

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

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Бакалавр

Освітній рівень

Імпульсно-хвильовий випрямляч для забезпечення  
стабільності та ефективності енергопостачання

Назва теми

КвРТР.2021005.01.05 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:

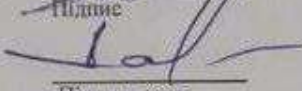
студент III курсу, група ТР1с-21-1

  
Підпис

Костянтин ЛЯШКО

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

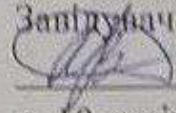
«19» червня 2024р.

Хмельницький, 2024

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКТтаР

 Валерій МАРТИНОК

« 10 » січня 2024 р

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

ЛЯШКУ Костянтину Володимировичу

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

1 Тема роботи: Імпульсно-хвильовий випрямляч для забезпечення стабільності та ефективності енергопостачання

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

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

2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру 01 червня 2024 року


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

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Огляд систем бездротової передачі енергії; теоретичні моделі для оцінки ефективності випрямлення на основі безперервних хвиль; аналіз ключових компонентів бездротових технологій; вдосконалення та оцінка імпульсно-хвильового випрямляча.

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

1. Еквівалентна схема діода з подвоєнням напруги. 2. Структурна випрямляча зі збільшенням напруги. 3. Моделювання ефективності схеми випрямлення

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)

Костянтин ЛЯЦКО

Андрій СЕЛЬСЬКИЙ

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Імпульсно-хвильовий випрямляч для забезпечення стабільності та ефективності енергопостачання»

Автор роботи: Ляшко Костянтин Володимирович.

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

Пояснювальна записка: 68 сторінок, 30 рисунків, 1 таблиця, 40 джерел.

Графічна частина: технічне креслення.

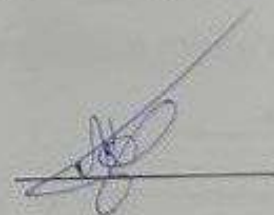
**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ВИПРЯМЛЯЧ ІМПУЛЬСНОЇ ХВИЛІ, ДІОД ШОТТКІ, ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИПРЯМЛЕННЯ, ОПІР НАВАНТАЖЕННЯ, РОБОЧИЙ ЦИКЛ, МІКРОХВИЛЬОВА ЕКВІВАЛЕНТНА СХЕМА, БЕЗДРОТОВА ПЕРЕДАЧА ЕНЕРГІЇ, ЕЛЕКТРОНІКА З НИЗЬКИМ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ.

Об'єктом дослідження є випрямляч імпульсної хвилі на основі діода Шотткі.

Метою кваліфікаційної роботи є вивчення, аналіз та оптимізація випрямляча імпульсної хвилі на основі діода Шотткі, з фокусом на залежності ефективності випрямлення від опору навантаження та робочого циклу.

У даній кваліфікаційній роботі проаналізовано випрямляч імпульсної хвилі на основі діода Шотткі з використанням мікрохвильової еквівалентної схеми. Встановлено, що ефективність випрямлення залежить від опору навантаження; при зміні робочого циклу ефективність може досягати 76,1%, але при безперервній хвилі вона різко знижується до 3,9%. Розроблений випрямляч характеризується простою конструкцією та компактними розмірами, що робить його привабливим для бездротової передачі інформації та енергії в електроніці з низьким енергоспоживанням.

01.06.2024 р.



## ЗМІСТ

|  |      |
|--|------|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....  | С. 4 |
| ВСТУП .....  | 5    |
| 1 ОГЛЯД СИСТЕМ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ .....  | 7    |
| 1.1 Огляд та коротка історія бездротової передачі електроенергії .....                     | 8    |
| 1.2 Ректена і випрямляч .....  | 12   |
| 1.2.1 Загальна будова прямої антени .....  | 12   |
| 1.2.2 Послідовний діодний випрямляч .....  | 14   |
| 1.2.3 Шунтовий діодний випрямляч .....   | 16   |
| 1.2.4 Випрямляч-подвійник напруги та багатоступінчастий випрямляч .....                    | 17   |
| 1.3 Переваги та обмеження бездротової передачі енергії .....                               | 20   |
| 1.4 Висновок до першого розділу .....  | 23   |
| 2 ТЕОРЕТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИПРЯМЛЕННЯ НА ОСНОВІ БЕЗПЕРЕРВНИХ ХВИЛЬ ..... | 24   |
| 2.1 Передавання безперервної хвилі .....   | 25   |
| 2.2 Перехід до безперервної хвилі .....  | 25   |
| 2.3 Технологія та широкі можливості застосування .....                                     | 26   |
| 2.4 Аналіз випрямлячів в бездротовій передачі електроенергії .....                         | 29   |
| 2.5 Висновок до другого розділу .....  | 34   |
| 3 АНАЛІЗ КЛЮЧОВИХ КОМПОНЕНТІВ БЕЗДРОТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ .....                                 | 36   |
| 3.1 Аналіз ефективності випрямлення модульованих хвиль .....                               | 36   |
| 3.2 Теоретичний аналіз імпульсної хвилі випрямляча .....                                   | 39   |
| 3.3 Аналіз випрямлячів Шоттки на основі безперервних хвиль .....                           | 45   |
| 3.4 Конструкція заземленого копланарного хвилевода .....                                   | 50   |
| 3.5 Висновок до третього розділу .....   | 52   |
| 4 ВДОСКОНАЛЕННЯ ТА ОЦІНКА ІМПУЛЬСНО-ХВИЛЬОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА .....                            | 54   |

КвРТР.2021005.01.05 ПЗ

| №      | Арк. | № докум.        | Підпис | Дата     |  | Літ. | Арк. | Аркуші |
|--------|------|-----------------|--------|----------|--|------|------|--------|
| зроб.  |      | Ляшко К.В.      |        | 19.06.20 | Імпульсно-хвильовий випрямляч для забезпечення стабільності та ефективності енергопостачання |      |      |        |
| ревіз. |      | Сельський А.А.  |        | 19.06.20 |  |      | 2    | 72     |
| Контр. |      | Корецька Л.О.   |        | 19.06.20 |  |      |      |        |
| перев. |      | Мартинович В.В. |        | 19.06.20 | Пояснювальна записка   |      |      |        |

ХНУ, гр. ТР1с-21-1

|   |   |    |
|---|---|----|
| 4.1   | Вимірювання при однаковій амплітуді напруги .....           | 54 |
| 4.2   | Вимірювання при однаковій середній вхідній потужності ..... | 59 |
| 4.3   | Форматування математичних компонентів .....                 | 60 |
| 4.4   | Висновок до четвертого розділу .....                        | 64 |
| ВИСНОВКИ.....   |   | 66 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....                                 |   | 67 |
| ДОДАТОК А Еквівалентна схема діода з подвоєнням напруги ..... |   | 70 |
| ДОДАТОК Б Структурна випрямляча зі збільшенням напруги .....  |   | 71 |
| ДОДАТОК В Моделювання ефективності схеми випрямлення .....    |   | 72 |

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 3    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

|      |   |
|------|---|
| BPSK | Двійкова фазова маніпуляція               |
| CPW  | – Coplanar waveguide                      |
| CW   | – Неперервна хвиля                        |
| GCPW | Заземлений копланарний хвилевід           |
| ICW  | Переривчаста безперервна хвиля            |
| IoT  | – Internet-of-things                      |
| OFDM | – Ортогональне частотне мультиплексування |
| QPSK | Квадратурна фазова маніпуляція            |
| RF   | – Ratio frequency                         |
| WPT  | – Wireless power transfer                 |
| WSN  | – Бездротові сенсорні мережі              |

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 4    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

## ВСТУП

У перспективному сучасному світі, що швидко розвивається, бездротові технології займають центральне місце в інноваційних дослідженнях та розвитку. Розширення бездротових мереж інтернету речей (IoT), бездротових сенсорних мереж (WSN) та мереж п'ятого та шостого поколінь (5G/6G) стає основним напрямком в сфері комунікаційних технологій. Одним з ключових аспектів цього розвитку є технологія одночасної бездротової передачі інформації та енергії.

Виробництво ректенів, що складаються з приймальних антен та випрямлячів, визначає ефективність бездротового живлення пристроїв та передачі даних. Особливо важливою стає можливість ефективного перетворення бездротової потужності в електричну енергію постійного струму. Хоча сучасні технології досягли значної ефективності випрямлення, наприклад, у НВЧ-діапазоні до 80%, проте дослідники продовжують вдосконалювати цей процес.

Запропонувавши нові теоретичні моделі для оцінки ефективності випрямлення на основі безперервних хвиль. Це відкриває нові можливості для кращого розуміння процесу випрямлення та його оптимізації. Важливо зауважити, що ефективне випрямлення модульованих хвиль вважається ключовою особливістю технології бездротової передачі інформації та енергії, що знаходиться в центрі уваги в сучасному світі комунікаційних технологій.

Розвиток бездротових технологій та постійне зростання потреб споживачів у них створюють попит на нові рішення, спрямовані на підвищення ефективності та стабільності енергопостачання. В умовах постійної конкуренції і швидкої технологічної динаміки важливо мати ефективні рішення, які забезпечують надійну та стабільну роботу бездротових пристроїв.

Однією з ключових проблем, яку потрібно вирішувати в цьому контексті, є підвищення ефективності випрямлення імпульсної хвилі. Це особливо актуально для сучасних систем передачі інформації та енергії, де кожен втрачений ватт може стати перешкодою в їхній надійній роботі [1].

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 5    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

Однією з ключових переваг запропонованої топології є можливість зміни опору навантаження випрямляча для досягнення стабільної та ефективної роботи в різних умовах. Це дає можливість пристосовувати систему до конкретних потреб і забезпечувати максимальну ефективність в різних сценаріях використання.

У процесі дослідження використані як теоретичні, так і експериментальні методи. Теоретичний аналіз базувався на моделюванні роботи випрямляча на основі безперервних хвиль, що дозволило отримати загальні принципи його роботи та зрозуміти вплив різних параметрів на ефективність. Експериментальні дослідження проводилися з використанням програмного забезпечення ADS та спеціальних експериментальних установок для перевірки отриманих теоретичних результатів у реальних умовах. Такий підхід дозволив отримати відповідність між теорією та практикою, що є важливим для надійності та достовірності отриманих результатів.

Метою даної кваліфікаційної роботи є вдосконалення імпульсно-хвильового випрямляча для забезпечення стабільності та ефективності енергопостачання в бездротових системах передачі інформації та енергії.

Загальна мета полягає в створенні ефективного та стабільного випрямляча, який може бути успішно використаний для безперебійної роботи бездротових систем у різних умовах і за різних обставин.

Результати цієї кваліфікаційної роботи можуть стати кроком у напрямку покращення енергоефективності та надійності бездротових технологій. Вони можуть бути використані для розвитку більш тривалих та надійних бездротових пристроїв, сприяючи розвитку Інтернету речей, бездротових сенсорних мереж і систем зарядки. Такі вдосконалення можуть також позитивно вплинути на продуктивність мереж п'ятого та шостого поколінь, забезпечуючи стабільну передачу інформації та енергії в майбутньому.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 6    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

# 1 ОГЛЯД СИСТЕМ БЕЗДРОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

Останнім часом Інтернет речей (IoT) викликає великий інтерес у дослідженнях, а також у виробництві. Він має величезний спектр застосувань у всіх аспектах нашого життя, таких як: розумний дім, розумне місто, носимі пристрої, промисловий Інтернет, підключений автомобіль, підключене здоров'я. В IoT, окрім швидкого з'єднання, потрібна величезна кількість датчиків та електронних пристроїв для обміну даними та передачі даних. З 2019 року починає використовуватися технологічний стандарт п'ятого покоління для широкосмугових стільникових мереж (5G). Він має більшу пропускну здатність і чудову швидкість передачі даних. Однак однією з найбільших проблем в IoT є живлення датчиків і електронних пристроїв, оскільки вони не завжди підключені до джерел живлення. Використання традиційного методу, наприклад батареї, спричиняє забруднення навколишнього середовища, а також витрачає час і ресурси на зарядку або заміну батареї вручну через певний час [2]. З цієї причини низький рівень потужності WPT (бездротова передача енергії) є однією з найкращих відповідей на цю проблему. За допомогою WPT електроенергія може передаватися бездротовим способом для живлення датчиків і електронних пристроїв. У WPT радіочастотна потужність зазвичай перетворюється на постійний струм за допомогою схеми випрямлення. Таким чином, датчики та електронні пристрої можуть мати подовжений термін служби батареї або, в ідеалі, повну автономність.

Однак у процесі перетворення радіочастотної потужності в постійну потужність за допомогою випрямляча, через обмеження діодів випрямної схеми, при низькій радіочастотній потужності ефективність перетворення радіочастоти в постійний струм є відносно низькою при використанні звичайної безперервної хвилі (Continuous Wave ) сигнал. Питання про те, як підвищити ефективність

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 7    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

перетворення радіочастоти в постійний струм при низьких рівнях потужності, все ще розглядається. Серед рішень було розроблено використання сигналів із високим PAPR замість безперервної хвилі, про що повідомляється в деяких роботах відповідно до літератури. Це допомагає схемам випрямлення забезпечувати більш високий вихід постійного струму, напругу та/або ефективність перетворення радіочастотного сигналу в постійний струм за низької споживаної потужності. Це здається цікавим рішенням, оскільки без особливих модифікацій схеми можна мати більше зібраного постійного струму на виході збирача енергії для живлення датчиків та електронних пристроїв.

Метою даного розділу є вивчення форм сигналу з оптимізованою потужністю (форми сигналу з оптимізованою потужністю) та застосування їх у пристроях збору енергії, щоб покращити їх продуктивність RF-to-DC порівняно з сигналом безперервної хвилі. Запропоновані сигнали з оптимізованою потужністю складаються з мультисинусового сигналу та радіочастотного імпульсного сигналу. По-перше, буде представлено дослідження форм сигналів за допомогою Matlab і ADS для демонстрації характеристик сигналів. По-друге, вплив сигналів з оптимізованою потужністю показано на різних топологіях випрямляча/ректени.

### 1.1 Огляд та коротка історія бездротової передачі електроенергії

Сьогодні розвиток Інтернету речей (IoT), розумного міста, розумної будівлі веде наш світ до нової ери. Мільйони інтелектуальних датчиків і інтелектуальних пристроїв мають бути з'єднані разом, тому велике питання, як увімкнути живлення цих датчиків і пристроїв. Поки використано традиційний електрохімічний метод, наприклад акумуляторний. Але це тимчасовий спосіб, тому що батарея не довговічна і при її заміні забруднює навколишнє середовище. Крім того, він не забезпечує автономність для розумних датчиків і розумних

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 8    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

пристроїв. Саме тому бездротова передача енергії (WPT) є одним із найефективніших способів, на який можна покластися, особливо для додатків, які вимагають невеликих рівнів потужності, таких як датчики пробудження або електронні пристрої для обміну даними або передачі даних бездротовим способом. У цьому випадку необхідна потужність становить лише від кількох мВт до кількох мВт. Бездротова передача електроенергії демонструє «передачу електричної енергії без проводів». Основними компонентами бездротової системи передачі електроенергії (рис.1.1) є мікрохвильовий генератор, передавальна антена та ректенна (приймальна антена + випрямний контур) [3].

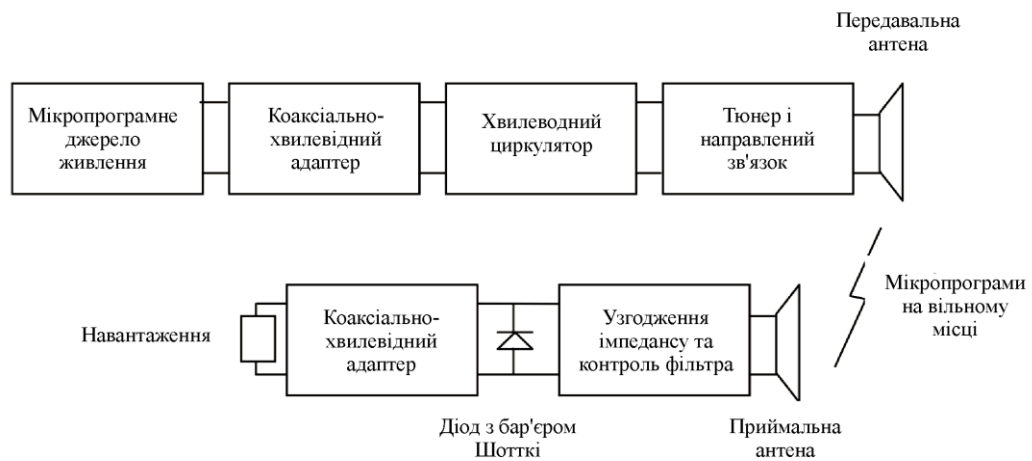


Рисунок 1.1 – Функціональна блок-схема бездротової системи передачі електроенергії

Передачу електроенергії високої напруги в лінійних кабелях, вежах і підстанціях між електростанціями та споживачами можна повністю усунути за допомогою бездротової передачі електроенергії. Можна сприяти взаємозв'язку планів виробництва електроенергії в глобальному масштабі. Бездротова передача електроенергії може надати більше свободи вибору як приймачів, так і передавачів, навіть для мобільних приймачів і передавачів, а також знижує вартість зберігання, передачі та розподілу енергії. За допомогою бездротової передачі енергії бездротова енергія може передаватися в місця, куди дротова

передача не може дістатися. Поки працює бездротова передача електроенергії, живлення завжди доступне на ректені. Збій живлення через коротке замикання та несправність кабелів ніколи не виникне в передачі [3].

Під час бездротової передачі електроенергії радіочастотний сигнал перетворюється на постійний струм за допомогою ректени, яка складається з антени та випрямляча. Випрямляч/ректена на основі різних діапазонів робочих частот, таких як: вузькосмуговий, багатосмуговий та широкосмуговий випрямляч/ректена також представлені в цьому розділі. З іншого боку, проблема бездротової передачі електроенергії буде запропонована, щоб показати важливість POW (Power Optimized Waveform) у бездротовій передачі енергії, а також ефективність перетворення радіочастотного сигналу в постійний струм випрямляча та ректени. У ньому також пояснюється необхідність підвищення ефективності перетворення радіочастотного сигналу в постійний струм на малих рівнях радіочастотної потужності, щоб забезпечити необхідну потужність постійного струму для електронних датчиків і пристроїв у застосуваннях малої потужності.

Перший експеримент із бездротової передачі електроенергії провів американський фізик Нікола Тесла в Колорадо-Спрінгс у 1899 році. Він особливо зацікавився явищем резонансу та спробував застосувати його до бездротової передачі електроенергії. Він уявив, що електромагнітні хвилі будуть доставляти електроенергію в будь-яку точку світу, не потребуючи лінії електропередач (рис. 1.2) [4].

Тесла побудував на вершині вежі величезну котушку, яка резонує на 150 кГц і працює на 300 кВт. Однак, на жаль, немає чітких результатів щодо потужності випромінювання та потужності, отриманої далеко від джерела. Робота Тесли не зупинилася в Колорадо-Спрінгс. Наприкінці ІХХ століття Тесла побудував вежу електропередач на Лонг-Айленді, Нью-Йорк. Проект був

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 10   |

залишений незадовго до завершення через фінансові проблеми. Протягом першої половини 20 століття відсутність інтересу до технічних ресурсів і більше того, відсутність технічних можливостей може пояснити неадекватність тематичної бездротової передачі енергії, особливо джерел, які здатні генерувати значну потужність на високих частотах.

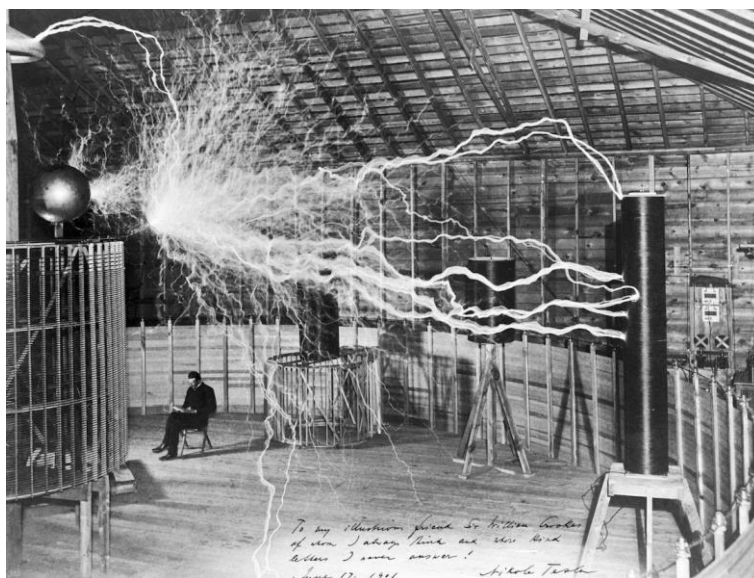


Рисунок 1.2 – Нікола Тесла у своїй лабораторії в Колорадо-Спрінгс, яка була побудована для експериментів з радіохвилями для передачі енергії

У 1969 році Пітер Глейзер представив концепцію SPS (Solar Power System) [5]. Цей проект міг би запропонувати альтернативу енергетичним проблемам, з якими стикається планета, а також як джерело чистої та екологічно чистої енергії. Система, створена в результаті цього проекту, має супутник на геостационарній орбіті, який фіксує сонячну енергію, ця сонячна енергія перетворюється на мікрохвильову енергію на частоті 2,45 ГГц і надсилається на землю. Ризики на рівні приймальних антен значні. Питома потужність близько 100 Вт/м<sup>2</sup>.

Базуючись на передбаченні Фарадея (1831), теорії Максвелла та демонстрації поширення електромагнітних хвиль Герцем у ІХХ столітті,

|      |      |          |        |      |  |  |  |  |      |
|------|------|----------|--------|------|--|--|--|--|------|
|      |      |          |        |      |  |  |  |  | Арк. |
|      |      |          |        |      |  |  |  |  | 11   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |  |  |  |      |

наприкінці ІХХ століття Тесла мав ідею про бездротове забезпечення електроенергією, як згадувалося вище. Але неможливо передати 300 кВт на 150 кГц через низьку щільність потужності та дифузію потужності. У 60-х роках 20 століття передачу мікрохвильової енергії з ефективністю 90% з потужністю 8 Вт на частоті 2,45 ГГц здійснив Вільям Браун. У наш час мікрохвильова передача енергії для збору енергії необхідна для додатків із низькою продуктивністю, як згадувалося раніше в цьому розділі. Для цього додатка враховано оптимізацію випрямляча, прямокутної антени та форми хвилі, щоб забезпечити максимальну ефективність перетворення радіочастотного сигналу в постійний, щоб досягти мети, щоб датчики та електронні пристрої мали здатність збирати енергію при дуже низькій потужності. Загалом приймальні частини системи бездротової передачі електроенергії відіграють дуже важливу роль у покращенні живлення електронних датчиків і пристроїв.

## 1.2 Ректена і випрямляч

Випрямляч або ректена є основними частинами енергетичних систем. Ректена – пасивний елемент, що складається з антени, випрямного контуру (випрямляча) з фільтром низьких частот між антенами та випрямного діода (або діодів). Антена, що використовується в ректені, може бути дипольною, Ягі-Уда, патч-антеною або параболічною тарілою тощо. Діоди з бар'єром Шотткі (GaAs-W, Si та GaAs) зазвичай використовуються в схемі випрямлення через швидший час переходу, набагато менший прями падіння напруги, низька порогова напруга та хороші ВЧ характеристики [6].

### 1.2.1 Загальна будова прямої антени

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 12   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

Для збору бездротової енергії використовується ректена, яка складається з випрямляча та приймальної антени. Структурна схема прямої антени показана на рис.1.3.

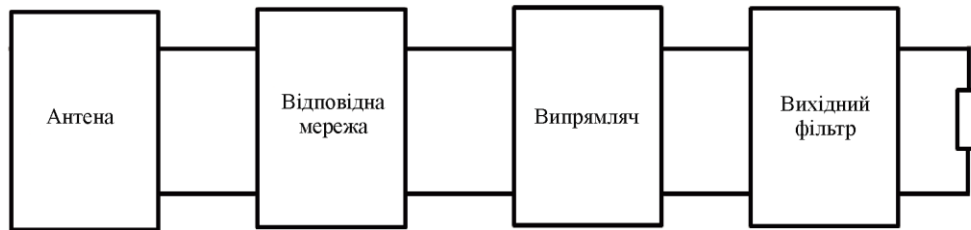


Рисунок 1.3 – Блок-схема прямої антени

Радіочастотна (РЧ)/мікрохвильова енергія збирається приймальною антеною та перетворюється на постійний струм за допомогою схеми випрямлення (або випрямляча). Щоб підвищити ефективність перетворення RF-to-DC прямої антени, можна додати два блоки відповідно між антеною та випрямлячем, а також між випрямлячем і резистором навантаження. Крім того, необхідно додатково зменшити внесені втрати і підвищити вхідну напругу випрямної схеми. Ці блоки діють і як фільтри, і як відповідні розділи, вони повинні бути оптимізовані, щоб одночасно виконувати такі функції:

- Для узгодження антени та навантаження з випрямлячем
- Щоб захистити антену від повторного випромінювання гармонік високого порядку, створених випрямлячем.
- Щоб захистити навантаження від будь-яких радіочастотних сигналів, які є гармоніками високого порядку, що генеруються діодом Шотткі (для цього блок між випрямлячем і навантаженням повинен бути фільтром постійного струму).

Крім того, навантаження також має бути оптимальним, щоб отримати найвищу ефективність. Різні типи випрямних кіл, такі як одношунтовий напівхвильовий випрямляч, повнохвильовий мостовий випрямляч або інші гібридні випрямлячі, можуть бути частиною випрямляча ректени. Ефективність

перетворення ВЧ-постійного струму в основному залежить від схеми, особливо від діода. Ефективність перетворення ректени з діодом також залежить від інтенсивності мікрохвильової вхідної потужності та оптимального підключеного навантаження. Ефективність стає досить низькою при низькій вхідній потужності або якщо схема не узгоджена між вхідним або вихідним навантаженням. Характеристика діода, який має власну напругу переходу та напругу пробою, також впливає на ефективність перетворення радіочастотного сигналу в постійний струм. Якщо вхідна напруга діода нижча за напругу переходу або вища за напругу пробою, діод не показує належної продуктивності. Як результат, ефективність перетворення RFto-dc падає з нижчим або вищим вхідним сигналом, ніж оптимальний [7].

### 1.2.2 Послідовний діодний випрямляч

Базова структура послідовно встановленого діода представлена на рис. 1.4. У [8] структура призначена для низьких рівнів потужності (значно нижче 0 дБм), можливості обробки потужності можна обміняти на високу чутливість. Вибір було зроблено для використання діодів Шотткі з нульовим зміщенням HSMS2850 [9], які мають низьку потужність, низьку порогову напругу (150 мВ) і низьку ємність переходу (0,18 пФ).

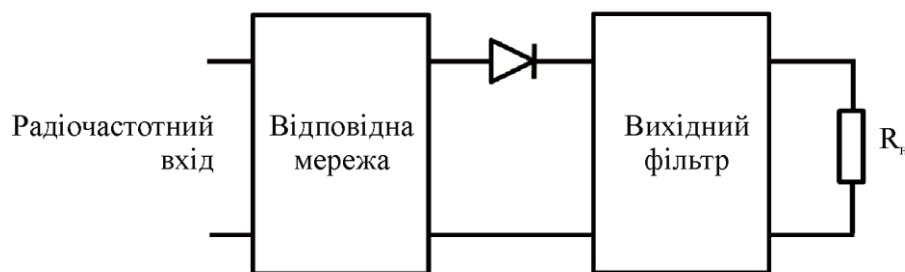


Рисунок 1.4 – Топологія послідовно встановленого діодного випрямляча

Ці випрямні схеми мають дуже нелінійну поведінку в основному через діодний процес випрямлення. Непрактично проектувати підчастини незалежно, оскільки вони сильно взаємодіють одна з одною. Навантаження вхідного фільтра залежить від діода і вихідного фільтра на кінці діода. З цієї причини для оцінки пасивних компонентів елементів фільтра необхідно використовувати методику глобальної оптимізації схеми. Ці оптимізації були зроблені за допомогою програмного забезпечення ADS (з Momentum) від Keysight Technologies.

На рис. 1.5 простежується приклад еволюції ефективності перетворення радіочастоти в постійний струм як функції рівня падаючої радіочастотної потужності.

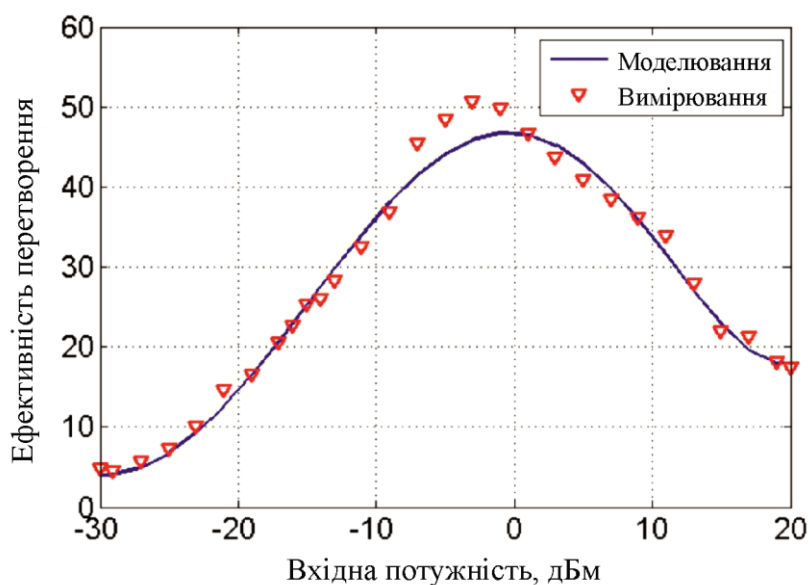


Рисунок 1.5 – Приклад ефективності перетворення ВЧ-постійного струму послідовно встановленого діодного випрямляча

Навантаження прямої антени було налаштовано для отримання максимальної ефективності точки потужності для даного рівня вхідної потужності. Максимальна ефективність перетворення приблизно 50% досягається в діапазоні від -5 дБм до 0 дБм (1 мВт) падаючої потужності. У цьому випадку центральна частота становить 2,45 ГГц, а значення навантаження

становить 2,4 кВт. При менших рівнях потужності ефективність нижча через порогову напругу діода, яка порівнянна з амплітудою падаючого сигналу. Для високих рівнів потужності внутрішні втрати діода стають значними через послідовний опір діода. Крім того, зворотна напруга пробою діода обмежує рівень вхідної потужності, а потім і ефективність [9]. Крім того, поява гармонік вищого порядку швидко погіршує ефективність перетворення радіочастотного сигналу в постійний. Оскільки вони несуть потужність, їхні рівні зростають у  $N$  разів (для  $N$ -гармоніки) швидше, ніж основна частота. Випрямлячі з одним послідовним діодом і шунтованим діодом можуть отримати вищу ефективність при низькій споживаній потужності [10]. У [15, 16] ефективність перетворення радіочастотного сигналу в постійний струм послідовно встановленого діодного випрямляча при 0 дБм, 2,25 ГГц і  $Z_{load}$  1 кВт становить приблизно 45 %.

### 1.2.3 Шунтовий діодний випрямляч

Топологія шунтового діодного випрямляча показана на рис.1.6. Також у [9] шунтована структура випрямляча була розроблена для діапазону вхідної потужності від 0 дБм до 20 дБм. При цих рівнях потужності порогова напруга менше впливає на характеристики схеми. Основна мета полягає в тому, щоб максимально зменшити внутрішні втрати, притаманні випрямному діоду, і збільшити можливості керування потужністю. Діод, який використовується для цієї структури, має пороговий рівень напруги 350 мВ (HSMS2860 від Keysight [17]).

Структура досягає максимальної ефективності перетворення 70 % для вхідної потужності 15 дБм. Ефективність перетворення має аналогічну залежність щодо імпедансу навантаження, як показано на рис.1.7 з оптимальним навантаженням 750 Вт для вхідної потужності 15 дБм на частоті 2,45 ГГц. У той

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 16   |

же час ККД шунтованого діодного випрямляча, представленого в [15] при 0 дБм, 2,25 ГГц і  $Z_{load}$  360 Вт, становить приблизно 45 %.

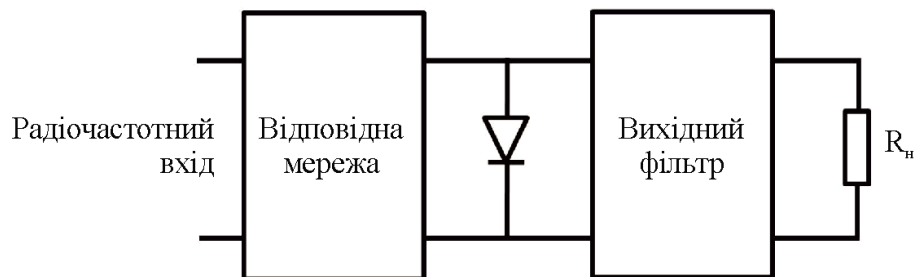


Рисунок 1.6 – Топологія шунтового діодного випрямляча

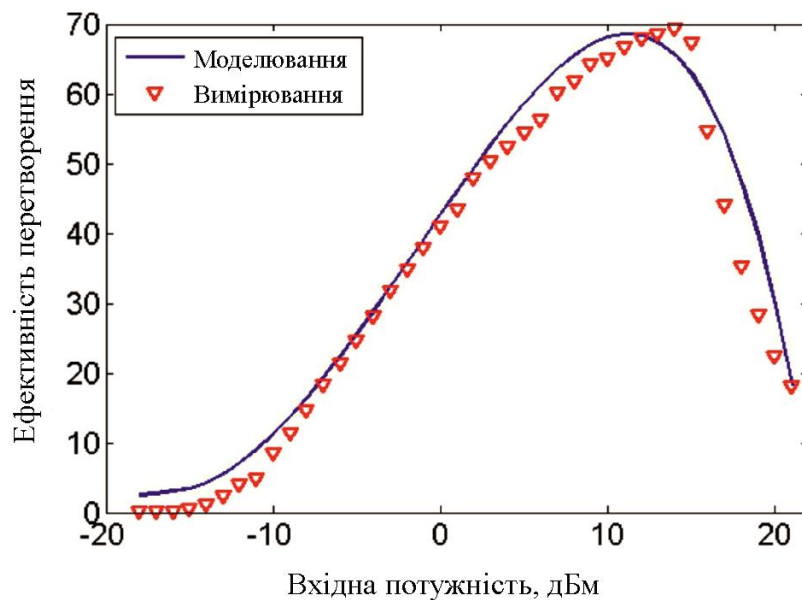


Рисунок 1.7 – Приклад ефективності перетворення РЧ-постійного струму шунтованого діодного випрямляча

#### 1.2.4 Випрямляч-подвійник напруги та багатоступінчастий випрямляч

Випрямляч-подвійник напруги можна розглядати як комбінацію двох наведених вище топологій: послідовно встановленого діода та шунтованого діода. Він містить два діоди: один послідовно, а інший паралельно (як показано на рис. 1.8), які створюють більшу вихідну напругу постійного струму. У [15, 16]

максимальний ККД випрямляча-подвійника напруги при 0 дБм, 2,25 ГГц і  $Z_{load}$  3 кВт становить приблизно 60 %.

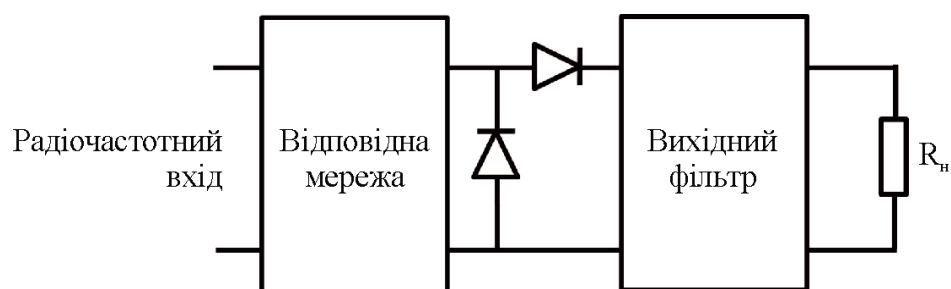


Рисунок 1.8 – Топологія випрямляча подвійника напруги

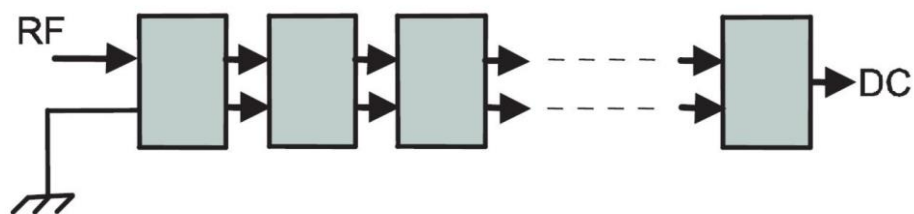


Рисунок 1.9 – Схема помножувача напруги

Подібно до конфігурації випрямляча-подвійника напруги, багатоступінчастий випрямляч є комбінацією кількох ідентичних каскадних ступенів (рис. 1.8 - рис. 1.10). Багатоступінчастий випрямляч може забезпечити дуже високу вихідну напругу постійного струму для кількох застосувань, таких як: зарядка конденсатора для збирача енергії електростатичних коливань, де вібрації перетворюються на електрику за допомогою механічної сили тяжіння, яка залежить від напруги, що подається від випрямляча. до пластини конденсатора.

Таким чином, вихідна напруга постійного струму випрямляча повинна бути вищою, щоб скоротити час заряджання конденсатора з багатоступеневим випрямлячем Кокрофта–Уолтона 2,4 ГГц, який розроблений і оптимізований для роботи при низькій густині потужності та забезпечення високих рівнів напруги.

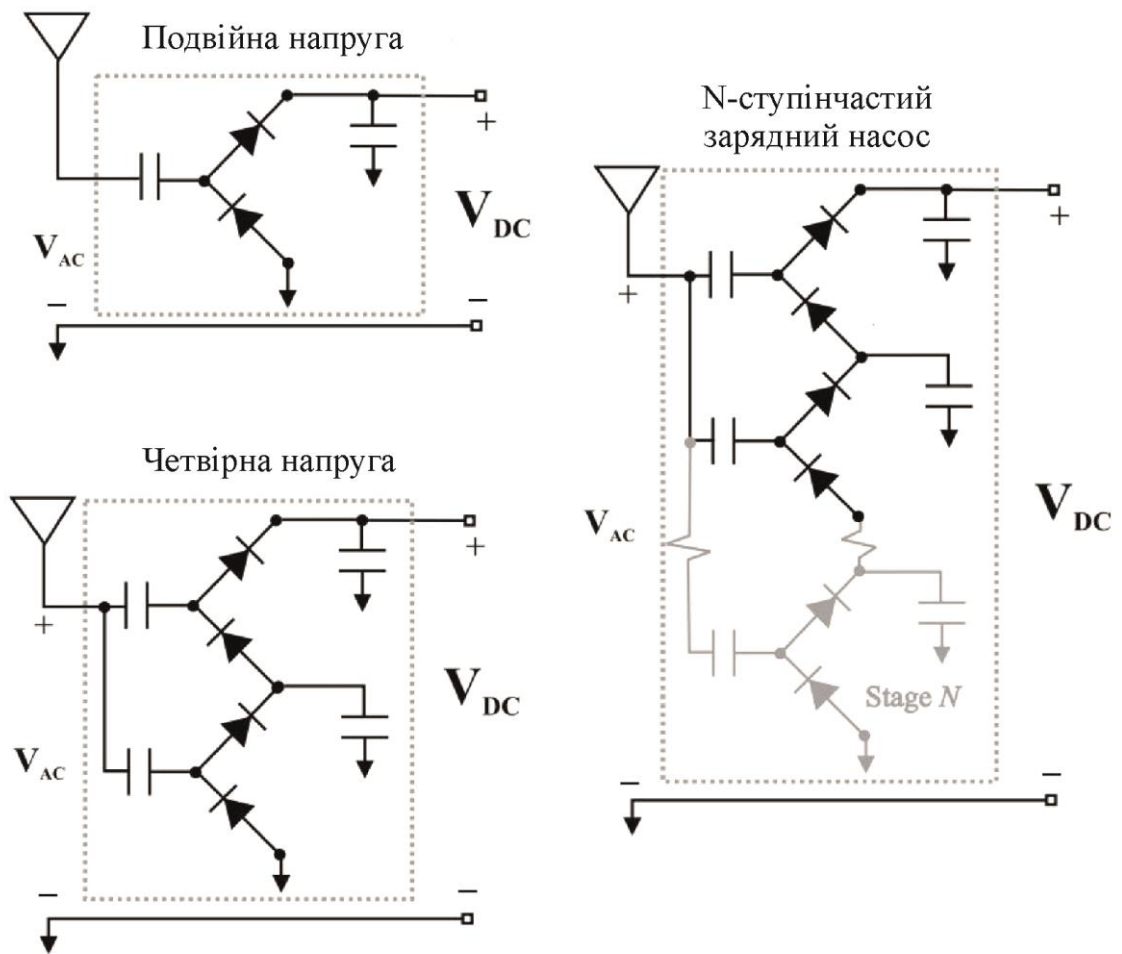


Рисунок 1.10 – Принцип роботи зарядного насоса

Як видно з рис. 1.11а і рис. 1.11б, вихідна напруга постійного струму багатокаскадного випрямляча є значно високою. Він досягає 3,5 В при -5 дБм. Вихідна напруга постійного струму досягає найвищого значення на 2,4 ГГц, що є оптимальною частотою схеми. Вихідна напруга постійного струму становить 1,25 В при 2,4 ГГц, коли вхідна потужність -15 дБм. Крім того, в [18] багатоступеневий випрямляч використовується в додатках RFID і системі збору радіочастотної енергії з використанням багатодіапазонних антенних решіток. Для випрямляча/ректени загалом їх застосування в RFID та системах збору енергії можна знайти в [19].

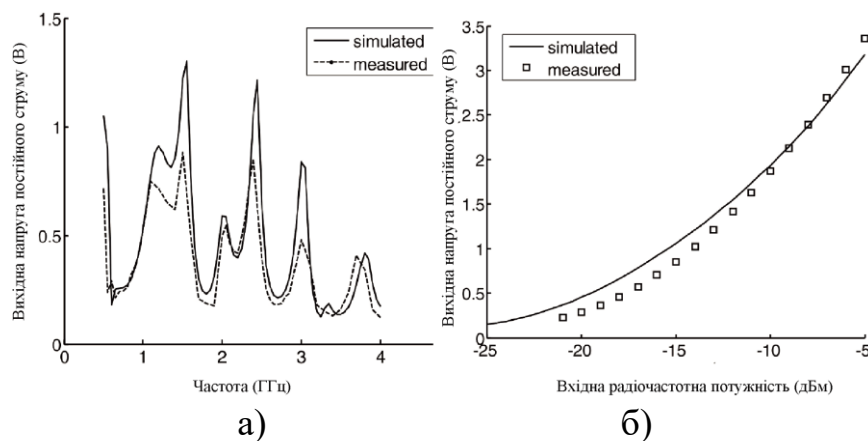


Рисунок 1.11 – Вихідна напруга постійного струму багатоступеневого випрямляча: а) – від частоти; б) – проти вхідної радіочастотної потужності

### 1.3 Переваги та обмеження бездротової передачі енергії

Бездротова передача енергії - це інноваційна технологія, яка відкриває широкі можливості для розвитку бездротових систем та пристроїв. Вона перетворює спосіб, яким споживано електроенергію, забезпечуючи ефективне живлення різноманітних пристроїв без необхідності використання кабелів або батарей.

Переваги бездротової передачі енергії відіграють ключову роль у розвитку сучасних технологій, що стосуються як побутових, так і промислових застосувань. Цей інноваційний метод живлення пристроїв забезпечує ряд переваг, які можуть відкрити нові можливості для ефективності, зручності та сталості бездротових систем. Враховуючи постійний розвиток цієї технології, розуміння переваг бездротової передачі енергії стає важливим для її подальшого впровадження та вдосконалення.

Бездротова передача енергії відкриває безліч переваг, які можуть значно покращити функціональність та надійність різноманітних пристроїв і систем. Розглянемо деякі з найважливіших переваг цієї технології:

1. Гнучкість та мобільність: Однією з найвагоміших переваг бездротової передачі енергії є можливість використовувати пристрої без обмежень, пов'язаних зі стандартними кабелями та проводами. Це дозволяє створювати мобільні, гнучкі системи, що відповідають потребам сучасного способу життя.

2. Зручність та спрощення: Відсутність потреби у проводах зробиє процес встановлення та обслуговування пристроїв більш простим і зручним. Це особливо корисно у випадку великих систем, які складаються з багатьох компонентів.

3. Енергоефективність: Бездротова передача енергії може бути більш енергоефективною порівняно з проводовими системами, оскільки вона може уникнути енергетичних втрат, пов'язаних зі зміною електричного опору кабелів та проводів.

4. Масштабованість: Ця технологія дозволяє легко масштабувати системи, додавати нові пристрої та вузли без необхідності розгортання додаткових кабелів чи інфраструктури.

5. Висока надійність: Бездротова передача енергії може бути менш схильною до впливу на зовнішні фактори, такі як вологість, корозія чи механічні пошкодження, що може покращити надійність системи.

6. Мінімальні витрати на обслуговування: Відсутність проводів та кабелів може знизити витрати на обслуговування системи, так як вона потребує меншої кількості обслуговування та ремонту.

7. Зменшення впливу на навколишнє середовище: Зниження використання кабелів та проводів може допомогти зменшити вплив на навколишнє середовище шляхом зменшення викидів, пов'язаних з виробництвом та утилізацією матеріалів.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 21   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

Ці переваги відображають значне значення та потенціал бездротової передачі енергії у багатьох сферах життя і промисловості.

Хоча бездротова передача енергії відкриває широкі можливості для розвитку технологій, необхідно також враховувати обмеження, які можуть вплинути на її ефективність та придатність для конкретних застосувань. Перехід від розгляду переваг до обмежень дозволить глибше зрозуміти сутність цієї технології та визначити шляхи подальшого вдосконалення. Отже, ключові аспекти обмежень бездротової передачі енергії та їх вплив на сучасні комунікаційні технології:

**Втрата ефективності з дистанцією:** Чим далі від випромінювача знаходиться приймач, тим менше ефективності має бездротова передача енергії через втрати сигналу та розсіювання.

**Потреба у відповідній інфраструктурі:** Впровадження систем бездротової передачі енергії вимагає наявності відповідної інфраструктури, такої як передавачі та приймачі, що може бути витратним процесом.

**Міжсистемні перешкоди:** Висока концентрація бездротових пристроїв на одній території може призвести до міжсистемних перешкод та перехоплення сигналу, що може погіршити ефективність передачі енергії.

**Безпека даних:** Безпека передачі даних та енергії є важливою проблемою у бездротових системах, оскільки вони можуть бути більш вразливі до хакерських атак та перехоплення інформації.

В цілому, бездротова передача енергії відкриває широкі можливості для розвитку і вдосконалення різноманітних систем та пристроїв. Її переваги, такі як гнучкість, зручність та енергоефективність, роблять її привабливим вибором для багатьох застосувань. Однак необхідно враховувати й обмеження, такі як обмежена дальність передачі та можливість перешкод у бездротовому середовищі. Зрозуміння цих аспектів є важливим для розробки та впровадження

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 22   |

ефективних систем бездротової передачі енергії, які задовольняють потреби сучасного світу і сприятимуть подальшому технологічному прогресу.

#### 1.4 Висновок до першого розділу

Підсумовуючи огляд систем бездротової передачі енергії, можна зазначити, що ця технологія має значний потенціал для впровадження в різноманітних сферах, від побутових пристроїв до промислових систем. Розглянуті в розділах ректени та випрямлячі, які є ключовими компонентами бездротових систем передачі енергії, надають розуміння їхньої будови та принципу роботи.

Переваги бездротової передачі енергії, такі як зручність, гнучкість та енергоефективність, роблять її привабливою для використання у різних областях. Однак необхідно також враховувати обмеження, такі як обмежена дальність передачі та можливі перешкоди в бездротовому середовищі.

Загальною метою подальших досліджень і розвитку є максимізація переваг бездротової передачі енергії, мінімізація обмежень і створення ефективних систем, які задовольняють потреби сучасного світу та сприятимуть подальшому технологічному прогресу.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 23   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

## 2 ТЕОРЕТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИПРЯМЛЕННЯ НА ОСНОВІ БЕЗПЕРЕРВНИХ ХВИЛЬ

Безперервна хвиля, або CW, представляє собою тип електромагнітної хвилі, яка має постійну амплітуду та частоту. Зазвичай це синусоїдальна хвиля, що має нескінченну тривалість і використовується для різних застосувань, включаючи лазерні прискорювачі та радіопередавачі.

Безперервні хвилі також застосовуються у радіолокаційних системах, де вони використовуються для вимірювання відстаней до об'єктів та визначення їхніх швидкостей. Відмінністю цього типу радарів є те, що вони відправляють і приймають постійний сигнал, що дозволяє вимірювати зміни частоти сигналу, спричинені рухом об'єктів (ефект Доплера). Це дає можливість визначати швидкості об'єктів та виявляти рухливі цілі, такі як літаки, судна чи автомобілі. Крім того, CW радари можуть використовуватися для заміру відстаней до об'єктів та визначення їхнього розташування, що робить їх важливим інструментом для військових, авіаційних та метеорологічних додатків.

В контексті радіопередачі, безперервна хвиля може також означати метод передачі, де синусоїдальна несуча хвиля постійно вмикається та вимикається. Цей метод, відомий як переривчаста безперервна хвиля (ICW), використовувався для передачі інформації за допомогою змінної тривалості періодів увімкнення та вимикання сигналу. Наприклад, азбука Морзе використовувалася для кодування інформації у ранніх радіо.

У ранніх етапах бездротової телеграфії, безперервна хвиля також відомі як "незатухаючі хвилі", оскільки вони відрізнялися від хвиль із затуханням, що генерувалися іншими типами передавачів, такими як іскрові випромінювачі.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 24   |

## 2.1 Передавання безперервної хвилі

Ранні радіопередавачі використовували імпульси проміжок для генерації радіочастотних коливань у передавальній антені. Ці сигнали склалися з коротких імпульсів синусоїдальних радіочастотних коливань, які швидко згасали до нуля і відомі як затухаючі хвилі. Однак такі хвилі мали широку смугу пропускання, що призводило до створення електромагнітних перешкод, які впливали на інші передачі на різних частотах.

Це спонукало до пошуків методів створення радіочастотних коливань, які згасали більш повільно і мали меншу амплітуду затухання. Зворотна залежність між швидкістю загасання та шириною смуги частот диктувала потребу у зменшенні швидкості загасання, щоб зменшити вплив сигналу на інші передачі. У зв'язку з цим державні норми стали обмежувати максимальний рівень затухання, який може мати радіопередавач.

Отже, для мінімізації впливу електромагнітних перешкод і забезпечення ефективної передачі, виробники почали випускати іскрові передавачі, які генерували довші сигнали з меншою амплітудою затухання.

## 2.2 Перехід до безперервної хвилі

Виявилось, що ідеальною радіохвилею для радіотелеграфного зв'язку була б безперервна синусоїда з нульовим загасанням, або безперервна хвиля. Ця форма хвилі теоретично не має смуги пропускання, оскільки вся її енергія зосереджена на одній частоті, тому вона не втручається в інші передачі на різних частотах. Зрозуміло, що безперервні хвилі не можуть бути створені за допомогою електричних іскор, але з'явилися можливості їх генерації завдяки винайденню електронного генератора на вакуумній лампі, що відбулося близько 1913 року завдяки праці Едвіна Армстронга і Олександра Мейснера. Після

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 25   |

закінчення Першої світової війни, передавачі, здатні виробляти безперервні хвилі, такі як генератор змінного струму Александерсона та осцилятори на вакуумній лампі, стали доступними широкому колу користувачів.

Близько 1920 року іскрові передавачі з затухаючою хвилею почали бути замінені на вакуумні лампові передавачі, які забезпечували безперервні хвилі. А вже у 1934 році передачі з затухаючою хвилею були остаточно заборонені, що відзначило кінець їх ери в історії радіозв'язку.

### 2.3 Технологія та широкі можливості застосування

За допомогою радарів, що стають все більш інтегрованими в нашу повсякденність, можна не лише відстежувати рух об'єктів у просторі, а й застосовувати їх у безлічі сфер, від метеорології та автомобільної промисловості до військових застосувань та наукових досліджень.

Радар з безперервною хвилею (CW радар) є системою радіолокації, де постійна радіохвильова енергія стабільної частоти передається та приймається для виявлення відбиваючих об'єктів. Цей тип радару дозволяє виявляти окремі об'єкти за допомогою ефекту Доплера, який призводить до зміни частоти отриманого сигналу відносно переданого. Ця зміна частоти дозволяє виявити об'єкти за допомогою фільтрації сигналів за їх частотою [19].

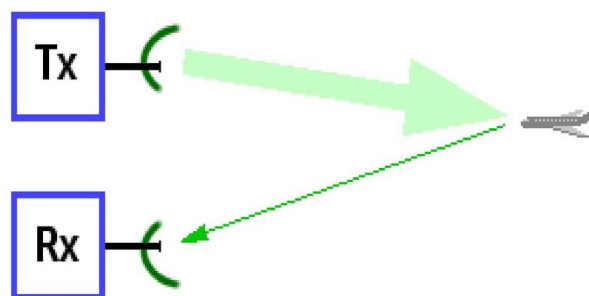


Рисунок 2.1 – Принцип вимірювання безперервним радіолокатором

Аналіз Доплера радіолокаційних сигналів дозволяє відокремлювати повільні або стаціонарні об'єкти, що забезпечує надійність в роботі радару в умовах наявності великих нерухомих об'єктів або повільно рухомих перешкод. Це особливо корисно для виявлення об'єктів на тлі рефлектора, наприклад, дозволяє літальному апарату, який перебуває на великій висоті, виявляти літаки, що рухаються на низькій висоті, на фоні земної поверхні. Благодаря здатності ефективно фільтрувати сильне відбиття від поверхні, радар може все ще виявляти об'єкти, які відбивають значно менше енергії сигналу.

Радарні системи CW використовуються на обох кінцях діапазону<sup>^</sup>

- недорогі радіовисотоміри, датчики наближення та спортивні аксесуари, які працюють від кількох десятків метрів до кількох кілометрів;
- дорогий радар раннього попередження CW Angle Track (CWAT), що працює понад 100 км для використання з ракетними системами «земля-повітря».

Головною перевагою радарів CW є їх безімпульсний характер, що робить їх простими у виготовленні та експлуатації. Вони не обмежені мінімальним або максимальним діапазоном, хоча рівень потужності передачі настановлює практичні обмеження їх діапазону. Безперервний радар максимізує загальну потужність на ціль, оскільки передавач безперервно транслює сигнал.

У військовому застосуванні радари CW використовуються для наведення ракет класу «повітря-повітря» з напівактивним радіолокаційним самонаведенням (SARH), таких як AIM-7 Sparrow у США та ракети Standard. Літак-носії висвічує ціль радіосигналом CW, а ракета наводиться на відбиті радіохвилі. З урахуванням високої швидкості руху ракети відносно літака відбувається сильний доплерівський зсув. Більшість сучасних радарів повітряного бою, навіть імпульсні доплерівські установки, мають функцію CW для цілей наведення ракет.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 27   |

Приймачі, які використовуються у безперервних доплерівських радіолокаційних системах, суттєво відрізняються від тих, що використовуються у звичайних радарх. Вони складаються з багаточисельного банку фільтрів, яких може бути понад сотня. Кількість фільтрів безпосередньо впливає на максимальну відстань, яку може охопити радар.

Подвоєння кількості фільтрів приймача може збільшити дальність виявлення об'єктів приблизно на 20%. Оптимальна ефективність на максимальній відстані досягається, коли розмір фільтра приймача відповідає максимальному рівню FM-шуму, який присутній у сигналі передачі. Зменшення розміру фільтра приймача нижче середнього рівня шуму FM передачі не призведе до покращення продуктивності виявлення у цьому діапазоні.

Радар CW вважається узгодженим, якщо розмір фільтра приймача відповідає середньоквадратичній ширині смуги пропускання FM-шуму у сигналі передачі.

Бістатичні радары з безперервною хвилею використовують дві фізично окремі антени - передавальну та приймальну. Це дозволяє зменшити проблеми, пов'язані з власними перешкодами, що є типовими для моностатичних радарів з безперервною хвилею. Такий підхід дозволяє забезпечити більш точний та надійний збір сигналів, оскільки передавальна антена не впливає на приймальний шлях та навпаки. Це підвищує ефективність радарної системи та забезпечує кращу якість отриманих даних.

Бістатичний радар FM-CW відрізняється від типових радіолокаційних систем. В ньому передавач і приймач розташовані на відстані один від одного. Передавальна антена зазвичай розміщується ближче до місця розташування ракетної пускової установки, в той час як приймальна антена знаходиться далеко від неї. Ця конфігурація дає змогу передавальному радару висвітлювати ціль, подібно до пошукового світла, і випромінювати радіосигнал у всіх напрямках.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 28   |

У приймачі використовуються дві антени: одна спрямована на ціль, а інша — на передавальну антену. Антена, спрямована на передавальну антену, допомагає створювати наскрізний нуль, що дозволяє приймачу надійно функціонувати в області прямого зв'язку з антеною або неподалік від неї.

Бістатична пара приймача та передавача FM-CW може також використовуватися як система зниження темпу радіозв'язку (OTAD). Передавач OTAD транслює сигнал FM-CW на двох різних частотних каналах: один для синхронізації приймача з передавачем, а інший для освітлення сцени вимірювання. Використовуючи спрямовані антени, приймач OTAD одночасно збирає обидва сигнали і змішує їх, щоб отримати змінений сигнал, який відображає бістатичний діапазон до цілі.

Більшість сучасних радарних систем FM-CW використовують одну передавальну антену та декілька приймальних антен. Оскільки передавач працює на постійній частоті, як і приймач, необхідно уникати перевантаження каскадів приймача

#### 2.4 Аналіз випрямлячів в бездротовій передачі електроенергії

Антени відіграють ключову роль у системах зв'язку, визначаючи ефективність радіоінтерфейсу. Технологія мікрохвильової бездротової передачі електроенергії базується на генеруванні, передачі та перетворенні мікрохвильової енергії. Її було застосовано до кількох додатків із перевагами, таких як супутники сонячної енергії, платформи спостереження, бездротові датчики, транспортні засоби з дистанційним керуванням і мітки радіочастотної ідентифікації (RFID). Отже, на практиці потрібна бездротова передача електроенергії на великі відстані з високою ефективністю. Випрямлячі є ключовим компонентом мікрохвильової системи бездротової передачі енергії. Він розташований на приймальному кінці, ефективність перетворення

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 29   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

мікрохвильового випромінювання в постійний струм має вирішальне значення для загальної ефективності системи.

Є численні опубліковані дослідження випрямлячів [20-23]. За робочою смугою частот вони працюють на одній частоті [24], багаточастотній [25] або широкосмуговій [26]. Що стосується топологічної структури, вони працюють з одним діодом, подвійними діодами або діодними матрицями.

Сучасні дослідження показують, що оптимальна ефективність перетворення мікрохвильового випромінювання в постійний струм випрямляча залежить від діапазону робочих частот. У 1977 році алюмінієва пряма стрічка, виготовлена Брауном, досягла понад 90% ефективності в діапазоні S [20]. Останні дослідження показують, що ефективність може сягати до 75% в S-діапазоні [21]. Випрямляч з одним послідовним діодом досягає ефективності 71,9% в діапазоні X [22], тоді як у діапазоні Ka він становить 53 і 60% в [23] відповідно. Загальна тенденція полягає в тому, що зі збільшенням робочої частоти найвища ефективність перетворення мікрохвильового випромінювання в постійний струм знижується. Доцільно проводити порівняння між випрямлячами в одному робочому діапазоні частот.

Ефективність перетворення діодних випрямлячів зазвичай вища, ніж у випрямлячів на основі транзисторів і монолітних мікрохвильових інтегральних схем (ММІС). Однак їх вхідні потужності нижчі. Серед цих діодних випрямлячів запропонований випрямляч не тільки досягає вищої ефективності перетворення, але й працює на відносно більш високому рівні потужності, що робить його відмінним від попередньої роботи.

Теоретичний аналіз діодів у випрямлячах-подвійниках напруги представлено на основі теорії в [25]. Ця модель включала один діод і паралельний опір навантаження. Характеристики діода були описані його параметрами SPICE та синусоїдальним сигналом, що падає на випрямляч.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 30   |

Валента та ін. В [26] також змоделивали схеми ефективності перетворення енергії за допомогою однодіодної моделі. Він розглядав ефективність перетворення за сигналів з високим відношенням пікової до середньої потужності (PAPR) замість безперервного збудження. При виведенні рівнянь замкнутої форми враховано шпаруватість сигналу з переривчастою передачею.

Однак моделі в посиланнях [24, 25] не підходять для аналізу випрямляча з подвійником напруги, який має два діоди, а форми сигналів на них різні в умовах одного діода. Збудження випрямляча в мікрохвильовій системі передачі електроенергії, як правило, має безперервну форму. Тому використано це збудження в аналізі, а не високий сигнал відношення пікової до середньої потужності, щоб відповідати застосуванню в мікрохвильовій системі передачі потужності. Перевагою аналізу, представленого в цьому документі, є його дійсність для конструкції мікрохвильового випрямляча з подвійником напруги. Він пропонує корисний інструмент для виправлення прогнозування ефективності та проектування схем.

Типова блок-схема випрямляча показана на рис. 2.2. Фільтр низьких частот перед діодом забезпечує проходження мікрохвиль основної частоти, а гармоніки вищого порядку, що генеруються нелінійним діодом, відхиляються назад у схему випрямлення. Це можна було б усунути завдяки компромісу між вторинною потужністю та додатковими вищими внесеними втратами в деяких конструкціях. Фільтр пропускання постійного струму застосований для подавлення гармонік і згладжування вихідної напруги постійного струму. Мережа узгодження використовується для перетворення вхідного опору схеми, який потрібно узгодити з джерелом. Конструкція мережі узгодження імпедансу в основному зосереджена на діоді, який має динамічний вхідний опір через нелінійність.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 31   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

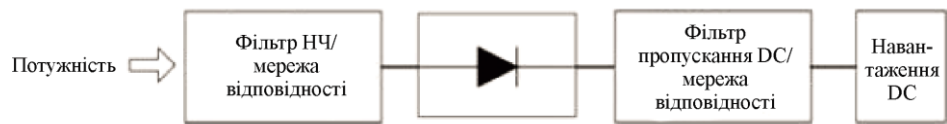


Рисунок 2.2 – Типова структурна схема випрямляча

Фільтри та узгоджувальна мережа вважаються ідеально розробленими. Вважається, що гармоніки, створені діодами під час випрямлення, повністю переробляються. У колі випрямлення немає втрат енергії гармонік і внесених втрат. Отже, модель із зосередженими параметрами випрямляча-подвійника напруги може бути розглянута та проаналізована без мережі/фільтра, що узгоджує вхідний опір, як показано на рис. 2.3. Аналіз характеристик діодів у такому типі схеми виглядає наступним чином.

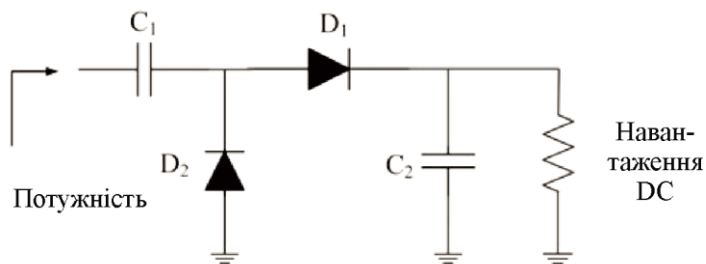


Рисунок 2.3 – Модель із зосередженими параметрами випрямляча-подвійника напруги

#### А) Кут провідності діода

На рисунку 2.5 показані мікрохвильові форми напруги-струму, що діють на діод і його з'єднання. Падаюча мікрохвильова синусоїдна напруга дорівнює  $U_p \sin \omega t$ . Напруга на діоді показана як

$$U_I = -U_T + U_P \sin \omega t \quad (2.1)$$

де  $U_T$  – напруга зміщення постійного струму на діоді, яка є комбінацією вихідної напруги постійного струму  $U_D$  і напруги провідності діода  $U_F$ . Тут  $U_{Tj} = U_D + U_F$ .

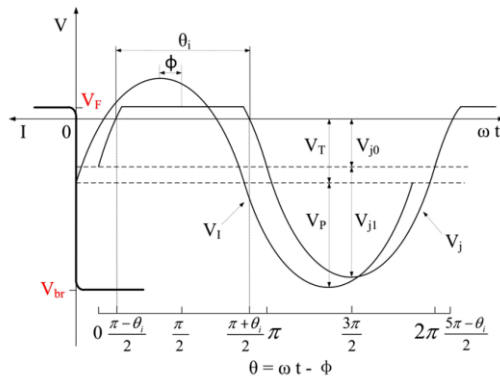


Рисунок 2.4 – Осцилограми напруги на діоді та його з'єднанні та крива вольт-амперної характеристики діода

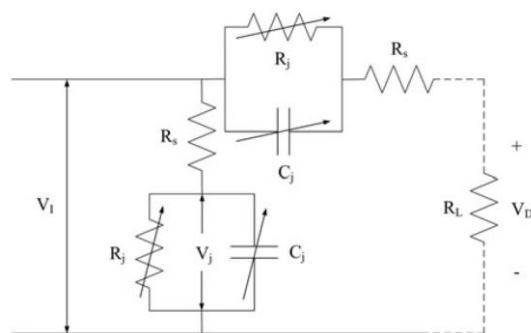


Рисунок 2.5 – Модель еквівалентної схеми випрямляча-подвійника напруги

Діоди на рис. 2.3 виражені параметрами еквівалентної схеми, як показано на рис. 2.5. Ця модель містить послідовний опір  $R_s$ , опір діодного переходу  $R_j$  і ємність переходу  $C_j$ .  $R_H$  – опір навантаження. Втрати потужності відбуваються як на послідовному опорі, так і на діодному переході. Припускаючи, що  $R_j$  близький до нуля в провідному стані та нескінченний у стані відсічення, втратами через діодний перехід нехтували протягом періоду відсічення, оскільки струм дорівнює нулю.

Завдяки діодному переходу  $U_j$  відстає від  $U_l$  на невеликий порядок  $f$ , як показано на рис. 2.4,  $U_j$  можна виразити як у рівнянні (2.2).  $U_{j0}$  і  $U_{j1}$  — це частини вхідної напруги постійного струму та середньої потужності, що працюють на діодному переході відповідно

$$U_j = \begin{cases} -U_{j0} + U_{j1} \sin(\omega t - \phi), \\ U_F \end{cases} \quad (2.2)$$

Вцілому, модель еквівалентної схеми випрямляча-подвійника напруги, яка враховує послідовний опір, опір діодного переходу та його ємність, відображає основні параметри цієї системи. Ця модель допомагає розуміти та аналізувати роботу випрямляча-подвійника, враховуючи втрати потужності та затримку напруги на діодному переході. Дослідження таких еквівалентних схем сприяє покращенню ефективності та надійності електронних пристроїв, що використовуються у різних сферах техніки та технологій.

## 2.5 Висновок до другого розділу

У цьому розділі представлено важливі теоретичні моделі для оцінки ефективності випрямлення на основі безперервних хвиль. Розглянуто процеси передавання та переходу до безперервних хвиль, визначено їх технологічні особливості та широкі можливості застосування у різних сферах. Особлива увага приділена аналізу випрямлячів у бездротовій передачі електроенергії, що є ключовим елементом в сучасних безперервних системах. Вцілому стисло узагальнює отримані результати та вказує на їх значення для подальших досліджень та практичного використання в технологічних застосуваннях.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 34   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

### 3 АНАЛІЗ КЛЮЧОВИХ КОМПОНЕНТІВ БЕЗДРОТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

У сучасному світі бездротові технології займають центральне місце в різних сферах, від комунікацій і зв'язку до інтернету речей та автономних систем. Однак для ефективної роботи бездротових пристроїв і систем необхідні надійні та продуктивні компоненти. У рамках даного дослідження зосереджено на аналізі ключових компонентів бездротових технологій, що включає в себе вивчення ефективності випрямлення модульованих хвиль, теоретичний аналіз імпульсної хвилі випрямляча, а також оцінку впливу випрямлячів Шоттки на основі безперервних хвиль. При цьому розглядається також конструкція заземленого копланарного хвилевода як важливого елемента бездротових систем. Дослідження цих компонентів допоможе краще зрозуміти їхню роль у бездротових технологіях та виявити можливості для їх подальшого вдосконалення та оптимізації.

#### 3.1 Аналіз ефективності випрямлення модульованих хвиль

За останні роки широкий розвиток бездротових технологій сприяв інтенсивному дослідженню та впровадженню концепцій Інтернету речей (IoT), бездротових сенсорних мереж (WSN) і мереж п'ятого та шостого поколінь (5G/6G). Особливу увагу привертає технологія одночасної бездротової передачі інформації та енергії, що стає надзвичайно важливою у зв'язку з розвитком бездротового живлення пристроїв під час комунікації та потребою відмовитися від батарей. Основним компонентом системи бездротової передачі інформації та енергії є ректена, що складається з приймальної антени та випрямляча, який ефективно перетворює бездротову потужність в електричну енергію постійного струму. На сьогоднішній день ефективність випрямлення НВЧ-постійного

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 35   |

струму може досягати близько 80%. Однак група Чанга запропонувала теоретичні моделі для оцінки ефективності випрямлення на основі безперервних хвиль, що дозволяє краще розуміти процес і покращувати його результати. Важливо зауважити, що ефективне випрямлення модульованих хвиль є ключовою особливістю технології бездротової передачі інформації та енергії.

Підходи до проектування випрямлячів модульованого сигналу можна класифікувати на три типи. Перше – вимірювання. Після проектування випрямлячів на основі теорії безперервної хвилі випрямляча були виміряні ККД модульованих сигналів [27]. Виміряна пікова ефективність постійного мікрохвильового випромінювання безперервної хвилі в [27] становила 78,7%, тоді як для сигналу квадратурної фазової маніпуляції (QPSK – Quadrature Phase Shift Keying) – 72,4%. Випрямляч у [28] виміряв максимальну ефективність 64,6% для безперервної хвилі і пікову ефективність 61,4% для сигналу двійкової фазової маніпуляції (BPSK – Binary Phase Shift Keying).

У [29] сигнал безперервної хвилі та амплітудна-фазова модуляція отримали найвищу ефективність випрямлення, відповідно 52% і 46%. Очевидно, ефективність модульованих хвиль була нижчою, ніж у безперервної хвилі, що пояснюється тим фактом, що відношення пікової до середньої потужності безперервної хвилі і модульованих хвиль були однаковими. Експериментальне дослідження виявило, що модульовані хвилі з високим відношення пікової до середньої потужності отримували б високу ефективність, коли вхідна потужність була низькою [30]. Фам та ін. виміряли максимальну ефективність 74,7% для імпульсної хвилі і 8,3% для безперервної хвилі, коли вхідна потужність становила -15 дБм, а опір навантаження становив 100 кОм [30]. У [31] результати вимірювань показали, що ортогональне частотне мультиплексування (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing), білий шум і хаотичні сигнали мали вищу ефективність, ніж безперервної хвилі при вхідній потужності –10 дБм.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 36   |

Друга класифікація зазначає поєднання моделювання та експериментів. Після моделювання випрямлячів у програмному забезпеченні ADS вони були виготовлені та піддані вимірюванням. У дослідженні [32] мультизіновий сигнал продемонстрував пікову ефективність на рівні 72,6% при вхідній потужності 16 дБм. Імпульсна хвиля випрямляча, виміряна у [33], показала пікову ефективність 64% при середній вхідній потужності 4 дБм, в той час як випрямляч, описаний у [34], досягнув ефективності 59,6% при вхідній потужності -2,84 дБм.

Третя класифікація поєднує теоретичний аналіз, моделювання та експерименти. Після теоретичного аналізу випрямлячів отримані висновки були перевірені шляхом моделювання та вимірювань. У першу чергу, проводився теоретичний аналіз випрямлячів. Далі, отримані висновки були перевірені шляхом моделювання та експериментів. Під час теоретичного аналізу навантаження випрямляча, автори у [35] прийшли до висновку, що оптимальне навантаження для модульованих хвиль зростатиме зі збільшенням відношення пікової до середньої потужності хвиль. На основі моделі еквівалентної схеми та виведення в [16], автори у [36] розробили теоретичну формулу ефективності випрямлення для оптимізованих за потужністю сигналів, коли відношення пікової до середньої потужності випрямляча перевищує 1. Зроблено висновок, що ефективність підвищується зі збільшенням цього відношення від 2 до 200, особливо при низькій вхідній потужності. Теоретичний аналіз, зроблений у [35, 36], був перевірений за допомогою моделювання та вимірювань у ADS.

Окрім відношення пікової до середньої потужності модульованої хвилі, інші параметри також впливають на пікову ККД випрямляча. У даній роботі проведено теоретичний аналіз імпульсної хвилі випрямляча. Зроблено висновок, що досягнення максимальної ефективності можливе у випадку, коли робочий цикл і навантаження випрямляча обернено пропорційні при однаковій вхідній амплітуді імпульсної хвилі. Для підтвердження цього правила був розроблений,

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 37   |

змодельований та вимірний імпульсний випрямляч на основі заземленого копланарного хвилеводу (GCPW). Застосування такого випрямляча можливе у системах бездротової передачі інформації та енергії.

### 3.2 Теоретичний аналіз імпульсної хвилі випрямляча

Теоретично проаналізовано випрямляч імпульсної хвилі на прикладі випрямляча-подвійника напруги. Модель еквівалентної схеми діодів подвоєння напруги проілюстрована на рисунку 3.1, де  $R_s$  – це еквівалентний послідовний опір,  $C_j$  – ємність переходу,  $C_H$  – ємність фільтра постійного струму,  $R_H$  – опір навантаження. Цей аналіз дозволяє краще зрозуміти принципи роботи випрямляча імпульсної хвилі, а також визначити параметри, які впливають на його ефективність.

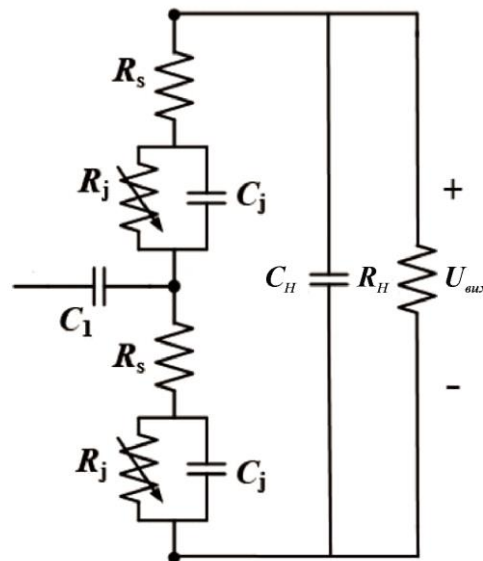


Рисунок 3.1 – Модель еквівалентної схеми діода подвоєння напруги

Форма сигналу імпульсної хвилі у часовій області з періодом повторення  $T_a$  представлена на рисунку 3.2. Потужність неперервної хвилі (CW) зосереджена на частковій тривалості  $\Delta T$ . Відношення  $\Delta T$  до  $T_a$  визначається як

робочий цикл  $\alpha$ . Час тривалості імпульсу  $\Delta T$  містить  $M$  послідовних періодів синуса ( $M=3$  на рисунку 3.2). Це дозволяє визначити характеристики імпульсу та робочий режим системи імпульсного випрямлення.

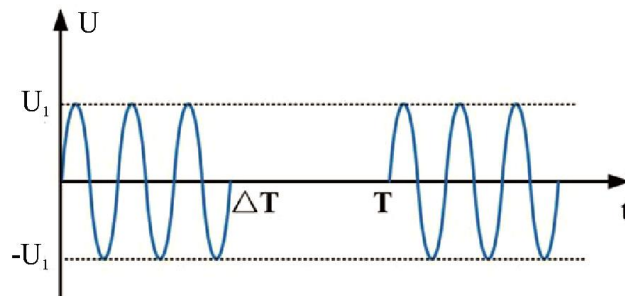


Рисунок 3.2 – Форма імпульсної хвилі у часовій області

Напруга  $U_d$  на діоді може бути визначена як:

$$U_d = \begin{cases} -U_{d0} + U_{d1} \cos(\omega t - \phi) & \text{Діоди вимкнено, а хвиля увімкнена} \\ -U_{d0} & \text{Діоди вимкнено, а хвиля викнена} \\ U_T & \text{Діоди увімкнено} \end{cases}, \quad (3.1)$$

де  $U_{d0}$  – постійна складова  $U_d$  на діоді,  $U_{d1}$  – амплітуда основної напруги на діоді,  $U_T$  - пряма напруга включення діода, а  $\phi$  – різниця фаз між  $U_d$  і  $U$ , як показано на рисунку 3.3. Припускаючи, що  $U_0$  – це постійний компонент напруги на  $R_L$ , а  $U_1$  – амплітуда вхідної імпульсної хвилі, напруга  $U_n$  у вузлі між двома діодами дорівнює:

$$U_n = \begin{cases} -\frac{U_0}{2} + U_1 \cos(\omega t) & 0 < t < 2\pi M \\ -\frac{U_0}{2} & 2\pi M < t < \frac{2\pi M}{\alpha} \end{cases}. \quad (3.2)$$

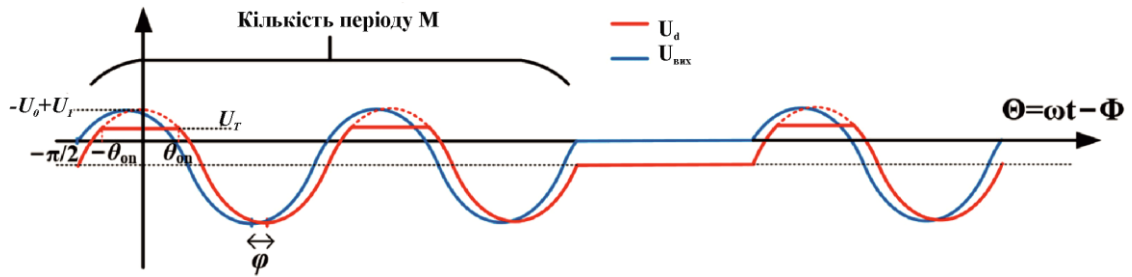


Рисунок 3.3 – Графіки  $U_d$  і  $U_{вих}$  у часовій області

Вихідна напруга  $U_{вих}$  описується:

$$U_{вих} = \begin{cases} -U_0 + U_1 \cos(\omega t) & 0 < t < 2\pi M \\ -U_0 & 2\pi M < t < 2\pi M / \alpha \end{cases} \quad (3.3)$$

Середнє значення  $U_{d,dc}$  є середнім значенням  $U_d$  протягом повного періоду.

Це можна обчислити за допомогою формули:

$$U_{d,dc} = \frac{1}{T} \int_0^T U_d d\theta = \frac{1}{2\pi M / \alpha} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{2\pi M}{\alpha} - \frac{\pi}{2}} U_d d\theta =$$

$$= \frac{\alpha}{2\pi} \left[ -2U_{d1} \sin \theta_{вкл} + 2U_{d0} \theta_{вкл} - 2U_T \theta_{вкл} - \frac{2\pi U_{d0}}{\alpha} \right], \quad (3.4)$$

де  $\theta = \omega t - \varphi$ , а  $\theta_{вкл}$  – фазовий кут, при якому діод увімкнено. Очевидно, що значення  $M$  виключається у виразі (3.5), що вказує на те, що  $M$  не пов'язане з  $U_{d,dc}$ .

Відповідно до закону Кірхгофа вихідна напруга постійного струму та напруга на діоді мають співвідношення:

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 40   |

$$\frac{U_0}{2} = \frac{U_{d,dc}}{1 + 2 \cdot R_s / R_L} \quad (3.5)$$

Слід описувати вхідну напругу та струм як середньоквадратичне значення. Середньоквадратичне значення напруги  $U_{RMS}$  обчислюється за допомогою формули:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int U^2(\theta) d\theta} = \sqrt{\frac{\alpha}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{3\pi/2} (U_1 \cos(\theta + \varphi))^2 d\theta} = U_1 \sqrt{\frac{\alpha}{2}} \quad (3.6)$$

Струм через кожен діод є комплексним, тому він зображений так:

$$I = I_R \cos(\theta) + I_i \sin(\theta) \quad (3.7)$$

в якому враховується лише дійсна частина  $I_R \cos(\theta)$ , оскільки уявна частина не споживає електричної енергії. Справжній струм:

$$I_R = \frac{1}{\pi R_s} \left[ \int_{-\pi/2}^{-\theta_{вкл}} (U - U_d) \cos(\theta + \varphi) d\theta + \int_{-\theta_{вкл}}^{\theta_{вкл}} (U - U_T) \cos(\theta + \varphi) d\theta + \int_{\theta_{вкл}}^{3\pi/2} (U - U_d) \cos(\theta + \varphi) d\theta \right] = I_R(\theta_{вкл}, \varphi) \quad (3.8)$$

Функція  $I_R(\theta_{вкл}, \varphi)$  залежить від параметрів  $\theta_{вкл}$  та  $\varphi$ . Отже, середньоквадратичний струм на кожному діоді визначається за формулою (3.9):

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{\alpha}{2\pi M} \int_{-\pi/2}^{3\pi/2} M \times (I_R \cos \theta)^2 d\theta} = I_R(\theta_{вкл}, \varphi) \sqrt{\frac{\alpha}{2}} \quad (3.9)$$

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 41   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

Загальну вхідну потужність можна розрахувати шляхом використання наступного виразу:

$$P_{ex} = U_{RMS}(2I_{RMS}) \quad (3.10)$$

Отже, ефективність випрямлення, позначена як  $\eta$ , може бути визначена за допомогою наступного виразу:

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P_{ex}} = \frac{U_0^2 / R_L}{U_{RMS}(2I_{RMS})} = \frac{U_0^2}{U_1 I_R(\theta_{вкл}, \varphi) \alpha R_L} \eta(\alpha R_L) \quad (3.11)$$

З рівняння (3.11) можна вивести, що ефективність випрямлення імпульсної хвилі випрямляча залежить від продуктивності робочого циклу  $\alpha$  та опору навантаження  $R_H$ . Коли пікова вхідна напруга  $U_1$  залишається сталою, а добуток  $\alpha$  і  $R_H$  не змінюється, максимальна ефективність випрямляча залишається незмінною. Іншими словами, при різних робочих циклах імпульсної хвилі випрямляч може забезпечувати високу ефективність випрямлення, змінюючи опір навантаження. Безперервну хвилю можна розглядати як спеціальний випадок імпульсної хвилі зі співвідношенням  $\alpha$ , яке дорівнює 1. Як тільки оптимальний опір навантаження для безперервної хвилі  $R_{LCW}$  дорівнює  $\alpha \times R_{LPW}$  для імпульсної хвилі, пікова ефективність випрямлення обох типів сигналів стає однаковою за умови, що амплітуда залишається незмінною.

Ефективність випрямлення імпульсної хвилі випрямляча обчислюється за допомогою наступної формули:

$$\eta = \frac{U_0^2 / R_L}{P_{ex}} \quad (3.12)$$

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 42   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

З урахуванням робочого циклу імпульсної хвилі, вхідна імпульсна потужність  $P_w$  і середня вхідна потужність  $P_{вх}$  мають таке співвідношення:

$$P_{вх} = P_w + 10\log(\alpha) \text{ (dBm)} \quad (3.13)$$

З огляду на середню вхідну потужність  $P_{вх}$ , її використання є необхідним при розрахунку ефективності випрямлення імпульсної хвилі. Можна зробити висновок, що імпульсна хвиля може досягати вищої ефективності при низькій середній вхідній потужності. Це пояснюється тим, що імпульсна хвиля концентрує потужність безперервної хвилі протягом часткового часу, щоб отримати більшу амплітуду за такої ж відносно низької вхідної потужності  $P_{вх}$ .

Проведений аналіз технології бездротової передачі інформації та енергії в контексті безперервних хвиль розкриває значний потенціал цієї технології в сучасному світі. Одним із ключових компонентів цієї системи є випрямлячі, які ефективно перетворюють бездротову потужність в електричну енергію постійного струму. У даному контексті важливо згадати про випрямлячі Шотткі, які володіють швидшим часом відгуку та нижчою напругою перетину, порівняно зі звичайними польовими випрямлячами.

Моделі і аналіз ефективності випрямлення на основі безперервних хвиль, які були представлені групою Чанга, вказують на значний потенціал для покращення результатів випрямлення. Особливо важливо врахувати ці теоретичні моделі при проектуванні випрямлячів Шотткі, оскільки вони дозволяють краще розуміти процеси, що відбуваються в таких системах, та оптимізувати їх ефективність.

Зокрема, аналіз вимірювань ефективності випрямлення для різних типів модульованих хвиль, таких як QPSK та BPSK, вказує на значний вплив

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 43   |

характеристик вхідного сигналу на ефективність випрямлення. Дослідження також показали, що оптимальне навантаження для випрямлячів залежить від відношення пікової до середньої потужності хвиль, що враховується при проектуванні випрямлячів Шотткі.

Таким чином, інтеграція теоретичних моделей та аналізу ефективності випрямлення на основі безперервних хвиль у дослідження та проектування випрямлячів Шотткі може сприяти подальшому розвитку бездротових технологій та покращенню їхньої продуктивності.

### 3.3 Аналіз випрямлячів Шотткі на основі безперервних хвиль

Випрямлячі Шотткі вже більше 25 років використовуються в галузі електропостачання. Основними перевагами є дуже низьке падіння прямої напруги та швидкість перемикавання, яка наближається до нуля, що робить їх ідеальними для вихідних каскадів імпульсних джерел живлення. Ця остання особливість також стимулювала їх додаткове використання в дуже високочастотних програмах, включаючи дуже низьку потужність, включаючи вимоги до сигналу та перемикавання діодів менше ніж 100 пікосекунд. Для цього потрібні маленькі пристрої Шотткі з низькою ємністю.



Рисунок 3.4– Умовно графічне позначення діода Шотткі на електричних принципових схемах

У своїй простій формі діод Шотткі складається з одного шару напівпровідника р-типу або n-типу, розташованого між двома металевими

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 44   |

електродними контактами, один з яких дозволяє інжектувати заряд в одному напрямку зсуву, блокуючи в іншому, а інший забезпечує низький рівень опір проведення струму як омичний контакт. Коли випрямляючий металевий електрод і напівпровідник з'єднані разом, початково різні рівні Фермі напівпровідника та робота виходу металу змушені вирівнюватися, теоретично спричиняючи вигин зони та створення бар'єру Шотткі, відповідального за випрямлення, як описано в Правило Шотткі-Мотта. [8] У практичних застосуваннях, однак, правило Шотткі-Мотта не дотримується строго на інтерфейсах метал–напівпровідник через явище закріплення рівня Фермі, яке виникає внаслідок утворення електронних станів у забороненій зоні на кінці напівпровідникового матеріалу. проти випрямляючого металевого контакту.

В уніполярному діоді Шотткі немає області збіднення носіїв заряду на переході метал–напівпровідник. Таким чином, під прямим зсувом дірки можуть без особливих перешкод зміщуватися з напівпровідника безпосередньо в метал, тоді як бар'єр Шотткі блокує ін'єкцію дірок з металу у зворотному напрямку. Відсутність області збіднення носіїв заряду дозволяє усунути час зворотного відновлення, необхідний в інших типах діодів для зміни робочого стану з прямого зсуву на зворотний, що призводить до надзвичайної частоти перемикання діодів Шотткі. Крім того, оскільки бар'єр метал–напівпровідник має нижчу висоту порівняно з бар'єрами переходу в діодах з р–n-переходом, потрібна нижча напруга активації прямого зміщення, що забезпечує більшу щільність прямого струму та менше падіння напруги прямого зміщення. У свою чергу, однак, низька висота бар'єру є недоліком зворотного зсуву, відповідаючи за більш високі рівні зворотного струму витoku та зниженої зворотної напруги пробою, які обмежують діод Шотткі для застосування з низькою напругою. Ці два недоліки можна компенсувати архітектурно, оточуючи діод напівпровідниковими захисними кільцевими структурами, які можуть захистити

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 45   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

від струму витоку та зворотного пробую, контролюючи геометрію поля пробую [37]. Діод Шотткі став найпопулярнішою конструкцією друкованого діода, значно випереджаючи більшість інших конкурентів. Ця діодна архітектура продемонструвала як чудову сумісність із друком, так і видатну частоту перемикання при низьких напругах.

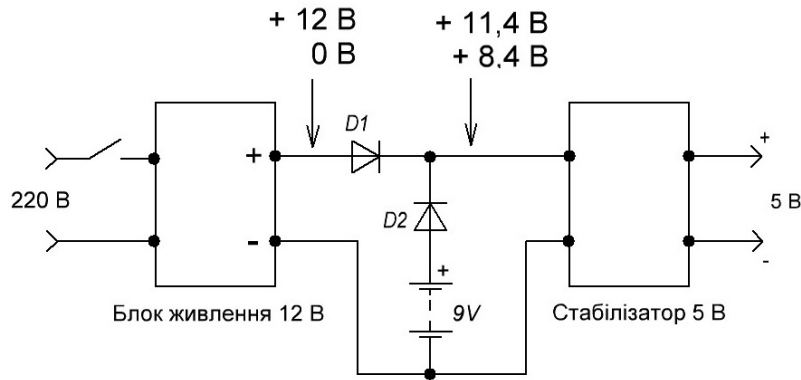


Рисунок 3.5 – Конструкція діода Шотткі

Зворотний час відновлення діодів Шотткі має надзвичайно швидкі (але м'які) характеристики відновлення. Наскільки малий час зворотного відновлення, який вони можуть продемонструвати, насамперед продиктовано їхньою ємністю, а не рекомбінацією неосновних носіїв, як у звичайних випрямлячах з рп-переходами. Ця характеристика забезпечує дуже незначне перевищення зворотного струму при перемиканні Шотткі з режиму прямої провідності в стан зворотного блокування.

Поєднання дуже «швидких і м'яких властивостей перемикання» Шотткі також може усунути потребу в демпфуючих схемах у багатьох додатках, які в іншому випадку можуть знадобитися для швидких або надшвидких випрямлячів, що демонструють характеристики різкого відновлення. Ці особливості роблять випрямлячі Шотткі дуже привабливим вибором для низьких паразитних втрат при перемиканні.

Конструкція пристроїв Шотткі обмежена в деяких додатках порівняно з випрямлячами рп-переходів, оскільки їх зворотні струми витоку у багато разів вищі. Крім того, випрямлячі Шотткі мають максимальні номінальні температури переходів зазвичай у діапазоні від 125°C до 175°C, порівняно з типовими 200°C для звичайних рп-переходів, що додатково впливає на поведінку струму витоку.

Для деяких застосувань пристрої Шотткі мають обмежені номінальні значення напруги зворотного блокування порівняно зі звичайними випрямлячами з рп-переходом. Незважаючи на це, завдяки розумному вибору багато додатків оптимізовано за допомогою випрямлячів Шотткі та їхніх унікальних робочих характеристик. Випрямлячі Шотткі рідко перевищують 100 вольт у своїй робочій піковій зворотній напрузі (VRWM), оскільки пристрої, які помірно перевищують цей номінальний рівень, призведуть до прямої напруги, яка дорівнює або перевищує еквівалентні випрямлячі з рп-переходом.

Описані вище властивості випрямляча Шотткі в основному визначаються висотою металевого енергетичного бар'єру матеріалу, нанесеного на кремній виробником. Метал з низькою висотою енергетичного бар'єру мінімізує пряму напругу, але також буде обмежений у своїй високотемпературній робочій здатності та матиме дуже високі зворотні струми витоку. Вибір високої висоти металевого бар'єру мінімізує чутливість до температури та струму витоку, але збільшить пряму напругу.

Залежно від вимог застосування, ці особливості конструкції можна використовувати як компроміс у правильному виборі при виборі випрямляча Шотткі з використанням різних бар'єрних металів від виробника. Корпорація Microsemi пропонує різноманітні варіанти бар'єрного металу на п-епітаксіальному шарі поверх підкладки з низьким питомим опором для оптимізації параметричних характеристик на додаток до захисного огородження та пасивації. Надійний з'єднання Шотткі розроблено з захисним кільцем рп-

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 47   |

переходу, щоб закінчувати периметр розсіяною р-областю. Це також служить пригнічувачем перехідної напруги для зворотного поглинання енергії та захисту від перенапруги в безпосередній близькості від переходу Шотткі. Ця область периметра фактично потрапляє в лавину, перш ніж Шотткі пошкоджується надмірною кількістю зворотного потоку струму та енергії під час перехідних процесів.

Захисне співвідношення пристрою «напруга-струм» показано на рисунку 3.6 разом із типовими електричними параметрами, визначеними для випрямлячів Шотткі.

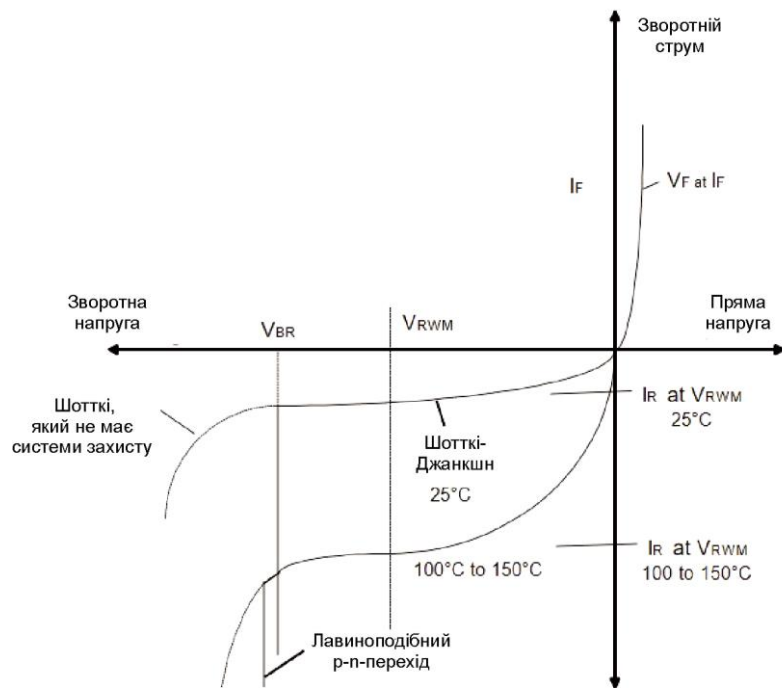


Рисунок 3.6 – Вольт-амперні характеристики та типові параметри Шотткі

У деяких випадках випрямлячі Шотткі також специфікуються зі зворотним тестом на лавинну енергію. Це допоможе забезпечити безпечний рівень роботи в додатках із дуже швидким перемиканням, що призводить до високої індуктивної (наприклад, трансформаторної) напруги  $Ldi/dt$  або інших джерел перехідних процесів перенапруги, які можуть короткочасно вивести Шотткі за межі максимальної номінальної  $V_{RWM}$ . У таких програмах користувач має

запитувати ці спеціальні вимоги до зворотної енергії для додаткового екранування, якщо не вказано інше.

Комплексний світ бездротових технологій, де особливу увагу приділяється важливості аналізу ефективності випрямлення на основі безперервних хвиль та їх взаємодії з параметрами заземленого копланарного хвилеводу. Вимірювання таких параметрів, як імпеданс або втрати сигналу в хвилеводі, визначають оптимальні умови для передачі бездротового сигналу. Подальше використання цих даних при проектуванні випрямлячів Шоттки дозволяє досягти максимальної ефективності випрямлення та мінімізувати втрати сигналу.

### 3.4 Конструкція заземленого копланарного хвилевода

Заземлений копланарний хвилевід (GCPW – Grounded Coplanar Waveguide) – це тип хвилеводу, який використовується в мікрохвильовій і міліметровій техніці передачі сигналів. У цьому типі хвилеводу провідники, що передають сигнал, розташовані між двома заземленими провідниками, що знаходяться на одному рівні з активним провідником. Це дозволяє забезпечити кращу електромагнітну ізоляцію від оточуючого середовища та зменшити загальний розмір структури, що робить його привабливим для використання в мікросхемах та інтегральних схемах.

Заземлений копланарний хвилевід, як мікрохвильова та надсмугова мікросмужкова лінія, має широкий спектр застосувань і є незамінним компонентом для калібрування пробників осцилографів. Через широку смугу пропускання струмового датчика заземленого копланарного хвилевода можна розглядати як підсистему калібрувального датчика. Відповідно до теорії вимірювання у часовій області, смуга пропускання заземленого копланарного хвилевода має бути більш ніж у 2-3 рази більша за смугу пропускання зонда, щоб лінія передачі GCPW не впливала на точність калібрування зонда.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 49   |

Дослідження використання заземленого копланарного хвилевода з масивами через отвори як тестових пластин для калібрування зондів привернуло все більше уваги, і опубліковані дослідження повідомляють, що смуга пропускання заземленого копланарного хвилевода зазвичай досягає 50 ГГц або 40 ГГц. Чим ширша смуга пропускання, тим суворіші вимоги до розміру та структури GCPW. Умар змінив сигнал заземленого копланарного хвилевода з одностороннього на диференціальний вхід, щоб збільшити смугу пропускання до 60 ГГц, що призвело до складної структури, яка не сприяла практичному застосуванню. Хуей Хуанг придумав моди вищого порядку, додавши структуру наскрізних отворів до заземленого копланарного хвилевода для досягнення смуги пропускання до 50 ГГц, продемонструвавши, що додавання наскрізних отворів до заземленого копланарного хвилевода є ще одним ефективним способом розширення його смуги пропускання.

Копланарна лінія передачі (копланарний хвилевід) має схожі переваги з щілинною лінією, але відрізняється ще однією важливою перевагою - мінімальна залежність хвильового опору від товщини підкладки. Це означає, що копланарна лінія дозволяє використовувати підкладки з високим значенням діелектричної проникності ( $\epsilon$ ), що в свою чергу дозволяє зменшити розміри інтегральних схем. Така властивість робить копланарний хвилевід перспективним рішенням для досягнення компактних розмірів електронних пристроїв і сприяє їхньому ефективному використанню в сучасних технологічних рішеннях.

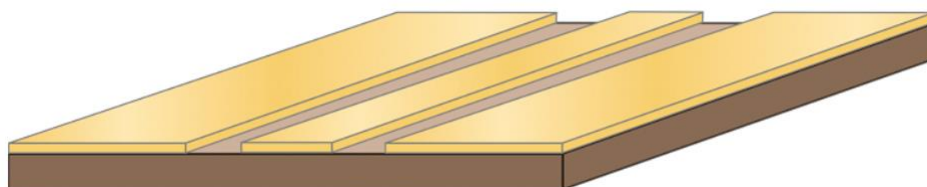


Рисунок 3.7 - Копланарна лінія

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 50   |

Досягнення в мікрохвильовій технології сприяли розробці мікрохвильових датчиків і покращенню їх продуктивності. Наприклад, мікрохвильові датчики — це методи мікрохвильової діелектричної спектроскопії та ближньої інфрачервоної спектроскопії, об'єднані для отримання більшої кількості даних електромагнітного спектру, тому використання мікрохвильових датчиків може бути більш ефективним у ідентифікації різних речовин без використання великої кількості зразків для навчання. Новий датчик поєднує методи флуоресценції та мікрохвильової діелектричної спектроскопії в одній фізичній структурі, і точність ідентифікації фальсифікації меду може бути покращена за допомогою комбінації двох різних спектральних даних.

### 3.5 Висновок до третього розділу

У даному розділі детально проаналізовано ефективність випрямлення модульованих хвиль, вивчено теоретичні аспекти імпульсної хвилі випрямляча та проведено аналіз випрямлячів Шоттки на основі безперервних хвиль. Набуті знання стосовно конструкції заземленого копланарного хвилевода допомагають краще зрозуміти та використовувати бездротові технології в сучасному світі. Великий потенціал для покращення продуктивності та ефективності бездротових систем завдяки аналізу та оптимізації їхніх ключових компонентів.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 51   |

## 4 ВДОСКОНАЛЕННЯ ТА ОЦІНКА ІМПУЛЬСНО-ХВИЛЬОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА

В останні роки імпульсно-хвильові випрямлячі привернули значну увагу у наукових та технічних колах завдяки їх важливій ролі у бездротових технологіях та інших сферах. Ці випрямлячі є ключовими компонентами в системах бездротового передачі сигналів і енергії, забезпечуючи ефективне перетворення безперервних або модульованих хвиль на постійний струм. Їхнє вдосконалення і оцінка стають об'єктом інтенсивного дослідження з метою підвищення їхньої ефективності та функціональності.

У відповідь на потребу у практичній перевірці теоретичних концепцій, розглянутих у попередньому розділі щодо імпульсного випрямлення, був розроблений конкретний імпульсний випрямляч. Цей випрямляч, який дозволяє перетворювати імпульсні хвилі у постійний струм, включає в себе ряд ключових компонентів, таких як мережу узгодження імпедансу, випрямні діоди, фільтр постійного струму та опір навантаження.

У зазначеному в рисунку 4.1 схематичному зображенні представлена структура випрямляча з подвоєнням напруги, що складається з кількох ключових компонентів, включаючи мережу узгодження імпедансу, два випрямні діоди, фільтр постійного струму та опір навантаження.

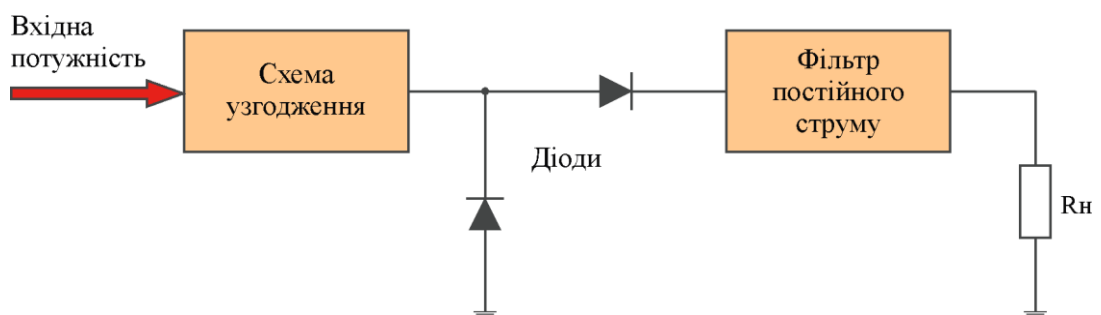


Рисунок 4.1 – Схематичне зображення випрямляча зі збільшенням напруги

Структура випрямляча, який було розроблено, наведена на рисунку 4.2. У даному випрямлячі використовується заземлений компланарний хвилевід GSPW для створення шляху постійного струму до діодів, уникнення паразитного ефекту, який може виникати від використання мікросмужкових ліній. В якості випрямного діода було вибрано діод Шоттки HSMS-2862, який складається з двох діодів HSMS-2860. Також, серія детекторних діодів постійного струму HSMS-286x спеціально розроблена та оптимізована для використання у широкому діапазоні частот, починаючи від 915 МГц і до 5,8 ГГц. Вони ідеально підходять для застосувань у радіочастотних ідентифікаційних системах (RFID) та RF технологіях, а також для виявлення сильних сигналів, модуляції, перетворення радіочастотного сигналу в постійний струм або подвоєння напруги. Ця серія детекторних діодів пропонує недорогі рішення для різноманітних проектних завдань.

Цей діод має низьку ємність переходу ( $C_{j0} = 0,18$  пФ), низьку напругу прямого зсуву ( $V_T = 0,35$  В) і напругу зворотного пробою ( $U_{зв} = 4$  В).

Послідовний конденсатор  $C_1$  з ємністю 47 пФ діє як блок постійного струму, щоб запобігти зворотному проходженню сигналу постійного струму до джерела вхідного сигналу. Для приглушення гармонік високого порядку та згладжування вихідної напруги постійного струму, був створений фільтр постійного струму. Цей фільтр складається з конденсаторів  $C_2$  і  $C_3$  ємністю 470 пФ, які з'єднані паралельно через заземлений компланарний хвилевід GSPW. Підкладкою був використаний F4В з відносною діелектричною проникністю  $\epsilon_r = 2,65$ , тангенсом утрат  $\tan \delta = 0,001$  і товщиною  $h = 0,8$  мм.

Випрямляч був змодельований за допомогою програмного забезпечення ADS з такими параметрами:  $w_1 = 2,1$  мм,  $w_2 = 0,7$  мм,  $w_3 = 4$  мм,  $g_1 = 1$  мм і

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 53   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

$g_2 = 1,7$  мм. Запропонований випрямляч працює на частоті 2,4 ГГц і має компактні розміри  $0,22 \lambda_0 \times 0,11 \lambda_0$  ( $28 \times 14$  мм<sup>2</sup>).

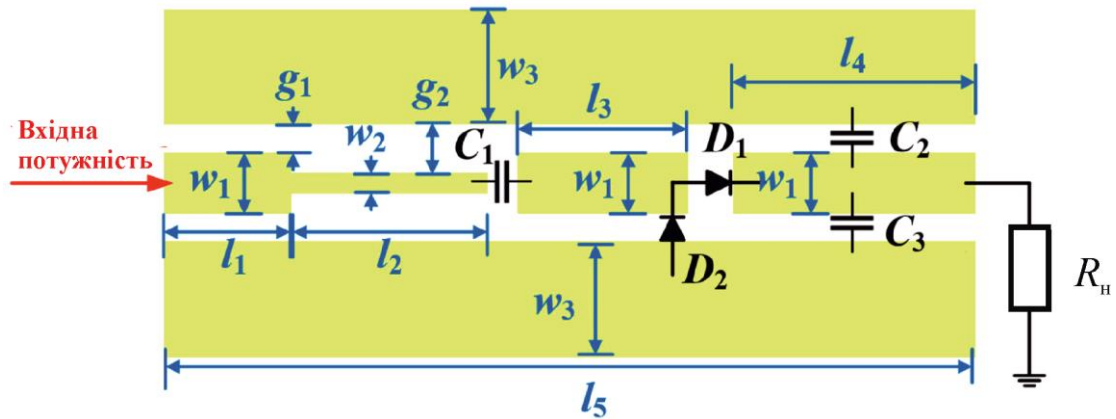


Рисунок 4.2 – Структура запропонованого випрямляча

Блок схема вимірювань зображена на рисунку 4.3.

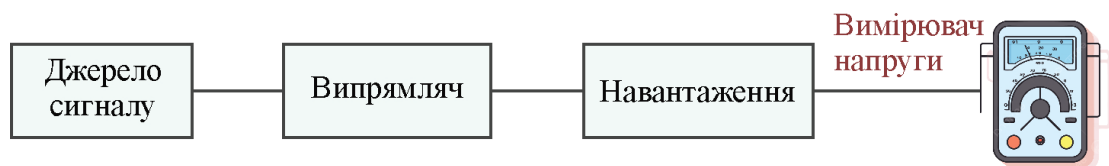


Рисунок 4.3 – Вимірювальна система випрямляча

#### 4.1 Вимірювання при однаковій амплітуді напруги

На рисунку 4.4 показана ефективність випрямлення від навантаження для різних робочих циклів при однаковій піковій вхідній напрузі випрямляча. Досягнута висока відповідність між результатами моделювання та вимірювань. Робоча частота випрямляча у моделі становить 2,4 ГГц, оскільки вхідна імпульсна потужність складає 17 дБм. Середня вхідна потужність може бути розрахована згідно з формулою (3.13). Найвища модельна ефективність випрямлення залишається на рівні понад 77% при різних робочих циклах 0,01,

0,1, 0,5 і 1 та відповідних навантажень 50 кОм, 5 кОм, 1 кОм і 0,5 кОм. Зі збільшенням робочого циклу оптимальне значення навантаження зменшується, і відбувається обернена залежність між робочим циклом та навантаженням.

При вимірюванні було встановлено, що робоча частота складає 2,38 ГГц, а оптимальна вхідна потужність становить 20 дБм, що зазвичай веде до досягнення максимальної ефективності випрямлення на рівні близько 76%. Найкращі результати були отримані при використанні навантажень 50 кОм, 5 кОм, 1 кОм і 0,5 кОм. Порівняно з модельованими даними, виміряна максимальна ефективність випрямлення трохи знизилася, але загальна тенденція кривої залишається стабільною.

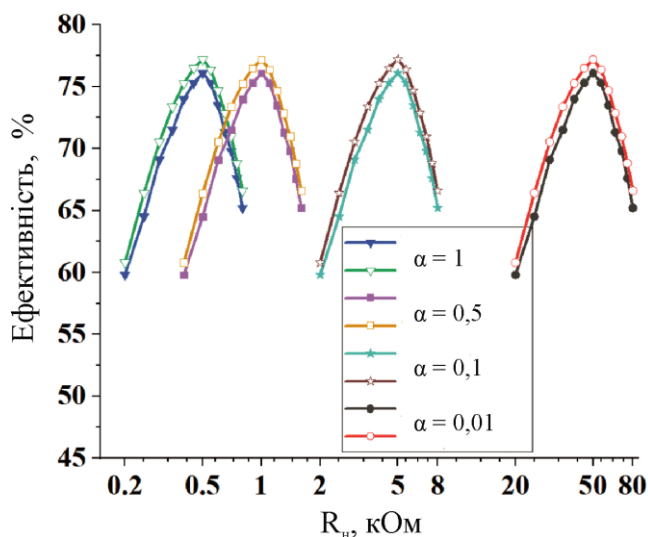


Рисунок 4.4 – Моделювання ефективності випрямлення при однаковій вхідній напрузі

Теоретичний аналіз у розділі 3 можна перевірити наступним чином. Фазовий кут  $\theta$  на описується:

$$\cos(\theta_{\text{вкл}}) = \frac{U_T + U_{d0}}{U_{d1}} \quad (4.1)$$

Припустивши, що опір переходу діода дуже великий, коли діод вимкнений. Таким чином, напруга на послідовному опорі  $R_s$  показана як:

$$R_s \frac{d(C_j - U_d)}{dt} = U_n - U_d \quad (4.2)$$

Ємність переходу  $C_j$  обчислюється в ряд Фур'є, де:

$$C_j \approx C_0 + C_1 \cos(\omega t - \varphi) + C_2 \cos(2\omega t - 2\varphi) + \dots \quad (4.3)$$

в якому елементом, вищим за другу гармоніку, можна знехтувати. Підставляючи (4.3) у (4.2), можна побачити, що:

$$\begin{aligned} & \omega R_s (C_1 U_{d0} - C_0 U_{d1}) \sin(\omega t - \varphi) = \\ & = U_{d0} - \frac{U_0}{2} + (U_1 \cos(\varphi) - U_{d1}) \cos(\omega t - \varphi) - U_1 \sin \varphi \sin(\omega t - \varphi) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Оскільки вираз (4.4) має зберігатися протягом періоду вимкнення діода, кожен елемент у виразі (4.4) окремо дорівнює нулю:

$$U_{d0} = \frac{U_0}{2} \quad (4.5)$$

$$U_{d1} = U_1 \cos(\varphi) \quad (4.6)$$

Підставляючи (3.5) і (4.4) в (4.6),  $\varphi$  описується як:

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 56   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

$$\varphi = \arctan \left[ \omega R_s \left( C_0 - \frac{C_1 \cos(\theta_{\text{вкл}})}{1 + U_T / (U_0 / 2)} + C_2 \right) \right] \approx \arctan (\omega R_s C_{\text{еф}}) \quad (4.7)$$

де  $C_{\text{еф}}$  – ефективна ємність, яку можна розглядати як  $C_{\text{еф}} \approx C_j$  [16].

Співвідношення між  $\theta_{\text{вкл}}$ ,  $R_s$ ,  $R_H$  і  $\alpha$  виходить шляхом підстановки (3.5), (4.1), (4.5) і (4.6) у (3.4), тому це показано як:

$$\frac{\pi R_s / (\alpha R_H)}{1 + U_T / (U_0 / 2)} = \tan(\theta_{\text{вкл}}) - \theta_{\text{вкл}} \quad (4.8)$$

Напруга  $U_1$  розраховується відповідно до:

$$P_{\text{PW}} = \frac{U_{1\text{еф}}^2}{Z_{\text{вх}}} \quad (4.9)$$

де  $U_{1\text{еф}}$  – ефективне значення вхідної напруги, а співвідношення між  $U_{1\text{еф}}$  і  $U_1$  це  $U_1 = \sqrt{2} U_{1\text{еф}}$ .

Коли вхідний опір  $Z_{\text{вх}}$  узгоджується з внутрішнім опором  $Z_s$  джерела сигналу, його значення дорівнює:

$$Z_{\text{вх}} = Z_s^* = 50 \Omega \quad (4.10)$$

$P_{\text{PW}} = 20$  дБм підставляється в (4.9) і (4.10), щоб отримати  $U_1 = 3,16$  В.

Беручи  $C_{\text{еф}} \approx C_{j0}$ , підставляючи частоту  $f = 2,4$  ГГц, опір переходу діода  $R_s = 6$  Ом і ємність нульового зміщення  $C_{j0} = 0,18$  пФ у формулу (4.7), можна отримати різницю фаз  $\varphi = 0,0163$ .

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 57   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

Для отримання найвищої ефективності випрямлення вихідна напруга  $U_0 = U_{br} = 4 \text{ В}$  [36]. Напруга  $U_T = 0,35 \text{ В}$ , (4.5) і (4.6) підставляються в (4.1), щоб отримати кут провідності  $\theta_{екл} = 0,7329$ . Різні робочі цикли  $\alpha$  можна підставити в (4.8), щоб отримати відповідний опір навантаженню  $R_n$  для різних значень  $\alpha$ , щоб отримати результат розрахунку на рисунку 4.5.

Нарешті, підставляючи всі відомі вище умови та використовуючи вираз (3.13), отримуємо теоретичну максимальну ефективність випрямлення пульсуючих сигналів (PW) за різних робочих циклів. Розрахункова пікова ефективність випрямлення становить 83,4%.

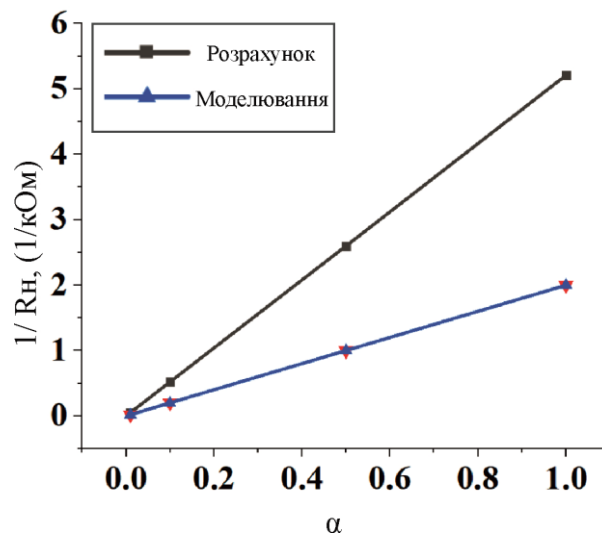


Рисунок 4.5 – Залежність  $1/R_n$  від  $\alpha$  при тій самій вхідній напрузі при піковій ефективності випрямлення

На рисунку 4.5 наведено графік залежності між робочим циклом  $\alpha$  та опором навантаження  $R_n$ , що показує результати розрахунків та моделювання. Дослідження проведено при максимальній ефективності випрямлення при стабільній вхідній напрузі. Спостерігається, що для однакової амплітуди вхідної напруги, шпаруватість  $\alpha$  зворотно пропорційна опорю навантаження  $1/R_n$ . Це

означає, що добуток  $\alpha$  і  $R_H$  залишається сталим, підтверджуючи теоретичний аналіз.

#### 4.2 Вимірювання при однаковій середній вхідній потужності

На рисунку 4.6 показано зміну ефективності (ККД) випрямлення випрямляча в залежності від навантаження для різних робочих циклів при постійній середній вхідній потужності  $P_{вх}$ . Змодельована робоча частота випрямляча складає 2,4 ГГц, а середня вхідна потужність становить -3 дБм. Діапазон навантажень розглядається від 20 до 80 кОм.

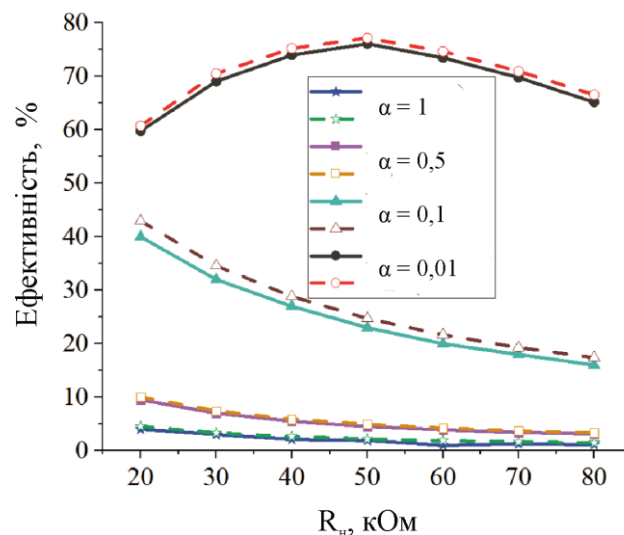


Рисунок 4.6 – Моделювання ефективності випрямлення при однаковій середній вхідній потужності

Ефективність випрямлення (ККД) є критичним параметром для оцінки продуктивності випрямляча, оскільки вона показує, яка частка вхідної потужності ефективно перетворюється у корисну вихідну потужність. Зі збільшенням робочого циклу  $\alpha$  найвища ефективність випрямлення поступово знижується. Це можна пояснити зменшенням ефективного періоду часу,

протягом якого випрямляч здатен ефективно перетворювати вхідну потужність, що призводить до збільшення втрат.

Для аналізу, змодельовано кілька значень робочого циклу  $\alpha$ , таких як 0.01, 0.05, 0.1, і 0.2, щоб визначити вплив цього параметра на ККД випрямляча. Наприклад, при значенні  $\alpha=0.01$  та навантаженні  $R_H=50$  кОм, найвища ефективність випрямлення складає 76,1%. Це демонструє, що при дуже малих робочих циклах випрямляч досягає своєї максимальної ефективності. Проте, зі збільшенням робочого циклу, ефективність знижується.

### 4.3 Форматування математичних компонентів

На рисунок 4.7 показана залежність ефективності випрямлення від середньої вхідної потужності для різних робочих циклів. Виміряна робоча частота становить 2,38 ГГц, а навантаження складає 50 кОм. Значення робочого циклу  $\alpha$  розглядаються для 0,01, 0,1 і 1. Наприклад, при  $\alpha = 0.01$  виміряна найвища ефективність випрямлення складає 76,1%, що значно перевершує найвищі ефективності випрямлення, що становлять 3,9% і 28,4% при  $\alpha = 1$  і  $\alpha = 0.1$  відповідно.

Зі збільшенням середньої вхідної потужності для різних робочих циклів спостерігається тенденція зниження ефективності випрямлення при збільшенні  $\alpha$ . Висока ефективність випрямлення при малих значеннях  $\alpha$  вказує на те, що оптимальним є використання низьких робочих циклів для досягнення максимальної ефективності перетворення енергії.

Ці результати підкреслюють важливість вибору оптимального робочого циклу для випрямляча, особливо в контексті систем, що працюють на високих частотах, таких як 2,38 ГГц. При проектуванні випрямлячів для мереж 5G та інших високошвидкісних бездротових систем необхідно враховувати вплив

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 60   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

робочого циклу на ефективність перетворення енергії, щоб забезпечити максимальну продуктивність і мінімальні втрати.

Результати на рисунку 4.7 доповнюють дані з рисунку 4.6, підтверджуючи, що менші робочі цикли сприяють підвищенню ефективності випрямлення. Вибір правильного робочого циклу є критично важливим для оптимізації роботи випрямляча, що особливо актуально для систем, де ефективність енергоперетворення є визначальним фактором.

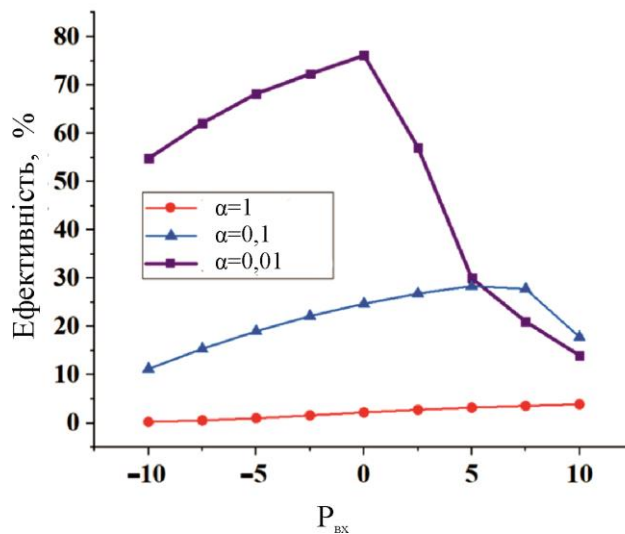


Рисунок 4.7 – Вимірювання ефективності випрямлення при однаковому опорі навантаження

Теоретичний аналіз був перевірений на практиці за допомогою результатів вимірювань при однаковій амплітуді напруги. Показано, що при збереженні пікової вхідної напруги пікова ефективність випрямлення імпульсна хвиля залишається стабільною, а добуток  $\alpha$  і  $R_n$  є постійним значенням. Можна розглядати безперервну хвилю як спеціальний випрямляч імпульсної хвилі з  $\alpha = 1$ . Це означає, що випрямляч на основі безперервної хвилі може бути трансформований в імпульсний випрямляч шляхом модифікації робочого циклу та навантаження. Такий підхід дозволяє регулювати ефективність випрямлення

в широкому діапазоні, використовуючи однакове джерело сигналу та амплітуду напруги.

Оптимальні значення вхідної потужності та навантаження, що відповідають робочому циклу  $\alpha = 1$ , складають відповідно  $P_{вх} = 20$  дБм і  $R_{н} = 0,5$  кОм. У той же час, для  $\alpha = 0,01$ , вони становлять  $P_{вх} = 20 + 10\log(0,01) = 0$  дБм і  $R_{н} = 50$  кОм для досягнення максимальної ефективності. Таким чином, імпульсний випрямляч має ефективність вище 76% у широкому діапазоні вхідної потужності (0–20 дБм) та діапазоні навантажень (0,5–50 кОм), коли значення  $\alpha$  змінюється від 0,01 до 1. Це підтверджує можливість регулювання робочого циклу та навантаження для досягнення високої ефективності випрямлення у широкому діапазоні вхідних потужностей та навантажень при рівних вхідних напругах для імпульсної та безперервної хвилі.

Дані вимірювання вказують на важливість імпульсного випрямлення у порівнянні з безперервним випрямленням при певних умовах, зокрема, при низькій вхідній потужності та великому опорі навантаження. Імпульсна хвиля здатна зосередити свою енергію в короткий час, що дозволяє досягти значної амплітуди сигналу навіть за умови низької вхідної потужності. Такий ефект стає ключовим у забезпеченні кращої ефективності випрямлення порівняно з безперервною хвилею, особливо в сценаріях з високим опором навантаження, коли зосередженість енергії є важливою.

У таблиці 4.1 узагальнено характеристики імпульсних випрямлячів, що представлені у науковій літературі. Однак дана робота має кілька переваг, які варто відзначити.

Переваги дослідженого випрямляча:

1. Імпульсний випрямляч був предметом теоретичного аналізу, що дозволило зробити висновок про зворотну пропорційність між шпаруватістю

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 62   |

імпульсної хвилі та опором навантаження випрямляча при однаковій амплітуді вхідного імпульсу. Цей висновок був підтверджений як моделюванням, так і експериментальними вимірюваннями. Теоретичний аналіз допоміг розкрити важливі закономірності, що впливають на ефективність випрямлення, та оптимізувати параметри випрямляча.

2. Запропонований випрямляч має просту конструкцію, що сприяє підвищенню коефіцієнта корисної дії (ККД) порівняно з тими, що згадані у літературі, і забезпечує компактні розміри. Спрощена конструкція дозволяє знизити витрати на виробництво і полегшує інтеграцію випрямляча у різні бездротові системи.

3. Використання спрощеної конструкції випрямляча дозволило досягти високого коефіцієнта корисної дії. У експериментальних дослідженнях було показано, що запропонований випрямляч демонструє кращі характеристики, ніж аналоги, завдяки оптимізованій конструкції та ефективному використанню вхідної енергії.

4. Завдяки простій конструкції та оптимізованим параметрам, випрямляч має компактні розміри, що є важливим для застосування у сучасних бездротових системах, де простір є критично важливим параметром. Компактність також полегшує інтеграцію випрямляча в різні пристрої, від мобільних телефонів до високочастотних передавачів.

5. Такий підхід використання імпульсного випрямлення, сполучений із спрощеною конструкцією випрямляча, відкриває нові перспективи для досягнення високої ефективності та компактності у бездротових системах передачі інформації та енергії. Це особливо актуально для технологій 5G та інших сучасних комунікаційних систем, де ефективність енергоперетворення та мінімізація розмірів є ключовими вимогами.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 63   |

6. Експериментальні вимірювання підтвердили теоретичні висновки, демонструючи високу ефективність випрямляча у різних умовах. Це підвищує надійність запропонованої конструкції і підтверджує її переваги перед існуючими аналогами.

Таблиця 4.1 – Порівняння запропонованого імпульсного випрямляча з аналогами

| Джерело   | діод                 | Навант. | Розмір ( $\lambda_0$ ) | матеріал        | Напруга (В) | ККД (%) | Теоретичний аналіз |
|---|----------------------|---------|------------------------|-----------------|-------------|---------|--------------------|
| Радіосигнал, що подвоює напругу                       | SMS-7630             | 100 кОм | N/A                    | FR4             | N/A         | 74.7    | N/A                |
| Ректени для збору імпульсних хвиль на частоті 2,4 ГГц | SMS-7621             | N/A     | N/A                    | FR4             | N/A         | 64      | N/A                |
| Генератори субнаносекундних імпульсів                 | Тип Кокрофта-Уолтона | 20 кОм  | N/A                    | Роджерс RO4003С | N/A         | 59.6    | N/A                |
| Імпульсно-хвильовий випрямляч                         | HSMS-2862            | 50 кОм  | 0,22 × 0,11            | F4В             | 6.17        | 76.1    | Розглянуто         |

#### 4.4 Висновок до четвертого розділу

У даному розділі розглянуто ефективність випрямлення імпульсної хвилі порівняно з безперервною хвилею в залежності від робочого циклу та навантаження. Проведений теоретичний аналіз був підтверджений експериментальними дослідженнями, де було виявлено, що імпульсна хвиля досягає більшої ефективності випрямлення, особливо за умов низької вхідної потужності та великого опору навантаження. Це свідчить про те, що імпульсна хвиля може концентрувати енергію в короткий час, що дозволяє досягти великої амплітуди сигналу за умови низької вхідної потужності. Такий підхід дозволяє регулювати ефективність випрямлення в широкому діапазоні вхідних

потужностей та навантажень, використовуючи однакове джерело сигналу та амплітуду напруги.

Отже, запропонований імпульсний випрямляч поєднує у собі високу ефективність, простоту конструкції та компактність, що робить його привабливим варіантом для використання у сучасних бездротових системах передачі інформації та енергії. Завдяки теоретичному аналізу та експериментальним підтвердженням, можна впевнено стверджувати, що даний випрямляч має значний потенціал для подальшого розвитку і застосування в інноваційних технологіях.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 65   |

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено теоретичне дослідження імпульсного випрямлення хвиль та розроблено заземлений компланарний хвилевід випрямляч, який спроектовано для досягнення високоефективного випрямлення.

Використовуючи як теоретичні, так і експериментальні методи, було проведено аналіз ефективності випрямлення імпульсних хвиль. Виявлено, що при однаковій амплітуді вхідної напруги спостерігається зворотна залежність між шпаруватістю та навантаженням, що дозволяє досягти високоефективного випрямлення за різних робочих циклів шляхом регулювання навантаження. Розроблений випрямляч використовує топологію подвоєння напруги та лінію передачі наземного копланарного хвилеводу. Проведені експериментальні вимірювання підтвердили, що найвища ефективність випрямлення склала 76,1% при робочій частоті 2,38 ГГц, середній вхідній потужності 0 дБм, навантаженні 50 кОм і робочому циклі 0,01. Також виявлено, що імпульсна хвиля може мати вищу ефективність випрямлення, ніж безперервна хвиля, особливо при низькій вхідній потужності та високому навантаженні. Зазначена можливість розширення діапазону застосування мікрохвильової передачі потужності за допомогою імпульсного випрямлення може виявитися важливим кроком у розвитку бездротової передачі інформації та енергії.

Вцілому, представлені заземлений компланарний хвилевід випрямляч є обіцяним рішенням для досягнення високоефективного випрямлення імпульсних хвиль. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення технології виготовлення та оптимізацію конструкції випрямляча для ще більшої ефективності. Додаткові випробування можуть допомогти виявити можливості застосування цієї технології в різних сферах, таких як бездротова передача енергії та інформації, що відкриває шлях до нових можливостей в сучасних бездротових технологіях.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КвРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 66   |

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Лінії радіозв'язку та антенні пристрої. Навчальний посібник / [М.Д. Ільїнов, Т.Г. Гурський, І.В. Борисов, К.М. Гриценко]. – К.: ВІТІ, 2018. – 250 с.
2. E. G. Larsson et al., “Massive MIMO for next generation wireless systems,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 186–195, Feb. 2014.
3. A. Zaidi et al., *5G Physical Layer: Principles, Models and Technology Components*. San Francisco, CA, USA: Academic, Sep. 2018.
4. G. Interdonato et al., “Ubiquitous cell-free massive MIMO communications,” *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, vol. 2019, no. 1, 2019, Art. no. 197.
5. E. Johnson, “Physical limitations on frequency and power parameters of transistors,” in *IRE Int. Conv. Rec.*, vol. 13, Mar. 1965, pp. 27–34.
6. T. D. Ponnimbaduge Perera et al., “Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT): Recent advances and future challenges,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 1, pp. 264–302, Jan.–Mar. 2018.
7. Jin, Y.; Kwak, K.S.; Yoo, S.-J. A Novel Energy Supply Strategy for Stable Sensor Data Delivery in Wireless Sensor Networks. *IEEE Syst. J.* 2020, 14, 3418–3429.
8. Gustavsson, U.; Frenger, P.; Fager, C.; Eriksson, T.; Zirath, H.; Dielacher, F.; Studer, C.; Pärssinen, A.; Correia, R.; Matos, J.N.; et al. Implementation Challenges and Opportunities in Beyond-5G and 6G Communication. *IEEE J. Microw.* 2021, 1, 86–100.
9. Ponnimbaduge Perera, T.D.; Jayakody, D.N.K.; Sharma, S.K.; Chatzinotas, S.; Li, J. Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT): Recent Advances and Future Challenges. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2018, 20, 264–302.
10. Rodenbeck, C.T.; Jaffe, P.I.; Strassner, B.H., II; Hausgen, P.E.; McSpadden, J.O.; Kazemi, H.; Shinohara, N.; Tierney, B.B.; DePuma, C.B.; Self, A.P. Microwave and Millimeter Wave Power Beaming. *IEEE J. Microw.* 2021, 1, 229–259.
11. Chen, Z.N.; Liu, D.; Nakano, H.; Qing, X.; Zwick, T. Antennas in Microwave Wireless Power Transmission. In *Handbook of Antenna Technologies*; Springer Publishing Company: Berlin/Heidelberg, Germany, 2016; pp. 3033–3076.
12. M. Giordani and M. Zorzi, “Non-terrestrial networks in the 6G era: Challenges and opportunities,” 2020, arXiv:1912.10226.
13. T. L. Marzetta et al., *Fundamentals of Massive MIMO*. New York, NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2016.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРТР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 67   |

14. H. Q. Ngo et al., “Cell-free massive MIMO versus small cells,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 3, pp. 1834–1850, Mar. 2017.
15. G. Interdonato et al., “Ubiquitous cell-free massive MIMO communications,” *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, vol. 2019, no. 1, p. 197, 2019.
16. Overview of 802.3bt–Power Over Ethernet Standard, Ethernet Alliance, Apr. 2018.
17. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, IEEE 1588-2019, 2019.
18. Timing and Synchronization Aspects in Packet Networks: Recommendation ITU-T G.8261/Y.1361, ITU-T, Paris, France, Aug. 2019. [13] D. Apostolopoulos et al., “Analog radio-over-fiber solutions in support of 5G,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Opt. Netw. Design Model.*, May 2018, pp. 266–271.
19. I. C. Sezgin et al., “A flexible multi-Gbps transmitter using ultra-high speed sigma-delta-over-fiber,” in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, 2018, pp. 1195–1198.
20. R. Rogalin et al., “Scalable synchronization and reciprocity calibration for distributed multiuser MIMO,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 4, pp. 1815–1831, Apr. 2014.
21. A. Bourdoux et al., “Non-reciprocal transceivers in OFDM/SDMA systems: Impact and mitigation,” in *Proc. IEEE Radio Wireless Conf.*, 2003, pp. 183–186.
22. M. Guillaud et al., “A practical method for wireless channel reciprocity exploitation through relative calibration,” in *Proc. Int. Symp. Signal Process. Appl.*, 2005, vol. 1, no. 9, pp. 403–406.
23. C. Shepard et al., “Argos: Practical many-antenna base stations,” in *Proc. Annu. Int. Conf. Mobile Comput. Netw.*, 2012, pp. 53–64.
24. K. Hausmair et al., “Modeling and linearization of multi-antenna transmitters using over-the-air measurements,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, 2018, pp. 1–4.
25. S. Hesami et al., “Intra-array coupling estimation for mimo transceivers utilizing blind over-the-air measurements,” in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, Jun. 2019, pp. 468–471.
26. R. N. Braithwaite, “Digital predistortion of a RF power amplifier using a remote closed loop estimator,” in *Proc. IEEE Top. Conf. RF/Microw. Power Amplifiers Radio Wireless Appl.*, Jan. 2020, pp. 42–45.

27. X. Wang et al., “Digital predistortion of 5G massive MIMO wireless transmitters based on indirect identification of power amplifier behavior with OTA tests,” *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 68, no. 1, pp. 315–327, Jan. 2020.

28. A. A. Nasir et al., “Timing and carrier synchronization in wireless communication systems: A survey and classification of research in the last 5 years,” *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, vol. 2016, p. 180, 2016.

29. H. V. Cheng and E. G. Larsson, “Some fundamental limits on frequency synchronization in massive MIMO,” in *Conf. Rec. Asilomar Conf. Signals, Syst. Comput.*, 2013, pp. 1213–1217.

30. S. Jacobsson et al., “Massive MU-MIMO-OFDM uplink with direct RF-sampling and 1-Bit ADCs,” in *Proc. IEEE Globecom Workshops*, Dec. 2019, pp. 1–6.

31. Y. Qi et al., “On the phase tracking reference signal (PT-RS) design for 5G new radio (NR),” in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, Jul. 2018, pp. 1–5.

32. K. Li et al., “Decentralized baseband processing for massive MUMIMO systems,” *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Circuits Syst.*, vol. 7, no. 4, pp. 491–507, Nov. 2017.

33. C. Jeon et al., “Decentralized equalization with feedforward architectures for massive MU-MIMO,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 67, no. 17, pp. 4418–4432, Sep. 2019.

34. K. Li et al., “Feedforward architectures for decentralized precoding in massive MU-MIMO systems,” in *Proc. 52nd Asilomar Conf. Signals, Syst., Comput.*, Oct. 2018, pp. 1659–1665.

35. W. M. Holt, “1.1 Moore’s law: A path going forward,” in *Proc. IEEE Int. Solid-State Circuits Conf.*, Jan. 2016, pp. 8–13.

36. N. Collaert, “1.3 Future scaling: Where systems and technology meet,” in *Proc. IEEE Int. Solid-State Circuits Conf.*, Feb. 2020, pp. 25–29.

37. F. Dielacher et al., “SiGe BiCMOS technology and circuits for active safety systems,” in *Tech. Papers Int. Symp. VLSI Design, Autom. Test.*, Apr. 2014, pp. 1–4.

38. M. Schroter et al., “SiGe HBT technology: Future trends and TCAD-based roadmap,” *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 6, pp. 1068–1086, Jun. 2017.

39. P. Hillger et al., “Terahertz imaging and sensing applications with silicon-based technologies,” *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–19, Jan. 2019.

40. D. Y. C. Lie et al., “A review of 5G power amplifier design at cm-wave and mm-wave frequencies,” *Wireless Commun. Mobile Comput.*, vol. 2018, pp. 1–16, Jul. 2018.

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КВРРР.2021005.01.05 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        | 69   |

ДОДАТОК А  
Презентаційні матеріали

# Кваліфікаційна робота

Кафедра автоматизації,  
комп'ютерно-інтегрованих  
технологій та робототехніки

ТЕМА

## «Імпульсно-хвильовий випрямляч для забезпечення стабільності та ефективності енергопостачання»

Виконав:  
здобувач 3 курсу, група ТР1с-21-1      ЛЯШКО К.В.

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

### Мета роботи

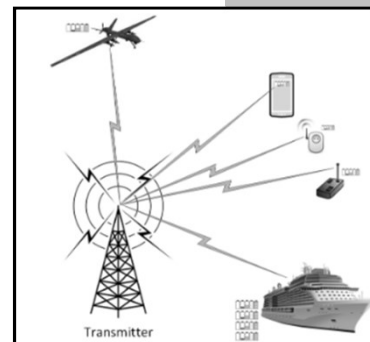
аналіз та оптимізація випрямляча імпульсної хвилі на основі діода Шоттки, з фокусом на залежності ефективності випрямлення від опору навантаження та робочого циклу

### Об'єкт дослідження

випрямляч імпульсної хвилі на основі діода Шоттки

### Актуальність теми

полягає в необхідності вдосконалення бездротових технологій, зокрема технології 5G, для забезпечення ефективності передачі інформації та енергії



## Теоретичний аналіз імпульсної хвилі випрямляча

Еквівалентна схема діода з бар'єром ШОТТКІ

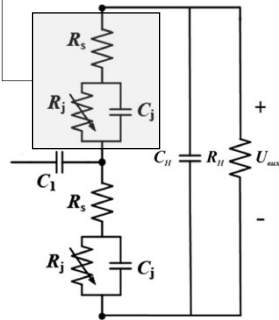


Рис. 1 – Модель еквівалентної схеми діода подвоєння напруги

R<sub>s</sub> - опір  
C<sub>j</sub> - ємність переходу  
C<sub>н</sub> - ємність фільтра DC  
R<sub>н</sub> - опір навантаження

Напруга U<sub>d</sub> на діоді

$$U_d = \begin{cases} -U_{d0} + U_{d1} \cos(\omega t - \phi) & \text{вимк} \\ -U_{d0} & \text{вимк} \\ U_T & \text{увімк} \end{cases}$$

Параметри діодів:

U<sub>d0</sub> - постійна складова напруги на діоді  
U<sub>d1</sub> - амплітуда основної напруги на діоді  
U<sub>T</sub> - пряма напруга включення діода  
φ - різниця фаз між U<sub>d</sub> і U

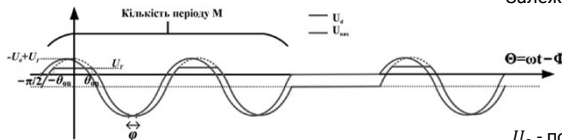


Рис. 3 – Графіки U<sub>d</sub> і U<sub>вих</sub> у часовій області

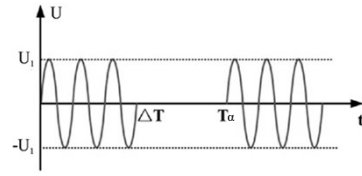


Рис. 2 – Форма імпульсної хвилі у часовій області

Напруга вузла між двома діодами U<sub>n</sub>

$$U_n = \begin{cases} \frac{U_0}{2} + U_1 \cos(\omega t) & 0 < t < 2\pi M \\ -\frac{U_0}{2} & 2\pi M < t < \frac{2\pi M}{\alpha} \end{cases}$$

Залежність U<sub>n</sub> від часу t показана на рис. 3

U<sub>0</sub> - постійна напруга на резисторі R<sub>н</sub>  
U<sub>1</sub> - амплітуда вхідної імпульсної хвилі

3

## Теоретичний аналіз імпульсної хвилі випрямляча

Вихідна напруга U<sub>вих</sub>

$$U_{\text{вих}} = \begin{cases} -U_0 + U_1 \cos(\omega t) & 0 < t < 2\pi M \\ -U_0 & 2\pi M < t < 2\pi M / \alpha \end{cases}$$

Середнє значення U<sub>d,dc</sub> є середнім значенням U<sub>d</sub> протягом повного періоду

$$U_{d,dc} = \frac{1}{T} \int_0^T U_d d\theta = \frac{1}{2\pi M / \alpha} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} U_d d\theta = \frac{\alpha}{2\pi} [-2U_{d1} \sin\theta_{\text{ект}} + 2U_{d0}\theta_{\text{ект}} - 2U_T\theta_{\text{ект}} - \frac{2\pi U_{d0}}{\alpha}]$$

Середньоквадратичне значення напруги U<sub>RMS</sub>

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(\theta) d\theta} = \sqrt{\frac{\alpha}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (U_1 \cos(\theta + \phi))^2 d\theta} = U_1 \sqrt{\frac{\alpha}{2}}$$

Струм через кожен діод є комплексним

$$I = I_R \cos(\theta) + I_i \sin(\theta) \quad \text{в якому враховується лише дійсна частина } I_R \cos(\theta), \text{ оскільки уявна частина не споживає електричної енергії.}$$

$$I_R = \frac{1}{\pi R_L} \left[ \int_{-\pi/2}^{\theta_{\text{ект}}} (U - U_d) \cos(\theta + \phi) d\theta + \int_{-\theta_{\text{ект}}}^{\theta_{\text{ект}}} (U - U_T) \cos(\theta + \phi) d\theta + \int_{\theta_{\text{ект}}}^{\pi/2} (U - U_d) \cos(\theta + \phi) d\theta \right] = I_R(\theta_{\text{ект}}, \phi)$$

Середньоквадратичне значення струму I<sub>RMS</sub>

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{\alpha}{2\pi M} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} M \times (I_R \cos\theta)^2 d\theta} = I_R(\theta_{\text{ект}}, \phi) \sqrt{\frac{\alpha}{2}}$$

Загальна вхідна потужність

$$P_{\text{ex}} = U_{RMS} (2I_{RMS})$$

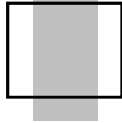
Ефективність випрямлення ККД

$$\eta = \frac{U_0^2 / R_L}{P_{\text{ex}}}$$

Вхідна імпульсна потужність

$$P_{\text{ex}} = P_w + 10 \log(\alpha) \text{ (dBm)}$$

4



## Розроблений імпульсний випрямляч на основі діода Шотткі

для забезпечення стабільного живлення бездротових пристроїв

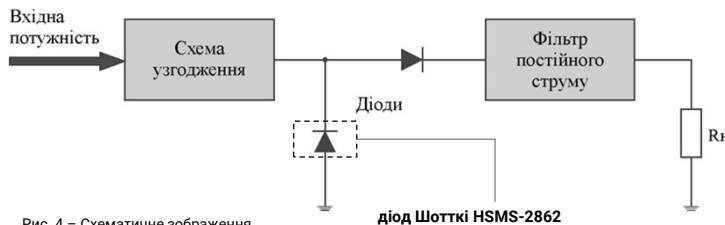


Рис. 4 – Схематичне зображення випрямляча зі збільшенням напруги

- Низька ємність переходу ( $C_{j0} = 0,18$  пФ)
- Низька напруга прямого зсуву ( $U_f = 0,35$  В)
- Напруга зворотного пробію ( $U_{об} = 4$  В)

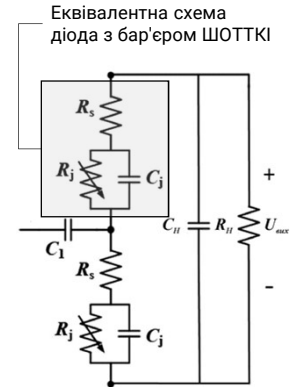
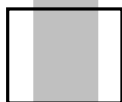


Рис. 1 – Модель еквівалентної схеми діода подвоєння напруги

- $R_s$  - опір
- $C_j$  - ємність переходу
- $C_n$  - ємність фільтра DC
- $R_n$  - опір навантаження



## Розроблений імпульсний випрямляч на основі діода Шотткі

для забезпечення стабільного живлення бездротових пристроїв

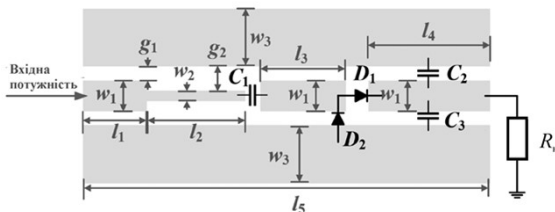


Рис. 5 – Структура запропонованого випрямляча

### Параметри випрямляча:

- ширина доріжок •  $w_1 = 2,1$  мм,  $w_2 = 0,7$  мм,  $w_3 = 4$  мм
- відстань між доріжками •  $g_1 = 1$  мм,  $g_2 = 1,7$  мм
- робоча частота • 2,4 ГГц
- розміри •  $0,22 \lambda_0 \times 0,11 \lambda_0$  або  $28 \times 14$  мм<sup>2</sup>

### Фільтр постійного струму:

#### Послідовний конденсатор C1: 47 пФ

- Діє як блок DC для запобігання зворотного проходження сигналу DC до джерела вхідного сигналу.

#### Конденсатори C2 і C3: 470 пФ (кожен)

- З'єднані паралельно через заземлений компланарний хвилевід GSPW для приглушення гармонік високого порядку та згладжування вихідної напруги DC.

### Використана підкладка F4B:

- Відносна діелектрична проникність  $\epsilon_r = 2,65$
- Тангенс втрат  $\tan \delta = 0,001$
- Товщина  $h = 0,8$  мм

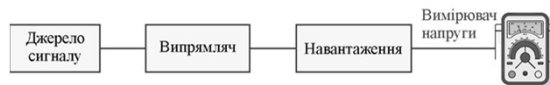


Рис. 6 – Вимірювальна система випрямляча



## Вимірювання при однаковій амплітуді напруги

### Параметри випрямляча:

- Робочий цикл: 0,01, 0,1, 0,5, 1.
- Навантаження: 50 кОм, 5 кОм, 1 кОм, 0,5 кОм

### Робоча частота та вхідна потужність:

- Робоча частота випрямляча: 2,4 ГГц.
- Пікова вхідна напруга: 17 дБм.
- Розрахунок середньої вхідної потужності за формулою (11)

$$P_{ср} = P_w + 10\log(\alpha)$$

### Оптимальна ефективність:

- Найвища модельна ефективність випрямлення: понад **77%**.
- При різних робочих циклах та відповідних навантаженнях

Робочі цикли  $\alpha$  можна підставити у  $\frac{\pi R_L / (\alpha R_w)}{1 + U_T / (U_0 / 2)} = \tan(\theta_{екст}) - \theta_{екст}$  (12) щоб отримати відповідний опір навантаження  $R_w$  для різних значень  $\alpha$

Розрахункова пікова ефективність випрямлення становить: **83,4%**

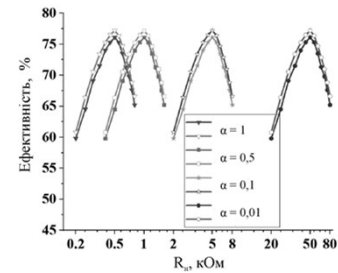


Рис. 7 – Моделювання ефективності випрямлення при однаковій вхідній напрузі

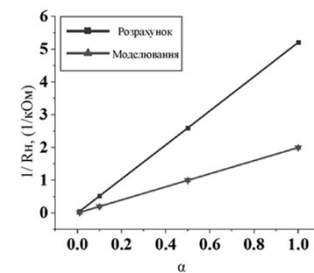


Рис. 8 – Залежність  $1/R_w$  від  $\alpha$  при тій самій вхідній напрузі при піковій ефективності випрямлення

7

## Вимірювання при однаковій середній вхідній потужності

### Випрямлення від навантаження:

- Показує залежність ефективності від опору навантаження.

### Параметри випрямляча:

- Моделювана робоча частота: 2,4 ГГц.
- Середня вхідна потужність: -3 дБм.
- Діапазон навантажень: 20-80 кОм.

### Результати моделювання та вимірювань:

- Підтверджують залежність ефективності від навантаження та робочого циклу.
- Ефективність трохи нижча, але тенденція залишається стабільною.

### Оптимальна ефективність:

- Значення ефективності при різних робочих циклах та опорі навантаження.
- Найвища ефективність досягається при  $\alpha=0,01$  та  $R_n=50$  кОм - **76,1%**

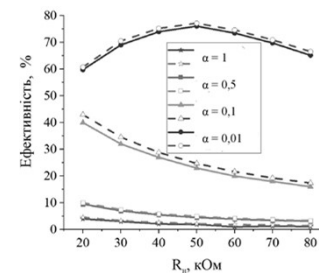


Рис. 9 – Моделювання ефективності випрямлення при однаковій середній вхідній потужності

8

## Вимірювання при однаковому опорі навантаження

### Випрямлення від навантаження:

- Зміна ефективності випрямлення від значень навантаження.
- Вплив робочих циклів на ефективність.

### Параметри випрямляча:

- Робоча частота: 2,4 ГГц.
- Опір навантаження: 50 кОм.
- Значення робочого циклу  $\alpha$ : 0,01, 0,1, 1.

### Результати моделювання та вимірювань:

- Графіки ефективності випрямлення для різних значень  $\alpha$ .

### Оптимальна ефективність:

- При значенні  $\alpha = 0.01$  виміряна найвища ефективність випрямлення становить **76,1%**.
- Це значно перевершує найвищі ефективності випрямлення при  $\alpha = 1$  (**3,9%**) і  $\alpha = 0.1$  (**28,4%**)

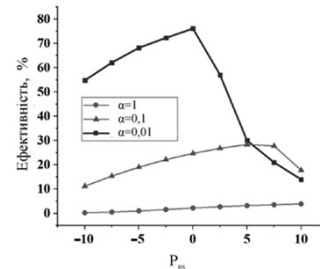


Рис. 10 – Моделювання ефективності випрямлення при однаковому опорі навантаження

## Порівняння запропонованого імпульсного випрямляча з аналогами

Табл. 1 – Порівняння запропонованого імпульсного випрямляча з аналогами

| Джерело   | діод                 | Навант. | Розмір ( $\lambda_0$ ) | матеріал        | Напруга (В) | ККД (%) | Теоретичний аналіз |
|---|----------------------|---------|------------------------|-----------------|-------------|---------|--------------------|
| Радіосигнал, що подвоює напругу                       | SMS-7630             | 100 кОм | N/A                    | FR4             | N/A         | 74.7    | N/A                |
| Ректени для збору імпульсних хвиль на частоті 2,4 ГГц | SMS-7621             | N/A     | N/A                    | FR4             | N/A         | 64      | N/A                |
| Генератори субнаносекундних імпульсів                 | Тип Кокрофта-Уолтона | 20 кОм  | N/A                    | Роджерс RO4003С | N/A         | 59.6    | N/A                |
| Імпульсно-хвильовий випрямляч                         | HSMS-2862            | 50 кОм  | 0,22 × 0,11            | F4В             | 6.17        | 76.1    | Розглянуто         |

Порівняльний аналіз показує, що імпульсна хвиля досягає більшої ефективності випрямлення порівняно з безперервною хвилею при низькій вхідній потужності та великому опорі навантаження, завдяки концентрації енергії в короткий час.



## Висновки

- Проведено аналіз імпульсного випрямлення хвиль та розроблено заземлений компланарний хвилевід випрямляч, спроектований для високоефективного випрямлення.
- Застосовано як теоретичні, так і експериментальні методи для аналізу ефективності випрямлення імпульсних хвиль. Виявлено зворотну залежність між шпаруватістю та навантаженням, що дозволяє досягти високоефективного випрямлення за різних робочих циклів.
- Представлення випрямляч використовує топологію подвоєння напруги та лінію передачі наземного копланарного хвилеводу. Проведені моделювання підтвердили його високу ефективність.
- Показано, що імпульсна хвиля може мати вищу ефективність випрямлення, ніж безперервна хвиля, особливо при низькій вхідній потужності та високому навантаженні. Це відкриває нові можливості в бездротовій передачі енергії та інформації.
- Заземлений компланарний хвилевід випрямляч є рішенням для високоефективного випрямлення імпульсних хвиль. **Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію конструкції для ще більшої ефективності та вивчення можливостей застосування в різних галузях.**

**ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!**  
Готовий відповісти на Ваші питання

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Ляшко Костянтин Володимирович

Тема роботи: Імпульсно-хвильовий випрямляч для забезпечення стабільності та ефективності енергопостачання

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи

Кількість листів креслень 3      Кількість сторінок записки 68

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Метою кваліфікаційної роботи є вивчення, аналіз та оптимізація випрямляча імпульсної хвилі на основі діода Шотткі, з фокусом на залежності ефективності випрямлення від опору навантаження та робочого циклу. У даній кваліфікаційній роботі проаналізовано випрямляч імпульсної хвилі на основі діода Шотткі з використанням мікрохвильової еквівалентної схеми.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Кваліфікаційна робота відповідає виданому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: У відповідності до технічного завдання у першому розділі детально розглянуто історію та сучасний стан бездротової передачі електроенергії, від загального огляду технологій до конкретних компонентів, таких як ректени та випрямлячі. Другий розділ присвячений теоретичним моделям оцінки ефективності випрямлення на основі безперервних хвиль. Він починається з основ передачі безперервної хвилі та процесу переходу до цієї форми передачі енергії. У третьому розділі проводиться аналіз ключових компонентів, які використовуються в бездротових технологіях. Основний акцент зроблено на аналізі ефективності випрямлення модульованих і імпульсних хвиль, а також випрямлячів Шотткі. Робота представляє значний внесок у вивчення та розвиток бездротових технологій передачі енергії. Вона охоплює широкий спектр аспектів, від технічних деталей конструкцій до теоретичних моделей, що дозволяє глибше зрозуміти ефективність випрямлення електричних сигналів у бездротових системах.

4. Позитивні сторони роботи: Тема дослідження є надзвичайно актуальною у сучасному світі, що стрімко розвивається в напрямку бездротових технологій. Запропоноване дослідження спрямоване на вдосконалення технологій 5G, що є ключовим аспектом розвитку комунікаційних систем. У роботі запропоновано нові теоретичні моделі для оцінки ефективності випромінювання на основі безперервних хвиль, що відкриває нові можливості для кращого розуміння процесу випромінювання та його оптимізації.

5. Негативні сторони роботи: Було б доцільно провести більш детальні експериментальні дослідження з урахуванням більш широкого спектру умов та параметрів роботи випромінювача. Деякі розділи роботи потребують більш детального пояснення та кращої структурованості, що допомогло б зробити матеріал більш зрозумілим та легким для сприйняття.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає

7. Відгук про роботу в цілому: Робота є вагомим внеском у розвиток сучасних бездротових технологій. Вона демонструє глибоке розуміння теми дослідження та здатність студента застосовувати як теоретичні, так і практичні методи для вирішення поставлених завдань. Незважаючи на деякі недоліки, робота відзначається високим рівнем виконання та актуальністю, що робить її важливою для подальшого розвитку технологій 5G та бездротової передачі енергії.

8. Інші зауваження: немає

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

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

«14» червня 2024р.



підпис

Ім'я користувача:  
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:  
1016372199

Дата перевірки:  
18.06.2024 18:38:05 EEST

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:  
19.06.2024 01:47:22 EEST

ID користувача:  
100005862

Назва документа: Ляшко\_антиплагіат

Кількість сторінок: 69 Кількість слів: 12576 Кількість символів: 98104 Розмір файлу: 4.13 MB ID файлу: 1016179467

1253 слова позначені як "вилучені" та не враховуються у підрахунку слів

## 0.64% Схожість

Найбільша схожість: 0.26% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1016179471)

0.34% Джерела з Інтернету

16

Сторінка 71

0.4% Джерела з Бібліотеки

5

Сторінка 71

## 0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

## 0% Вилучень

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

Немає вилучених Інтернет-джерел

0% Вилученого тексту з Бібліотеки

1

Сторінка 71

## Модифікації

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

Замінені символи

122

# Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 0.0%

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилки в документах: 12%

|   |          |         |                                |         |
|---|----------|---------|--------------------------------|---------|
| ID: 131432<br>Назва: БКР Імпульсно-хвильовий<br>випрямляч для забезпечення<br>Додано в БД: 2024-06-19<br>Автора: Костянтин ЛЯШКО<br>Керівники: Андрій СЕЛЬСЬКИЙ<br>Консультанти:<br>Опоненти: | Документ |         | Сумарний збіг по Базі<br>Даних |         |
|   | Символи  | Лексеми | Символи                        | Лексеми |
|   | 84309    | 639     | 295 (0%)                       | 5 (1%)  |

## Джерело плагиату

| ID | Опис | Наявність<br>плагиату в<br>документі |         |
|----|------|--------------------------------------|---------|
|    |      | Символи                              | Лексеми |

Завідувачу кафедри АКІГтаР  
д-ру техн. наук, проф. Мартинюку В.В.  
Ляшка К.В.  
ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курсу, групи ТР1с-21-1

### ЗАЯВА

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

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

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

03.06.2024

дата

  
підпис

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

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

Назва: Імпульсно-хвильовий випрямляч для забезпечення стабільності та ефективності енергопостачання

Автор: Дячко Костянтин Володимирович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма: Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології

Науковий керівник: Сельський Андрій Анатолійович, к.ф.м.н., доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

| № | Висновок  | Початок 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 укривтя запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.  |                           |
| 5 | Інше:   |                           |

Підтвердження:

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

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

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

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 0.64% і адресується до 16 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