

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Бакалавр

Освітній рівень

Вдосконалення приймального блоку для ефективно  
резонансної бездротової передачі енергії

Назва теми

КвРТР.2021001.01.01ПЗ

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Шифр і назва

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

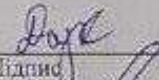
Шифр і назва

Освітня програма «Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології»

Назва

Виконав:

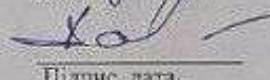
студент III курсу, група TR1c-21-1

  
Підпис

Богдан ДАНЧУК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник:

  
Підпис, дата

Андрій СЕЛЬСЬКИЙ

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер:

  
Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

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

  
Підпис

Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ


« 19 » червня 2024р.

Хмельницький, 2024

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру АКИТ та Р


 Валерій МАРТИНЮК


« 10 » січня 2024 р

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

ДАНЧУКУ Богдану Анатолійовичу  
Прізвище, ім'я по батькові здобувача

- 1 Тема роботи: Вдосконалення приймального блоку для ефективної резонансної бездротової передачі енергії  
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 технологічних аспектів бездротової передачі енергії; огляд та аналіз використання GAN HEMT у бездротових системах передачі енергії; резонансна бездротова передача енергії класу E на основі GAN HEMT; моделювання модуля блоку живлення для заряджання акумулятора
- 5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):  
блок-схема блоку прийому енергії з використанням підсилювача класу E; моделювання резонансної бездротової передачі енергії з використанням підсилювача класу E та оцінки стабільності струму; моделювання схем і принципів роботи блоків приймання та передачі енергії в системах резонансної бездротової передачі енергії.

Завдання отримав 

Керівник 

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7 Дата видачі завдання 01 лютого 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка науковця/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

(підпис, дата)

Богдан ДАНЧУК

Науковий керівник

Андрій СЕЛЬСЬКИЙ

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Вдосконалення приймального блоку для ефективної резонансної бездротової передачі енергії»

Автор роботи: Данчук Богдан Анатолійович.

Керівник роботи: Сельський А.А., к.ф.м.н., доцент.

Пояснювальна записка: 67 сторінок, 23 рисунки, 4 таблиці, 40 джерел.

Графічна частина: технічне креслення.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** БЛОК ПРИЙОМУ ЕНЕРГІЇ, БЛОК ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ, БЕЗДРОВОТА ПЕРЕДАЧА ЕНЕРГІЇ, РЕЗОНАНС, ПАСИВНІ ЕЛЕМЕНТИ, ТРАНЗИСТОРИ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ НЕГАТИВНОГО ОПОРУ, ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ПОТУЖНОСТІ.

Об'єктом дослідження є блок прийому енергії для бездротової передачі електроенергії в резонансній системі.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в розробці та вивченні ефективності блоку прийому енергії, його можливостях заряджання батарей та оптимізації для підвищення потужності передачі.

У цій кваліфікаційній роботі представлено новий блок прийому енергії для бездротової передачі електроенергії, який призначений для використання у сучасних електромобілях. Цей блок відрізняється здатністю отримувати великі потужності від передавача енергії. Він заснований на використанні пасивних компонентів, таких як котушки, діоди та конденсатори, та оптимізований для роботи у резонансній системі бездротової передачі енергії. Блок здатний заряджати батареї з високою напругою, зокрема перше їх заряджання. Під час роботи на частоті 4 МГц блок прийому енергії функціонує як перетворювач негативного опору, що спричиняє нестабільний струм, необхідний для ефективного заряджання батареї. Аналіз результатів моделювання підтвердив можливість використання цієї схеми для передачі більшої потужності за умови підключення додаткових транзисторів.

01.06.2024 р.



## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	С. 4
ВСТУП .....	5
1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ	
1.1 Загальна характеристика бездротової передачі енергії .....	8
1.2 Класифікація бездротових систем передачі електроенергії .....	9
1.3 Бездротова передача енергії в дальній зоні .....	10
1.3.1 Мікрохвильова передача енергії .....	11
1.3.2 Лазерна передача енергії .....	11
1.4 Передача потужності ближнього поля .....	12
1.4.1 Індуктивна передача потужності .....	14
1.4.2 Ємнісна передача потужності .....	17
1.5 Переваги та недоліки бездротових систем передачі електроенергії .....	18
1.6 Бездротова передача енергії в електромобілях .....	20
1.7 Висновки до першого розділу .....	23
2 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ GaN HEMT У БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ .....	24
2.1 Роль GaN HEMT у розвитку бездротових систем передачі енергії .....	24
2.2 Комутаційні характеристики .....	26
2.3 Транзистор з високою рухливістю електронів .....	27
2.4 Покращена продуктивність системи завдяки новим і покращеним топологіям .....	28
2.5 Застосування GaN HEMT .....	31
2.6 Висновки до другого розділу .....	32

КвРТР.2021001.01.01 ПЗ

Зам.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		Лит.	Арк.	Аркуші
Розроб.		Данчук Б.А.	<i>[Signature]</i>	18.06.2024	Вдосконалення приймального блоку для ефективної резонансної бездротової передачі енергії		2	69
Перевір.		Сельський А.А.	<i>[Signature]</i>	18.06.2024				
Реценз.								
Н. Контр.		Корсунська Л.О.	<i>[Signature]</i>	18.06.2024	Пояснювальна записка	ХНУ, зр. ТР1с-21-1		
Затверд.		Мірошник В.В.	<i>[Signature]</i>	18.06.2024				

3 РЕЗОНАНСНА БЕЗДРОТОВА ПЕРЕДАЧА ЕНЕРГІЇ КЛАСУ Е НА ОСНОВІ GaN HEMT .....	33
3.1 Блок передачі енергії .....	33
3.2 Приймальний блок живлення .....	36
3.3 Модель трансформатора для бездротової передачі енергії .....	37
3.4 Модуль GaN HEMT.....	40
3.5 Субгармонійне коливання .....	42
3.6 Висновки до третього розділу.....	43
4 МОДЕЛЮВАННЯ МОДУЛЯ БЛОКУ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЗАРЯДЖАННЯ АКУМУЛЯТОРА .....	44
4.1 Перетворювач AC-DC.....	44
4.2 Резонансний ємнісний дільник напруги .....	46
4.3 Зарядний пристрій із використанням смугового фільтра з плоскою смугою пропускання .....	48
4.4 Коефіцієнт магнітного зв'язку .....	52
4.5 Моделювання запропонованого приймального блоку живлення .....	54
4.6 Висновки до четвертого розділу.....	63
ВИСНОВКИ.....	65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	66
ДОДАТОК А. Блок-схема блоку прийому енергії з використанням підсилювача класу Е .....	69
ДОДАТОК Б. Моделювання резонансної бездротової передачі енергії з використанням підсилювача класу Е та оцінки стабільності струму.....	70
ДОДАТОК В. Моделювання схем і принципів роботи блоків приймання та передачі енергії в системах резонансної бездротової передачі енергії .....	71

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AC	–	Змінний струм (Alternating Current)
DC	–	Постійний струм (Direct Current)
CPT	–	Ємнісна бездротова передача енергії (Capacitive Power Transfer)
EV	–	Електромобіль (Electric Vehicle)
GaN	–	Гемтрий транзистор на основі галієвого нітриду (Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor)
HEMT	–	Nitride High Electron Mobility Transistor)
IGBT	–	Біполярний транзистор з ізольованим затвором (Insulated Gate Bipolar Transistor)
IPT	–	Індуктивна бездротова передача енергії (Inductive Power Transfer)
LPT	–	Лазерна бездротова передача енергії (Laser Power Transfer)
MCR	–	Магнітно-резонансна бездротова передача енергії (Magnetic Resonant Coupling Wireless Power Transfer)
WPT	–	Resonant Coupling Wireless Power Transfer)
MPT	–	Магнітна бездротова передача енергії (Magnetic Power Transfer)
NIC	–	Випрямляючий перетворювач з від'ємним опором
PDL	–	Потужність, що передається до навантаження
PRU	–	Блок отримання енергії
PTE	–	Ефективність передачі енергії
PTU	–	Блок передачі енергії
WPT	–	Бездротова передача енергії (Wireless Power Transfer)

					КВРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

## ВСТУП

Бездротові технології передачі енергії стають перспективними у різних областях застосування через важливі проблеми тривожності щодо дальності та громіздких батарей [1, 2, 3, 4, 5]. Пристрої на основі напівпровідників з широкою забороненою зоною, такі як GaN HEMT і SiC, підвищують продуктивність бездротових додатків завдяки своїм унікальним матеріальним характеристикам: низькій паразитній ємності, опору в увімкненому стані та високому напрузі пробою. Більшість результатів показали, що використання пристроїв з широкою забороненою зоною як перемикаючих пристроїв призводить до вищої ефективності передачі та щільності потужності [6, 7, 8, 9].

Блок прийому енергії є одним із важливих ключів у бездротовій передачі енергії, особливо для резонансної бездротової передачі енергії, коли робоча частота перевищує мегагерци. Для регулювання отриманої змінної електроенергії зазвичай використовується традиційний мостовий випрямляч на діодах, а також деякі дослідження підключають до нього DC-DC перетворювач постійного струму-постійного струму для пониження напруги для застосувань бездротової передачі енергії.

У дослідженні за допомогою активного випрямляча типу "push-pull" досягнуто 210 Вт з ефективністю перетворення 89,3% за допомогою бездротової передачі енергії на основі класу E на відстані 10 см. Багатолівневий DC-DC перетворювач постійного струму-постійного струму на базі IGBT, підключений після стадії випрямлення, є добрим способом збільшення потужності блоку прийому енергії до 500 Вт, переданої навантаженню на відстань 35 см. Деякі інші роботи пропонують використання методів індуктивність-конденсатор-конденсатор (LCC) або послідовно-паралельно-послідовно (SPS) для компенсації невідповідності імпедансу в блоку прийому енергії для передачі

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

бездротової енергії зі змінними навантаженнями. Попередні дослідження були спрямовані на отриману потужність від резонансної бездротової передачі енергії, що є дуже корисним для бездротових передач енергії на короткі дистанції. Метою даної кваліфікаційної роботи є розкриття топології схеми блоку прийому енергії для резонансної бездротової передачі енергії, яка може забезпечити більшу відстань передачі енергії в пасивній схемі, що може бути виготовлена для комерційних застосувань.

Крім того, було запропоновано використовувати перетворювач негативного опору для створення негативного опору з метою зменшення опору котушки [10]. Деякі дослідження показали, що ефективність передачі потужності покращувалася на великій відстані з використанням перетворювача негативного опору [11]. Крім того, використання перетворювача негативного опору може максимізувати ефективність системи [12]. Крім того, вихідну електроенергію слід регулювати, незалежно від того, як вона змінюється. Попередні роботи досліджували кілька методів регулювання потужності, які можна класифікувати на три типи: пасивне регулювання, активна випрямлення та післястадійне регулювання (за допомогою LDO або DC-DC) [13]. Деякі літературні роботи розглядали гібридні багаторівневі післястадійні регулятори, які використовувалися для покращення просторової свободи [13].

У контексті керування режимом пікового струму субгармонічні коливання не виникають від невеликої нестійкості сигналу; натомість вони виявляються значним явищем. Це поширене явище, коли робочий цикл перевищує порогове значення в 50%, а в окремих ситуаціях це може статися навіть із робочими циклами нижче цієї позначки. Досягнення стабільності в усіх робочих циклах у перетворювачі в режимі пікового струму передбачає введення лімузуючого сигналу на вихід підсилювача помилки. Однак це вводить зміну в поведінку

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контур керування, відхиляючись від точних характеристик, очікуваних у традиційному перетворювачі струмового режиму.

У цій кваліфікаційній роботі запропоновано топологію блоку прийому енергії, зокрема резонансний блок і випрямляч, який поводитьься через ефект перетворювача негативного імпедансу, а також через субгармонічні коливання, що викликає нестабільний струм для заряджання батареї. Представлено основні компоненти резонансної бездротової передачі енергії, зокрема блок приймання живлення, блок приймання електроенергії, модель трансформатора, модуль GaN НЕМТ і субгармонійні коливання. Потім представлений модуль блоку прийому живлення, що містить схему АС-DC перетворювача змінного струму в постійний струм і вихідне навантаження резонансного ємнісного діляника напруги для досягнення зарядки акумулятора.

					КВРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						7
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

# 1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

## 1.1 Загальна характеристика бездротової передачі енергії

За останні роки спостерігається значний технічний прогрес у виробництві портативних електронних та силових пристроїв різного призначення. Ці пристрої відрізняються меншими розмірами, вищою енергоефективністю та збільшеними значеннями трансформованої потужності [14].

Незважаючи на високу технологічність таких портативних пристроїв, однією з проблем залишається поповнення енергії в акумуляторах живлення. Сучасні електронні пристрої, як от телефони, планшети та комп'ютери, можуть працювати без підзарядки протягом кількох годин [15]. Однак для їх продовження роботи потрібна часта підзарядка або заміна акумуляторів, що призводить до додаткових витрат і несприє екологічності. З цієї проблеми виникає зацікавленість у бездротовій передачі енергії.

Бездротова передача енергії, також відома як бездротова передача енергії або бездротова зарядка, – це технологія, яка дозволяє передавати електричну енергію від джерела живлення до електричного пристрою без потреби у фізичних роз'ємах або проводах. Ця технологія усуває потребу у традиційних кабелях живлення та може забезпечити зручний та ефективний спосіб зарядки та живлення різних пристроїв.

Першим піонером у цій області був вчений Нікола Тесла, який у 1891 році побудував котушку Тесла, здатну передавати електроенергію на відстань до 3 км без використання дроту [16]. Згодом інші дослідники, такі як Джон Шудер, Вільям Браун і Пітер Глейзер, також працювали над бездротовою передачею енергії.

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однак лише приблизно в 2007 році група вчених з Массачусетського технологічного інституту розробила функціонуючу модель бездротової передачі енергії, здатну передавати електроенергію для запалювання 60 Вт лампи на відстані 2 м.

Сьогодні бездротові системи передачі електроенергії активно застосовуються для заряджання акумуляторів електронних пристроїв, в електромобільній промисловості, майнінгу та в медичних пристроях.

## 1.2 Класифікація бездротових систем передачі електроенергії

Системи бездротової передачі енергії (WPT), також відомі як бездротова зарядка або бездротова передача енергії, забезпечують передачу електроенергії між джерелом живлення та навантаженням без необхідності використання фізичних з'єднань у вигляді кабелів.

Бездротова передача енергії (WPT) відома поділом на дві основні категорії в залежності від механізмів передачі енергії:

- 1) передача потужності у дальньому полі, також відома як радіаційний метод;
- 2) Передача потужності у ближньому полі, також відома як безвипромінювальний метод.

Більш детальну класифікацію бездротових систем передачі електроенергії можна побачити на рисунку 1.1

Як видно на рисунку 1.1, системи бездротової передачі енергії в дальній зоні можна розділити на дві основні категорії: системи, які використовують мікрохвилі для передачі енергії, відомі як мікрохвильова передача енергії (MPT), і системи, що використовують лазерну технологію, відомі як лазерна передача енергії (LPT).

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

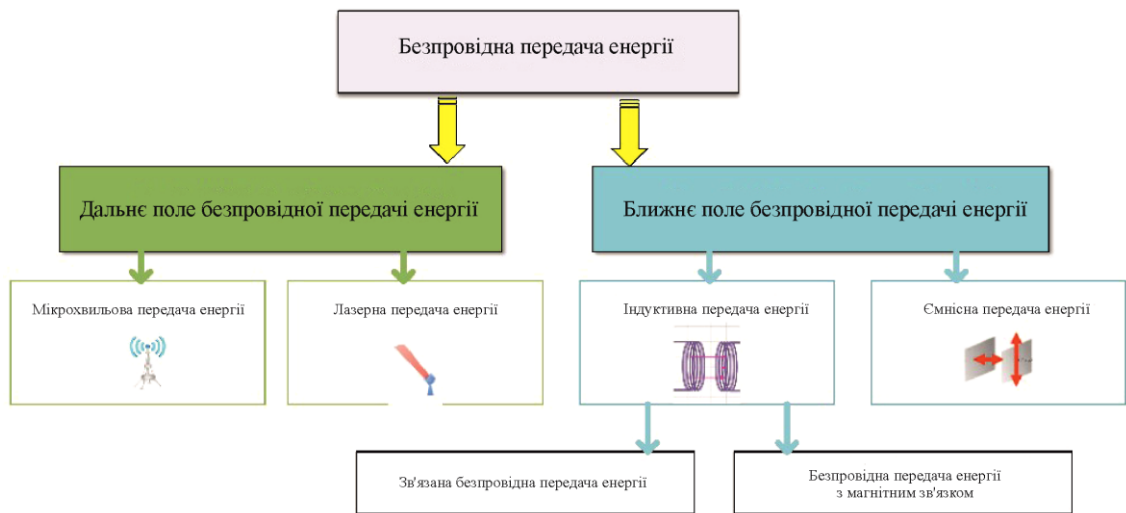


Рисунок 1.1 – Класифікація безпроводної передачі енергії

У свою чергу, бездротові системи передачі енергії в ближньому полі також можна класифікувати у дві основні категорії: індуктивна передача енергії (IPT), де енергія передається за допомогою магнітного поля, і ємнісна передача енергії (CPT), де енергія передається за допомогою електричного поля.

Крім того, передача енергії за допомогою IPT може бути реалізована двома основними технологіями: зв'язаною бездротовою передачею енергії (CWPT) та бездротовою передачею енергії з магнітним зв'язком (MCRWPT).

### 1.3 Бездротова передача енергії в дальній зоні

Бездротова передача енергії в дальній зоні використовує електромагнітні хвилі у вигляді радіочастотного сигналу для передачі енергії. Під час цього процесу передавач випромінює енергію через електричне поле електромагнітної хвилі. Як вже згадано, цей тип бездротової передачі енергії поділяється на дві основні групи: мікрохвильова передача енергії (MPT) і лазерна передача енергії (LPT).

Мікрохвильова передача енергії (MPT) використовує радіочастотні сигнали для передачі енергії, що робить її ефективним методом передачі

електроенергії на великі відстані. З іншого боку, лазерна передача енергії (LPT) використовує лазерне випромінювання для передачі енергії, що може бути ефективним для точкових застосувань або умов, де необхідна висока точність передачі енергії.

### 1.3.1 Мікрохвильова передача енергії

Мікрохвильова передача енергії (MPT) використовує електромагнітне випромінювання з використанням мікрохвиль для передачі енергії. Цей метод широко застосовується в авіаційній індустрії, зокрема для живлення безпілотних літальних апаратів. Основна ідея полягає у використанні мікрохвильових пристроїв для випромінювання сигналу у формі радіохвиль через відповідні антени. У приймачі, який також функціонує як антена, енергія, зібрана в електричному полі хвилі, передається навантаженню. Основною перевагою MPT є висока передана потужність, добра адаптація до різних умов навколишнього середовища і гнучкість у передачі та прийомі сигналів. Цей метод застосовується там, де необхідне живлення пристроїв на великій відстані один від одного та в різних погодних умовах. Однак недоліком є низька ефективність передачі, яка зазвичай не перевищує 10%, і потреба у великих передавачах (антенах), що робить цей метод витратним.

### 1.3.2 Лазерна передача енергії

Оскільки для передачі енергії потрібні великі антени, все більше уваги приділяється лазерній передачі енергії. Цей метод використовує висококонцентроване лазерне світло, спрямоване на приймач енергії, для максимально ефективною передачі на великі відстані. При передачі, електрична енергія від джерела (наприклад, батареї) перетворюється в монохроматичний

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

світловий промінь за допомогою лазера. Потім цей промінь направляється на приймач, який зазвичай складається з фотоелектричних панелей. У приймачі енергія лазерного випромінювання перетворюється назад в електричну енергію, що використовується для зарядки батарей або для живлення пристроїв. Однак, порівняно з МРТ, лазерний промінь потребує складних систем відстеження та моніторингу, оскільки лазерне випромінювання може бути небезпечним для людей і навколишнього середовища. Крім того, лазерний промінь більш сприйнятливий до атмосферного поглинання та розсіювання, що може знижувати ефективність передачі енергії. Незважаючи на ці обмеження, лазерна передача енергії стає все більш популярною, і прогнозується, що пристрої на базі цієї технології будуть використовуватися в космічних програмах вже найближчим часом.

#### 1.4 Передача потужності ближнього поля

Типова система бездротової передачі енергії охоплює передавач і приймач, між якими енергія передається через магнітне або електричне поле. Ця система може використовувати один із двох методів передачі енергії: індуктивний (IPT) або ємнісний (CPT). У випадку індуктивного методу передачі енергії використовуються котушки як передавачі та приймачі. З іншого боку, енергія може передаватися за допомогою електричного поля через два плоскі конденсатори: один на передавачі, інший – на приймачі [17].

Передача енергії ближнього поля здебільшого описується через великий інтерес до її застосування та широкого використання в різних галузях промисловості, таких як біомедицина, портативні пристрої, підводні роботи, імплантологія, підводні датчики та електромобілі. Це найбільш розвинена технологія бездротової передачі енергії і має великий потенціал у багатьох важливих галузях. Ілюстрація принципу передачі електричної енергії

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

індуктивним методом показана на рисунку 1.2. Цей метод є найбільш поширеним у категорії IPT ближнього поля.

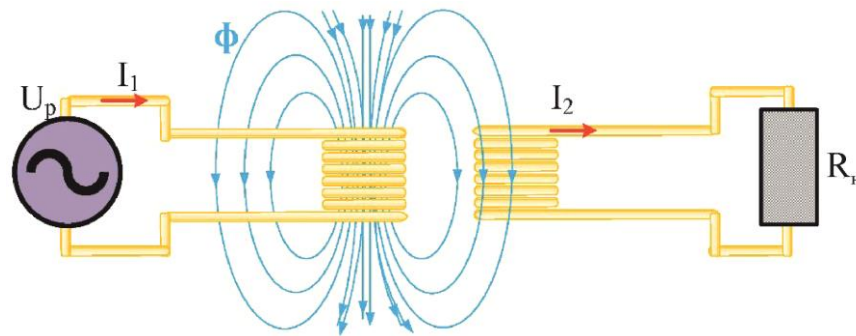


Рисунок 1.2 – Бездротова передача електроенергії за допомогою індуктивної технології

Принцип передачі електричної енергії індукційним методом ґрунтується на роботі повітряного трансформатора. Коли джерело змінної напруги з амплітудою  $U_0$  та частотою  $f_0$  підключається до затискачів первинної обмотки трансформатора, струм починає протікати через первинну обмотку  $N_1$ . Цей струм створює змінний у часі магнітний потік, який впливає на вторинну обмотку  $N_2$ . Завдяки явищу електромагнітної індукції у вторинній обмотці також виникає струм. У випадку, коли силові лінії магнітного поля з індукцією  $B$  перпендикулярні до поверхні  $S$ , через яку проходить магнітний потік, і додатково магнітне поле є однорідним, вираз для магнітного потоку виражається за формулою:

$$\Phi = B \cdot S, \quad (1.1)$$

де  $B$  – індукція магнітного поля,  $S$  – площа поверхні, яку перетинає магнітний потік.

Цей принцип індукційної передачі енергії є основою для роботи бездротових систем передачі енергії, зокрема в системах ближнього поля.

Закон Фарадея встановлює, що індукована електрорушійна сила  $\varepsilon$  у вторинній обмотці трансформатора дорівнює добутку числа витків  $N_2$  вторинної обмотки на похідну за часом від потоку магнітного поля  $\Phi$ . Це можна виразити наступним чином:

$$\varepsilon = -N_2 \cdot S \cdot \frac{dB}{dt} . \quad (1.2)$$

Для визначення діючих значень напруги на обмотках  $n$ -ї обмотки трансформатора враховується, що втрати в обмотці незначні і напруги на обмотках  $N_1$  і  $N_2$  рівні електрорушійним силам. Тоді вираз для діючих значень напруги на обмотках  $n$ -ї обмотки можна записати як:

$$U_{rmsn} = k \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot N_n \cdot B_m \cdot S , \quad (1.3)$$

де  $N_n$  – число витків  $n$ -ї обмотки,  $k$  – коефіцієнт зв'язку, а  $B_m$  – амплітуда щільності магнітного потоку.

#### 1.4.1 Індуктивна передача потужності

Технологія індуктивної передачі потужності (ІРТ) ґрунтується на принципах законів Ампера і Фарадея, які були вперше продемонстровані Ніколою Теслою у 1898 році. Ця технологія розділяється на дві основні групи: бездротова передача енергії з індуктивним зв'язком (IWPT) і бездротова передача енергії з магнітним зв'язком (MCR WPT).

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 1.3 представлена типова система, що використовується в обох розглянутих топологіях. Ця система складається з передавача та приймача, між якими передається електрична енергія. Передача енергії відбувається через взаємодію магнітного поля між обмотками трансформатора, що забезпечує індуктивний зв'язок між ними.

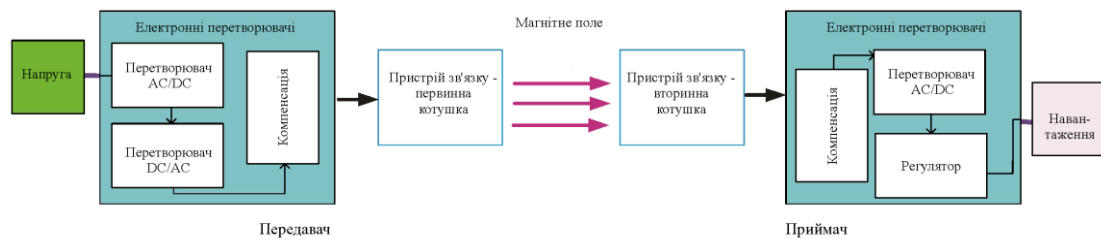


Рисунок 1.3 – Бездротова система передачі електроенергії – IPT

У представленій системі, зображеній на рисунку 1.3, на стороні передавача розташовані блоки, які включають в себе випрямляч, перетворюючий змінну напругу від джерела живлення (наприклад, електромережі), в постійну напругу потрібного значення, залежно від потреби. У цьому ж блоку передавача також використовується інвертор DC/AC, який перетворює постійний струм на змінний. Останнім елементом системи передавача є котушка. Схема приймача складається з приймальної котушки, випрямляча змінного/постійного струму для перетворення змінної напруги в постійну, і стабілізатора для забезпечення стабільної напруги на виході приймача. При збільшенні відстані між передавачем і приймачем зменшується коефіцієнт зв'язку між ними, що призводить до збільшення падіння напруги через індуктивність та зниження передачі енергії [18].

Для вирішення цієї проблеми використовуються додаткові компенсаційні блоки, такі як створення резонансного контуру. Ці блоки зазвичай складаються з конденсаторів, підключених у різних конфігураціях до приймача та передавача.

Застосування такого рішення дозволяє знизити опір системи в системах, де переважає індуктивність виток порівняно з взаємною індуктивністю. Топології та властивості таких систем були детально описані в роботах [13, 14, 15, 16].

Бездротова передача енергії з індуктивним зв'язком заснована на передачі енергії за допомогою магнітного поля передавальної та приймальної котушок, які знаходяться на короткій відстані одна від одної. Принцип передачі енергії ідентичний принципу дії повітряного трансформатора. Робочий діапазон частот цієї технології становить кілогерци, а типова відстань між передавачем і приймачем не перевищує 40 мм. Ця технологія дозволяє передавати енергію від одних ват до кіловат.

На відстані від 20 мм до 100 мм коефіцієнт зв'язку котушок зменшується від 0,6 до 0,1, а ефективність передачі енергії знижується з 80% до приблизно 40%. Параметри, такі як кількість витків, форма і розмір котушок, також впливають на значення коефіцієнта зв'язку і ефективність передачі. Перевагами технології з індуктивним зв'язком є простота та висока ефективність передачі енергії порівняно з іншими системами, а також низька робоча частота, що забезпечує безпеку передачі. Однак мінусами цієї технології є обмежена відстань передачі, низький коефіцієнт електромагнітного зв'язку, значне підігрів системи через втрати в обмотках, а також зниження ефективності передачі при збільшенні відстані між котушками. Точне розташування котушок одне відносно одного також є важливим фактором для ефективності передачі енергії.

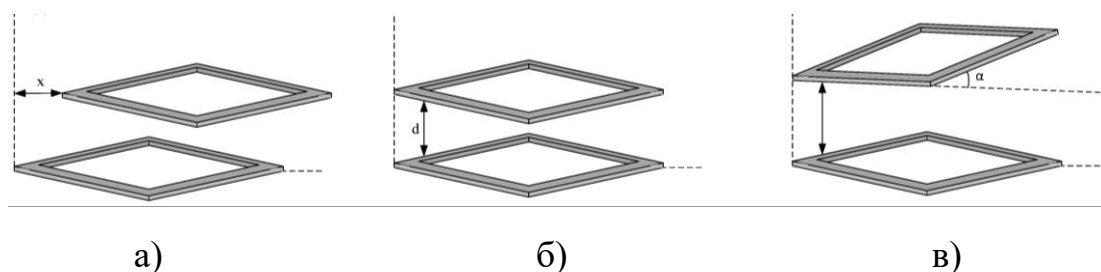


Рисунок 1.4 – Зміна положення: а) – горизонтально, б) – вертикально і в) – під кутом передавальної та приймальної котушок прямокутного перерізу

## 1.4.2 Ємнісна передача потужності

Технологія ємнісної передачі потужності (CPT – Capacitive Power Transfer) базується на використанні ємнісного зв'язку між передавачем і приймачем, які діють як електроди конденсатора у формі металевих оболонок або пластин. Система передавача отримує живлення від джерела змінної напруги, що створює змінний потенціал, передаючи його на навантаження через кришки приймача. Технологія CPT вважається більш доступною за вартістю порівняно з IPT, проте її основним обмеженням є дуже коротка відстань між передавачем і приймачем. Крім того, CPT менш безпечна у порівнянні з IPT, тому частіше застосовується у невеликих додатках, наприклад, медичних імплантатах, або у випадках, коли потрібна гнучкість і компактність системи.



Рисунок 1.5 – Бездротова передача живлення – CPT

На рисунку 1.5 показана прикладна система CPT. У цій системі відображені ті ж блоки як на стороні передавача, так і на стороні приймача, що й у системі, показаній на рисунку 1.3. Функції цих блоків аналогічні тим, що були розглянуті раніше. Головною відмінністю між цими двома системами є форма виходу передавача і входу приймача, які в цьому випадку представлені двома пластинами плоского конденсатора.

## 1.5 Переваги та недоліки бездротових систем передачі електроенергії

В таблиці 1.1 наведено порівняння параметрів різних технологій IPT, а в таблиці 1.2 зроблено порівняння всіх технологій WPT.

Зокрема, у таблиці 1.1 порівнюються такі параметри технології IPT, як коефіцієнт зв'язку, робоча частота, максимальна потужність та ефективність передачі. У таблиці 1.2 протиставляються переваги та недоліки технології WPT.

Таблиця 1.1 – Порівняння параметрів різних технологій IPT

Параметр	MCR WTP	IWPT	СТР
Робоча частота	Дуже високо	Високий	Середній
Гістерезисні втрати	Жодного	З'являтися	З'являтися
Втрати на вихрові струми	Високий	Середній	Низький
Коефіцієнт зв'язку	<0,25	>0,5	~1
Ефективність	Середній	Високий	Середній
Відстань	Середній	Середній	Низький

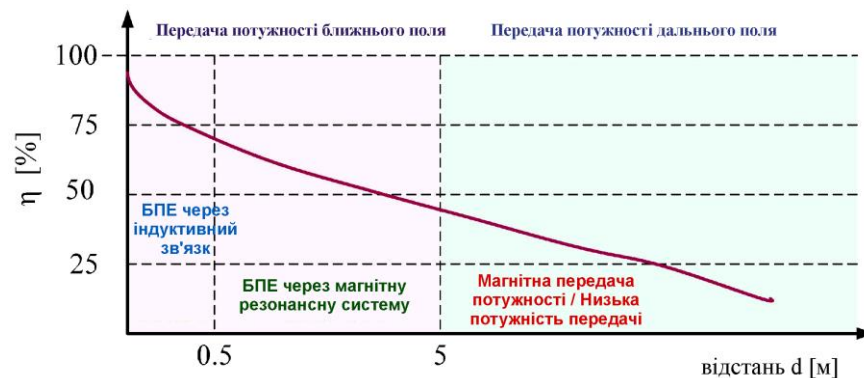


Рисунок 1.6 – Ефективність бездротових систем передачі енергії в залежності від відстані між передавачем і приймачем

Навіть із усіма перевагами, зазначеними в таблицях, на рисунку 1.6 зображено залежність енергоефективності (η) від відстані (d) для різних технологій, проаналізованих у даному розділі. Як видно з рисунку 1.6, ефективність передачі енергії зменшується зі збільшенням відстані між

передавачем і приймачем. У короткому діапазоні відстаней ця ефективність досягає максимуму (від 68% до 95%), з найкращими результатами для ICWPT. Проте збільшення відстані призводить до зниження ефективності до 45–65%. Технології, які використовують далеке поле для передачі потужності, мають найнижчі значення ефективності через різноманітні фактори, такі як погодні умови та конструкція системи [19].

Таблиця 1.2 – Переваги та недоліки технології WPT

	<b>СТР</b>	<b>ІТП</b>	<b>МРТ</b>	<b>LPT</b>
<b>Переваги</b>	Висока потужність передачі (до кількох кВт)	Можливість отримати більш високий ККД (90%)	Велика ефективна відстань передачі до кількох кілометрів	Велика ефективна відстань передачі до кількох кілометрів
	Передає потужність без утворення вихрових струмів	Висока передача потужності (на кілька кВт)	Підходить для мобільних телефонів	Підходить для мобільних телефонів
	Зменшує витрати за рахунок використання металевих пластин як передавача та приймача	Хороша гальванічна розв'язка	Має потенціал для передачі кількох кВт	Має потенціал для передачі кількох кВт
	Дуже добре підходить для невеликих додатків, але також може використовуватися у великих додатках, таких як електромобілі	Може застосовуватися від малих (телефон) до великих пристроїв (електромобілі)		
<b>Недоліки</b>	Обмежена ефективність в діапазоні 70-80%	Обмежена відстань передачі від см до м	Низький ККД, менше 10%	Низький ККД, менше 20%
	Коротка відстань передачі (макс. 100 мм)	Значні втрати на вихрові струми обмежують область застосування	Комплексне виконання	Лінія видимості ствольної коробки
	Деякі проблеми в результаті конфлікту між відстанню передачі, потужністю та значенням ємності			

Із загальних висновків, представлених у таблицях, видно, що найвищий коефіцієнт зв'язку спостерігається у технології, що використовує електричне поле, але вона обмежена відстанню передачі. Технологія, що використовує резонансну частоту, має найвищі значення робочої частоти та не має втрат на гістерезисі, але її ефективність нижча за IWPT. На жаль, технологія MCR WPT характеризується значними втратами через вихрові струми та зниженням добротності при збільшенні частоти сигналу.

З урахуванням переваг та недоліків різних технологій, можна зробити висновок, що технологія IPT має найбільший потенціал через високу ефективність передачі. Проте технологія CRT також показує перспективи, хоча зараз має меншу ефективність та обмежену відстань передачі. Технології, що використовують далеке поле, мають значні недоліки, що ускладнюють їх комерційне використання.

## 1.6 Бездротова передача енергії в електромобілях

У сучасному світі, основними засобами транспорту є транспортні засоби з двигуном внутрішнього згорання, що веде до значного забруднення навколишнього середовища [19]. Однак, у зв'язку з проблемами щодо доступності сирової нафти та газу, а також зростаючою необхідністю у зниженні рівня забруднення повітря, електромобілі (EV) стають привабливою альтернативою. Електромобілі можна умовно розділити на дві категорії: гібридні електромобілі (HEV) і повністю електричні автомобілі (AEV). У цьому розділі зосереджено увагу на повністю електричних автомобілях. Зазвичай ці автомобілі використовують батареї, суперконденсатори або паливні елементи як джерела енергії. Залежно від типу електромобіля може використовуватися одне або кілька з цих джерел. Відповідно до джерела живлення, електромобілі можуть бути розділені на транспортні засоби, що працюють від акумуляторів (BEV), які

					КВРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потребують зовнішньої системи зарядки, і транспортні засоби на паливних елементах, які не потребують зовнішньої системи зарядки.

У літературі проведено багато досліджень, присвячених електромобілям та їх класифікації, конфігурації, стандартам зарядки та іншим аспектам. Проте все більше уваги зосереджується на бездротовому живленні електромобілів. У цьому процесі найчастіше використовується метод індуктивної передачі потужності (IPT). На рисунку 1.7 показана типова топологія бездротового джерела живлення для електромобілів.

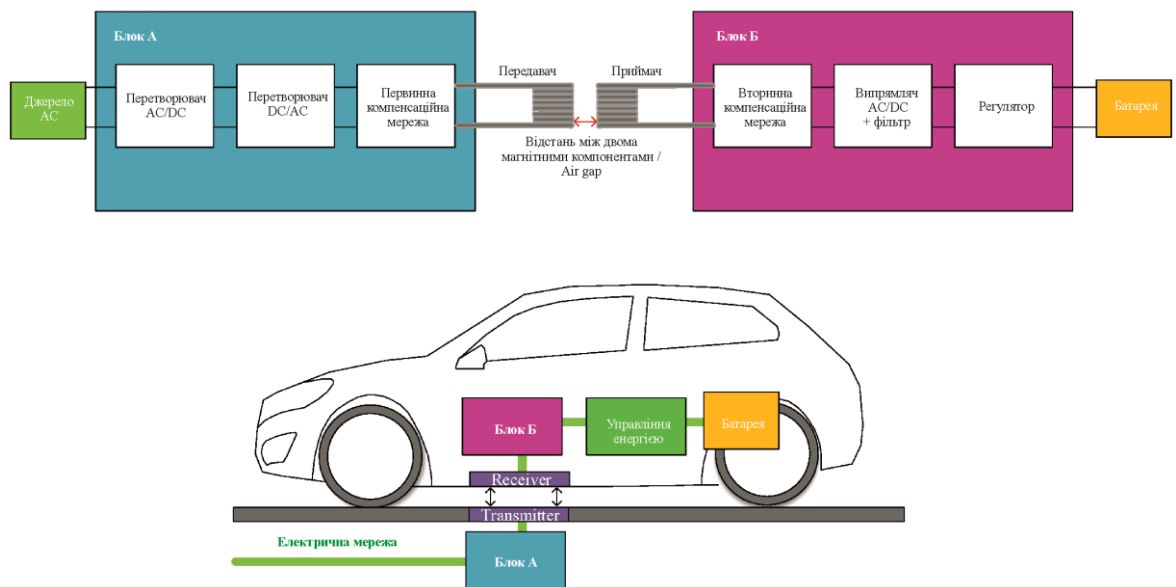


Рисунок 1.7 – Система бездротової зарядки, розроблена для електромобілів

Ця система охоплює приймач, розташований в шасі електромобіля, та передавач, розташований під дорожнім покриттям або в парковці. Передавач складається з джерела низькочастотної енергії, перетворювача з системою корекції коефіцієнта потужності, високочастотного інвертора, компенсаційної котушки та передавальної котушки (первинної котушки). У свою чергу, коло приймача включає резонансний контур, високочастотний випрямляч, фільтр і

аккумулятор. Відстань між передавачем і приймачем залежить від типу транспортного засобу, товщини дорожнього покриття і зазвичай не перевищує 0,4 метра. Резонансна частота системи компенсації передавальної та приймальної котушок визначає необхідну частоту комутації інверторів і зазвичай становить від 20 до 100 кілогерц. Одним з факторів, що впливає на ефективність передачі потужності, є конструкція котушок (кругла, плоска соленоїдна, біполярна, триполюсна, зигзагоподібна) і топологія системи компенсації, що широко досліджувалося в літературі. З економічної точки зору, найбільш придатною топологією системи компенсації для систем великої потужності є топологія послідовно-послідовна і послідовно-паралельна. Важливим елементом у бездротовій системі живлення для електромобілів є блок, що відповідає за зв'язок між колами для управління попитом на електроенергію.

Розвиток електромобілів відкриває нові можливості у сферах транспорту та електроенергетики. Однак, для успішної імплементації цієї технології по всьому світу необхідна стандартизація кожного її аспекту. Стандартизація, пов'язана із заряджанням електромобілів, може бути розділена на три напрямки: стандарти для зарядних компонентів електромобілів, стандарти інтеграції з мережею EVGI (Electric Vehicle Grid Integration) і стандарти безпеки. Основною організацією, що займається стандартизацією повністю електричних транспортних засобів, є Міжнародна організація стандартизації (ISO), а також існують багато інших організацій, що стандартизують компоненти систем зарядки електромобілів. У світі існує кілька стандартів зарядки інфраструктури для електромобілів. SAE та IEEE використовуються американськими виробниками компонентів транспортних засобів, тоді як IEC широко використовується в Європі. Японія використовує стандарти CHAdeMO, а Китай – Guobiao (GB/T).

					КВРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.7 Висновки до першого розділу

У даному розділі розглянуто різноманітні аспекти бездротової передачі енергії, починаючи з загальної характеристики цього явища. Класифікація бездротових систем передачі електроенергії дозволила нам усвідомити різноманітні підходи та технології, які застосовуються в цій області. Поглиблене вивчення передачі енергії в дальній зоні, зокрема за допомогою мікрохвильових та лазерних систем, підкреслило різноманітність та потенційні можливості цих технологій.

Особлива увага приділялася передачі потужності в ближній зоні, де індуктивна та ємнісна передача потужності представляють собою перспективні напрямки. Розглянуті переваги та недоліки кожного типу системи дозволяють усвідомити їхні характеристики та обмеження.

Загальною висновком розділу є те, що бездротова передача енергії є важливим напрямком досліджень та розвитку. Різноманітні технології в цій області мають свої переваги та недоліки, і вибір конкретної технології залежить від конкретних умов та вимог конкретного застосування. Важливим завданням є подальше вдосконалення технологій бездротової передачі енергії з метою підвищення ефективності, безпеки та дальшого розвитку цього перспективного напрямку.

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ GAN НЕМТ У БЕЗДРОВОВИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

### 2.1 Роль GaN НЕМТ у розвитку бездротових систем передачі енергії

У бездротовому зв'язку, де використовуються високочастотні радіохвилі для передачі даних з високою швидкістю, потрібні спеціальні напівпровідникові пристрої з винятковими характеристиками на високих частотах та великою потужністю. Одним з таких ключових пристроїв є транзистор з високою рухливістю електронів (НЕМТ), який був розроблений у 1980 році доктором Мімурою в компанії Fujitsu Laboratories Ltd. Він є важливим компонентом для сучасних бездротових зв'язків [21]. На рисунку 2.1 показано, що область, де генеруються електрони (допування або поляризація), відокремлена від області, де транспортуються електрони, і двовимірний електронний газ (2DEG), що утворюється на межі розділу різнорідного переходу (інтерфейс гетеропереходу). Цей електронний газ не розсіюється домішками, що дозволяє електронам рухатися з високою швидкістю. Перша функція зменшує шум, створений транзисторами, тоді як друга покращує ефективність посилення високочастотного сигналу.

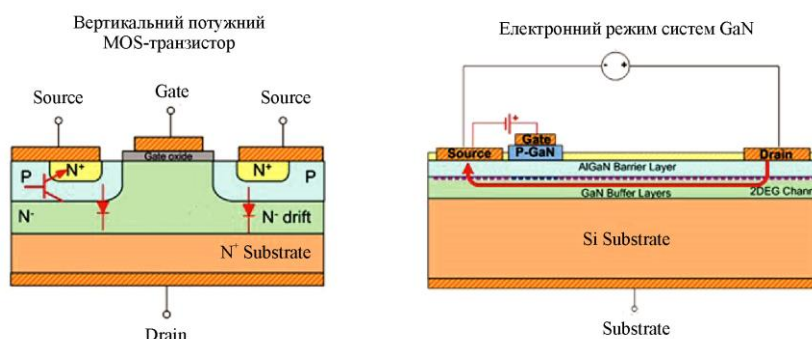


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення принципу роботи E-HEMT: вплив позитивної напруги між затвором і витоком

					КВРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

GaN: подібності та відмінності з MOSFET. GaN E-HEMT концептуально подібні до кремнієвих MOSFET. GaN E-HEMT — це три термінальні пристрої з вузлами затвора, стоку та джерела. Подібно до МОП-транзисторів, позитивна напруга між затвором і витокком на E-HEMT забезпечує високу рухливість електронів між клемми стоку та витокку (рисунок 2.1). Коли затвор утримується на рівні або нижче потенціалу джерела, шлях високої рухливості електронів переривається, і струм між стоком і джерелом не тече. Це вірно лише для пристроїв у режимі покращення. Тут не розглядаються силові транзистори GaN, які використовують пристрої в режимі виснаження, як правило, у конфігурації каскоду. Складність реалізації каскодового коду GaN транзисторів, по суті багатокристальних модулів, обмежила ринкове визнання цього типу продукції.

Номінальна напруга, як правило, 650 В або 100 В, є мінімальною напругою, яку транзистори блокують або затримують. Лавинні характеристики повторюваних лавин кремнієвих МОП-транзисторів не так легко охарактеризувати в GaN E-HEMT, однак охарактеризована напруга пробою GaN E-HEMT показала, що вони стійкі до перехідних напруг.

Хоча існує багато подібностей, є деякі ключові відмінності між GaN E-HEMT і MOSFET. Кремнієві МОП-транзистори – це вертикальні пристрої, що означає, що струм від джерела до джерела тече від верху (джерела) кремнієвого кристала через канал МОП-транзистора до підкладки стоку в нижній частині. GaN E-HEMT, з іншого боку, є бічними пристроями, тому струм від стоку до джерела протікає в клему стоку у верхній частині пристрою через канал високої мобільності до клемми джерела, також у верхній частині пристрою.

Силові транзистори GaN виготовляються шляхом нарощування шарів GaN і AlGaN (алюмінієвий GaN) на кремнієвих підкладках – так само, як стандартні Si MOSFET, які використовуються у великих обсягах. Гетероінтерфейс між GaN

					КВРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

і AlGaN утворює двовимірний електронний газ (2DEG) і є основою для каналу високої мобільності. Утворений 2DEG має дуже високу щільність заряду та мобільність, що призводить до дуже низького опору відтік до джерела,  $R_{DS(on)}$  і дуже високошвидкісних пристроїв. 2DEG є рідною характеристикою інтерфейсу GaN-AlGaN, тому шлюз пристрою повинен забезпечувати метод переривання каналу для використання в програмах перетворювача енергії. Це досягається шляхом створення інтерфейсу GaN P-типу, який виснажує канал 2DEG під затвором. Це виробляє зазвичай вимкнений транзистор електронного режиму, керований позитивним зміщенням затвора увімкнення 2DEG.

## 2.2 Комутаційні характеристики

Структура GaN E-HEMT має додаткову особливість порівняно з Si MOSFET, оскільки не має корпусного діода чи паразитного біполярного транзистора. Переваги комутаційних джерел живлення полягають у відсутності втрат на корпусі діода зі зворотним відновленням і високої напруги, що є традиційними недоліками Si MOSFET.

Аналіз втрат на перемикання GaN E-HEMT знову подібний до аналізу MOSFET. Основний механізм втрат при перемиканні встановлюється значеннями ємності пристрою та заряду затвора. Оскільки значення заряду затвора та ємності вузла набагато менші, ніж у MOSFET, втрати GaN E-HEMT значно зменшуються. Вхідна, вихідна та зворотна ємності GaN забезпечують увімкнення з низькими втратами та швидкі переходи, що призводить до відсутності втрат у періоді  $dv/dt$  (плато Міллера) під час увімкнення. По суті GaN E-HEMT схожі на MOSFET з набагато швидшим, ефективнішим перемиканням і меншими втратами на провідність.

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2.3 Транзистор з високою рухливістю електронів

Транзистор з високою рухливістю електронів (HEMT) – це нова, важлива технологія в світі масового виробництва комутаційних пристроїв. На відміну від традиційних кремнієвих транзисторів, HEMT є гетеропереходними пристроями, що складаються з двох напівпровідникових матеріалів з різними забороненими зонами. Вперше запропоновані наприкінці 1990-х і на початку 2000-х років, HEMT відрізняються унікальною зонною діаграмою, що призводить до утворення газу основних носіїв електронів у нелегованому матеріалі з низькою забороненою зоною. Ця структура дозволяє працювати на високих частотах завдяки відсутності розсіюючих атомів допantu. Характеристики HEMT залежать від матеріалів і можуть бути налаштовані для різних застосувань з високою частотою або потужністю.

Наприклад, транзистори HEMT на основі нітриду галію (GaN), як показано на рисунку 2.2, особливо ефективні для застосувань у пристроях перетворення напруги та інших комутаційних топологіях високої потужності завдяки їх низькому опору відкритого стану.

У додатках з дуже великою потужністю, особливо при низьких частотах, зазвичай використовуються біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT). Недавно МОП-транзистори з карбіду кремнію (SiC) також стали популярними у цьому сегменті високої потужності, пропонуючи ще вищі частоти перемикання до кількох сотень кГц. Проте, коли потрібна ще більша швидкість перемикання при помірних рівнях потужності нижче 1000 Вт, HEMT стає єдиним відповідним рішенням. Популярними застосуваннями таких вимог є блоки живлення для серверів у дата-центрах, споживчі адаптери змінного струму, автомобільні перетворювачі 48 В DC/DC та лазерні драйвери для LIDAR.

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.2 – Область застосування потужності та частоти для IGBT, SiC MOSFET і GaN HEMT

Однією з основних труднощів, які гальмували широке впровадження та масове виробництво GaN HEMT протягом останніх двох десятиліть, були складнощі, пов'язані з проектуванням драйверів затвора. Вимоги до складних схем та пов'язані з ними проблеми надійності ставили певні вимоги, які потрібно було вирішити перед тим, як GaN HEMT могли бути успішно впроваджені на ринку. Компанія ROHM вирішила ці проблеми, пропонуючи спеціальну серію мікросхем драйверів затвора, які спрощували конструкцію схеми і забезпечували найвищу продуктивність. Ці розробки дозволили GaN HEMT від ROHM стати готовими до використання, створивши основу для наступних кроків у розробці пристроїв з ще більшими характеристиками напруги.

#### 2.4 Покращена продуктивність системи завдяки новим і покращеним топологіям

Схеми корекції коефіцієнта потужності (PFC) традиційно будуються з передніми мостовими випрямлячами, щоб розпочати процес перетворення потужності перетворення змінного струму на постійний і примусового струму слідувати за мережевою напругою змінного струму. Усунення втрат переднього

кінця випрямляча можливо шляхом реалізації безмостової схеми тотемного стовпа (ВТР) (рисунок 2.3). Топологія ВТР PFC використовує перемикаючі транзистори та забезпечує набагато менші втрати, ніж реалізація мостового випрямляча. До появи силових транзисторів GaN кремнієві MOSFET були єдиним вибором для конфігурацій ВТР. Впровадження ВТР з МОП-транзисторами показало лише незначне покращення, оскільки втрати зворотного відновлення синхронного МОП-транзистора з високою стороною кола підвищення майже стерли вигравш від видалення мостового випрямляча. Без паразитних корпусних діодів і можливостей зворотної провідності GaN E-HEMTS усуваються втрати зворотного відновлення в ВТР PFC і реалізується справжня цінність топології. Досягнуто підвищення ефективності з 97,5% до 99%. Завдяки нижчим втратам, вищій частоті та зменшеній кількості деталей, менший, менш дорогий, холодніший і надійніший інтерфейсний PFC був реалізований для додатків, які потребують PFC.

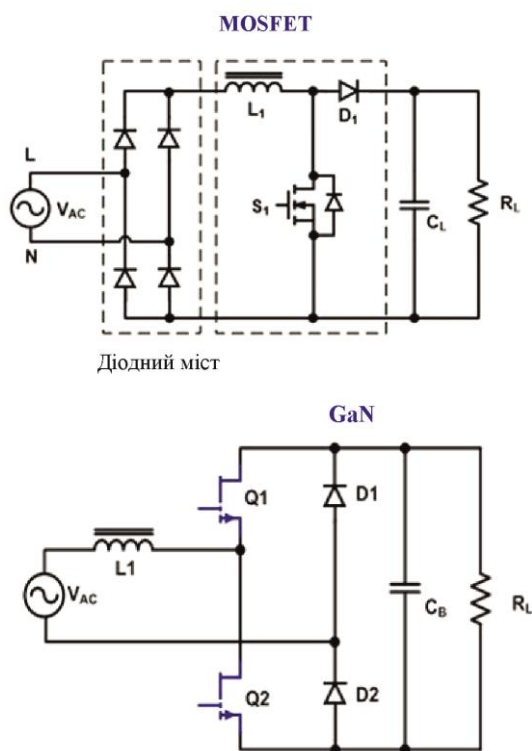


Рисунок 2.3 – Впровадження безмостової схеми для усунення втрат на передньому кінці випрямляча

Однією з найбільш популярних топологій для ізольованих перетворювачів DC-DC є напівмост LLC, яка використовує перемикання з нульовою напругою (ZVS). Цей тип топології широко застосовується в широкому діапазоні потужностей від 75 Вт до 750 Вт, оскільки він забезпечує високу ефективність за рахунок використання резонансного перемикання та оптимального магнітного дизайну. Він вже протягом останніх двадцяти років широко використовується з традиційними Si MOSFET транзисторами. Використання силових транзисторів GaN, які мають дуже низьку вихідну ємність і високу частоту перемикання, додатково підвищує ефективність та продуктивність топології LLC. Для досягнення ZVS і використання переваг цієї топології, конвертерам LLC потрібно достатньо часу на періоди простою.

Зменшений C OSS у GaN E-HEMT порівняно з кремнієвими транзисторами сприяє збільшенню індуктивності намагнічування, що в свою чергу зменшує втрати в трансформаторі. Це також призводить до зниження середньоквадратичного значення струму через напівмостові перемикачі живлення, що призводить до зменшення провідних втрат. Зменшений C OSS також сприяє підвищенню частоти перемикання, зменшенню резонансного резервуару і, отже, досягненню вищої щільності потужності. Порівняно з Si MOSFET, GaN E-HEMT може знизити втрати на затворі до 50 разів (від 2,8 Вт до 50 мВт) у перетворювачі LLC потужністю 200 Вт, який працює на частоті 1 МГц, що призводить до підвищення ефективності на 1,5% шляхом додаткового зменшення втрат на затворі і зниження втрат у колі комутації LLC.

## 2.5 Застосування GaN HEMT

Робота GaN HEMT має високу частоту перемикання та помірні рівні потужності, що робить їх ідеальними для великої кількості застосувань у сучасній електроніці. З кожним днем ці прикладні простори стають все більш важливими та завоюють відповідну частку ринку електронної промисловості.

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Три найпоширеніші приклади цього – це перетворювачі змінного/постійного струму, такі як адаптери змінного струму та вбудовані зарядні пристрої, перетворювачі постійного/постійного струму (наприклад, вхід 48 В, вихід 12 В) і системи лазерного дистанційного зондування (LiDAR).

Зазвичай двигуни складаються з послідовної серії перетворювачів напруги. Починаючи зі змінного струму, він спочатку конвертується у високовольтний постійний струм, а потім знову перетворюється на змінну частоту або набір змінної напруги для керування рухом двигуна (рис. 2.4). В електромобілях високовольтну шину постійного струму можна використовувати безпосередньо.

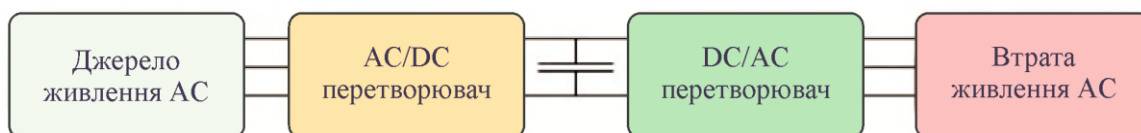


Рисунок 2.4 – Блок-схема приводу двигуна

Остаточний вихідний каскад постійного/змінного струму є ідеальним застосуванням для GaN HEMT, де частота перемикання може коливатися між 40 кГц і 100 кГц, а струми навантаження можуть бути значними.

У порівнянні з іншими технологіями, такими як кремнієві МОП-транзистори та IGBT, GaN HEMT є більш ефективними, компактнішими та, як правило, менш дорогими у реалізації.

Ще одним застосуванням GaN HEMT, яке набуває широкого поширення на ринку, є лазерний драйвер для систем LiDAR, особливо тих, що використовуються в програмах автономного водіння. Щоб створити імпульси світла для LiDAR, ці лазери повинні керуватися напівпровідниковим перемикачем. Якість перемикача безпосередньо впливає на роздільну здатність зображення LiDAR і зазвичай характеризується часом увімкнення, піковим струмом і втратами при перемиканні. У порівнянні з традиційними кремнієвими пристроями, комутатори GaN HEMT демонструють надзвичайно високу швидкість і до 65% менші втрати потужності. Це забезпечує покращену

продуктивність LiDAR з точки зору якості зображення, одночасно покращуючи ефективність і термічну складність.

Очікується, що до 2025 року ринок GaN-пристроїв у радіочастотних додатках досягне 2 мільярдів доларів США. Значна частина цього обумовлена радарними додатками, а також розробкою спільної електроніки та антен, наприклад систем електронного сканування. Радар зазвичай реалізується за допомогою високопотужної широкосмугової лампи біжучої хвилі (ЛБХ). GaN НЕМТ швидко замінюють цей ненадійний пристрій із коротким терміном експлуатації завдяки застосуванню імпульсних радіочастотних сигналів. Як і в попередніх прикладах, рішення GaN НЕМТ забезпечує вищу надійність, покращену ефективність і кращу високочастотну характеристику.

## 2.6 Висновки до другого розділу

У даному розділі було проаналізовано роль транзисторів GaN E-HEMT у бездротових системах передачі енергії. Виявлено, що GaN E-HEMT вже стали ключовим компонентом у силовій електроніці, покращуючи ефективність та забезпечуючи нові можливості для розвитку різноманітних топологій, таких як ВТР PFC і LLC. Використання транзисторів GaN E-HEMT у бездротових системах передачі енергії стало реальністю завдяки їх низькій паразитарності, тепловому стресу та легкості в експлуатації. Цей розділ також висвітлив значення GaN E-HEMT у різних галузях, а саме: центри обробки даних, промислову автоматизацію, відновлювані джерела енергії та автомобільні додатки. Вища ефективність і щільність GaN транзисторів допомагає знижувати витрати на систему, її доставку, встановлення, обслуговування та експлуатацію.

Отже, можна зробити висновок, що GaN E-HEMT грають ключову роль у вдосконаленні бездротових систем передачі енергії та відіграють важливу роль у подальшому розвитку цих технологій.

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 РЕЗОНАНСНА БЕЗДРОТОВА ПЕРЕДАЧА ЕНЕРГІЇ КЛАСУ Е НА ОСНОВІ GAN HEMT

Резонансна бездротова передача енергії (RBPE) на основі транзисторів GaN HEMT (транзисторів з високою рухливістю електронів галію арсеніду) стала однією з передових технологій у сфері безпроводної енергетики. Цей підхід використовує резонансні техніки для ефективного передавання електричної енергії через великі відстані без необхідності прямого контакту або використання проводів. Завдяки використанню транзисторів GaN HEMT, які відрізняються високою ефективністю та швидкодією, резонансна бездротова передача енергії класу Е стає ще більш привабливою альтернативою для різноманітних застосувань, від медичних пристроїв до мобільних технологій та промислових систем. У цьому розділі представлено основні принципи резонансної бездротової передачі енергії класу Е на основі транзисторів GaN HEMT та її переваги у порівнянні з іншими методами передачі енергії.

#### 3.1 Блок передачі енергії

Дослідимо блок передачі енергії у системах бездротової передачі енергії на основі резонансних принципів, зокрема, використання еквівалентної схеми класу Е. Резонансна бездротова передача енергії є важливою технологією для безпроводного живлення пристроїв у різних галузях, зокрема медичні пристрої, мобільні пристрої та промислові системи

Отримана еквівалентна схема для резонансної бездротової передачі енергії еквівалентна схемі класу Е [25], як показано на рисунку 3.1.

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

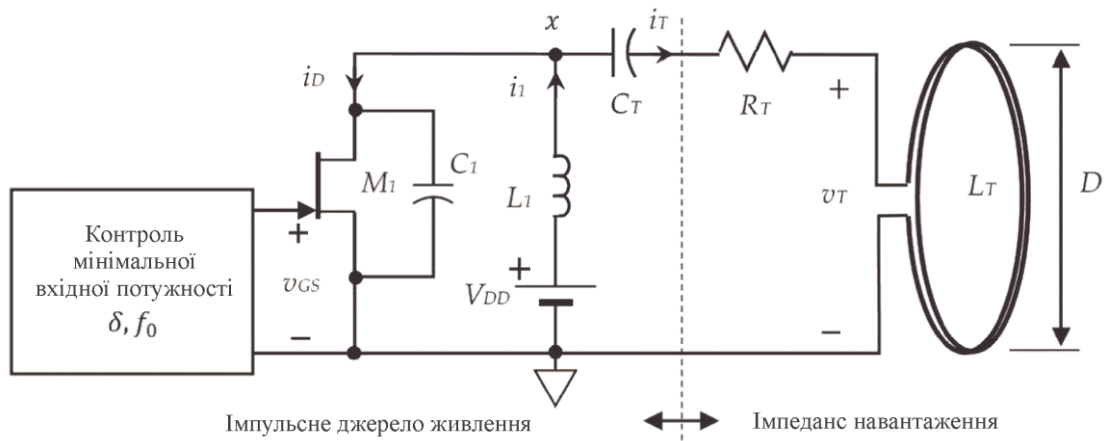


Рисунок 3.1 – Блок прийому енергії з використанням підсилювача класу E

Збільшений струм  $i_1$  перетворює електричну енергію від джерела постійного струму  $U_{DD}$  в енергію в магнітному полі за допомогою електричного струму наступним чином.

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{U_{DD} - v_x(t)}{L_1} \quad (3.1)$$

Потім магнітна енергія передається на бік імпедансного навантаження, коли перемикач  $M_1$  вимикається. Таким чином, потужність, що надходить до навантаження, пропорційна кількості магнітної енергії, поглиненої індуктором, яка є функцією приросту струму  $i_1$ . Для досягнення вищої потужності, що подається на навантаження, потрібно отримати найнижчу  $v_x(t)$  можливу в момент увімкнення  $M_1$  і вимикання  $M_1$ , коли  $v_x(t)$  повертається до  $U_{DD}$ . Бажано, щоб опір  $R_T$ , що позначає опір котушки, був якомога меншим, щоб підвищити енергоефективність під час бездротової передачі енергії.

Було виявлено [26], що максимальне значення вузлової напруги є функцією кута фази струму  $\phi$ , як показано на рисунку 3.2а, наступним чином.

$$U_{x,\max} = U_{DD} \left( 1 + \frac{1}{\cos \phi} \right), \quad (3.2)$$

де

$$\frac{\tan \phi}{\pi - \phi} = \frac{\delta}{1 - \delta}.$$

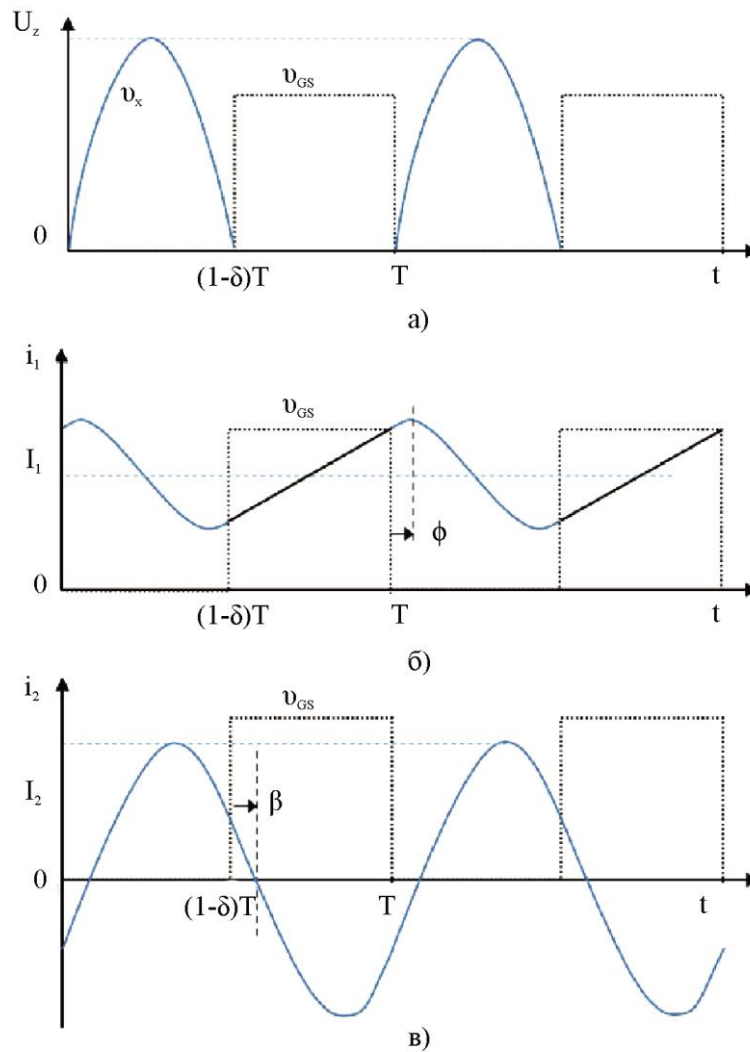


Рисунок 3.2 – Ілюстрація а) – напруги стоку  $U_x$ ; б) – фазового кута  $\phi$  та в) – фазового кута  $\beta$

Вищезазначене рівняння є дійсним лише для керування перемикачем  $M_1$  з нульовою напругою у режимі сталої відповіді, що може не виконуватись для

перехідних станів. Відповідний кут фази струму  $\phi$  становить  $64^\circ$ , а відповідне збільшення напруги  $U_{x,max}/U_{DD}$  становить 3.28 у сталому стані [26].

Параметри  $\beta$  і  $\phi$  [24] є ключовими параметрами для досягнення перемикання нульової напруги та перемикання похідної нульової напруги в підсилювачі потужності (ПП) класу E.

Параметр  $\phi$ , як показано на рисунку 3.2б, позначає різницю фаз між фазою увімкнення пристрою та фазою, у якій виникає максимальний струм, що протікає через  $L_1$ , на який безпосередньо впливає навантаження  $\delta$ . Параметр  $\beta$  представляє різницю фаз між увімкненням пристрою та струмом котушки передавача, як показано на рисунку 2в. Обидва параметри  $\beta$  та  $\phi$  контролюються шляхом налаштування частоти  $f$  та відсотка  $\delta$  таким чином, щоб перемикач у підсилювачі потужності класу E працював з мінімальними втратами потужності. Контроль мінімальної вхідної потужності [26] застосовується, щоб уникнути ситуації, коли ефективність передачі потужності знижується через зміну навантаження, що визначає навантаження  $\delta$  шляхом обміну потужністю, що подається на навантаження, з потужністю ефективність передачі.

### 3.2 Приймальний блок живлення

У цій роботі пропонується конкретний вид блоку прийому енергії, як показано на рисунку 3.3. Навантаження імпедансу підключене за допомогою магнітного зв'язку між блоком передачі енергії та блоком прийому енергії. Коливання приймальної напруги на стороні блоку прийому енергії є функцією відстані від котушки блоку прийому енергії та умови резонансу, що визначається ємністю блоку передачі енергії.

$$v_R = v_R(f_0, g, C_r). \quad (3.3)$$

					КВРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36



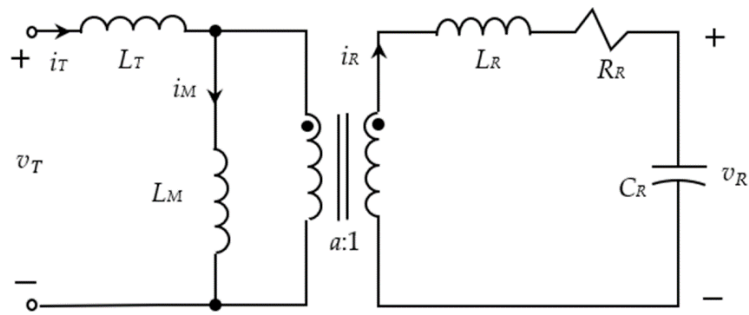


Рисунок 3.4 – Модель трансформаторної схеми для бездротової передачі енергії

Якісний фактор паралельного колювання  $Q_P$  [28] визначається виразом (3.4)

$$Q_P = R_R \sqrt{\frac{C_R}{L_R}}, \quad (3.4)$$

де  $C_R$  – це ємність блоку прийому енергії. Велика підписка  $R$  відповідає прийому і відрізняється від меншого  $r$  в  $C_r$ , яке вказує на резонанс. Коли блок передачі енергії та блок прийому енергії мають схожі обмотки, тобто  $L_T = L_R$ , магнітуда напругового підсилення  $G_{v,1}$  виводиться при ідеальному резонансному відповіданні, тобто за умови, що частота перемикування  $2\pi f_0 = 1/\sqrt{L_R C_R}$ , наступним чином.

$$G_{v,1} = \frac{v_R}{v_r} = \frac{k}{k^2} + jQ_P, \quad (3.5)$$

Наведене вище рівняння (3.5) ігнорує як вплив струму намагніченості, що протікає через  $L_M$ , так і втрати котушки через опір котушки  $R_T$ . Коефіцієнт зв'язку  $k$  – це зв'язок між передавальною і приймальною обмотками. Коефіцієнт

зв'язку  $k$  більший, ніж  $Q_P$ , коли відстань між котушками невелика, і набагато менший, ніж  $Q_P$  при бездротовій передачі енергії на великі відстані. Величина та фаза підсилення напруги виражаються окремо, як показано нижче.

$$|G_{v,1}| = \frac{k}{\sqrt{k^4 + Q_P^2}}, \quad (3.6)$$

$$G_{v,1} = -\angle \tan^{-1} \frac{Q_P}{k} = \begin{cases} 0^\circ & \text{індуктивна бездротова передача енергії} \\ -90^\circ & \text{резонансна бездротова передача енергії} \end{cases}$$

Модель схеми резонансного бездротового трансформатора передачі потужності, показана на рисунку 3.4, діє як інвертор опору, який інвертує зворотний зв'язок конденсатора  $C_R$  до підсилювача потужності класу Е. Еквівалентний опір зворотного зв'язку  $Z_{FB}$ , відображений з блоку прийому енергії на блок передачі енергії, визначається наступним чином.

$$Z_{FB} = \frac{1}{G_{v,1}^2} \frac{1}{j\omega_0 C_R}, \quad (3.7)$$

де

$$\omega_0 = 2\pi f_0$$

Наведене вище рівняння є аналогом трансформатора з коефіцієнтом перетворення  $1:G_{v,1}$ . Оскільки коефіцієнт перетворення є комплексним числом, конденсатор є негативним конденсатором, який еквівалентний індуктивності з індуктивністю, визначеною таким чином.

					КВРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L_2 = \frac{Q_P^2}{k^2} \frac{1}{\omega_0^2 C_R} = \frac{R_R^2}{k^2} C_R . \quad (3.8)$$

Незатухаюча власна частота блоку передачі потужності через  $\omega_2$  визначається виразом (3.9).

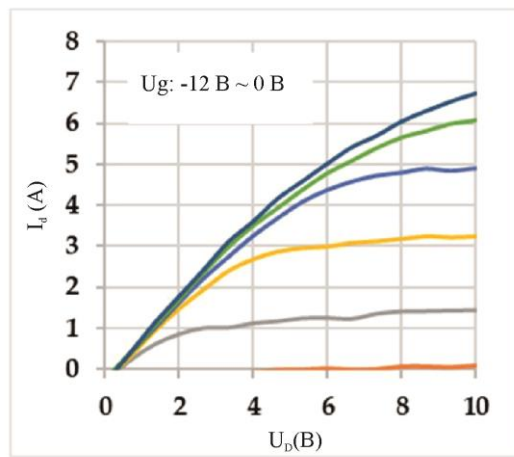
$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_T}} = \frac{k}{R_R} \frac{1}{\sqrt{C_R C_T}} . \quad (3.9)$$

### 3.4 Модуль GaN HEMT

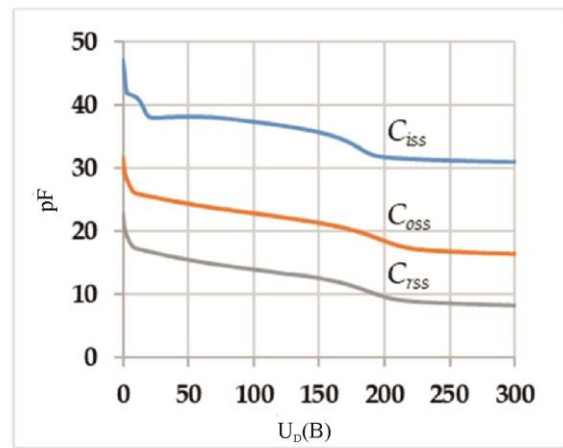
У дослідженні використано GaN HEMT в режимі D. У літературі подано GaN HEMT у D-моді [25], Нещодавно розроблений 20-мм пристрій із кривою  $I_D$ - $U_D$  (показана на рисунку 3.5а) вказує на те, що опір увімкнення становив 0,9 Ом при напрузі стік-витік 2 В. Криву  $C$ - $U_D$ , показану на рисунку 3.5б, було взято з Напівпровідниковим аналізатором B1505A і демонструє надзвичайно низьку вхідну ємність ( $C_{iss}$ ), що дозволяє частоті перемикання бути вищою за 50 МГц.

У даному дослідженні з'єднано три пристрої діаметром 20 мм паралельно для отримання більшого струму з побічним ефектом у вигляді потрійного збільшення вхідної ємності та зниження частоти перемикання до менше ніж 16 МГц. Цей пристрій має загальну ширину затвора 20 мм, щільність струму 500 мА/мм і опір увімкнення 50 мОм/мм. Зокрема, він мав напругу пробою 600 В і порогову напругу затвора  $-9$  В. Супутні паразитні ємності та інші відповідні характеристики описані в таблиці 3.1.

					КВРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)

Рисунок 3.5 – Характеристики D-режиму GaN НЕМТ:

а) – крива  $I_D-U_D$  та б) – крива  $C-U_D$

Таблиця 3.1 – Параметри D-режиму GaN НЕМТ з діаметром 20 мм

Символ	Опис	Одиниця вимірювання	$U_{DS}$	
			0 В	600 В
$C_{oss}$	Вихідна ємність	пФ	31	17
$C_{iss}$	Вхідна ємність	пФ	46	31
$C_{rss}$	Ємність зворотного зв'язку	пФ	23	8
$U_{th}$	Напруга ввімкнення затвора	В	-9	
$U_{GS}$	Максимум	В	10 ~ -30	
$R_{DS,on}$	На опір	$m\Omega$	900	
$U_{BD}$	Напруга пробою	В	600	
$i_{D,cont}$	Постійний струм витоку	А	3	

Для вирішення проблем з упаковкою D-Mode GaN НЕМТ 20 мм був закритий в корпус TO220 (Transistor Outline 220). Хоча двоканальний плоский пакет без виводів (DFN – Dual Flat No-Lead) міг ефективно зменшити вплив вихідної індуктивності, упаковка TO220 мала кращий тепловий опір. Зменшення ширини пристрою GaN НЕМТ на 20 мм виявилось значним покращенням

порівняно з нашою попередньою версією, яка мала загальну ширину затвора 120 мм і була укладена в корпус TO220. D-Mode GaN HEMT 20 мм мав шість разів меншу паразитну ємність порівняно з версією на 120 мм. Використання D-Mode GaN 20 мм було особливо перевагою для роботи на високих частотах у діапазоні МГц, що робить його оптимальним вибором для резонансної бездротової передачі енергії.

### 3.5 Субгармонійне коливання

У нелінійних системах часто можуть виникати субгармонічні коливання, частота яких становить частки  $1/n$  ( $n = 2, 3, 4, \dots$ ) від члена прикладеної сили [29]. Це було виявлено як у теоретичних результатах, так і в експериментах, проведених для електричного коливального контуру, що містить індуктивність і ємність залізного сердечника, що насичуються. Блок прийому живлення, запропонований у кваліфікаційній роботі, використовував діоди з нелінійним вихідним струмом щодо вхідної напруги на діодах. Діоди вмикалися і вимикалися не тільки відповідно до напруги, але й від самого струму в практичній моделі високочастотного високовольтного діода SiC. Нелінійне диференціальне рівняння могло створювати субгармонічні коливання з частотою, яка становила частку вхідного сигналу – фіксовану частоту. Окремі члени нелінійного диференціального рівняння повинні охоплювати миттєві стани напруги та струму. У наших експериментах субгармонічні коливання виникали, коли напруга живлення постійного струму  $V_{DD}$  на стороні блоку передачі енергії була вищою за рівень напруги, який мав місце, коли посилення напруги між котушкою блоку прийому енергії та котушкою блоку передачі енергії було вищим за поріг провідності напруга діодів в блоці прийому живлення. У кваліфікаційній роботі лише показано існування субгармонічних коливань замість надання повних теоретичних результатів для порівняння.

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

### 3.6 Висновки до третього розділу

У цьому розділі детально розглянуто резонансну бездротову передачу енергії класу Е на основі GaN HEMT. Розглянули блок передачі енергії, приймальний блок живлення, модель трансформатора для бездротової передачі енергії, модуль GaN HEMT та явище субгармонійного коливання.

За допомогою аналізу цих компонентів розуміло, як GaN HEMT впливає на ефективність та надійність бездротової передачі енергії. Результати наших досліджень вказують на потенційні переваги використання GaN HEMT у таких системах, зокрема, покращення ефективності, зниження втрат та підвищення продуктивності. Таким чином, визначено перспективні напрямки подальшого вдосконалення та використання GaN HEMT у резонансній бездротовій передачі енергії класу Е.

					КВРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

## 4 МОДЕЛЮВАННЯ МОДУЛЯ БЛОКУ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЗАРЯДЖАННЯ АКУМУЛЯТОРА

### 4.1 Перетворювач АС-DC

Схема перетворювача змінного струму в постійний (АС-DC) з використанням діодного випрямляча показана на рисунку 4.1, перевага якого полягає в тому, що джерело змінного струму високої напруги перетворюється на накопичувач постійного струму низької напруги. Діод  $D_1$  використовується для запобігання негативному заряду в конденсаторі  $C_P$ . Діод  $D_2$  працює разом із конденсатором  $C_C$ , який є схемою пікового детектора. Ці два діоди вмикаються по черзі, щоб обмежити напругу в конденсаторі  $C_P$ ; таким чином, напруга конденсатора на  $C_P$  виводиться для низького струму наступним чином.

$$-U_{D1,on} \leq v_{C_P} \leq v_{D2,on} + U_{C_C,min}. \quad (4.1)$$

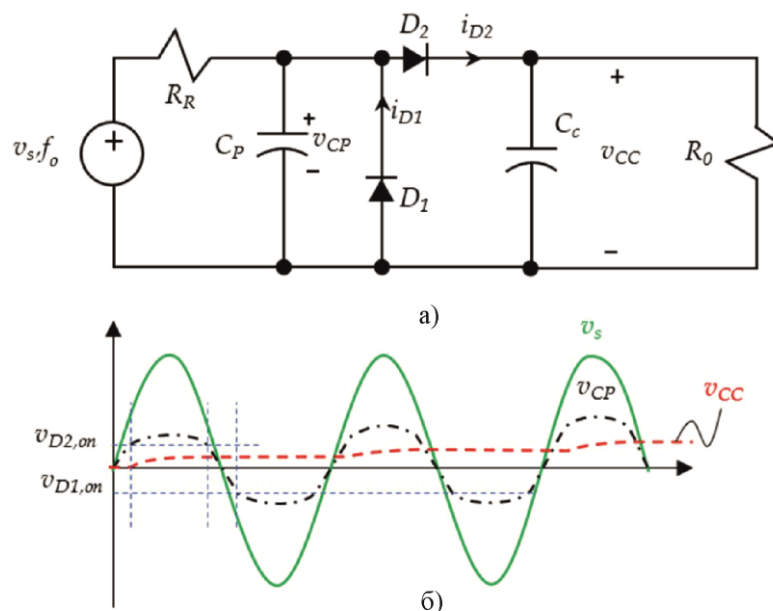


Рисунок 4.1 – а) – Еквівалентна схема перетворювача змінного струму на постійний струм у блоку приймання енергії та б) – його ідеальні форми хвиль

Час зарядки конденсатора  $C_P$  має бути меншим за період часу джерела вхідного сигналу  $V_s$ ; однак, чим менший опір  $R_R$ , тим більші резистивні втрати перетворювача, коли напруга перетворюється на негативний цикл. На практиці опір високочастотного діода становить 0,2 Ом, тому напругу конденсатора  $v_{C_P}$  можна збільшити на фактичну напругу на діодах наступним чином.

$$-(U_{D1,on} + I_{D1,max} R_{D1,on}) \leq v_{C_P} \leq U_{D2,on} + I_{D2,max} R_{D2,on} + U_{C_c,min}. \quad (4.2)$$

Пікова напруга конденсатора детектора  $v_{C_c}$  є функцією заряду через резистор  $R_R$  до  $U_s - v_{D2,on}$  і розряду від навантаження  $R_0$ . Припускаючи, що  $R_R$  дуже мале, можна знайти результат сталого стану мінімального значення напруги конденсатора  $C_{c,min}$  наступним чином.

$$U_{C_c,min} = (U_s - U_{D2,on}) \frac{1 - e^{-1/(2f_0 R_R C_c)}}{e^{1/(2f_0 R_0 C_c)} - e^{-1/(2f_0 R_R C_c)}} \approx (U_s - v_{D2,on}) e^{\frac{-1}{2f_0 R_0 C_c}}. \quad (4.3)$$

Максимальний струм діодів  $D_1$  та  $D_2$  може бути отриманий наступним чином.

$$I_{D1,max} = \frac{U_s - U_{D1,on}}{R_R}$$

$$I_{D2,max} = \frac{U_s - U_{D2,on} - U_{C_c,min}}{R_R}. \quad (4.4)$$

					КВРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При великому навантаженні  $R_0$ , два діода мають однаковий максимальний струм, тобто,  $I_{D1,max} \approx I_{D2,max}$

#### 4.2 Резонансний ємнісний дільник напруги

Джерелом вхідного сигналу для перетворювача АС-DC змінного струму на постійний є резонансний ємнісний дільник напруги, змодельований, як показано на рисунку 4.2.

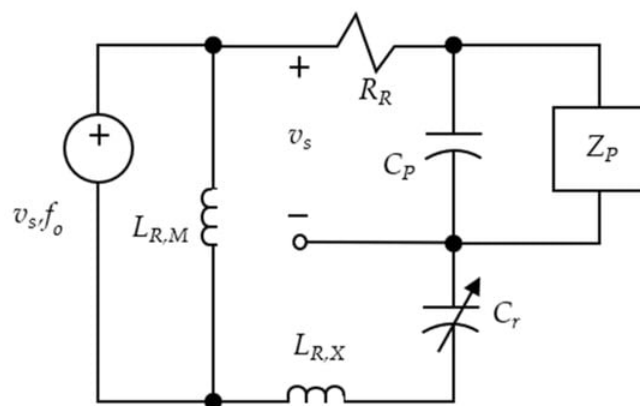


Рисунок 4.2 – Схема резонансного ємнісного дільника напруги в блоці приймання енергії

Конденсатор  $C_R$  регулюється для налаштування послідовного резонансу між ним і конденсатором обробки  $C_P$  з індуктором  $L_R$ . Припускається, що дуже мала частина індуктивності  $L_R$  виступає в якості індуктивності намагнічування  $L_{R,M}$  як вторинна котушка трансформатора, а решта індуктивності  $L_{R,X}$  – це індуктивність витоку. Резонансна напруга, як правило, перевищує кілька сотень вольт. Для досягнення зниження напруги та підтримання явища резонансу, конденсатор  $C_P$ , вставлений послідовно з резонансним конденсатором  $C_r$  у LC-контурі, включає в себе нову загальну ємність.

$$C_R = \frac{C_r C_p}{C_r + C_p} . \quad (4.5)$$

Резонанс напруги виникає, коли резонансна частота послідовного резервуара LC  $f_{LC}$  відповідає вхідній частоті  $f_0$ , за умови, що індуктивність витоку набагато більша за індуктивність намагніченості, тобто  $L_R \approx L_{R,X}$ , як показано нижче.

$$U_S = \frac{C_r}{C_r + C_p} U_R . \quad (4.6)$$

Резонанс напруги відбувається, коли резонансна частота послідовного LC-бака співпадає зі вхідною частотою  $f_0$ , за умови, що витікання індуктивності набагато більше, ніж магнітна індуктивність, тобто  $L_R \approx L_{R,X}$ .

$$f_0 = f_{LC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{R,R}C_R}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R C_R}} . \quad (4.7)$$

Регулюючи ємність  $C_r$ , яка згодом змінюється  $C_R$ , можна налаштувати резонансну частоту серії резервуарів LC за допомогою наступного рівняння.

$$\Delta f_{LC} = -\frac{1}{4\pi} (L_R C_R)^{-\frac{3}{2}} L_R \frac{\partial C_R}{\partial C_r} \Delta C_r = -\frac{C_R}{2f_{LC} C_r^2} \Delta C_r . \quad (4.8)$$

Оскільки точне значення  $f_{LC}$  невідоме після завершення налаштування, але відома частота передачі  $f_0$ , наступне рівняння можна використовувати для налаштування за умови, що  $C_p \gg C_r$

					КВРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{\Delta f_{LC}}{f_0} = -K_f \frac{\Delta C_r}{C_r} = -\frac{C_R}{2f_{LC}C_r^2} \Delta C_r, \quad (4.9)$$

де

$$K_f = \frac{C_p}{2C_r}.$$

Наведене вище рівняння виражене як відсоткова зміна ємності, яка пропорційна відношенню  $C_R$  та  $C_r$ . Щоб забезпечити низьку чутливість налаштування ємності, що є кращим, ніж тонке налаштування, ємність  $C_p$  зменшено. Але, з іншого боку, напруга на навантаженні також підвищується до дуже високої напруги, що є несприятливим для застосування з великим навантаженням  $Z_p$ , яке може взяти занадто багато заряду від резонансного резервуара LC і порушити механізм резонансу.

#### 4.3 Зарядний пристрій із використанням смугового фільтра з плоскою смугою пропускання

Вихідним навантаженням перетворювача AC-DC є резонансний ємнісний діляк напруги, який моделюється, як показано на рисунку 4.4а. Акумулятор можна змодельовати за допомогою резистора  $R_B$ , що представляє електроди та втрату з'єднання між шарами; конденсатор  $C_B$ , який представляє миттєву ємнісну поведінку для зберігання заряду; і ідеальне джерело постійної напруги  $U_B$ . Резистор  $R_B$  залежить від температури, яка зазвичай становить близько 0,1 Ом при кімнатній температурі для літій-іонної батареї.

Конденсатор  $C_B$  зазвичай становить тисячі Фарадей для кожної окремої літій-іонної батареї. Джерелом входу зарядного пристрою є джерело постійного

					КВРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

струму  $v_{cc}$ , накладене на джерело змінного струму  $v_{cc}$ . Для зменшення втрат енергії фільтра низьких частот, окрім резистора з низьким опором  $R_B$ , використано індуктор, який служив дроселем для поглинання різниці напруг між вхідною напругою та напругою постійного струму батареї  $U_B$ . Керівне рівняння для струму для зарядки конденсатора батареї  $C_B$  схеми на рисунку 4.3а формулюється наступним чином.

$$L_B \frac{di_B}{dt} + R_B i_B + \int i_B dt = v_{cc} + (U_{C_c} - U_B) \quad (4.10)$$

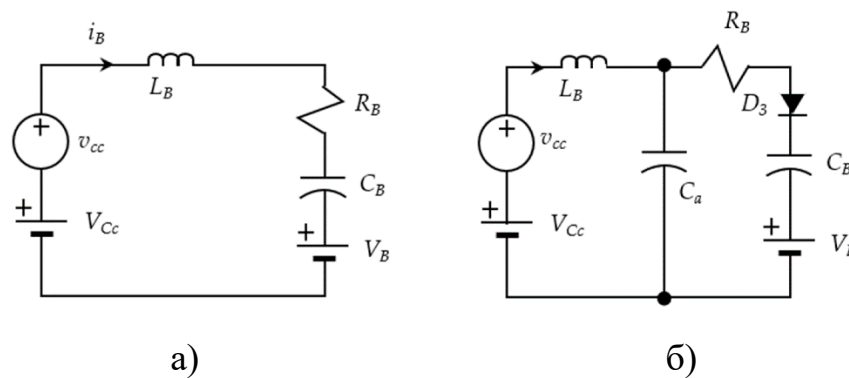


Рисунок 4.3 – Схема фільтра з плоскою смугою пропускання а) – без стабілізаційного конденсатора та б) – із стабілізаційним конденсатором  $C_a$

Забезпечуючи припущення стаціонарного стану, коли  $U_B = U_{C_c}$ , отримано перетворення Лапласа між напругою змінного струму  $v_{cc}$  та вихідним струмом  $i_B$  наступним чином.

$$\frac{I_B(s)}{U_{C_c}(s)} = \frac{s}{L_B s^2 + R_B s + \frac{1}{C_B}} \quad (4.11)$$

Для конкретної частоти  $f_0$  бездротової передачі енергії в діапазоні від 4 до 15 МГц можна вибрати  $L_B$  в мкГн, який разом із великою ємністю  $C_B$  та нулем у початку координат формує фільтр з плоскою смугою пропускання, який має низький коефіцієнт посилення напруги на високочастотному компоненті, а також низький коефіцієнт посилення напруги на ультранизкочастотному компоненті, тобто різницю напруги між  $V_B$  та  $V_{Cc}$ , щоб запобігти стрибкам струму від акумулятора під час початкового заряджання.

Альтернативна схема для прискорення стрибка струму від батареї під час підключення батареї до схеми полягає в додаванні конденсатора стабілізації  $C_a$  разом з діодом, як показано на рисунку 4.3б. Можна використовувати діод для захисту зворотного потоку струму від батареї до котушки індуктивності  $L_B$  або навіть конденсатор стабілізації високої частоти  $C_a$  на перетворювачі АС-DC. На рисунку 4.4 наведено графік Бодє для смугового фільтра з  $L_B=2$  мкГн,  $C_B=10\ 000$  Ф і  $R_B=0,1$  Ом.

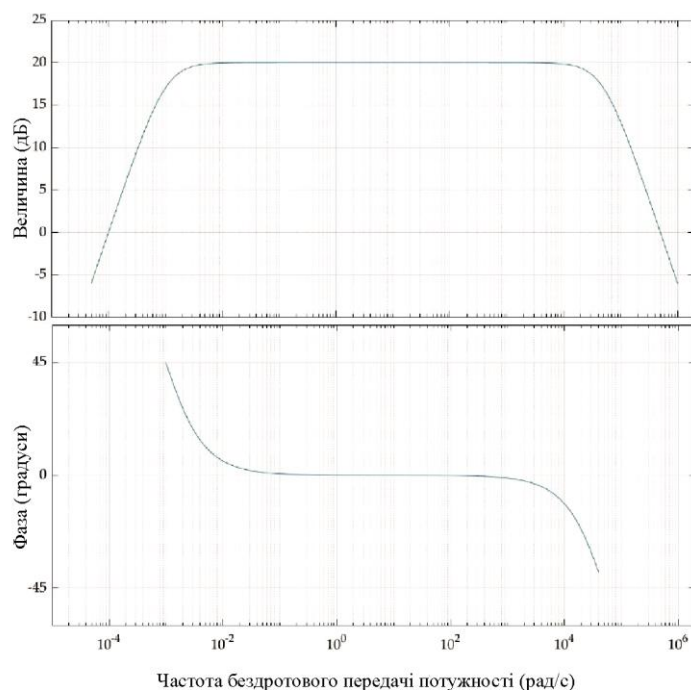


Рисунок 4.4 – Передавальна функція пропускну здатності фільтра з плоскою смугою пропускання

Еквівалентний імпеданс зарядного пристрою батареї, якщо припустити, що перетворення змінного струму в постійний перебуває в стаціонарному стані, визначається наступним чином.

$$Z_B = \frac{U_B}{I_B} . \quad (4.12)$$

Використовуючи ті самі параметри  $L_B=2$  мкГн,  $C_B=10\,000$  Ф і  $R_B=0,1$  Ом, з урахуванням розраховано еквівалентне навантаження при опорі  $0,1$  Ом з нульовою фазою в діапазоні частот від МГц до  $10$  кГц.

Рівняння (4.12) показує від'ємний опір, який може нівелювати опір  $R_T$  блоку передачі енергії та навіть викликати нестабільність бездротової передачі енергії. У сталому стані резонансу блок прийому живлення був перетворювачем негативного опору, який перетворював позитивний опір у негативний у діапазоні від менше  $1$  Гц до  $30$  кГц. Для компонента резонансної частоти вхідного сигналу схема блоку прийому живлення перетворювала миттєву ємність батареї в індуктивність  $L_2$ , як показано на рисунку 4.5. Коли абсолютне значення негативного опору імпедансу  $Z'_B$  було набагато вищим, ніж опір котушки блоку передачі енергії, резервуар LC у блоку прийому енергії був пов'язаний з негативним демпфуванням, що могло спричинити нестабільність відгуку схеми. Тому знадобиться замкнутий контур керування струмом для стабілізації схеми в майбутньому.

					КВРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

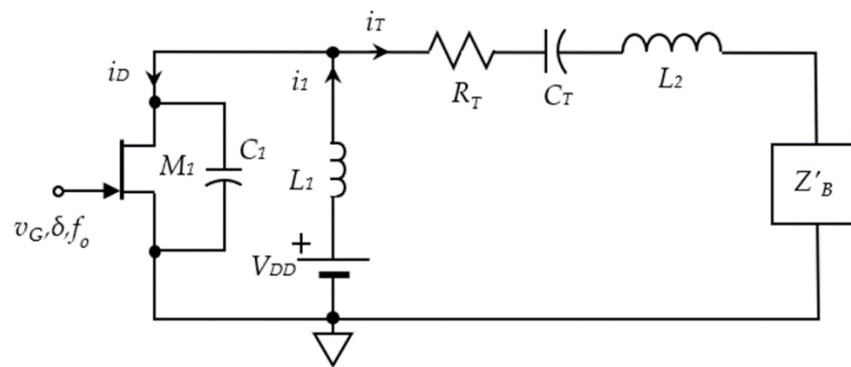


Рисунок 4.5 – Еквівалентна схема резонансної бездротової передачі енергії для заряджання акумулятора

#### 4.4 Коефіцієнт магнітного зв'язку

Коефіцієнт зв'язку  $k$  є функцією відстані  $g$  між передавальною та приймальною котушками, які використовуються в бездротовій передачі енергії. Коефіцієнт дистанційного зазору можна перетворити на відношення  $g/D$  для спрощення фактичного впливу на коефіцієнт зв'язку [32], де  $D$  позначає діаметр котушки. Приклад, який демонструє спад коефіцієнта зв'язку щодо різних співвідношень  $g/D$  під впливом  $D = 70$  см, показаний на рисунку 4.6. Можна побачити, що коефіцієнт зв'язку  $k$  становив 0,1, коли котушка блоку прийому енергії була на відстані 35 см від котушка блоку передачі електроенергії, і коефіцієнт зв'язку  $k$  впав до половини 0,1, коли котушка блоку прийому енергії була на відстані 50 см. У [33] також було запропоновано, що максимальне підсилення напруги  $G_{v,1}$  і максимальна передача потужності можуть бути отримані, коли коефіцієнт зв'язку  $k$  відповідає коефіцієнту якості паралельного резонансу  $Q_P$ .

Отже, висновок, який було зроблено, полягає в тому, що для максимально віддалених відстаней необхідно використовувати котушки з нульовим опором, що може бути легко досягнуто у космосі, але не на Землі. Навантаження, розміщене паралельно з LC-блоком, також може впливати на якість фактору

якості паралельного резонансу  $Q_P$ , що призводить до зниження напругового підсилення, як показано на рисунку 4.7. Напряга батареї  $U_B$ , підключена до запропонованого блоку прийому енергії, є своєрідним навантаженням, яке може бути еквівалентним резистивному навантаженню, коли потужність заряджається через батарею. Для великого навантаження, тобто меншого еквівалентного опору, напругове підсилення менше, і, отже, може бути досягнуто менший еквівалентний опір серед потужностей передачі енергії, коли батарея заряджається великою потужністю. Для тієї ж напруги батареї  $U_B$ , еквівалентний опір стає меншим при збільшенні потужності. Це також означає, що бажано заряджати більший ряд батарей за більшої напруги, щоб зменшити еквівалентний опір. Застосування в електричних транспортних засобах, де напруга батареї може досягати 300 В, може бути ідеальним варіантом застосування для резонансної бездротової передачі енергії з високою потужністю.

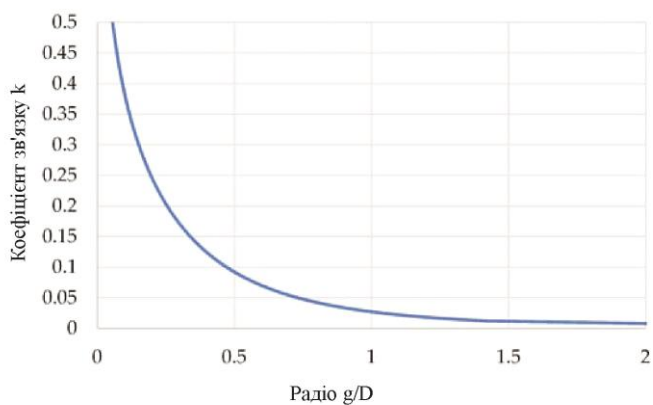


Рисунок 4.6 – Залежність коефіцієнта зв'язку від відстані передачі потужності

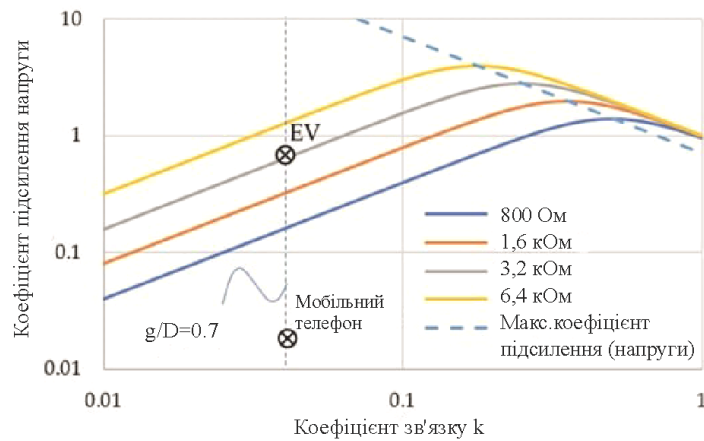


Рисунок 4.7 – Підвищення напруги в відсотках коефіцієнта зв'язку для різних опорів навантаження  $Z_0$  при  $C_T = 200$  пФ і  $L_2 = 7$  мкГн

Для порівняння використовувалися різні додатки, зокрема зарядку мобільного телефону з напругою  $V_B=5$  В при зарядному струмі 1 А та зарядку електромобіля з  $V_B=132$  В при тому самому зарядному струмі 1 А. Використовуючи  $C_r=200$  пФ і  $C_p=5$  нФ, поділ напруги становив 25 разів відповідно до рівняння (4.6). Для випадку заряджання батареї мобільного телефону еквівалентний опір становив  $5 \text{ Ом} \times 25 = 125 \text{ Ом}$ , а приріст напруги міг становити лише 0,02, коли  $g/D = 0,7$ . Для випадку заряджання батареї електричного транспортного засобу еквівалентний опір становив  $132 \text{ Ом} \times 25 = 3,3 \text{ кОм}$ , а приріст напруги міг становити лише 0,8 для тієї самої відстані  $g/D = 0,7$ . Щоб зарядити мобільний телефон, через еквівалентну різницю в навантаженні, як показано на рисунку 4.7, для заряджання стільникового телефону потрібен був вищий вхідний сигнал  $U_{DD}$ , ніж у додатку електромобіля.

#### 4.5 Моделювання запропонованого приймального блоку живлення

В роботі використано два варіанти моделювання: одне було використано для визначення ефекту блоку прийому електроенергії окремо, а інше

використовувалося для визначення функції блоку прийому електроенергії всередині резонансної бездротової передачі енергії з підсилювачем класу E. Перша конфігурація моделювання показана на рисунку 4.8а, де застосовано параметри схеми, як показано в таблиці 4.1.

Конденсатор батареї та конденсатор стабілізації  $C_a$  були ініціалізовані напругою 4 В. Струм нестабільності, як показано на рисунку 4.8б, показує що зарядний струм до конденсатора швидко зростає після 100 мкс часу моделювання.

Таблиця 4.1 – Перелік параметрів у моделюванні 1

Пункт	Опис	Одиниця	Значення
$R_T$	Опір котушки передавального пристрою	Ом	0.1
$R_R$	Опір котушки приймального пристрою	Ом	0.1
$R_B$	Опір батареї	Ом	0.1
$L_R$	Витокова індуктивність трансформатора бездротової передачі енергії	мкГн	5
$L_M$	Магнітна індуктивність трансформатора бездротової передачі енергії	мкГн	0.1
$L_B$	Індуктивність пасивного смугового фільтра	мкГн	2
$D_{1,2,3}$	Діод високої напруги, швидкого відновлення; SiC	STPSC406D	
$C_r$	Резонансна ємність приймального пристрою	пФ	290
$C_P$	Конденсатор подільника напруги змінного струму приймального пристрою	нФ	5
$C_B$	Ємність батареї	Ф	2000
$C_c$	Ємність змінного струму до постійного струму вихідного каналу приймального пристрою	мкФ	1
$C_a$	Стабілізуюча ємність приймального пристрою	мФ	1
$k$	Магнітний коефіцієнт зв'язку		1
$U_B$	Напруга батареї	В	4

Схема стала нестабільною, що призвело до заряджання мегават в акумуляторі за 300 мкс часу моделювання. Це сталося через те, що вихідна ємність блоку живлення AC-DC  $C_c$  (масштаб 10:1; у лінії золотого кольору) була заряджена достатньо високою напругою, щоб подати ємність стабілізації блоку живлення  $C_a$  (у лінії синього кольору). Струм зарядки батареї (у зеленій лінії) різко збільшився, коли напруга в  $C_a$  була вище напруги батареї та порогової напруги діода, що одночасно збільшило вхідний струм (масштаб 1000:1; червона лінія).

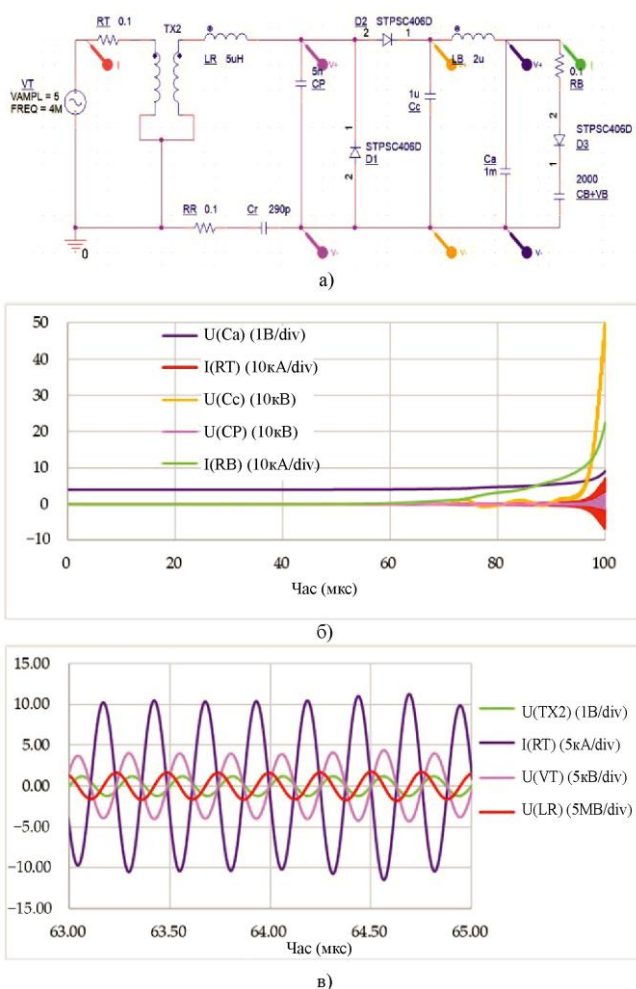


Рисунок 4.8 – Моделювання PSpice: а) – схема моделювання запропонованого блоку прийому живлення, б) – результати резонансу з блоком прийому живлення в програмі бездротової передачі енергії та в) – зміни фази під час формування резонансу

Як резонансний конденсатор блоку живлення, так і напруга ємності дільника змінного струму зросли через резонанс струму. Проводячи закрите дослідження зміни фази напруги та струму з різними кольоровими маркерами на тій самій схемі, як показано на рисунку 4.8в, збільшено тривалість часу від 63 мкс до 65 мкс до того, як стався сплеск напруги. Порівнявши часову (фазову) основу з вхідною напругою 5 В змінного струму (у фіолетовій лінії) і виявили, що напруга  $v_T$  (масштаб 1000:1; у зеленій лінії) на первинній обмотці змінювалася від ведучої фази  $20^\circ$  при 63 мкс до майже ведучої фази  $120^\circ$  при 65 мкс. Напруга  $v_R$  (масштаб  $10^6:1$ ; червона лінія) на первинній обмотці змінювалася від  $220^\circ$  фазової затримки при 63 мкс до майже  $90^\circ$  фазової затримки при 65 мкс. Це також було, коли напруга  $v_R$  і напруга  $v_T$  досягли фази  $90^\circ$ , створюючи умову резонансу, що задовольняє рівняння (3.5) і (3.6) з підсиленням напруги  $|G_{v,1}|$  з майже 1000.

Це моделювання було нереальною бездротовою передачею енергії, оскільки напруга не могла досягати 1 мегавольт в реальних програмах, коли більшість конденсаторів витримують 1000 вольт, а підсилення напруги  $|G_{v,1}|$  не може бути 1000 для передачі потужності на великі відстані з низьким коефіцієнтом зв'язку  $k$ . Однак все одно дуже важливо зрозуміти механізм резонансу, а також правильну роботу схеми блоку приймання енергії з цього прикладу моделювання. На рисунку 4.8б можна спостерігати, що напруга в конденсаторі  $C_c$  коливалася на субгармонійній частоті близько 10 кГц. Поточний стрибок був у певному сенсі формою експоненціального зростання, яка відома як нестабільність. Напруга батареї  $U_B$  під час моделювання становила 4 В, оскільки для досягнення нестабільності струму при більшій напрузі батареї знадобилося дуже багато часу моделювання. В експериментах використовували високу напругу батареї, щоб досягти аналогічного ефекту струму нестабільності.

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Друге моделювання ґрунтувалося на підсилювачі класу Е замість джерела напруги змінного струму, яке могло легко забезпечити високу потужність із високою напругою на високій частоті близько 4 МГц. Робоча частота 4 МГц була отримана на основі поточної експериментальної схеми. Використовуючи контроль мінімальної вхідної потужності [36], згаданий у Розділі 3.1, виявлено, що частота 4 МГц разом із навантаженням  $\delta$  для керування обома параметрами  $\beta$  та  $\phi$  дає найменшу втрату потужності. Підсилювач класу Е був схожий на підвищувальний перетворювач. За винятком того, що на виході був резервуар LC, як показано на рисунку 4.9а. У схемі всі параметри, що використовуються для блоку прийому живлення, були ідентичні попередньому прикладу моделювання, за винятком резонансної ємності  $C_r$ , яка була мікроналаштована до 392 пФ для резонансу; крім того, ємність стабілізації була видалена зі схеми. Резонанс стався одразу після того, як у моделюванні було увімкнено схему, яка не потребувала стабілізаційної ємності для допомоги. Причина, чому схема могла досягти резонансу набагато швидше, ніж при використанні джерела змінної напруги, могла полягати в точному узгодженні резонансної частоти або в тому, що підсилювач класу Е саморегулювався на резонанс. Відповідні результати показані на рисунку 4.9б. Вихідний конденсатор змінного та постійного струму  $C_c$  спочатку деякий час коливався, перш ніж досягти вищої напруги, ніж напруга батареї, тобто 4 В, а незабаром після цього зарядний струм зріс і досяг 4 А. Зарядний струм все ще містив деякі високочастотні пульсації, як зазначено в результаті широкосмугового фільтра рівняння (4.11).

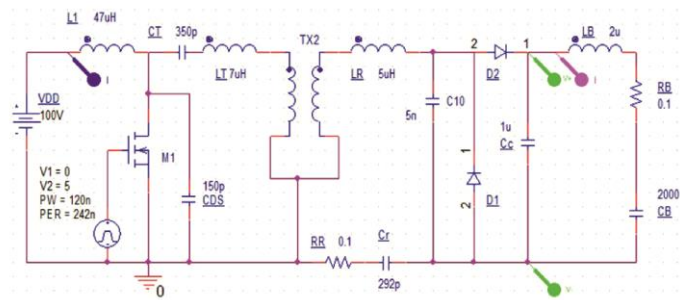
Вхідний струм виник після збільшення струму зарядки. Оскільки напруга батареї була встановлена на 4 В, вихідна потужність була розрахована як  $4 \text{ А} \times 4 \text{ В} = 16 \text{ Вт}$ . У попередньому прикладі не було негативного ефекту опору блоку прийому живлення, оскільки для схеми підсилювача класу Е існував стабільний стан. Розглянувши ближче тривалість часу від 122 мкс до 125 мкс до наростання струму заряджання, як показано на рисунку 4.9в, помічено, що перемикання нульової напруги поступово формується з форми хвилі транзистора

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

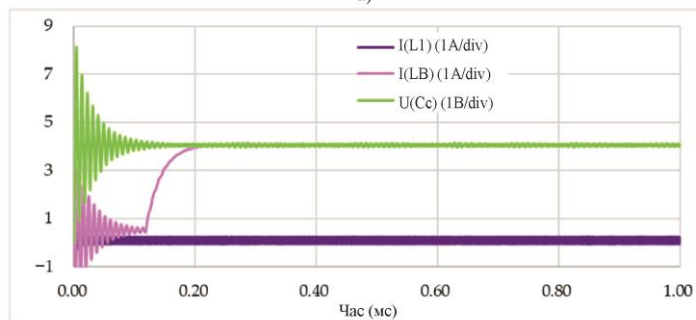
$v_{DS}$  (масштаб 100:1; золотом). лінія) порівняно з часом вимкнення  $v_{GS}$  (у червоній лінії). Було також помічено, що різниця фаз між напругою  $v_T$  (масштаб 1000:1, зелена лінія) первинної обмотки та напругою  $v_R$  (масштаб 100:1, зелена лінія) вторинної обмотки стала  $90^\circ$ , що відповідало умова резонансу в рівнянні (3.6).

Струм  $I_1$  на індукторі  $L_1$  збільшився під час увімкнення транзистора, а поточний фазовий кут  $\phi$  становив близько  $64^\circ$ , а відповідне збільшення напруги  $U_{x,max}/U_{DD}$  також становило близько 3,28, як і очікувалося в рівнянні (3.2) для стаціонарного стану. Це показує, що підсилювач класу E міг би чудово працювати із запропонованим модулем блоку прийому живлення. У цьому моделюванні частота перемикання становила  $1000/242 = 4,1$  МГц, а навантаження становило  $120/242 = 49,6\%$ . Коефіцієнт підсилення напруги  $|G_{v,1}|$ , який спостерігається на рисунку 4.9в, становив  $120\text{ В}/500\text{ В} = 0,24$ , що було досягнуто в реальній резонансній бездротовій передачі енергії з досить великим розривом відстані  $g$  у вимірі діаметра котушки блоку передачі енергії.

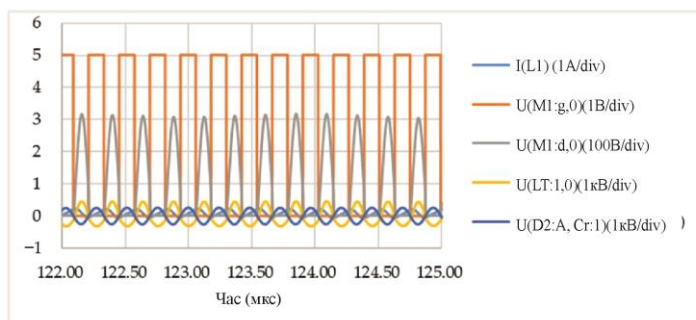
					КВРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)



в)

Рисунок 4.9 – а) – Моделювання в PSpice для резонансної бездротової передачі енергії з використанням підсилювача класу E в блоці передачі енергії, б) – результати зі стабільним вихідним струмом  $i_B$  до батареї (рожевий колір), вхідний струм блоку передачі енергії  $i_{L1}$  (фіолетовий колір) і вихідна напруга на акумуляторі (зелений колір), а також в) – реакції підсилювача класу E для резонансної бездротової передачі енергії

Система керування стане нестабільною, коли резонанс із дуже високим підсиленням напруги  $|G_{v,1}|$  було досягнуто регулюванням резонансної ємності блоку прийому живлення. На рисунку 4.10 показано реакцію нестабільності, коли резонансну ємність  $C_r$  було мікроналаштовано до 292,1 пФ. З невеликою зміною резонансної ємності  $C_r$  коло LC змінило стабільну схему на нестабільну.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Таким чином, для практичних застосувань необхідний оперативний моніторинг блоку прийому електроенергії, а блоком передачі електроенергії можна керувати, щоб уникнути нестабільності. Обидва моделювання вище використовували той самий коефіцієнт зв'язку  $k=1$ , оскільки явище нестабільності все одно відбудуватиметься з різними коефіцієнтами зв'язку, і лише час моделювання для досягнення нестабільності збільшиться через менші значення для коефіцієнта зв'язку  $k$ . Коли було досліджено форму вихідної хвилі (червона крива) зарядного струму, що протікає в батарею, можна було спостерігати субгармоніки  $f_s/n$  близько 100 кГц та інші нижчі частоти.

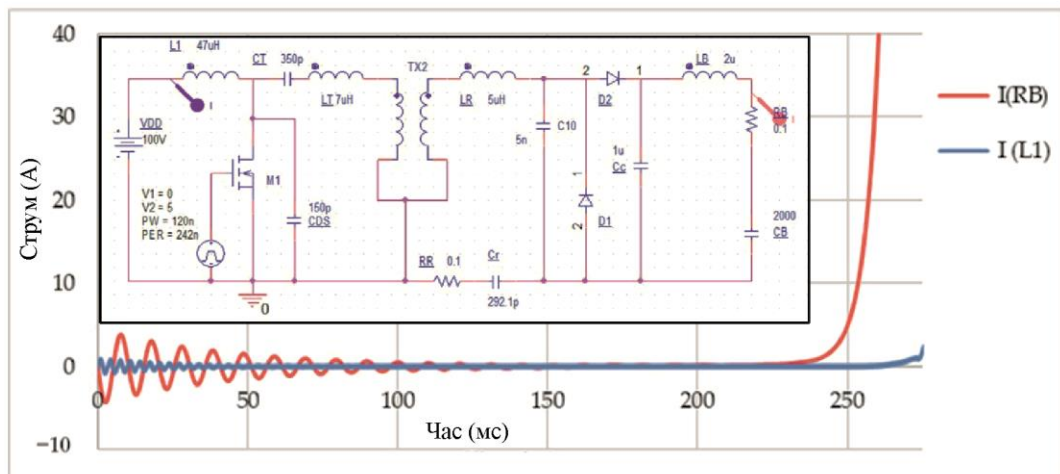


Рисунок 4.10 – Струм нестабільності з підсилювачем класу E, який використовується в блоці передачі енергії, вмикаючи вхідний струм блоку передачі енергії (синій колір) і вихідний струм до батареї (червоний колір)

Чисельне дослідження на основі інструментів автоматизації електронного проектування (EDA), таких як програмне забезпечення OrCAD PSpice, ускладнює точний аналіз нелінійних мереж.

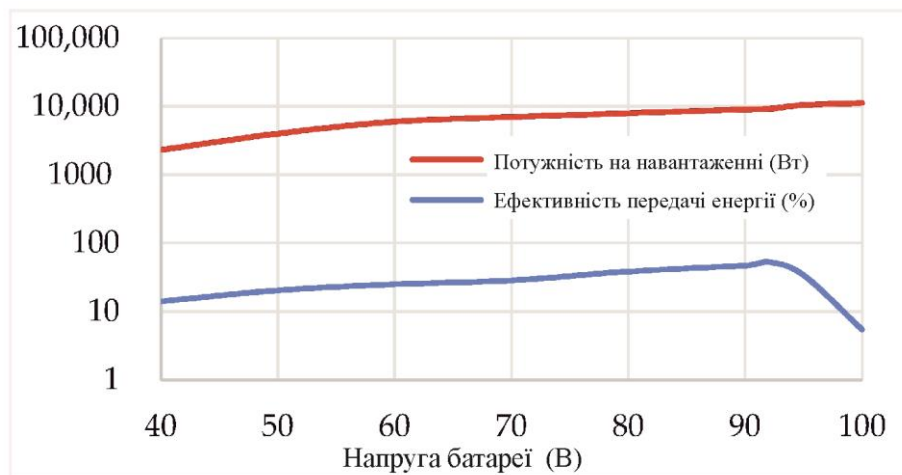


Рисунок 4.11 – Числові результати потужності, переданої до навантаження, та ефективності передачі потужності при різних напругах батареї

Аналіз ефективності передачі потужності та потужності, що надходить до навантаження для поточної нелінійної мережі, наведеної на рисунку 4.11, проводився в цьому дослідженні за допомогою квазістатичного аналізу з наступними семи кроками.

1. Визначення напруги батареї  $U_B$ .
2. Виконання аналізу OrCAD PSpice із належним вибором часу виконання, приблизно 300 мкс у даному дослідженні, та розміру кроку, 1 нс у даному дослідженні.
3. Експорт даних трасування елементів розсіювання потужності, таких як діоди, резистори та транзистори.
4. Експорт даних трасування батареї для розрахунку вихідної потужності.
5. Вибір максимального струму, 100 А в цьому дослідженні, для визначення дійсного діапазону даних трасування.
6. Виконання розрахунку вихідної потужності шляхом множення вхідного струму батареї та напруги самої батареї.

7. Виконання розрахунку вхідної потужності шляхом додавання вихідної потужності разом із втратами потужності від усіх елементів розсіювання потужності.

Причина, по якій семиетапний аналіз використовувався замість прямого розрахунку вхідної потужності на стороні блоку передачі енергії, полягає в тому, що в момент, коли результат розходився, у конденсаторах і котушках індуктивності все ще була консервативна енергія. Неправильний розрахунок енергії збереження призведе до того, що фактична вхідна потужність буде серйозно занижена. Після семиетапного аналізу отримано результат квазістатичного аналізу, як показано на рисунку 4.11. Результат показав, що максимальна ефективність передачі енергії становила 53% при напрузі батареї 92 В. Понад напругою батареї 92 В, ефективність передачі потужності різко впала через високі коливання струму, які були представлені на початку аналізу. Потужність, що подається на навантаження, монотонно зростала зі збільшенням напруги акумулятора.

#### 4.6 Висновки до четвертого розділу

У даному розділі представлено новий блок прийому енергії для резонансної бездротової передачі енергії, який відрізняється здатністю залучати високу потужність від блоку передачі енергії. Розглянуто перетворювач АС-DC, резонансний ємнісний дільник напруги, зарядний пристрій із використанням смугового фільтра з плоскою смугою, коефіцієнт магнітного зв'язку та моделювання запропонованого приймального блоку живлення.

Наші дослідження показали, що запропонований блок прийому енергії має великий потенціал для забезпечення ефективної та надійної бездротової передачі енергії. Його можливість залучати велику потужність робить його привабливим

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

для використання у широкому спектрі застосувань, зокрема зарядку електромобілів та інші підвищеної потужності додатки.

Таким чином, запропонований блок прийому енергії є перспективним напрямком у розвитку резонансних бездротових систем передачі енергії.

					КВРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

## ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи було досліджено пасивну схему для бездротової передачі енергії, яка може використовуватись для отримання енергії від блоку передачі енергії. Експериментальні дані показали, що з цієї схеми можна отримувати значну потужність для заряджання електромобілів на відстані до 50 см. Приймальний блок живлення працює як перетворювач негативного опору і складається з пасивних елементів, що дозволяє йому працювати без додаткового живлення.

Спостерігається явище резонансу, коли частота перемикавання блоку передачі енергії відповідає резонансній частоті блоку прийому енергії. Це призводить до високої потужності при негативному демпфуванні, що, в свою чергу, викликає нестабільність струму та передачу великої потужності. Нелінійні ефекти через різні гармоніки струму також впливають на характеристики імпедансу.

Дослідження також показало, що напруга від мережі постійного струму знижує свою напругу без втрати ефективності передачі потужності, але потужність, що надходить до навантаження, зменшується. Використання транзистора GaN HEMT і схеми класу E дозволяє досягти високої ефективності бездротової передачі енергії.

У майбутньому, для підтримки передачі високої потужності, важливо дослідити теорії субгармонійних коливань та розробити методи керування для регулювання вихідного струму блоку передачі енергії.

					КвРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Kadlimatti, V.; Bhat, S. Methodologies of Loop Offset voltage Trimming for Inverting-Buck-Boost for AMOLED Display Application. In Proceedings of the 2020 9th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Bremen, Germany, 7–9 September 2020; pp. 1–4.
2. Kang, B.G.; Chung, S.K.; Won, J.S.; Kim, H.S. EMI reduction technique of flyback converter based on capacitance model of transformer with wire shield. In Proceedings of the 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), Seoul, Korea, 1–5 June 2015; pp. 163–169.
3. Xie, L.; Ruan, X.; Ji, Q.; Ye, Z. Shielding-cancelation technique for suppressing common-mode EMI in isolated power converters. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2014, 62, 2814–2822.
4. Kam, K.; Pommerenke, D.; Centola, F.; Lam, C.w.; Steinfeld, R. EMC guideline for synchronous buck converter design. In Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Austin, TX, USA, 17–21 August 2009; pp. 47–52.
5. Ibuchi, T.; Funaki, T. Experimental evaluation on noise characteristics in SiC-Based synchronous boost converter. In Proceedings of the 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), Amsterdam, The Netherlands, 27–30 August 2018; pp. 613–618.
6. Kaewchai, J.; Khangern, W.; Nitta, S. Controlling conducted EMI emission on a buck-boost converter using gate controlled circuit. In Proceedings of the 2002 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Beijing, China, 21–24 May 2002; pp. 541–544.
7. Ding, S.; Wang, F. A New Negative Output Buck–Boost Converter with Wide Conversion Ratio. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2017, 64, 9322–9333.
8. Valdez-Resendiz, J.E.; Sanchez, V.M.; Rosas-Caro, J.C.; Mayo-Maldonado, J.C.; Sierra, J.; Barbosa, R. Continuous input-current buck-boost DC-DC converter for PEM fuel cell applications. *Int. J. Hydrog. Energy* 2017, 42, 30389–30399.

					КВРТР.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

9. Shan, D.; Wang, H.; Cao, K.; Zhang, J. Wireless power transfer system with enhanced efficiency by using frequency reconfigurable metamaterial. *Sci. Rep.* 2022, 12, 331.

10. Gore, V.B.; Gawali, D.H. Wireless power transfer technology for medical applications. In *Proceedings of the Conference on Advances in Signal Processing (CASP), Pune, India, 9–11 June 2016*; pp. 455–460. [Google Scholar] [CrossRef]

11. Filipiak, M.; Głuchy, D. Analiza Wybranych Układów w Technice Bezprzewodowego Przesyłu Energii Elektrycznej. *Pozn. Univ. Technol. Acad. J.* 2013, 74, 227–235.

12. Barsukov, Y.; Qian, J. *Battery Power Management for Portable Devices*, Artech House Power Engineering; Artech House: London, UK, 2013.

13. Abdul-jabbar, T.A.; Obed, A.A.; Abid, A.J. Design of an Uninterrupted Power Supply with Li-Ion Battery Pack: A Proposal for a Cost-Efficient Design with High Protection Features. *J. Technol.* 2021, 3, 1–10.

14. Okoyeigbo, O.; Olajube, A.; Shobayo, O.; Aligbe, A.; Ibhaze, A.E. Wireless power transfer: A review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*; IOP Publishing: Bristol, UK, 2021; Volume 012032, pp. 1–9.

15. Schuder, J.C.; Stephenson, H.E.; Townsend, J.F. High level electromagnetic energy transfer through a closed chestwall. *IRE Int. Conv. Rec.* 1961, 9, 119–126.

16. Brown, W.C. The history of wireless power transmission. *Solar Energy* 1996, 56, 3–21.

17. Ongaro, F.; Summerer, L. Peter Glaser lecture: Space and a sustainable 21st century energy system. In *Proceedings of the 57th International Astronautical Congress, Valencia, Spain, 3 October 2006*. Paper IAC-06-C3.1.01.

18. Rim, C.T.; Mi, C. *Wireless Power Transfer for Electric Vehicles and Mobile Devices*; John Wiley and Sons: West Sussex, UK, 2017.

19. Qiu, C.; Chau, K.T.; Liu, C.; Chan, C.C. Overview of wireless power transfer for electric vehicle charging. In *Proceedings of the 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Barcelona, Spain, 17–20 November 2013*; pp. 1–9.

20. Li, S.; Mi, C.C. *Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications*. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* 2015, 3, 4–17.

					КВРTP.2021001.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

21. Mohsan, S.A.H.; Khan, M.A.; Rokia LS, R.; Islam, A.; Mahmood, A.; Mazinani, A.; Amjad, H. A review on Research Challenges, Limitation and Practical Solution for Underwater Wireless Power Transfer. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* 2020, 11, 554–562.

22. Coca, E. *Wireless Power Transfer Fundamentals and Technologies*; InTechOpen: London, UK, 2016.

23. Moore, J.; Castellanos, S.; Xu, S.; Wood, B.; Ren, H.; Tse, Z.T.H. *Applications of Wireless Power Transfer in Medicine: State-of-the-Art Reviews*. *Ann. Biomed. Eng.* 2018, 47, 22–38.

24. Barbruni, G.L.; Ros, P.M.; Demarchi, D.; Carrara, S.; Ghezzi, D. *Miniaturised Wireless Power Transfer Systems for Neurostimulation: A Review*. *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.* 2020, 14, 1160–1178.

25. Kuka, S.; Ni, K.; Alkahtani, M. A review of method and challenges for Improvement in Efficiency and Distance for Wireless Power Transfer. *Power Electron. Driv.* 2020, 5, 1–25.

26. Sidiku, M.B.; Eronu, E.M.; Ashigwuike, E.C. *Review On Wireless Power Transfer: Concepts, Implementations, Challenges, and Mitigation*. *Niger. J. Technol.* 2020, 39, 1206–1215.

27. Zhang, Z.; Pang, H.; Georgiadis, A.; Cecati, C. *Wireless Power Transfer—An Overview*. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2019, 66, 1044–1058.

28. T. Farkas and M. F. Schlecht, “Viability of active EMI filters for utility applications,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 9, no. 3, pp. 328–337, 1994 .

29. A . Gria l, A. El A roudi , L. Ma rtin ez-Salam ero, R . Ley va, an d J. Ma ixe, “Current control technique for improving EMC in power converters,” *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 5, pp. 274–275, 2001.

30. D. C. Hamill, J. H. B. Deane, and P. J. Aston, “Some applications of chaos in power converters,” in *Proc. IEE Colloquium New Power Electronic Techniques*, London, U.K., May 23, 1997, pp. 5/1–5/5.

31. K. Tan, I. Hinberg, a nd J. Wadhvani , “Electromagnetic interference in medica l devices : Healt h Canada’s past a nd current perspectives and activities,” in *Proc. IEEE Int. EMC Symp.*, Montreal, Canada, Aug. 13 –17, 2001, pp. 1283 –1288.

32. W. D. Kimmel and D. D. Gerke, "Using grounding to control EMI," *Med. Device Diagnostic Ind. Mag.*, pp. 72–78, Aug. 1996.

33. P. Kloeden and Z. Li, "Li-Yorke chaos in higher dimensions: A review," *J. Difference Equat. Applicat.*, vol. 12, no. 3–4, pp. 247–279, 2006.

34. L. E. Lawwhite and M. F. Schlecht, "Active filters for 1-MHz power circuits with strict input/output ripple requirements," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 2, no. 4, pp. 282–290, 1987.

35. L. E. LaWhite and M. F. Schlecht, "Design of active ripple filters for power circuits operating in the 1–10 MHz range," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 3, no. 3, pp. 310–317, 1988.

36. H. Li, Z. Li, and W. A. Halang, "Calculation of invariant probability density distribution for chaotic map in dc-dc converter and its applications," in *Proc. 51st Int. Wissenschaftliches Kolloquium zur Elektrotechnik und Informationstechnik*, Technische Universität Ilmenau, Sept. 11, 2006, pp. 363–364.

37. H. Li, Z. Li, W. A. Halang, B. Zhang, and G. Chen, "Analyzing chaotic spectra of dc-dc converters using the prony method," *IEEE Trans. Circuits Syst. I I*, vol. 54, no. 1, pp. 61–65, 2007.

38. H. Li, Z. Li, K. S. Tang, and W. A. Halang, "A chaotic soft switching PWM boost converter for EMI reduction," in *Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electronics*, Cambridge, U.K., June 30–July 2, 2008, pp. 341–346.

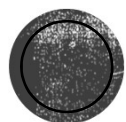
39. H. Li, K. S. Tang, Z. Li, and W. A. Halang, "A chaotic peak current mode boost converter for EMI reduction and ripple suppression," *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, vol. 55, no. 8, pp. 763–767, 2008.

40. H. Li, Z. Li, and W. A. Halang, "Reduktion elektromagnetischer Störaussendungen getakteter Gleichspannungswandler mittels chaotisch modulierter Trägersignale," *German Patent 10 2009 039 069.3*, 2009.

ДОДАТОК А  
Презентаційні матеріали

ФАКУЛЬТЕТ:  
ФІТ  
КАФЕДРА:  
АКІТтаР

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА



# ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРИЙМАЛЬНОГО БЛОКУ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОЇ РЕЗОНАНСНОЇ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

ВИКОНАВ:  
СТУДЕНТ III КУРСУ,  
ГРУПА ТР1с-21-1  
ДАНЧУК Б.А.

НАУКОВИЙ КЕРІВНИК:  
К.Ф.М.Н., ДОЦЕНТ  
СЕЛЬСЬКИЙ А.А.

### МЕТА КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

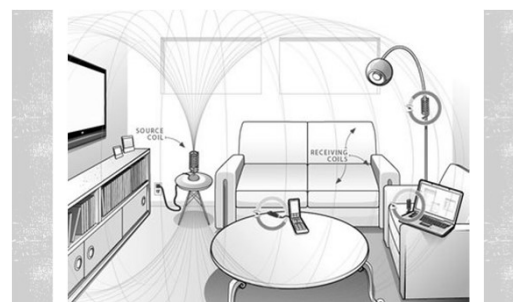
полягає в розробці та вивченні ефективності блоку прийому енергії, його можливостях заряджання батарей та оптимізації для підвищення потужності передачі

### ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

блок прийому енергії для бездротової передачі електроенергії в резонансній системі

### АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

обумовлена швидким розвитком сучасних технологій електромобілів та необхідністю забезпечення їх ефективною системою бездротового заряджання



### РЕЗОНАНСНА БЕЗПРОВІДНА ПЕРЕДАЧА ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРІВ GAN HEMT

#### Резонансна БПЕ

- це технологія передачі електричної енергії через великі відстані без необхідності використання проводів або прямого контакту між пристроями.

#### GaN HEMT

gallium nitride high-electron-mobility transistor

- це вид транзистора з високою рухливістю електронів, що використовує галієвий нітрид (GaN) як напівпровідниковий матеріал.

## РЕЗОНАНСНА БЕЗПРОВІДНА ПЕРЕДАЧА ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРІВ GAN NEMT

### Блок передачі енергії

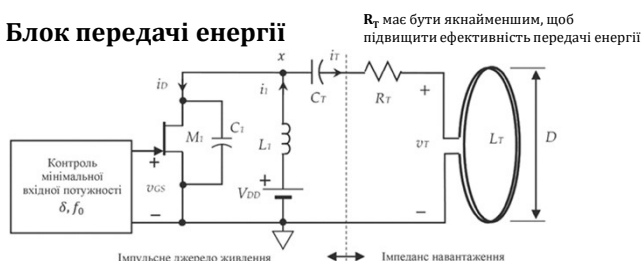


Рис. 1 – Блок прийому енергії з використанням підсилювача класу E

Перетворення електричної енергії з джерела постійного струму  $U_{DD}$  в магнітну енергію за допомогою збільшеного струму  $i_1$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{U_{DD} - v_x(t)}{L_1} \quad (1)$$

Максимальна вузлова напруга залежить від кута фази струму  $\phi$ :

$$U_{x,max} = U_{DD} \left( 1 + \frac{1}{\cos\phi} \right) \quad (2)$$

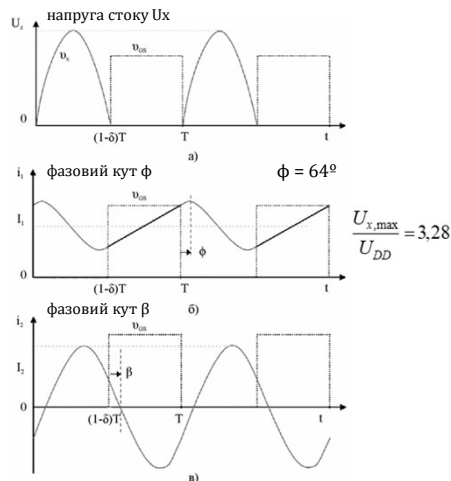


Рис. 2 – Графіки: а) – напруги стоку  $U_x$ ; б) – фазовий кута  $\phi$  та в) – фазовий кута  $\beta$

3

## РЕЗОНАНСНА БЕЗПРОВІДНА ПЕРЕДАЧА ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРІВ GAN NEMT

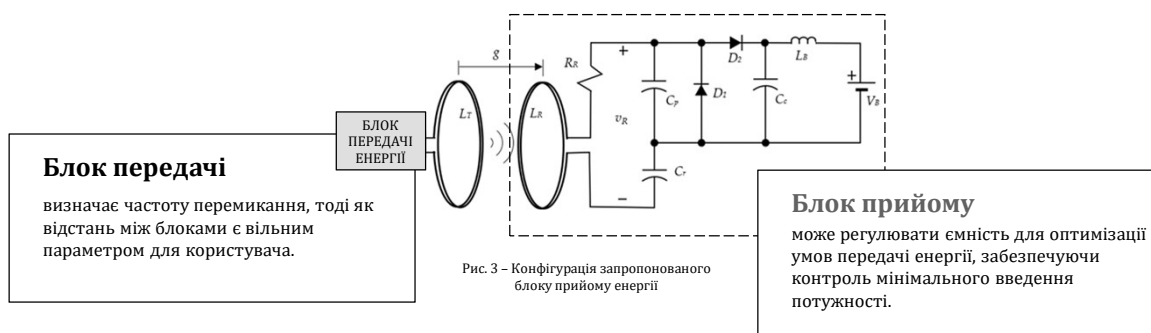


Рис. 3 – Конфігурація запропонованого блоку прийому енергії

Коливання приймальної напруги - функція відстані та умови резонансу  $v_R = v_R(f_0, g, C_r)$  (3)

4

## МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ БЕЗДРОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

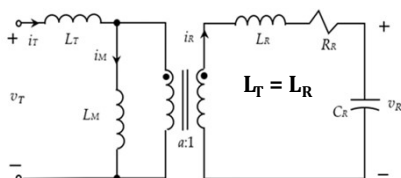


Рис. 4 - Модель трансформаторної схеми для бездротової передачі енергії

Якісний фактор паралельного коливання  $Q_P$

$$Q_P = R_R \sqrt{\frac{C_R}{L_R}} \quad (4)$$

Коефіцієнт зв'язку

$k > Q_P$  – коли відстань між котушками невелика,  
 $k < Q_P$  – при бездротовій передачі енергії на великі відстані.

Магнітуда напругового підсилення  $G_{v,1}$

при  $2\pi f_0 = 1/\sqrt{L_R C_R}$

$$G_{v,1} = \frac{v_R}{v_T} = \frac{k}{k^2} + jQ_P \quad (5)$$



Ігнорує:

- вплив струму намагніченості, що протікає через  $L_M$ ,
- втрати котушки через опір котушки  $R_T$ .

Величина та фаза підсилення напруги  $|G_{v,1}| = \frac{k}{\sqrt{k^4 + Q_P^2}} \quad (6)$

$$G_{v,1} = -\angle \tan^{-1} \frac{Q_P}{k} = \begin{cases} 0^\circ & \text{індуктивна БПЕ} \\ -90^\circ & \text{резонансна БПЕ} \end{cases}$$

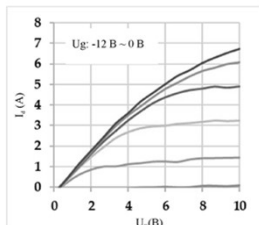
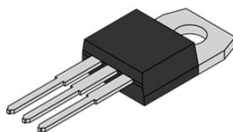
Аналог трансформатора з коефіцієнтом перетворення  $1:G_{v,1}$

Еквівалентний опір зворотного зв'язку  $Z_{FB} = \frac{1}{G_{v,1}^2} \frac{1}{j\omega_0 C_R}$

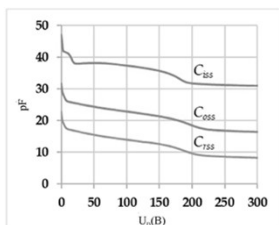
## МОДУЛЬ GaN HEMT

Transistor Outline 220

- D-Mode GaN HEMT 20 мм
- закритий в корпус TO220
- хороший тепловий опір
- діапазон частот МГц



крива  $I_D-U_D$



крива C-U<sub>D</sub>

Рис. 5 - Характеристики D-режиму GaN HEMT

Табл. 1 - Параметри D-режиму GaN HEMT з діаметром 20 мм

Символ	Опис	Одиниця вимірювання	U <sub>DS</sub>	
			0 В	600 В
C <sub>oss</sub>	Вихідна ємність	пФ	31	17
C <sub>iss</sub>	Вхідна ємність	пФ	46	31
C <sub>rss</sub>	Ємність зворотного зв'язку	пФ	23	8
U <sub>th</sub>	Напруга ввімкнення затвора	В		-9
U <sub>GS</sub>	Максимум	В		10 ~ -30
R <sub>DS,on</sub>	На опір	mΩ		900
U <sub>BD</sub>	Напруга пробую	В		600
i <sub>D,cont</sub>	Постійний струм витoku	А		3

### Субгармонійні коливання

спостерігалися при вищій напрузі живлення на стороні передавача, ніж напруга на приймачі, що виходила за межі порогу діодів.

## МОДЕЛЮВАННЯ МОДУЛЯ БЛОКУ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЗАРЯДЖАННЯ АКУМУЛЯТОРА

Напруга конденсатора на  $C_p$  для низького струму

$$-U_{D1,on} \leq v_{Cp} \leq v_{D2,on} + U_{Cc,min} \quad (7)$$

Напругу конденсатора  $v_{Cp}$  можна збільшити на фактичну напругу на діодах

$$-(U_{D1,on} + I_{D1,max}R_{D1,on}) \leq v_{Cp} \leq U_{D2,on} + I_{D2,max}R_{D2,on} + U_{Cc,min} \quad (8)$$

Мінімальне значення напруги конденсатора  $C_{Cc,min}$

$$U_{Cc,min} = (U_s - U_{D2,on}) \frac{1 - e^{-1/(2f_0R_R C_c)}}{e^{1/(2f_0R_R C_c)} - e^{-1/(2f_0R_R C_c)}} \approx (U_s - U_{D2,on}) e^{\frac{-1}{2f_0R_R C_c}} \quad (9)$$

Максимальний струм діодів  $D_1$  та  $D_2$   $I_{D1,max} = \frac{U_s - U_{D1,on}}{R_R}$   $(10)$

При великому навантаженні  $R_0$   $I_{D2,max} = \frac{U_s - U_{D2,on} - U_{Cc,min}}{R_R}$   
 $I_{D1,max} \approx I_{D2,max}$

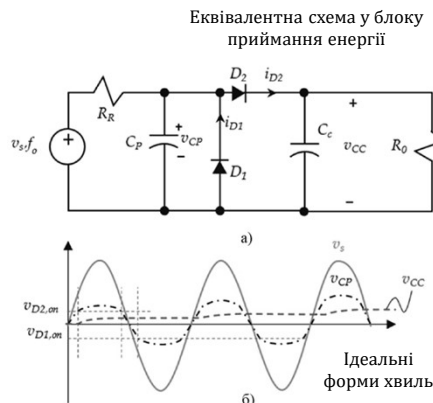


Рис. 6 - Перетворювач змінного струму на постійний струм AC-DC

## РЕЗОНАНСНИЙ ЄМНІСНИЙ ДІЛЬНИК НАПРУГИ

**РЕДН** є джерелом вхідного сигналу для перетворювача AC-DC

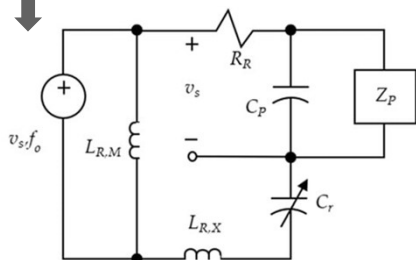


Рис. 7 - Схема резонансного ємнісного дільника напруги в блоці приймання енергії

Для досягнення зниження напруги та підтримання явища резонансу, конденсатор  $C_p$ , вставлений послідовно з резонансним конденсатором  $C_r$  у LC-контурі, включає в себе нову загальну ємність.

Загальна ємність конденсаторів у LC-контурі  $C_R = \frac{C_r C_p}{C_r + C_p}$   $(11)$

Умова резонансу напруги в послідовному резервуарі LC  $v_s = \frac{C_r}{C_r + C_p} v_R$   $(12)$

Рівняння для налаштування резонансної частоти серії резервуарів LC  $\Delta f_{LC} = -\frac{1}{4\pi} (L_R C_R)^{\frac{3}{2}} L_R \frac{\partial C_R}{\partial C_r} \Delta C_r = -\frac{C_R}{2f_{LC} C_r^2} \Delta C_r$   $(13)$

Рівняння для налаштування резонансної частоти за умови  $CP \gg Cr$   $K_f = \frac{C_p}{2C_r}$   $\frac{\Delta f_{LC}}{f_0} = -K_f \frac{\Delta C_r}{C_r} = -\frac{C_R}{2f_{LC} C_r^2} \Delta C_r$   $(14)$

## ЗАРЯДНИЙ ПРИСТРІЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ФІЛЬТРА З ПЛОСКОЮ СМУГОЮ ПРОПУСКАННЯ

Схема фільтра з плоскою смугою пропускання

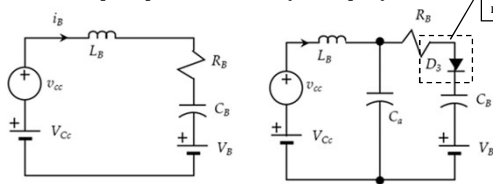


Рис. 8 - Без стабілізаційного конденсатора

Рис. 9 - Зі стабілізаційним конденсатором Ca

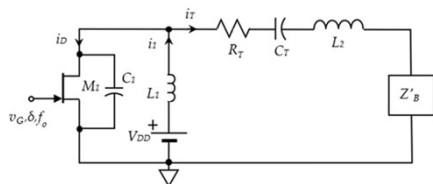


Рис. 10 - Еквівалентна схема резонансної бездротової передачі енергії для заряджання акумулятора

Рівняння струму зарядки конденсатора батареї

$$L_B \frac{di_B}{dt} + R_B i_B + \int i_B dt = v_{cc} + (U_{C_c} - U_B) \quad (15)$$

Перетворення Лапласа між напругою змінного струму  $v_{cc}$  та вихідним струмом  $i_B$

$$U_B = U_{C_c} \quad \frac{I_B(s)}{U_{C_c}(s)} = \frac{s}{L_B s^2 + R_B s + \frac{1}{C_B}} \quad (16)$$

$f_0$  від 4 до 15 МГц  
 $L_B$  в мкГн,

Еквівалентний імпеданс зарядного пристрою батареї

$$Z_B = \frac{U_B}{I_B} \quad (17)$$

$L_B=2$  мкГн  
 $C_B=10\,000$  Ф  
 $R_B=0,1$  Ом  
 $f_0$  від МГц до 10 ГГц

## КОЕФІЦІЄНТ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ

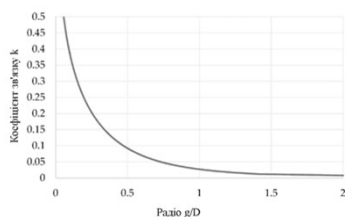


Рис. 11 - Залежність коефіцієнта зв'язку від відстані передачі потужності

Коефіцієнт зв'язку  $k$  в бездротовій передачі енергії залежить від відстані між передавальною та приймальною котушками, вираженої у співвідношенні  $g/D$ , де  $D$  - діаметр котушки.

Коефіцієнт зв'язку зменшується зі збільшенням відстані між котушками

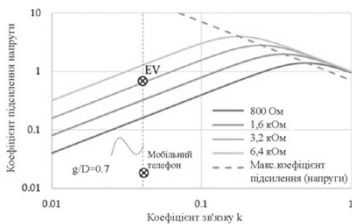


Рис. 12 - Підвищення напруги в відсотках коефіцієнта зв'язку для різних опорів навантаження  $Z_0$  при  $C_r = 200$  пФ і  $L_2 = 7$  мкГн

### ПОРІВНЯННЯ ЗАРЯДКИ МОБІЛЬНОГО ТЕЛЕФОНУ І ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

- Випереджаючи коефіцієнт становить 25 разів відповідно до виразу (12),
- заряджаючи мобільний телефон еквівалентний опір становив 125 Ом, тоді як для електромобіля цей показник був 3,3 кОм.
- Для заряджання мобільного телефону потрібен був вищий вхідний сигнал  $U_{DD}$ , ніж для електромобіля, через велику різницю в навантаженні.

Умова резонансу напруги в послідовному резервуарі LC

$$v_S = \frac{C_r}{C_r + C_p} v_R \quad (12)$$

# МОДЕЛЮВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО ПРИЙМАЛЬНОГО БЛОКУ ЖИВЛЕННЯ

## ДВА ВАРИАНТИ МОДЕЛЮВАННЯ:

1. Моделювання ефекту блоку прийому електроенергії
2. Моделювання функції блоку прийому електроенергії всередині резонансної бездротової передачі енергії з підсилювачем класу E

Табл. 2 – Перелік параметрів у моделюванні 1

Пункт	Опис	Одиниця	Значення
$R_T$	Опір котушки передавального пристрою	Ом	0.1
$R_R$	Опір котушки приймального пристрою	Ом	0.1
$R_B$	Опір батареї	Ом	0.1
$L_R$	Витоківна індуктивність трансформатора бездротового передачі енергії	мкГн	5
$L_M$	Магнітна індуктивність трансформатора бездротового передачі енергії	мкГн	0.1
$L_P$	Індуктивність пасивного смугового фільтра	мкГн	2
$D_{1,2,3}$	Діод високої напруги, швидкого відновлення; SiC		STPSC406D
$C_r$	Резонансна ємність приймального пристрою	пФ	290
$C_F$	Конденсатор подільника напруги змінного струму приймального пристрою	нФ	5
$C_B$	Ємність батареї	Ф	2000
$C_c$	Ємність змінного струму до постійного струму вихідного каналу приймального пристрою	мкФ	1
$C_s$	Стабілізуюча ємність приймального пристрою	мФ	1
$k$	Магнітний коефіцієнт зв'язку		1
$U_B$	Напруга батареї	В	4

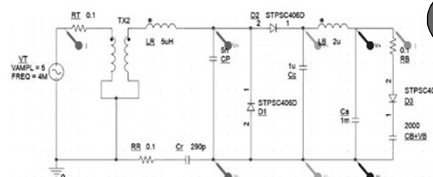


Рис. 13 (а): Схема моделювання запропонованого блоку прийому живлення в програмі PSpice

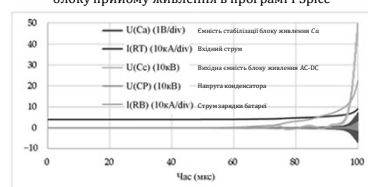


Рис. 13 (б): Результати резонансу з блоком прийому живлення в програмі бездротової передачі енергії

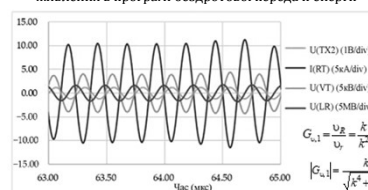


Рис. 13 (в): Зміни фази під час формування резонансу

$$G_{s,1} = \frac{U_B}{U_s} = \frac{k}{k^2 + Q_p^2} \quad (5)$$

$$|G_{s,1}| = \frac{k}{\sqrt{k^4 + Q_p^2}} \quad (6)$$

# МОДЕЛЮВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО ПРИЙМАЛЬНОГО БЛОКУ ЖИВЛЕННЯ

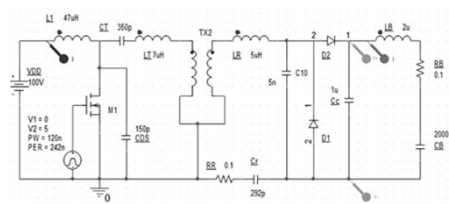


Рис. 14 (а): Моделювання для резонансної бездротової передачі енергії з використанням підсилювача класу E в блоці передачі енергії

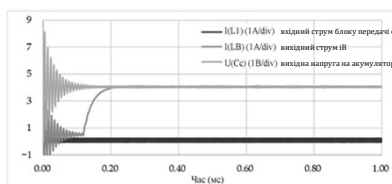


Рис. 14 (б): Результати резонансу в програмі бездротової передачі енергії

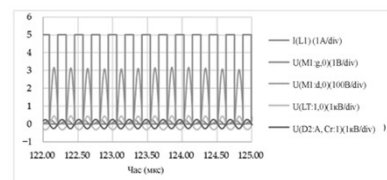


Рис. 14 (в): Реакції підсилювача класу E для резонансної бездротової передачі енергії

$$\frac{I_B(s)}{U_{CC}(s)} = \frac{s}{L_B s^2 + R_B s + \frac{1}{C_B}} \quad (16)$$

$$U_{x,max} = U_{DD} \left( 1 + \frac{1}{\cos\phi} \right) \quad (2)$$

$$|G_{v,1}| = \frac{k}{\sqrt{k^4 + Q_p^2}} \quad (6)$$

1

2

12

## СТАБІЛЬНІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ БЛОКУ ПРИЙОМУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

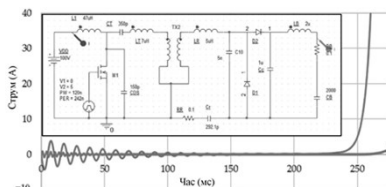


Рис. 15 – Струм нестабільності із підсилювачем класу E, який використовується в блоці передачі енергії

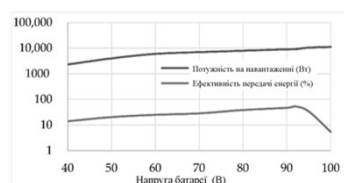


Рис. 16 – Числові результати потужності, переданої до навантаження, та ефективності передачі потужності при різних напругах батареї

### Суть проблеми:

- Нестабільність при високому підсиленні напруги  $[Gv,1]$  через регулювання резонансної ємності  $C_r$ .
- Зміна ємності на 292,1 пФ призвела до переходу від стабільної до нестабільної схеми.

— I(RB) вхідний струм блоку передачі енергії  
— I(L1) вихідний струм до батареї

### Аналіз ефективності передачі потужності та потужності, що надходить до навантаження для поточної нелінійної мережі:

1. Визначення напруги батареї  $U_B$ .
2. Виконання аналізу OrCAD PSpice із належним вибором часу виконання, приблизно 300 мкс у даному дослідженні, та розміру кроку, 1 нс у даному дослідженні.
3. Експорт даних трасування елементів розсіювання потужності, таких як діоди, резистори та транзистори.
4. Експорт даних трасування батареї для розрахунку вихідної потужності.
5. Вибір максимального струму, 100 А в цьому дослідженні, для визначення дійсного діапазону даних трасування.
6. Виконання розрахунку вихідної потужності шляхом множення вхідного струму батареї та напруги самої батареї.
7. Виконання розрахунку вхідної потужності шляхом додавання вихідної потужності разом із втратами потужності від усіх елементів розсіювання потужності

13

- Пасивна схема бездротової передачі енергії дозволяє отримувати значну потужність для заряджання електромобілів на відстані до 50 см без додаткового живлення.
- Явище резонансу веде до високої потужності, але може призводити до нестабільності струму та передачі великої потужності через негативне демпфування.
- Нелінійні ефекти, такі як гармоніки струму, впливають на характеристики імпедансу.
- Напруга від мережі постійного струму може знижуватись без втрати ефективності передачі потужності, але потужність, що надходить до навантаження, зменшується.
- Використання транзистора GaN HEMT і схеми класу E дозволяє досягти високої ефективності бездротової передачі енергії.

## ВИСНОВКИ

У майбутньому важливо дослідити теорії субгармонійних коливань та розробити методи керування для регулювання вихідного струму блоку передачі енергії.

14

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Данчук Богдан Анатолійович

Тема роботи: Вдосконалення приймального блоку для ефективної резонансної бездротової передачі енергії

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 67

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Мета кваліфікаційної роботи полягає в розробці та вивченні ефективності блоку прийому енергії, його можливостях заряджання батарей та оптимізації для підвищення потужності передачі. У цій кваліфікаційній роботі представлено новий блок прийому енергії для бездротової передачі електроенергії, який призначений для використання у сучасних електромобілях. Цей блок відрізняється здатністю отримувати великі потужності від передавача енергії.
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 автор докладно аналізує технологічні аспекти бездротової передачі енергії, охоплюючи загальну характеристику цього процесу, класифікацію систем за різними критеріями та розгляд методів передачі як в дальній (мікрохвильова та лазерна), так і в ближній зоні. Другий розділ роботи присвячений детальному огляду та аналізу використання GaN HEMT у бездротових системах передачі енергії. Третій розділ розглядає специфічні технічні аспекти резонансної бездротової передачі енергії класу E, яка базується на GaN HEMT. Четвертий розділ охоплює детальне моделювання модуля блоку живлення для заряджання акумуляторів. Автор досліджує перетворювачі AC-DC, резонансні ємнісні ділянки напруги та зарядні пристрої з використанням смужових фільтрів для оптимізації ефективності та надійності енергетичних систем. Кваліфікаційна робота також містить висновки, які систематизують отримані результати у всіх розділах, а також перелік джерел посилань і додатки, що демонструють практичне застосування отриманих знань.

4. Позитивні сторони роботи: Робота пропонує детальний та всебічний огляд бездротової передачі енергії, включаючи різні методи і технології в передових бездротових системах. Автор систематично використовує передові технології, такі як GaN HEMT, для покращення продуктивності і ефективності систем бездротової передачі енергії. Робота містить практичні застосування у сфері електромобілів та інших важливих галузях, що підсилює її актуальність та значимість у сучасному технологічному середовищі.

5. Негативні сторони роботи: Може бути складно пройти через всі деталі роботи через її великий об'єм і глибоку технічну специфіку для менш освічених у цій галузі читачів. Іноді інформація може бути недостатньо структурована, що може ускладнювати сприйняття загальної логіки роботи.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає

7. Відгук про роботу в цілому: Робота представляє значний внесок у розвиток технологій бездротової передачі енергії, надаючи глибоке та комплексне обґрунтування їх застосування у сучасному технічному середовищі. Автор проявив високий рівень технічної компетентності та здатність до науково-дослідницької роботи. Незважаючи на деякі недоліки у структурації і об'ємі, робота заслуговує на високу оцінку за актуальність і значимість своїх результатів.

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка кваліфікаційної роботи: Кваліфікаційна робота відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки добре (3,75/С), а її автор Данчук Б.А., 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:  
1016363711

Дата перевірки:  
15.06.2024 19:12:42 EEST

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:  
16.06.2024 10:09:58 EEST

ID користувача:  
100005862

Назва документа: Данчук\_антиплагіат

Кількість сторінок: 68 Кількість слів: 12127 Кількість символів: 93589 Розмір файлу: 8.20 MB ID файлу: 1016169197

1427 слів позначені як "вилучені" та не враховуються у підрахунку слів

## 0.61% Схожість

Найбільша схожість: 0.24% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1016169195)

0.5% Джерела з Інтернету

25

Сторінка 70

0.45% Джерела з Бібліотеки

12

Сторінка 70

## 0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

## 0% Вилучень

Немає вилучених джерел

## Модифікації

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

Замінені символи

40

## Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 0.0%

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилки в документах: 8%

ID: 130762 Назва: БКР Оптимізація системи перетворення струму з подвійним активним мостом Додано в БД: 2024-06-16 Автора: Ілля ІГНАТЕНКО Керівники: Андрій СЕЛЬСЬКИЙ Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	80163	610	487 (1%)	8 (1%)

### Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

Завідувачу кафедри АКІТтаР  
д-ру техн. наук, проф. Мартишоку В.В.  
Данчука Б.А.

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

Данчук  
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: Вдосконалення приймального блоку для ефективної резонансної бездротової передачі енергії

Автор: Данчук Богдан Анатолійович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма: Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології

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

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

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

Підтвердження:

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

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

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

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 0.61% і адресується до 25 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи



Валерій МАРТИНЮК

Денис МАКАРИШКІН

Андрій СЕЛЬСЬКИЙ