

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

ГЮІК 433246.000 ПЗ
(позначення документа)

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЇВ БЕЗПРОВІДНОЇ ЗАРЯДКИ АКУМУЛЯТОРНИХ
ЗАСОБІВ ЖИВЛЕННЯ
(тема)

Виконав:

студент 5 курсу, групи ЕППм 19-1

Городецький Євгеній Іванович
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Електронні прилади
та пристрої
(повна назва освітньої програми)

Керівник зав.каф.Бондаренко І. М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

_____ (підпис)

Бондаренко І. М.
(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Електронні прилади та пристрої
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« ____ » _____ 2020_ р.

ЗАВДАННЯ
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Городецькому Євгену Івановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження пристроїв безпроводної зарядки акумуляторних засобів живлення

затверджена наказом по університету від 6 ____ 11 _____ 2020 р. № 156 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 18 грудня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи Провести оцінку перспектив можливих застосувань системи безпроводної передачі енергії зокрема для дистанційної зарядки акумуляторних джерел живлення. Запропонувати та обґрунтувати структурну схему дистанційної зарядки. Провести теоретичне або практичне моделювання пристрою.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1. Напрямки та перспективи застосування систем дистанційної зарядки

2. Фізичні принципи дії пристроїв дистанційної зарядки

3. Приклади та технічні характеристики існуючих систем дистанційної зарядки

4. Приклад пристрою дистанційної зарядки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Презентація _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін	Примітка
1	Огляд напрямків та перспектив застосування дистанційних зарядок	3.11.20	
2	Огляд фізичних принципів дії пристроїв дистанційних зарядок	6.11.20	
3	Огляд технічних характеристик існуючих систем дистанційних зарядок	10.11.20	
4	Приклад пристрою дистанційної зарядки	15.11.20	
5	Написання пояснювальної записки	19.11.20	
6	Підготовка презентації	26.11.20	
7	Рецензування, нормоконтроль, здача роботи на кафедру	15.12.20	

Дата видачі завдання 13 липня 2020 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ зав. каф. Бондаренко І. М.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 45 с., 9 рис., 3 табл., 15 джерел, 2 додатки

БЕЗДРОТОВЕ ЖИВЛЕННЯ, БЕЗДРОТОВІ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ
,ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ, ЗАРЯДНІЙ ПРИСТРІЙ.

Об'єктом роботи є бездротові зарядні пристрої.

Метою роботи є вивчення технічної можливості створення бездротових зарядних пристроїв.

Метод дослідження – дедуктивно-аналітичний аналіз структур, конструкцій та технологій виготовлення систем бездротових зарядних пристроїв.

У роботі зроблено огляд структур та конструкцій бездротових зарядних пристроїв, визначено їх переваги й недоліки. Обґрунтовано вибір найбільш відповідних щодо наданих вимог варіантів конструкцій. Запропоновано варіанти ефективних систем бездротової передачі енергії .

Унаслідок виконання роботи визначено перспективи розвитку систем бездротових зарядних пристроїв,

У першому розділі розглянуто перспективи розвитку систем бездротової зарядки.

У другому розділі розглянуто основні принципи дії безпроводної зарядки та фізичні закони завдяки яким вони працюють.

У третьому розділі розглянуто існуючі види та типи бездротових зарядок.

У четвертому розділі представлено схему універсальної безпроводної зарядки яка підходить для більшої частини акумуляторних пристроїв.

ABSTRACT

Explanatory note contains: 45 pages, 9 figures, 3 tables, 15 sources, 2 appendices

ELECTROMAGNETIC INDUCTION, WIRELESS POWER SUPPLY, CHARGER, WIRELESS COMMUNICATION NETWORKS.

The object of work is wireless chargers.

The aim of the work is to study the technical feasibility of creating wireless chargers.

Research method – deductive-analytical analysis of structures, structures and technologies of manufacturing wireless charger systems.

The paper reviews the structures and designs of wireless chargers, identifies their advantages and disadvantages. The choice of the most appropriate design options in relation to the provided requirements is substantiated. Variants of efficient wireless power transmission systems are offered.

As a result of the work, the prospects for the development of wireless charger systems are determined,

The first section discusses the prospects for the development of wireless charging systems.

The second section discusses the basic principles of wireless charging and the physical laws by which they work.

The third section discusses the existing types and types of wireless charging.

The fourth section presents a scheme of universal wireless charging that is suitable for most battery devices.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1 НАПРЯМКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ БЕЗДРОТОВОЇ ЗАРЯДКИ	14
2 ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ДІЇ ПРИСТРОЇВ ДИСТАНЦІЙНОЇ ЗАРЯДКИ	16
2.1 Індуктивний зв'язок	16
2.2 Магнітно-резонансна зв'язок	17
2.3 Бездротове випромінювання	18
2.4 Зарядка ближньої дії	21
3 ПРИКЛАДИ ТА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОЇ ЗАРЯДКИ	26
3.1 Ахітектура	26
3.2 SISO	34
3.3 MISO	36
3.4 SIMO	37
3.5 MIMO	38
4. ПРИКЛАД ПОБУДОВИ ПРИСТРОЮ ДИСТАНЦІЙНОЇ ЗАРЯДКИ	40
ВИСНОВКИ	43
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	44

ДОДАТОК А Відомість атестаційної роботи	44
ДОДАТОК Б Презентація	45

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

EMBC – Medicine and Biology Society

IPT – Індуктивна передача потужності

MISO – кілька входів / один вихід

MIMO – система точка-точка

NFC – Near Field Communication

PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicles

RF – Радіочастотне випромінення

RFID – Радіочастотна ідентифікація на основі індуктивного зв'язку

SPS - Супутник сонячної енергії

SWIPT – Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

SIMO – один вхід / кілька виходів

SISO – Система магнітної індукції з одним входом і одним виходом

WBAN – Wireless BodyArea Networks

WPCN - Wireless Powered Communication Networks

БЗ – Бездротове живлення

ККД – Коефіцієнт корисної дії

СВЧ – Сверхвисока частота

ШІМ – Широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

В даний час бездротові зарядки на самій-то справі такими не є. Вони не звільняють користувача від проводів, а лише змінюють спосіб зарядки пристрою. Якщо в звичайній ситуації смартфон «прив'язаний до кабелю, то у випадку з бездротові зарядками потрібно його обов'язкове знаходження на спеціальній станції.

Незважаючи на те що зараз є велика кількість способів передачі електрики без дротів, найпоширенішим залишається використання електромагнітної індукції.

Уже в кінці ХХ століття в побутовій техніці застосовувалися індукційні котушки для зарядки електричних зубних щіток і бритв, але через відсутність єдиного стандарту цей спосіб не мав великого поширення. Розвитком цієї технології стала поява в 2008 році стандарту Qi, розробленого організацією Wireless Power Consortium.

Qi працює на базі давно відомого принципу електромагнітної індукції, за рахунок якої можлива передача енергії від бази приймача за допомогою магнітного поля. База знаходиться в самому пристрої зарядки, а приймач – в смартфоні. Крім цього, стандарт дозволяє передавати дані про заряд пристрою, щоб автоматично припинити зарядку. При цьому не варто плутати NFC і Qi. Наявність підтримки передачі даних на малій відстані (NFC) зовсім не говорить про те, що пристрій можна заряджати без дротів.

Підключена до електромережі зарядна станція створює змінне магнітне поле, і пристрій з відповідною індукційною котушкою буде отримувати енергію від поля, індукованого зарядної станцією поля, і тим самим можлива передача енергії на невелику відстань. Стандарт Qi передбачає два варіанти: низької потужності – від 0 до 5 Вт для переносної електроніки і смартфонів, а також середньої потужності – до 120 Вт, який призначений для зарядки планшетів.

Але, як було сказано раніше, Qi лише умовно можна назвати бездротовим способом зарядки, так як він має малий радіус дії, а пристрій завжди має перебувати

на майданчику, яка підключена до мережі за допомогою дроту. Це є одночасно і плюсом, і мінусом.

Через необхідність тримати смартфон на майданчику, під час заряджання перестає бути мобільним, і, щоб не припинявся процес зарядки, всі маніпуляції з ним доведеться виробляти, не знімаючи зі станції. Але при цьому відпадає необхідність постійно підключати та відключати кабель для зарядки.

Завдяки високій ефективності Q_i (ККД становить близько 80 %), яка не сильно поступається провідний зарядці, цей стандарт залишається одним з найпопулярніших серед всіх способів бездротової зарядки. Крім цього, електромагнітне поле, створюване котушкою, абсолютно нешкідливе.

У порівнянні з традиційним (проводовим) способом зарядки БЗ має низку переваг:

- зручність для користувачів, які будуть позбавлені від безлічі зарядних кабелів для різних пристроїв. Якщо виробники прийдуть до спільного знаменника, використання однакових зарядних пристроїв для продукції різних брендів дозволить позбутися від плутанини проводів;

- зменшення розміру пристроїв шляхом використання менш ємних акумуляторів або навіть, можливо, повної відмови від них;

- підвищення захищеності пристроїв (наприклад, пило- та вологонепроникний) при повній відмові від використання проводів як для зарядки, так і для передачі даних;

- розширення можливості застосування пристроїв, особливо в тих випадках, коли використання проводів або заміна батареї є вкрай небажаними або навіть неможливими наприклад в імплантатах;

- можливість забезпечити зарядку на вимогу, що дозволить уникнути перезарядки акумуляторів і зменшити витрати на електрику.

Однак використання БЗ, як правило, має більш високу вартість реалізації в порівнянні з традиційним способом: замість зарядного шнура потрібно встановити

бездротове зарядний пристрій, а в мобільний гаджет повинен бути обладнаний приймачем переданої енергії. Крім того, пристрої БЗ характеризуються підвищеною тепловіддачею при роботі, що вимагає використання більш якісних матеріалів.

Розробка технологій БЗ йде за двома основними напрямками. У першому випадку використовується енергія електромагнітного випромінювання радіочастотного або навіть мікрохвильового діапазону. З міркувань безпеки такий спосіб може бути використаний тільки для малопотужних пристроїв. Так, наприклад, все спрямоване радіочастотне випромінювання підходить тільки для додатків з вузлами датчиків, які споживають потужність до 10 мВт.

Альтернативний шлях для передачі енергії магнітного поля, що генерується котушкою-випромінювачем і отримується котушкою-приймачем. Оскільки загасання магнітного поля набагато сильніше, ніж електричного, даний метод можна застосовувати тільки для зарядки на невеликій відстані. Але даний спосіб зарядки безпечний, що дозволяє широко використовувати його для найрізноманітніших приладів від зубних щіток до автомобілів.

Це дослідження фокусується на стратегіях бездротової зарядки в мережах зв'язку з можливістю бездротового отримання енергії, також званих бездротовими мережами зв'язку (WPCN).

Історія стала свідком серії важливих технічних проривів, об'єднаних двома основними напрямками досліджень в області електричного і магнітного поля. У 1888 р Х. Р. Герц (H. R. Hertz) для передачі електрики через крихітний зазор використовував осцилятор, сполучений з індукційними котушками. Це вперше експериментально підтвердило існування електромагнітного випромінювання. Нікола Тесла, творець електрообладнання, працюючих на змінному струмі, провів перші експерименти по бездротової передачі енергії на основі мікрохвильового випромінювання. Він зосередив зусилля на вивченні можливості передачі бездротової енергії на великі відстані, і в 1896 р йому вдалося передати сигнали на відстань близько 48 км за допомогою мікрохвильового випромінювання. Ще один

великий прорив був досягнутий в 1899 р.: електроенергія високої частоти з напругою 10 МВ була передана на відстань близько 40 км (25 миль), що дозволило запалити 200 ламп розжарювання і запустити електродвигун. Однак технологія, яку застосовував Тесла, не отримала розвитку, оскільки використання такої високої напруги могло б привести до катастрофічних наслідків для людей і електрообладнання в околицях. Приблизно в той же період він представив свою знамениту котушку Тесли (рис. 1(а)). У 1901 р він побудував вежу Ворденкліфф (Wardenclyffe Tower) для передачі електричної енергії без проводів через іоносферу (рис. 1(б)). Однак через обмеження технології (наприклад, низьку ефективність системи через необхідність генерації електричного поля гігантських розмірів) ідея також не отримала подальшого розвитку і не мала комерційного успіху.

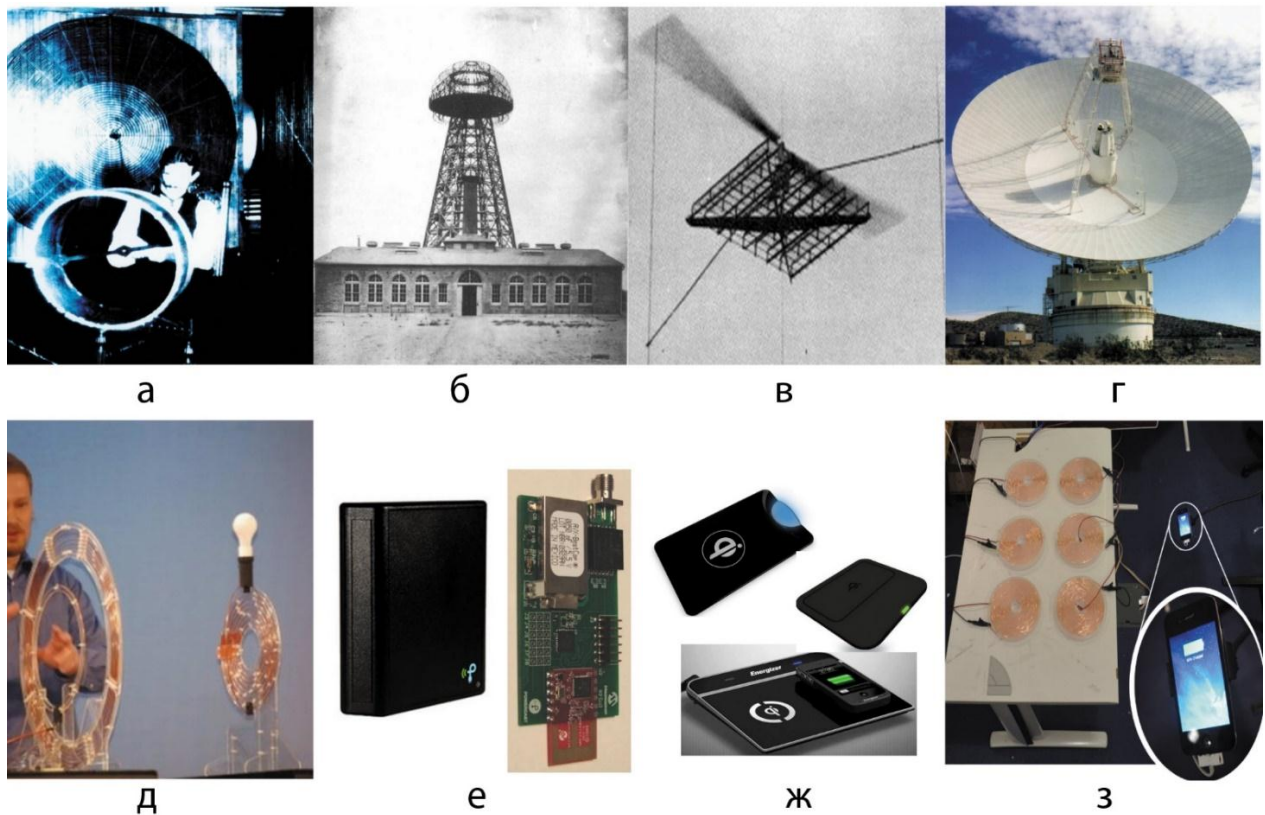
Пізніше, в 1920-1930-х роках, були винайдені магнетрони для перетворення електрики в мікрохвилі, що уможливило передачу енергії на великі відстані без використання проводів. Однак спосіб ефективно конвертувати мікрохвильове випромінювання назад в електрику не був знайдений, і розвиток технологій БЗ призупинилося.

Так тривало до 1964 року, коли В. К. Браун (W. C. Brown), що вважається головним інженером практичної бездротової зарядки, винайшов пристрій, названий ректенна, яке призначалося для перетворення мікрохвиль в електрику. Браун довів практичність передачі мікрохвильової енергії, продемонструвавши модель вертольота, який отримує всю необхідну йому енергію від мікрохвильового променя (рис. 1(в)). Це послужило стартом для досліджень можливості конструювання літаків, що працюють від мікрохвильового випромінювання, які проводилися в 1980-1990-х роках в Японії і Канаді. У 1975 р Браун передав 30 кВт на відстань 1 милі з ефективністю перетворення 84%, використовуючи комплекс далекого космічного зв'язку обсерваторії Голдстоун (Goldstone Deep Space Communications Complex, рис. 1(г)).

Супутник сонячної енергії (SPS), концепція якого була запропонована в 1968

р, це ще один приклад можливого використання СВЧ для передачі енергії на великі відстані. В основі ідеї лежить розміщення великого SPS на геостаціонарній орбіті Землі для збору енергії Сонця і її передачі на Землю за допомогою електромагнітного випромінювання. Широкі дослідження з передачі енергії за допомогою мікрохвиль проводилися НАСА протягом 1970-1980-х років.

В цей же період часу йшов поступовий прогрес технології БЗ за допомогою магнітного поля. Великих проривів на цьому напрямі не було, хоча варто відзначити, що пристрої з індуктивним зв'язком вже в 1960-х роках широко використовувалися в малопотужних медичних пристроях.



а) котушка Тесли; б) вежа Ворденкліфф; в) вертоліт, який працює на бездротовому електриці; г) обсерваторія Голдстоун; д) система Witricity; е) приймач і передавач Powercaster; ж) зарядні панелі Qi; з) системи MIMO

Рисунок. 1 – Бездротові системи передачі енергії

1 НАПРЯМКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ БЕЗДРОТОВОЇ ЗАРЯДКИ

Технології БЗ поділяються на не випромінюючі, робота яких заснована на ефекті магнітної індукції, і випромінюючі, які використовують енергію електромагнітних хвиль. Невипромінюючі пристрої використовують такі методи передачі енергії, як індуктивний зв'язок, магнітно-резонансна зв'язок і ємнісний зв'язок. Випромінюючі технології, в свою чергу, можуть використовувати спрямовану передачу енергії або ж ненаправлену. При ємнісному зв'язку величина переданої енергії залежить від доступної площі пристрою. Однак для портативного електронного пристрою це є неприйнятним, оскільки габарити таких пристроїв не дозволяють забезпечити достатню потужність для зарядки. Якщо ж говорити про спрямованих випромінювачів електромагнітної енергії, то обмеження полягає в тому, що зарядний пристрій має знати точне місце розташування приймача енергії, який до того ж має перебувати в межах прямої видимості. Через очевидного обмеження вищезазначених двох методів БЗ зазвичай реалізується за допомогою інших трьох методів, а саме: магнітної індуктивного зв'язку, магнітно-резонансної зв'язку і непрямого радіочастотного випромінювання (рис. 1.1)

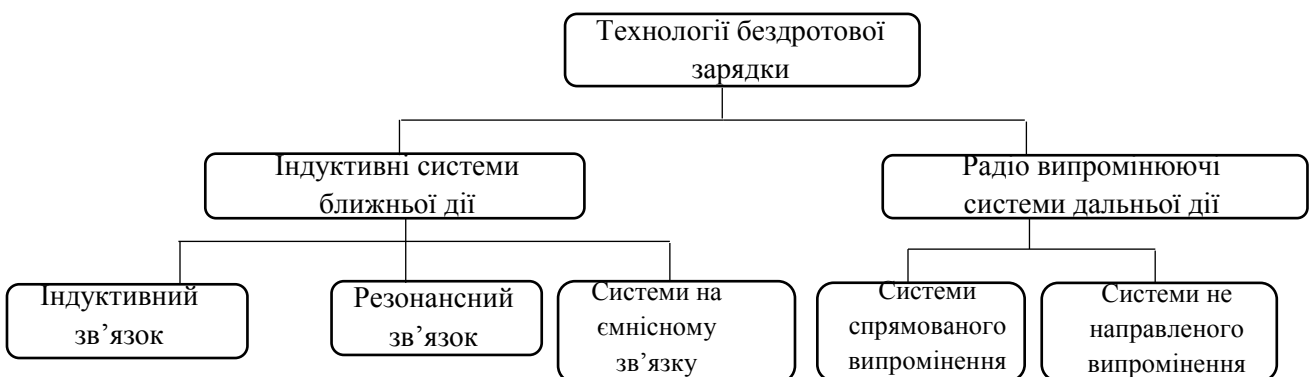


Рисунок 1.1 – Класифікація технологій бездротової зарядки

Магнітна індукція і магнітно-резонансна зв'язок працюють на невеликій

відстані, де генерується електромагнітне поле домінує в області, близької до передавача або розсіює пристрою. Потужність магнітного поля обернено пропорційна третього ступеня відстані від джерела до приймача. У той же час мікрохвильове випромінювання працює на набагато більшій відстані. Потужність мікрохвильового випромінювання зменшується обернено пропорційно квадрату відстані від випромінювача. Більш того, для даного методу поглинання випромінювання не впливає на передавач, оскільки передає і приймає антени не пов'язані. Навпаки, при використанні індуктивних методів приймач і передавач роблять взаємний вплив один на одного.

2. ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ДІІ ПРИСТРОЇВ ДИСТАНЦІЙНОЇ ЗАРЯДКИ

2.1 Індуктивний зв'язок

Індуктивний зв'язок засновано на явищі електромагнітної індукції (рис. 2.1(a)). Індуктивна передача потужності (ІРТ) відбувається, коли первинна котушка передавача енергії генерує змінюється магнітне поле, яке проходить через вторинну котушку приймача енергії. Змінне магнітне поле індуктує напругу / струм у вторинній котушці приймача. Цей ефект можна використовувати для зарядки бездротового пристрою або акумулятора. Робоча частота індуктивного зв'язку зазвичай знаходиться в діапазоні декількох кілогерц. Для підвищення ефективності зарядки вторинна котушка повинна бути налаштована на робочу частоту. Добротність такої системи зазвичай має низькі значення (наприклад, нижче 10), оскільки передана потужність швидко знижується при підвищенні добротності. Через відсутність компенсації добротності ефективна зарядна відстань таких систем зазвичай не перевищує 20 см. Радіочастотна ідентифікація на основі індуктивного зв'язку (RFID) використовує технологію збільшення відстані зарядки до десятків сантиметрів за рахунок зниження ефективності (1-2%). Отримана приймачем потужність вимірюється в мікроватах. Незважаючи на обмежену відстань передачі, ефективна потужність зарядки може бути дуже високою (наприклад, кіловати в пристроях для зарядки електромобіля).

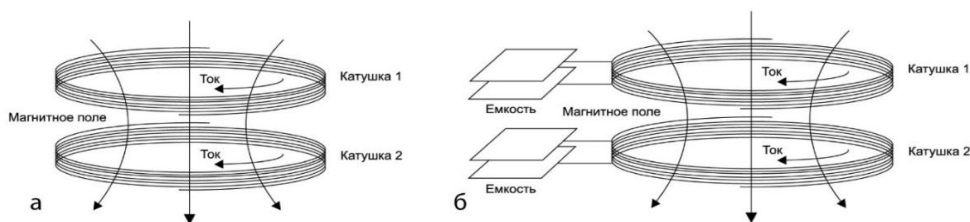


Рисунок 2.1 – Моделі бездротових зарядних систем на основі індуктивного і магнітно-резонансного зв'язку

До переваг пристроїв магнітно індуктивного зв'язку також відносяться простота впровадження, зручна робота, висока ефективність на близькій відстані (як правило, меншому, ніж діаметр котушки) і гарантована безпека. Тому даний метод можна застосовувати для мобільних пристроїв. Використовуючи згадану вище технологію MagMIMO, можна заряджати бездротовий пристрій на відстані до 30 см. Стверджується, що MagMIMO може виявляти телефон і ініціювати його зарядку навіть якщо він знаходиться не в прямої видимості зарядного пристрою, наприклад в кишені.

2.2 Магнітно-резонансний зв'язок

Магнітно-резонансний зв'язок (рис. 2.1(б)) заснований на взаємодії з затухаючої хвилею, яка генерує і передає електричну енергію між двома резонансними котушками через змінні або осцилюючі магнітні поля. Оскільки дві резонансні котушки, що працюють на тій же резонансній частоті, сильно пов'язані, може бути досягнута висока ефективність передачі енергії, при цьому втрати для нерезонансних зовнішніх перешкод будуть невеликими. Наприклад, в квітні 2015 був продемонстрований сучасний прототип, який показав максимальну ефективність передачі потужності в 92,6 % на відстані 0,3 см. Завдяки використанню ефекту резонансу перевагою магнітно-резонансної зв'язку є ігнорування впливу зовнішнього середовища і відсутність вимоги прямої видимості передавального пристрою. Продемонстровані раніше магнітозв'язані резонатори показали здатність передавати енергію на більші відстані, ніж пристрої індуктивного зв'язку тієї ж потужності, і з більш високою ефективністю, ніж за допомогою радіочастотного (RF) випромінювання. Крім того, магнітно-резонансний зв'язок може бути використаний для передачі енергії на кілька пристроїв за допомогою одного передавача, завдяки чому даний метод дозволяє заряджати декілька пристроїв одночасно.

Пристрої, що використовують резонансний зв'язок, працюють в діапазоні

мегагерцових частот і мають високу добротність. Це особливо важливо для збільшення відстані до зарядки, оскільки висока добротність згладжує негативний вплив збільшеної відстані між пристроями і, отже, підвищує ефективність БЗ. Таким чином, стає можливим збільшення відстані передачі потужності аж до 1 м. Як уже згадувалося, в 2007 р вчені з МІТ запропонували Witricity високоефективну технологію бездротової передачі енергії на середніх дистанціях, засновану на сильно пов'язаному магнітному резонансі. Повідомлялося, що за допомогою даної технології можна змусити працювати лампу потужністю 60 Вт на відстані більш ніж 2 м при ефективності енергопередачі близько 40 %. Ефективність збільшилася до 90 %, коли відстань передачі склало 1 м. Однак недоліком даної технології є те, що розмір приймача Witricity важко зменшити, оскільки потрібна наявність розподіленої ємнісної котушки. Це є серйозною проблемою в реалізації технології Witricity в портативних пристроях. Магнітно-резонансний зв'язок може одночасно заряджати декілька пристроїв, для чого потрібно налаштування пов'язаних резонаторів з декількома прийомними котушками, що навіть покращує загальну ефективність системи. Однак взаємний зв'язок прийомних котушок може привести до перешкод, і отже, необхідна правильна настройка приймальних пристроїв.

2.3 Бездротове випромінювання

В даному випадку в якості середовища для перенесення енергії використовується RF-випромінювання мікрохвильового діапазону. Радіохвилі НВЧ поширюються в просторі зі швидкістю світла в прямому напрямку. Типова частота мікрохвильового випромінювання становить від 300 МГц до 300 ГГц. При передачі енергії можуть використовуватися також інфрачервоні і рентгенівські промені. Однак через проблеми безпеки такі системи широко не використовуються. На рис. 2.2 показана архітектура СВЧ-системи передачі енергії. Вона починається з перетворення змінного струму (AC) в постійний (DC), який, в свою чергу,

перетворюється в радіовипромінювання за допомогою магнетрона, що входить до складу передавача. Після поширення по повітрю мікрохвильове випромінювання захоплюється антенною приймача, після чого відбувається зворотне перетворення радіовипромінювання в електрику.

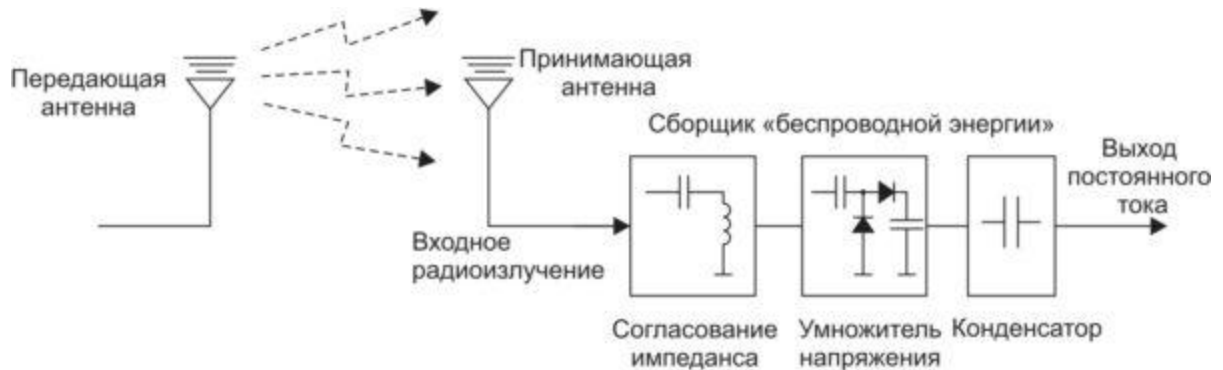


Рисунок 2.2 – Система передачі енергії дальньої дії за допомогою радіовипромінювання

Ефективність перетворення RF-DC в значній мірі залежить від поглиненої щільності потужності на приймальній антені, від точності узгодження імпедансу між антенною та множителем напруги і енергоефективності перетворювача напруги, який конвертує прийняте RF-випромінювання в постійний струм. Наприклад, в одному з продемонстрованих в травні 2015 р пристроїв ефективність перетворення RF-DC досягала 62 і 84 % при сумарній вхідній потужності 10 і 5,8 дБм відповідно.

RF-випромінювання може бути ізотропним або спрямованим. Ізотропне більш підходить для ширококомовних додатків. При передачі точка-точка направлене випромінювання може підвищити ефективність передачі енергії. Для формування спрямованого випромінювання використовується масив фокуруючих антен або антени на основі апертурних решіток. Чіткість формування променя енергії поліпшується зі збільшенням кількості передавальних антен. Використання великого числа антен збільшеного розміру також сприяє поліпшенню якості передачі енергії. На комерційному ринку вже присутні пристрої для БЗ на основі RF-випромінювання,

наприклад передавач Powercaster і приймач Powerharvester, які допускають ізотропну передачу потужності 1 або 3 Вт (рис. 1(е)).

Крім більш високої дальності передачі, мікрохвильове випромінювання має ще одне перевагу-сумісність з існуючою системою зв'язку. За допомогою RF-випромінювання можливо одночасно передавати і енергію, і інформацію. Амплітуда і фаза СВЧ використовуються для модуляції інформації, а її випромінювання і коливання для перенесення енергії. Концепція використання одночасної передачі інформації і енергії отримала назву SWIPT (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer). Для впровадження SWIPT були розроблені вдосконалені інтелектуальні антени, що використовуються на стороні приймача, які забезпечують хороший компроміс між продуктивністю і складністю системи. Інший підхід до впровадження подібних систем, що має певні економічні переваги, передбачає розгортання виділених силових маяків, що діють спільно з існуючою системою зв'язку. Однак через медичне обмеження для RF-випромінювання потужність передавачів повинна бути регламентована відповідно до нормативів, такими, наприклад, як встановлені Федеральною комісією зі зв'язку США (FCC), і максимально допустимими рівнями впливу, зазначеними в стандарті IEEE C95.1-2005. Це призводить до збільшення щільності мережі передавальних станцій, що мають знижену потужність випромінювання.

У таблиці 2.1 наводяться порівняльні характеристики різних типів БЗ, їх переваги, недоліки, ефективне відстань зарядки і сфери застосування.

Таблиця 2.1 – Порівняння різних технологій бездротової зарядки

Технологія бездротової зарядки	Переваги	Недоліки	Радіус дії
Індуктивний зв'язок	Безпечність, простота конструкції	Робота на короткій відстані, нагрів, не підходить для мобільних додатків, необхідно суворе вирівнювання зарядного і заряджаемого пристрою	Від декількох міліметрів до декількох сантиметрів

Продовження таблиці 2.1

Технологія бездротової зарядки	Переваги	Недоліки	Радіус дії
Резонансно індуктивний зв'язок	Не суворі вимоги до вирівнювання пристрою, можливість одночасно заряджати декілька пристроїв з різною потужністю, ефективність зарядки, пристрої можуть знаходитися не в прямій видимості один від одного	Не підходить для мобільних пристроїв, обмежений радіус дії, складна конструкція	Від декількох сантиметрів до декількох метрів
Радіо випромінення	Ефективно для роботи на великих відстанях, можливо використовувати у мобільних пристроях	Небезпечна при високих енергіях, низька ефективність зарядки, пристрої мають знаходитися у полі зору.	Від декількох десятків метрів до декількох кілометрів.

2.4 Зарядка ближньої дії

Зарядні додатки для ближнього поля можуть бути реалізовані на основі індуктивного і резонансної зв'язку. Через простоту і низьку вартість реалізації в більшості існуючих рішень в основному застосовується індуктивний зв'язок. Як згадувалося вище, технологія IPT (Inductive Power Transfer) передача енергії за допомогою котушок індуктивності) здатна забезпечити передачу великої потужності (кіловат і вище) і широко використовується в промисловій автоматизації. Основні області застосування включають роботизовані маніпулятори, автоматизовані підводні апарати, індукційні генератори і асинхронні двигуни. Потужні системи IPT також застосовуються для забезпечення енергією громадського транспорту, наприклад монорейкових складів, пасажирського транспорту, електрорухомого складу на залізничному транспорті (зокрема, на високошвидкісних поїздах). Передана при цьому потужність коливається від кіловата до сотень кіловат. Наприклад, система онлайнного живлення електрорухомого складу реалізує вихідну потужність 100 кВт з 80%-й енергоефективністю при повітряному

зазорі 26 см.

Ще одне широко поширене застосування зарядних пристроїв великої потужності це зарядка акумуляторних батарей на транспортних засобах на електроприводі (Electric Vehicle, EV), в тому числі на гібридних електричних транспортних засобах (Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV). Індуктивний зв'язок почав застосовуватися для зарядки EV з 1990-х років. Були розроблені індуктивні зарядні пристрої як для односпрямованої, так і для двобічної зарядки, яка робить можливим створення цілих мереж БЗ. Як правило, ефективність зарядки досягає 90 % і вище при потужності 1-10 кВт на відстані 4-10 мм. У 2012-2015 рр. були продемонстровані і оцінені системи на основі резонансної зв'язку для EV. У порівнянні з індуктивними пристроями БЗ, зарядка EV на основі резонансної зв'язку дозволяє помітно збільшити зарядний відстань, а також ефективність передачі енергії. Так, наприклад, в експериментах, результати яких були представлені на International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe) в Гетеборзі (Швеція) у вересні 2014 р була досягнута ефективність понад 95% при повітряному проміжку 22,5 см.

Системи зарядки ближньої дії середньої потужності (від декількох ватів до десятків ват) застосовуються, перш за все, в медичних апаратах і побутових пристроях. Різні конструкції біомедичних імплантатів, засновані на індуктивному зв'язку, були показані на конференції Medicine and Biology Society (EMBC) в Буенос-Айресі (Аргентина) ще в 2010 р Сучасні рішення можуть забезпечити більш високу ефективність зарядки 50% і вище при повітряному зазорі 10 мм. Системи з резонансною зарядкою, використовувані в біомедичних імплантатах, мають більш потужну проникаючу здатність. Оскільки відстань до БЗ набагато більше розміру котушки, резонансний зв'язок забезпечує менший розмір імплантованого пристрою в порівнянні зі стандартним рішенням. У деяких роботах було показано, що при передавальній котушці діаметром 3 см і приймальній діаметром 2 см ефективність зарядки може досягати більше 60% на відстані понад 20 см. Сучасні технології

можуть дати підвищення ефективності БЗ в біотканевих середовищах до 70%.

Що стосується застосування БЗ середньої потужності для побутової техніки, то це, наприклад, індуктивна зубна щітка, освітлення, настінний вимикач, система опалення та тощо, взагалі, де тільки може бути використана БЗ. Якщо мова йде про портативних пристроях, то для них було випущено безліч стандартних БЗ, таких, наприклад, як зарядний пристрій Qi RAVPower, зарядний майданчик Verizon Qi, Duracell Powermat, зарядний пристрій Energizer Qi, зарядні майданчики ZENS Qi і Airpulse, розроблені для передачі енергії на ноутбуки, планшети і мобільні телефони (рис. 1(ж)).

Більш того, в період з 2011 по 2014 р на різних міжнародних наукових конференціях з електромагнетизму, СВЧ-технологіям, питань бездротової передачі даних були продемонстровані системи БЗ ближньої дії для передачі енергії з морських енергостанцій, для використання в нафтовидобувній промисловості, вугільних шахтах, електричних велосипедах, сенсорах і датчиках, переносні пристрої, що використовуються в імплантах, RFID, LED-дисплеях і т. п.

Системи дальнього радіусу дії можуть бути реалізовані на основі як ненаправленого, так і спрямованого радіовипромінювання. Ненаправлене випромінювання підходить навіть для тих умов, коли передавач і приймач не перебувають в умовах прямої видимості. При цьому ефективність прийому в дуже незначній мірі залежить від орієнтації антени приймача, проте ефективність зарядки в такому випадку буде відносно низька. Тому найбільш широко поширеними додатками для ненаправленої зарядки стали малопотужні бездротові системи, такі як бездротові сенсорні мережі (WRSN) і RFID-системи. WRSN з низькими робочими циклами можуть підтримувати постійну роботу при щільності електромагнітної потужності RF-випромінювання в діапазоні 20-200 мВт /см².

Для роботи в ненаправленої системи дальнього радіусу були спеціально розроблені сімейства датчиків наднизької потужності. Як було показано на International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) в Сеулі (Сівши. Корея) в

травні 2012 р, вбудований датчик і приймач окремого пристрої споживають потужність 1,79 і 0,683 мВт відповідно і можуть передавати дані зі швидкістю 500 кбіт / с.

Щоб не залежати від виділеного пристрою БЗ, були розроблені бездротові системи зарядки, засновані на зборі енергії від навколишнього середовища. У спеціалізованій літературі останнім часом нерідко згадуються розробки платформ самозарядних датчиків для збору енергії від RF-сигналів телевізійного мовлення, передач радіостанцій з амплітудною модуляцією (AM), від глобальної системи мобільного зв'язку (GSM 900/1800), маршрутизаторів Wi-Fi, базових станцій стільникового зв'язку та супутникового телемовлення.

RF-датчики можуть знайти застосування в найрізноманітніших системах, наприклад таких, як бездротові натільні сенсорні / комп'ютерні мережі (Wireless BodyArea Networks, WBAN), призначені для моніторингу стану пацієнта і медико-санітарної допомоги. Пристрої WBAN можуть бути ношеними, розміщеними на тілі, або навіть імплантованими всередину людського тіла. У деяких наукових публікаціях 2012-2014 рр. розглядаються питання створення і варіанти використання WBAN, які не мають батареї, живлення яких здійснюється за допомогою БЗ. Як правило, споживана потужність таких датчиків складає десятки мілліватт, а ефективність зарядки складає близько кількох відсотків (наприклад, 1,2%). Слід зазначити, що розміщення імплантованих датчиків глибоко всередині органів тіла тягне за собою значно меншу ефективність зарядки, зазвичай менше 0,1%. Стверджується, що типові імплантовані датчики з мікрохвильовим джерелом живлення можуть працювати на відстані десятків сантиметрів від випромінювача. RF-датчики також використовуються в системах Інтернету речей (IoT), системах зв'язку між машинної взаємодії (M2M) і системах інтелектуальних мереж (Intelligent Network, IN).

Системи з направленим випромінюванням можуть бути використані для бездротового живлення електронних пристроїв з великим енергоспоживанням. У

1960-х роках були розроблені надпотужні системи передачі енергії, що використовують мікрохвильове випромінювання, здатні передавати сотні кіловат. Спрямовані СВЧ-системи передачі великої потужності на далеку відстань отримали відносно широке поширення. Як було згадано вище, експеримент по передачі СВЧ-енергії в Голдстоуні, проведений в 1975 р, продемонстрував можливість передачі 30 кВт з потужністю пучка 450 кВт на відстань більш 1,54 км при роботі системи на частоті 2,388 ГГц. Системи на основі спрямованого СВЧ-випромінювання дальнього радіусу дії також стимулювали розвиток мереж великих систем БЗ. Це, наприклад, Solar Power Satellites (SPS); безпілотні літальні апарати (БЛА), в тому числі з бездротовим живленням від джерела СВЧ-випромінювання; висотні платформи на електромоторах (HAPP); повітряна радіоантена Raytheon (RAMP) і програми створення висотних стаціонарних ретрансляторів (SHARP).

Останнім часом активно набирають популярність транспортні засоби на електроприводі (згадані раніше EV / PHEV). Для їх харчування також можуть бути використані системи БЗ на основі спрямованого СВЧ-випромінювання. На International Electric Drives Production Conference (EDPC) в Нюрнберзі (Німеччина) в 2013 р були представлені матеріали дослідження і створення системи дорожніх випромінювачів для бездротової передачі енергії електротранспорту. Показано, що розроблена антенна здатна приймати потужність 10 кВт з ефективністю перетворення RF-DC більше 80%.

У минулому десятилітті великого поширення набули системи бездротового живлення середньої потужності для роботи з портативними електронними пристроями. Наприклад, комерційна система Cota, про яку також говорилося вище, здатна передавати енергію на відстань до 10 м навіть при наявності перешкод між передавачем і приймають пристроями. Крім того, система передавальних станцій СВЧ-випромінювання (наприклад, 60 ГГц) може служити джерелом живлення для мобільних пристроїв в стільникових мережах. Однак практичність і економічна ефективність такої системи потребують подальшого дослідження.

3 ПРИКЛАДИ ТА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОЇ ЗАРЯДКИ

Розглянемо і проаналізуємо системи БЗ, їх архітектуру, апаратне забезпечення і питання конструювання.

3.1 Ахітектура

На рис. 3.1 представлена блок-схема типової невідновлюючої системи БЗ. Передавач складається з: випрямляча, що перетворює змінний струм в постійний; підвищуючого перетворювача постійного струму, що збільшує вихідну напругу; інвертора-перетворювача, конвертує постійний струм в змінний. Приймач складається з: випрямляча, що перетворює змінний струм високої частоти в постійний; понижуючого перетворювача постійного струму, що зменшує вихідну напругу; навантаження.

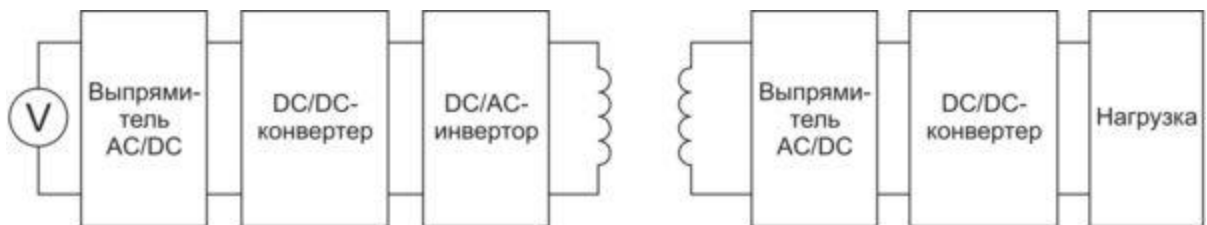


Рисунок 3.1 – Блок-схема системи невідновлюючої БЗ

Процес передачі відбувається наступним чином. Змінний струм передається на вхід випрямляча. Існуючі мережі змінного струму працюють на частоті 50 або 60 Гц, що занадто мало для систем БЗ. Отриманий постійний струм за допомогою перетворювача отримує більш високу напругу. Потім відбувається перетворення напруга-частота, після якого на виході виходить змінний струм високої частоти. Проходячи через котушку, змінний струм формують магнітне поле, яке взаємодіє з

катушкою приймача через повітряний зазор і збуджує змінний струм високої частоти в приймачі. Далі відбувається зворотний процес перетворення: змінний струм випрямляється, потім відбувається зменшення отриманої напруги в перетворювачі для отримання струму, придатного для живлення пристрою або зарядки батареї.

Топологія індуктивних систем зв'язку має чотири різновиди, а саме: послідовно-послідовна; послідовно-паралельна; паралельно-послідовна; паралельно-паралельна. Різниця даних топологій позначається на компенсаційних перетвореннях при взаємодії електромагнітних ланцюгів. Паралельно-послідовна і паралельно-паралельна регулюють струм інвертора, що протікає в паралельних резонансних контурах, за допомогою додаткових індукторів, що приводить до збільшення розмірів перетворювача і його вартості. Крім того, ці дві топології мають різні значення резонансної ємності в залежності від поєднання і добротності контурів. Тому більш широке поширення набули послідовно-послідовна і послідовно-паралельна структури. Основними типами вхідного порту системи резонансного сполуки є послідовні і паралельні схеми, які використовуються в поєднанні для підвищення ефективності роботи індукційної катушки.

Індуктивні системи зв'язку зазвичай використовують архітектуру з двома катушками, як показано на рис. 3.1. У той же час архітектура системи при використанні резонансного зв'язку більш різноманітна. Порівняно недавно набули поширення системи із застосуванням магнітного зв'язку на основі чотирьох катушок з узгодженим опором, системою релейного резонатора і системами доміно-резонаторів.

Ідея використовувати систему БЗ з чотирма катушками вперше була запропонована в 1998р. У ній на стороні передавача розташовуються катушка збудження і передавальний резонатор, а на стороні приймача, приймаючий резонатор і катушка навантаження (рис. 3.2). Використання катушки збудження і катушки навантаження включає в себе два додаткових коефіцієнта взаємного зв'язку,

тобто коефіцієнт між котушкою збудження і передавальним резонатором, а також між приймаючим резонатором і котушкою навантаження. У порівнянні з системою з двома котушками, два додаткових коефіцієнта забезпечують додаткові можливості по збільшенню відстані передачі. Однак загальна ефективність передачі не перевищуватиме 50 % через вимоги узгодження незалежності.

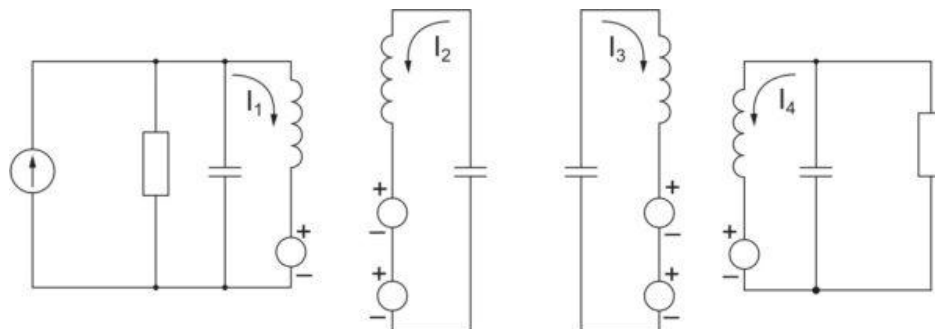


Рисунок 3.2 – Архітектура бездротової системи зарядки з чотирма котушками і резонансної зв'язком

Система з використанням релейного резонатора отримується шляхом додавання додаткового релейного резонатора між передавальної і приймальної котушками. Оптимізація і експериментальні оцінки такої системи проводилися з робочими частотами 115,6 кГц, 1,25 / 6,78 / 7 / 13,56 МГц. Для подальшого розширення діапазону передачі системи з релейним резонатором може бути застосована так звана система доміно-резонатора, коли між передавальної і приймальної котушками можуть бути розміщені кілька проміжних резонаторних реле. Такі системи виходять дуже гнучкими і можуть бути виконані в різних конфігураціях: пряма лінія, кільце, вигнуті і Y-образні візерунки. Енергія може передаватися роздільними шляхами або об'єднувати кілька шляхів, що забезпечує поліпшене керування передачею потужності.

Напруженість магнітного поля можна охарактеризувати як функцію відстані d від джерела в такий спосіб:

$$H(d) = \frac{INr^2}{2\sqrt{(r^2 + d^2)^3}} \quad (3.1)$$

де I , N і r – струм, число витків і радіус котушки відповідно.

З (3.1) безпосередньо випливає, що збільшення числа витків і радіусу передавальної котушки призводить до посилення напруженості. Однак вони не можуть збільшуватися безмежно, тому їх оптимізація проводиться більш складним способом, при якому враховуються частота і опір. Для ефективного прийому переданої енергії приймаюча котушка повинна мати низький імпеданс.

Ефективність передачі енергії без випромінювальної зарядної системи сильно залежить від взаємної індуктивності між двома котушками, добротності Q і коефіцієнта узгодження навантаження. Взаємна індуктивність пари котушок вказує, як зміна однієї котушки впливає на індукований струм в іншій. Взаємна індуктивність між парою котушок пропорційна самоіндукції двох котушок через коефіцієнт зв'язку. Коефіцієнт ефективності передачі, який характеризує якість взаємозв'язку котушок, визначається вирівнюванням, відстанню, ставленням діаметрів і формою двох котушок.

Добротність Q визначається як відношення енергії, що зберігається в резонаторі, до енергії, що забезпечується генератором. Більш високе значення Q вказує на меншу швидкість втрати енергії системи при передачі потужності. Тому в силовій системі з високою добротністю коливання / резонанс повільно знижуються. На добротність впливає само індуктивність, опір і внутрішня частота, які, в основному, залежать від застосовуваних матеріалів. Коефіцієнт відповідності навантаження залежить від відстані. Так як резонансні частоти пари котушок змінюються при зміні зазору, коефіцієнт узгодження навантаження вимірює, наскільки точно збігаються резонансні частоти. Для настройки коефіцієнта узгодження навантаження для підтримки узгодження резонансної частоти на різній відстані в літературі запропоновані різні рішення, такі як маніпуляція зі

сполученням, узгодження частоти, узгодження імпедансу і настройка параметрів резонатора.

Таблиця 3.1 – Порівняння особливостей реалізації пристроїв індуктивної зарядки

Публікація	Застосована технологія	Напруга на виході, В	Максимальна ефективність зарядки, %	Максимальна робоча дистанція, мм	Частота
J. Yoo, L. Yan, S. Lee, Y. Kim, and H.-J Yoo. A 5.2 mW Self-Configured Wearable Body Sensor Network Controller and a 12 W Wirelessly Powered Sensor for a Continuous Health Monitoring System // IEEE Journal of Solid-State Circuits. Vol. 45. № 1. 2010.	0,18 мкм КМОП	1,8	54,9	10	13,56 МГц
H.-M. Lee and M. Ghovanloo. An Adaptive Reconfigurable Active Voltage Doubler/rectifier for Extended-range Inductive Power Transmission // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. Vol. 59. № 8. 2012.	0,5 мкм КМОП	3,1	77	80	13,56 МГц

Продовження таблиці 3.1

Публікація	Застосована технологія	Напруга на виході, В	Максимальна ефективність зарядки, %	Максимальна робоча дистанція, мм	Частота
S.-Y. Lee, J.-H. Hong, C.-H. Hsieh, M.-C. Liang, and J.-Y. Kung. A Low-power 13.56 MHz RF Front-end Circuit for Implantable Biomedical Devices // IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst. Vol. 7. № 3. 2013.	0,18 МКМ КМОП	3	87	20	13,56 МГц
O. Lazaro and G. A. Rincon-Mora. 180-nm CMOS Wideband Capacitor-Free Inductively Coupled Power Receiver and Charger // IEEE Journal of Solid-State Circuits. Vol. 48. № 11. 2013.	0,18 МКМ КМОП	1,5	82	11,35	100–150 кГц
X. Li, C.-Y. Tsui, and W.-H. Ki. Power Management Analysis of Inductively-Powered Implants with 1X/2X Reconfigurable Rectifier // IEEE Transactions on Circuits and SystemsI: Regular	0,13 МКМ КМОП	3,6	65	20	40,68 МГц

Papers. Vol. 62/ № 3. 2015.					
--------------------------------	--	--	--	--	--

У таблицях 3.1 і 3.2 показані деякі з нещодавно розроблених способів апаратної реалізації систем передачі енергії через індуктивність (ІРТ) і резонансних систем зв'язку відповідно. Показано, що для систем ІРТ ефективність зарядки 50-80 % може бути досягнута при відстанях до зарядки в кілька сантиметрів. Для систем резонансного зв'язку зарядна відстань збільшується до декількох дециметрів з ефективністю від 50% до 90%.

Таблиця 3.2 – Порівняння особливостей реалізації пристроїв на основі магнітного зв'язку

Публікація	Діаметр передавальної котушки, см	Діаметр приймальної котушки, см	Робоча дистанція, см	Максимальна ефективність зарядки, %	Частота
A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljacic. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances // Science. Vol. 317. № 5834. 2007.	60×60	30×30	75	93	9,9 МГц
Z. N. Low, R. Chinga, R. Tseng and J. Lin. Design and Test of a Highpower High-efficiency Loosely Coupled Planar Wireless Power Transfer System // IEEE Trans. Ind. Electron. Vol. 56. № 5. 2009.	21×21	13×13	1	75,7	134 кГц

Продовження таблиці 3.2

Публікація	Діаметр передавальної котушки, см	Діаметр приймальної котушки, см	Робоча дистанція, см	Максимальна ефективність зарядки, %	Частота
D. Wang, Y. Zhu, H. Guo, X. Zhu, T. Mo and Q. Huang // Enabling Multi-angle Wireless Power Transmission via Magnetic Resonant Coupling // in Proc. of International Conference on Computing and Convergence Technology (ICCCT). Seoul, South Korea. Dec. 2012.	30×30	30×30	0,5	74,08	15,1 МГц
D. Ahn and S. Hong. Effect of Coupling Between Multiple Transmitters or Multiple Receivers on Wireless Power Transfer // IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 60. № 7. 2013.	30×30	31,5×22,5	21–31	45–57	144 кГц
M. T. Ali, A. Anwar, U. Tayyab, Y. Iqbal, T. Tauqeer and U. Nasir. Design of High Efficiency Wireless Power Transmission System at Low Resonant Frequency // in Proc. of IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference	13,6×13,6	5×5	0,3	88,1	22,2–22,4 МГц

and Exposition (PEMC). Antalya, Turkey. Sept. 2014.					
---	--	--	--	--	--

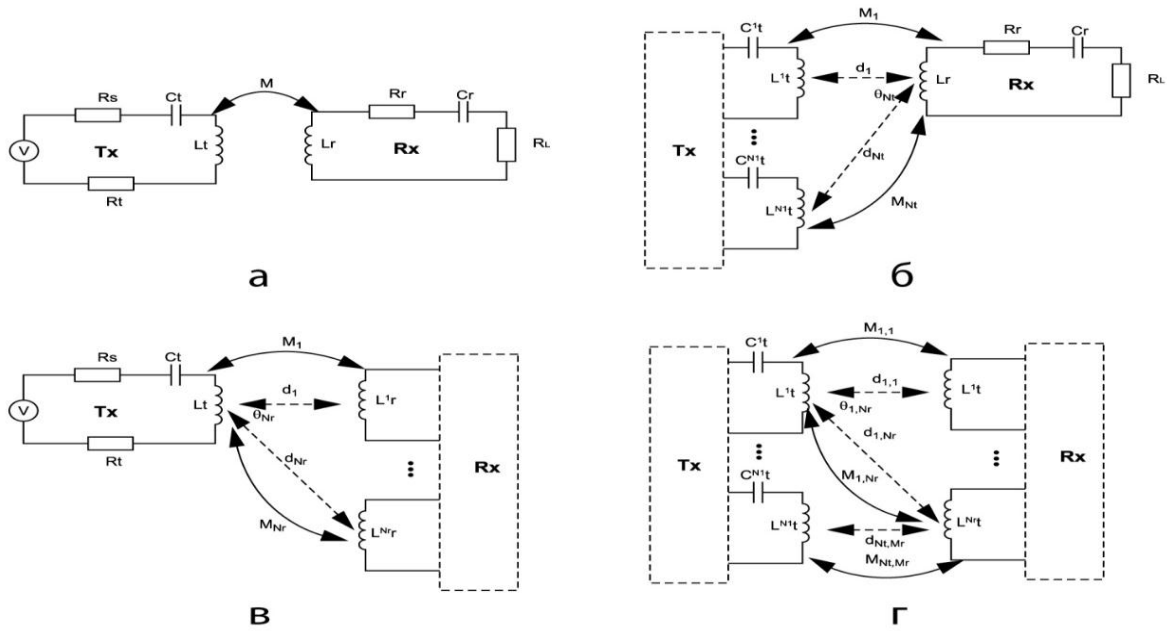
Поширення радіохвиль для дальнього радіозв'язку добре вивчено. Приділимо увагу основним характеристикам поширення магнітних хвиль при близькому взаємодії. Спочатку розглянемо фундаментальну модель магнітної індукції в базовій установці одиночного входу / одиночного виходу (SISO).

3.2 SISO

Система магнітної індукції з одним входом і одним виходом показана на рис. 3.3(a). Нехай r_t і r_r радіуси передавальної і приймаючої котушок відповідно. Відстань між котушками позначимо як d . Нехай ω_0 – це резонансна кутова частота, з якою пов'язані дві котушки. тоді:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_t C_t}} = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (3.2)$$

де L_t і L_r – самоіндукція передавальної і приймаючої котушок відповідно.



а) SISO; б) MISO;
в) SIMO; г) MIMO

Рисунок 3.3 – Схеми моделей передачі «точка-точка»

M – взаємодукція, а C_t і C_r – резонансні ємності. Опір передавальної і приймаючої котушок відповідно позначимо як R_t і R_r . Імпеданс джерела передавача і навантаження приймача R_s і R_L відповідно. Згідно з другим правилом Кірхгофа, напруга між двома котушками може бути виражена такою формулою:

$$\begin{aligned} \left(R_s + R_t + j\omega L_t + \frac{1}{j\omega C_t} \right) I_t + j\omega M I_r &= V_s, \\ j\omega M I_t + \left(R_L + R_r + j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C_r} \right) I_r &= 0. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Після спрощення (3.3) отримана потужність на навантаженні приймача може бути обчислена як:

$$P_r = P_t Q_t Q_r \eta_t \eta_r k^2(d), \quad (3.4)$$

де P_t - передана потужність джерела, η_t і η_r – ефективність передавача і приймача, які обчислюють за формулою:

$$\eta_t = \frac{R_s}{R_t + R_s}, \eta_r = \frac{R_L}{R_r + R_L} \quad (3.5)$$

Q_t і Q_r – добротність передавача і приймача, які обчислюють за формулою:

$$Q_t = \frac{\omega L_t}{R_t + R_s}, Q_r = \frac{\omega L_r}{R_r + R_L}, \quad (3.6)$$

де $k(x)$ – коефіцієнт фактора зв'язку між двома котушками.

Коефіцієнт зв'язку є функцією взаємної індуктивності, позначеної як M , і власної індуктивності котушок передачі і прийому. Його значення визначається наступним виразом:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_t L_r}} \quad (3.7)$$

Якщо відомий радіус котушок передачі і прийому, а також відстань зарядки між ними, коефіцієнт зв'язку також може бути виражений у вигляді такої функції:

$$k^2(d) = \frac{r_t^3 r_r^3 \pi^2}{(d^2 + r_t^2)^3} \quad (3.8)$$

Підставляючи (3.8) в (3.4), отримаємо, що потужність, отримана передавачем при з'єднанні один до одного (SISO), приводиться до наступного вигляду:

$$P_r = P_t Q_t Q_r \eta_t \eta_r \frac{r_t^3 r_r^3 \pi^2}{(d^2 + r_t^2)^3} \quad (3.9)$$

3.3 MISO

На рис. 3.3(б) показана базова модель для схеми MISO (кілька входів / один вихід). Нехай N_t – це число передавальних котушок. На резонансній частоті кожна котушка передавача взаємодіє з котушкою приймача. Енергія, що передається на приймач від котушки передавача, $n \in \{1, \dots, N_t\}$, розраховується за формулою:

$$P_r^n = P_t^n Q_t^n Q_r \eta_t^n \eta_r k_n^2(d_n), \quad (3.10)$$

де P_{nr} , Q_{nt} і η_{nt} – передана енергія, добротність і ефективність передавальної котушки n відповідно.

Ефективність передачі між передавачем і приймачем може бути обчислена за формулою:

$$k_n^2(d) = \frac{r_n^3 r_r^3}{(d_1^2 + r_n^2)^3} = \frac{r_n^3 r_r^3}{\left(\left(\frac{d_1}{\cos \theta_n} \right)^2 + r_n^2 \right)^3}, \quad (3.11)$$

де θ_n – кут між d_1 і d_n , як показано на рис. 3.3(б),

r_n – радіус n -ної котушки передавача.

Сумарна потужність, що отримується приймачем в цьому випадку, може бути розрахована за формулою:

$$P_r = \left(Q_r \eta_r r_r^3 = P_1 Q_1 \eta_1 \frac{\eta_1^3}{\left(\left(\frac{d_1}{\cos \theta_1} \right)^2 + \eta_1^2 \right)^3} + P_{N_t} Q_{N_t} \eta_{N_t} \frac{r_{N_t}^3}{\left(\left(\frac{d_1}{\cos \theta_{N_t}} \right)^2 + r_{N_t}^2 \right)^3} \right) \quad (3.12)$$

У разі коли котушки передавача ідентичні, тобто E . $P_1 = P_2 = \dots = P_{N_t} = P_T$, $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_{N_t} = Q_T$, $\eta_1 = \eta_2 = \dots = \eta_{N_t} = \eta_T$ і $r_1 = r_2 = \dots = r_{N_t} = r_T$, формула для розрахунку переданої енергії може бути приведена до вигляду:

$$P_r = P_T Q_T Q_r \eta_t \eta_T \pi^2 r_T^3 r_r^3 \times \left(\frac{1}{\left(1 + \frac{r_T^2}{d_1^2} \right) d_1^6} + \dots + \frac{\cos^6 \theta_n}{\left(1 + \frac{r_T^2 \cos^6 \theta_{N_t}}{d_n^2} \right) d_n^6} \right) \quad (3.13)$$

3.4 SIMO

На рис. 3.3(в) показана базова модель для схеми підключення один вхід / кілька виходів (SIMO). Нехай N_r це число котушок приймача. Подібно схемою MISO, на резонансній частоті кожна котушка приймача взаємодіє з передавальною котушкою, т. о. кожна котушка приймача отримує свою порцію енергії від передавача. Енергія, що отримується приймачем, $m \in \{1, \dots, N_r\}$, розраховується за формулою:

$$P_r^m = P_t Q_t Q_r^m \eta_t \eta_r^m k_m^2 (d_m), \quad (3.14)$$

де Q_r^m і η_r^m – добротність і ефективність m -ої котушки приймача відповідно, d_m це відстань між котушкою m приймача і передавальною котушкою.

Загальна потужність, що передається приймачу, розраховується за такою формулою:

$$P = P_t Q_t \eta_t \left(Q_r^1 \eta_r^1 k_1^2(d_1) + \dots + Q_r^m \eta_r^m k_m^2(d_m) + \dots + Q_r^N \eta_r^N k_{N_r}^2(d_{N_r}) \right), \quad (3.15)$$

де $k_m^2(d_m)$ аналогічні формулі (3.11).

3.5 MIMO

Нехай $k_{n,m}$ і $d_{n,m}$ позначають коефіцієнт зв'язку і відстань між котушкою n приймача і котушкою m передавача відповідно. Для розрахунків в схемі підключення MIMO застосовується система точка-точка (рис. 3.3(г)). Відповідно до неї приймач отримує енергію окремо від кожної окремої котушки передавача. Перехресні зв'язки між котушками приймача і передавача слабкі. Потужність на котушці приймача

$m \in \{1, \dots, N_r\}$, що отримується від $n \in \{1, \dots, N_t\}$ котушки передавача, розраховується за формулою:

$$P_r^{n,m} = P_t^n Q_t^n Q_r^m \eta_t^n \eta_r^m k_{n,m}^2(d_{n,m}), \quad (3.16)$$

де $k_{n,m}^2(d_{n,m})$ аналогічні формулі (3.11).

Повна передана потужність може бути обчислена в такий спосіб:

$$P_r = \sum_{n=1}^{N_t} \sum_{m=1}^{N_r} P_r^{n,m} \quad (3.17)$$

4 ПРИКЛАД ПОБУДОВИ ПРИСТРОЮ ДИСТАНЦІЙНОЇ ЗАРЯДКИ

Генератор, що задає зібраний на ШІМ мікросхемі UC3845, частота роботи 8-9 КГц, з неї імпульси подаються на потужний польовий транзистор IRF3205, навантажений на котушку. Замість зазначеного на схемі живильного акумулятора можна підключити невеликий блок живлення з напругою 12 вольт і потужністю 15-20 ват, можна і більше. Котушка мотається діаметром 25 см, містить 30 витків дроту діаметром 0,3-0,4 мм. Транзистор буде трохи грітися, тому його бажано розташувати на невеликому радіаторі. Резистор R5 теж буде грітися, його потрібно брати потужністю 2-5 ват.

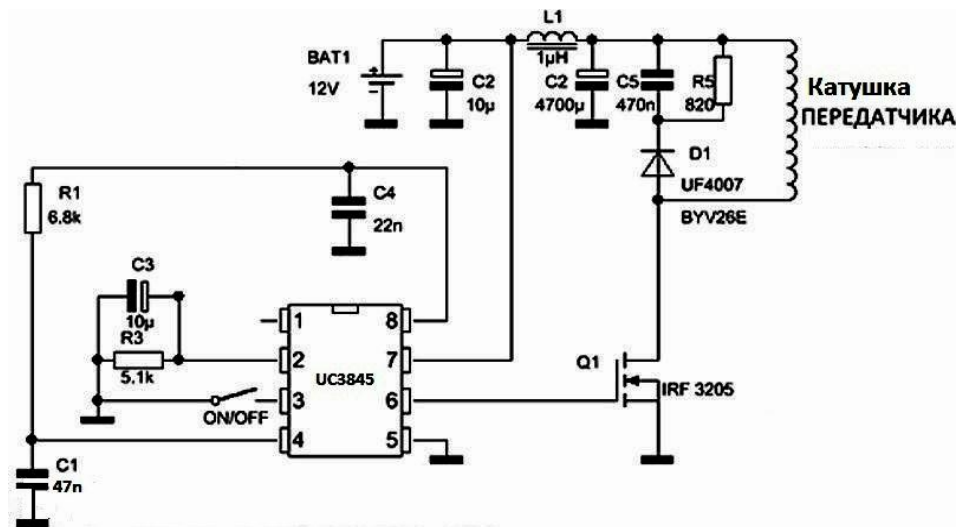


Рисунок 4.1 – Схема бездротової зарядки

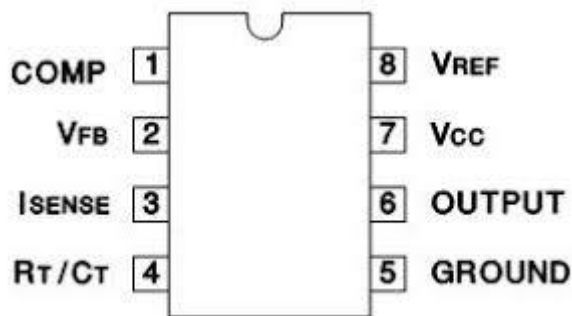


Рисунок 4.2 – Позначення виводів мікросхеми

Comp: (укр. Корекція) вихід підсилювача помилки. Для нормальної роботи ШІМ-контролера необхідно компенсувати АЧХ підсилювача помилки, з цією метою до зазначеного висновку зазвичай підключається конденсатор ємністю близько 100 пФ, другий контакт якого з'єднаний з контактом 2 ІС. Якщо на цьому контакті напруга стане нижче 1 вольта, то на 6 виході мікросхеми буде зменшуватися тривалість імпульсів, тим самим зменшуючи потужність даного ШІМ-контролера.

Vfb: (укр. Напруга зворотного зв'язку) вхід зворотного зв'язку. Напруга на цьому контакті порівнюється із зразковою, який формується всередині ШІМ-контролера UC3845. Результат порівняння модулює шпаруватість вихідних імпульсів, в результаті вихідна напруга блоку живлення стабілізується. Формально другий контакт служить для скорочення тривалості імпульсів на виході, якщо на нього подати вище +2,5 вольта, то імпульси скоротяться і мікросхема знизить потужність.

C / S: (друге позначення I sense) (укр. Струмовий зворотній зв'язок) сигнал обмеження струму. Даний контакт повинен бути приєднаний до резистору в ланцюзі истоку ключового транзистора. У момент перевантаження МОП транзистора напруга на опорі збільшується і при досягненні певного порогу UC3845 припиняє свою роботу, закриваючи вихідний транзистор.

Rt / Ct: (укр. Завдання частоти) підключення частотозадаючого RC-ланцюжка, необхідної для установки частота внутрішнього генератора. R підключається до Vref – опорна напруга, а C до загального проводу (зазвичай вибирається кілька десятків пФ). Ця частота може бути змінена в досить широких межах, зверху вона обмежується швидкодією ключового транзистора, а знизу – потужністю імпульсного трансформатора, яка падає зі зменшенням частоти. Практично частота вибирається в діапазоні 35 ... 85 кГц.

Gnd: (укр. Загальний) загальний контакт, земля.

Out: (укр. Вихід) вихід ШІМ-контролера, підключається до затвору ключового транзистору через резистор або паралельно з'єднані резистор і діод (анодом до

затвору).

V_{cc} : (укр. Живлення) вхід живлення ШІМ-контролера, на цей контакт мікросхеми подається напруга живлення в діапазоні від 16 В до 34 В.

V_{ref} : вихід внутрішнього джерела опорної напруги, його вихідний струм становить до 50 мА, напруга 5 В. Підключається до одного з плечей дільника служить для оперативної регулювання U вихода всього блоку живлення.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання атестаційної роботи розглянуті принципи роботи бездротових зарядок, виконаний порівняльний аналіз різних типів бездротових зарядок з точки зору їх ефективності.

Розглянуто перспективи розробки і тенденції змін бездротових зарядок.

Відзначено що розвиток систем дистанційної передачі енергії неспинно прогресує. Проаналізовано переваги та недоліки бездротового живлення у. Виконано порівняльний аналіз існуючих систем бездротового живлення.

Визначено що вартість та реалізація технології бездротової зарядки на даний момент дуже складна та дорога, також відзначено що технологія має певний рівень розвитку але цього рівня не достатньо для повної заміни звичайних зарядних пристроїв.

Вартість бездротових в порівнянні зі звичайними дуже висока и не дає особливих переваг, але дуже корисну функцію виконує у медицині, технологія бездротової підзарядки імплантів ,або у інших галузях, наприклад бездротова підзарядка дрона-спостерігача у повітрі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Принцип работы UC3845 URL: http://soundbarrel.ru/bit_tehnika/sv_svarka03.html (дата обращения: 29.10.2020)
2. Беспроводная зарядка телефона своими руками URL: https://www.tool-electric.ru/2018/06/blog-post_76.html (дата обращения: 2.11.2020)
3. Технологии беспроводной зарядки. Часть 1. Теоретические основы и способы аппаратной реализации URL: <https://wireless-e.ru/peredacha-energii/tehnologii-besprovodnoj-zaryadki-1/> (дата обращения: 5.11.2020)
4. Ванке В. А. Статья: «СВЧ-электроника» // Журнал, «Электроэнергетика. Наука. Технология. Бизнес». – № 5 2007 г. (дата обращения: 5.11.2020).
5. Статья «Передача электроэнергии без проводов – от начала до наших дней» URL: <https://habr.com/post/373183/> (дата обращения: 9.11.2020)
6. Статья «Взаимная индукция» URL: http://www.hydrumuseum.ru/ru/encyclopedia/glossary/Vzaimnaya_indukciya/ (дата обращения: 9.11.2020)
7. Может ли электричество стать полностью беспроводным? URL: <https://postnauka.ru/faq/97857> (дата обращения: 13.11.2020)
8. Введение в беспроводную передачу электрической энергии URL: <https://radioprogram.ru/post/152> (дата обращения: 17.11.2020)
- 9 Как работает беспроводная зарядка для телефона: это не магия URL: <https://ichip.ru/sovety/ekspluataciya/kak-rabotaet-besprovodnaya-zaryadka-dlya-telefona-eto-ne-magiya-528752> (дата обращения: 25.11.2020)
10. Как работает беспроводная зарядка URL: <https://thecode.media/qi/> (дата обращения: 30.11.2020)
11. Бондаренко І. М., Електронні системи: Навч. посібник / І. М. Бондаренко, О. В. Глухов, О. О. Кравчук // Харків: ХНУРЕ. 2019. – 219с.

12. Бондаренко І.М., Сучасна компонентна база електронних систем: Навч. посібник / І. М. Бондаренко, О. В. Бородін, В. П. Карнаушенко // Харків: ХНУРЕ. 2020. – 268с.

13. Бондаренко І.М., Мікропроцесорні системи контролю та керування: Навч. посібник / І.М. Бондаренко, О.В. Бородін, В.П. Карнаушенко // Харків: ХНУРЕ. 2020. – 244с.

14. Бондаренко І.М., Прилади та пристрої інтегральної електроніки. Частина 1: Навч. посібник / І.М. Бондаренко, О.В. Бородін, В.П. Карнаушенко, Ю.С. Васильєв // Харків: ХНУРЕ. 2020. – 228с.

15. Бондаренко І.М., Моделювання в електроніці: Навч. посібник / І.М. Бондаренко, Л.І. Свідерська, О.В. Грицунов // Харків: ХНУРЕ. 2020. – 144с.