

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Бакалавр

Освітній рівень

Понижувальний перетворювач постійного струму

Назва теми

КвРТР.2021004.01.04 ПЗ

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Шифр і назва

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Шифр і назва

Освітня програма «Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології»

Назва

Виконав:


студент III курсу, група ТР1с-21-1

  
Підпис

Максим ЛАБУСЮК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник:

  
Підпис, дата

Андрій СЕЛЬСЬКИЙ

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер:

  
Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

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

  
Підпис

Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

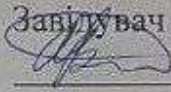
«19» червня 2024р.

Хмельницький, 2024

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКИТтаР

 Валерій МАРТИНЮК


« 10 » січня 2024 р.


## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Лабусюк Максим Ігорович

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

- Тема роботи: Понижувальний перетворювач постійного струму
- Керівник роботи: Сельський Андрій Анатолійович, к.ф.м.н., доцент
- Затверджено наказом по університету від «15» лютого 2024р. №8
- Строк подання здобувачем роботи на кафедру 01 червня 2024 року
- Вихідні дані до роботи: схема технологічного процесу, технічне завдання
- Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):  
аналіз проблем та шляхи вдосконалення понижуючих перетворювачів DC-DC; теоретичні аспекти понижувальних перетворювачів DC-DC; аналіз і принцип дії понижувального перетворювача із розширеним діапазоном робочого циклу в області понижувальних напруг для відновлюваних джерел енергії; аналіз і проектування розширеного понижувального DC-DC перетворювача.
- Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):  
1. Перетворювач DC-DC із подовженим робочим циклом в області підвищення вихідної напруги. 2. Моделювання роботи понижувального DC-DC перетворювача. 3. Моделювання роботи DC-DC перетворювача в режимах пониження та підвищення напруги.

Завдання отримав 

Керівник 

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання 10 січня 2024 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

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

Студент

Науковий керівник

(підпис, дата)

(підпис, дата)

Максим ЛАБУСЮК

Андрій СЕЛЬСЬКИЙ

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Понижувальний перетворювач постійного струму»

Автор роботи: Лабусюк Максим Ігорович.

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

Пояснювальна записка: 67 сторінок, 27 рисунків, 4 таблиці, 40 джерел.

Графічна частина: технічне креслення.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ПОНИЖУВАЛЬНО-ПІДВИЩУВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ, ПОСТІЙНИЙ СТРУМ, РОБОЧИЙ ЦИКЛ, ЗМЕНШЕНИЙ ДІАПАЗОН, ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ DC-DC, ПІДСИЛЕННЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ.

Об'єктом дослідження є понижуючий перетворювач DC-DC.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в дослідженні та розробці понижуючих перетворювачів постійного струму з розширеним діапазоном робочого циклу для підвищення ефективності

Понижувально-підвищувальні перетворювачі постійного струму є важливими для забезпечення відновлюваних джерел енергії доступом до мережі постійного струму. У звичайних таких перетворювачах спостерігається вихідна напруга, яка менша за вхідну, у проміжному діапазоні робочих циклів від 0 до 0,5. Однак останні розробки в цій галузі вказують на зменшений діапазон робочого циклу, що призводить до вихідної напруги в області зниження. Для досягнення нижчого діапазону вихідної напруги потрібні дуже низькі цикли заповнення. У даній кваліфікаційній роботі запропоновано новий понижуючий перетворювач DC-DC, який розширює діапазон робочого циклу, дозволяючи понижувальну роботу з вихідною напругою нижче вхідної, навіть при високому заповненні циклу. Проведено аналіз, розробку та моделювання цього перетворювача за допомогою програмного забезпечення.

01.06.2024 р.



## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....  | С. |
| ВСТУП.....   | 4  |
| 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ТА ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПОНИЖУЮЧИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ DC-DC.....   | 5  |
| 1.1 Загальна характеристика проблеми.....  | 8  |
| 1.2 Потреба у вдосконаленні понижуючих перетворювачів DC-DC.....   | 9  |
| 1.3 Існуючі методи та рішення .....  | 10 |
| 1.4 Тенденції у розвитку перетворювачів DC-DC: аналіз сучасних технологічних та інноваційних рішень .....  | 13 |
| 1.5 Висновок до першого розділу.....   | 18 |
| 2 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ПОНИЖУВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ DC-DC.....   | 22 |
| 2.1 Основні принципи роботи перетворювачів DC-DC.....  | 24 |
| 2.2 Топології та класифікація перетворювачів DC-DC .....   | 26 |
| 2.2.1 Перетворювачі з комутаційною індуктивністю .....   | 27 |
| 2.2.2 Перетворювачі з комутаційною ємністю.....  | 34 |
| 2.2.3 Гібридні перетворювачі.....  | 39 |
| 2.2.4 Багатоступеневі перетворювачі .....  | 40 |
| 2.2.5 Високочастотні перетворювачі на основі трансформаторів.....  | 40 |
| 2.3 Особливості роботи перетворювачів DC-DC у відновлюваних енергетичних системах.....   | 41 |
| 2.4 Висновок до другого розділу .....  | 42 |
| 3 АНАЛІЗ І ПРИНЦИП ДІЇ ПОНИЖУВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІЗ РОЗШИРЕНИМ ДІАПАЗОНОМ РОБОЧОГО ЦИКЛУ В ОБЛАСТІ ПОНИЖУВАЛЬНИХ НАПРУГ ДЛЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ..... | 44 |
| 3.1 Аналіз технічних характеристик понижувального перетворювача .....  | 47 |
| 3.2 Принцип роботи у режимі безперервної провідності .....   | 50 |
| 3.3 Висновок до третього розділу.....  | 52 |

|                        |      |                |        |          |  |                    |      |         |
|------------------------|------|----------------|--------|----------|--|--------------------|------|---------|
| КвРТР.2021004.01.04 ПЗ |      |                |        |          |  |                    |      |         |
|                        |      |                |        |          |  |                    |      |         |
| Зам.                   | Арж. | Ад. док.м.     | Підпис | Дата     | Понижувальний перетворювач постійного струму | Літ.               | Арк. | Акрюків |
| Розроб.                |      | Лабунюк М.І.   |        | 19.06.24 |  |                    | 2    | 72      |
| Варіант.               |      | Сельський А.А. |        | 19.06.24 | Пояснювальна записка                         | ХНУ, гр. ТР1с-21-1 |      |         |
| Розроб.                |      |                |        |          |  |                    |      |         |
| Н. Контро.             |      | Корсунь Л.О.   |        | 20.06.24 |  |                    |      |         |
| Комп'ютер.             |      | Митенко В.В.   |        | 20.06.24 |  |                    |      |         |

|   |    |
|---|----|
| 4 АНАЛІЗ І ПРОЕКТУВАННЯ РОЗШИРЕНОГО ПОНИЖУВАЛЬНОГО DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА .....                          | 50 |
| 4.1 Конструкція індуктора та конденсатора для розширеного діапазону робочого циклу .....              | 50 |
| 4.2 Розгляд напруги та струму напівпровідника у контексті понижувального перетворювача.....           | 51 |
| 4.3 Порівняльний аналіз з існуючими рішеннями .....   | 53 |
| 4.4 Результати моделювання та практичні експерименти .....  | 54 |
| 4.5 Висновок до четвертого розділу .....  | 62 |
| ВИСНОВКИ.....   | 63 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....   | 65 |
| ДОДАТОК А Перетворювач DC-DC із подовженим робочим циклом в області підвищення вихідної напруги ..... | 69 |
| ДОДАТОК Б Моделювання роботи понижувального DC-DC перетворювача ..                                    | 70 |
| ДОДАТОК В Моделювання роботи DC-DC перетворювача в режимах пониження та підвищення напруги .....      | 71 |

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 3    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

|          |  |
|----------|--|
| AC       | – Змінний струм (Alternating Current)                        |
| CCM      | – Continuous Conduction Mode                                 |
| DC       | – Постійний струм (Direct Current)                           |
| DC-DC    | – Постійний струм - Постійний струм                          |
| EMC      | – Електромагнітна сумісність (Electromagnetic Compatibility) |
| Matlab   | – Matrix Laboratory  |
| MOSFET   | – Метал-оксид-полісілікатний транзистор                      |
| PWM      | – Широко-імпульсна модуляція                                 |
| Simulink | – Пакет моделювання та симуляції                             |
| ЕМП      | – Електромагнітні перешкоди                                  |
| ККД      | – Коефіцієнт корисної дії                                    |
| ZCS      | – Комутації нульового струму                                 |

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 4    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

## ВСТУП

У сучасний час використання відновлюваних джерел енергії стає все більш актуальним і стрімким процесом у декарбонізації виробництва електроенергії. Сонячні та вітрові установки, серед інших джерел, стають все поширенішими, проте вони генерують відносно низькі вихідні напруги. У той же час, звичайні електричні мережі та навантаження потребують значно вищих напруг для ефективної роботи. Для забезпечення сумісності між низьковольтними джерелами та високовольтними мережами, широко використовуються індивідуальні перетворювачі живлення DC-DC.

Ці перетворювачі грають ключову роль у збільшенні впровадження відновлюваних ресурсів у енергетичні мережі. Вони знаходять широке застосування у промисловості, освітленні, побутовій електроніці та зарядці акумуляторів електромобілів. У промислових застосуваннях перетворювачі DC-DC стабілізують вихідну напругу для нормальної роботи навантаження незалежно від змін вхідної напруги.

Останні розробки в цій області спрямовані на подолання обмежень та поліпшення характеристик перетворювачів, таких як пульсації напруги та струму, щільність потужності, ефективність і вартість. Зокрема, в останні роки було запропоновано численні нові топології перетворювачів з метою розширення діапазону зниження напруги, проте багато з них мають обмежену область зниження через низький діапазон робочих циклів.

Особливу увагу варто звернути на можливість розширення понижувальної області, особливо в контексті розв'язання проблем затінення фотоелектричних панелей у з'єднаних колах. Використання мікроперетворювачів DC-DC, здатних працювати в понижувальній області, може допомогти у підтримці нормальної роботи системи навіть під час затінення.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка та дослідження нової конструкції мікропонижувального неізольованого перетворювача постійного струму з використанням одного потужного напівпровідника.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 5    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

Основним завданням є розширення понижувальної області шляхом розширення діапазону робочого циклу, щоб відповідати потребам додатків, які вимагають розширеної вихідної понижувальної напруги, таких як сонячні фотоелектричні панелі, що працюють в умовах частого затінення. Досягнення цієї мети передбачає проведення теоретичного аналізу нової топології перетворювача, його дизайну та моделювання.

Дана кваліфікаційна робота вирішує актуальну проблему забезпечення сумісності між низьковольтними джерелами енергії та високовольтними мережами, що стає все більш важливим у контексті переходу до використання відновлюваних джерел енергії. Відповідно, основною метою є створення ефективного та надійного перетворювача, який забезпечить стабільне живлення високовольтних мереж з електроенергією, згенерованою від сонячних фотоелектричних панелей, навіть в умовах затінення.

Актуальність теми полягає в потребі розвитку більш ефективних та енергоефективних понижувально-підвищувальних перетворювачів постійного струму (DC-DC). З урахуванням зростаючого інтересу до використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, стає важливим мати ефективні перетворювачі, які забезпечують стабільні вихідні напруги навіть при варіаціях вхідних умов.

Новітні дослідження в галузі показують, що зменшення діапазону робочого циклу в перетворювачах може обмежувати їхню ефективність та можливості. Тому розробка нового понижувального перетворювача, який здатний працювати з більшим діапазоном робочих циклів і забезпечувати вихідну напругу нижче вхідної, виявляється дуже актуальною.

Дана кваліфікаційна робота має значення для подальшого розвитку електроніки та відновлюваних джерел енергії, оскільки вона пропонує новий підхід до побудови понижуючих перетворювачів, який може мати позитивний вплив на їхню ефективність та енергоефективність.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 6    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

# 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ТА ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПОНИЖУЮЧИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ DC-DC

У сучасному контексті використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, стає надзвичайно важливим кроком у зусиллях з декарбонізації електроенергетики. Проте, однією з основних перешкод для їх широкого застосування є низькі вихідні напруги, які не завжди відповідають потребам високовольтних мереж електропостачання.

Для вирішення цієї проблеми, інженери широко використовують індивідуальні перетворювачі живлення DC-DC, які забезпечують сумісність між низьковольтними джерелами енергії та вимогами високовольтних мереж. Ці перетворювачі відіграють важливу роль у забезпеченні ефективного використання відновлюваних ресурсів у енергетичних системах, знаходячи застосування в різних галузях, включаючи промисловість, освітлення, побутову електроніку та зарядку акумуляторів електромобілів [1].

Проте, багато існуючих перетворювачів мають свої обмеження, особливо у зниженні напруги через обмежений діапазон робочих циклів. Останні розробки в цій галузі спрямовані на подолання цих обмежень та поліпшення характеристик перетворювачів, зокрема, зниження пульсацій напруги та струму, підвищення щільності потужності, підвищення ефективності та зниження вартості.

Особлива увага приділяється можливості розширення понижувальної області перетворювачів, щоб вирішити проблеми затінення фотоелектричних панелей у з'єднаних колах. Використання мікроперетворювачів DC-DC, які працюють в понижувальній області, виявляється одним з ефективних способів забезпечення нормальної роботи системи, навіть у випадках затінення.

Значна увага зосереджується на використанні відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, у контексті зростаючого інтересу до

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 7    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

зменшення викидів вуглецю та боротьби зі змінами клімату. Однак, однією з основних проблем використання цих джерел є їх низькі вихідні напруги, що часто не відповідають вимогам високовольтних електричних мереж.

Для вирішення цієї проблеми широко використовуються перетворювачі постійного струму в постійний струм (DC-DC), які здатні підвищувати вихідну напругу від відновлюваних джерел до рівня, придатного для використання в електричних мережах. Це дозволяє інтегрувати відновлювані джерела енергії з існуючими електричними мережами та забезпечувати стабільне електропостачання.

Нові розробки у цій області спрямовані на підвищення ефективності та надійності перетворювачів, а також на розширення їх функціональності. Наприклад, впровадження мікроперетворювачів DC-DC дозволяє забезпечити стабільне живлення системи навіть у випадках затінення сонячних панелей, що підвищує ефективність використання відновлюваних джерел енергії.

### 1.1 Загальна характеристика проблеми

Із загальною зростаючою тенденцією використання відновлюваних джерел енергії, особливо сонячної та вітрової енергії, стикаємося з проблемою несумісності їх низьковольтних вихідних напруг з вимогами сучасних високовольтних мереж електропостачання. Традиційні електричні мережі та пристрої оптимізовані для роботи на високих напругах, що забезпечує ефективну передачу енергії та забезпечує електричну безпеку. Однак, відновлювані джерела, такі як сонячні панелі та вітрові турбіни, зазвичай генерують електричну енергію з низькими напругами.

Ця несумісність стає значним перешкодженням для ефективного використання відновлюваних джерел енергії у сучасних електромережах. Щоб компенсувати цю різницю у напрузі, необхідне використання перетворювачів

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 8    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

постійного струму в постійний (DC-DC), які здатні підвищувати вихідну напругу до потрібного рівня. Ці перетворювачі, які виконують важливу функцію у забезпеченні сумісності між низьковольтними джерелами енергії та високовольтними мережами електропостачання, є ключовим елементом в системах використання відновлюваних джерел енергії.

Таким чином, основною проблемою є необхідність розробки та вдосконалення перетворювачів DC-DC, які забезпечать ефективне підвищення напруги для забезпечення сумісності між вихідною напругою відновлюваних джерел енергії та вимогами високовольтних електричних мереж.

## 1.2 Потреба у вдосконаленні понижуючих перетворювачів DC-DC

Потреба у вдосконаленні понижуючих перетворювачів DC-DC виникає з ряду факторів, пов'язаних зі зростанням використання відновлюваних джерел енергії та їх несумісністю зі звичайними електричними мережами [2]:

### 1. Низькі вихідні напруги відновлюваних джерел енергії:

Відновлювані ресурси енергії включають сонячну енергію, вітер, падіння води, тепло землі (геотермальну енергію), біомасу, хвилі, океанські течії, різницю температур в океанах і енергію припливів. Ці джерела можуть бути використані для виробництва електроенергії, тепла або механічної енергії шляхом їх перетворення.

Розробник політики, який відповідає за розвиток національної електромережі, має зосередитися на тих технологіях, які вже зарекомендували себе комерційно та економічно ефективні для мережевих додатків. Такі комерційно успішні технології включають гідроелектроенергію, сонячну енергію, енергію, отриману з біомаси, енергію вітру та геотермальну енергію. Хоча технології, які ще знаходяться на дослідницькій або ранній комерційній стадії, такі як хвильова та океанська течія, а також неелектричні методи

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

використання відновлюваних джерел, як сонячні водонагрівачі та геотермальні теплові насоси, також можуть стати важливими частинами майбутньої енергетичної системи

## 2. Потреба у сумісності з високовольтними мережами:

Для ефективного використання електроенергії, що генерується від відновлюваних джерел, необхідно підвищувати рівень вихідної напруги, щоб забезпечити сумісність з високовольтними мережами електропостачання. Однак більшість відновлюваних джерел, таких як сонячна та вітрова енергія, надають відносно низьку вихідну напругу. Це створює потребу в ефективних перетворювачах, які можуть підвищувати напругу до необхідного рівня для інтеграції з високовольтними мережами.

Зокрема, перетворювачі DC-DC використовуються для збільшення вихідної напруги з низького рівня, що надається від сонячних панелей або вітрових турбін, до вищого рівня, який відповідає вимогам високовольтних мереж. Це дозволяє забезпечувати ефективний та стабільний потік електроенергії у мережі, підвищуючи загальну ефективність та надійність системи.

Останні розробки у цій області спрямовані на розширення діапазону робочого напруги перетворювачів, зниження пульсацій та підвищення ефективності, щоб забезпечити оптимальну сумісність з високовольтними мережами. Такі вдосконалення дозволяють оптимізувати використання відновлюваних джерел енергії та сприяють створенню більш стійких та ефективних систем електропостачання

## 3. Розширення діапазону зниження напруги:

Багато існуючих перетворювачів мають обмежену область зниження напруги через низький діапазон робочих циклів, що обмежує їх ефективність та можливості використання. Для досягнення оптимальної працездатності в

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 10   |

системах електропостачання, особливо з використанням відновлюваних джерел енергії, необхідно розробляти перетворювачі, які здатні працювати в широкому діапазоні вхідних напруг та робочих циклів.

Нові технології та топології перетворювачів, спрямовані на розширення діапазону зниження напруги, включають у себе різноманітні підходи, такі як розвиток мультирівневих конверторів, оптимізація керування пристроями та використання нових матеріалів. Ці підходи дозволяють покращити ефективність перетворювачів та забезпечити їх адаптацію до різноманітних умов роботи, включаючи змінність вихідної потужності від відновлюваних джерел енергії.

Одним з ключових напрямків розвитку є зменшення впливу пульсацій напруги та струму в перетворювачах, що сприяє поліпшенню їх ефективності та зниженню втрат енергії. Дослідження та інновації в цій області ведуть до створення більш надійних та продуктивних перетворювачів, що відкривають нові можливості для використання відновлюваних джерел енергії у сучасних системах електропостачання.

#### 4. Проблема затінення фотоелектричних панелей:

У з'єднаних колах сонячних панелей може виникати проблема затінення, що зменшує вихідну напругу та потужність, що виробляється. Це особливо актуально в умовах змінної освітленості або затінення під час руху хмар або перешкод. Для підтримки нормальної роботи системи електропостачання у таких умовах необхідно мати перетворювачі, які здатні працювати в понижувальній області.

Мікроперетворювачі DC-DC стали важливим компонентом для розв'язання цієї проблеми, оскільки вони можуть ефективно знижувати напругу з низького до високого рівня, забезпечуючи стабільне живлення системи навіть під час затінення. Зокрема, розробка перетворювачів з розширеною понижувальною областю дозволяє збільшити ефективність сонячних

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 11   |

електростанцій та забезпечити безперебійне функціонування в умовах змінної освітленості. Такі перетворювачі дозволяють оптимізувати використання сонячної енергії та забезпечити стабільний вихідний струм у системах з великою кількістю сонячних панелей, що піддаються затіненню [3].

Отже, вдосконалення понижуючих перетворювачів DC-DC спрямоване на розширення їх понижувальної області, підвищення ефективності, зменшення пульсацій напруги та струму, підвищення щільності потужності та зниження вартості. Такі вдосконалення не лише сприятимуть узгодженню вихідної напруги відновлюваних джерел з потребами високовольтних мереж, але й підтримають стабільну роботу системи навіть у складних умовах, наприклад, під час затінення фотоелектричних панелей.

### 1.3 Існуючі методи та рішення

У контексті забезпечення ефективного використання відновлюваних джерел енергії та їх інтеграції з високовольтними мережами електропостачання, існують різноманітні методи та рішення, які допомагають подолати технічні обмеження та поліпшити характеристики перетворювачів DC-DC. Ці методи спрямовані на забезпечення сумісності між низьковольтними джерелами енергії та високовольтними мережами, а також на підвищення ефективності та надійності енергетичних систем [4, 5]. Деякі з них включають:

#### 1. Модерні топології перетворювачів DC-DC:

Сучасні дослідження та розвиток в області перетворювачів DC-DC спрямовані на створення нових топологій, які забезпечують не лише розширення діапазону зниження напруги, а й підвищення ефективності та надійності роботи. Однією з перспективних технологій є топології з підвищеним коефіцієнтом заповнення, які дозволяють ефективно використовувати енергію навіть при низьких вхідних напругах. Крім того, резонансні перетворювачі здатні

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 12   |

працювати в широкому діапазоні робочих циклів, що дозволяє оптимізувати енергоефективність та зменшити втрати енергії під час конвертації.

Помітним напрямком розвитку є вдосконалення алгоритмів керування та модуляції, що дозволяють оптимізувати роботу перетворювачів у різних режимах навантаження та забезпечувати стабільність роботи системи при змінних умовах експлуатації. Такий підхід дозволяє підтримувати оптимальні параметри роботи перетворювача та знижувати вплив пульсацій напруги та струму на роботу підключених електричних пристроїв.

Використання інтелектуальних управлінських систем, заснованих на штучному інтелекті та машинному навчанні, може значно підвищити ефективність роботи перетворювачів. Ці системи можуть автоматично адаптуватися до змінних умов експлуатації, прогнозувати оптимальні параметри роботи та вчасно вносити корективи для забезпечення найкращої продуктивності системи.

Використання нових матеріалів та технологій у виробництві компонентів перетворювачів може сприяти підвищенню енергоефективності та зменшенню розмірів пристроїв. Наприклад, застосування напівпровідникових матеріалів з високою електропровідністю дозволяє зменшити втрати енергії у перетворювачах та підвищити їхню продуктивність.

Перетворювачі DC/DC з різними топологіями відіграють важливу роль у вирівнюванні рівнів напруги, керуванні потужністю та забезпеченні ефективної передачі енергії в електронних системах [7]. Вони забезпечують адаптацію до різних джерел живлення, пропонують гальванічну ізоляцію та сприяють створенню компактних та легких конструкцій [8]. Ці перетворювачі є невід'ємною частиною систем відновлюваної енергетики, заряджання акумуляторів і адаптації живлення до унікальних вимог застосування.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 13   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

Ці технологічні рішення спрямовані на подолання технічних обмежень та покращення характеристик перетворювачів DC-DC, що дозволяє забезпечити ефективне використання відновлюваних джерел енергії у сучасних енергетичних системах.

## 2. Використання мікроперетворювачів DC-DC:

Однією з перспективних технологій у сфері перетворення енергії є використання мікроперетворювачів DC-DC. Ці компактні пристрої мають унікальні характеристики, що дозволяють їм працювати в понижувальній області, тобто здійснювати конвертацію енергії з високої вхідної напруги до низької вихідної напруги. Основними перевагами мікроперетворювачів є їх компактність, висока ефективність та здатність забезпечувати стабільне живлення навіть у складних умовах, наприклад, під час затінення фотоелектричних панелей.

Мікроперетворювачі DC-DC відкривають широкі можливості для покращення ефективності та надійності систем відновлювальної енергії. Їх здатність працювати з низькими вхідними напругами дозволяє ефективно використовувати енергію, що генерується від сонячних панелей та інших джерел з низькою вихідною напругою. Це сприяє збільшенню загальної ефективності системи та зниженню загальних витрат енергії.

Крім того, мікроперетворювачі можуть бути використані для розширення функціональності сонячних енергетичних систем. Вони можуть бути інтегровані з різними сенсорами та системами керування, що дозволяє автоматично регулювати роботу системи в залежності від зовнішніх умов та забезпечувати оптимальний рівень продуктивності.

Завдяки своїй компактності та низькому споживанню енергії, мікроперетворювачі DC-DC також знаходять широке застосування в мобільних системах, таких як портативні електронні пристрої та електромобілі. Вони

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 14   |

забезпечують стабільне живлення для різноманітних пристроїв та систем, підвищуючи їх функціональність та продуктивність.

Отже, використання мікроперетворювачів DC-DC відкриває нові можливості для підвищення ефективності та надійності систем відновлювальної енергії, а також розширення їх функціональності та застосування в різних галузях промисловості.

### 3. Активні методи корекції:

Одним з ключових напрямків у вдосконаленні перетворювачів DC-DC є застосування активних методів корекції. Ці методи включають в себе використання різноманітних алгоритмів керування та модуляції, спрямованих на оптимізацію роботи перетворювачів та покращення їх характеристик.

Застосування алгоритмів керування дозволяє регулювати параметри роботи перетворювача з метою досягнення оптимальних показників продуктивності та ефективності. Ці алгоритми можуть враховувати різноманітні фактори, такі як зміни вхідних параметрів, навантаження та інші, для забезпечення стабільності роботи системи та максимізації вихідних характеристик.

Використання методів модуляції дозволяє керувати часом відкриття та закриття елементів перетворювача з метою регулювання вихідних параметрів, таких як напруга та струм. Ці методи дозволяють знижувати пульсації напруги та струму, що сприяє покращенню стабільності роботи системи та зменшенню споживання енергії.

Використання активних методів корекції дозволяє оптимізувати робочі параметри перетворювача з метою забезпечення максимальної ефективності та надійності. Це включає в себе підбір оптимальних параметрів алгоритмів керування та модуляції, а також вдосконалення дизайну та конструкції перетворювача для забезпечення оптимальних робочих умов.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 15   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

Таким чином, використання активних методів корекції є ефективним способом покращення ефективності та стабільності роботи перетворювачів DC-DC, що дозволяє забезпечити надійне живлення електронних пристроїв та систем у різних галузях виробництва.

#### 4. Оптимізація компонентів:

Надзвичайно важливим аспектом у підвищенні ефективності та надійності перетворювачів DC-DC є оптимізація їх складових компонентів. Вдосконалення конструкції індукторів, конденсаторів та інших елементів перетворювачів може відігравати вирішальну роль у забезпеченні оптимальних характеристик та зниженні енергетичних втрат.

Оптимізація конструкції індукторів, які використовуються для згладжування струму та забезпечення стабільної роботи перетворювача, може сприяти зниженню втрат потужності та пульсацій напруги. Також важливим є вдосконалення конструкції конденсаторів, які відповідають за зберігання електричної енергії та згладжування напруги на вході та виході перетворювача.

Застосування новітніх матеріалів у конструкції компонентів, таких як високоефективні магнітні матеріали для індукторів або високопровідні матеріали для конденсаторів, може допомогти знизити втрати енергії та пульсації напруги. Також важливим є використання передових технологій у виготовленні компонентів, що дозволяє отримати більш ефективні та стабільні елементи.

Підбір оптимальних параметрів компонентів, таких як ємність конденсаторів та індуктивність індукторів, грає важливу роль у забезпеченні оптимальної роботи перетворювача. Відповідно до вимог системи та умов експлуатації, оптимізація цих параметрів може допомогти забезпечити максимальну ефективність та надійність перетворювача.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 16   |

Отже, оптимізація компонентів є важливим етапом у розробці перетворювачів DC-DC, що дозволяє забезпечити їхню найвищу продуктивність та надійність у різних умовах експлуатації.

Ці методи та рішення використовуються для подолання обмежень та поліпшення характеристик перетворювачів DC-DC, що дозволяє забезпечити ефективне використання відновлюваних джерел енергії у сучасних енергетичних системах/

#### 1.4 Тенденції у розвитку перетворювачів DC-DC: аналіз сучасних технологічних та інноваційних рішень

У сучасному світі спостерігається постійний розвиток технологій, спрямованих на підвищення ефективності, надійності та екологічної чистоти перетворювачів DC-DC.

Перетворювач DC-DC – це електронний пристрій, який перетворює потужність постійного струму (DC) з одного рівня напруги на інший. Він широко використовується в різних галузях промисловості та застосуваннях, де потрібне стабільне та надійне джерело живлення. Перетворювачі постійного струму зазвичай використовуються в джерелах живлення, акумуляторних системах, системах відновлюваної енергії, телекомунікаціях, автомобілях і промисловості.

Однією з ключових тенденцій є пошук нових топологій перетворювачів, спроектованих для розширення діапазону зниження напруги. Це дозволяє підвищити універсальність та ефективність таких перетворювачів, що особливо актуально у контексті використання відновлюваних джерел енергії з низькою вихідною напругою.

Ще однією важливою тенденцією є вдосконалення управління та модуляції перетворювачів [9]. Застосування новітніх алгоритмів керування та механізмів модуляції дозволяє зменшити пульсації напруги та струму, поліпшити

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 17   |

ефективність перетворювачів та забезпечити стабільну роботу систем електроживлення.

Також варто відзначити тенденцію до застосування новітніх матеріалів та компонентів у конструкції перетворювачів. Використання нових матеріалів дозволяє знизити розміри та вагу перетворювачів, підвищити їхню ефективність та знизити витрати енергії.

Крім того, активно досліджуються можливості використання мікроперетворювачів DC-DC, які забезпечують стабільне живлення в низьковольтних системах, навіть в умовах затінення. Це особливо важливо для застосувань, де надзвичайно важлива надійність та стабільність електроживлення.

Майбутні перспективи ринку перетворювачів постійного струму багатообіцяючі. Зростаючий попит на енергоефективні та мініатюрні електронні пристрої стимулює зростання ринку. Оскільки світ стає все більш цифровим, попит на компактні та легкі силові електронні пристрої зростає. Це, у свою чергу, підживлює ринковий попит на перетворювачі DC-DC.

Зростання виробництва енергії з відновлюваних джерел є ще одним фактором, що сприяє зростанню ринку перетворювачів постійного струму. Зі збільшенням впровадження систем сонячної та вітрової енергії виникає потреба в ефективному перетворенні енергії для забезпечення максимального використання енергії. Перетворювачі постійного струму відіграють вирішальну роль у перетворенні постійного струму, отриманого з відновлюваних джерел, у придатну до використання енергію змінного струму або для зберігання енергії.

Автомобільна промисловість також є значним рушієм для ринку перетворювачів постійного струму. Зростаюче впровадження електромобілів і гібридних електромобілів вимагає ефективних систем управління та перетворення електроенергії. Перетворювачі постійного струму

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 18   |

використовуються в цих транспортних засобах для перетворення високої напруги постійного струму від акумулятора на нижчу напругу, необхідну для різних компонентів.

Загалом очікується, що ринок перетворювачів постійного струму в найближчі роки значно зросте. Зростаючий попит на енергоефективні та компактні електронні пристрої, зростання виробництва енергії з відновлюваних джерел і все більше впровадження електромобілів сприяють зростанню ринку. Прогнозується, що протягом прогнозованого періоду ринок зростатиме.

Отже, загальна тенденція у розвитку перетворювачів DC-DC полягає в пошуку інноваційних технологій, що спрямовані на підвищення ефективності, надійності та екологічної чистоти цих пристроїв

### 1.5 Висновок до першого розділу

У даному розділі розглянута загальна характеристика проблеми, пов'язаної з несумісністю низьковольтних джерел енергії з високовольтними мережами електропостачання. Проблема полягає у необхідності підвищення напруги, генерованої від відновлюваних джерел, до рівня, що відповідає вимогам сучасних електричних мереж. Для цього потрібні ефективні понижуючі перетворювачі DC-DC.

Також у розділі були оглянуті існуючі методи та рішення, спрямовані на вдосконалення понижуючих перетворювачів DC-DC, включаючи модерні топології, використання мікроперетворювачів, активні методи корекції та оптимізацію компонентів. Ці методи і рішення дозволяють забезпечити ефективне використання відновлюваних джерел енергії у сучасних енергетичних системах. Отже, перша частина роботи розкрила важливі аспекти проблеми та надала обґрунтування для подальших розділів, де будуть розглянуті деталі та варіанти вдосконалення понижуючих перетворювачів DC-DC.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 19   |

## 2 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ПОНИЖУВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ DC-DC

Існує зростаючий попит на понижувальні перетворювачі постійного струму у зв'язку з швидким розвитком різних промислових сегментів, таких як центри обробки даних, промислова робототехніка, Інтернет речей (IoT) і вбудовані системи. Ці перетворювачі електроенергії мають бути високопродуктивними та відповідати вимогам щодо щільності потужності, ефективності, вартості, ваги та надійності.

Існує ряд стратегій для оптимізації цих параметрів [10]. Наприклад, використання високих і дуже високих частот дозволяє зменшити розміри магнітних і ємнісних компонентів, що сприяє зниженню обсягу і ваги перетворювача. Проте важливо враховувати, що підвищення частоти перемикання може призвести до збільшення втрат в напівпровідникових пристроях.

Однією з ключових стратегій підвищення ефективності є зменшення кількості напівпровідникових пристроїв із забезпеченням потрібного підсилення напруги. Додатково, необхідно зменшити напругу блокування у вимкненому стані та середньоквадратичний струм у стані провідності для мінімізації втрат і підвищення надійності.

Для досягнення цих цілей були розроблені різноманітні архітектури енергосистем і топології перетворювачів. Вони спрямовані на отримання необхідного коефіцієнта підсилення напруги, одночасно враховуючи інші вимоги до продуктивності та надійності.

У сучасних програмах, архітектура системи залежить від величини напруги навантаження, її джерела, а також від рівня потужності та конкретних вимог програми [11]. Навантаження, що використовується у вищезгаданих

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 20   |

додатках, працюють при низькій напрузі та високому струмі, тому інтерфейсні перетворювачі повинні мати можливість ефективного зниження вхідної напруги від високої до надвисокої. Наприклад, для центрів обробки даних вхідна напруга може знаходитись у діапазоні 380–400 В, тоді як навантаження працює при напрузі 1–2 В. У такому випадку інтерфейсний перетворювач потужності повинен мати високий коефіцієнт зниження, наприклад, 400:1, якщо він виконаний у вигляді єдиного перетворювача. Також можливий варіант реалізації у вигляді багатоступеневих систем, які складаються з нерегульованого етапу попередньої обробки та регульованого вихідного етапу [12].

Нерегульований понижувальний етап, який відповідає за зниження напруги та забезпечує електричну ізоляцію, може бути реалізований високоефективно за допомогою контролера з відкритим контуром для керування активними перемикачами. Проте слід зазначити, що реалізація такого перетворювача може бути складною через використання високочастотного роздільного трансформатора. Регульований вихідний етап може бути реалізований різними підходами, які можуть бути показані на рисунку 2.1.

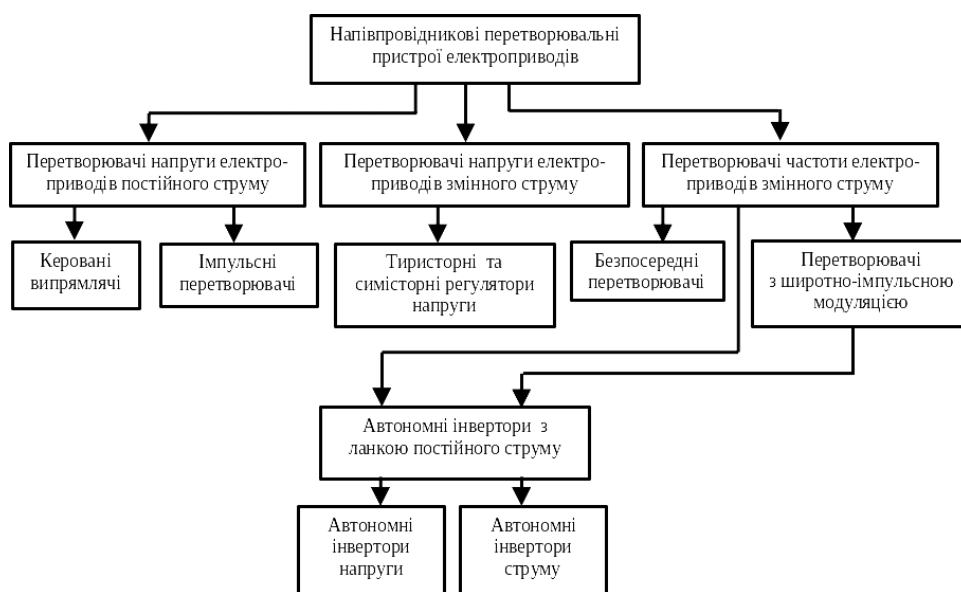


Рисунок 2.1 – Типологія перетворювачів

Існує також інша архітектура, відома як часткова/диференціальна обробка потужності, де перетворювачі з фіксованим і регульованим вихідним сигналом складаються в стопку з метою отримання бажаного підсилення та регулювання напруги. В обох підходах нерегульований перетворювач може бути реалізований з використанням неізольованих або ізольованих перетворювачів [13]. Додатково, існує багато підходів до реалізації регульованого перетворювача, які можуть бути застосовані в залежності від конкретних вимог та умов використання.

## 2.1 Основні принципи роботи перетворювачів DC-DC

Перетворювач постійного струму - це технічний пристрій або система, призначена для зміни рівня напруги або струму з одного значення на інше в системі з постійним струмом. Ці перетворювачі широко використовуються для різноманітних застосувань, де потрібна конвертація електроенергії, від малих батарей до високовольтних систем передачі енергії. Вони можуть бути електронними схемами або механічними пристроями і грають важливу роль у забезпеченні сталого живлення різноманітних пристроїв і систем

Основні принципи роботи перетворювачів DC-DC полягають у перетворенні напруги з одного рівня на інший, зазвичай з нижчого рівня на вищий або навпаки, за допомогою електронних комутаційних схем. Ось деякі ключові принципи роботи цих перетворювачів:

1. Вибір топології: Перетворювачі DC-DC можуть використовувати різні топології, такі як підвищення, пониження, зворотній або комбінований режими. Вибір топології залежить від вхідної і вихідної напруг, потужності та ефективності.

2. Ключові елементи: Основними елементами у перетворювачах DC-DC є комутуючі елементи, такі як транзистори або тиристори, які використовуються для періодичного відкривання та закривання цепі для керування потоком енергії.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 22   |

3. Частота комутації: Частота комутації визначається швидкістю, з якою ключові елементи відкриваються та закриваються. Висока частота комутації дозволяє використовувати менші та легші компоненти, але може збільшити втрати енергії через комутаційні втрати.

4. Управління і модуляція: Управління роботою перетворювача включає в себе модуляцію частоти комутації, шириною імпульсів, амплітудою та фазовим кутом для керування вихідною напругою та струмом.

5. Вихідний фільтр: Щоб забезпечити стабільну вихідну напругу та зменшити пульсації, до перетворювачів DC-DC часто входять вихідні фільтри, які використовують індуктивності та конденсатори.

6. Керування потужністю: Деякі перетворювачі DC-DC мають можливість регулювати вихідну потужність шляхом зміни відношення ввімкнення та вимкнення ключових елементів.

Перетворювачі постійного струму в постійний широко використовуються в портативних електронних пристроях, таких як мобільні телефони та ноутбуки, що живляться в основному від акумуляторів. Вони забезпечують ефективне управління напругою, що дозволяє пристроям працювати при різних вимогах енергії для різних підсистем.

Більшість схем таких перетворювачів також регулюють вихідну напругу, що дозволяє відповідати різним потребам електронних компонентів. Деякі варіанти, як світлодіодні джерела живлення та зарядні насоси, надають додаткові можливості, наприклад, регулювання струму через світлодіоди або подвоєння вихідної напруги.

Спеціалізовані перетворювачі, які максимізують збір енергії від сонячних панелей або вітрових турбін, відомі як оптимізатори потужності, використовуються для ефективного використання отриманої енергії.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 23   |

У порівнянні з трансформаторами, що працюють на мережевих частотах, перетворювачі постійного струму в постійній працюють на вищих частотах, що дозволяє використовувати менші та легші компоненти. Це робить їх економічними та ефективними в різноманітних застосуваннях, включаючи побутову електроніку

Загалом, перетворювачі DC-DC грають важливу роль у забезпеченні стабільного живлення для різноманітних електронних пристроїв і систем, забезпечуючи ефективне та енергоефективне перетворення напруги для потреб споживачів

## 2.2 Топології та класифікація перетворювачів DC-DC

Варіанти зниження вхідної напруги перетворювача включають використання як ізольованих, так і неізольованих конфігурацій, як показано на рисунку 2.1. Ізольовані перетворювачі базуються на високочастотних трансформаторах (HFT) і можуть використовуватися як трансформатори постійного струму (DCX) або стабілізатори напруги. З іншого боку, неізольовані перетворювачі можуть бути реалізовані за допомогою комутованої індуктивності, комутованого конденсатора або їх комбінації. Індуктори та конденсатори використовуються для передачі енергії в перших двох класах перетворювачів, і обидва використовуються в останньому випадку, відомому як гібридні перетворювачі. Крім того, перетворювачі можуть бути поділені на підкласи, враховуючи їхню реалізацію та характеристики, як показано на рисунку 2.1. Ці класи перетворювачів можуть використовуватися окремо або в комбінаціях для відповідності вимогам специфікацій. Також можуть бути інтегровані додаткові блоки схем, такі як активні та пасивні схеми фіксації напруги, хоча вони не забезпечують додаткового підсилення напруги, вони

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 24   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

важливі для керування та оптимізації роботи напівпровідникових пристроїв в цих системах.

### 2.2.1 Перетворювачі з комутаційною індуктивністю

Котушка індуктивності використовується для перемикання між джерелом та навантаженням з метою передачі потужності при зниженні напруги. У понижуючих і квазірезонансних понижуючих перетворювачах використовується лише один магнітний елемент для цієї операції. Однак інші два класи перетворювачів, відомі як перетворювачі з відводами та зв'язаними індукторами, використовують складну магнітну структуру з метою отримання більш високих коефіцієнтів підсилення та поліпшення продуктивності перетворювача.

Понижуючий і квазірезонансний понижуючий перетворювач [14]. Понижуючий перетворювач, показаний на рисунку 2.2а, відомий своєю здатністю знижувати напругу та одночасно регулювати вихідний сигнал. Однак у чистому вигляді його використання обмежене через втрати потужності на діодах та індуктивному фільтрі, особливо в системах зі значним струмом. Ці втрати можуть бути зменшені, замінивши діоди на синхронні випрямлячі та використовуючи методи роботи з чергуванням для мінімізації втрат на індуктивності. Незважаючи на те, що ці підходи можуть призвести до більшої кількості активних та пасивних пристроїв, вони дозволяють покращити ефективність перетворювача. Однак понижуючі перетворювачі можуть мати обмежену ефективність, особливо коли йдеться про підсилення від високої до надвисокої напруги при екстремальних коефіцієнтах навантаження. Тому було запропоновано різноманітні альтернативні типи перетворювачів, спрямованих на вирішення цієї проблеми.

Наприклад, для подолання вищезгаданих проблем траєкторія перемикання напівпровідникових пристроїв була модифікована шляхом поєднання

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 25   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |



## Рисунок 2.2 – Понижуючий перетворювач і квазірезонансні понижувальні перетворювачі

Рисунок 2.2 показує різні типи понижуючих перетворювачів та квазірезонансних понижуючих перетворювачів. На підписах до підграфіків представлені такі конфігурації: а) понижуючий перетворювач: це базова конфігурація понижувального перетворювача, яка використовується для зниження напруги на виході до необхідного рівня; б) квазірезонансний перетворювач з вимикачем нульової напруги: у цій конфігурації використовується квазірезонансний принцип роботи, а також вимикач нульової напруги, що дозволяє підвищити ефективність та знизити втрати енергії; в) квазірезонансний перетворювач з вимикачем нульової напруги; г) модифіковані перетворювачі: ці конфігурації представляють різні варіанти квазірезонансних перетворювачів з додатковими елементами або модифікаціями, які спрямовані на покращення ефективності, стабільності або інших характеристик системи. Цей рисунок демонструє різноманітність конструкцій та принципів роботи понижуючих та квазірезонансних перетворювачів, які використовуються для ефективного зниження напруги в електронних системах.

Перетворювачі на основі котушки індуктивності. На рисунку 3а показано, що індуктивність вихідного фільтра звичайного понижувального перетворювача замінено на індуктивність з відводами (ІВ), щоб надати додаткові можливості для керування підсиленням напруги перетворювача [14].

;;;У конфігурації понижувального перетворювача ІВ були внесені зміни з метою спрощення вимог до драйвера затвора [13]. Отриманий перетворювач став перетворювачем на зв'язаному індукторі, зі збереженням того ж самого коефіцієнта перетворення напруги. Однак, пульсації вихідного струму залишаються значними, що призводить до високих вимог до вихідного фільтра-

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 27   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

конденсатора. Також виникає переривчастий струм індуктивності при певних умовах навантаження, що призводить до наявності нулів на правій півплощині. Це ускладнює конструкцію контролера даного перетворювача.

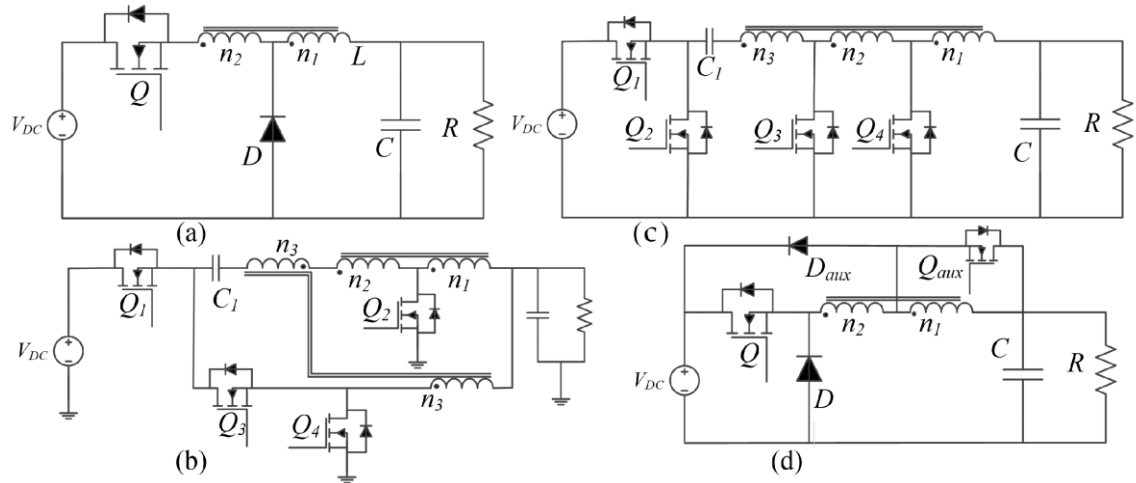


Рисунок 2.3 – Понижувальні перетворювачі на основі котушки індуктивності; а) – діодна котушка індуктивності, б) – триобмоткова котушка індуктивності з послідовним конденсатором, в) – стрічковий і з’єднаний перетворювач індуктивності та г) – індуктивність з відводами з допоміжним контуром

Для вирішення цих проблем розробили багатофазний понижуючий перетворювач, який можна побачити на рисунку 3б. Шляхом зміни точки відводу індуктора можна отримати різні коефіцієнти підсилення напруги. Для підвищення коефіцієнта підсилення напруги в перетворювачах з діодними

відводами можна використати додаткову третинну обмотку на котушці індуктивності та послідовний конденсатор, як зображено на рисунку 2.3в. Цей перетворювач є похідним від послідовного конденсаторного перетворювача ПІ, що був запропонований в [16].

Мінімізація пульсацій вихідного струму цих перетворювачів можлива за рахунок роботи у багатьох фазах. Для цього вихідний струм чергується на  $360^\circ/n$ , де  $n$  - кількість чергових фаз. Використання додаткових фаз потребує додаткових напівпровідникових та пасивних пристроїв, що створює додаткове навантаження для оптимізації перетворювача, особливо його ефективності.

З'єднані котушки індуктивності можуть допомогти зменшити магнітний об'єм перетворювача та покращити його продуктивність в стаціонарному і перехідному режимах. Крім того, коефіцієнт витягування обмотки можна регулювати для отримання необхідного коефіцієнта підсилення напруги, змінюючи коефіцієнт заповнення.

Для розширення коефіцієнта заповнення таких перетворювачів використовували відводи котушки індуктивності. Однак витік енергії з магнітних елементів погіршує продуктивність, і цю проблему можна, до певної міри, уникнути шляхом з'єднання цих елементів. Активні перемикачі, які використовуються для перемикання вхідної напруги, повинні мати високу напругу затвору і більшу опірність, що призводить до вищих провідникових втрат. Для розширення коефіцієнта заповнення таких перетворювачів було використано відводи котушки індуктивності, як це показано в [17]. Продуктивність таких з'єднаних індуктивних перетворювачів можна покращити за допомогою методів м'якого перемикання. З цією метою можна інтегрувати резонансні кола, як показано в [18]. Зв'язані котушки індуктивності можуть бути інтегровані в звичайний понижуючий перетворювач для отримання більшого коефіцієнта підсилення, як це було зроблено в [18]

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 29   |

## 2.2.2 Перетворювачі з комутаційною ємністю

У перетворювачах даного типу для передачі енергії використовуються конденсатори, що дозволяє підвищити щільність потужності цих перетворювачів. Однак розподіл заряду через конденсатор є експоненціальним, що призводить до певних недоліків у роботі отриманих перетворювачів. Для подолання цієї проблеми оригінальні перетворювачі цього типу було змінено шляхом інтеграції елемента, який має властивості поточного джерела, такого як перетворювач або індуктор. Отримані таким чином перетворювачі відомі як гібридні перетворювачі з комутованим резонатором та резонансними перетворювачами з комутаційним конденсатором (рисунок 2.4).

### Перетворювачі на основі комутації конденсаторів

Були розроблені перетворювачі, які використовують комутаційні мережі з конденсаторів для передачі потужності. Такі перетворювачі, відомі як комутовані конденсатори або перетворювачі типу "накачування заряду", дозволяють підвищити щільність потужності, уникаючи використання магнітних елементів.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 30   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

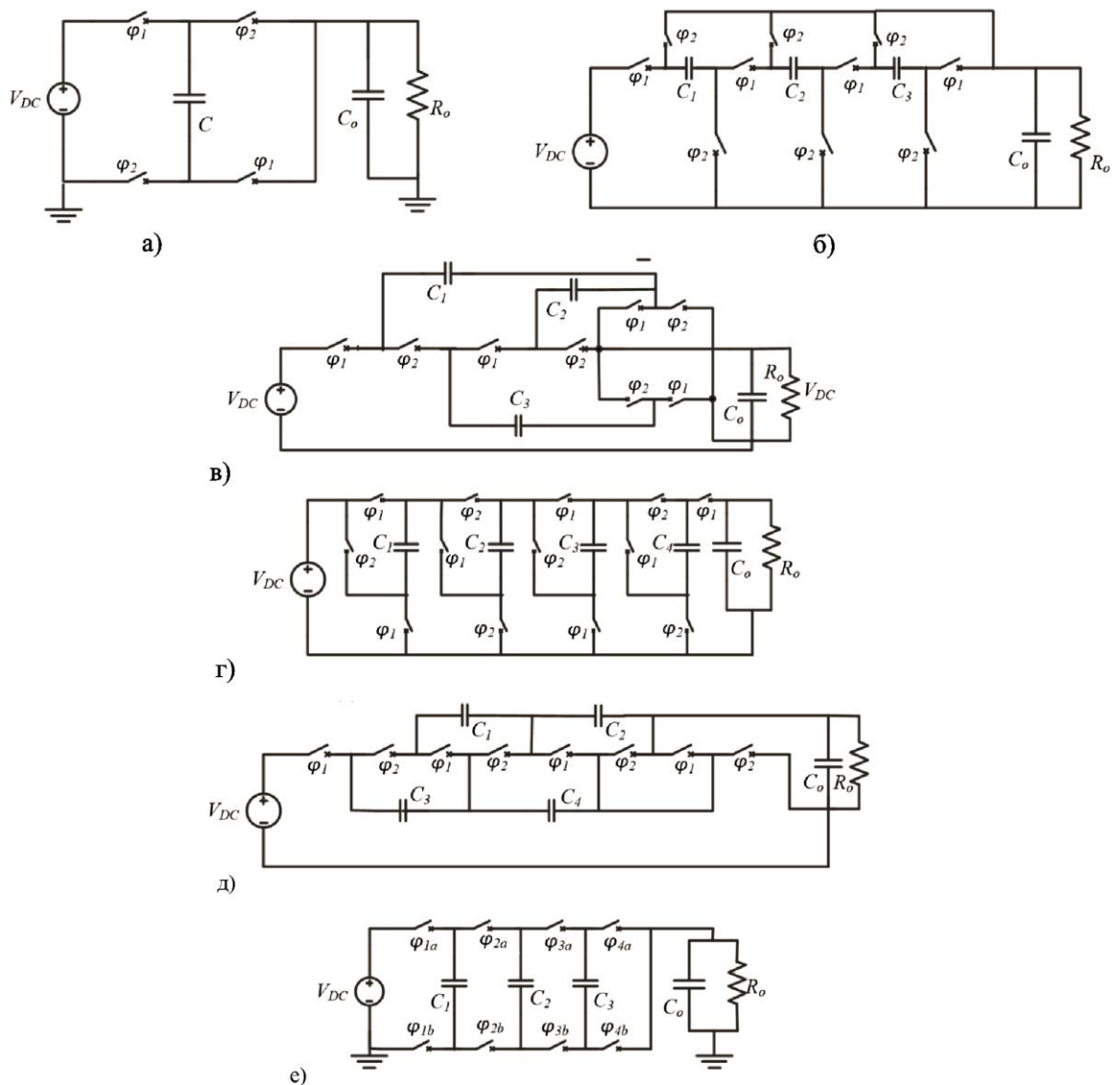


Рисунок 2.4 – Понижувальні перетворювачі на основі комутованих конденсаторів; а) – 2-до-1, б) послідовно-паралельний (4-до-1), в) – Діксона (4-до-1), г) – Фібоначчі (5-до-1), д) – сходи (4-до-1) і е) – багаторівневі перетворювачі з літаючими конденсаторами (4-до-1)

Існують різні мережі з комутацією конденсаторів, які можна каскадувати для отримання більшої ефективності. Однак такі перетворювачі мають високий рівень пульсацій вхідного та вихідного струмів, а також високий рівень електромагнітного шуму. Для подолання цих проблем запропоновано використання конденсаторного дільника напруги на вході, паралельний перетворювач, та чергування на виході. Керування вихідною напругою цих

перетворювачів здійснюється за рахунок зміни частоти перемикавання. Однак цей підхід може створювати проблеми з електромагнітними перешкодами. Для вирішення цих питань запропоновано стратегії керування на основі модуляції коефіцієнта заповнення, що дозволяють регулювати вихідну напругу. Також варто зазначити, що ці перетворювачі мають відносно низький коефіцієнт корисної дії з експоненціальним розподілом заряду між конденсаторами. У деяких дослідженнях було запропоновано метод керування розділеною фазою, що забезпечує однакову напругу на кожному конденсаторі на переході, використовуючи додатковий буферний каскад.

#### Резонансні перетворювачі з комутованим конденсатором

Іншим підходом для управління втратами у розподілі заряду є використання котушки індуктивності, розміщеної послідовно з конденсатором передачі енергії, що показано на рисунку 2.5а. Такий перетворювач називається перетворювачем з резонансним комутованим конденсатором (ReSC). Резонансна напівхвильова робота дозволяє досягти комутації нульового струму (ZCS) під час увімкнення та вимкнення. Індуктивність може бути інтегрована у багаторівневий перетворювач літаючого конденсатора. Ці перетворювачі можна каскадувати для отримання більшого коефіцієнта підсилення та збільшення щільності потужності. У випадку реалізації індуктора, його можна представити як один елемент (рисунку 2.5б) або розподілені елементи (рисунку 2.5в). Вихідний опір і втрати залежать від топології перетворювача і частоти комутації. Для регулювання вихідної напруги запропоновано використовувати методи керування мертвим часом на основі параметричного аналізу перетворювача. Контроль часу заряду конденсатора здійснюється з постійним часом розряду для регулювання вихідної напруги. Промодулювання щільності імпульсу також може бути використано для контролю вихідної напруги. Двофазна версія звичайних резонансних перетворювачів з комутованим конденсатором була

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 32   |

розроблена для зменшення пульсацій вихідної напруги та підвищення щільності потужності.

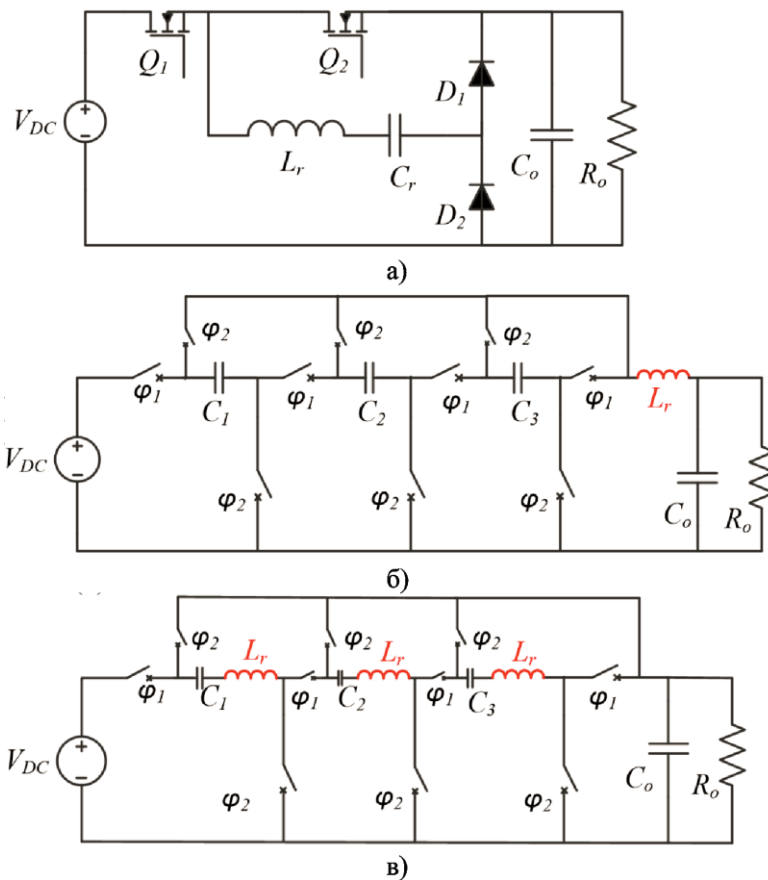


Рисунок 2.5 – Резонансні перетворювачі з перемиканням конденсаторів;  
 а) – базова форма, б) – з одним індуктором на виході та в) – з розподіленими індукторами

Перетворювачі на основі комутованих конденсаторів можуть бути поєднані з розподіленими котушками індуктивності, утворюючи клас перетворювачів, що дозволяють зниження напруги. Цей тип перетворювача відомий як перетворювач з комутованим резонатором (SwRC). На рисунку 2.6а показано перетворювач із двома резонансними мережами, які працюють на двох підінтервалах. Інша група конвертерів, названих конвертерами з комутаційним баком (STC), була запропонована на основі аналогічної концепції [17].

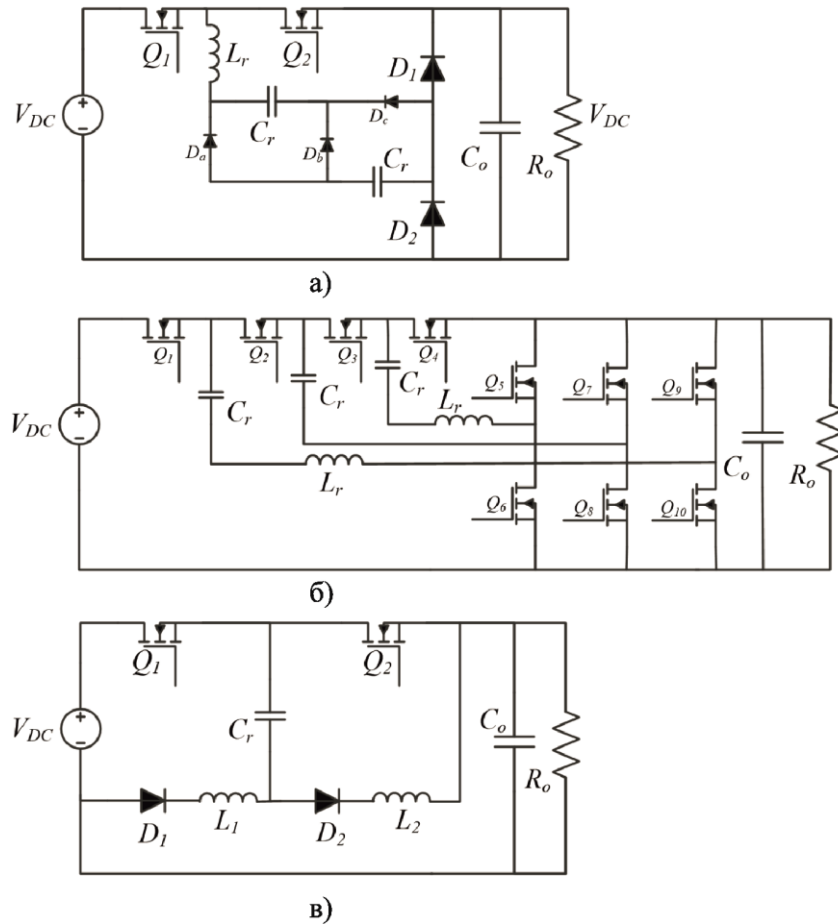


Рисунок 2.6 – Перетворювачі з комутованим резонатором: а) – базова конфігурація, б) – конвертер з комутаційним баком, і в) –перетворювач з комутованим резонатором з багаторежимними властивостями

На рисунку 2.6б представлений конвертер з іншою конфігурацією резонансного бака. Перетворювачі цього типу мають фіксоване підсилення напруги, що визначається балансом заряду конденсатора. Це одне з обмежень перетворювачів SC і ReSC. Однак, як вирішення цієї проблеми, пропонується використовувати кілька резонансних резервуарів для різних потужностей та режимів роботи, включаючи використання котушки індуктивності для регулювання вихідної напруги (рисунку 2.6в). Керування комутованими резонаторними перетворювачами може здійснюватися шляхом модуляції

коефіцієнта заповнення або частоти перемикавання, як це відбувається у звичайних перетворювачах DC-DC. Крім того, перетворювачі з комутованим резонатором, які мають широкий діапазон підсилення напруги, де діапазон коефіцієнта заповнення може бути регульований за допомогою взаємозв'язку між котушками індуктивності.

### 2.2.3 Гібридні перетворювачі

Котушки індуктивності вбудовуються у перетворювачі комутованих конденсаторів для контролю характеристик розподілу заряду. Коли частота комутації ( $f_s$ ) дорівнює резонансній частоті ( $f_r$ ) LC-кола, перетворювач працює в резонансному режимі і називається перетворювачем ReSC. При вищих значеннях частоти комутації, ніж резонансна частота, перетворювач переходить у багаторежимний, де індуктор працює як в резонансному. Якщо частота комутації значно перевищує резонансну частоту, котушки індуктивності працюють тільки в лінійному режимі, а отриманий перетворювач відомий як гібридний. У гібридних перетворювачах як індуктивність, так і конденсатор беруть участь у передачі потужності від входу до виходу. Ці перетворювачі можна класифікувати як одноканальні, двоканальні та багатофазні залежно від кількості шляхів передачі енергії, підключених до навантаження. Крім того, є ще два типи перетворювачів: понижуючі з послідовним конденсатором і трирівневі понижуючі перетворювачі.

### 2.2.4 Багатоступеневі перетворювачі

Ще одним способом досягнення високого коефіцієнта зниження є використання багатоступеневих перетворювачів. Зазвичай використовуються двокаскадні перетворювачі, щоб врахувати коефіцієнт корисної дії та питому

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 35   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

потужність. Перший етап можна реалізувати за допомогою нерегульованого перетворювача для забезпечення ефективності. Це може бути ізольований перетворювач LLC або неізольований перетворювач. В деяких випадках струмові навантаження та втрати мінімізуються за допомогою паралельних перетворювачів. Напруга першого етапу знижується за рахунок перетворювачів вхідної послідовності або трирівневих перетворювачів. Другий етап може бути з'єднаний з першим за допомогою потужного з'єднання постійного струму або віртуального з'єднання. Зменшення вимог до ємності кола постійного струму може бути досягнуте за рахунок використання перетворювачів з віртуальним з'єднанням постійного струму. Також можна застосовувати топологічно залежну стратегію керування перемиканням для оптимізації роботи перетворювача.

### 2.2.5 Високочастотні перетворювачі на основі трансформаторів

Використання топологій на основі високочастотного трансформатора дозволяє знизити вхідну напругу і забезпечити електричну ізоляцію між джерелом та навантаженням. Ці перетворювачі можуть бути частиною багатоступеневих систем або самостійними перетворювачами. У самостійних перетворювачах вони можуть мати різні конфігурації для досягнення необхідного підсилення [19]. Наприклад, повний міст зі зсувом по фазі (PSFB) може використовуватися як будівельний блок перетворювача з послідовним входом і паралельним виходом. У таких перетворювачах можна застосовувати подвійний активний міст (DAB), який є основним будівельним блоком, і використовувати різні стратегії керування, такі як стратегія з фазовим зсувом.

LLC-резонансні перетворювачі широко використовуються як нерегульовані перетворювачі через їх високу продуктивність на вибраній частоті комутації. Вони можуть використовувати звичайні або матричні трансформатори. Крім того, для підвищення ефективності обробки

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 36   |

електроенергії може бути використана часткова архітектура обробки потужності та відповідні топології перетворювача. Нерегульований шлях живлення перетворювача може бути реалізований за допомогою перетворювача LLC на основі матричного трансформатора, що дозволяє знизити опір постійному струму і підвищити ефективність.

### 2.3 Особливості роботи перетворювачів DC-DC у відновлюваних енергетичних системах

Перетворювачі постійного струму в постійний (DC-DC) відіграють ключову роль у відновлюваних енергетичних системах, де енергія генерується з сонячних панелей, вітрових турбін, гідроелектростанцій та інших джерел відновлюваної енергії. Ці системи вимагають надійного та ефективного управління енергією для забезпечення стабільного живлення споживачів та ефективного використання виробленої енергії.

Особливості роботи перетворювачів DC-DC у відновлюваних енергетичних системах включають:

Підвищення або зниження напруги: Перетворювачі DC-DC можуть здійснювати підвищення (boost), зниження (buck) або обидва типи перетворень напруги від відновлюваного джерела енергії до потрібного рівня для живлення споживачів або зберігання в акумуляторах.

Максимізація ефективності: Важливим аспектом роботи перетворювачів DC-DC є максимізація ефективності перетворення енергії. Це досягається шляхом зменшення втрат енергії під час процесу перетворення та оптимізації робочих параметрів перетворювача.

Управління потужністю та режимами роботи: Перетворювачі DC-DC повинні забезпечувати ефективне управління потужністю та працювати у різних режимах, відповідно до змінних умов виробництва енергії та потреб споживачів.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 37   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

Стабілізація напруги та підтримка різних напружових рівнів: Відновлювані енергетичні системи можуть потребувати стабільного живлення з різних напружових рівнів для різних типів споживачів. Перетворювачі DC-DC забезпечують стабілізацію напруги та можливість регулювання вихідного напружового рівня.

Гнучкість та масштабованість системи: Перетворювачі DC-DC повинні бути гнучкими та здатними масштабуватися для відповіді на зміни умов виробництва та потреб споживачів. Це включає в себе можливість підключення додаткових модулів перетворювачів для збільшення потужності або для роботи в різних конфігураціях.

Отже, перетворювачі DC-DC у відновлюваних енергетичних системах відіграють ключову роль у забезпеченні ефективного та стабільного живлення, максимізації використання виробленої енергії та забезпеченні гнучкості та масштабованості системи.

## 2.4 Висновок до другого розділу

У даному розділі розглянуто основні принципи роботи таких перетворювачів, їх класифікацію за топологіями, а також різні типи перетворювачів, такі як перетворювачі з комутаційною індуктивністю, з комутаційною ємністю, гібридні та багатоступеневі перетворювачі, а також високочастотні перетворювачі на основі трансформаторів.

Окрема увага була приділена особливостям роботи перетворювачів DC-DC у відновлюваних енергетичних системах. Ці системи вимагають від перетворювачів ефективного та надійного управління енергією для оптимального використання виробленої відновлюваної енергії. Перетворювачі DC-DC допомагають забезпечити стабільне живлення споживачів шляхом

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 38   |

підвищення або зниження напруги від відновлюваних джерел енергії, а також забезпечують ефективне управління потужністю та роботу в різних режимах.

Таким чином, розділ надає важливі теоретичні знання та класифікацію перетворювачів DC-DC, які є важливими для розуміння їх роботи та застосування у відновлюваних енергетичних системах

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 39   |

### 3 АНАЛІЗ І ПРИНЦИП ДІЇ ПОНИЖУВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІЗ РОЗШИРЕНИМ ДІАПАЗОНОМ РОБОЧОГО ЦИКЛУ В ОБЛАСТІ ПОНИЖУВАЛЬНИХ НАПРУГ ДЛЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

У сучасний час використання відновлюваних джерел енергії стає все більш важливим для декарбонізації виробництва електроенергії. Однак багато з цих джерел, таких як сонячні та вітрові установки, генерують відносно низькі вихідні напруги. У той же час, звичайні електричні мережі та навантаження вимагають значно вищих напруг. Для забезпечення сумісності між низьковольтними джерелами та високовольтними мережами використовуються індивідуальні перетворювачі живлення DC-DC.

Ці перетворювачі відіграють ключову роль у збільшенні впровадження відновлюваних ресурсів у енергетичні мережі. Вони знаходять широке застосування у промисловості, освітленні, побутовій електроніці та зарядці акумуляторів електромобілів.

У промислових застосуваннях перетворювачі DC-DC стабілізують вихідну напругу, необхідну для нормальної роботи навантаження, незалежно від змін вхідної напруги. Деякі останні розробки в цій області спрямовані на подолання обмежень і поліпшення характеристик перетворювачів, таких як пульсації напруги та струму, щільність потужності, ефективність і вартість.

Перетворювачі постійного струму в постійний струм відрізняються за такими характеристиками, як коефіцієнти підсилення напруги, режим роботи (одно- чи двонаправлений), ізоляція від мережі, а також тип живлення (струм або напруга).

Для фотоелектричних (PV) енергоресурсів або паливних елементів необхідно мати перетворювач DC-DC, який забезпечує високий коефіцієнт

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 40   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

підсилення напруги та високу ефективність. Це дозволяє підвищити низьку напругу, що генерується відновлюваними ресурсами, до необхідного рівня для подальшого використання.

Щоб досягти збільшення вихідної напруги, можна використовувати топологію підвищення, аналогічну тій, що використовується у класичному підвищувальному перетворювачі DC-DC. Однак багато топологій підвищення напруги мають обмеження через наявність паразитних елементів у котушках індуктивності, конденсаторах та перемикаючих напівпровідниках.

Більшість стандартних перетворювачів, таких як неізолювані понижувально-підвищувальні або ізолювані двотактні системи, мають значні обмеження, такі як великий коефіцієнт навантаження, низьку ефективність та обмежену роботу на високих частотах.

Для застосувань, які потребують широкого діапазону напруги, традиційно використовувалися трансформатори, які можуть бути низькочастотними або високочастотними. Проте використання трансформаторів призводить до ряду проблем, таких як індуктивність витoku, паразитні ємності та зниження ККД через втрати в обмотках та магнітних втрати.

У зусиллях зменшення об'єму та маси, а також підвищення ефективності, були розроблені безтрансформаторні топології. Ці топології використовують перетворювачі постійного струму, що розроблені для високого підсилення напруги.

Для розв'язання проблем, пов'язаних зі струмами витoku та безпекою людини під час обслуговування, були запропоновані альтернативні рішення на основі безтрансформаторних H-мостів. Проте ці альтернативні рішення, зазвичай, містять більше перемикачів живлення, що призводить до збільшення кількості компонентів та загальної вартості, разом зі збільшенням провідності та втрат на комутацію.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 41   |

Щоб подолати обмеження, накладені попередніми топологіями, було розроблено інші підходи для досягнення розширеного діапазону напруги. Ці підходи використовують різноманітні техніки, що базуються на складних методах підвищення напруги.

Більшість цих рішень використовують спеціальну техніку підвищення напруги на основі багаторівневих підвищувальних перетворювачів, систем з м'яким перемиканням з чергуванням, каскадних топологій перетворювачів постійного струму, комутованих індукторів і конденсаторних осередків, або поєднаних індукторних топологій.

Крім того, квадратичні понижувально-підвищувальні перетворювачі, які використовуються в різних сферах застосування, є ще одним ефективним підходом для отримання високого підсилення напруги.

В останні роки було запропоновано численні нові топології перетворювачів з метою розширення діапазону зниження напруги. Зазвичай такі перетворювачі призначені для регулювання діапазонів послаблення або зміни напруги вгору. Хоча ці нові конструкції спрямовані на підвищення підсилення та отримання високих значень напруги, у більшості з них область зниження обмежена дуже малим діапазоном робочих циклів.

Варто звернути увагу на можливість розширення понижувальної області, особливо в контексті розв'язання проблеми затінення фотоелектричних панелей, яка може виникати у з'єднаних колах. Кожна фотоелектрична панель у такій системі має свій власний мікроперетворювач DC-DC, що дозволяє відстежувати робочу точку максимальної потужності. Оскільки вихідна напруга фотоелектричних панелей залежить від сонячного випромінювання, затінення окремих панелей може призвести до суттєвого зниження вихідної потужності всієї системи. Використання мікроперетворювачів DC-DC, здатних працювати в понижувальній області, може допомогти у підтримці нормальної роботи системи

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 42   |

навіть під час затінення. Однак наразі обмежена кількість досліджень присвячена цьому питанню, і розроблені рішення мають складну структуру, що потребує подальшого дослідження та вдосконалення.

### 3.1 Аналіз технічних характеристик понижувального перетворювача

Відома топологія DC-DC понижувально-підвищувального перетворювача широко використовується у системах, де потрібна регулювання вихідної напруги відносно вхідної напруги  $U_{вх}$ . Цей тип перетворювача особливо актуальний для фотоелектричних генераторів, що працюють у затінених або снігових умовах. Зміни в опроміненні призводять до значних коливань як вихідної потужності, так і напруги фотоелектричних панелей.

Коли панель затінена, її напруга зменшується, а вироблена потужність різко впаде через зменшення струму насичення. Отже, перетворювач, підключений до фотоелектричної панелі, повинен адаптуватися, змінюючи свою робочу область для збереження стабільної напруги та потужності. У випадку послідовно з'єднаних кіл фотоелектричних панелей, де послідовний струм однаковий, перетворювач має працювати в понижувальній або підвищувальній області, щоб компенсувати втрати напруги чи потужності.

Представлений мікроперетворювач постійного струму розроблений для роботи переважно в розширеній понижувальній області. Однак, при необхідності через падіння напруги, він може працювати і в підвищувальній області. Як показано на рисунку 3.1 враховуючи всі компоненти як ідеальні та працюючі в режимі безперервної провідності (CCM), вихідна напруга перетворювача, позначена як  $U_{вих}$  у виразі (3.1), може коливатися від 0 до нескінченності для робочого циклу,  $\delta$ , з варіація між 0 і 1 [20].

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 43   |

$$U_{вих} = \frac{\delta}{1-\delta} U_{вх} \quad (3.1)$$

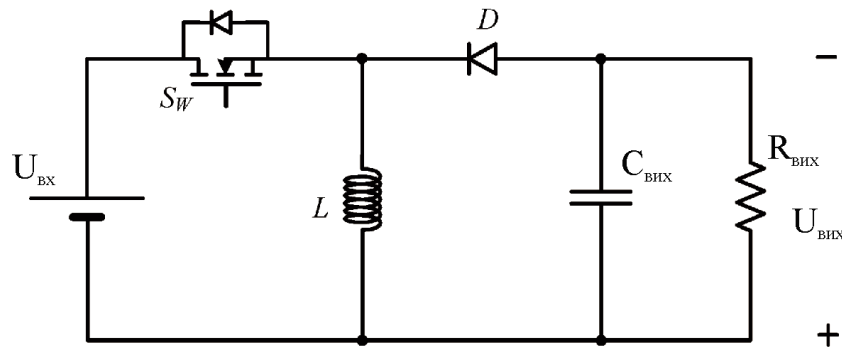


Рисунок 3.1 – Звичайний DC-DC понижуючий перетворювач

Для розширення діапазону робочого циклу у напрямку зниження вихідної напруги пропонується нова топологія мікроперетворювача постійного струму з підсиленням, яка представлена на рисунку 3.2. У порівнянні зі звичайними топологіями підсилення, ця нова топологія зберігає індуктивність підсилення та вимагає лише одного активного перемикача  $S_W$ . Проте, запропонований новий перетворювач має розширене статичне підсилення вихідної напруги в понижувальній області порівняно з традиційними понижуючими перетворювачами.

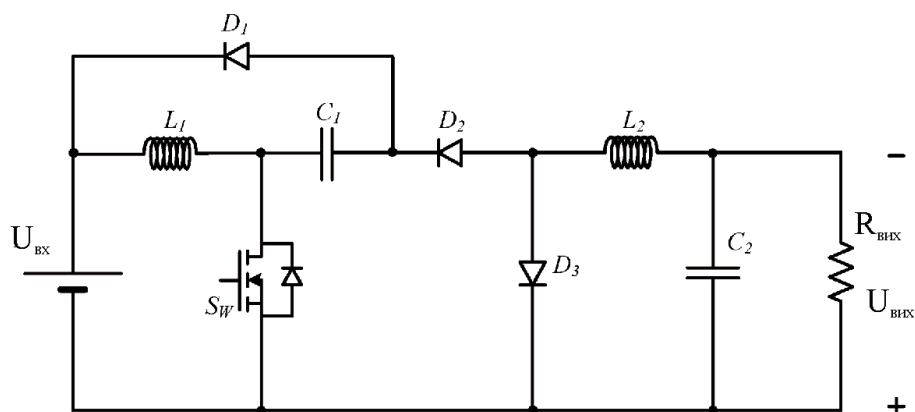


Рисунок 3.2 – Перетворювач постійного струму в постійний струм із подовженим робочим циклом в області підвищення вихідної напруги

Для ефективного відстеження точки максимальної потужності (МРР) фотоелектричними панелями важливо, щоб пульсації навколо цієї точки були дуже маленькими. Щоб зменшити пульсації перемикавання, більшість перетворювачів постійного струму повинні працювати в режимі безперервної провідності (ССМ) для даного набору котушок індуктивності та конденсаторів.

У режимі безперервної провідності аналіз розширеного понижувального перетворювача DC-DC показує два основні режими роботи, як показано на рисунку 3.3. У цих режимах, припускаючи всі компоненти ідеальними, де  $\delta$  – це робочий цикл, а  $T_s$  – період перемикавання, можна описати наступні два режими роботи.

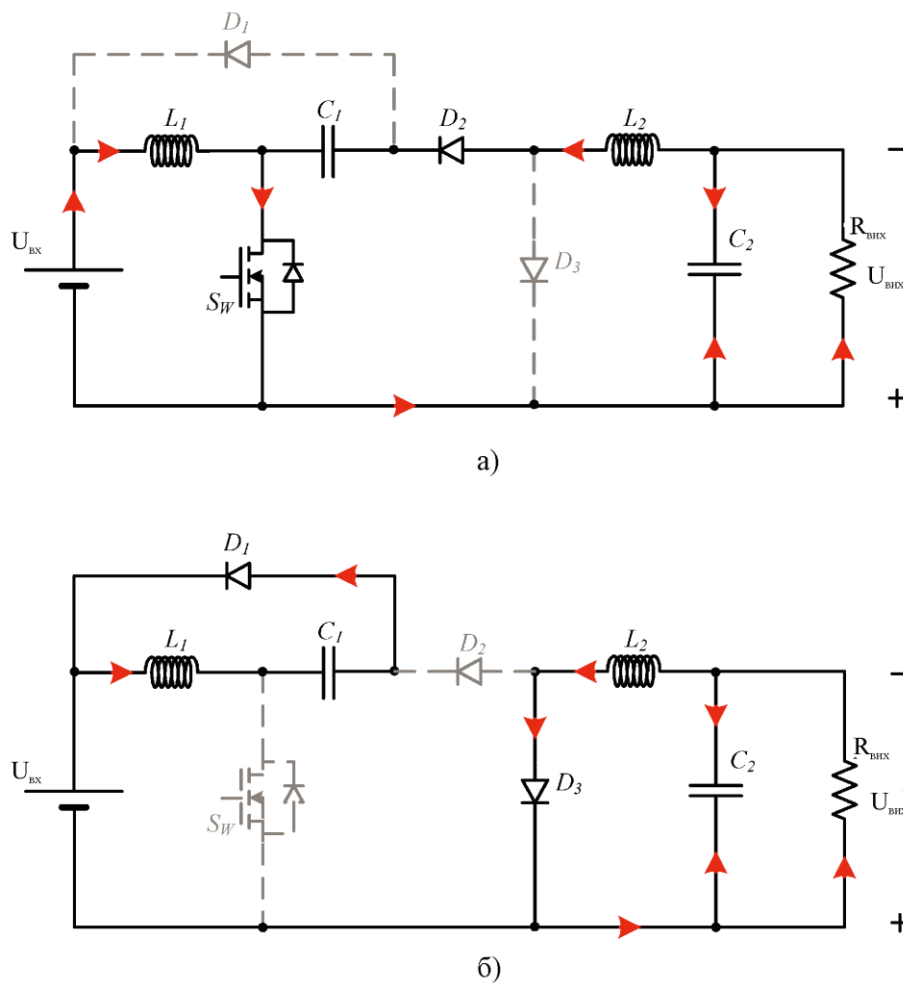


Рисунок 3.3 – Режимы работы перетворювача.

а) – режим 1 –  $S_w$  увімкнено; б) – режим 2 –  $S_w$  вимкнено

У першому режимі роботи, коли перемикач  $S_w$  увімкнено, він перебуває в стані увімкнення (увім) протягом інтервалу часу від 0 до  $\delta T_s$ . Під час цього інтервалу діод  $D_2$  також перебуває в стані увімкнення, тоді як діоди  $D_1$  і  $D_3$  знаходяться у стані зворотного зміщення. Під час роботи перемикача  $S_w$  в котушках індуктивності  $L_1$  і  $L_2$  накопичується енергія, а конденсатор  $C_1$  розряджається. Це призводить до збільшення струму в індуктивності  $L_1$  і зменшення напруги на конденсаторі  $C_1$ . Діод  $D_1$  має зворотне зміщення через те, що має негативну напругу від катода до анода, яка складається з суми джерела вхідної напруги та напруги на конденсаторі  $C_1$  ( $-U_1 - U_{C1}$ ). Так само, діод  $D_3$  також має зворотне зміщення через конденсатор  $C_1$ .

У другому режимі роботи, коли перемикач  $S_w$  вимкнено протягом інтервалу часу від  $(1 - \delta)T_s$ , він перебуває у стані вимкнення (вимк), тоді як діоди  $D_1$ ,  $D_2$  і  $D_3$  перебувають у стані увімкнення. Під час цього інтервалу запасена енергія в індуктивності  $L_1$  передається конденсатору  $C_1$ . Це призводить до зменшення струму в індуктивності  $L_1$  і збільшення напруги на конденсаторі  $C_1$ .

### 3.2 Принцип роботи у режимі безперервної провідності

Для отримання стаціонарного коефіцієнта підсилення напруги розширеного понижувального перетворювача DC-DC, було вивчено його роботу в стаціонарному режимі в умовах безперервної провідності (CCM) з ідеальними компонентами. У стаціонарному режимі середні напруги  $U_{L1}$  і  $U_{L2}$  індуктивностей  $L_1$  і  $L_2$  дорівнюють нулю протягом періоду перемикання. Враховуючи два режими роботи, зображені на рисунку 3.3, середні напруги обох котушок індуктивності, як функція робочого циклу  $\delta$ , визначаються наступними співвідношеннями:

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 46   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

$$U_{L1} = \delta U_{ex} + (1 - \delta) U_{C1} = 0 \quad (3.2)$$

$$U_{L2} = \delta(U_{вих} - U_{C1}) + (1 - \delta)U_{вих} = 0 \quad (3.3)$$

Щоб визначити коефіцієнт підсилення вихідної напруги, необхідно розв'язати попередні рівняння для отримання вихідної напруги  $U_{вих}$ , що залежить від вхідної напруги  $U_{вх}$  та параметра робочого циклу  $\delta$ .

$$U_{вих} = \frac{\delta^2}{1 - \delta} U_{ex} \quad (3.4)$$

За допомогою попереднього виразу можна підтвердити, що вихідна напруга може коливатися від нуля вольт до нескінченності в розширеному діапазоні робочого циклу  $\delta$ , що належить до інтервалу  $\delta \in (0, (\sqrt{5} - 1)/2)$  у області бака. Цей самий висновок підтверджується також з рисунка 3.4, де статичний коефіцієнт підсилення напруги  $U_{вих}/U_{вх}$  представлений як функція параметра робочого циклу  $\delta$ . Розширений понижуючий перетворювач постійного струму забезпечує вихідну напругу в понижувальній області приблизно від  $\delta \approx 0$  до  $\delta \approx 0.62$ , що розширює понижувальну область від  $\delta \approx 0.5$  (що є стандартом для звичайних систем понижувального підвищення)  $\delta \approx 0.62$ .

Згідно з виразом (3.4), теоретичне збільшення напруги може бути нескінченним у разі повного циклу наповнення. Проте, у реальності через неідеальності перетворювача це підсилення обмежується значенням, що не перевищує п'ять. Хоча запропонований конвертер має ширший діапазон витрат, порівняно зі звичайними топологіями, він все ж демонструє трохи менший максимальний коефіцієнт підсилення. Однак це невелике зменшення підсилення не погіршує його придатність як мікроперетворювача постійного струму для

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 47   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

фотоелектричних панелей, за умови, що кількість панелей в серії дозволяє кожній з них працювати в основному в понижувальній області.

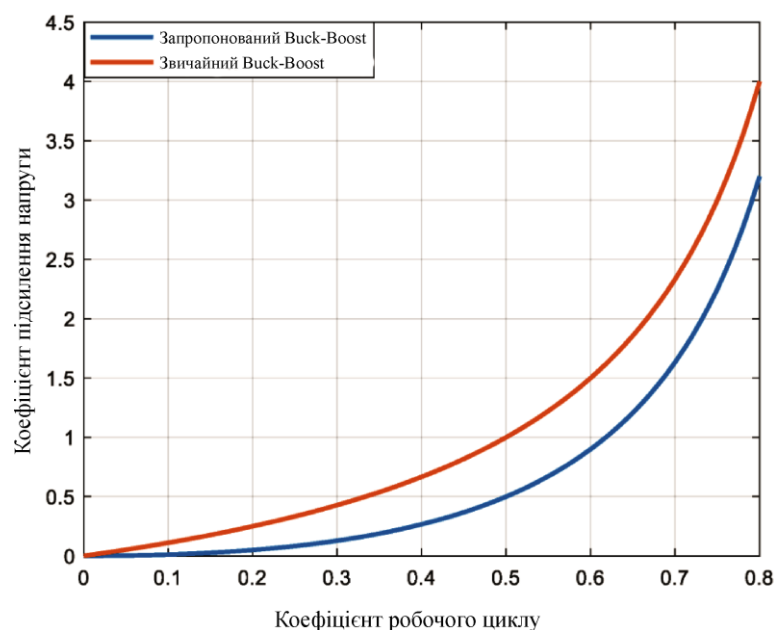


Рисунок 3.4 – Коефіцієнти підсилення напруги в традиційній та розширеній понижувальних областях систем зниження напруги

### 3.3 Висновок до третього розділу

У даному розділі було проведено аналіз технічних характеристик понижувального перетворювача із розширеним діапазоном робочого циклу для відновлюваних джерел енергії. Було досліджено принцип його роботи у режимі безперервної провідності.

Згідно з аналізом, понижуючий перетворювач із розширеним діапазоном робочого циклу представляє собою важливий елемент в системах, що використовують відновлювані джерела енергії. Його технічні характеристики дозволяють ефективно знижувати напругу від відновлюваних джерел до рівня, придатного для використання в електричних мережах.

Принцип роботи понижувального перетворювача у режимі безперервної провідності було детально проаналізовано, що дозволяє зрозуміти його робочі особливості та можливості в практичних застосуваннях. Отже, понижуючі перетворювачі з розширеним діапазоном робочого циклу є ключовим елементом в системах відновлюваної енергії, і їх аналіз та розуміння принципів роботи є важливими для подальшого вдосконалення та впровадження в енергетичні мережі.

|             |             |                 |               |             |                        |      |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|------------------------|------|
|             |             |                 |               |             | КВРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|             |             |                 |               |             |                        | 49   |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                        |      |

## 4 АНАЛІЗ І ПРОЕКТУВАННЯ РОЗШИРЕНОГО ПОНИЖУВАЛЬНОГО DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА

4.1 Конструкція індуктора та конденсатора для розширеного діапазону робочого циклу

Щоб забезпечити мінімізацію пульсацій у струмах і напругах перетворювача, індуктивність і ємність були підібрані з урахуванням цього фактора. Так, значення індуктивності  $L_1$  обирається таким чином, щоб забезпечити невелику амплітуду пульсацій струму  $\Delta I_{L1}$ , що порівняно мала відносно середнього значення  $I_{L1}$  протягом періоду  $1/f$ . Припускаючи час увімкнення та  $U_{вх}$  як напругу на котушці індуктивності, індуктивність  $L_1$  функціонально залежить від амплітуди пульсацій струму  $\Delta I_{L1}$ , як наведено у виразі (4.1)

$$L_1 = \frac{\delta U_{вх}}{\Delta I_{L1} f} . \quad (4.1)$$

Самоіндуктивність  $L_2$  може бути визначена використовуючи аналогічний метод, який використовується для визначення індуктивності  $L_1$ , і це відбувається за умови, коли перемикач живлення вимкнено і струм не проходить через індуктивність. Самоіндуктивність  $L_2$  визначається виходячи з амплітуди пульсацій струму  $\Delta I_{L2}$ , коли перемикач вимкнений, як це показано у формулі (4.2).

$$L_2 = \frac{U_{C1}(1-\delta)}{\Delta I_{L2} f} . \quad (4.2)$$

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 50   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

Такий же метод застосовувався для визначення розміру конденсатора  $C_1$  у розширеному понижувальному перетворювачі DC-DC [22]. Виходячи з невеликої пульсації напруги (в порівнянні з середньою напругою конденсатора  $C_1$ )  $\Delta U_{C1}$ , разом із достатньо малим еквівалентним послідовним опором і часом розряду конденсатора  $\Delta t_1$ , що залежать від робочого циклу  $\delta$ , і використовуючи  $U_{\text{вих}}$  і  $P_{\text{вих}}$  для позначення напруги навантаження та потужності відповідно, можна отримати вираз (4.3) для визначення ємності  $C_1$ .

$$C_1 = \frac{\Delta Q}{\Delta U_{C1}} = \frac{\Delta I_{L2}}{8\Delta U_{C1}f}. \quad (4.3)$$

Для визначення номіналу конденсатора  $C_2$  враховано зміну його заряду, що позначається як  $\Delta Q$ , яка виникає внаслідок його поточної пульсації  $\Delta I_{L2}$ .

$$C_2 = \frac{1}{\Delta U_{C2}} \frac{P_{\text{вих}}}{U_{\text{вих}}} \Delta t_1. \quad (4.4)$$

З точки зору визначення розмірів компонентів, за тими ж припущеннями, цей перетворювач підкоряється відносно схожим взаємозв'язкам, що й перетворювач Кука.

#### 4.2 Розгляд напруги та струму напівпровідника у контексті понижувального перетворювача

Напруження напруги ( $U_s$ ) на перемикачі живлення  $S_w$  отримано шляхом аналізу схеми в усталеному стані та врахування того, що ця напруга дорівнює

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 51   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

піковій напрузі конденсатора  $C_1$ . Виходячи з цього, та припускаючи, що конденсатор  $C_1$  має пульсації напруги  $\Delta U_{C1}$  і середнє значення  $U_{C1}$ , напруга на клеммах живлення перемикача, коли він розімкнений, визначається за наступною формулою (4.5):

$$U_s = U_{C1} + \frac{\Delta U_{C1}}{2} . \quad (4.5)$$

Номінальна напруга на діоді  $D_1$  дорівнює напрузі на перемикачі живлення  $S_w$  у вимкненому стані. Важливо відзначити, що, відповідно до рисунків 3.3, напруга на перемикачі та діоді  $D_1$  визначається мережею, що складається з джерела вхідної напруги  $U_{вх}$ , перемикача  $S_w$ , конденсатора  $C_1$  і діода  $D_1$ . Номінальна напруга на діоді  $D_2$  визначається вхідною напругою джерела  $U_{вх}$ . З рисунку 3.3б видно, що коли діоди  $D_1$  і  $D_3$  включені, напруга вхідного сигналу безпосередньо застосовується до діода  $D_2$ . Щодо номінальної напруги діода  $D_3$ , вона залежить від напруги на конденсаторі  $C_1$ . Коли діод  $D_3$  перебуває в режимі «вимкнено» (рис. 3.3а), а перемикач  $S_w$  знаходиться в положенні «увімкнено», конденсатор  $C_1$  безпосередньо прикладається до цього діода. Напруга на конденсаторі  $C_1$  може бути отримана з виразу (3.2) і виражена у виразі (4.6). Отже, номінальні напруги обох діодів ( $D_2$  і  $D_3$ ) визначаються у виразі (4.7).

$$U_{C1} = \frac{\delta}{1-\delta} U_{вх} . \quad (4.6)$$

$$\begin{cases} U_{D2} = U_{вх} \\ U_{D3} = U_{C1} \end{cases} . \quad (4.7)$$

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 52   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

Напруга струму силового перемикача  $S_w$  залежить від струму навантаження та робочого циклу, як вказано у виразі (4.8). Струм навантаження  $I_{вих}$  можна визначити на основі номінальної потужності перетворювача та значення робочої напруги вихідного DC/DC перетворювача, використовуючи консервативні оцінки [23].

$$I_{Sw} = \frac{\delta^2 I_{вих}}{1 - \delta} \quad (4.8)$$

Ці рівняння допомагають вибрати MOSFET-транзистори з невеликою напругою та великим струмом для використання в конкретних застосуваннях.

#### 4.3 Порівняльний аналіз з існуючими рішеннями

У таблиці 4.1 представлено порівняльний аналіз характеристик запропонованого перетворювача з відомими топологіями, які описані в літературі [24, 30-38]. Порівнюючи понижувально-підвищувальну топологію та кількість компонентів, які використовуються в кожній з них, можна побачити, що запропонований мікроперетворювач DC-DC виявився одним з топологій, що вимагають мінімальну кількість перемикачів та інших компонентів (за винятком класичної топології бак-буст). Запропонована топологія потребує лише одного комутаційного пристрою, що допомагає зменшити втрати на комутацію. Крім того, запропонована топологія розширює коефіцієнт підсилення напруги в області зниження від  $\delta \approx 0$  до  $\delta \approx 0,62$ . Топології, представлені в деяких джерелах, показали зменшення області зниження, тоді як інші, навпаки, демонстрували збільшення, подібне до конструкції, запропонованої в даній кваліфікаційній роботі. Однак топологія з розширеною областю зниження, яка

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 53   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

представлена в одному з джерел, вимагає більше одного комутатора та більше пасивних компонентів.

Таблиця 4.1 – Порівняння запропонованого рішення з іншими топологіями понижувального підвищення

| Топології                  |  |  |   |   |  |
|----------------------------|--|--|---|---|--|
|                            | Класична   | Buck-Boost<br>Інвертування                                   | Cuk – $I_{вих}$<br>безперервний                       | SEPIC – $U_{вих}$<br>може бути<br>нижчою або<br>вищою за $U_{вх}$ | Запропонована<br>топологія                           |
| Підсилення<br>напруги      | $\frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{\delta}{1-\delta}$ | $\frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{2\delta-\delta^2}{1-\delta}$ | $\frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{\delta}{2(1-\delta)}$ | $\frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{2\delta}{1-\delta}$               | $\frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{\delta^2}{1-\delta}$ |
| Бак діапазон               | 0,50   | 0,38   | 0,66  | 0,25  | 0,62   |
| Кількість<br>перемикачів   | 1  | 1  | 2   | 3   | 1  |
| Кількість<br>діодів        | 1  | 3  | 5   | 2   | 3  |
| Кількість<br>індукторів    | 1  | 2  | 2   | 2   | 2  |
| Кількість<br>конденсаторів | 1  | 2  | 3   | 1   | 2  |

#### 4.4 Результати моделювання та практичні експерименти

Поведінку розширеного понижувального перетворювача DC-DC досліджено за допомогою чисельних експериментів, проведених з використанням Power Systems Toolbox у програмному забезпеченні Matlab/Simulink. У цих моделюваннях значення компонентів, що використовуються для розширеного понижувального перетворювача DC-DC, були наступними: котушки індуктивності  $L_1 = 10$  мГн і  $L_2 = 10$  мГн, конденсатори  $C_1 = 20$  мкФ і  $C_2 = 100$  мкФ. Ці значення були обчислені за допомогою попередніх рівнянь, з використанням частоти перемикання 10 кГц. Отримані результати включають в себе дані як для режиму підвищення, так і для режиму пониження.

Результати моделювання, представлені на рисунках 4.1, 4.2, 4.3 і 4.4, відображають форми сигналів для перетворювача в усталеному стані в понижувальному режимі з робочим циклом 0,5. На рисунку 4.1 показано варіант, де вхідна напруга становила 100 В, а вихідна напруга складала 50 В. Ці результати підтверджують, що абсолютне значення вихідної напруги дорівнює половині вхідної напруги, що відповідає виразу (3.4) для статичного підсилення напруги.

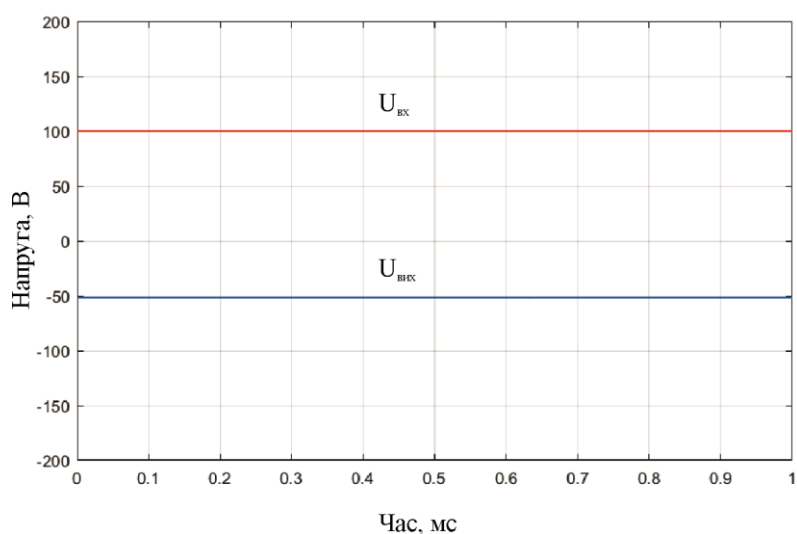


Рисунок 4.1 – Результати моделювання вхідної та інвертованої вихідної напруги в понижувальному режимі

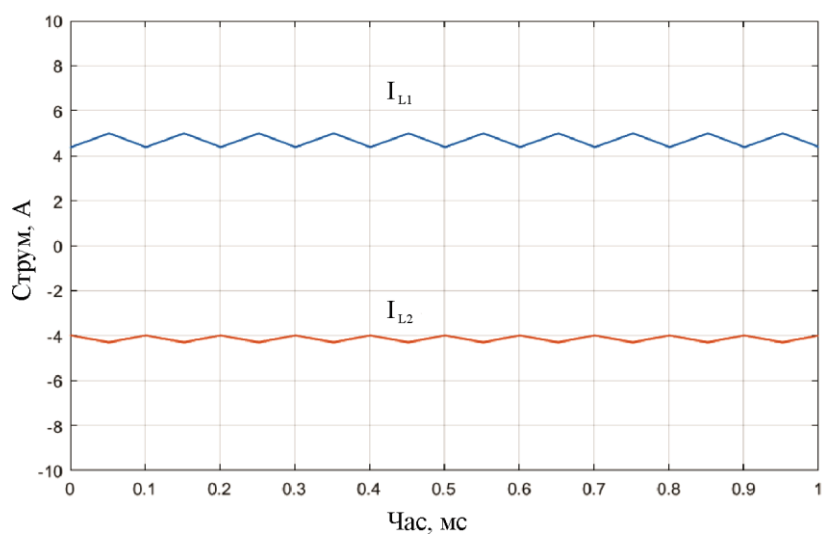


Рисунок 4.2 – Результати моделювання струмів індукторів  $L_1$  і  $L_2$  у понижувальному режимі

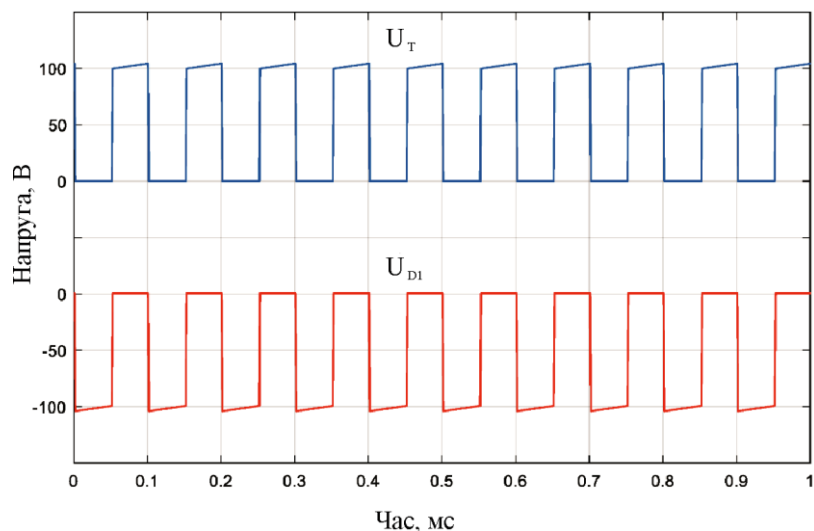


Рисунок 4.3 – Результати моделювання напруги на перемикачі живлення  $S_w$  і діоді  $D_1$  у режимі зниження

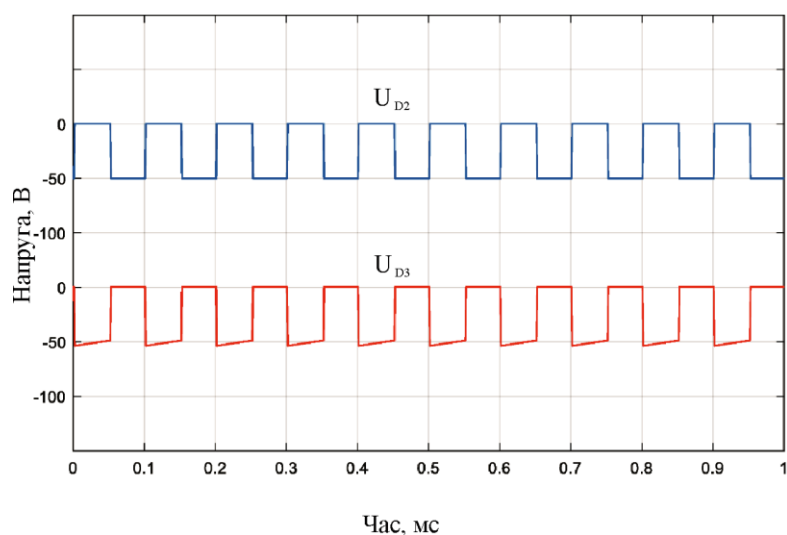


Рисунок 4.4 – Результати моделювання напруги на діодах  $D_2$  і  $D_3$  в режимі зниження

На рисунку 4.2 наведено результати моделювання струмів індуктивностей  $L_1$  і  $L_2$  у режимі зниження. З аналізу цих сигналів видно, що струми в обох котушках індуктивності проявляють безперервний режим провідності з невеликими пульсаціями в порівнянні з їх середнім значенням. Пульсації струму

в індуктивності  $L_2$  виявилися меншими, ніж у індуктивності  $L_1$ , оскільки остання була зв'язана з конденсатором  $C_2$ .

На рисунку 4.3 представлені напруги на вимикачі живлення та діоді  $D_1$ , а на рисунку 4.4 – напруги на діодах  $D_2$  і  $D_3$ . Аналізуючи останні форми сигналів, можна спостерігати, що діоди  $D_2$  і  $D_3$  працювали у комплементарних станах. Порівнюючи ці результати з напругою на вимикачі живлення та на діоді  $D_1$  (рис. 4.3), можна зауважити, що зворотна напруга на  $D_1$  за абсолютним значенням подвоює відповідні значення на діодах  $D_2$  і  $D_3$ .

Результати, представлені на рисунках 4.5, 4.6, 4.7 і 4.8, відображають форми сигналів для перетворювача в усталеному стані в режимі підвищення з робочим циклом 0,7. На рисунку 4.5 вхідна напруга близька до 100 В, а відповідна вихідна напруга становить приблизно 165 В, що підтверджує режим підвищення та теоретичні очікування.

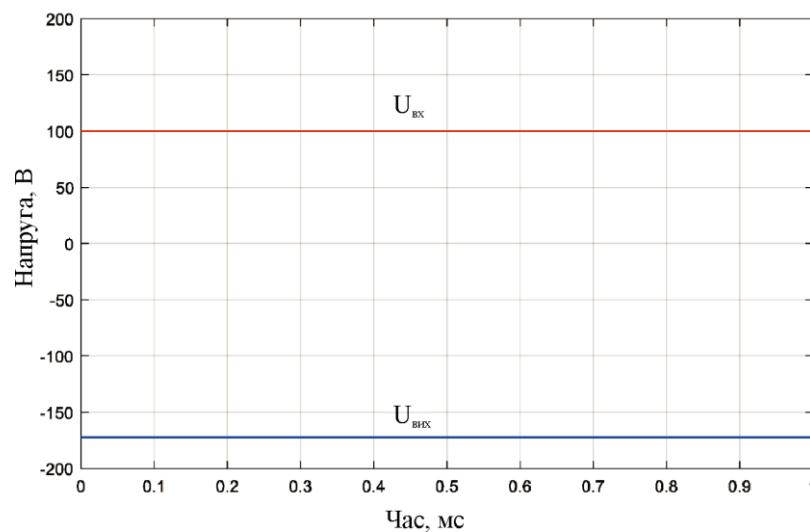


Рисунок 4.5 – Результати моделювання вхідної та інвертованої вихідної напруги в режимі підвищення

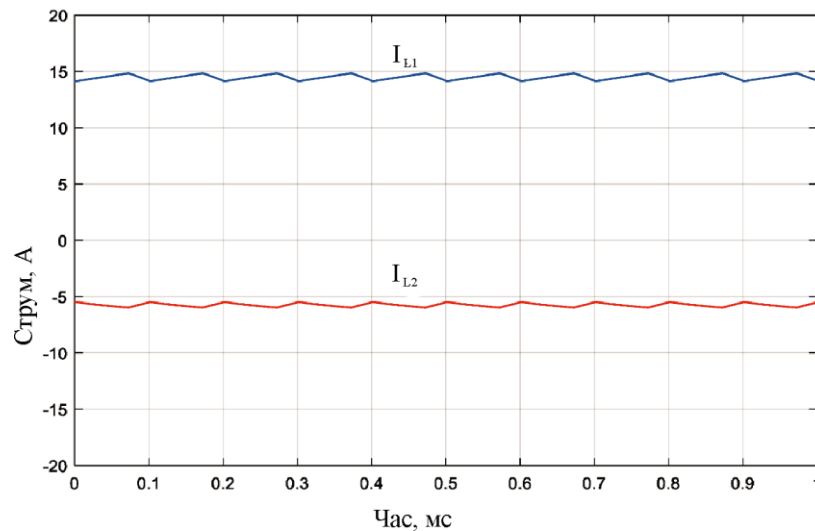


Рисунок 4.6 – Результати моделювання струмів індукторів  $L_1$  і  $L_2$  у режимі підвищення

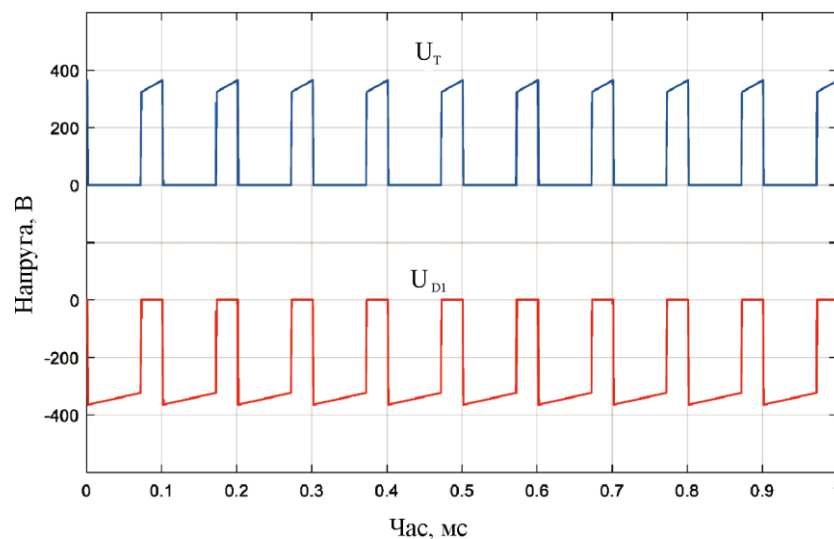


Рисунок 4.7 – Результати моделювання напруги на перемикачі живлення  $S_w$  і діоді  $D_1$  у режимі підвищення

На рисунку 4.6 наведені результати моделювання струмів індуктивностей  $L_1$  і  $L_2$  в режимі підвищення. З цих даних видно, що робота у режимі безперервної провідності була збережена. Напруга на силових напівпровідникових пристроях відображена на рисунках 4.7 і 4.8, що підтверджує очікувані характеристики режиму наддуву.

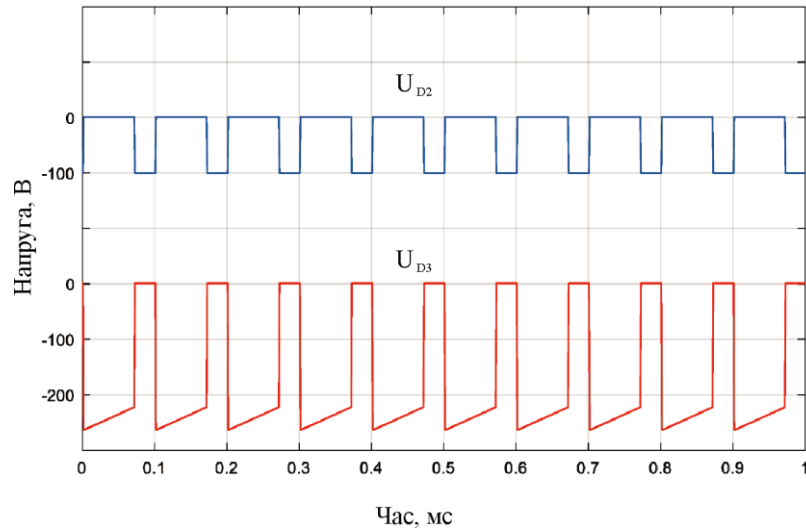


Рисунок 4.8 – Результати моделювання напруги на діодах D2 і D3 в режимі підвищення

Для оцінки продуктивності розширеного понижувального перетворювача DC-DC проведено дослідження в динамічних умовах. На рисунку 4.9 представлені результати, отримані при зміні вхідної напруги від 100 В до 70 В у момент часу  $t = 0,2$  с. При такій зміні вхідної напруги вихідна напруга також знижується за абсолютним значенням. Проте, для відновлення попереднього рівня вихідної напруги в момент часу  $t = 0,48$  с, значення пульсації було збільшено. Цей ефект чітко спостерігається на рисунку 4.9. Таким чином, відображено, що розширений понижувальний перетворювач демонструє здатність до ефективного управління напругою навіть у змінних умовах вхідного живлення.

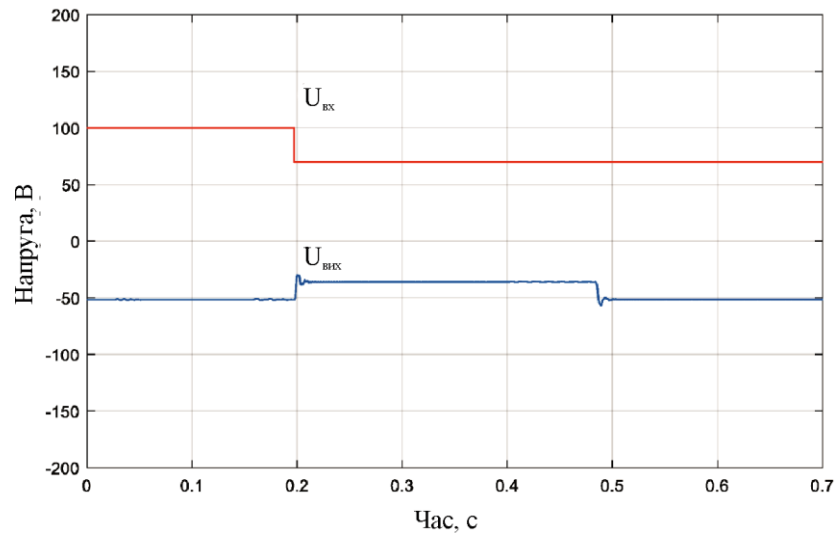


Рисунок 4.9 – Результати моделювання вхідної та інвертованої вихідної напруги в перехідному режимі

Завдяки аналізу цих результатів можна переконатися, що коли відбувається раптова зміна вхідної напруги, вихідна напруга зазнає збурень. Однак початкове значення можна відновити. На основі цього результату можна зробити висновок, що мікроперетворювач DC-DC реагує відповідно до змін вхідної напруги.

Було проведено ще одне випробування перехідних процесів, у цьому випадку беручи до уваги перетворювач, який працює як фотоелектричний генератор для підтримки вихідної напруги. Коли фотоелектрична панель затінена, її вихідна напруга зменшується. Так, при  $t = 0,2$  с вхідна напруга раптово падає від 100 В до 30 В, тоді як при  $t = 0,45$  с вона відновлюється до початкового значення напруги в безтіньових умовах. Для підтримки вихідної напруги необхідно змінити робочий цикл. На рисунку 4.10 представлено відповідні результати моделювання, де вхідна напруга постраждала від вищезгаданого падіння напруги, але вихідна напруга зберігалася, за винятком швидких і невеликих перехідних процесів. У цьому випадку мікроперетворювач постійного струму спочатку працював у понижувальній області, але змінився на

підвищувальну область під час падіння напруги, щоб підтримувати бажану вихідну напругу. Як показано на рисунку 4.10, конвертер все ще працює належним чином, навіть під час переходу між понижуючими та підвищуючими областями.

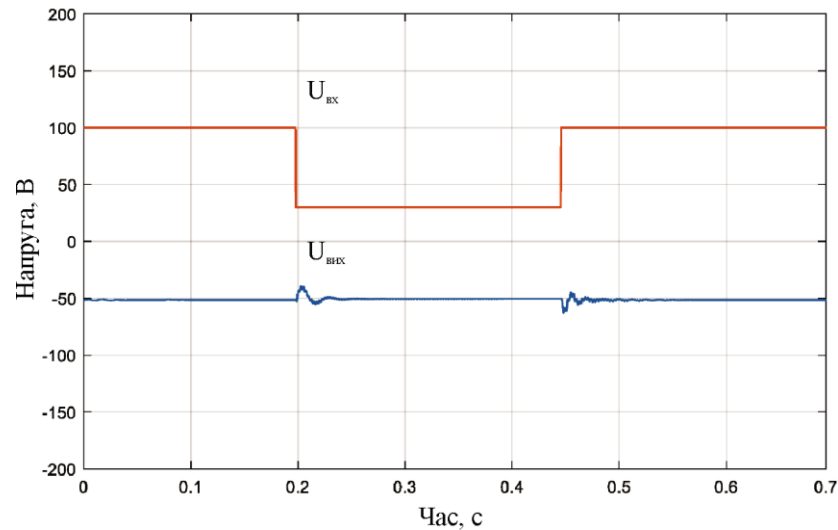


Рисунок 4.10 – Результати моделювання вхідної та вихідної напруги в перехідному режимі з огляду на роботу цього перетворювача з фотоелектричною системою

Проведено порівняльне дослідження щодо ефективності запропонованого мікро DC-DC перетворювача та класичних понижувально-підвищувальних перетворювачів. Дослідження включало два режими роботи: перетворювачі працювали в понижувальному режимі, а потім у режимі підвищення. У таблиці 4.2 наведено результати перевірки конвертера. Можна побачити, що ефективність запропонованої топології була подібною до ефективності топології SEPIC з майже такими ж значеннями. У підвищеній області ефективність запропонованого мікроперетворювача DC-DC майже досягла ефективності класичних перетворювачів зі зниженням ефективності менше ніж на 0,5%. Запропонований мікроперетворювач постійного струму в постійний струм може мати ККД на 2% нижчий (щонайбільше), ніж класичні перетворювачі.

Таблиця 4.2 – Ефективність запропонованої топології порівняно з деякими іншими понижуючими перетворювачами

| Buck-Boost<br>Інвертування |            | Сuk<br>Вихідний струм<br>безперервний |            | SEPIC<br>вихідна напруга<br>може бути нижчою<br>або вищою за вхідну |            | Запропонована<br>топологія |            |
|----------------------------|------------|---------------------------------------|------------|---|------------|----------------------------|------------|
| Бак                        | Підвищення | Бак                                   | Підвищення | Бак   | Підвищення | Бак                        | Підвищення |
| 93,7%                      | 97,5%      | 94,1%                                 | 97,6%      | 92,8%   | 97,3%      | 92,2%                      | 97,1%      |

#### 4.5 Висновок до четвертого розділу

У даному розділі було проведено аналіз та проектування розширеного понижувального DC-DC перетворювача з урахуванням потреб відновлюваних джерел енергії. Розглянута конструкція індуктора та конденсатора, які є ключовими компонентами для забезпечення розширеного діапазону робочого циклу перетворювача. Було розглянуто різні аспекти їхньої конструкції з метою оптимізації ефективності та надійності роботи системи.

Проведений розгляд напруги та струму напівпровідника у контексті понижувального-перетворювача. Були розглянуті особливості їхньої роботи та вплив на ефективність та надійність всієї системи. Проведений порівняльний аналіз з існуючими рішеннями на ринку. Це дозволило визначити переваги та недоліки розробленого перетворювача порівняно з аналогами, що існують на сьогоднішній день. Також представлені результати моделювання та практичні експерименти, що підтверджують ефективність розробленого рішення.

Отже, аналіз та проектування розширеного понижувального DC-DC перетворювача виявили його високий потенціал для впровадження у системи відновлюваних джерел енергії, а також підтвердили його конкурентоспроможність на ринку енергетичних технологій.

## ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи запропонована нова топологія для понижувального перетворювача постійного струму з розширеним діапазоном робочого циклу в понижувальній області. Запропонована топологія мікроперетворювача DC-DC використовує один керований перемикач живлення та розроблена для привілею понижувальної області шляхом розширення діапазону робочих циклів, дозволяючи вихідну напругу, нижчу за вхідну напругу, порівняно з діапазоном у класичному понижувальному перетворювачі. Це корисно для додатків, які вимагають вищої чіткості при низьких робочих циклах. Насправді запропонований перетворювач також дозволяє зменшити напругу на керованому вимикачі живлення та на діодах. Недоліком є те, що ККД, як правило, трохи нижчий, ніж у класичних перетворювачів з понижуючими характеристиками. Інший аспект полягає в тому, що на практиці, через неідеальну природу реактивних компонентів перетворювача та напівпровідників, підвищення підсилення обмежене, як у багатьох підвищуючих перетворювачах.

Завдяки характеристикам цієї топології він може забезпечити привабливе рішення для відстеження точки максимальної потужності у відновлюваних джерелах енергії, у випадках, коли фотоелектричні панелі низької напруги потребують послідовного з'єднання для досягнення вихідної напруги постійного струму, достатньої для живлення інверторів, підключених до мережі змінного струму. Завдяки розширенню діапазону робочого циклу в понижувальній області запропонований перетворювач дає змогу розробити серію фотоелектричних ліній з достатньо високою напругою для живлення інверторів змінного струму з використанням помірних робочих циклів (0,5–0,7). За наявності сильних коливань опромінення, наприклад, в умовах із тінями, розширений діапазон робочого циклу бокса буде корисним для точного відстеження точки максимальної потужності у всіх послідовно з'єднаних фотоелектричних панелях або для зниження потужності.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 63   |

Однією з ключових переваг запропонованої топології є її здатність розширити діапазон робочого циклу в понижувальній області, що робить її привабливим рішенням для додатків, які вимагають вищої чіткості при низьких робочих циклах. Крім того, ця топологія дозволяє зменшити напругу на керуваному вимикачі живлення та на діодах, що сприяє підвищенню ефективності роботи системи. Проте, слід зазначити, що ККД запропонованого перетворювача може бути трохи нижчим, ніж у класичних перетворювачах з понижуючими характеристиками.

В процесі дослідження використовувалися як теоретичні, так і експериментальні методи для вивчення характеристик та ефективності запропонованої топології. Впровадження цієї нової технології може мати широкі практичні застосування, зокрема в сонячних електростанціях та інших системах відновлюваної енергії, де необхідно точне відстеження точки максимальної потужності. Крім того, у випадках, коли фотоелектричні панелі низької напруги потребують послідовного з'єднання для досягнення вихідної напруги постійного струму, достатньої для живлення інверторів, ця топологія може бути особливо корисною.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 64   |

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Глазовський В.Ф., Клименко С.І., Коваль В.В. "Силова електроніка: підручник". - Київ: Видавничо-поліг.й центр "Київський університет", 2018.

2. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола: навч. посібник / В.С. Маляр. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 312 с.

3. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник для студентів вищ. закл. освіти, що навчаються за напрямками "Електромеханіка" та "Електротехніка": У 4-х т. / Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В., Юрченко М.М., Сенько Л.І., Ясінський В.В. -К.: ТОВ "Видавництво"Обереги", 2000. Т.1. Елементна база електронних пристроїв.– 300 с.

4. Основи електроніки і перетворювальної техніки: Навчальний посібник/ В.І.Костенко, О.О.Шавьолкін, О.М.Рак. За ред. В.І.Костенко. – Д.: ДонНТУ, 2002. – 110 с.

5. Мілих В.І., Шавьолкін О.О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. – К.: Каравела, 2007. – 688 с.

6. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум: Навч. посіб. /Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. За ред. А. Г. Соскова. 2-е вид. -К.: Каравела, 2004. -432 с.

7. Шавьолкін О.О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: Навчальний посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. 403 с.

8. Кириленко О.В., Жуйкою В.Я., Денисюк С.П., Рибіна О.Б. Системи силової електроніки та методи їх аналізу. – К.: Текст, 2006. – 488 с.

9. Жуйков В.Я., Рогаль В.В., Будьонний О.В., Пілінський В.В. Енергетична електроніка. Електронний підручник. – К.: 2008. – <http://fel.kpi.ua/lib/pidruchniki>

10. Bindra, A. Driven by Density, Efficiency at Low Cost, Power Integration Reaches New Heights. IEEE Power Electron. Mag. 2022, 9, 14–19.

11. Giasson, A.; Dokopoulos, S. Rethinking the Power Delivery Networks of Mobile Robots. IEEE Power Electron. Mag. 2020, 7, 12–18.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 65   |

12. Krein, P.T. Data Center Challenges and Their Power Electronics. CPSS Trans. Power Electron. Appl. 2017, 2, 39–46.

13. Fei, C.; Lee, F.C.; Li, Q. High-Efficiency High-Power-Density LLC Converter with an Integrated Planar Matrix Transformer for High-Output Current Applications. IEEE Trans. Ind. Electron. 2017, 64, 9072–9082.

14. Xue, F.; Yu, R.; Huang, A. A Family of Ultrahigh Efficiency Fractional Dc-Dc Topologies for High Power Energy Storage Device. IEEE 2021, 9, 1420–1427.

15. Chen, L.; Wu, H.; Xu, P.; Hu, H.; Wan, C. A High Step-down Non-Isolated Bus Converter with Partial Power Conversion Based on Synchronous LLC Resonant Converter. In Proceedings of the IEEE APEC, Charlotte, NC, USA, 15–19 March 2015; pp. 1950–1955.

16. Park, J.H.; Cho, B.H. The Zero Voltage Switching (ZVS) Critical Conduction Mode (CRM) Buck Converter with Tapped-Inductor. IEEE Trans. Power Electron. 2005, 20, 762–774.

17. Abramovitz, A.; Yao, J.; Smedley, K. Unified Modeling of PWM Converters with Regular or Tapped Inductors Using TIS-SFG Approach. IEEE Trans. Power Electron. 2016, 31, 1702–1716.

18. Yau, Y.T.; Jiang, W.Z.; Hwu, K.I. Ultrahigh Step-down Converter with Wide Input Voltage Range Based on Topology Exchange. IEEE Trans. Power Electron. 2017, 32, 5341–5364.

19. Gu, Y.; Zhang, D. Voltage Regulator Buck Converter with a Tapped Inductor for Fast Transient Response Application. IEEE Trans. Power Electron. 2014, 29, 6249–6254.

20. Yau, Y.T.; Jiang, W.Z.; Hwu, K.I. Bidirectional Operation of High Step-Down Converter. IEEE Trans. Power Electron. 2015, 30, 6829–6844.

21. Lee, I.; Cho, S.; Moon, G. Interleaved Buck Converter Having Low Switching Losses and Improved Step-Down Conversion Ratio. IEEE Trans. Power Electron. 2012, 27, 3664–3675.

22. Xu, P.; Wei, J.; Lee, F.C. Multiphase Coupled-Buck Converter - A Novel High Efficient 12 V Voltage Regulator Module. IEEE Trans. Power Electron. 2003, 18, 74–82.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРTP.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 66   |

23. Yao, K.; Qiu, Y.; Xu, M.; Lee, F.C. A Novel Winding-Coupled Buck Converter for High-Frequency, High-Step-Down DC–DC Conversion. *IEEE Trans. Power Electron.* 2005, 20, 1017–1024.

24. Ge, T.; Miao, Z.; Liu, L. Active Cross-Commutated (ACC) Buck Converter. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2022, 69, 2577–2587.

25. Hajiheidari, M.; Farzanehfard, H.; Adib, E. High-Step-Down DC–DC Converter with Continuous Output Current Using Coupled-Inductors. *IEEE Trans. Power Electron.* 2019, 34, 10936–10944.

26. Mahnashi, Y.; Peng, F.Z. Generalization of the Fundamental Limit Theory in a Switched-Capacitor Converter. *IEEE Trans Power Electron.* 2017, 32, 6673–6676.

27. Umeno, T.; Takahashi, K.; Oota, I.; Ueno, F.; Inoue, T. New Switched-Capacitor DC-DC Converter with Low Input Current Ripple and Its Hybridization. In *Proceedings of the IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems, Calgary, AB, Canada, 12–14 August 1990*; pp. 1091–1094.

28. Chung, H.S.-H.; Hui, S.Y.R.; Tang, S.C.; Wu, A. On the Use of Current Control Scheme for Switched-Capacitor DC/DC Converters. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2000, 47, 238–244.

29. Han, J.; von Jouanne, A.; Temes, G.C. A New Approach to Reducing Output Ripple in Switched-Capacitor-Based Step-down DC-DC Converters. *IEEE Trans. Power Electron.* 2006, 21, 1548–1555.

30. Seeman, M.D.; Sanders, S.R. Analysis and Optimization of Switched-Capacitor DC–DC Converters. *IEEE Trans. Power Electron.* 2008, 23, 841–851.

31. Cheong, S.V.; Chung, S.H.; Ioinovici, A. Duty-Cycle Control Boosts DC-DC Converters. *IEEE Circuits Devices Mag.* 1993, 9, 36–37.

32. Suetsugu, T. Novel PWM Control Method of Switched Capacitor DC-DC Converter. In *Proceedings of the IEEE ISCAS, Monterey, CA, USA, 31 May–3 June 1998*; Volume 6, pp. 454–457

33. Lei, Y.; May, R.; Pilawa-Podgurski, R. Split-Phase Control: Achieving Complete Soft-Charging Operation of a Dickson Switched-Capacitor Converter. *IEEE Trans. Power Electron.* 2016, 31, 770–782.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРРР.2021004.01.04 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 67   |

34. Rentmeister, J.S.; Stauth, J.T. A 48V: 2V Flying Capacitor Multilevel Converter Using Current-Limit Control for Flying Capacitor Balance. In Proceedings of the IEEE APEC, Tampa, FL, USA, 26–30 March 2017.

35. Ye, Z.; Lei, Y.; Pilawa-podgurski, R.C.N. The Cascaded Resonant Converter: A Hybrid Switched-Capacitor Topology With High Power Density and Efficiency. IEEE Trans. Power Electron. 2020, 35, 4946–4958.

36. Liu, W.C.; Ye, Z.; Pilawa-Podgurski, R.C.N. Comparative Analysis on Minimum Output Impedance of Fixed-Ratio Hybrid Switched Capacitor Converters. In of the IEEE COMPEL, Toronto, ON, Canada, 17–20 June 2019; pp. 1–7.

37. Lin, Y.-C.; Liaw, D.-C. Parametric Study of a Resonant Switched Capacitor DC-DC Converter. In Proceedings of the IEEE TENCON, Singapore, 19–22 August 2001; pp. 710–716.

38. Qiu, D.; Zhang, B.; Zheng, C. Duty Ratio Control of Resonant Switched Capacitor DC-DC Converter. In Proceedings of the IEEE ICEMS, Nanjing, China, 27–29 September 2005; pp. 1138–1141.

39. Cervera, A.; Mordechai Peretz, M. Resonant Switched-Capacitor Voltage Regulator with Ideal Transient Response. IEEE Trans. Power Electron. 2015, 30, 4943–4951.

40. Yeung, B.; Cheng, K.W.E.; Sutanto, D.; Ho, S.L. Zero-Current Switching Switched-Capacitor Quasiresonant Step-down Converter. IEE Proc. 2002, 111–121.

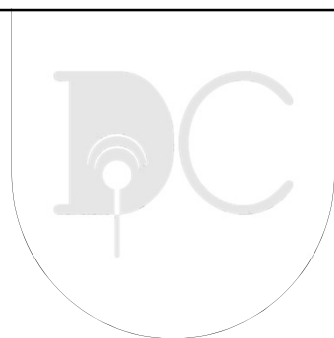
ДОДАТОК А  
Презентаційні матеріали

**ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Понижувальний перетворювач постійного струму**



Виконав:  
студент 3 курсу,  
група ТР1с-21-1  
Максим ЛАБУСЮК

Науковий керівник:  
к.ф.м.н., доцент  
Андрій СЕЛЬСЬКИЙ

**АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ:**

полягає в потребі розвитку більш ефективних та енергоефективних перетворювачів DC-DC

**МЕТА:**

дослідження понижуючих перетворювачів DC з розширеним діапазоном робочого циклу для підвищення ефективності

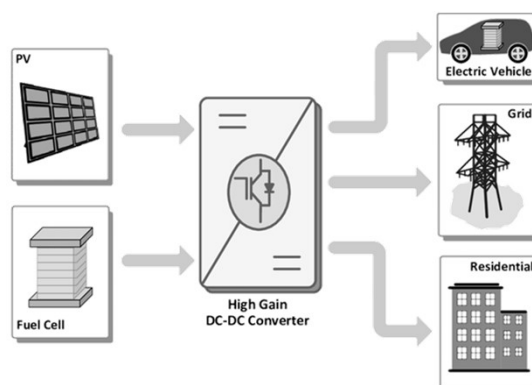
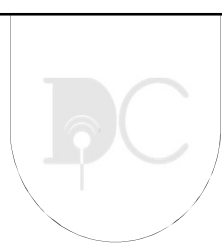


створення пристрою, який здатний понижувати вихідну напругу нижче вхідної, навіть при високому рівні заповнення цикл

**ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ:**

понижуючий перетворювач DC-DC

**Direct Current**



## DC-DC

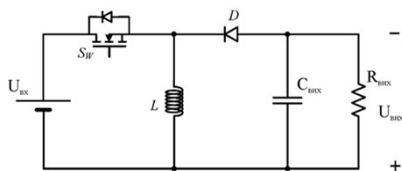


Рис. 1 – Звичайний DC-DC понижуючий перетворювач

Діапазон вихідної напруги перетворювача з урахуванням ідеальних компонент та роботи в режимі безперервної провідності:

$$U_{\text{вих}} = \frac{\delta}{1-\delta} U_{\text{вх}} \quad (1)$$

## АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОНИЖУЮЧОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

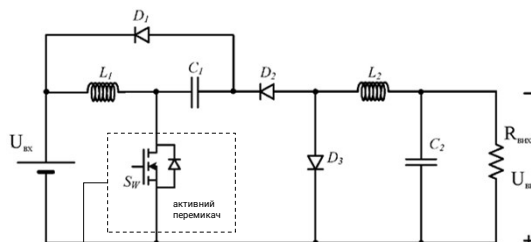


Рис. 2 – Перетворювач DC-DC із подовженим робочим циклом в області підвищення вихідної напруги

Щоб зменшити пульсації перемикання, перетворювач DC повинен працювати в режимі безперервної провідності

режим роботи перетворювача DC, в якому струм через індуктивність ніколи не знижується до нуля протягом періоду роботи

### Ключові моменти:

- Використання перетворювача DC-DC у фотоелектричних генераторах для забезпечення стабільної напруги та потужності.
- Перетворювач може адаптуватися до змін опромінення, забезпечуючи стабільну роботу.
- Можливість перетворювача працювати як в понижувальному, так і в підвищувальному режимах, залежно від потреби.
- Графічне відображення діапазону вихідної напруги для робочого циклу від 0 до 1 в режимі безперервної провідності.

3

## АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОНИЖУЮЧОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

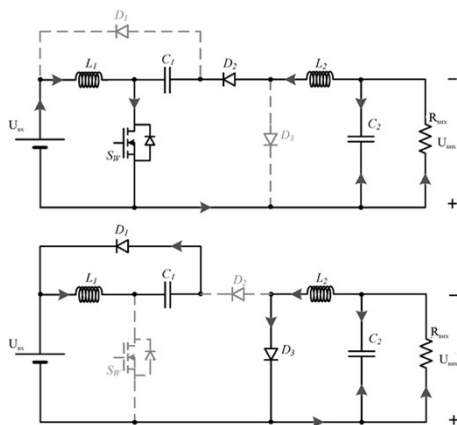


Рис. 3 – Режимы роботи перетворювача

а)

ON  $S_w$

ПЕРШИЙ РЕЖИМ РОБОТИ

- протягом інтервалу часу від 0 до  $\delta T_s$ .
- $D_2$  також перебуває в стані увімк.,
- $D_1$  і  $D_3$  знаходяться у стані зворотного зміщення.
- в  $L_1$  і  $L_2$  накопичується енергія;  $C_1$  розряджається → до збільшення струму в індуктивності  $L_1$  і зменшення напруги на конденсаторі  $C_1$

б)

$S_w$  OFF

ДРУГИЙ РЕЖИМ РОБОТИ

- протягом інтервалу часу від 0 до  $\delta T_s$ .
- протягом інтервалу часу від  $(1 - \delta)T_s$ ,
- $D_1$ ,  $D_2$  і  $D_3$  перебувають у стані увімк.
- енергія в  $L_1$  передається  $C_1$ . → зменшення струму в індуктивності  $L_1$  і збільшення напруги на конденсаторі  $C_1$

4

## ПРИНЦИП РОБОТИ У РЕЖИМІ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ПРОВІДНОСТІ

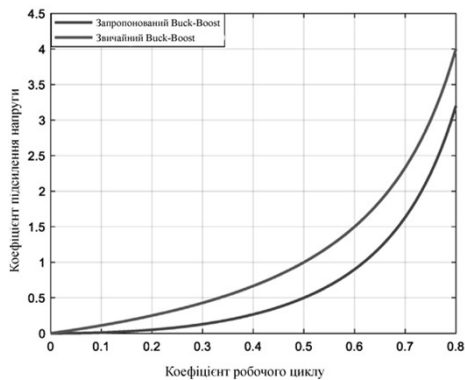


Рис. 4 – Коефіцієнти підсилення напруги в традиційній та розширеній понижувальних областях систем зниження напруги

Середні напруги обох котушок індуктивності, як функція робочого циклу  $\delta$

$$U_{L1} = \delta U_{ex} + (1 - \delta) U_{C1} = 0 \quad (2)$$

$$U_{L2} = \delta(U_{вих} - U_{C1}) + (1 - \delta)U_{вих} = 0 \quad (3)$$

Коефіцієнт підсилення вихідної напруги

$$U_{вих} = \frac{\delta^2}{1 - \delta} U_{ex} \quad (4)$$

$U_{вих}$  може коливатися від нуля вольт до нескінченності в розширеному діапазоні робочого циклу  $\delta$ , що належить до інтервалу

$$\delta \in (0, (\sqrt{5} - 1)/2)$$

Запропонований конвертер має ширший діапазон витрат, порівняно зі звичайними топологіями, він все ж демонструє трохи менший максимальний коефіцієнт підсилення

5

## АНАЛІЗ ІНДУКТОРА ТА КОНДЕНСАТОРА ДЛЯ РОЗШИРЕНОГО ДІАПАЗОНУ РОБОЧОГО ЦИКЛУ

Функціональна залежність індуктивності  $L_1$  від амплітуди пульсацій струму  $\Delta I_{L1}$

$$L_1 = \frac{\delta U_{ex}}{\Delta I_{L1} f} \quad (5)$$

Визначення самоіндуктивності  $L_2$  з урахуванням амплітуди пульсацій струму  $\Delta I_{L2}$  при вимкненому стані перемикача

$$L_2 = \frac{U_{C1}(1 - \delta)}{\Delta I_{L2} f} \quad (6)$$

Визначення ємності конденсатора  $C_1$  з урахуванням пульсації напруги та часу розряду

$$C_1 = \frac{\Delta Q}{\Delta U_{C1}} = \frac{\Delta I_{L2}}{8 \Delta U_{C1} f} \quad (7)$$

Визначення номіналу конденсатора  $C_2$  з урахуванням пульсації заряду

$$C_2 = \frac{1}{\Delta U_{C2}} \frac{P_{вих}}{U_{вих}} \Delta t_1 \quad (8)$$

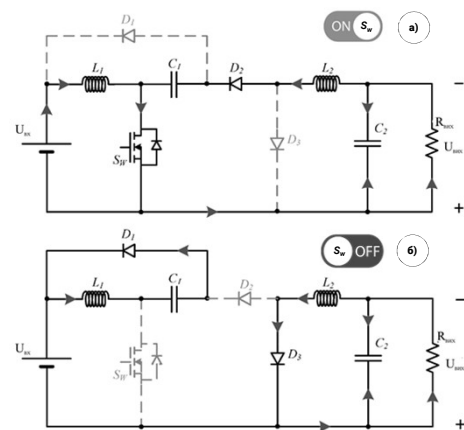


Рис. 3 – Режими роботи перетворювача

6

## АНАЛІЗ НАПРУГИ ТА СТРУМУ НАПІВПРОВІДНИКА У КОНТЕКСТІ ПОНИЖУЮЧОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Визначення напруги на клеммах живлення у вимкненому стані

$$U_s = U_{C1} + \frac{\Delta U_{C1}}{2} \quad (9)$$

Вираз для напруги на конденсаторі C1

$$U_{C1} = \frac{\delta}{1-\delta} U_{ex} \quad (10)$$

Визначення номінальних напруг діодів D2 і D3

$$\begin{cases} U_{D2} = U_{ex} \\ U_{D3} = U_{C1} \end{cases} \quad (11)$$

Визначення напруги струму силового перемикача Sw

$$I_{Sw} = \frac{\delta^2 I_{ex}}{1-\delta} \quad (12)$$

Ці рівняння допомагають вибрати MOSFET-транзистори з невеликою напругою та великим струмом для використання в конкретних застосуваннях.

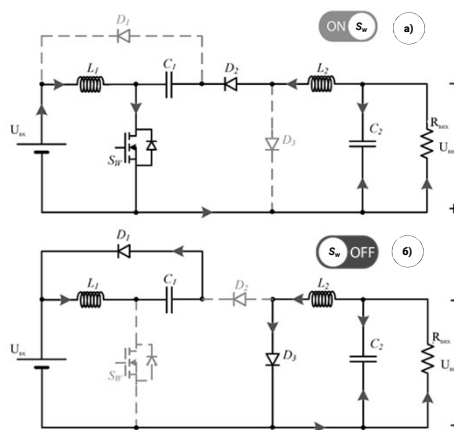


Рис. 3 – Режими роботи перетворювача

7

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ З ІСНУЮЧИМИ РІШЕННЯМИ

Табл. 1 – Порівняння запропонованого рішення з іншими топологіями понижувального підвищення, представленими в літературі

|                         | ТОПОЛОГІЇ  |  |   |   |  |
|-------------------------|--|--|---|---|--|
|                         | Класична   | Buck-Boost Інвертування  | Cuk - I <sub>вих</sub> безперервний                   | SEPIC- U <sub>вих</sub> може бути нижчою або вищою за U <sub>ex</sub> | Запропонована топологія                              |
| Підсилення напруги      | $\frac{U_{вих}}{U_{ex}} = \frac{\delta}{1-\delta}$ | $\frac{U_{вих}}{U_{ex}} = \frac{2\delta - \delta^2}{1-\delta}$ | $\frac{U_{вих}}{U_{ex}} = \frac{\delta}{2(1-\delta)}$ | $\frac{U_{вих}}{U_{ex}} = \frac{2\delta}{1-\delta}$                   | $\frac{U_{вих}}{U_{ex}} = \frac{\delta^2}{1-\delta}$ |
| Коефіцієнт підсилення   | 0,50   | 0,38   | 0,66  | 0,25  | 0,62   |
| Кількість перемикачів   | 1  | 1  | 2   | 3   | 1  |
| Кількість діодів        | 1  | 3  | 5   | 2   | 3  |
| Кількість індукторів    | 1  | 2  | 2   | 2   | 2  |
| Кількість конденсаторів | 1  | 2  | 3   | 1   | 2  |

8

## РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПОНИЖУЮЧОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Поведінку розширеного понижувального перетворювача DC-DC досліджено за допомогою чисельних експериментів

Форми сигналів для перетворювача в усталеному стані в понижувальному режимі з робочим циклом 0,5

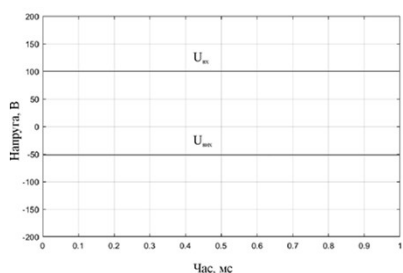


Рис. 5 – Результати моделювання вхідної та інвертованої вихідної напруги в понижувальному режимі

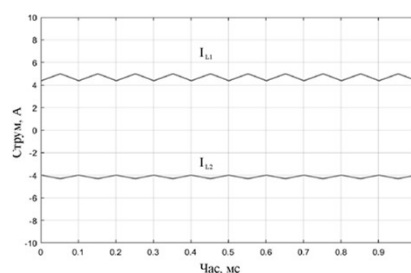
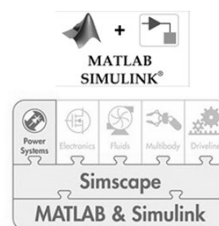


Рис. 6 –Результати моделювання струмів індукторів L<sub>1</sub> і L<sub>2</sub> у знижувальному режимі

Коефіцієнт підсилення вихідної напруги

$$U_{вих} = \frac{\delta^2}{1-\delta} U_{вх} \quad (4)$$



L<sub>1</sub> = 10 мГн  
L<sub>2</sub> = 10 мГн  
C<sub>1</sub> = 20 мкФ  
C<sub>2</sub> = 100 мкФ  
f = 10 кГц

Отримані результати включають в себе дані як для режиму підвищення, так і для режиму пониження

## РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПОНИЖУЮЧОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Поведінку розширеного понижувального перетворювача DC-DC досліджено за допомогою чисельних експериментів

Форми сигналів для перетворювача в усталеному стані в понижувальному режимі з робочим циклом 0,5

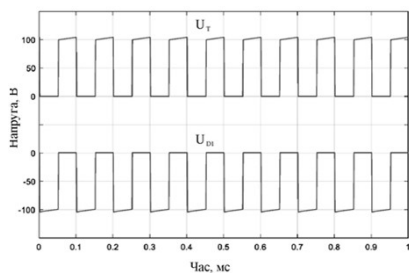


Рис. 7 – Результати моделювання напруги на перемикачі живлення S<sub>w</sub> і діоді D<sub>1</sub> у режимі зниження

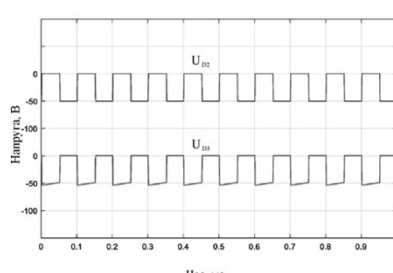
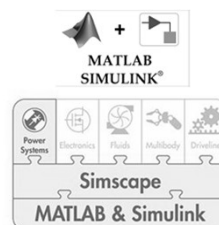


Рис. 8 –Результати моделювання напруги на діодах D<sub>2</sub> і D<sub>3</sub> в режимі зниження



L<sub>1</sub> = 10 мГн  
L<sub>2</sub> = 10 мГн  
C<sub>1</sub> = 20 мкФ  
C<sub>2</sub> = 100 мкФ  
f = 10 кГц

Отримані результати включають в себе дані як для режиму підвищення, так і для режиму пониження

## РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПОНИЖУЮЧОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Поведінку розширеного понижувального перетворювача DC-DC досліджено за допомогою чисельних експериментів

Форми сигналів для перетворювача в усталеному стані в режимі підвищення з робочим циклом 0,7

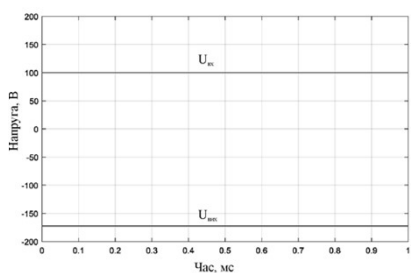


Рис. 9 – Результати моделювання вхідної та інвертованої вихідної напруги в режимі підвищення

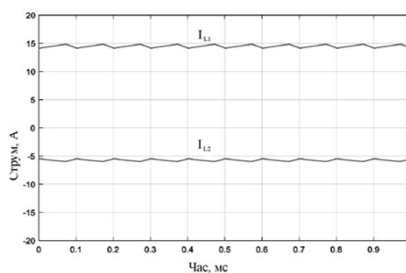
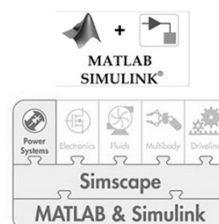


Рис. 10 –Результати моделювання струмів індукторів L<sub>1</sub> і L<sub>2</sub> у режимі підвищення



**L<sub>1</sub> = 10 мГн**  
**L<sub>2</sub> = 10 мГн**  
**C<sub>1</sub> = 20 мкФ**  
**C<sub>2</sub> = 100 мкФ**  
**f = 10 кГц**

Отримані результати включають в себе дані як для режиму підвищення, так і для режиму пониження

## РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПОНИЖУЮЧОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Поведінку розширеного понижувального перетворювача DC-DC досліджено за допомогою чисельних експериментів

Форми сигналів для перетворювача в усталеному стані в режимі підвищення з робочим циклом 0,7

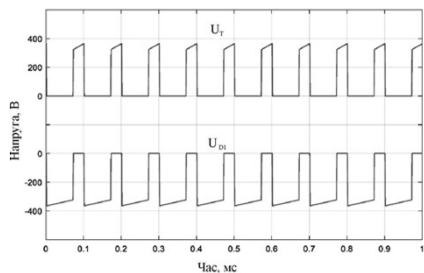


Рис. 11 – Результати моделювання напруги на перемикачі живлення S<sub>W</sub> і діоді D<sub>1</sub> у режимі підвищення

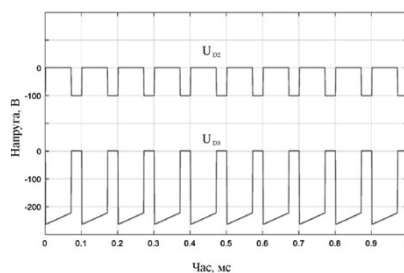


Рис. 12 –Результати моделювання напруги на діодах D<sub>2</sub> і D<sub>3</sub> в режимі підвищення



**L<sub>1</sub> = 10 мГн**  
**L<sub>2</sub> = 10 мГн**  
**C<sub>1</sub> = 20 мкФ**  
**C<sub>2</sub> = 100 мкФ**  
**f = 10 кГц**

Отримані результати включають в себе дані як для режиму підвищення, так і для режиму пониження

## РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПОНИЖУЮЧОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

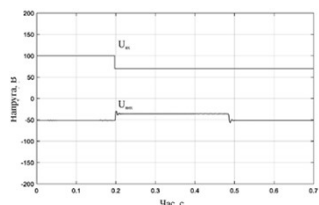


Рис. 13 – Результати моделювання вхідної та інвертованої  $U_{вих}$  в перехідному режимі

Форми сигналів для перетворювача в усталеному стані в режимі підвищення з робочим циклом 0,7

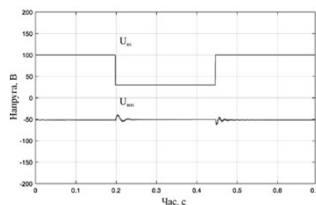


Рис. 14 – Результати моделювання  $U_{вх}$  та  $U_{вих}$  в перехідному режимі з огляду на роботу цього перетворювача з фотоелектричною системою

Табл. 2 – Ефективність запропонованої топології порівняно з деякими іншими понижуючими перетворювачами

| Buck-Boost<br>Інвертування |            | Сик<br>Вихідний струм<br>безперервний |            | SEPIC<br>вихідна напруга може<br>бути нижчою або вищою<br>за вхідну |            | Запропонована топологія |            |
|----------------------------|------------|---------------------------------------|------------|---|------------|-------------------------|------------|
| Бак                        | Підвищення | Бак                                   | Підвищення | Бак   | Підвищення | Бак                     | Підвищення |
| 93,7%                      | 97,5%      | 94,1%                                 | 97,6%      | 92,8%   | 97,3%      | 92,2%                   | 97,1%      |



$$L_1 = 10 \text{ мГн}$$

$$L_2 = 10 \text{ мГн}$$

$$C_1 = 20 \text{ мкФ}$$

$$C_2 = 100 \text{ мкФ}$$

$$f = 10 \text{ кГц}$$

Отримані результати включають в себе дані як для режиму підвищення, так і для режиму пониження

13

## ВИСНОВКИ

- Запропонована нова топологія перетворювача DC-DC із розширеним діапазоном робочого циклу в понижувальній області.
- Дозволяє отримувати вихідну напругу, що нижче за вхідну, що корисно для додатків з вимогами до високої чіткості при низьких робочих циклах.
- Зменшує напругу на керованому вимикачі живлення та на діодах, підвищуючи ефективність системи.
- ККД перетворювача може бути трохи нижчим, ніж у класичних перетворювачах.
- Підвищення посилення обмежене через неідеальну природу реактивних компонентів та напівпровідників.
- Має потенціал у відновлюваних джерелах енергії, де потрібне точне відстеження точки максимальної потужності.
- Застосовується у фотоелектричних панелях для досягнення вихідної напруги постійного струму для живлення інверторів.



14

**ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!**

МІНІСТЕРСТВО ОВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Лабусюк Максим Ігорович

Тема роботи: Понижувальний перетворювач постійного струму

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 67

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Мета кваліфікаційної роботи полягає в дослідженні та розробці понижуючих перетворювачів постійного струму з розширеним діапазоном робочого циклу для підвищення ефективності. Понижувально-підвищувальні перетворювачі постійного струму є важливими для забезпечення відновлюваних джерел енергії доступом до мережі постійного струму.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Кваліфікаційна робота відповідає виданому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: У відповідності до технічного завдання перший розділ розпочинається з чіткої загальної характеристики проблеми, що відзначається високим рівнем актуальності в сучасному енергетичному секторі. У другому розділі викладено основні принципи роботи перетворювачів DC-DC. Класифікація топологій перетворювачів відображає розмаїття підходів і надає чітке уявлення про особливості кожного типу. Третій розділ детально аналізує технічні характеристики і принципи роботи новітніх понижуючих перетворювачів, що працюють в області відновлюваних джерел енергії. У четвертому розділі особлива увага приділяється конструкції індуктора та конденсатора, що використовуються для досягнення розширеного діапазону робочого циклу. Порівняльний аналіз з існуючими рішеннями виявляє переваги запропонованого підходу. Результати моделювання та практичні експерименти підтверджують ефективність і доцільність запропонованих технічних рішень. Ці розділи свідчать про високий рівень підготовки автора і його глибоке розуміння проблеми. Використання сучасних досягнень науки та передових методів роботи гарантує актуальність і наукову цінність роботи.

4. Позитивні сторони роботи: Робота включає комплексний аналіз існуючих методів і технологій у сфері DC-DC перетворювачів, що відображається в ретельному порівняльному аналізі із передовими науковими та інженерними рішеннями. Висновки та рекомендації автора щодо оптимізації систем перетворення струму мають практичну спрямованість і можуть бути використані для подальшого розвитку сучасних енергетичних технологій.
5. Негативні сторони роботи: Недостатня кількість або якість практичних прикладів або деталей реалізації описаних технічних рішень.
6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає
7. Відгук про роботу в цілому: Охоплено актуальні проблеми в сфері понижуючих перетворювачів DC-DC, їх потребу у вдосконаленні та сучасні технологічні рішення. Кожен розділ чітко структурований, засвідчуючи глибоке теоретичне осмислення предметної області та впровадження передових підходів у дослідження. Аналіз і порівняльний аналіз існуючих технологій відображають широкий огляд літературних джерел та інженерних рішень.
8. Інші зауваження: немає
9. Оцінка кваліфікаційної роботи: Кваліфікаційна робота відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки добре (3,75/С), а її автор Лабусюк М.І., присвоєння кваліфікації бакалавра зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка»
10. Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, місце роботи) Мишан Віктор Володимирович –к.т.н., доцент кафедри ТМІТ

«15» червня 2024р.



підпис

Ім'я користувача:  
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:  
1016372198

Дата перевірки:  
18.06.2024 16:57:41 EEST

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:  
19.06.2024 01:49:24 EEST

ID користувача:  
100005862

Назва документа: Лабусюк\_антиплагіат

Кількість сторінок: 70 Кількість слів: 11889 Кількість символів: 97043 Розмір файлу: 2.52 MB ID файлу: 1016179466

1258 слів позначені як "вилучені" та не враховуються у підрахунку слів

## 1.03% Схожість

Найбільша схожість: 0.3% з Інтернет-джерелом (<http://catalog.liha-pres.eu/index.php/liha-pres/catalog/download/242/6..>)

0.79% Джерела з Інтернету

93

Сторінка 72

0.43% Джерела з Бібліотеки

16

Сторінка 72

## 0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

## 0.01% Вилучень

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

0.01% Вилучення з Інтернету

4

Сторінка 73

0% Вилученого тексту з Бібліотеки

2

Сторінка 73

## Модифікації

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

Замінені символи

116

# Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 0.0%

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилки в документах: 7%

|   |          |         |                             |         |
|---|----------|---------|-----------------------------|---------|
| ID: 131431<br>Назва: БКР Понижувальний перетворювач постійного струму<br>Додано в БД: 2024-06-19<br>Автора: Максим ЛАБУСЮК<br>Керівники: Андрій СЕЛЬСЬКИЙ<br>Консультанти:<br>Опоненти: | Документ |         | Сумарний збіг по Базі Даних |         |
|   | Символи  | Лексеми | Символи                     | Лексеми |
|   | 84154    | 592     | 787 (1%)                    | 12 (2%) |

## Джерело плагіату

| ID | Опис | Наявність плагіату в документі |         |
|----|------|--------------------------------|---------|
|    |      | Символи                        | Лексеми |

Завідувачу кафедри АКІТтаР  
д-ру техн. наук, проф. Мартиноку В.В.

Лабусюк М.І.

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи АКІТ-20-1

### ЗАЯВА

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

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

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

03.06.2024

дата



підпис

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

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

Назва: Понижувальний перетворювач постійного струму

Автор: Лабунюк Максим Ігорович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма: Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології

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

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

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

Підтвердження:

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

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

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

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 1.03% і адресується до 20 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

Валерій МАРТИНЮК

Денис МАКАРИШКІН

Андрій СЕЛЬСЬКИЙ