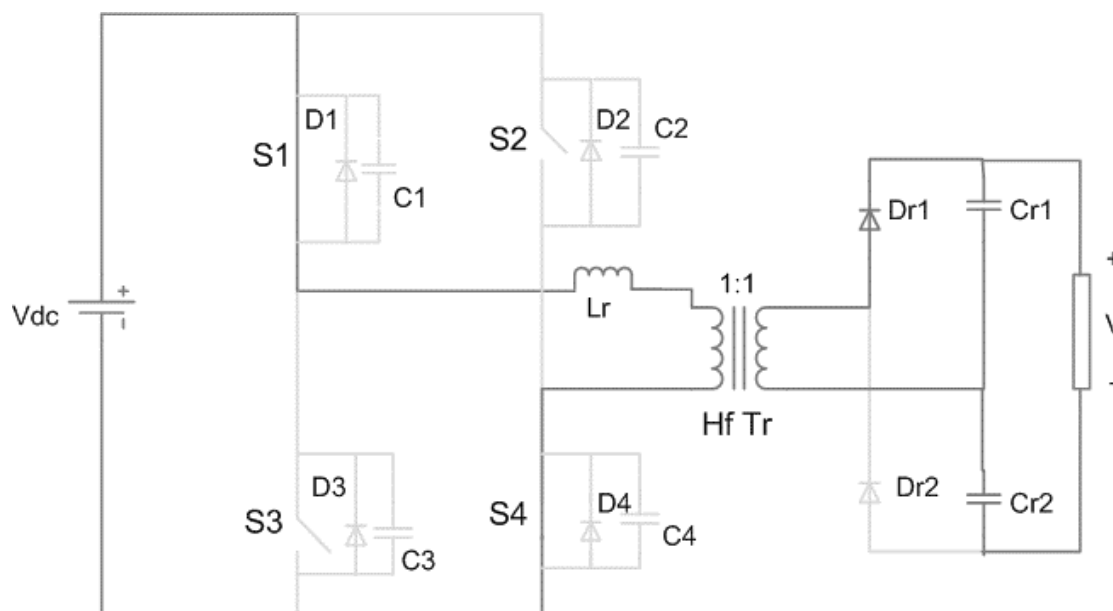


Рисунок 3.1 – Еквівалентна схема режиму I

Режим II: t_1-t_2

У режимі II, коли транзистор S_1 вимикається, конденсатори C_1 і C_3 починають заряджатися і розряджатися в резонансі з індуктивністю L_r (рисунок 3.2). Стан S_1 зміщується до вимкненого, і схема починає працювати в умовах резонансного заряджання й розряджання елементів. Цей процес необхідний для збереження енергії в коливальній системі, яка включає індуктивність і ємності. Відповідно, цей етап визначає зміну енергії в схемі, і ємності, зокрема C_1 і C_3 , заряджаються і розряджаються, що підтримує баланс енергії між первинною і вторинною стороною трансформатора. Завдяки цьому процесу забезпечується ефективне використання енергії в системі.

У цьому режимі ключову роль відіграє паразитна ємність силових ключів,

етапу комутації. Після того як напруга на $C3$ падає до нуля, $S3$ може бути включений для досягнення комутації при нульовій напрузі. Це є важливою умовою для уникнення збоїв в роботі схеми і забезпечення м'якої комутації без значних енергетичних втрат. Такий перехід дозволяє мінімізувати втрати енергії і забезпечити ефективність роботи перетворювача.

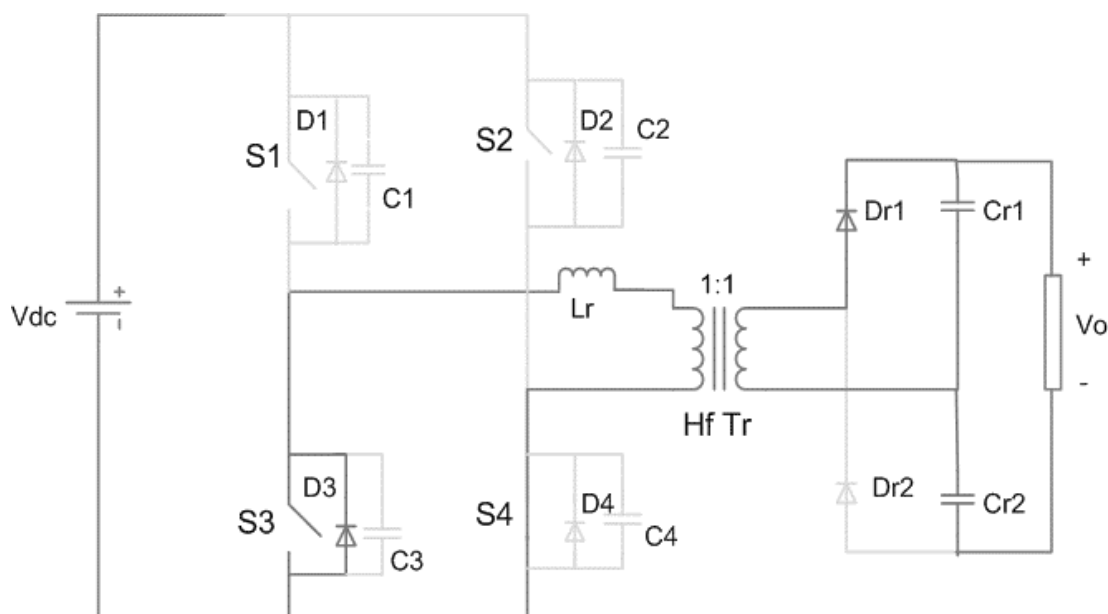


Рисунок 3.3 – Еквівалентна схема режиму III

Забезпечення умов для комутації при нульовій напрузі у цьому режимі є критично важливим для зменшення динамічних втрат у силових ключах, що істотно підвищує довговічність і надійність усього пристрою. Природне включення діода $D3$, яке відбувається за рахунок накопиченої енергії в індуктивному елементі L_r , дозволяє уникнути додаткових імпульсних перенапруг на ключі $S3$. Крім того, це сприяє зниженню рівня електромагнітних завад, що виникають під час різких переходів між режимами. У результаті, режим III створює передумови для енергоефективного функціонування перетворювача з мінімальними втратами і покращеною стабільністю вихідних

параметрів.

Режим IV: t_3-t_4

У цьому режимі S4 вимикається, і енергія в ємностях C2 і C4 починає заряджатися і розряджатися в резонансі з індуктивністю L_r (рисунок 3.4). Цей процес, подібно до попереднього, включає резонансні коливання, в яких ємності C2 і C4 обмінюються енергією з індуктивним елементом L_r . Зарядження та розрядження цих ємностей допомагає підтримувати стабільну передачу потужності і рівновагу між елементами схеми, що необхідно для досягнення високої ефективності в перетворенні енергії. Подібний режим роботи дозволяє підготувати систему до наступного етапу комутації, забезпечуючи оптимальну передачу енергії між елементами.

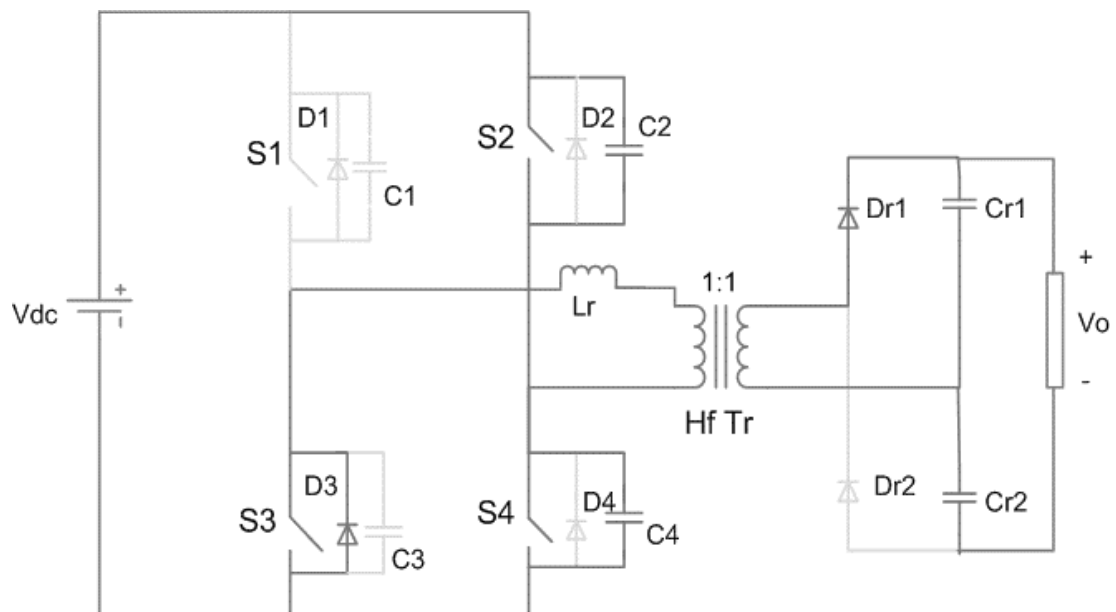


Рисунок 3.4 – Схема еквівалентної схеми режиму IV

У цей період у схемі відбувається поступова зміна напрямку струму через індуктивність L_r , що сприяє природному переходу до наступного комутаційного

стану. Резонансна взаємодія між L_1 та ємностями C_2 і C_4 не тільки забезпечує ефективне перерозподілення енергії, але й дозволяє знизити напругу на ключі S_2 до нульового рівня, що є передумовою для реалізації м'якої (перемикання з нульовим напругою) комутації. Така поведінка системи відіграє важливу роль у зменшенні втрат потужності на перемикання, а також сприяє зниженню теплового навантаження на елементи силового каскаду. У підсумку, цей режим забезпечує плавний перехід між фазами роботи та підвищує загальну надійність та енергоефективність перетворювача.

Крім того, такий характер резонансного процесу сприяє зменшенню електромагнітних перешкод, що виникають під час перемикання силових ключів. Завдяки комутації з нульовою напругою, зменшується рівень високочастотних гармонік, які зазвичай є джерелом радіоелектронних завад у стандартних силових перетворювачах. Це дозволяє інтегрувати запропоновану схему в системи, що працюють в умовах підвищених вимог до електромагнітної сумісності (ЕМС), зокрема в телекомунікаційних або медичних застосуваннях, де стабільність і чистота енергоживлення мають критичне значення.

Режим V: t_4-t_5

У цьому режимі напруга на конденсаторі C_2 розряджається до нуля, що дозволяє активувати основний діод D_2 перемикача S_2 природним чином (рисунок 3.5). Коли напруга на C_2 стає рівною нулю, S_2 може бути увімкнений для досягнення комутації при нульовій напрузі, що забезпечує оптимальні умови для подальшої передачі потужності без зайвих енергетичних втрат. Цей процес є критичним для досягнення високої ефективності перетворення енергії, оскільки дозволяє мінімізувати перевантаження на компонентах і запобігти виникненню пікових напруг.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

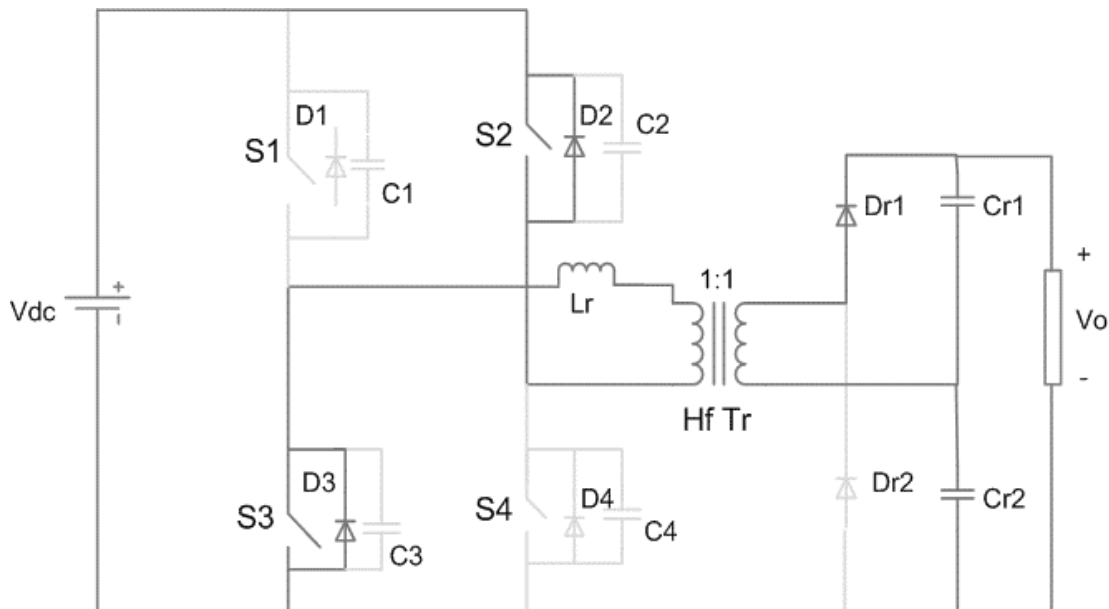


Рисунок 3.5 – Схема еквівалентної схеми режиму V

Крім того, реалізація природного вмикання діода D2 сприяє зменшенню електромагнітних завад, що виникають під час жорсткої комутації, тим самим покращуючи електромагнітну сумісність (ЕМС) перетворювача з іншими елементами системи. Така стратегія перемикавання дозволяє зменшити втрати на перемикавання і забезпечує стабільну роботу пристрою навіть за високих частот. Важливою перевагою цього режиму є також зниження вимог до тепловідведення з ключів, що спрощує конструкцію та підвищує надійність всього пристрою. У результаті досягається збалансована робота силового каскаду з одночасним зменшенням втрат потужності та підвищенням загального ККД.

Режим VI: t_5 - t_6

На останньому етапі, коли S2 і S3 увімкнені, активна потужність передається від джерела до вторинної сторони через транзистори S2 і S3 (рисунок 3.6). В цей час діод Dr2 на вторинній стороні перебуває в увімкненому стані, що дозволяє заряджати конденсатор Cr2 струмом $i_{Dr2}(t)$. У результаті

відбувається остаточне завершення циклу передачі енергії до навантаження. Завдяки цьому процесу завершується повна передача енергії до навантаження, і перетворювач готовий до наступного циклу роботи.

Цей завершальний етап є симетричним до початкового режиму, що забезпечує стабільність і повторюваність циклу комутації. Зарядження конденсатора C_{r2} відбувається з урахуванням динаміки напруги і струму в вторинному колі, що дозволяє накопичити необхідну кількість енергії для живлення навантаження. Водночас, цей режим забезпечує умови для плавного переходу до наступного півперіоду комутації без різких змін у електричних параметрах схеми. Завдяки чітко визначеній послідовності процесів у цьому режимі, досягається висока ефективність роботи перетворювача, а також зменшуються втрати на ключах і випрямлячах.

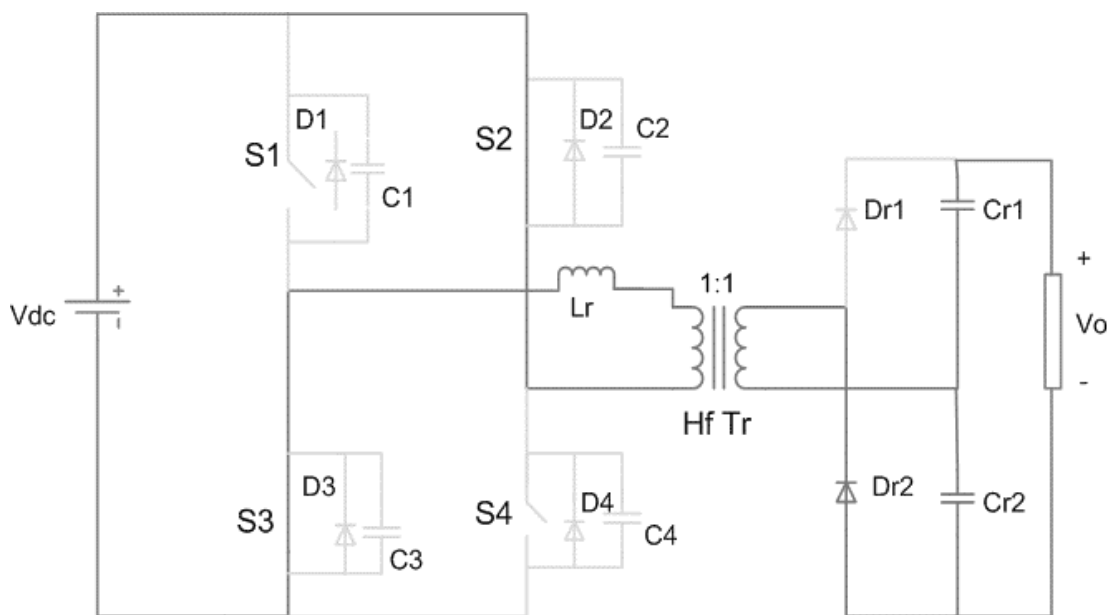


Рисунок 3.6 – Схема еквівалентної схеми режиму VI

Таким чином, після завершення передачі енергії в кінцевому етапі комутації, перетворювач повертається до початкового стану, готовий до нового

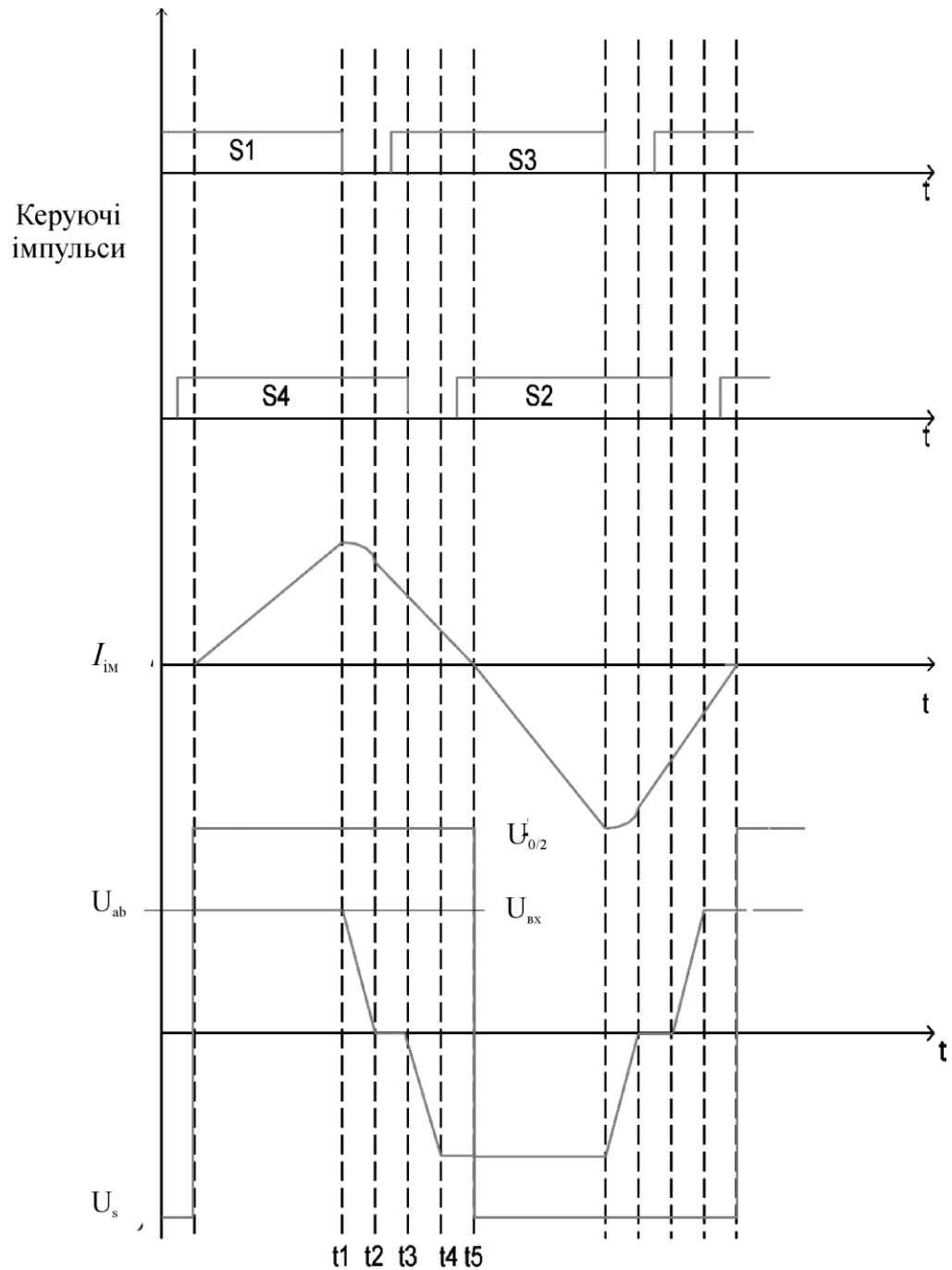
циклу роботи. Роль кожного етапу в забезпеченні високої ефективності і стабільності роботи схеми важлива, оскільки це дозволяє забезпечити безперервний процес енергетичної трансформації з мінімальними втратами. Однак для досягнення ще більшої оптимізації і налаштування параметрів перетворювача важливо звернути увагу на форми робочих хвиль, які наочно відображають весь процес перемикання і його особливості.

На рисунку 3.7 наведено форми робочих хвиль запропонованого перетворювача, що відображають процеси перемикання в кожному з етапів роботи системи. На графіках показано зміни напруги та струму в ключових елементах схеми, таких як транзистори, діоди і ємності. Важливою особливістю є наявність нульових переходів напруги, що сприяють досягненню комутації при нульовій напрузі, що забезпечує мінімізацію енергетичних втрат та підвищує ефективність роботи перетворювача.

Візуалізація робочих хвиль дає змогу чітко прослідкувати зміни в резонансних процесах заряджання та розряджання ємностей, а також у роботі транзисторів і діодів під час перемикання. Графіки дозволяють краще зрозуміти взаємодію між різними компонентами схеми, забезпечуючи оптимальний баланс енергії, необхідний для стабільної роботи перетворювача. Це важливо для подальшого вдосконалення схеми та налаштування її параметрів для досягнення максимальної ефективності.

Крім того, форми робочих хвиль дозволяють виявити потенційні небажані явища, такі як перенапруги або надструми, що можуть виникати під час переходу між режимами роботи. Аналіз цих сигналів дає змогу своєчасно вносити корективи в конструкцію схеми або алгоритми керування, щоб запобігти перевантаженням елементів та забезпечити довготривалу надійну експлуатацію перетворювача. Таким чином, дослідження робочих хвиль є важливим етапом у процесі проєктування і оптимізації енергетичних перетворювальних пристроїв.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунку 3.7 – Форми робочих хвиль запропонованого перетворювача

3.3 Аналіз передачі потужності та резонансних процесів у перетворювачі

Робота запропонованого перетворювача розглядається в шести основних режимах, які визначаються послідовністю перемикування силових ключів. У

кожному режимі відбуваються різні процеси, включаючи передавання активної потужності, резонансне заряджання і розряджання ємностей, перехідні процеси та досягнення комутації при нульовій напрузі. Аналіз цих режимів дозволяє оцінити ефективність роботи перетворювача та визначити параметри для оптимізації його характеристик.

Передача активної потужності в режимах I та VI

У першому (t_0-t_1) та шостому (t_5-t_6) режимах перетворювач передає активну потужність від джерела живлення до вторинної сторони через силові ключі.

- У режимі I (рис. 3.1) ключі S_1 і S_4 ввімкнені, що дозволяє енергії надходити до навантаження. Діод Dr_1 проводить струм, а ємність Cr_1 заряджається.

- У режимі VI (рис. 3.6) аналогічний процес відбувається для іншої половини циклу: ключі S_2 і S_3 проводять струм, діод Dr_2 увімкнений, а ємність Cr_2 заряджається.

Ці два режими є основними для передавання потужності, і їх ефективність визначається втратами в ключах та елементах випрямляча.

Резонансне заряджання і розряджання ємностей у режимах II та IV

Режими II (t_1-t_2) та IV (t_3-t_4) характеризуються процесами резонансного заряджання і розряджання ємностей, що відіграє ключову роль у забезпеченні умов для перемикання з нульовим напругою.

- У режимі II (рис. 3.2) після вимкнення ключа S_1 ємності C_1 і C_3 заряджаються і розряджаються в резонансі з індуктивністю L_r , що сприяє плавному перемикаю ключів.

- У режимі IV (рис. 3.4) аналогічні процеси відбуваються для ємностей C_2 і C_4 після вимкнення ключа S_4 .

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ці процеси дозволяють мінімізувати втрати при перемиканні та забезпечити ефективну роботу перетворювача.

Перехідні процеси в режимах III та V

Режими III (t_2-t_3) та V (t_4-t_5) пов'язані з ключовими перехідними процесами, які забезпечують необхідні умови для комутації при нульовій напрузі.

- У режимі III (рис. 3.3) напруга на ємності C3 повністю розряджається, після чого діод D3 ключа S3 природним чином відкривається. Це створює умови для безпечного ввімкнення ключа S3 із перемикання з нульовим напругою.

- У режимі V (рис. 3.5) аналогічний процес відбувається для напруги на C2: вона розряджається, після чого природно відкривається діод D2, що дозволяє ввімкнути ключ S2 без додаткових втрат.

Перехідні процеси в цих режимах є важливими для досягнення ефективного перемикання та зниження навантаження на силові ключі.

Досягнення комутації при нульовій напрузі

Комутація при нульовій напрузі є критичним аспектом для підвищення ефективності перетворювача. Вона досягається за рахунок:

- Резонансного перерозподілу енергії між ємностями і індуктивністю L_r , що дозволяє розряджати паразитні ємності перед увімкненням наступного ключа.

- Використання природного відкривання діодів (D2, D3), що зменшує втрати перемикання та підвищує надійність роботи пристрою.

Таким чином, поетапний аналіз режимів роботи перетворювача дозволяє оцінити його експлуатаційні характеристики, мінімізувати втрати та покращити ефективність перетворення енергії.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4. Вплив подвоювача напруги на характеристики перетворювача

Використання подвоювача напруги в схемах перетворювачів є ефективним методом для досягнення покращених характеристик, таких як зменшення розміру та об'єму трансформатора, підвищення ефективності енергетичних перетворень та забезпечення стабільності вихідної напруги. Завдяки своїм унікальним властивостям, подвоювач напруги дозволяє значно знизити втрати енергії та поліпшити загальну продуктивність системи.

3.4.1 Зменшення розміру і об'єму розділового трансформатора

Подвоювач напруги на вторинній стороні перетворювача дозволяє значно зменшити фізичні розміри та об'єм трансформатора, що є важливим для багатьох сучасних електронних пристроїв. Традиційно, для того щоб отримати необхідну вихідну напругу в системах з трансформаторами, доводиться використовувати великі кількості витків на вторинній обмотці трансформатора. Чим більше витків, тим більша індуктивність трансформатора, що прямо впливає на розмір і масу самого пристрою. Трансформатори з великою кількістю витків також часто мають вищі втрати через опір обмоток і магнітні втрати в ядрі, що додає до загальної маси пристрою. Водночас такі трансформатори займають більше простору і потребують більше матеріалів, що робить їх менш економічно ефективними і складними в інтеграції у компактні пристрої.

Використання подвоювача напруги дозволяє суттєво змінити цю ситуацію. Подвоювач напруги змінює принцип підвищення напруги, дозволяючи трансформатору працювати з меншою кількістю витків на вторинній обмотці, що зменшує фізичні розміри трансформатора. Оскільки подвоювач забезпечує подвоєння напруги вже після трансформації, можна застосовувати трансформатори з меншими витками, що знижує загальні розміри та вагу

					КПТР.210150.01.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

системи. Крім того, така схема дозволяє значно зменшити магнітні втрати і втрати в обмотках трансформатора, оскільки витки розміщуються на менший радіус, а магнітний потік зберігається більш ефективно. Це дозволяє досягти кращої енергетичної ефективності і значно покращити загальну компактність і надійність перетворювача, що особливо важливо для портативних і високотехнологічних пристроїв.

3.4.2 Підвищення ефективності завдяки зміні схеми випрямляча

Подвоювач напруги, інтегрований у схему перетворювача, значно змінює принцип роботи випрямляча, підвищуючи його ефективність. У традиційних схемах випрямлення, особливо в класичних діодних випрямлячах, часто виникають втрати енергії, пов'язані з неправильною комутацією або нелінійним перетворенням змінного струму в постійний. Ці втрати можуть виникати через неідеальні характеристики діодів, які не завжди включаються і вимикаються без значних часових затримок або при високих частотах, що супроводжується нагріванням та зниженням загальної ефективності. Крім того, у класичних схемах важко забезпечити оптимальне узгодження фаз між комутуючими елементами, що також призводить до втрат енергії в процесі перетворення.

Використання подвоювача напруги в перетворювачах дозволяє значно зменшити ці втрати. У схемах з подвоювачем напруги на вторинній стороні трансформатора забезпечується більш ефективне керування фазами, що дозволяє досягти більш рівномірної та точної комутації діодів. Це оптимізує процес перетворення змінного струму в постійний, зменшуючи пульсації вихідної напруги і покращуючи стабільність роботи системи. Зокрема, завдяки таким змінам у схемі, можна забезпечити більш високий коефіцієнт корисної дії (ККД) перетворювача, оскільки енергетичні втрати значно знижуються. Цей фактор є особливо важливим у застосуваннях, де ефективність є критичною, наприклад, в

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергозберігаючих системах або при інтеграції перетворювачів у портативні пристрої, де кожен додатковий відсоток ефективності може суттєво вплинути на тривалість роботи пристрою та зменшення теплових втрат.

3.4.3 Вплив подвоювача напруги на стабільність вихідної напруги

Подвоювач напруги не лише підвищує ефективність перетворення енергії, але й значно покращує стабільність вихідної напруги, особливо у випадках, коли вхідна напруга або навантаження зазнають значних коливань. Традиційно в схемах перетворення, де не використовується подвоювач напруги, можуть виникати значні пульсації на виході через різкі зміни навантаження або коливання вхідної напруги. Це призводить до нестабільної роботи системи, зокрема до непередбачуваних змін вихідної напруги, що може негативно вплинути на роботу чутливих електронних пристроїв, таких як мікропроцесори, сенсори чи інші компоненти, які потребують стабільного джерела живлення.

Інтеграція подвоювача напруги значно зменшує ці пульсації завдяки більш чітко відрегульованому процесу зарядки та розрядки ємностей. Це дозволяє стабільно підтримувати вихідну напругу навіть при змінних навантаженнях, запобігаючи різким сплескам або просіданням напруги. Подвоювач напруги також допомагає забезпечити рівномірне та передбачуване випрямлення, що дозволяє зменшити можливість утворення шкідливих імпульсів чи хвильових коливань на виході. Такий підхід критичний у ситуаціях, де необхідна висока точність стабілізації напруги, особливо у високочутливих пристроях, де навіть незначні коливання можуть призвести до помилок у роботі або виходу з ладу.

Таким чином, за рахунок більш ефективної стабілізації вихідної напруги, подвоювач напруги значно знижує ризик пошкоджень чутливої апаратури та забезпечує надійну роботу системи. Це робить схеми з подвоювачем напруги ідеальними для використання в енергозберігаючих пристроях, де важливо не

					КПТР.210150.01.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

лише зменшити фізичний розмір і обсяг перетворювача, але й забезпечити стабільну та надійну роботу навіть при коливаннях навантаження або вхідної напруги.

Крім того, використання подвоювача напруги дозволяє оптимізувати конструкцію системи з точки зору енергоефективності. За рахунок підвищення вихідної напруги з тієї ж вхідної потужності зменшується струмове навантаження на силові елементи схеми. Це знижує рівень теплових втрат, дозволяє використовувати менш потужні елементи керування та охолодження, що в свою чергу сприяє зменшенню габаритів та маси пристрою. Такий підхід є особливо корисним для портативних і автономних застосувань, наприклад у безпілотних літальних апаратах (БПЛА), де вагові обмеження є критичними.

З технічної точки зору, подвоювач напруги сприяє покращенню динамічних характеристик перетворювача при різких змінах режимів навантаження. Швидкість реакції вихідної напруги на зміну навантаження без затримок та перенапруги забезпечується за рахунок накопиченої енергії в конденсаторах подвоювача. Це дозволяє уникнути ефекту "просідання" напруги, який зазвичай спостерігається в традиційних схемах без такої топології. Завдяки цьому система зберігає стабільну роботу навіть в умовах імпульсного або динамічного навантаження, що є важливим для телекомунікаційного обладнання, цифрової обчислювальної техніки та пристроїв зв'язку.

3.5. Оцінка динамічних характеристик та ККД перетворювача

Оцінка динамічних характеристик та коефіцієнта корисної дії (ККД) перетворювача є важливими етапами в аналізі його ефективності та функціональності в різних умовах експлуатації. Цей розділ присвячений аналізу вихідної напруги та струмів у сталому режимі, вивченню впливу параметрів

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навантаження на динаміку перетворення, а також розрахунку ККД і основних втрат енергії, що виникають в процесі роботи перетворювача.

1. Аналіз вихідної напруги та струмів у сталому режимі

У сталому режимі перетворювач працює з постійними значеннями вихідної напруги та струму, які відповідають заданим умовам навантаження. Оцінка стабільності цих параметрів є критично важливою для забезпечення надійної роботи системи. Для проведення такого аналізу використовуються математичні моделі, що описують поведінку перетворювача, зокрема, рівняння для струмів і напруги в різних елементах схеми. Вихідна напруга повинна залишатись стабільною навіть за умови змін вхідної напруги або навантаження, що є ключовим критерієм для оцінки якості роботи перетворювача.

Для аналізу вихідних параметрів використовуються рівняння, що описують струм і напругу в основних елементах схеми, наприклад, для конденсаторів та індуктивностей. Вихідну напругу $U_{\text{вих}}$ можна виразити через вхідну напругу $U_{\text{вх}}$ та параметри трансформатора або підвищувальної схеми за допомогою таких рівнянь:

$$U_{\text{вих}} = k \cdot U_{\text{вх}}, \quad (3.1)$$

де k – коефіцієнт підвищення напруги, який залежить від трансформатора чи схеми подвоювача напруги.

Зміна вихідної напруги $U_{\text{вих}}$ зі зміною навантаження може бути описана рівнянням для струму на навантаженні:

$$I_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вих}}}{R_{\text{н}}}, \quad (3.2)$$

де $I_{\text{вих}}$ – струм на навантаженні, а $R_{\text{н}}$ – опір навантаження.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для визначення стабільності вихідної напруги при змінних умовах навантаження можна використовувати рівняння динаміки навантаження з врахуванням реактивних елементів:

$$U_{вих}(t) = U_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (3.3)$$

де τ – постійна часу, яка залежить від параметрів трансформатора та елементів кола.

2. Вплив параметрів навантаження на динаміку перетворення

Параметри навантаження, такі як опір, індуктивність та ємність, мають значний вплив на динамічні характеристики перетворювача. Зміни в навантаженні можуть призвести до коливань вхідної напруги, що впливають на вихідні параметри. Важливою задачею є визначення того, як зміна навантаження (наприклад, у вигляді змінного опору чи варіативних струмів) впливає на стабільність вихідної напруги, а також на швидкість і точність її відновлення до сталого значення після змін. Для оцінки цього впливу проводиться аналіз переходу між різними режимами роботи перетворювача, визначаються параметри, які оптимізують відгук на зміни навантаження, такі як постійна часу та коефіцієнт затухання коливань.

Параметри навантаження, такі як опір R_n , індуктивність L_n та ємність C_n , визначають характеристики перетворення. Вплив навантаження на перетворювач можна описати за допомогою рівнянь, що враховують зміни струму та напруги при зміні навантаження. Для лінійних навантажень, наприклад, зміни струму ΔI_n у відповідь на зміни опору можна виразити через:

$$\Delta I_n = \frac{\Delta U_{вих}}{R_n}, \quad (3.4)$$

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $\Delta U_{\text{вих}}$ – зміна вихідної напруги. Для нелінійних навантажень, таких як індуктивні або ємнісні навантаження, можуть бути використані рівняння для визначення часу реакції перетворювача на зміну навантаження.

Зміна напруги при зміні навантаження також залежить від індуктивності L та ємності C в контурі перетворення, що описується рівнянням RLC-кола:

$$U_{\text{вих}}(t) = U_0 \cdot \cos(\omega t + \phi), \quad (3.5)$$

де ω – циклічна частота коливань, а ϕ – фаза коливань, яка змінюється в залежності від параметрів навантаження.

3. Розрахунок ККД та основних втрат енергії

Коефіцієнт корисної дії (ККД) є одним з основних показників ефективності перетворювача, що визначає, яка частина енергії, що постачається на вхід, перетворюється на корисну вихідну енергію. Основні втрати енергії можуть виникати в результаті опору проводів, втрат на комутаційних елементах (транзисторах, діодах), а також на елементах, пов'язаних із магнітними втратами в трансформаторі. Для розрахунку ККД слід визначити співвідношення між вихідною потужністю і вхідною потужністю, враховуючи втрати на різних етапах перетворення. Аналіз втрат включає оцінку не тільки активних втрат (пов'язаних з опором та тепловими втратами), але й реактивних втрат, таких як індуктивні та ємнісні втрати в ланцюгах. Визначення ККД дозволяє виявити найбільш енергозатратні етапи роботи перетворювача і на основі цих даних прийняти рішення про необхідні вдосконалення конструкції для підвищення ефективності.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) перетворювача можна розрахувати за такою формулою:

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

де $P_{вих}$ – вихідна потужність перетворювача, а $P_{вх}$ – вхідна потужність.
Вихідна потужність розраховується через:

$$P_{вих} = U_{вих} \cdot I_{вих}, \quad (3.7)$$

а вхідна потужність — через:

$$P_{вх} = U_{вх} \cdot I_{вх}, \quad (3.7)$$

Використання подвоювача напруги в перетворювачах енергії має суттєвий вплив на їх характеристики, зокрема на розмір і об'єм трансформатора, ефективність роботи випрямляча та стабільність вихідної напруги. Подвоювач напруги дозволяє зменшити розміри трансформатора, забезпечуючи при цьому високий рівень ефективності без значних втрат на серії витків. Завдяки зміні принципу роботи випрямляча, подвоювач підвищує коефіцієнт корисної дії системи, оптимізуючи процес перетворення змінного струму в постійний. Крім того, подвоювач сприяє поліпшенню стабільності вихідної напруги, зменшуючи пульсації і сплески напруги, що особливо важливо для живлення чутливої апаратури. У результаті, інтеграція подвоювача напруги в перетворювачі забезпечує покращену ефективність, надійність та компактність систем, що робить їх привабливими для широкого спектра застосувань, включаючи енергозберігаючі та портативні пристрої.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.6 Висновок до третього розділу

У третьому розділі було проведено детальний аналіз сталого стану запропонованого перетворювача з подвоювачем напруги. Описано формування режимів роботи перетворювача та детально проаналізовано кожен з них, зокрема процеси передачі потужності, резонансне зарядження і розрядження ємностей, а також перехідні процеси. Важливим елементом дослідження стало розгляд досягнення комутації при нульовій напрузі, що сприяє підвищенню ефективності перетворювача.

Завдяки використанню подвоювача напруги досягнуто значного зменшення розміру та об'єму розділового трансформатора, що позитивно позначається на компактності та легкості конструкції. Крім того, зміна схеми випрямляча за допомогою подвоювача напруги дозволяє підвищити ефективність перетворювача, зменшуючи втрати енергії та покращуючи його загальну продуктивність. Ще одним важливим результатом є покращення стабільності вихідної напруги, що є критично важливим для застосувань у чутливих електронних системах.

Таким чином, аналіз запропонованого перетворювача підтвердив його високу ефективність, надійність та компактність, що робить його оптимальним рішенням для різноманітних технічних застосувань. Впровадження подвоювача напруги дозволяє досягти значних переваг в порівнянні з традиційними схемами перетворювачів, що підвищує їх конкурентоспроможність на ринку енергозберігаючих та портативних технологій.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ІНВЕРТНОГО DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА

У цьому розділі подано результати досліджень та моделювання інверторного DC-DC перетворювача, який був спроектований для покращення ефективності та стабільності вихідної напруги в порівнянні з традиційними схемами. Основною метою дослідження є оцінка роботи запропонованого перетворювача, який використовує інверторну структуру для перетворення постійного струму в змінний, а також подвоювач напруги на вторинній стороні для досягнення вищих рівнів вихідної напруги при зменшеному розмірі трансформатора.

Моделювання інверторного DC-DC перетворювача було виконано за допомогою програмного забезпечення PSpice, що дозволило здійснити детальний аналіз характеристик перетворювача в різних режимах роботи. В результаті моделювання були отримані дані про вихідні параметри, які порівнюються з результатами традиційних схем. Особлива увага приділяється оптимізації розміру трансформатора та покращенню коефіцієнта корисної дії (ККД), а також стабільності вихідної напруги при різних навантаженнях.

4.1 Моделювання схеми з перетворювачем фазового зсуву в PSpice

Звичайна схема перетворювача з фазовим зсувом, що містить феритовий трансформатор з первинною обмоткою та повнохвильовий випрямляч на вторинній стороні, була змодельована за допомогою програмного забезпечення PSpice (рисунок 4.1). Такі перетворювачі широко використовуються для перетворення постійного струму в змінний або для зменшення чи підвищення напруги в різноманітних електронних пристроях. Вони особливо ефективні в тих випадках, коли важлива стабільність напруги і точність регулювання вихідних

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

параметрів.

Для моделювання використовувалася схема, що включає перетворювач фазового зсуву, який створює певний кут зсуву фаз між вхідним і вихідним сигналами трансформатора. Це дозволяє досягти необхідного рівня вихідної напруги та забезпечує стабільне функціонування в умовах варіативного навантаження. На первинній стороні трансформатора використано феритове сердечник, що має високу магнітну проникність, що дозволяє знизити втрати на магнітне насичення та зменшити розміри трансформатора при збереженні високої ефективності. Для випрямлення змінного струму на вторинній стороні трансформатора використано повнохвильовий випрямляч з центральним відведенням, який забезпечує стабільну та рівномірну форму вихідного сигналу.

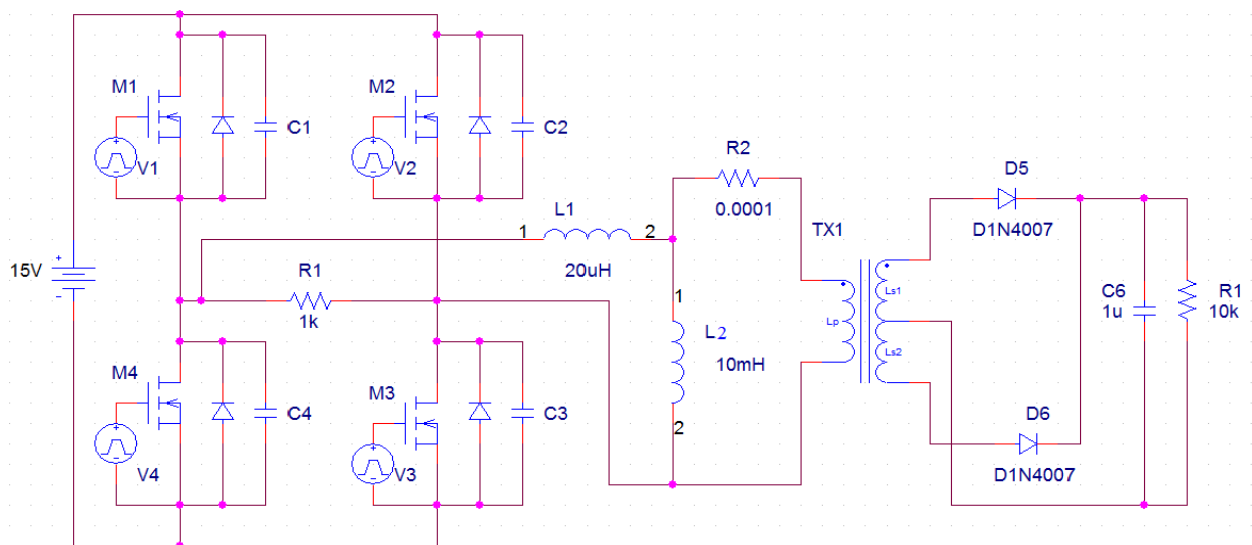


Рисунок 4.1 – Моделювання перетворювача фазового зсуву

Програмне забезпечення PSpice було обрано для моделювання даної схеми через його здатність точно відобразити динамічні процеси в електричних ланцюгах, враховуючи нелінійні ефекти, перехідні процеси та зміни навантаження. Для моделювання було налаштовано параметри схеми, зокрема

вхідна напруга 15 В, яка подавалася на перетворювач фазового зсуву. Параметри трансформатора, зокрема первинні витки (300 витків) та вторинні витки (150-150 витків), були розраховані з урахуванням необхідного коефіцієнта трансформації.

Після запуску моделювання були отримані результати, зокрема форма вихідного сигналу, що показана на рис. 4.2. Вихідний сигнал двополуперіодного випрямляча, що має центральне відведення, продемонстрував стабільність і чіткість, навіть при варіаціях навантаження, що є важливим показником для ефективності і надійності перетворювача в реальних умовах експлуатації.

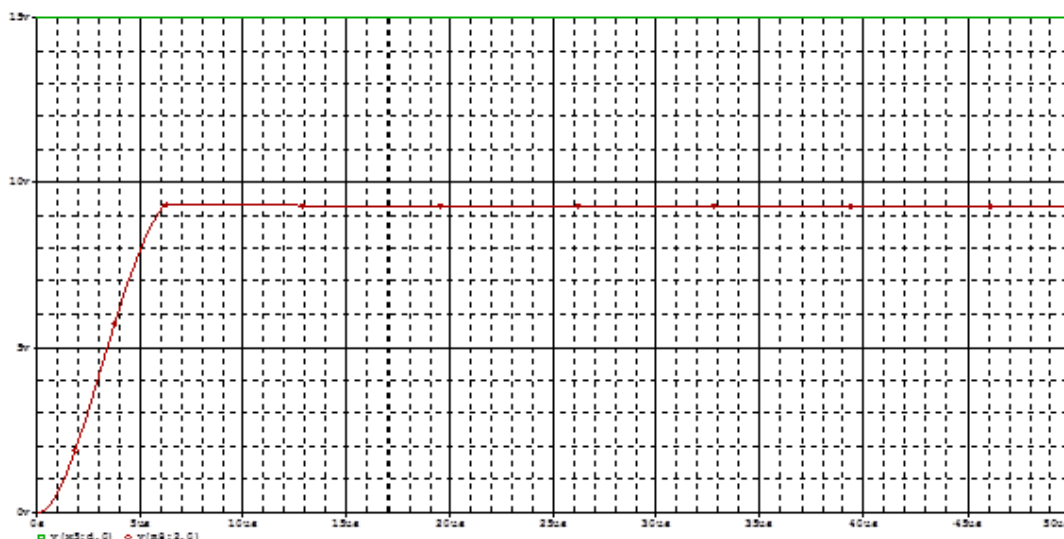


Рисунок 4.2 – Форма вихідного сигналу перетворювача фазового зсуву

Вихідні параметри були виміряні в рамках моделювання і представлені в таблиці 4.1. У таблиці наведено основні електричні характеристики системи, зокрема вхідну напругу, кількість витків на первинній та вторинній обмотках трансформатора, а також виміряну вихідну напругу. Ці дані дозволяють оцінити ефективність роботи перетворювача і виявити потенційні слабкі місця у схемі.

Таблиця 4.1 – Вихідні параметри моделювання перетворювача фазового зсуву

Параметр	Значення
Вхідна напруга	15 В
Первинні витки трансформатора	300 витків
Вторинні витки трансформатора	150-150 витків
Вихідна напруга	9.2 В

Ці дані надають чітке уявлення про стабільність і ефективність роботи трансформатора і перетворювача в цілому, що є основою для подальших модифікацій і оптимізацій схеми з метою покращення її продуктивності.

В традиційних схемах трансформаторів для досягнення бажаного рівня вихідної напруги від вхідної, необхідно забезпечити правильне співвідношення кількості витків на первинній і вторинній обмотках трансформатора. Це співвідношення визначає коефіцієнт трансформації, що прямо пропорційно залежить від вихідної та вхідної напруги, згідно з класичним рівнянням для трансформаторів:

$$\frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (4.1)$$

де:

$U_{вих}$ – вихідна напруга,

$U_{вх}$ – вхідна напруга,

n_2 – кількість витків на вторинній обмотці,

n_1 – кількість витків на первинній обмотці.

У випадку перетворювача, де вхідна напруга становить 15 В, для досягнення вихідної напруги 9,2 В потрібно застосувати певне співвідношення витків трансформатора. Якщо припустити, що ми використовуємо традиційний підхід без застосування додаткових елементів, таких як подвоювачі напруги, то

кількість витків повинна бути вибрана таким чином, щоб відповідати зниженому рівню вихідної напруги.

Розрахунок для традиційного трансформатора з коефіцієнтом трансформації можна провести за допомогою наведеної формули:

$$\frac{9,2 \text{ В}}{15 \text{ В}} = \frac{n_2}{300} \quad (4.2)$$

Звідси можемо знайти, що кількість витків на вторинній обмотці має бути:

$$n_2 = \frac{9,2 \text{ В} \cdot 300}{15 \text{ В}} = 184 \text{ витків} \quad (4.2)$$

Отже, для досягнення вихідної напруги 9,2 В з вхідної напруги 15 В за допомогою традиційного методу трансформації напруги, необхідно використовувати трансформатор з 300 витками на первинній обмотці та 184 витками на вторинній обмотці.

Проте в реальних схемах для досягнення потрібної напруги використовують певні технічні рішення, зокрема збільшення кількості витків на вторинній обмотці або використання додаткових компонентів для компенсації втрат і забезпечення стабільності напруги. Збільшення кількості витків, як правило, веде до збільшення габаритів трансформатора та підвищення його маси, що може значно вплинути на загальний розмір і вагу перетворювача.

Використання звичайного методу трансформації напруги з таким високим співвідношенням витків призводить до великих фізичних розмірів трансформатора, що збільшує не тільки його масу, але й можливі електричні втрати через підвищену кількість витків, що створюють додатковий опір і

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

індуктивність.

У результаті, для оптимізації роботи перетворювача можна скористатися більш ефективними методами, такими як застосування подвоювача напруги, що дозволяє знизити кількість витків трансформатора та зменшити його розміри, при цьому досягаючи того ж рівня вихідної напруги, але з меншими втратами і більшим коефіцієнтом корисної дії (ККД).

4.2 Результати моделювання запропонованого DC-DC перетворювача

Для покращення ефективності роботи перетворювача фазового зсуву у запропонованій схемі було застосовано подвоювач напруги замість традиційного повнохвильового випрямляча на вторинній стороні трансформатора. Це дозволило суттєво змінити характеристики роботи системи, підвищивши коефіцієнт корисної дії (ККД) та збільшивши щільність потужності.

На відміну від класичної схеми, де після вторинної обмотки застосовувався повнохвильовий випрямляч з центральним відведенням, у запропонованому варіанті використано випрямляч з подвоювачем напруги (рис. 4.3). Це дозволяє зменшити кількість витків на вторинній обмотці, що позитивно впливає на загальну ефективність та зменшує габаритні розміри трансформатора.

Крім зменшення кількості витків на вторинній обмотці, застосування подвоювача напруги дозволяє знизити пульсації струму у вторинному контурі. Завдяки послідовному з'єднанню конденсаторів та діодів, енергія накопичується і передається більш рівномірно, що зменшує електромагнітні завади та теплові втрати в елементах схеми. Така стабілізація дозволяє покращити роботу перетворювача при високочастотному перемиканні, забезпечуючи не лише вищу ефективність, але й менший вплив на сусідні електронні компоненти та зменшення вимог до електромагнітної сумісності (ЕМС).

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окрім цього, топологія з подвоювачем напруги спрощує ізоляцію між первинною та вторинною сторонами трансформатора. Відсутність центрального відводу дозволяє легше реалізувати гальванічну розв'язку та зменшити потенційні витоки або паразитні струми, що можуть виникати в складних схемах з кількома відводами. Такий підхід підвищує надійність роботи системи та забезпечує більшу безпеку в експлуатації, особливо у випадках роботи з високою напругою або у критичних застосуваннях, де неполадки можуть призвести до виходу обладнання з ладу.

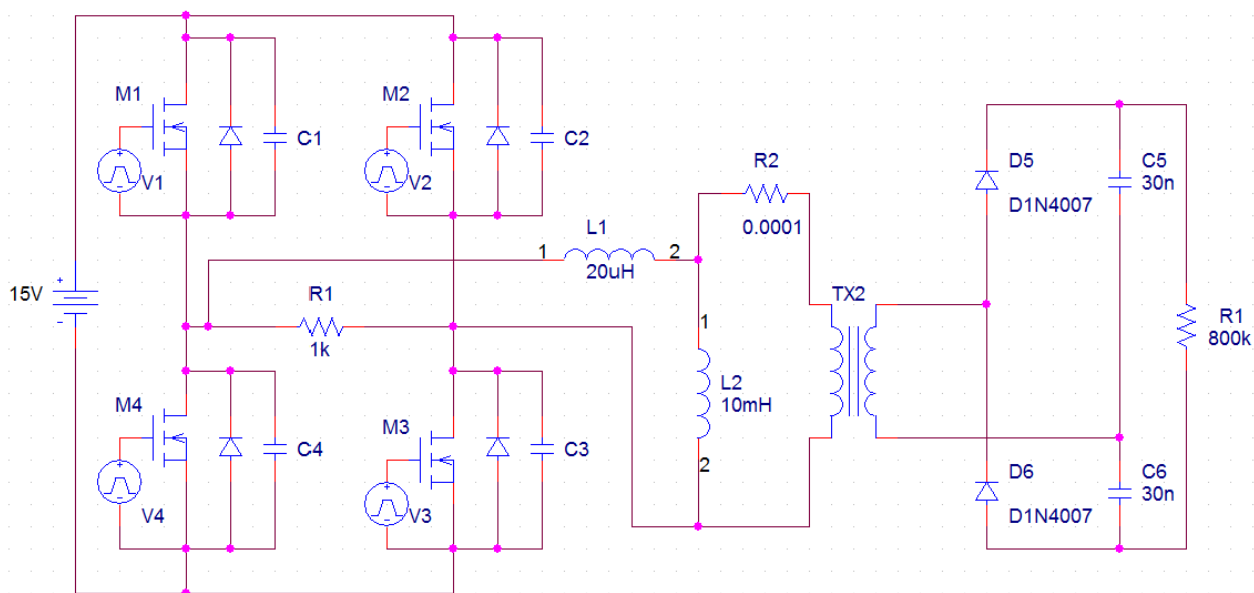


Рисунок 4.3 – Імітаційна схема запропонованого перетворювача

Конструктивно вторинна обмотка підключена безпосередньо до випрямляча подвоювача напруги. У цій схемі подвоєння напруги відбувається завдяки заряджанню конденсаторів під час різних напівперіодів роботи перетворювача, що дозволяє збільшити вихідну напругу майже вдвічі відносно вхідної напруги трансформатора.

Результати вимірювань підтвердили ефективність такого рішення:

- вхідна напруга становила 12 В;
- первинна обмотка трансформатора містила 25 витків;
- вторинна обмотка мала 25 витків, що еквівалентно співвідношенню 1:1;
- вихідна напруга після випрямлення та фільтрації складала 24 В.

Дані вимірювань та основні параметри перетворювача наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Основні параметри запропонованого перетворювач

Параметр	Значення
Вхідна напруга	12 В
Первинні витки трансформатора	25 витків
Вторинні витки трансформатора	25 витків
Вихідна напруга	24 В

На основі проведеного моделювання було отримано форму вихідного сигналу запропонованого DC-DC перетворювача. Як видно з графіків, вихідна напруга після випрямлення має стабільний рівень та відповідає очікуваним розрахункам. Подвоювач напруги забезпечує ефективне перетворення 12 В у 24 В із мінімальними пульсаціями, що підтверджує покращені параметри роботи запропонованої схеми. На рисунку 4.4 наведено результати моделювання вихідної напруги перетворювача.

Окрім стабільності вихідної напруги, результати моделювання демонструють також високу динамічну стійкість перетворювача до зміни навантаження. При раптовому збільшенні або зменшенні навантаження, вихідна напруга залишається в межах допустимих відхилень, що свідчить про ефективну компенсацію змін енергоспоживання. Така характеристика є особливо важливою для систем з нестабільним споживанням енергії, наприклад, у безпілотних літальних апаратах або портативних комунікаційних пристроях, де навантаження постійно змінюється залежно від режиму роботи.

Крім того, моделювання підтвердило зниження втрат на перемикання завдяки реалізації комутації при нульовій напрузі. У запропонованій схемі ключові транзистори перемикаються в моменти, коли напруга на них близька до нуля, що мінімізує втрати енергії та зменшує теплове навантаження на компоненти. Це дозволяє не лише підвищити загальний ККД перетворювача, а й зменшити вимоги до систем охолодження, що важливо в умовах обмеженого простору та ваги.

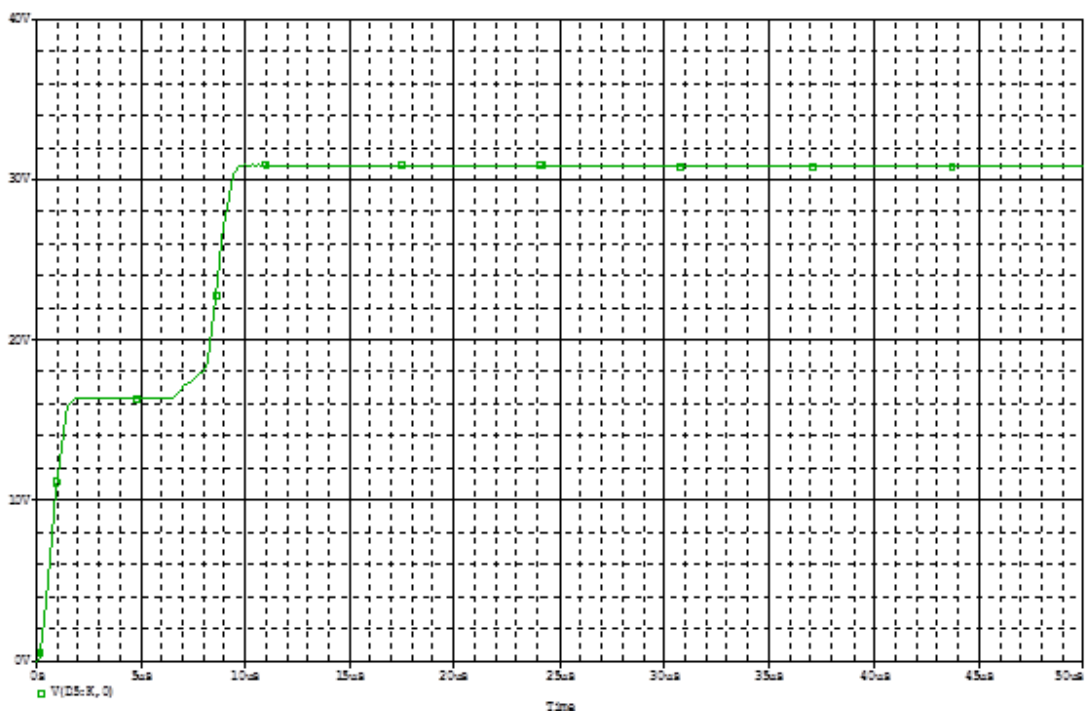


Рисунок 4.4 – Вихідні сигнали запропонованого DC-DC перетворювача

На основі аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що використання подвоювача напруги дозволяє значно знизити рівень втрат та покращити ефективність перетворення. Завдяки оптимізованій схемотехніці перетворювач демонструє високу стабільність вихідної напруги навіть при зміні навантаження, що підтверджує його надійність у практичному використанні.

Додатково було проведено аналіз спектра пульсацій вихідної напруги, який показав низький рівень гармонійних складових. Це свідчить про

мінімальний вплив перетворювача на живлення підключених пристроїв та можливість його застосування в чутливих електронних системах. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого підходу та доцільність його використання в сучасних схемах живлення.

На основі проведеного моделювання були досліджені основні характеристики запропонованого перетворювача, підтверджені його переваги в порівнянні з традиційними схемами. Робочий цикл на первинній стороні залишається незмінним, що спрощує керування перетворювачем. Завдяки вдосконаленій конструкції трансформатора його розміри та складність значно зменшуються.

У звичайному перетворювачі для отримання вихідної напруги 9,2 В з 15 В використовується трансформатор з відношенням витків 300:150 на вторинній обмотці. Натомість запропонований перетворювач має лише 25 витків як на первинній, так і на вторинній стороні, а необхідна вихідна напруга 24 В формується за допомогою подвоювача напруги при вхідному значенні 12 В.

Моделювання показало, що запропоноване рішення дозволяє суттєво зменшити втрати в магнітопроводі, що, у свою чергу, підвищує загальний ККД перетворювача. Компактність схеми покращується, а ефективність зростає. Це підтверджує, що застосування м'якого перемикачання та високого коефіцієнта посилення напруги сприяє підвищенню щільності потужності, що є особливо важливим для застосувань у сфері відновлюваної енергетики.

Додатково, варто відзначити, що запропонований перетворювач демонструє хорошу поведінку в умовах змінних навантажень, що є важливим аспектом для забезпечення стабільної роботи в реальних умовах експлуатації. Моделювання також показало, що за допомогою подвоювача напруги можна не тільки досягти бажаної вихідної напруги, але й значно зменшити вимоги до трансформатора в порівнянні з традиційними схемами. Це дозволяє зменшити

					КПТР.210150.01.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

загальні розміри системи, що є важливим при проектуванні компактних і енергоефективних джерел живлення для різних пристроїв.

Ще однією суттєвою перевагою запропонованого підходу є зменшення рівня радіоінтерференції завдяки використанню подвоювача напруги. Оскільки в перетворювачах з традиційною схемою випрямлення часто спостерігаються пульсації на виході, це може викликати електромагнітні перешкоди, які впливають на інші пристрої. У випадку запропонованого перетворювача завдяки мінімальним пульсаціям вихідної напруги, радіоінтерференція значно знижена, що дозволяє використовувати цей перетворювач у чутливих електронних пристроях, де чистота джерела живлення має критичне значення.

Результати дослідження показують, що запропоноване рішення є не тільки енергоефективним, але й більш екологічним, оскільки зменшує необхідність у великих магнітних компонентах, що зменшує використання рідкісних матеріалів і полегшує переробку виробів. Це робить запропоновану конструкцію більш стійкою до змін екологічних стандартів та підвищує її конкурентоспроможність на ринку високоефективних джерел живлення.

Крім зменшення електромагнітних перешкод, ще одним важливим аспектом є зниження акустичних шумів, які виникають у результаті високочастотної роботи перетворювача. У традиційних схемах коливання струму через магнітні елементи можуть спричиняти вібрації та шум, що особливо небажано в побутових або медичних пристроях. Завдяки плавнішому профілю струму та стабільній вихідній напрузі в запропонованій схемі, рівень акустичних шумів значно нижчий, що підвищує комфорт експлуатації та відкриває нові можливості для використання в середовищах, де тиша є важливою умовою.

Запропонована конструкція також демонструє хорошу масштабованість. Завдяки модульному принципу побудови, таку схему можна адаптувати для

					КПТР.210150.01.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

різних рівнів вхідної та вихідної напруги без суттєвих змін у загальній архітектурі. Це дає змогу застосовувати даний підхід як у малопотужних портативних пристроях, так і в більш потужних промислових або телекомунікаційних системах, забезпечуючи високу ефективність та стабільність в широкому діапазоні умов експлуатації.

4.3 Висновок до четвертого розділу

У цьому розділі було проведено моделювання та аналіз роботи запропонованого інверторного DC-DC перетворювача. На основі отриманих результатів встановлено, що використання подвоювача напруги дозволяє ефективно перетворювати вхідні 12 В у стабільні 24 В з мінімальними пульсаціями.

Моделювання підтвердило високу ефективність перетворювача, що досягається завдяки оптимізованій конструкції трансформатора та м'якому перемиканню. Зменшення кількості витків на первинній і вторинній обмотках дозволяє знизити втрати в магнітопроводі, що сприяє підвищенню ККД.

Аналіз вихідних сигналів продемонстрував стабільність вихідної напруги та відповідність розрахунковим значенням. Запропонована схема забезпечує високу щільність потужності та є перспективною для застосування у відновлюваній енергетиці та інших галузях, де важливими є компактність та енергоефективність.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У даному кваліфікаційному проєкті була розроблена та детально проаналізована нова модифікація фазозсувного повномостового перетворювача з подвоювачем напруги. Запропонована топологія вирішує проблему підвищення ефективності традиційних DC-DC перетворювачів, що обмежуються необхідністю збільшення коефіцієнта трансформації для досягнення високого посилення напруги. Замість цього, у модифікованій схемі, завдяки додаванню подвоювача напруги, вдалося досягти високої вихідної напруги без підвищення коефіцієнта трансформації, що призвело до зменшення розміру трансформатора і зниження індуктивності витоку, що значно покращило ефективність перетворювача.

Процес моделювання в середовищі PSpice підтвердив, що запропонована схема працює стабільно та ефективно при мінімальних пульсаціях вихідної напруги. Застосування подвоювача напруги дозволяє зменшити кількість витків на трансформаторі, що сприяє зниженню втрат у магнітопроводі та покращує загальну продуктивність перетворювача. Це має важливе значення для застосування таких перетворювачів у портативних і компактних пристроях, де важливо забезпечити високу щільність потужності без значних розмірів і ваги.

Аналіз роботи перетворювача показав, що запровадження зовнішньої індуктивності, яка виконувала роль резонансного індуктора, дозволяє досягти режиму перемикання при нульовій нарузі. Це дозволяє не тільки зменшити енергетичні втрати, а й значно підвищити надійність роботи системи, оскільки в такому режимі виключаються пікові напруги, які можуть спричинити пошкодження компонентів і негативно впливати на термін служби перетворювача.

У роботі також було проаналізовано ключові компоненти схеми, включаючи трансформатор, випрямляч на вторинній стороні та фільтр для згладжування пульсацій, що забезпечують стабільну роботу системи в широкому діапазоні навантажень. Використання таких компонентів сприяє значному

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшенню електромагнітних завад, що є важливим аспектом для забезпечення надійної роботи в чутливих електронних системах.

Підсумовуючи, запропонована топологія перетворювача забезпечує оптимальний баланс між компактністю, ефективністю та надійністю. Використання DC-DC перетворювачів у поєднанні з подвоювачем напруги дозволяє зменшити розміри трансформатора та підвищити ефективність роботи системи, зменшуючи при цьому втрати енергії та електромагнітні завади. Це робить запропоновану схему перспективною для застосування в системах відновлюваної енергетики, де важливі високий коефіцієнт трансформації, мала вага та розмір, а також висока ефективність перетворення енергії.

Результати моделювання та аналізу підтверджують, що дана топологія є оптимальним рішенням для різноманітних технічних застосувань, таких як телекомунікаційне обладнання, системи зарядки акумуляторів, а також для впровадження в автономні та мережеві системи відновлювальної енергетики, де зменшення втрат енергії та висока надійність є критично важливими параметрами. Подальші дослідження та вдосконалення цієї схеми можуть призвести до ще більшої ефективності та оптимізації енергетичних систем, забезпечуючи підтримку стійкого розвитку в таких галузях, як відновлювана енергетика, електроніка та промислові застосування.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Мірошниченко, І. П. Основи теорії електричних перетворювачів. – Київ: Наукова думка, 2010. – 320 с.
2. Павлов, Ю. А. Технічні засоби в електроніці та енергетиці. – Харків: ХНУ, 2012. – 350 с.
3. Гречко, В. А. Системи відновлювальної енергетики: теорія і практика. – Львів: ЛНУ, 2015. – 410 с.
4. Саляхов, І. Ф. Периферійні перетворювачі напруги в системах відновлювальної енергетики. – Донецьк: ДУЕТ, 2013. – 290 с.
5. Коваленко, В. В. Енергозбереження та енергоефективність у сучасних енергетичних системах. – Київ: Вища школа, 2014. – 350 с.
6. Бондар, О. М. Відновлювальна енергетика: принципи та технології. – Чернівці: ЧерНУ, 2016. – 280 с.
7. Герасименко, В. О. DC-DC перетворювачі в системах енергозбереження. – Київ: КНУ, 2017. – 220 с.
8. Хоменко, С. В. Перетворювачі електричної енергії. – Київ: Вища школа, 2011. – 300 с.
9. Матвієнко, М. М. Моделювання електронних схем в PSpice. – Одеса: ОНУ, 2013. – 250 с.
10. Світлана, В. О. Сучасні методи дослідження та моделювання електричних перетворювачів. – Львів: ЛНУ, 2015. – 270 с.
11. Абрамович, В. М. DC-DC перетворювачі для електричних мереж. – Київ: Наукова думка, 2016. – 220 с.
12. Мельник, А. А. Фазозсувні перетворювачі та їх застосування. – Харків: ХНУ, 2018. – 330 с.
13. Літвінов, А. Б. Системи та технології відновлювальної енергетики. – Київ: Вища школа, 2019. – 380 с.

					КПТР.210150.01.05	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

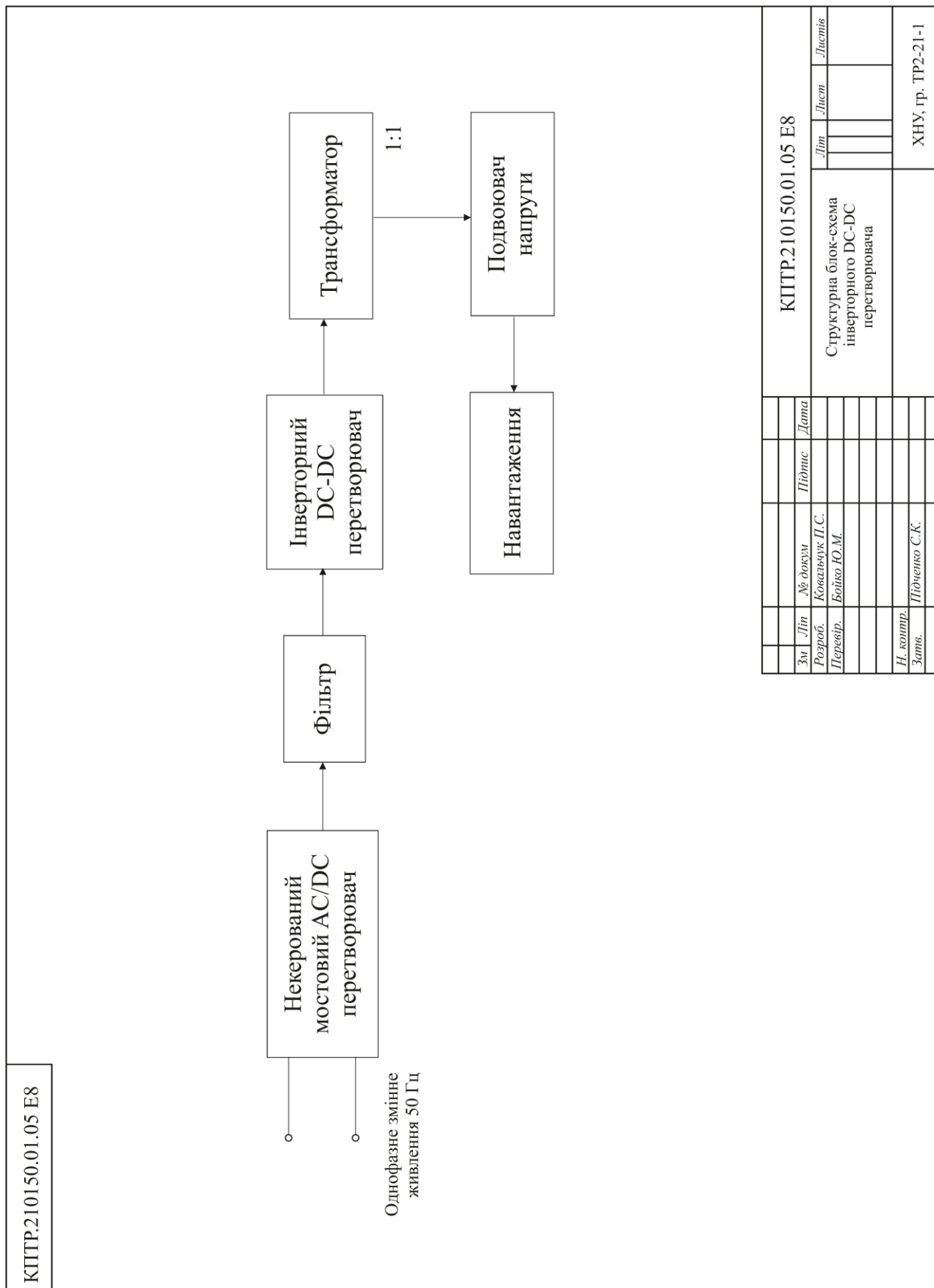
14. Бєлова, С. Г. Технології електричних перетворювачів у відновлювальній енергетиці. – Київ: НТУУ КПІ, 2020. – 290 с.
15. Березан, І. І. Технічні основи електричних перетворювачів. – Чернівці: ЧНУ, 2021. – 310 с.
16. Бартенко, В. В. Моделювання електронних схем та енергетичних систем. – Одеса: ОНУ, 2017. – 240 с.
17. Тарасова, Н. М. Аналіз енергетичних схем з використанням фазових зсувів. – Харків: ХНУ, 2022. – 280 с.
18. Шаповал, М. П. Теорія і практика застосування фазозсувних перетворювачів. – Львів: ЛНУ, 2014. – 310 с.
19. Чеботарьов, І. М. Моделювання та проектування перетворювачів електричної енергії. – Київ: КНУ, 2016. – 290 с.
20. Коваленко, Т. М. Перетворювачі для відновлювальних джерел енергії. – Київ: Вища школа, 2021. – 350 с.
21. Singh, B. Energy Conversion Systems. – New York: Wiley, 2015.
22. Nabaee, A. “A study on DC-DC converters for renewable energy systems.” IEEE Transactions on Power Electronics, 2017.
23. Mathur, A. “DC-DC converters in renewable energy systems: A review.” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018.
24. Nouri, M. “Power converters for renewable energy applications.” Elsevier, 2019.
25. Kumar, S. “Modelling and simulation of power electronics circuits in renewable systems.” IEEE, 2018.
26. Sood, V. K. “Phase-shift full bridge converters for renewable energy applications.” IEEE Transactions on Power Electronics, 2016.
27. Sweeney, S. “Modelling of power electronics converters in renewable systems.” IEEE Power and Energy Journal, 2020.
28. Gupta, S. “High efficiency DC-DC converters for power applications.” Journal of Power Electronics, 2017.

29. Bacha, S. “Applications of power converters in renewable energy.” Springer, 2015.
30. Lopez, J. “A comparative study of power converters for renewable energy sources.” IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021.
31. Yang, F. “Modeling and analysis of phase-shift full bridge converters.” IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019.
32. Robinson, T. “Analysis and design of DC-DC converters in energy systems.” Wiley-IEEE Press, 2018.
33. Kannan, K. “Renewable energy systems and power converters.” Elsevier, 2020.
34. Zhang, X. “High efficiency converters for photovoltaic systems.” IEEE Journal of Photovoltaics, 2020.
35. Silva, E. “DC-DC converter design for energy harvesting systems.” Springer, 2018.
36. Zhang, Y. “Energy conversion in renewable systems using power electronics.” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019.
37. Duran, C. “Phase-shifted full bridge converter: Applications in renewable energy systems.” IEEE Power Electronics Letters, 2017.
38. Kumar, V. “Applications of power electronic converters in energy systems.” Journal of Renewable Energy Technology, 2020.
39. Chen, C. “DC-DC power converters: Design and application in renewable energy.” Springer, 2019.
40. Li, H. “Analysis and optimization of power electronic converters.” IEEE Transactions on Power Electronics, 2021.

ДОДАТКИ

Додаток А

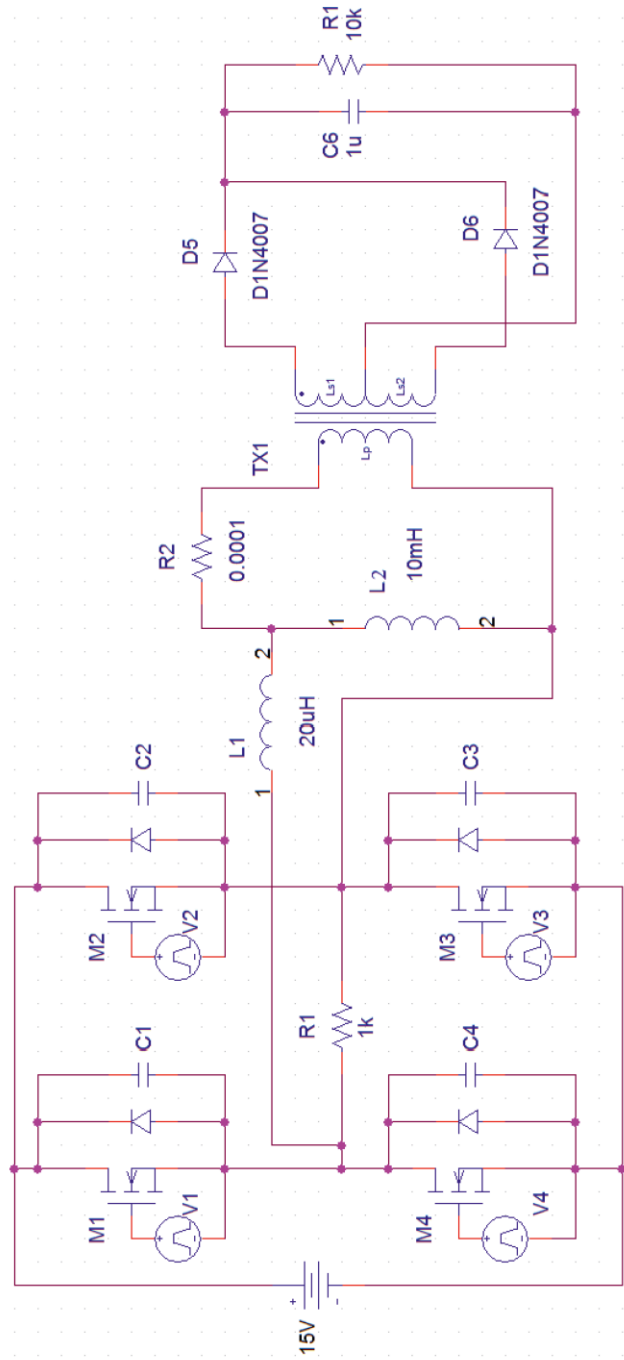
Структурна блок-схема інверторного DC-DC перетворювача



Додаток В

Імітаційна модель класичного фазозсувного перетворювача

КІПТР.210150.01.05 E8

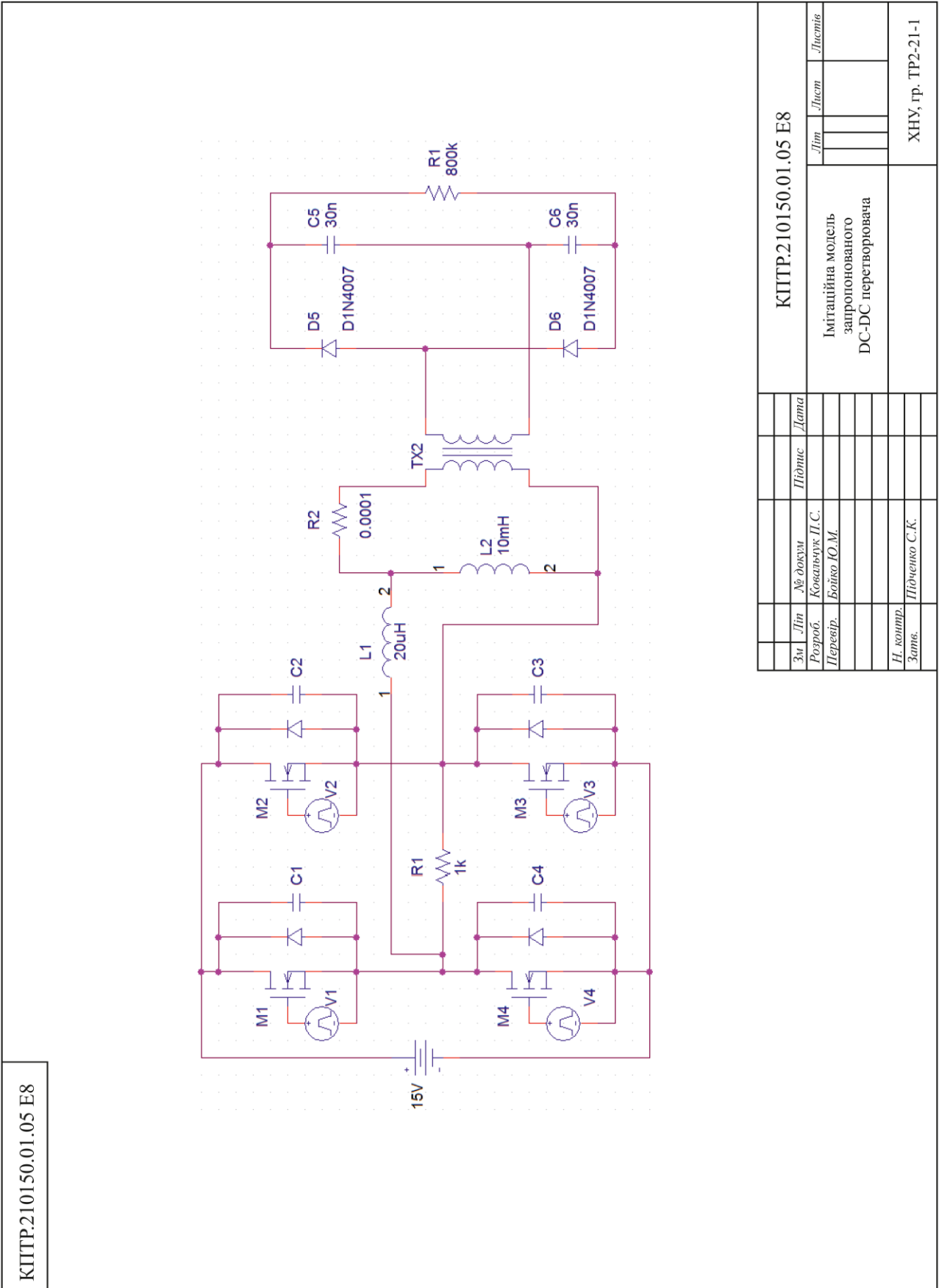


КІПТР.210150.01.05 E8			
Зм.	Лін.	Підпис	Дата
Розроб.	№ докум.		
Перевір.	Ковальчук П.С.		
	Бойко Ю.М.		
Н. контр.			
Затв.	Підменко С.К.		
		ХНУ, гр. ТР2-21-1	

Імітаційна модель класичного фазозсувного перетворювача

Додаток Г

Імітаційна модель запропонованого DC-DC перетворювача



КПТР.210150.01.05 E8		Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
Імітаційна модель запропонованого DC-DC перетворювача		Розроб.	Лист	Ковальчук І.С.		
		Перевір.	Лист	Бойко Ю.М.		
		Н. контр.	Лист			
		Затв.	Лист	Підченко С.К.		
		ХНУ, гр. ТР2-21-1				



ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

ІНВЕРТОРНИЙ DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Виконав:
здобувач 4 курсу,
група TP2-21-1
Павло КОВАЛЬЧУК

Науковий керівник:
д-р техн. наук, професор
Юлій БОЙКО

**Мета,
об'єкт і
предмет
дослідження**

МЕТА ПРОЕКТУ:
удосконалення DC-DC перетворювача із
подвоювачем напруги для ефективного використання
у відновлюваній енергетиці

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ:
інверторний DC-DC перетворювач для систем
відновлюваної енергетики

ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ:
принцип роботи, електричні характеристики та
структурні особливості фазозсувного
повномостового DC-DC перетворювача із
подвоювачем напруги

Вступ

Фазозсувний повномостовий DC-DC перетворювач – основа живлення для промислових систем постійного струму

⚠ Недолік жорсткого перемикання – високі втрати енергії

М'яке перемикання (нульової напруги / нульового струму) → підвищення ефективності

Проблеми традиційного DC-DC перетворювача:

- низьке підсилення напруги
- зниження щільності потужності
- обмежений діапазон **нульової напруги**

DC-DC перетворювач:

- простота реалізації
- комутація при нульовій напрузі
- підходить для середньо- та високотужних додатків

✓ Чому це важливо:

- ⚙ Відновлювана енергетика потребує **стабільної постійної напруги**
- Необхідні **ефективні, компактні** джерела живлення
- Традиційні схеми мають **високі втрати**
- Фазозсувний повномостовий перетворювач з **подвоювачем напруги** — перспективне рішення



Структурна схема фазозсувного повномостового DC-DC перетворювача з подвоювачем напруги

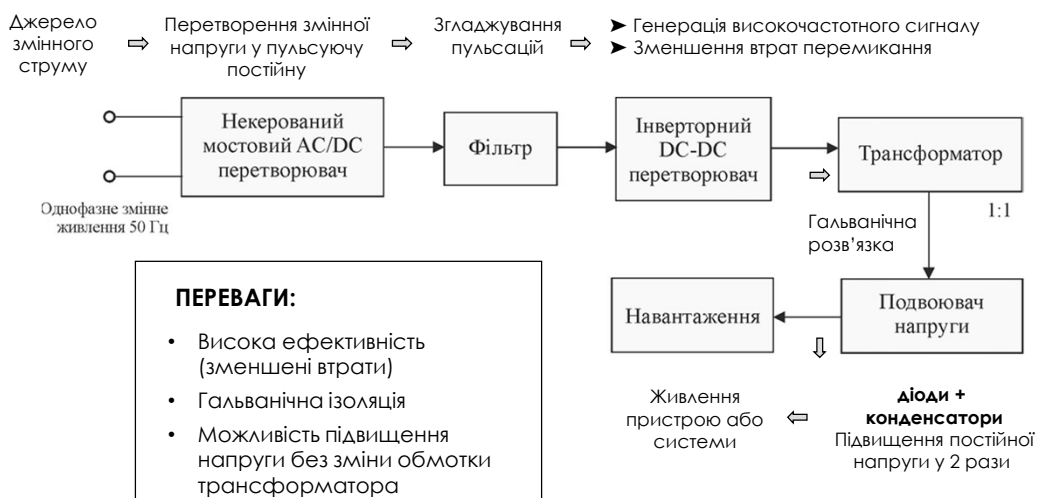


Рис. 1. Структурна схема фазозсувного повномостового перетворювача

Запропонована схема фазозсувного повномостового DC-DC перетворювача з подвоювачем напругою

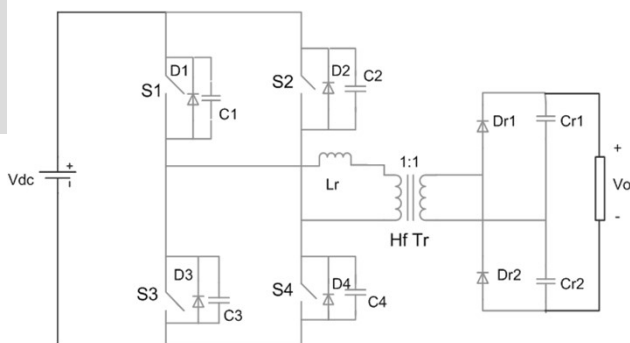


Рис. 1. Запропонована схема фазозсувного повномостового перетворювач з подвоювачем напруги

🔗 **Мета:** зменшити габарити трансформатора

🔗 **Модифікація:** замість класичного випрямляча — **подвоювач напруги**

🔗 **Для аналізу:**

- усі ключі вважаються ідеальними
- паразитні ємності та діоди однакові
- вихідна напруга – постійна

🔗 Період перемикання поділений на **6 режимів** ($t_0 - t_5$)

Основні режими роботи DC-DC-перетворювача (перший напівперіод)

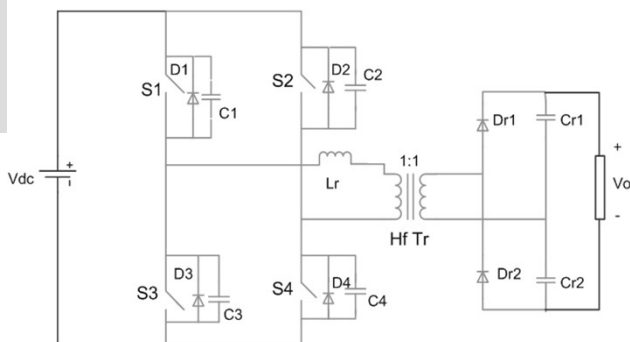


Рис. 1. Запропонована схема фазозсувного повномостового перетворювач з подвоювачем напруги

Режим	Інтервал часу	Ключові події
I	t_0-t_1	Потужність передається через S1 і S4 , діод Dr1 проводить, Cr1 заряджається.
II	t_1-t_2	S1 вимикається, C1 і C3 в резонансі з L .
III	t_2-t_3	C3 розряджено, діод D3 проводить, S3 вмикається з з нульовою напругою перемикання.
IV	t_3-t_4	S4 вимикається, C2 і C4 в резонансі з L .
V	t_4-t_5	C2 розряджено, діод D2 проводить, S2 вмикається з нульовою напругою перемикання — менше втрат, стабільна робота.
VI	t_5-t_6	Потужність передається через S2 і S3 , діод Dr2 проводить, Cr2 заряджається.

Аналіз роботи перетворювача в різних режимах перемикання

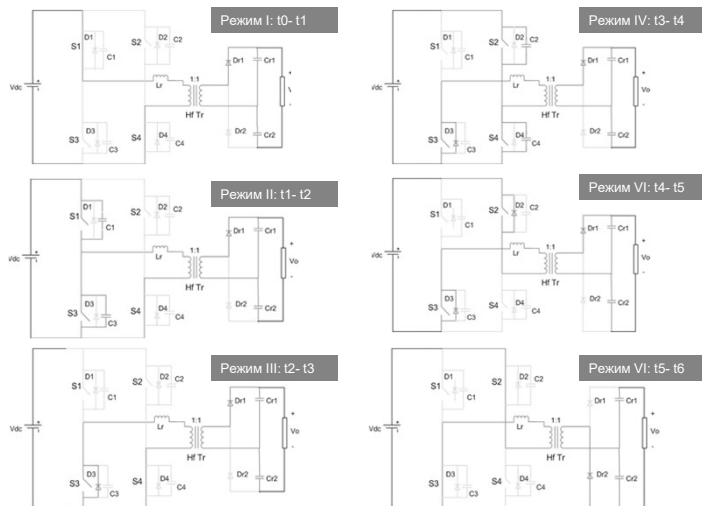


Рис. 2. Еквівалентна схема режимів роботи

Форми робочих хвиль запропонованого перетворювача

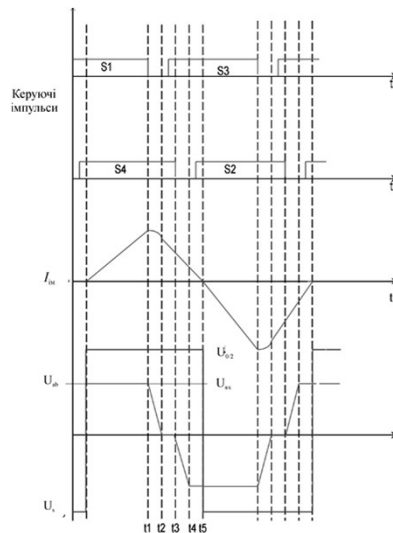


Рис. 3. Форми робочих хвиль запропонованого перетворювача

Схема моделювання класичного DC-DC перетворювача



МОДЕЛЬ:

- **Первинна сторона:** фазозсвний повномостовий інвертор
- **Трансформатор:** феритовий сердечник
- **Вторинна сторона:** повнохвильовий випрямляч з центральним відведенням

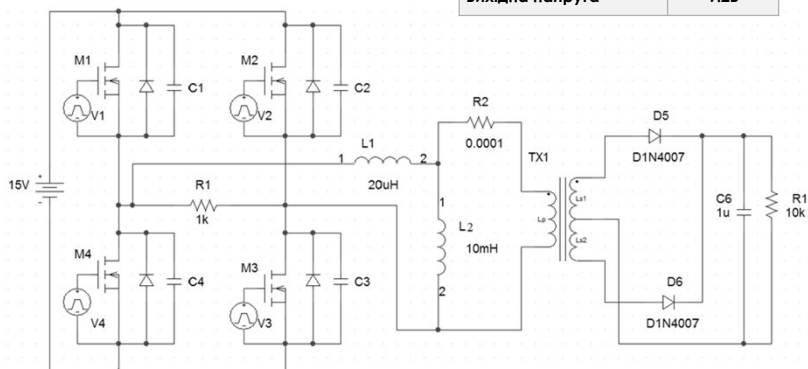


Рис. 4. Схема моделі інверторного DC-DC перетворювача

Таблиця 1 – Технічні параметри:

Параметр	Значення
Вхідна напруга	15В
Первинні витки трансформатора	300
Вторинні витки трансформатора	150-150
Вихідна напруга	9.2В

Результати моделювання звичайного DC-DC перетворювача

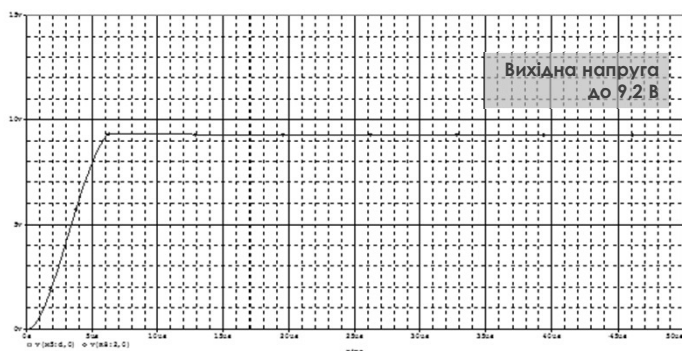


Рис. 5. Вихідна форма сигналу

Таблиця 1 – Технічні параметри:

Параметр	Значення
Вхідна напруга	15В
Первинні витки трансформатора	300
Вторинні витки трансформатора	150-150
Вихідна напруга	9.2В

ПРОБЛЕМА:

Для отримання 9,2 В потрібно **багато витків** трансформатора → **габаритність і складність**

Схема та параметри запропонованого DC-DC перетворювача

ОСОБЛИВІСТЬ СХЕМИ:

- Заміна **повнохвильового випрямляча на подвоювач напруги**
- Вторинна обмотка: напругу підключена до подвоювача

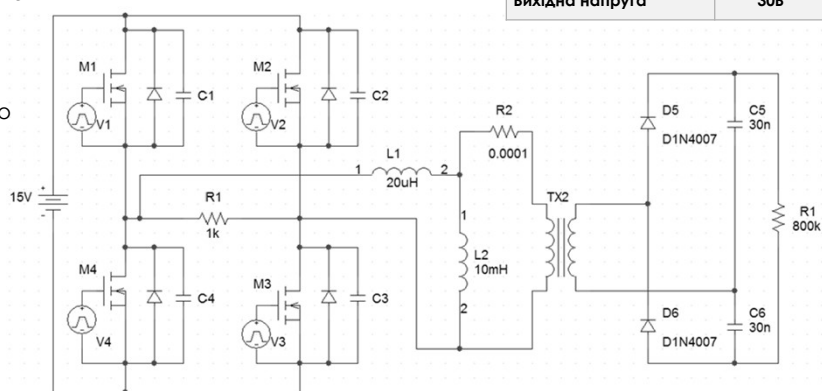


Рис. 6. Схема моделі запропонованого інверторного DC-DC перетворювача

Таблиця 2 – Технічні параметри:

Параметр	Значення
Вхідна напруга	15В
Первинні витки трансформатора	25
Вторинні витки трансформатора	25
Вихідна напруга	30В

Результати моделювання запропонованого DC-DC перетворювача

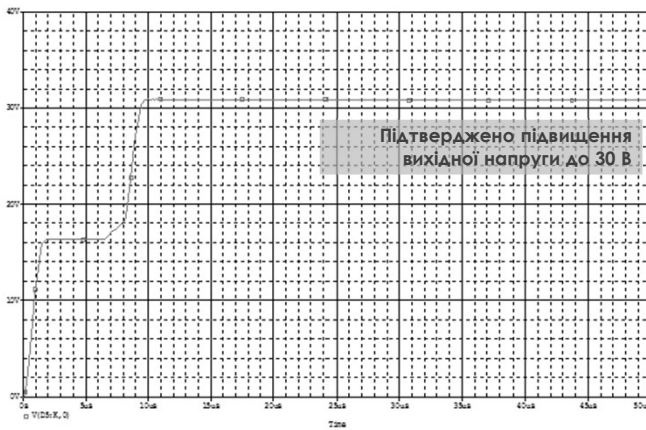


Рис. 7. Вихідна форма сигналу запропонованого перетворювача

ПЕРЕВАГИ:

- Співвідношення витків 1:1 → менше габаритів
- Вихідна напруга **вдвічі** більша за вхідну
- Підвищена щільність потужності
- Вищий ККД порівняно зі звичайною схемою

Представлення результатів кваліфікаційного проекту на міжнародній конференції

Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Факультет інформаційних технологій
Кафедра інформаційних систем та технологій



2-а Міжнародна науково-практична конференція

«ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ: РЕЗУЛЬТАТИ І ПЕРСПЕКТИВИ» (IST 2025)



5 березня 2025 р.

ІНВЕРТНИЙ DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Левко Ковальчук, Юрій Євдоким

Анотація. Розглянуто функціональну схему інвертного DC-DC перетворювача з відновлювальною дією, що забезпечує надійне живлення навантажувачів змінної потужності. Описано принцип роботи перетворювача з частотою переключення 20 кГц, що дозволяє знизити втрати потужності та підвищити ефективність живлення навантажувачів. Представлено результати моделювання роботи перетворювача в режимі постійного струму та в режимі динамічного живлення навантажувачів.

1. ВСТУП

У сучасних інформаційних системах і технологіях завжди знаходяться критичні навантажувачі, що потребують надійного живлення. Завдяки високій частоті переключення, інвертний DC-DC перетворювач дозволяє знизити втрати потужності та підвищити ефективність живлення навантажувачів. Крім того, він забезпечує надійне живлення навантажувачів змінної потужності. У статті розглянуто функціональну схему інвертного DC-DC перетворювача з відновлювальною дією, що забезпечує надійне живлення навантажувачів змінної потужності. Описано принцип роботи перетворювача з частотою переключення 20 кГц, що дозволяє знизити втрати потужності та підвищити ефективність живлення навантажувачів. Представлено результати моделювання роботи перетворювача в режимі постійного струму та в режимі динамічного живлення навантажувачів.

1.1. ДАНІ ТА МЕТОДИ

Спроектуючи і моделюючи функціональну схему інвертного DC-DC перетворювача з відновлювальною дією, необхідно врахувати такі параметри: частоту переключення, коефіцієнт передачі потужності, втрати потужності та ефективність живлення навантажувачів змінної потужності.

ІНВЕРТНИЙ DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Левко Ковальчук, Юрій Євдоким

Анотація. Розглянуто функціональну схему інвертного DC-DC перетворювача з відновлювальною дією, що забезпечує надійне живлення навантажувачів змінної потужності. Описано принцип роботи перетворювача з частотою переключення 20 кГц, що дозволяє знизити втрати потужності та підвищити ефективність живлення навантажувачів. Представлено результати моделювання роботи перетворювача в режимі постійного струму та в режимі динамічного живлення навантажувачів.

1. ВСТУП

У сучасних інформаційних системах і технологіях завжди знаходяться критичні навантажувачі, що потребують надійного живлення. Завдяки високій частоті переключення, інвертний DC-DC перетворювач дозволяє знизити втрати потужності та підвищити ефективність живлення навантажувачів. Крім того, він забезпечує надійне живлення навантажувачів змінної потужності. У статті розглянуто функціональну схему інвертного DC-DC перетворювача з відновлювальною дією, що забезпечує надійне живлення навантажувачів змінної потужності. Описано принцип роботи перетворювача з частотою переключення 20 кГц, що дозволяє знизити втрати потужності та підвищити ефективність живлення навантажувачів. Представлено результати моделювання роботи перетворювача в режимі постійного струму та в режимі динамічного живлення навантажувачів.

1.1. ДАНІ ТА МЕТОДИ

Спроектуючи і моделюючи функціональну схему інвертного DC-DC перетворювача з відновлювальною дією, необхідно врахувати такі параметри: частоту переключення, коефіцієнт передачі потужності, втрати потужності та ефективність живлення навантажувачів змінної потужності.

Результати моделювання роботи запропонованого інвертного DC-DC перетворювача

У цій статті представлено результати моделювання роботи запропонованого інвертного DC-DC перетворювача з відновлювальною дією. На рисунку 7 показано вихідну форму сигналу вихідної напруги, що становить 30 В. Це дозволяє знизити втрати потужності та підвищити ефективність живлення навантажувачів змінної потужності.



Схема запропонованого інвертного DC-DC перетворювача з відновлювальною дією

Висновки. Представлено результати моделювання роботи запропонованого інвертного DC-DC перетворювача з відновлювальною дією. На рисунку 7 показано вихідну форму сигналу вихідної напруги, що становить 30 В. Це дозволяє знизити втрати потужності та підвищити ефективність живлення навантажувачів змінної потужності.

ІНВЕРТНИЙ DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Левко Ковальчук, Юрій Євдоким

Анотація. Розглянуто функціональну схему інвертного DC-DC перетворювача з відновлювальною дією, що забезпечує надійне живлення навантажувачів змінної потужності. Описано принцип роботи перетворювача з частотою переключення 20 кГц, що дозволяє знизити втрати потужності та підвищити ефективність живлення навантажувачів. Представлено результати моделювання роботи перетворювача в режимі постійного струму та в режимі динамічного живлення навантажувачів.

ІНТЕРЕСНЕ

1. Тюрк, С.М., Виноград, А.П.М., & Майдан, І.А. (2012). Схеми живлення для високовольтних індукційних двигунів. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 48(1), 1180-1188.

2. Ковальчук, Л., Євдоким, Ю., & Лав, Т.С. (2011). High-voltage high-power ZVS full-bridge PWM converter for active power. In *Proc. 2011 IEEE Conf. Elect. Technol. Sci. Eng. Technol. (ETEST)*, 1-4.

3. Ковальчук, Л., Євдоким, Ю., & Лав, Т.С. (2012). Study of Active of a New Isolated DC-DC Converter with a High-Voltage Switching Tube. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 59(1), 3014-3018.

4. Майдан, І.А., & Виноград, А.П.М. (2012). Study of a New Isolated DC-DC Converter with a High-Voltage Switching Tube. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 59(1), 3014-3018.

5. Майдан, І.А., & Виноград, А.П.М. (2012). Study of a New Isolated DC-DC Converter with a High-Voltage Switching Tube. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 59(1), 3014-3018.

6. Майдан, І.А., & Виноград, А.П.М. (2012). Study of a New Isolated DC-DC Converter with a High-Voltage Switching Tube. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 59(1), 3014-3018.

7. Майдан, І.А., & Виноград, А.П.М. (2012). Study of a New Isolated DC-DC Converter with a High-Voltage Switching Tube. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 59(1), 3014-3018.

8. Майдан, І.А., & Виноград, А.П.М. (2012). Study of a New Isolated DC-DC Converter with a High-Voltage Switching Tube. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 59(1), 3014-3018.

9. Майдан, І.А., & Виноград, А.П.М. (2012). Study of a New Isolated DC-DC Converter with a High-Voltage Switching Tube. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 59(1), 3014-3018.

10. Майдан, І.А., & Виноград, А.П.М. (2012). Study of a New Isolated DC-DC Converter with a High-Voltage Switching Tube. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 59(1), 3014-3018.

11. Майдан, І.А., & Виноград, А.П.М. (2012). Study of a New Isolated DC-DC Converter with a High-Voltage Switching Tube. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 59(1), 3014-3018.

12. Майдан, І.А., & Виноград, А.П.М. (2012). Study of a New Isolated DC-DC Converter with a High-Voltage Switching Tube. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 59(1), 3014-3018.

13. Майдан, І.А., & Виноград, А.П.М. (2012). Study of a New Isolated DC-DC Converter with a High-Voltage Switching Tube. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 59(1), 3014-3018.

Висновки

- Запропоновано ефективну схему інверторного DC-DC перетворювача для систем на базі відновлюваних джерел енергії.
- Застосування **фазозсувного керування та подвоювача напруги** дозволило **зменшити втрати, підвищити ККД та зменшити габарити трансформатора**.
- Виконано **аналіз усіх режимів роботи**, що дало змогу **глибоко зрозуміти процеси енергоперетворення** та забезпечити **стабільну вихідну напругу**.
- Схема більш компактна і ефективна.

**Результати можуть
бути корисні для
проєктування
енергоефективних
систем
автономного
живлення**

ВІДГУК

на кваліфікаційний проект

студента групи TP2-21-1 Павло КОВАЛЬЧУК

«Інверторний DC-DC перетворювач для відновлювальної енергетики»

Кваліфікаційний проект присвячений актуальній темі розробки енергоефективних DC-DC перетворювачів для систем відновлюваної енергетики. Робота охоплює комплексне дослідження та аналіз інверторної схеми з подвоєною вихідною напругою, що дозволяє досягти підвищеного коефіцієнта перетворення напруги у порівнянні з традиційними топологіями.

Автором виконано огляд сучасних рішень у галузі перетворювальної техніки, наведено технічне обґрунтування вибору схеми, розглянуто принцип дії, параметри ключових елементів та вплив конструктивних факторів (зокрема, коефіцієнта трансформації) на характеристики пристрою. Окрема увага приділена моделюванню та аналізу результатів, що підтверджують ефективність обраного підходу.

Проект має чітку структуру, логічно побудовані розділи, грамотну технічну мову та відповідає вимогам, що ставляться до кваліфікаційних робіт освітнього рівня «бакалавр». Результати досліджень можуть бути використані в практичних розробках перетворювачів для автономних джерел живлення на базі відновлюваних джерел енергії.

У процесі виконання кваліфікаційного проекту Павло КОВАЛЬЧУК проявив креативність, ініціативність, старанність, наполегливість, здатність та вміння застосовувати набуті знання для вирішення складних завдань, обізнаність у сучасних системних та інформаційних технологіях.

Кваліфікаційний проект виконано на високому технічному рівні, має безперечну актуальність в області сучасних телекомунікацій, а студент Павло КОВАЛЬЧУК заслуговує оцінки «відмінно».

Керівник:
д-р техн. наук, професор



Юлій БОЙКО

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

Дипломник: Ковальчук Павло Сергійович

Тема роботи: Інверторний DC-DC перетворювач для відновлювальної енергетики

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційного проекту

Кількість листів креслень 4 Кількість сторінок записки 68

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Кваліфікаційний проект присвячений дослідженню та вдосконаленню роботи DC-DC перетворювача із подвоєною вихідною напругою, що дозволяє досягти вищого коефіцієнта підсилення напруги порівняно з традиційними рішеннями. Виконано аналіз електричних характеристик, досліджено вплив коефіцієнта витків у розділювальному трансформаторі на щільність потужності, а також проведено порівняння ефективності перетворення для різних конфігурацій.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Дипломна робота відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: Кваліфікаційний проект демонструє високий рівень дослідження та інженерного аналізу інверторного DC-DC перетворювача, призначеного для застосування у сфері відновлювальної енергетики. У роботі представлено огляд сучасних типів DC-DC перетворювачів, які використовуються в системах живлення, орієнтованих на використання енергії з фотоелектричних панелей, вітрогенераторів та інших джерел відновлювальної енергії. Автор детально проаналізував запропоновану схему інверторного DC-DC перетворювача, приділивши особливу увагу ключовим технічним рішенням, що спрямовані на підвищення ефективності та стабільності роботи в умовах змінного навантаження. В кожному розділі розглядається електрична поведінка перетворювача, включаючи перехідні процеси, режими роботи ключових елементів та вплив параметрів схеми на енергетичні характеристики. Отримані експериментальні та імітаційні результати свідчать про високу ефективність перетворення та добрі динамічні властивості.

4. Позитивні сторони роботи: Робота присвячена розробці та аналізу інверторного DC-DC перетворювача, орієнтованого на використання в

системах відновлювальної енергетики. Вона має чітку практичну спрямованість та актуальну тематику, що відповідає сучасним тенденціям розвитку енергоефективних та автономних джерел живлення. У роботі здійснено глибокий огляд існуючих рішень, запропоновано ефективну схему перетворювача та проведено якісне моделювання з урахуванням реальних умов експлуатації. Отримані результати підтверджують працездатність і доцільність впровадження розробленої конструкції в енергетичних системах нового покоління

5. Негативні сторони роботи: Робота в цілому виконана на достатньо високому рівні, однак має деякі недоліки. Зокрема, у пояснювальній записці недостатньо глибоко розкрито вплив змін вхідних параметрів (наприклад, коливань напруги від джерела) на стабільність вихідних характеристик перетворювача. Окремі ділянки тексту потребують стилістичного доопрацювання для забезпечення більшої технічної чіткості викладу. Однак, ці недоліки не мають принципового значення, суттєво не впливають на кінцевий результат і не знижують загального враження від проведеної роботи.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає

7. Відгук про роботу в цілому: В цілому кваліфікаційний проєкт виконаний на високому рівні, має чітку структуру, логічну послідовність викладення матеріалу та достатній рівень технічної обґрунтованості. У роботі розглянуто актуальні питання розробки інверторного DC-DC перетворювача для потреб відновлювальної енергетики, проведено аналіз існуючих технічних рішень. Робота відповідає вимогам, що висувуються до кваліфікаційних проєктів, та заслуговує на позитивну оцінку.

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка дипломної роботи: Кваліфікаційний проєкт відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки відмінно (5.00/А), а її автору Ковальчуку Павлу, присвоєння кваліфікації бакалавра зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка»

10. Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, місце роботи) Єрмоменко Олександр Іванович – к.т.н., доцент кафедри фізики та електротехніки

«06» червня 2025р.


підпис

Завідувачу кафедри телекомунікацій,
медійних та інтелектуальних технологій
д.т.н., професору ПІДЧЕНКУ Сергію
здобувача вищої освіти

КОВАЛЬЧУКА Павла

ФІТ, гр. ТР2-21-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу мого кваліфікаційного проєкту для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом мого кваліфікаційного проєкта «Інверторний DC-DC перетворювач для відновлювальної енергетики» в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія мого кваліфікаційного проєкту збігається (ідентична) з друкованою.

29 травня 2025 р.
дата


Підпис

Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

The maximum coincidence with one document 2.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. Errors in the documents: 8%

ID: 242734 Title: Інверторний DC-DC перетворювач для відновлювальної енергетики Added in a DB: 2025-06-02 Authors: Ковальчук Павло Сергійович Heads: Бойко Юлій Миколайович Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	84277	1267	1666 (2%)	27 (2%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Павло КОВАЛЬЧУК (TP2-21-1)

Співавтор:

Назва: Інверторний DC-DC перетворювач для відновлювальної енергетики

Експерт: *Роберт Олександр Сирин*

Підрозділ: Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Коефіцієнт подібності 1:2.5%

Коефіцієнт подібності 2:0.7%

Мікропробіли: 0

Заміна букв: 19

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-06-03 02:27:48.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування: *Виявлені запозичення не є плагіатом, оскільки це цитатування з джерел, наведених у списку літератури.*

Дата: *03.06.2025р*

експерт



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

КАФЕДРИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОГО ПРОЕКТУ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційного проекту: Інверторний DC-DC перетворювач для відновлювальної енергетики

Автор: Ковальчук Павло Сергійович

Освітня програма Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Керівник кваліфікаційного проекту: д.т.н., професор Бойко Юлій Миколайович

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	-
1.2	Виявлені запозичення не є академічним 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.	відповідає
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	-
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	-
2	Інші види порушень академічної доброчесності	-

Підтвердження:

Виявленні запозичення не є плагіатом так як розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження (є власні терміни, визначення тощо), коефіцієнти подібності складають 2,5% та 0,7%, а також мають посилання на приведений список літературних джерел.

«24» червня 2025 р.

Завідувач кафедри ТМІТ

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційного проекту

Сергій ПІДЧЕНКО

Віктор СТЕЦЮК

Юлій БОЙКО