МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

рівень вищої освіти *другий (магістерський)*

на тему Дослідження ефективних методів передачі енергії та розробка бездротового зарядного пристрою для мобільних роботів

Виконав: студента *II* курсу, групи *8.1764*
Клімашин С.І. _____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Напряму підготовки_____
(шифр)
Спеціальності
176
Мікро- та наносистемна техніка
(назва)
Керівник *доцент, доцент, к.т.н.*
Ніконова А.О.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент *інженер-конструктор Конструкторського бюро Колосова Григор'єва І.К.*
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

м. Запоріжжя
2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні

Рівень вищої освіти __*другий (магістерський)*_____
(перший (бакалаврський) рівень, другий (магістерський) рівень)

Напрям підготовки
_____*176*_____
(шифр)

Спеціальність___*Мікро- та наносистемна техніка*_____
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри __*ЕІСПЗ*_____

____*Критська Т.В.*_____

“ 12” *грудня* 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

_____*Клімашину Сергію Івановичу*_____
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження ефективних методів передачі енергії та розробка бездротового зарядного пристрою для мобільних роботів»
керівник роботи_____*Ніконова Аліна Олександрівна*
(прізвище, ім’я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від *“ 27” лютого 2025 року №313-с*
2. Строк подання студентом роботи_____*12 грудня 2025*_____
3. Вихідні дані до роботи *МК Arduino Uno R3, двигуни для Arduino з драйверами, драйвер двигуна L298N, дисплей OLED SSD1306, акумулятор 18650, модуль TTP223, ультразвуковий датчик HC-SR04, датчик перешкод Hw 201, TP4056*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
1 Дослідження ефективних методів передачі енергії
2 Розробка бездротового зарядного пристрою для мобільного робота
3 Техніко-економічне обгрунтування
4 Охорона праці та техногенна безпека
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов’язкових креслень)
Л1-динаміка зростання ринку робототехніки; Л2-методи бездротової енергопередачі; Л3-загальна структурна схема з використанням системи бездротової зарядки; Л4-алгоритм роботи системи бездротової зарядки мобільного робота; Л5-керування напругою в індуктивному бездротовому зарядному модулі для роботизованих систем; Л6-розробка приймача заряду для індукційної системи; Л7-розробка передавача бездротового заряду; Л8-схема електрична принципова

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
I	*Ніконова А.О.*	*.2025*
II	*Ніконова А.О.*	*.2025*
III	*Ніконова А.О.*	*.2025*
IV	*Ніконова А.О.*	*.2025*

7. Дата видачі завдання _____27.02.*2025 року*_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	*Аналіз існуючих методів бездротової передачі енергії та вимог до зарядки мобільних роботів*	*25.03.2025*	
2	*Розробка загальної структурної схеми бездротового зарядного пристрою та алгоритму його функціонування*	*07.04.2025*	
3	*Розробка принципових схем модуляції напруги, генератора високочастотного струму та котушок*	*10.05.2025*	
4	*Розробка схем передавача і приймача бездротової зарядки*	*12.06.2025*	
5	*Розробка повної принципової електричної схеми пристрою*	*21.07-03.08.2025*	
6	*Техніко-економічне обґрунтування.*	*15.08.2025*	
7	*Охорона праці та техногенна безпека.*	*10.10.2025*	
8	*Оформлення пояснювальної записки.*	*30.11.2025*	
9	*Рецензування, нормоконтроль, підписання роботи*	*15.12.2025*	
10	*Оприлюднений захист магістерської роботи*	*18.12.2025*	

Студент _____ *Клімашин С.І.*

(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи) _____ *Ніконова А.О.*

(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено _____ *Верьовкін Л.Л.*

(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить 88 сторінок, 23 рисунків, 17 таблиць, 18 джерел літератури.

Об’єкт дослідження - бездротовий зарядний пристрій для мобільних роботів.

Мета роботи - дослідити ефективні методи бездротової передачі енергії та розробити зарядний пристрій для мобільних роботів.

Завдання роботи - аналіз методів передачі енергії, розробка схеми та алгоритму зарядного пристрою, вибір елементної бази, моделювання та перевірка прототипу.

Методика досліджень - теоретичний аналіз, моделювання у Proteus, розрахунки та експериментальна перевірка прототипу.

Короткий виклад результатів досліджень - досліджено методи бездротової передачі енергії, обґрунтовано вибір індукційної системи для мобільних роботів. Підібрано елементну базу, розроблено схеми передавача й приймача, оптимізовано котушки та стабілізацію напруги. Створено прототип бездротового зарядного пристрою для мобільних роботів.

Результати впроваджень - результати дослідження були представлені та обговорені на ІІ Міжнародній науково-практичній конференції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні ЗНУ «Інженерні інновації та розбудова національної економіки».

Прогнозні пропозиції - рекомендується оптимізувати зарядний пристрій, підвищити ККД передачі енергії та забезпечити одночасне заряджання кількох роботів.

РЕЗИСТОРИ, ТРАНЗИСТОРИ, ДІОДИ, МІКРОСХЕМИ, ДВИГУНИ, ДРАЙВЕР, ДИСПЛЕЙ, КНОПКА, УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ДАТЧИК, ДАТЧИК ПЕРЕШКОД, МОДУЛЬ ЗВОЛОЖУВАЧА ПОВІТРЯ, ВИМИКАЧ, МЕМБРАНА ЗВОЛОЖУВАЧА, КОТУШКИ ІНДУКТИВНОСТІ, КОНДЕНСАТОРИ

Кваліфікаційну роботу виконано на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення з 27.02.2025р. по 12.12.2025 р

ЗМІСТ

ВСТУП 6
1 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ 7
1.1 Методи бездротової передачі енергії 10
1.2 Порівняння методів за ККД, дальність, вартість та безпечність 13
1.3 Аналіз вимог до зарядки мобільних роботів 15
2 РОЗРОБКА БЕЗДРОТОВОГО ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА 23
2.1 Загальна структурна схема системи бездротової зарядки 23
2.2 Алгоритм функціонування системи 25
2.3 Принципова схема модуляції напруги зарядного пристрою 27
2.4 Проєктування системи бездротової зарядки 29
2.4.1 Передавальна та приймальна котушки 29
2.4.2 Генератор високочастотного струму 31
2.4.3 Система стабілізації напруги на приймальному пристрої 32
2.4.4 Оптимізація конструкції котушок для максимального ККД 33
2.5 Розробка функціональних блоків системи 35
2.5.1 Блок керування мікроконтролером 35
2.5.2 Блок виводу інформації 36
2.5.3 Блок керування двигунами 37
2.5.4 Блок ультразвукового вимірювання відстані 38
2.5.5 Блок інфрачервоного датчика перешкод 39
2.5.6 Блок сенсорної кнопки 41
2.5.7 Блок керування модулем зволоження повітря 42
2.5.8 Блок керування двигуном постійного струму 43
2.6 Розробка приймача заряду для індукційної системи 46
2.7 Розробка передавача бездротового заряду 48
3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ 55
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 62
4.1 Основні поняття та визначення пожежної безпеки 62
4.2 Електробезпека 65
4.3 Радіаційна безпека 67
4.4 Теплова безпека 68
4.5 Організація безпечних умов праці 69
4.6 Охорона праці під час монтажу та обслуговування бездротових зарядних пристроїв 73
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ 76
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 78
Додаток А 80
Додаток Б 82
Додаток В 86

ВСТУП

З розвитком і масовим упровадженням мобільних роботів у промисловості, медицині, логістиці та побуті дедалі гостріше постає питання їх стабільного та ефективного живлення. Роботизовані платформи сьогодні беруть на себе значну частину рутинних процесів, підвищують продуктивність і точність виконання операцій, тож вимоги до систем енергопостачання зростають разом із масштабами їхнього використання.

Звичні способи заряджання, зокрема підключення через контактні роз'єми або заміна акумуляторів вручну, вже не відповідають потребам сучасної робототехніки. Контакти поступово зношуються, роботу обмежує прив'язка до зарядних станцій, а постійна участь оператора збільшує витрати та створює ризик додаткових простоїв. Це робить завдання забезпечення автономності особливо важливим.

У такій ситуації на перший план виходять бездротові системи живлення, які дозволяють заряджати роботів без контакта і без залучення людини. Технології бездротової передачі енергії (Wireless Power Transfer, WPT) пропонують різні підходи: індуктивний, магнітно-резонансний, радіочастотний та лазерний. Кожен із них має свої особливості та умови ефективного застосування, тому вибір оптимальної технології потребує зваженого аналізу.

Поширення Інтернету речей і розвиток інтелектуальних систем відкривають ще ширші можливості. Бездротові зарядні станції вже можуть аналізувати стан акумулятора в реальному часі, самостійно визначати потрібний момент підзарядки та коригувати параметри передавання енергії відповідно до навантаження чи режиму роботи робота.

Отже, зростання популярності мобільних роботів закономірно підсилює потребу в ефективних, надійних і безпечних бездротових системах живлення. Їх розвиток підвищить автономність і довговічність робототехніки та розширить можливості її використання в різних сферах. [1]

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

У сучасних умовах стрімкого розвитку автономних роботизованих систем особливо актуальною стає проблема забезпечення їх безперебійного живлення. Надійні джерела енергії, здатні підтримувати роботу роботів протягом тривалого часу без необхідності ручного підключення, є ключовим фактором підвищення продуктивності та автономності. Одним із найбільш перспективних рішень у цій сфері є бездротова передача енергії, яка дозволяє заряджати мобільні платформи без кабелів і механічних контактів, що суттєво спрощує експлуатацію та підвищує надійність роботи.

Однією з основних переваг бездротових зарядних систем є зниження фізичного зношування компонентів. У традиційних станціях перші збої зазвичай виникають у контактних роз’ємах, що впливає на роботу всього комплексу. Бездротова передача енергії усуває цю проблему, забезпечуючи стабільну готовність обладнання до роботи і зменшуючи залежність від оператора. Це значно знижує ймовірність людських помилок та простоїв у процесах, що потребують безперервної роботи.

Особливо актуальною є бездротова зарядка в умовах підвищеної вологості, наявності пилу або агресивного середовища, де механічні контакти швидко виходять з ладу. Саме у таких випадках відсутність фізичного контакту не лише підвищує зручність, але й забезпечує безпеку експлуатації, що робить технологію привабливою для застосування у медичних установах, на складах, на відкритих майданчиках та у промислових умовах із суворими екологічними вимогами.

Сучасні розробки у сфері бездротової передачі енергії не обмежуються оптимізацією конструкції зарядних модулів. Вони передбачають інтеграцію інтелектуальних систем, здатних адаптуватися до режиму роботи конкретного робота. Такі системи відстежують рівень заряду батареї в реальному часі, визначають оптимальний момент для зарядки та автоматично активують процес, мінімізуючи участь людини та знижуючи ризики неправильної експлуатації.

Інтеграція бездротових зарядних станцій у виробничу та логістичну інфраструктуру дозволяє підвищити ефективність роботи робототехнічних комплексів. Роботи заряджаються тільки тоді, коли це необхідно, без вимушених простоїв, а модульність систем дає змогу гнучко розміщувати зарядні точки та масштабувати їх кількість відповідно до навантаження. Синхронізація керування зарядкою з бортовим програмним забезпеченням робота дозволяє автоматично планувати маршрути до зарядних станцій у момент, коли рівень заряду наближається до критичного. Це особливо важливо для автономних роботів, які працюють без постійного контролю оператора.

Сучасні бездротові системи оснащуються механізмами контролю безпеки: датчиками температури котушок, рівня зарядки батарей, інтенсивності електромагнітного випромінювання та автоматичними алгоритмами відключення у разі перегріву або перевантаження. Це забезпечує безпеку роботи обладнання, зменшує ризик аварійних ситуацій та продовжує ресурс компонентів.

Особливу увагу приділяють стандартизації та уніфікації компонентів, що дозволяє забезпечити сумісність різних моделей роботів із зарядними станціями і швидко розгортати систему на нових об’єктах. Такий підхід спрощує масштабування інфраструктури та підвищує її гнучкість у динамічних умовах виробництва та логістики.

Важливим є також віддалений моніторинг і управління станціями зарядки через мережеві платформи. Це дозволяє відстежувати стан роботів і зарядних модулів, планувати графіки зарядки, оперативно реагувати на відхилення від нормальної роботи та забезпечувати стабільність функціонування всього комплексу без необхідності фізичної присутності персоналу.

На рисунку 1.1 показано динаміку зростання світового ринку робототехніки з 2000 по 2025 рік у мільярдах доларів США. Виділено три основні сегменти: промислові роботи (синя лінія), сервісні роботи, включно з

медичними (зелена лінія), та загальний обсяг ринку (помаранчева лінія). Як видно з графіку, після 2015 року темпи зростання значно прискорилися, особливо у сегменті сервісної робототехніки та загалом по ринку.

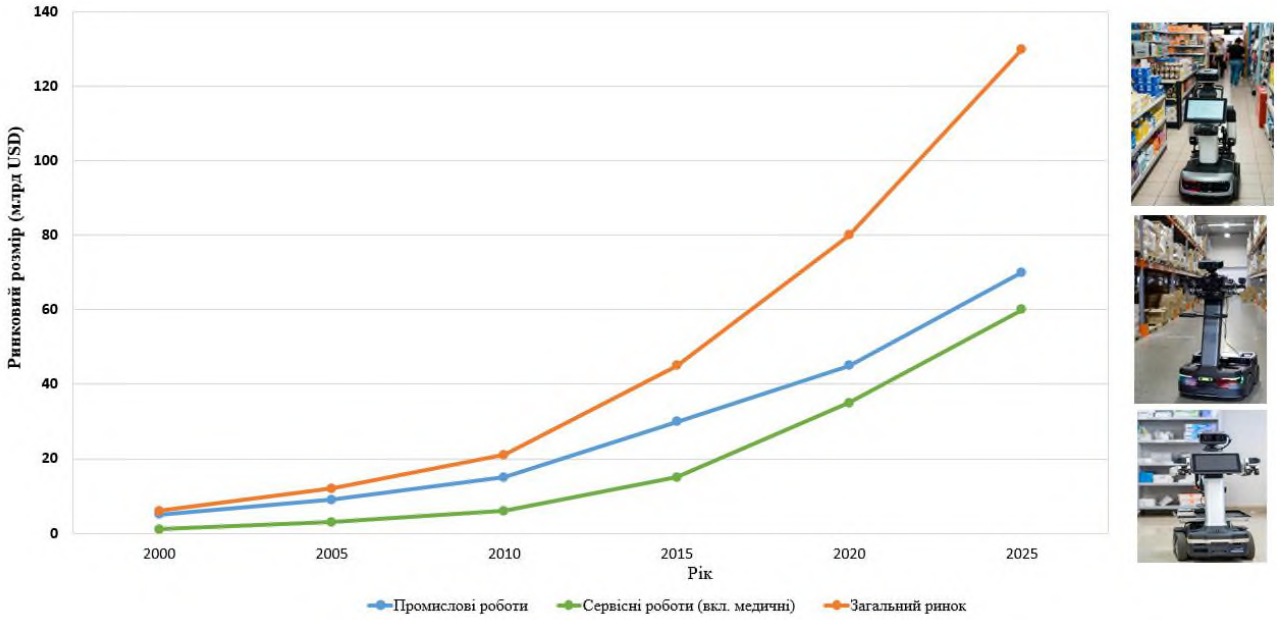


Рисунок 1.1 - Зростання глобального ринку робототехніки

З 2000 до середини 2010-х років галузь розвивалася порівняно повільно й стабільно. У цей період домінували промислові роботи, обсяг ринку яких зріс з 5-7 млрд доларів на початку століття до приблизно 20-25 млрд доларів до 2015 року. Сегмент сервісної робототехніки залишався значно меншим і не перевищував 10 млрд доларів.

Починаючи з 2015-2016 років темпи зростання різко прискорюються. Найдинамічніше розвивається сегмент сервісних роботів: зелена лінія стрімко піднімається і до 2025 року досягає 70-80 млрд доларів, що відображає масове впровадження роботизованих рішень у медицині, логістиці, торгівлі, побуті та сфері послуг. Промислові роботи продовжують зростати, проте повільніше, сягаючи у 2025 році близько 60 млрд доларів.

Загальний обсяг світового ринку робототехніки у 2025 році перевищує 130 млрд доларів, що означає більш ніж двадцятикратне збільшення порівняно з початком 2000-х років. Така траєкторія свідчить про докорінну трансформацію галузі: від переважно промислового застосування до широкого проникнення робототехнічних систем у повсякденне життя та

невиробничі сфери, що стало головним драйвером сучасного експоненційного зростання ринку.

Таким чином, впровадження бездротових зарядних систем не лише забезпечує автономність і безперервність роботи роботів, а й створює умови для розвитку інтелектуальних, безпечних і гнучких виробничих процесів. Вони дозволяють автоматично координувати споживання енергії, підвищувати ефективність використання ресурсів і забезпечують надійність функціонування автономних роботизованих комплексів навіть у складних промислових та логістичних середовищах. [1, 2, 3]

1.1 Методи бездротової передачі енергії

Бездротова передача енергії (Wireless Power Transfer, WPT) - це технологія, що дає змогу передавати електричну енергію без прямого контакту між джерелом живлення та пристроєм, який її отримує. На практиці існує кілька підходів до організації такої передачі. Вони відрізняються один від одного дальністю роботи, коефіцієнтом корисної дії, рівнем складності та сферою застосування. На рисунку 1.2 наведено основні способи, які сьогодні використовують для реалізації бездротового живлення та створення відповідних систем.

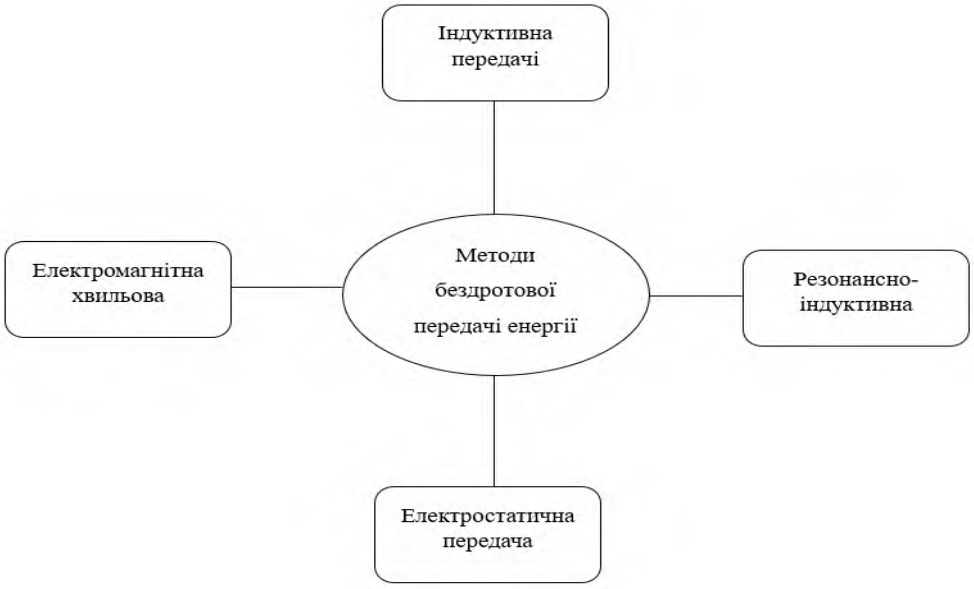


Рисунок 1.2 - Схема методів бездротової енергопередачі.

Індуктивний метод бездротової передачі енергії ґрунтується на відкритому ще Майклом Фарадеєм явищі електромагнітної індукції. Суть процесу зводиться до взаємодії двох котушок. Змінний струм у передавальній котушці створює навколо себе магнітне поле, яке перетинає вторинну котушку і викликає в ній появу електрорушійної сили, а разом з нею і струму. Такий спосіб працює тільки на близьких відстанях - зазвичай у межах кількох сантиметрів, тому його найчастіше застосовують у компактних пристроях на кшталт зарядних платформ для смартфонів, електричних зубних щіток чи роботів, для яких можливе точне позиціонування приймача й передавача.

Перевагою індуктивного методу є висока ефективність, що інколи сягає 90 відсотків. Крім того, система порівняно проста у реалізації, недорога та безпечна: створюване магнітне поле не становить загрози для людини й не створює суттєвих перешкод іншим приладам. Водночас відчутними залишаються його обмеження. Передусім це дуже мала відстань передачі та необхідність точного співпадіння положення котушок. Навіть незначний зсув може різко знизити ефективність, а металеві предмети між котушками інколи й повністю блокують передачу енергії.

Резонансно-індуктивний метод став логічним розвитком класичної індукції. У цьому випадку передавальна й приймальна частини формують LC-

контури, налаштовані на однакову частоту. Робота в резонансі дає змогу значно збільшити дальність дії - у деяких випадках до одного-двох метрів. Крім того, система краще переносить певні зміщення котушок і не втрачає працездатності при невеликих відхиленнях. Такі можливості роблять резонансно-індуктивну передачу привабливою для мобільних роботів, яким не завжди можна забезпечити ідеальне позиціонування.

Попри свої переваги, резонансні системи технічно складніші. Вони потребують точного узгодження частоти й підтримання стабільного резонансного режиму. Через це доводиться застосовувати складніші схеми керування, що підвищує вартість та ускладнює розробку. До того ж ефективність поступово зменшується зі збільшенням відстані, що обмежує сферу застосування.

Ще один підхід до бездротового живлення базується на передаванні енергії у вигляді електромагнітних хвиль. Передавальна антена випромінює радіо- або мікрохвильовий сигнал, який приймається спеціальною антенною системою та перетворюється назад у електричний струм за допомогою ректифікатора. Такий спосіб дає змогу працювати на значно більших відстанях: від кількох метрів до десятків метрів. Його використовують для живлення безпілотників, датчиків, розподілених систем або груп пристроїв, яким можна передавати енергію одночасно.

Перевага методу очевидна - велика дальність та можливість працювати з кількома приймачами. Проте високої ефективності очікувати не варто. Більшість енергії розсіюється у просторі, через що ККД зазвичай становить лише 20-50 відсотків. Крім того, система вимагає прямої видимості між передавачем і приймачем, що суттєво впливає на її практичність. Додаткові обмеження накладають і норми щодо безпеки електромагнітного випромінювання.

Електростатична передача енергії працює на основі електростатичної індукції, у якій змінне електричне поле викликає напругу у розташованому поруч провіднику. Попри те, що принцип цілком фізично обґрунтований, у

реальних умовах він виявився малоефективним. Системи такого типу надзвичайно чутливі до змін навколишнього середовища, нестабільні у роботі й мають дуже низький ККД. Використовувати їх можливо лише там, де магнітні поля небажані або заборонені, наприклад у деяких специфічних медичних чи промислових установках.

У підсумку вибір конкретного методу бездротової передачі енергії залежить від багатьох чинників: необхідної відстані, умов роботи, бажаної ефективності, габаритів пристрою та складності реалізації. Для мобільних роботів найчастіше обирають індуктивні або резонансно-індуктивні рішення, оскільки вони добре поєднують надійність, компактність і достатню потужність. Якщо ж потрібна більша дальність, звертаються до радіочастотних або мікрохвильових технологій, попри їх нижчий ККД і певні експлуатаційні труднощі.

1.2 Порівняння методів за ККД, дальність, вартість та безпечність

Надійне та ефективне живлення є однією з ключових умов стабільної роботи мобільних роботів. Від того, яким способом заряджається акумулятор, залежить не лише тривалість автономної роботи, а й загальна надійність системи. Сучасні розробки дедалі частіше орієнтуються на бездротові технології, що дозволяють відмовитися від жорстких фізичних з’єднань. Це зменшує зношування контактів і спрощує вбудування процесу заряджання у робочий цикл робота.

Для мобільних платформ, які працюють у складних або змінних умовах, бездротове живлення стає особливо зручним рішенням. Воно допомагає зберігати герметичність корпусу, підвищує стійкість до пилу та вологи й дає можливість поповнювати заряд без прямого під’єднання до джерела енергії. У

таблиці 1.1 подано порівняння основних характеристик поширених систем бездротової зарядки.

Таблиця 1.1 - Порівняльний аналіз основних характеристик сучасних систем бездротової зарядки.

Метод	ККД	Дальність дії	Вартість реалізації	Рівень безпеки
Індуктивна передача	Високий (70-90%)	Коротка (до 5 см)	Низька	Високий
Резонансно-індуктивна	Середній (40-70%)	Середня (до 1 м)	Середня	Високий
Електромагнітна хвильова	Низький (10-40%)	Далека (до 10 м+)	Висока	Помірний
Електростатична	Дуже низький (<10%)	Коротка	Низька	Високий

Індуктивна передача енергії демонструє високий коефіцієнт корисної дії - від 70 до 90 %, але працює лише на дуже коротких відстанях, до 5 см. Це робить її надзвичайно ефективною для компактних пристроїв, де елементи розташовані близько один до одного. Крім того, такі системи прості та недорогі у реалізації, а рівень безпеки залишається високим, що і пояснює їх популярність у побутових і невеликих промислових застосуваннях.

Резонансно-індуктивна передача забезпечує дещо менший ККД - приблизно 40-70 %, проте компенсує це значно більшою дальністю дії - до одного метра. Завдяки цьому пристрої не потребують ідеального вирівнювання котушок, що підвищує гнучкість використання. Вартість реалізації систем середня, а рівень безпеки залишається високим, тому резонансні рішення часто застосовують для мобільних роботів та інших пристроїв із рухомими компонентами.

Передача електромагнітними хвилями дозволяє живити пристрої на значно більших відстанях - понад 10 метрів. Проте її ефективність суттєво нижча і складає близько 10-40 %, що пов’язано з розсіюванням енергії у просторі. Вартість таких систем вища, а безпека помірна через вплив електромагнітного випромінювання. Цей метод доцільно використовувати для

спеціалізованих задач, де потрібна віддалена передача енергії, наприклад для безпілотних літальних апаратів або розподілених систем.

Електростатична передача енергії має дуже низький ККД - менше 10 %, працює на коротких відстанях, але при цьому залишає високий рівень безпеки і невелику вартість реалізації. Через низьку ефективність цей метод рідко застосовують у промисловості, хоча він залишається цікавим для наукових і дослідницьких розробок.

Загалом можна зробити висновок: із збільшенням дальності передачі енергії ефективність систем зазвичай знижується, а вартість реалізації зростає. Рівень безпеки залежить від конкретної технології і може варіюватися від високого до помірного. Врахування цих особливостей є ключовим при виборі найбільш придатної системи бездротового живлення для конкретних потреб і умов експлуатації. [3, 4]

1.3 Аналіз вимог до зарядки мобільних роботів

При виборі системи зарядки для мобільних роботів слід враховувати кілька ключових факторів, що визначають ефективність, зручність і безпеку експлуатації. Серед них важливе значення мають тип використовуваного акумулятора, споживана потужність, габарити та вага зарядного модуля. Не менш важливою є наявність можливості автоматичного позиціювання робота на базовій станції, що забезпечує автономне та точне заряджання без участі оператора.

Таблиця 1.2 - Основні параметри та вимоги до системи зарядки мобільних роботів

Параметр	Опис
Тип акумулятора	Літій-іонний, літій-полімерний, NiMH тощо. Визначає напругу, ємність, термін служби, безпеку.
Споживна потужність	Максимальна та середня потужність зарядки, що потрібна для відновлення роботи робота.
Розмір зарядного модуля	Фізичні габарити зарядного пристрою, що впливають на монтаж і розташування.
Вага зарядного модуля	Впливає на мобільність робота, особливо для невеликих моделей.
Автоматичне позиціювання	Системи і технології (сенсори, камери, магніти), що забезпечують точне стикування з базовою станцією.
Тип зарядки	Контактна (через конектори) або безконтактна (індуктивна, резонансна).
Час зарядки	Важливий параметр для оперативності роботи робота.
Сумісність з базовою станцією	Можливість інтеграції з наявними станціями зарядки або необхідність розробки нових рішень.
Безпека зарядки	Захист від перегріву, короткого замикання, перевантаження.

Тип акумулятора визначає багато технічних характеристик роботизованих пристроїв. Він впливає на робочу напругу, енергоефективність, надійність та безпеку системи. Найпоширенішими залишаються літій-іонні акумулятори завдяки високій енергетичній щільності при компактних розмірах. Разом із цим вони вимагають ретельного контролю температури та рівня заряду, адже перевищення допустимих параметрів може спричинити деградацію елементів або навіть займання.

Для менш енергоємних систем, де компактність і мала вага не є критично важливими, іноді застосовують нікель-металогідридні (NiMH) акумулятори. Вони простіші у використанні, більш витривалі до різних умов експлуатації та

не потребують складних схем захисту, що робить їх придатними для недорогих або допоміжних мобільних платформ.

Крім літій-іонних і NiMH, у сучасній робототехніці активно повертаються до використання літій-залізо-фосфатних акумуляторів (LiFePO4 або LFP). Хоча їхня питома енергетична щільність нижча (90-160 Вт·год/кг проти 200-300 Вт·год/кг у класичних NMC/NCA літій-іонних), вони мають значно більший ресурс (3000-7000 повних циклів проти 800-2000), практично не схильні до теплового розгону навіть при фізичному пошкодженні чи перезаряді, і зберігають стабільну напругу протягом майже всього розряду. Це робить їх ідеальним вибором для промислових роботів, великих наземних дронів, складських систем типу AMR і сервісних роботів, де безпека і довговічність важливіші за максимальну компактність.

Останніми роками швидко набирають популярність твердотільні літієві акумулятори (solid-state). Замість рідкого електроліту в них використовується твердий (керамічний, полімерний або сульфідний), що дозволяє підвищити енергетичну щільність до 400-500 Вт·год/кг і навіть більше, усунути ризик витікання електроліту і суттєво знизити ймовірність займання. Такі батареї вже тестуються в гуманоїдних роботах (Figure 02, Tesla Optimus Gen2, Boston Dynamics Atlas нового покоління) і в дронах військового призначення, але поки що їхня вартість у десятки разів вища за звичайні літій-іонні, а виробництво обмежене пілотними партіями компаній типу QuantumScape, Solid Power і Toyota.

Для мікро- і нанороботів, медичних імплантованих пристроїв і роїв крихітних роботів дедалі частіше застосовують тонкоплівкові літієві акумулятори та суперконденсатори. Тонкоплівкові батареї (товщина 0.1-0.5 мм) виготовляються методом вакуумного напилення і можуть бути інтегровані безпосередньо в конструкцію або навіть гнучких роботів. Суперконденсатори (EDLC або літій-іонні гібридні) забезпечують миттєві сплески потужності до десятків кіловат на кілограм і практично необмежену кількість циклів (мільйони), але зберігають дуже мало енергії (5-30 Вт·год/кг). Тому їх зазвичай

комбінують із основною батареєю для покриття пікових навантажень під час старту двигунів або роботи гідравліки.

Окремий напрямок - акумулятори на основі літій-сірки (Li-S) і літій-повітря (Li-Air). Теоретична питома ємність Li-S сягає 2600 Вт·год/кг, Li-Air - до 11 000 Вт·год/кг (порівняно з 250-300 у сучасних Li-ion). Такі системи здатні кардинально збільшити час автономної роботи важких роботів і безпілотних літальних апаратів, але поки що страждають від швидкої деградації сірчаного катода і чутливості до вологи та CO_2. Проте стартапи типу Sion Power та PolyPlus уже демонструють прототипи з 500-600 Вт·год/кг і 1000+ циклами, які планують вивести на ринок до 2027-2028 року.

Не варто забувати й про натрієві акумулятори (Na-ion), які останні два роки стрімко дешевшають завдяки CATL, BYD і HiNa Battery. Натрій значно дешевший і доступніший за літій, не потребує кобальту чи нікелю, а питома щільність вже досягає 160-200 Вт·год/кг. Для робототехніки це перспективний варіант для стаціонарних і напівстаціонарних систем (роботи-прибиральники великих площ, зарядні станції, логістичні платформи), де вага менш критична, а ціна і екологічність виходять на перший план.

Нарешті, у деяких вузькоспеціалізованих задачах продовжують застосовувати первинні (неперезаряджувані) літій-тіоніл-хлоридні ($Li\text{-}SOCl_2$) і літій-діоксид-марганцеві ($Li\text{-}MnO_2$) елементи. Вони мають екстремально низький саморозряд (до 20-30 років зберігання), працюють при -55...+150 °C і видають високу напругу (3.6-3.9 В на елемент), тому їх ставлять у військових і космічних роботів, буйки, датчики в арктичних умовах і глибоководні апарати, де заміна батареї неможлива або надто дорога.

Таким чином, вибір типу акумулятора для роботизованого пристрою вже давно вийшов за межі простого протиставлення "літій-іонний проти всіх інших" і перетворився на багатошарове інженерне рішення, де одночасно враховуються енергетична та потужнісна щільність, цикловий і календарний ресурс, температурний діапазон, безпека, вартість і навіть можливість переробки після закінчення терміну служби.

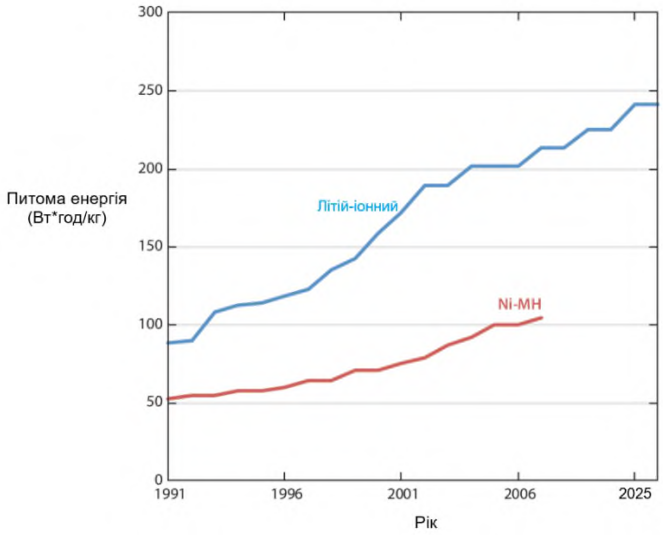


Рисунок 1.3 - Динаміка зростання питомої енергії акумуляторів.

На графіку показано зміну питомої енергії двох типів акумуляторів у період з 1991 по 2025 рік. Літій-іонні акумулятори (синя лінія) демонструють стабільне й значне зростання енергетичної щільності - від приблизно 90 Вт·год/кг до майже 250 Вт·год/кг. Натомість Ni-MH акумулятори (червона лінія) мають меншу динаміку та обмежений потенціал росту - від приблизно 50 до 110 Вт·год/кг.

Ці дані підтверджують технологічну перевагу літій-іонних елементів, які сьогодні стали стандартом для більшості мобільних, побутових і роботизованих пристроїв, поступово витіснивши менш ефективні Ni-MH рішення.



Рисунок 1.4 - Порівняння впливу ефекту пам’яті на NiCd та Li-Ion акумулятори.

При використанні NiCd акумуляторів переривчасте навантаження може призводити до втрати до 30 % початкової ємності. Літій-іонні батареї цього ефекту не мають: їх можна заряджати у будь-який момент без шкоди для елементів, що значно спрощує експлуатацію роботизованих систем.

Рівень енергоспоживання робота є ще одним важливим фактором при виборі зарядного модуля. Важливо враховувати не лише середнє навантаження під час робочого циклу, а й пікові значення, які виникають при інтенсивній роботі або швидкій зарядці. Недостатньо потужне джерело живлення може призвести до нестабільної роботи пристрою або перевантаження електромережі. Тому при проектуванні зарядного вузла необхідно збалансувати максимальні та середньодобові енергоспоживання, щоб забезпечити і ефективну зарядку, і стабільну роботу робота.

Розмір і маса зарядного модуля також мають велике значення для мобільних платформ. Обмежений внутрішній простір та вимоги до маневреності накладають серйозні обмеження на габарити обладнання. Зарядний блок повинен бути компактним, не заважати руху, не зміщувати центр мас і не створювати додаткових навантажень на ходову частину. Сучасні рішення орієнтовані на інтеграцію енергоефективних схем у мініатюрному виконанні з використанням сучасних компонентів і технологій розсіювання тепла.

Для забезпечення автономності роботів широко застосовується автоматичне позиціювання на базовій станції. Пристрій самостійно орієнтується у просторі та знаходить зарядну платформу без участі оператора. Методи навігації варіюються від простих магнітних напрямних до складних алгоритмів із використанням камер, LiDAR-датчиків або ультразвукових сенсорів. Надійність такого позиціювання прямо впливає на ефективність зарядки, адже правильне стикування необхідне для передачі енергії, особливо при контактних методах.

Тип зарядки також визначає експлуатаційні властивості системи. Контактна зарядка забезпечує високу ефективність завдяки прямому

з’єднанню, але потребує точного вирівнювання та може піддаватися механічному зносу. Бездротові методи, як індуктивна чи резонансна передача, надають більше свободи у розташуванні, усувають проблему зносу контактів, проте частина енергії втрачається у вигляді тепла, а ефективна відстань передавання обмежена. Вибір способу зарядки визначається конкретним застосуванням, умовами роботи та вимогами до довговічності.

Час зарядки є критичною характеристикою для продуктивності роботів, особливо при багаторазовому використанні протягом доби. Водночас важливо зберегти ресурс акумулятора, уникаючи надмірного струму або перегріву. Тому сучасні системи часто застосовують інтелектуальні алгоритми, які регулюють силу струму залежно від стану батареї та зовнішніх умов.

Сумісність зарядного модуля з існуючою інфраструктурою також є важливою. Уніфіковані роз’єми, стандартизовані протоколи та підтримка різних напруг дозволяють зменшити витрати на інтеграцію нових пристроїв і полегшують масштабування систем.

Не менш важливим аспектом є безпека. Акумулятори зберігають значну кількість енергії, і навіть невелика помилка може мати серйозні наслідки. Тому сучасні системи зарядки оснащують захистами від короткого замикання, перевантаження, перегріву та неправильного підключення. Надійність зарядної системи впливає не лише на тривалість життя робота, а й на безпеку оточення та користувача. [5, 6, 7]

Головною метою цієї кваліфікаційної роботи є вивчення сучасних підходів до передачі енергії та розробка бездротової системи заряджання, призначеної для мобільних роботів**.** Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасних методів бездротової передачі енергії та визначити найбільш ефективні для мобільних робототехнічних систем;

- дослідити фізичні принципи індуктивної та резонансної передачі енергії та оцінити їхні переваги і недоліки;

- розробити загальну структуру та принципову електричну схему бездротового зарядного пристрою;

-обрати елементну базу, мікроконтролер і вузли живлення для системи;

- провести моделювання пристрою у середовищі Proteus або аналогічному ПЗ, та перевірити відповіднсть результатів роботи до теоретичних розрахунків

- розрахувати параметри індуктивних котушок для оптимальної передачі енергії;

- розробити алгоритм керування процесом заряджання мобільного робота;

- зібрати прототип системи та перевірити його працездатність у реальних умовах.

2 РОЗРОБКА БЕЗДРОТОВОГО ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА

2.1 Загальна структурна схема системи бездротової зарядки

На рисунку (2.1) наведено схему функціонування системи з використанням бездротової зарядки.



Рисунок 2.1 - Загальна структурна схема з використанням системи бездротової зарядки.

Зображена схема демонструє взаємодію між основними компонентами системи живлення і керування пристроєм, що підтримує бездротову зарядку.

У центрі цієї архітектури - індуктивна передача енергії, яка є основою бездротової зарядки. Ця технологія працює завдяки створенню змінного магнітного поля, що генерується у передавальній котушці, яке потім індукує електричний струм у приймальній котушці пристрою. Такий процес відбувається без фізичного контакту між зарядним пристроєм і споживачем енергії, ґрунтуючись на законі електромагнітної індукції Фарадея.

Первинний блок заряду відповідає за надходження енергії в систему. Цей блок може отримувати живлення двома способами: через провідне підключення або через схему бездротової зарядки. Перемикання між цими джерелами виконує перемикач живлення, який автоматично визначає активне джерело живлення і перенаправляє енергію до відповідного входу.

Коли заряджання відбувається бездротовим способом, енергія надходить із передавального контуру, що генерує змінне магнітне поле. Це поле вловлюється приймальною котушкою, після чого енергія надходить через перемикач до центрального блока заряду (позначеного червоним). Саме він відповідає за розподіл енергії до всіх функціональних елементів пристрою.

Ключовим вузлом керування є керуючий процесор. Він отримує живлення з блока заряду і координує роботу всієї системи. Зокрема, процесор приймає сигнали від інфрачервоних сенсорів, які виявляють теплові об’єкти, та ультразвукових сенсорів, які дозволяють оцінювати відстань до перешкод. Оброблена інформація використовується для прийняття рішень щодо переміщення пристрою, що передається на драйвер мотору, а далі - до блоку двигунів.

Таким чином, уся система функціонує як інтегрована платформа, в якій навігації та відображення інформації. Завдяки цьому пристрій здатен автономно функціонувати, реагувати на навколишнє середовище та адаптувати свою поведінку, залишаючись при цьому енергонезалежним від традиційних кабельних рішень.

2.2 Алгоритм функціонування системи

На рисунку 2.2 подано алгоритм роботи системи бездротової зарядки мобільного робота.

Алгоритм відображає логічну послідовність дій мікроконтролера під час контролю рівня заряду, пошуку зарядної станції та виконання процесу заряджання.

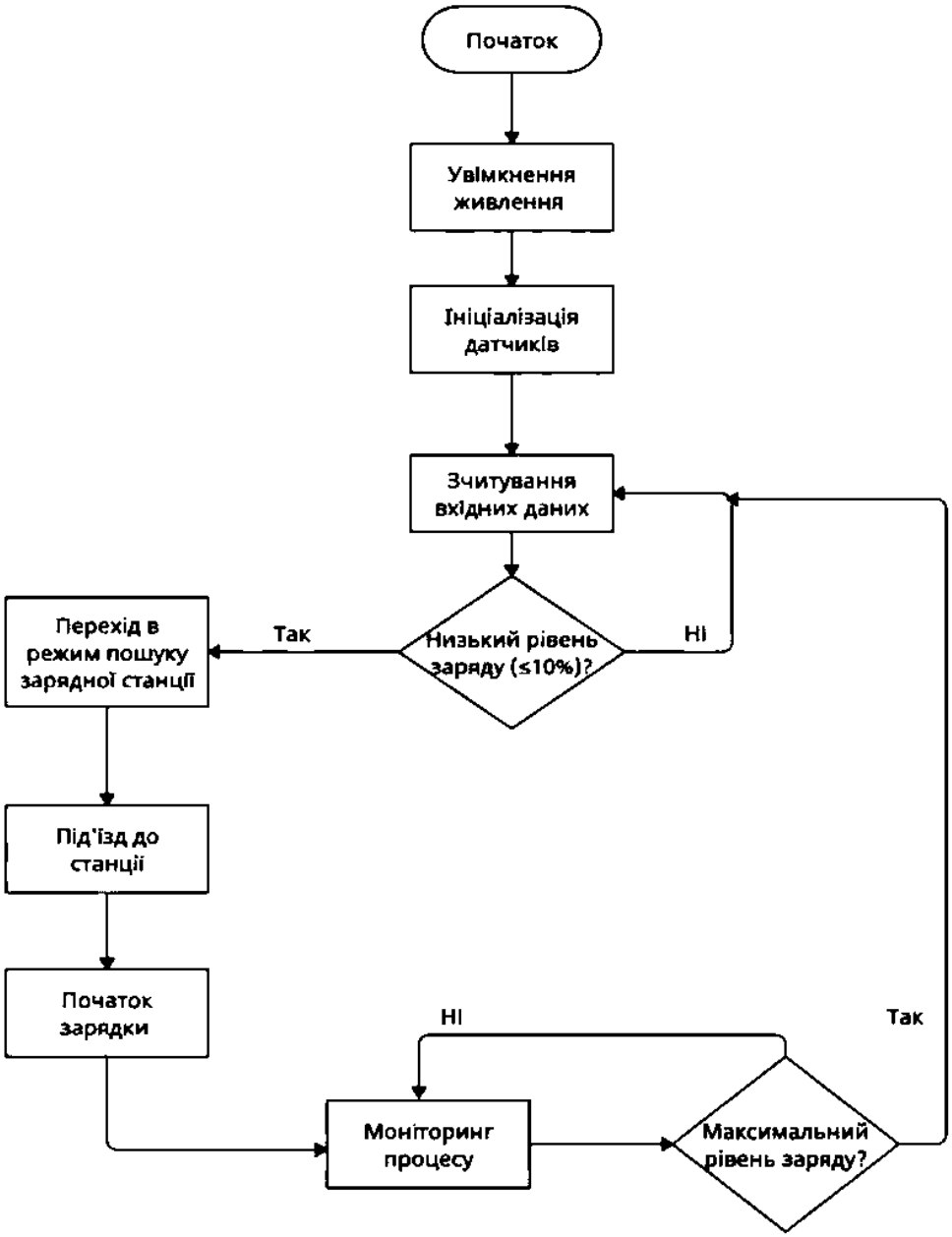


Рисунок 2.2 - Алгоритм роботи системи бездротової зарядки мобільного робота.

Після подачі живлення система автоматично переходить у початковий режим роботи. Контролер оцінює стан енергоживлення, перевіряє напругу та виконує стабілізацію живлення для мікроконтролера та підключених модулів. Якщо всі параметри відповідають нормі, система готова до подальших дій.

Наступним етапом відбувається ініціалізація датчиків. У роботі активуються сенсори контролю напруги, струму, температури, рівня заряду, а також навігаційні сенсори, які допомагають орієнтуватися під час пошуку зарядної станції. Кожен датчик проходить тест на працездатність і підтверджує готовність до роботи.

Інформація про рівень заряду акумулятора, температурні параметри, сигнали від станції та стан навколишнього середовища збирається та обробляється контролером. Ці дані зберігаються у внутрішній пам’яті для подальшого аналізу. На основі отриманої інформації система перевіряє рівень заряду. Якщо він перевищує 10%, робот продовжує виконувати свою роботу, періодично оновлюючи дані. У разі, коли рівень заряду падає до 10% або нижче, контролер активує режим пошуку зарядної станції.

У цьому режимі навігаційні сенсори сканують оточення в пошуках сигналу зарядної станції. Коли станцію виявлено, робот рухається до неї, регулюючи швидкість та положення корпусу для точного вирівнювання контактів або індукційних елементів. Після досягнення точки зарядки система перевіряє правильність з’єднання і починає процес заряджання. Контролер поступово збільшує струм до робочого рівня, постійно стежачи за напругою, температурою та струмом, щоб уникнути перегріву або перевантаження акумулятора.

Протягом заряджання система здійснює постійний моніторинг параметрів. Досягнувши максимального заряду, контролер плавно знижує струм до нуля, відключає зарядне коло і зберігає інформацію про заряд у пам’яті. Після цього робот знову готовий до виконання завдань, і цикл роботи повторюється.

Завдяки такій організації процесу система повністю автономна: робот самостійно визначає момент, коли необхідна зарядка, безпечним чином поповнює енергію та продовжує роботу без участі оператора. [8]

2.3 Принципова схема модуляції напруги зарядного пристрою

На рисунку (2.3) представлено схему модуляції напруги для бездротового зарядного пристрою мобільного робота.

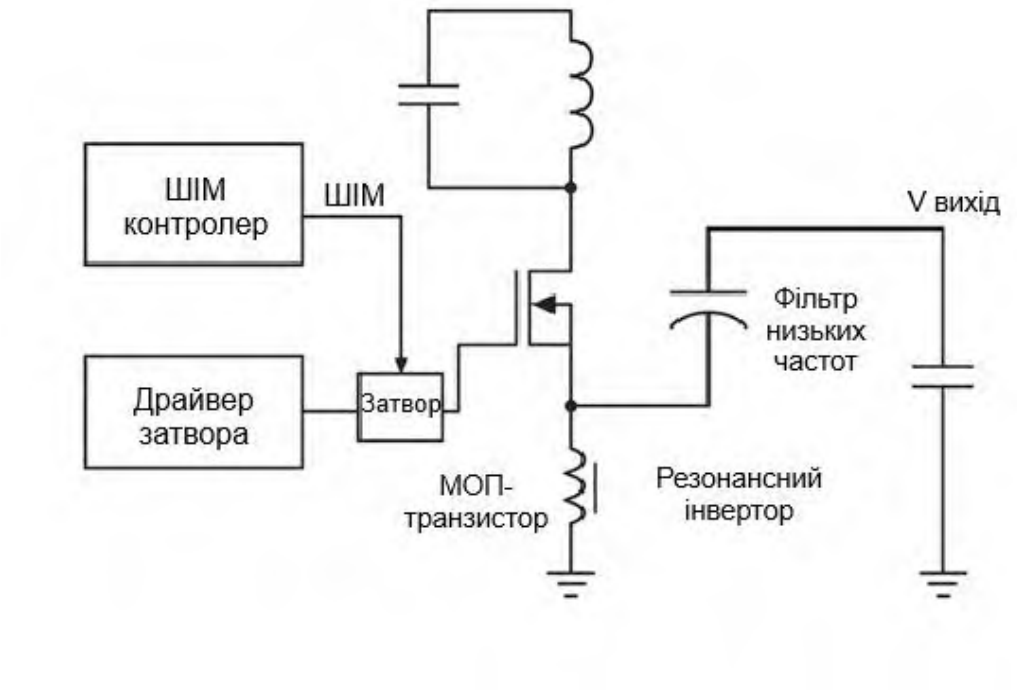


Рисунок 2.3 - Схема керування напругою в індуктивному бездротовому зарядному модулі для роботизованих систем.

Схема працює на основі імпульсно-широтної модуляції, що дозволяє ефективно керувати передачею енергії в бездротовому зарядному пристрої. Контролер формує високочастотний ШІМ-сигнал із заданою частотою,

причому змінювана скважність цього сигналу визначає середнє значення напруги, яка надходить на силовий транзистор.

Сигнал передається на драйвер керування затвором, що підсилює його до рівня, необхідного для надійного відкривання та закривання МОП-транзистора. Транзистор у схемі виконує роль високочастотного ключа, комутуючи постійну напругу на інвертор. Під час перемикання струм проходить через резонансний контур, утворений індуктивністю та ємністю. Саме цей контур генерує синусоподібний сигнал, який є оптимальним для індуктивної передачі енергії на приймальну сторону.

На виході передавача формується високочастотне електромагнітне поле, яке через повітряний проміжок індукує струм у приймальній котушці робота. Щоб забезпечити стабільну напругу і зменшити пульсації, після котушки використовується фільтр низьких частот, який перетворює змінний сигнал у стабільну постійну напругу.

Контролер також отримує зворотний зв’язок із приймальної сторони - наприклад, через Bluetooth або інший канал - що дозволяє динамічно регулювати скважність ШІМ і підтримувати оптимальний режим заряджання незалежно від відстані до зарядної станції або рівня заряду акумулятора.

Особливу увагу приділено енергоефективності: система зменшує споживання електроенергії, мінімізує вплив на навколишнє середовище та підтримує баланс між продуктивністю й економією енергії. Крім того, сучасні технології, такі як машинне навчання для прогнозування процесу зарядки та IoT для моніторингу стану системи, інтегровані для підвищення автономності та надійності роботи пристрою.

2.4 Проєктування системи бездротової зарядки

2.4.1 Передавальна та приймальна котушки

У роботі розглядаються технічні аспекти створення системи бездротової зарядки електронного пристрою. Головна мета полягає в тому, щоб забезпечити ефективну та стабільну передачу енергії від зовнішнього джерела до приймача без використання дротів. Проєкт охоплює кілька ключових елементів: котушки індуктивного зв’язку, які передають енергію, систему стабілізації напруги для надійної роботи пристрою, генератор високочастотного струму, що забезпечує оптимальну індукцію, а також продуману оптимізацію компонентів для підвищення загального ККД системи.

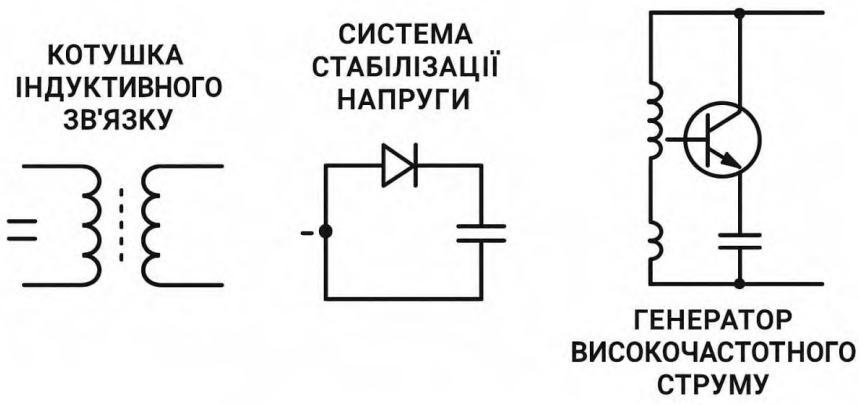


Рисунок 2.4 - Компоненти системи індуктивної енергопередачі

Принцип роботи бездротової зарядки ґрунтується на явищі електромагнітної індукції між двома котушками: передавальною та приймальною. Передавальна котушка створює змінне магнітне поле, а приймальна «ловить» його та перетворює назад у електричний струм. Для цього передавальна котушка підключена до генератора високої частоти, який формує змінний струм. Саме цей струм породжує магнітне поле, що

поширюється у просторі і взаємодіє з котушкою-приймачем. У результаті в приймальній котушці з’являється струм, і пристрій починає заряджатися. На перший погляд все здається простим, але ефективність передачі енергії значною мірою залежить від конструкції обох котушок.

При проєктуванні котушок враховують кілька ключових параметрів. Кількість витків дроту, зазвичай від десяти до двадцяти, впливає на індуктивність: чим більше витків, тим вища індуктивність, але водночас зростають і розміри котушки. Діаметр дроту обирають у межах 0,3-0,6 мм: занадто тонкий дріт сильно нагрівається, а товстий займає багато місця. Діаметр самої котушки, як правило, становить від 30 до 50 мм, що є компромісом між зручністю розміщення та ефективністю індуктивної передачі. Також важливою є робоча частота, зазвичай у діапазоні 100-200 кГц, оскільки на таких частотах індуктивний зв’язок стає більш ефективним.

Щоб оцінити, наскільки добре пов’язані котушки, використовують поняття взаємної індуктивності, яка позначається літерою M. Цей параметр показує, наскільки ефективно передавальна котушка може індукувати струм у приймальній і багато в чому визначає загальну ефективність зарядної системи. Взаємну індуктивність розраховують за формулою:

$$M = k * \sqrt{L_1 * L_2} \tag{2.1}$$

Тут L_1 і L_2 - індуктивності передавальної та приймальної котушок, а k - коефіцієнт зв’язку між котушками, який показує, наскільки ефективно енергія передається від однієї котушки до іншої. Його значення лежить у межах від 0 до 1. Цей параметр допомагає інженерам передбачити ефективність передачі енергії та оптимізувати конструкцію котушок для максимальної продуктивності системи. [9]

2.4.2 Генератор високочастотного струму

Для нормальної роботи бездротової зарядної системи передавальну котушку необхідно збуджувати змінним струмом досить високої частоти. Для цього використовується генератор високочастотного струму, який створює стабільне коливання та формує змінне магнітне поле навколо котушки.

Зазвичай генератор включає кілька важливих елементів. Перш за все, потрібне джерело живлення, найчастіше це постійна напруга, наприклад 12 В від акумулятора або блоку живлення. Безпосередньо коливання формує генератор імпульсів, де в простих схемах може застосовуватися знайомий багатьом таймер NE555. Він створює послідовність імпульсів, які надходять до керуючого елемента, найчастіше це MOSFET або IGBT транзистор, наприклад IRF540. Транзистор працює як високочастотний ключ, відкриваючись і закриваючись відповідно до сигналу генератора, подаючи імпульси струму на котушку.

Центральною частиною процесу є LC-контур, який складається з індуктивності та ємності і визначає резонансну частоту системи. Саме цей контур дозволяє досягти максимальної ефективності передачі енергії, підлаштовуючи роботу генератора так, щоб котушка працювала на оптимальній частоті. Резонансна частота розраховується за класичною формулою:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{Lc}} \tag{2.2}$$

Тут f - це резонансна частота в герцах, L - індуктивність котушки в Генрі, а C - ємність конденсатора у контурі в фарадах.

Щоб краще уявити роботу такого генератора, можна розглянути приклад. Якщо взяти котушку з індуктивністю L=10 μГн і конденсатор C=100 нФ то резонансна частота коливального контуру буде приблизно такою,

що дозволяє передавальній котушці ефективно формувати змінне магнітне поле для бездротової передачі енергії.

$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{10 \times 10^{-6} * 100 * 10^{-9}}} \approx 159 \text{ кГц}$$

Саме така резонансна частота є оптимальною для індуктивної бездротової передачі енергії в побутових умовах. Вона достатньо висока, щоб забезпечити ефективну індукцію, і водночас не настільки, щоб створювати серйозні електромагнітні завади. Завдяки цьому система працює безпечно і надійно, передаючи енергію туди, де вона потрібна.

2.4.3 Система стабілізації напруги на приймальному пристрої

Оскільки на виході приймальної котушки формується змінний струм, його неможливо подавати безпосередньо на споживач, наприклад на мікроконтролер або акумулятор. Тому необхідно перетворити змінну напругу на стабільну постійну. Для цього використовується класична схема, що поєднує випрямляч, фільтр і стабілізатор напруги.

Випрямляч зазвичай реалізується на основі Шотткі-діодів, які відрізняються малим прямим падінням напруги, що дозволяє зменшити втрати і підвищити ефективність системи. Після випрямлення сигнал надходить на фільтр згладжування, який часто виконують у вигляді великого електролітичного конденсатора. Його завдання - усунути пульсації випрямленої напруги і забезпечити більш плавний постійний сигнал.

Останнім етапом є стабілізація напруги за допомогою DC-DC перетворювача. Він підтримує постійну напругу на потрібному рівні,

наприклад 5 В. Для малопотужних пристроїв часто використовують лінійний стабілізатор AMS1117 5V, який надійно забезпечує необхідний рівень живлення.

Оцінити напругу, яку можна очікувати на виході після випрямлення, можна за спрощеною формулою, що враховує амплітуду змінного сигналу і падіння напруги на діодах.

$$U_{\text{вих}} \approx U_{\text{ін}} - 2 * U_{\text{діод}} \quad (2.3)$$

Тут $U_{вих}$ - це випрямлена напруга після діодного мосту, $U_{ін}$ - амплітуда змінної напруги на вході випрямляча, а $U_{діод}$ - падіння напруги на одному Шотткі-діоді.

Для прикладу, якщо амплітуда сигналу з котушки становить близько 7 В, а в схемі використано два Шотткі-діоди з падінням по 0,3 В, то на виході після випрямлення отримаємо приблизно 6,4 В. Це вже достатньо для подальшого згладжування та стабілізації напруги для живлення пристрою.

$$U_{\text{вих}} \approx 7 - 2 * 0{,}3 = 6{,}4 \text{ В}$$

Цього вже достатньо для подальшої стабілізації до 5 В, щоб живити логіку або заряджати батареї.

2.4.4 Оптимізація конструкції котушок для максимального ККД

Підвищення ефективності бездротової передачі енергії є ключовим завданням при створенні сучасних зарядних систем, особливо коли простір обмежений, а енергетичні вимоги мобільних пристроїв високі. Високий ККД

системи залежить не лише від електричної схеми, а й від правильного вибору конструктивних рішень та матеріалів.

Одним із важливих факторів є якість провідника. Для зменшення втрат на джоулеве нагрівання доцільно використовувати мідний дріт з низьким питомим опором, який мінімізує втрати при проходженні змінного струму високої частоти. Не менш важлива форма котушки: плоска спіральна конструкція дозволяє більш ефективно формувати магнітне поле в напрямку приймальної котушки, зменшуючи витоки потоку в сторони і покращуючи електромагнітний зв’язок між передавачем і приймачем.

Щоб сконцентрувати магнітний потік і зменшити паразитні втрати, у котушки часто встановлюють феритові осердя. Ферити відзначаються високою магнітною проникністю та низькими втратами на високих частотах, що робить їх ефективними для індуктивних систем. Крім того, для оптимізації роботи важливо правильно підібрати кількість витків і діаметр проводу. Збільшення витків підвищує індуктивність, але надмірна кількість може збільшити активний опір, а діаметр провідника потрібно підбирати з урахуванням ефекту поверхневого струму, характерного для високочастотних режимів.

Ефективність передачі енергії в таких системах зазвичай оцінюють через відношення вихідної потужності до вхідної:

$$\eta = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} \tag{2.4}$$

У цій формулі $P_{вих}$ означає потужність, яку отримує навантаження на приймальній стороні, а $P_{вх}$ - потужність, яку споживає передавальний пристрій. При цьому ефективність системи залежить не лише від електричних характеристик, а й від механічного розташування котушок. Важливо, щоб котушки були правильно центровані та знаходилися на оптимальній відстані

одна від одної. Крім того, сторонні впливи, наприклад металеві предмети або інші перешкоди між передавачем і приймачем, можуть суттєво знижувати ККД системи. [10, 11]

2.5 Розробка функціональних блоків системи

2.5.1 Блок керування мікроконтролером

Блок керування мікроконтролером відповідає за обробку вхідних сигналів, керування периферійними пристроями та реалізацію основної логіки роботи системи. Основним елементом цього блоку є плата Arduino Uno, на якій розташований мікроконтролер ATmega328P. Завдяки цифровим і аналоговим входам/виходам, цей блок забезпечує взаємодію з сенсорами, реле та іншими елементами схеми. На рисунку 2.5 наведено зовнішній вигляд плати Arduino, яка використовується як основний керуючий елемент системи.

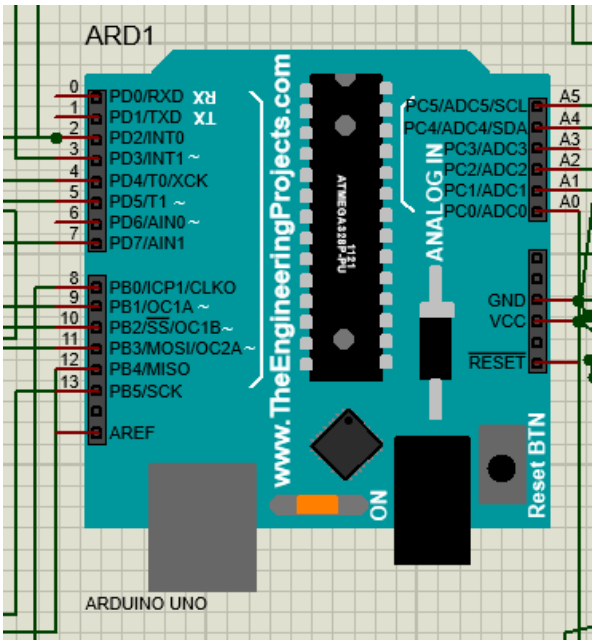


Рисунок 2.5 - Плата Arduino Uno як керуючий елемент системи

Плата Arduino Uno R3 є центральним керуючим елементом системи. Вона базується на мікроконтролері ATmega328, що забезпечує обробку сигналів, управління периферійними пристроями та виконання програмованих алгоритмів. Плата містить 14 цифрових входів/виходів (з них 6 можуть використовуватися як ШІМ-виходи), 6 аналогових входів, роз'єм живлення, USB-інтерфейс для програмування та комунікації з комп'ютером. Завдяки наявності стандартних роз'ємів і сумісності з модульними щитами (shield), Arduino забезпечує гнучке розширення функціоналу, що дозволяє підключати датчики, реле, дисплеї та інші виконавчі пристрої, реалізуючи повний контроль над роботою системи

2.5.2 Блок виводу інформації

Для відображення інформації про стан системи використовується блок виводу на OLED-дисплей. Його зовнішній вигляд та підключення показано на рисунку 2.6.

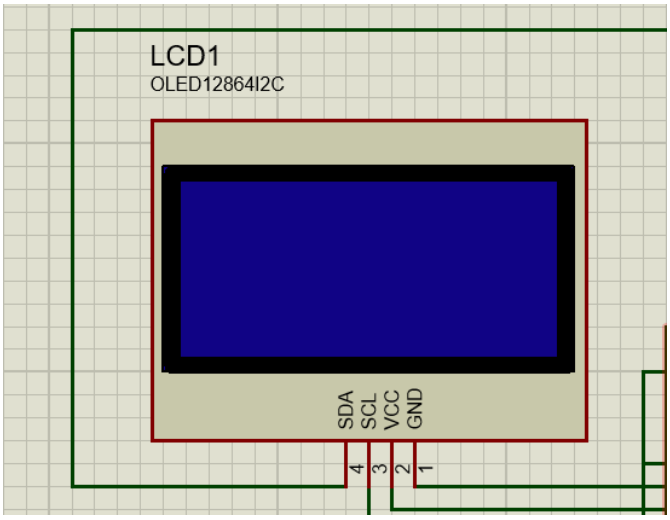


Рисунок 2.6 - OLED-дисплей 128×64 з інтерфейсом I2C

Блок виводу інформації реалізовано за допомогою OLED-дисплея типу 128×64 з інтерфейсом I2C. Він забезпечує візуальне відображення ключових

параметрів роботи системи, таких як рівень заряду, стан бездротової передачі енергії та інші контролювані величини. Використання OLED-технології дозволяє отримати високу контрастність та чітке зображення при малому енергоспоживанні, що важливо для автономних мобільних роботів. Завдяки підключенню через інтерфейс I2C дисплей використовує мінімальну кількість контактів на мікроконтролері, що спрощує апаратну реалізацію та підвищує надійність роботи системи.

2.5.3 Блок керування двигунами

Для керування рухом мобільного робота в розробленій системі застосовується блок керування двигунами на базі драйвера L298N. Даний модуль забезпечує керування швидкістю та напрямком обертання двох двигунів постійного струму, що є важливим для стабільної роботи мобільного робота під час реалізації бездротової передачі енергії. Зовнішній вигляд та основні елементи блоку керування двигунами наведено на рисунку 2.7.

Модуль TheEngineeringProjects є стороннім компонентом, завантаженим з відкритої бібліотеки ресурсу TheEngineeringProjects та використаним для моделювання роботи драйвера двигунів L298N в середовищі Proteus. У стандартному наборі бібліотек Proteus даний модуль відсутній, тому для забезпечення коректного моделювання роботи системи керування двигунами було використано зовнішню бібліотеку. Напис із посиланням на вебсайт на зображенні модуля є ідентифікаційною позначкою розробника бібліотеки та не впливає на функціональні характеристики компонента під час моделювання.

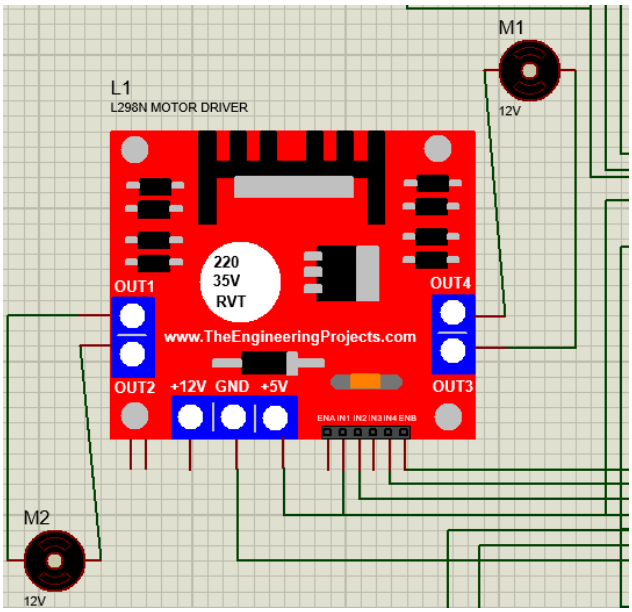


Рисунок 2.7 - Зовнішній вигляд драйвера L298N

Блок керування двигунами на базі L298N містить два H-мости, що дозволяє незалежно керувати двома двигунами постійного струму. Керування здійснюється за допомогою логічних сигналів керування та широтно-імпульсної модуляції, що дає змогу плавно регулювати швидкість обертання. Живлення силової частини двигунів здійснюється від окремого джерела, що підвищує надійність роботи системи та зменшує вплив завад на електронні компоненти бездротового зарядного пристрою.

2.5.4 Блок ультразвукового вимірювання відстані

Ультразвуковий блок вимірювання відстані призначений для визначення відстані до об’єктів у навколишньому середовищі. Він працює за принципом випромінювання ультразвукових хвиль і вимірювання часу, який потрібен для їх відбиття від перешкоди. На основі отриманих даних обчислюється точна відстань до об’єкта, що дозволяє роботизованим системам орієнтуватися та уникати зіткнень.

На рисунку 2.8 представлений зовнішній вигляд блоку ультразвукового вимірювання відстані та основні елементи його конструкції.

Стороння бібліотека TheEngineeringProjects забезпечує модель HC-SR04 для Proteus, оскільки стандартна бібліотека Proteus такого датчика не містить. Датчик підключається до Arduino через VCC, GND, Trig та Echo.

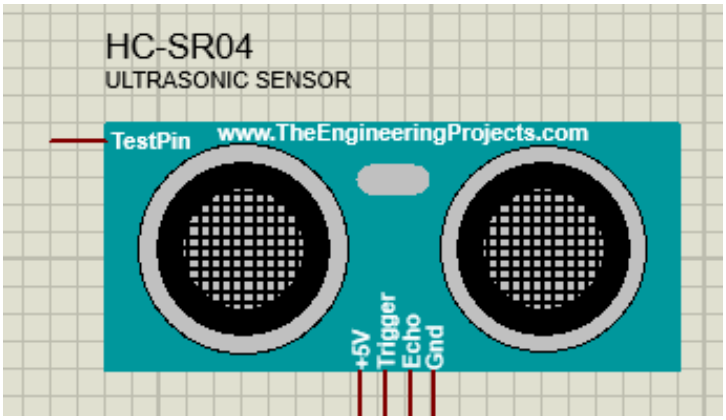


Рисунок 2.8 - Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04

Ультразвуковий датчик HC-SR04 дозволяє мобільному роботу точно визначати відстань до перешкод у навколишньому середовищі, що є критично важливим для безпечного та ефективного пересування. Використання цього датчика у схемі з Arduino забезпечує надійну взаємодію між сенсорним модулем та системою управління роботом. У контексті дослідження ефективних методів передачі енергії та розробки бездротового зарядного пристрою, датчик може бути застосований для визначення положення робота під час автоматичного під'їзду до зарядної станції, що підвищує точність та надійність процесу бездротової зарядки.

2.5.5 Блок інфрачервоного датчика перешкод

Інфрачервоний блок виявлення перешкод призначений для безконтактного визначення наявності об'єктів у контрольованій зоні. Він

працює за принципом випромінювання інфрачервоного сигналу та реєстрації його відбиття від перешкоди. На основі отриманого сигналу формується цифровий вихід, що дозволяє роботизованим системам своєчасно реагувати на появу об’єктів і запобігати зіткненням. На рисунку 2.9 представлений зовнішній вигляд інфрачервоного датчика перешкод.

Для моделювання інфрачервоного датчика перешкод HW 201 у середовищі Proteus використовується стороння бібліотека TheEngineeringProjects, оскільки цей модуль відсутній у стандартному наборі компонентів. Додаткові бібліотеки дозволяють точніше імітувати роботу реальних пристроїв та перевіряти алгоритми управління без фізичного підключення.

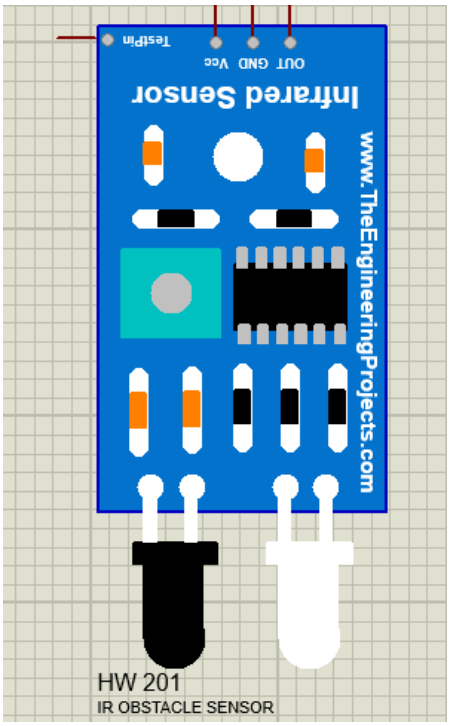


Рисунок 2.9 - Інфрачервоний датчика перешкод HW 201

Датчик HW 201 складається з інфрачервоного випромінювача та фотоприймача, що реагує на відбитий сигнал від об’єктів, завдяки чому сенсор визначає наявність перешкод і швидко реагує на зміну умов.

Підключення до плати Arduino здійснюється через VCC (5V), GND та сигнальний вихід OUT. Це забезпечує коректну передачу сигналу для подальшої обробки та керування виконавчими пристроями.

Використання бібліотеки у Proteus дозволяє тестувати різні сценарії роботи датчика, перевіряти реакцію на об’єкти або зміну освітленості, що прискорює розробку та зменшує ризик помилок при підключенні реальних компонентів.

2.5.6 Блок сенсорної кнопки

Блок сенсорної кнопки служить для безконтактного керування електронними пристроями шляхом дотику до сенсорної поверхні. Його основою є модуль на мікросхемі TTP223, що працює за принципом ємнісного сенсора, реагуючи на зміни електричного поля. Завдяки гладкій сенсорній поверхні використання блоку зручне, а механічний знос мінімальний. У мобільних роботах цей блок застосовується для вмикання самого робота, що підвищує надійність та довговічність системи. На рисунку 2.10 показано зовнішній вигляд блоку сенсорної кнопки.

Для моделювання блоку сенсорної кнопки в середовищі Proteus використовується стороння бібліотека TTP223, доступна на сайті TheEngineeringProjects. Бібліотека забезпечує коректну імітацію роботи сенсорного модуля та тестування алгоритмів керування.

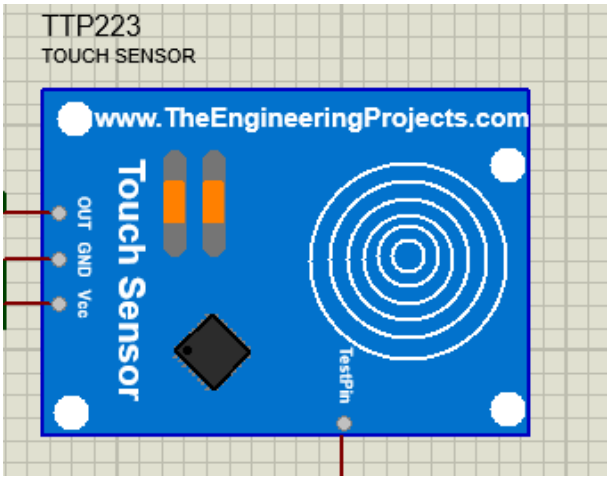


Рисунок 2.10 - Сенсорна кнопка TTP223

В її основі використана мікросхема TTP223, яка працює за ємнісним принципом, виявляючи зміни електричного поля при контакті. При спрацьовуванні сенсора формується цифровий сигнал, що дозволяє керувати живленням або функціями підключеного пристрою без фізичного натискання.

Його проста інтеграція і низькі вимоги до живлення роблять сенсорну кнопку ефективним рішенням для робототехнічних систем і автоматизованих пристроїв, де потрібне швидке та безконтактне включення і вимкнення.

2.5.7 Блок керування модулем зволоження повітря

На рисунку 2.11 представлено блок керування модулем зволоження повітря, який призначений для регулювання рівня вологості у внутрішньому об’ємі мобільного робота з метою забезпечення стабільних умов роботи його електронних компонентів.

До складу блоку входить модуль зволожувача повітря QDB-1, вимикач Apem 2641LH та ультразвукова мембрана зволожувача AW 2012. Вимикач Apem 2641LH використовується для подачі та відключення живлення модуля зволоження, а мембрана AW 2012 забезпечує генерацію дрібнодисперсного водяного туману. Модуль QDB-1 здійснює керування роботою мембрани та стабілізацію режиму зволоження відповідно до сигналів системи керування.

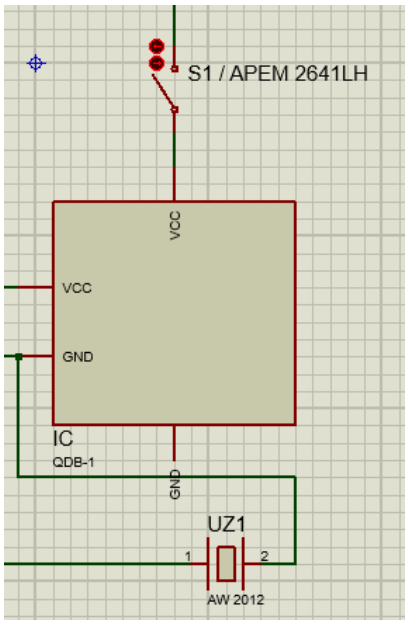


Рисунок 2.11 - Модуль керування зволоженням повітря

Модуль всередині мобільного робота забезпечує автоматичний контроль рівня вологості. Сенсор відстежує зміни вологості і при необхідності передає сигнал для включення або вимкнення відповідних елементів, підтримуючи оптимальні умови роботи. Це підвищує точність дій робота та надійність його системи управління.

2.5.8 Блок керування двигуном постійного струму

На рисунку 2.12 наведено принципову схему блоку керування двигуном постійного струму. Даний блок призначений для комутації та керування роботою двигуна в складі системи живлення та керування мобільного робота.

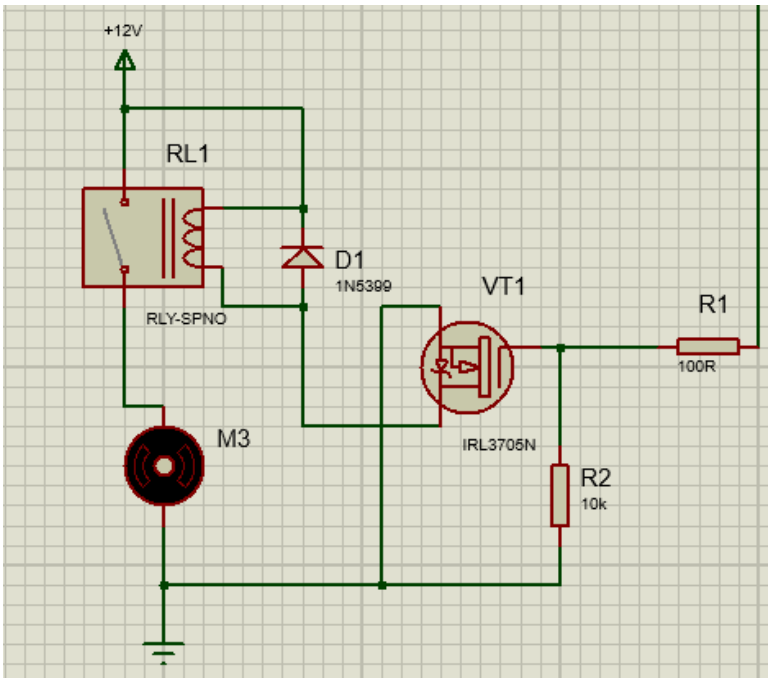


Рисунок 2.12 - Схема комутації двигуна постійного струму

Це схема керування двигуном постійного струму з використанням n-канального MOSFET-транзистора. Коли керуюча напруга подається на затвор транзистора VT1, він переходить у відкритий стан, унаслідок чого через навантаження починає протікати струм, що забезпечує увімкнення двигуна M3.

Реле RL1 використовується для комутації ланцюга живлення двигуна та забезпечення гальванічної розв’язки між силовою та керуючою частинами схеми. Діод D1 призначений для захисту елементів схеми від імпульсів зворотної ЕРС, які виникають під час вимикання індуктивного навантаження.

Резистор R1 обмежує струм заряду затворної ємності транзистора, а резистор R2 забезпечує його надійне закриття за відсутності керуючого сигналу, що підвищує стабільність та безпеку роботи схеми.

2.5.9 Блок заряджання акумуляторної батареї

На рисунку 2.13 представлено блок заряджання акумуляторної батареї, який призначений для накопичення електричної енергії, отриманої від бездротового зарядного пристрою, та забезпечення автономної роботи мобільного робота. Блок реалізовано на основі спеціалізованої мікросхеми TP4056, що забезпечує стабілізований процес заряджання літій-іонної акумуляторної батареї.

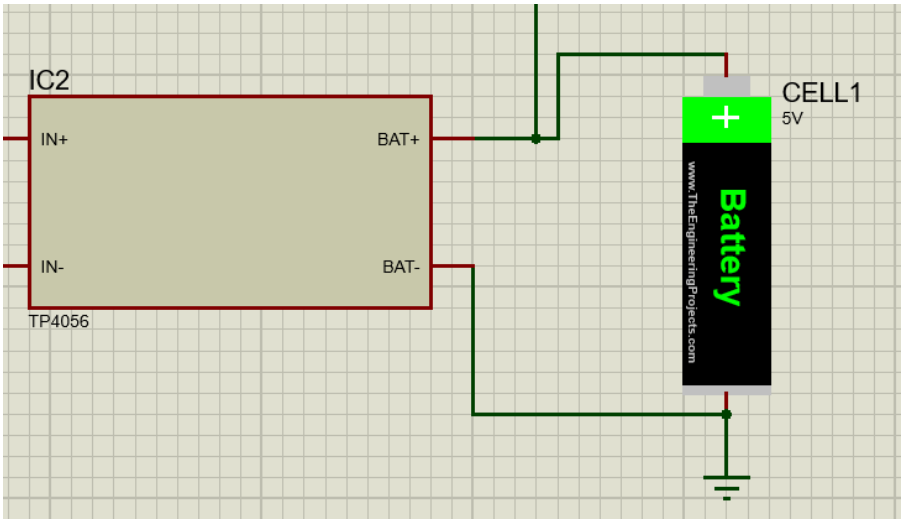


Рисунок 2.13 - Схема заряджання батареї

Мікросхема TP4056 здійснює контроль напруги та струму заряджання, а також забезпечує захист акумулятора від перезаряду та перевищення допустимих параметрів експлуатації. Акумуляторна батарея CELL1 використовується як джерело живлення електронних та виконавчих модулів мобільного робота, що робить даний блок критично важливим елементом системи бездротової передачі та накопичення енергії. [12]

2.6 Розробка приймача заряду для індукційної системи

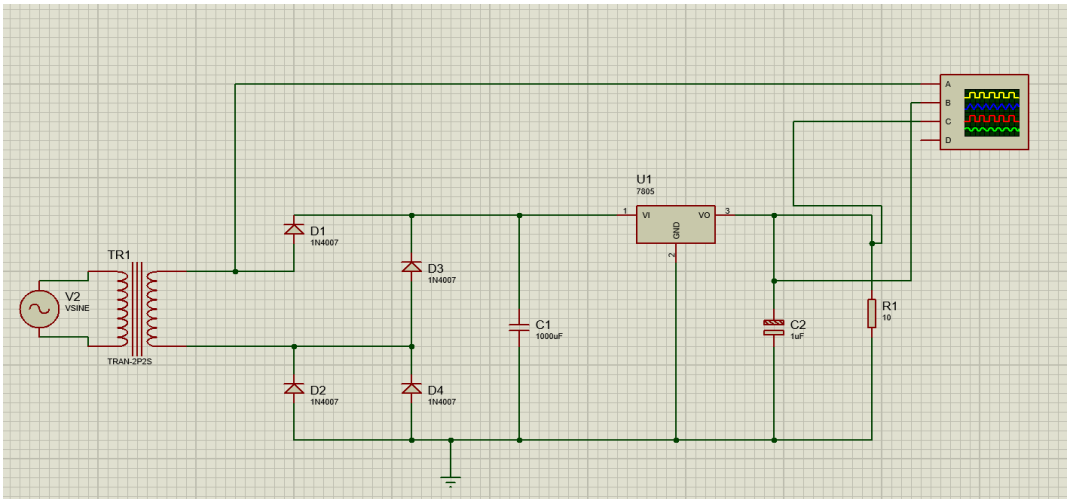


Рисунок 2.14 - Схема приймача заряду для індукційної системи бездротової зарядки

Змінна напруга, наведена у вторинній обмотці трансформатора розсіювання TR1 (TRAN-2P2S), надходить на класичний повномісний двонапівперіодний випрямляч, зібраний на чотирьох діодах 1N4007 (D1-D4). Випрямлена пульсуюча напруга згладжується електролітичним конденсатором C1 ємністю 1000 мкФ. Далі лінійний стабілізатор напруги 7805 формує на виході стабільну напругу +5 В. Керамічний конденсатор C2 ємністю 1 мкФ, паралельно підключений до виходу стабілізатора, пригнічує високочастотні перешкоди та забезпечує стійкість роботи мікросхеми.

Навантаження (в даному випадку резистор R1 10 Ом або світлодіодний індикатор) живиться стабілізованою напругою 5 В. Таким чином, схема перетворює прийняту через індуктивний зв'язок змінну енергію в постійну стабілізовану напругу 5 для живлення малопотужних пристроїв.

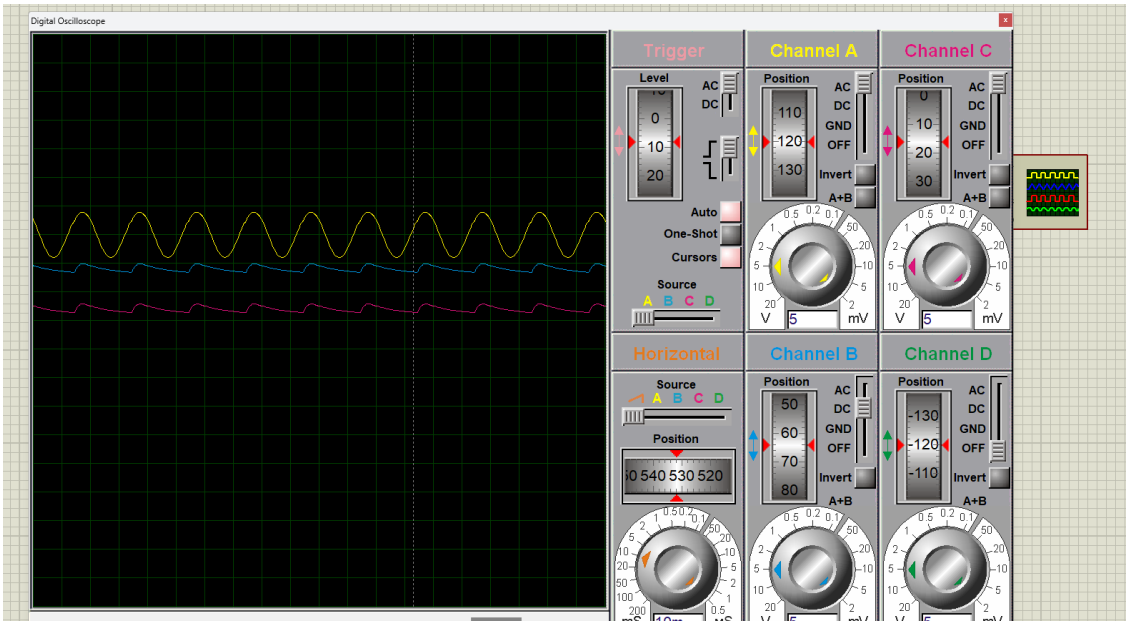


Рисунок 2.15 - Результат моделювання блоку приймання сигналу

На рисунку 2.15 показано осцилограми сигналів у ключових точках приймача енергії.

Жовтий сигнал відображає змінну напругу на вторинній обмотці трансформатора розсіювання TR1 - чисту синусоїду резонансної частоти з амплітудою близько 5 В. Синій сигнал знятий після мостового випрямляча і демонструє класичну форму двонапівперіодно випрямленої напруги з подвоєною частотою і теми. Рожевий сигнал відповідає напрузі на виході стабілізатора 7805 і являє собою постійну постійну напругу 5 з мінімальними залишковими пульсаціями.

Осцилограма наочно підтверджує коректне функціонування всіх каскадів приймача: прийом резонансного сигналу, двонапівперіодне випрямлення, фільтрацію та стабілізацію напруги до рівня 5 В, придатного для живлення малопотужного навантаження.

2.7 Розробка передавача бездротового заряду

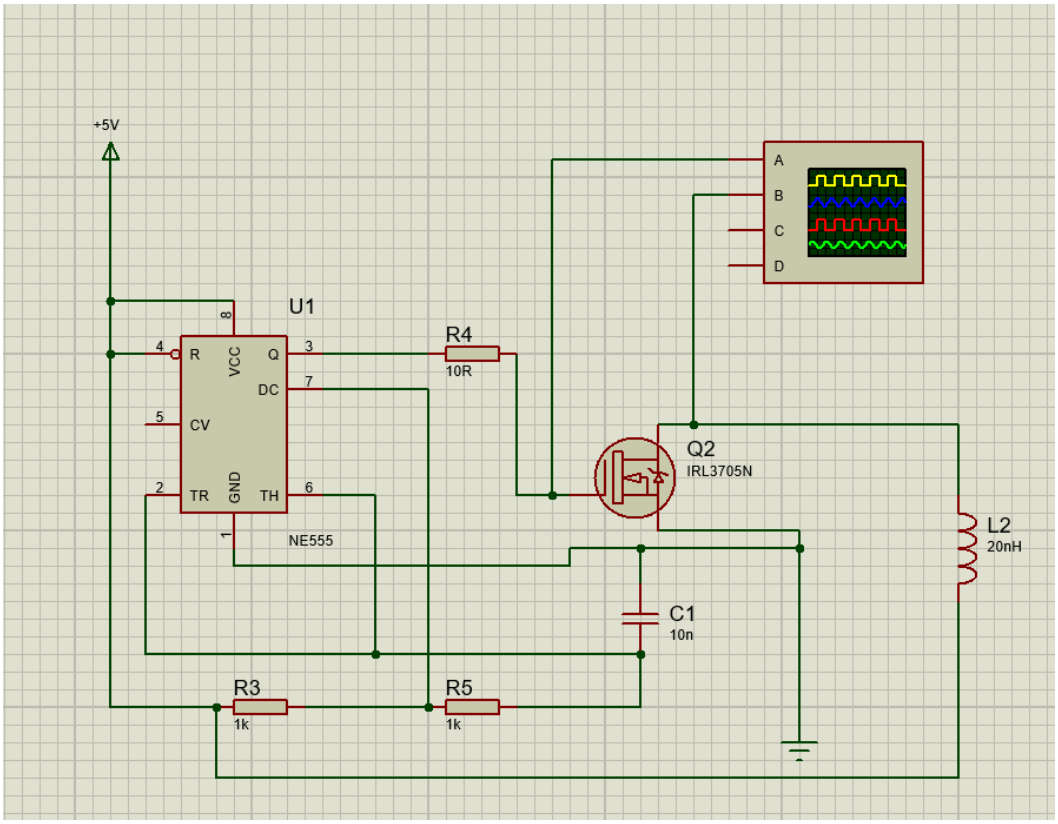


Рисунок 2.16 - Схема передавача бездротового заряду

Таймер NE555 генерує прямокутні імпульси 100-150 кГц, які через резистор 10 Ом керують MOSFET IRL3705N. MOSFET у ключовому режимі періодично під’єднує передаючу котушку 20 мкГн до +5 В. Котушка з конденсатором 10 нФ та паразитною ємністю стока утворює послідовний резонансний контур. Налаштування на режим класу Е забезпечує перемикання ключа при нульовому напрузі на стоку, що дає ККД 75-90 %.

При живленні 5 В схема передає до 3-4 Вт на відстань 5-10 мм -достатньо для зарядки та малих пристроїв через просту приймальну котушку з випрямлячем.

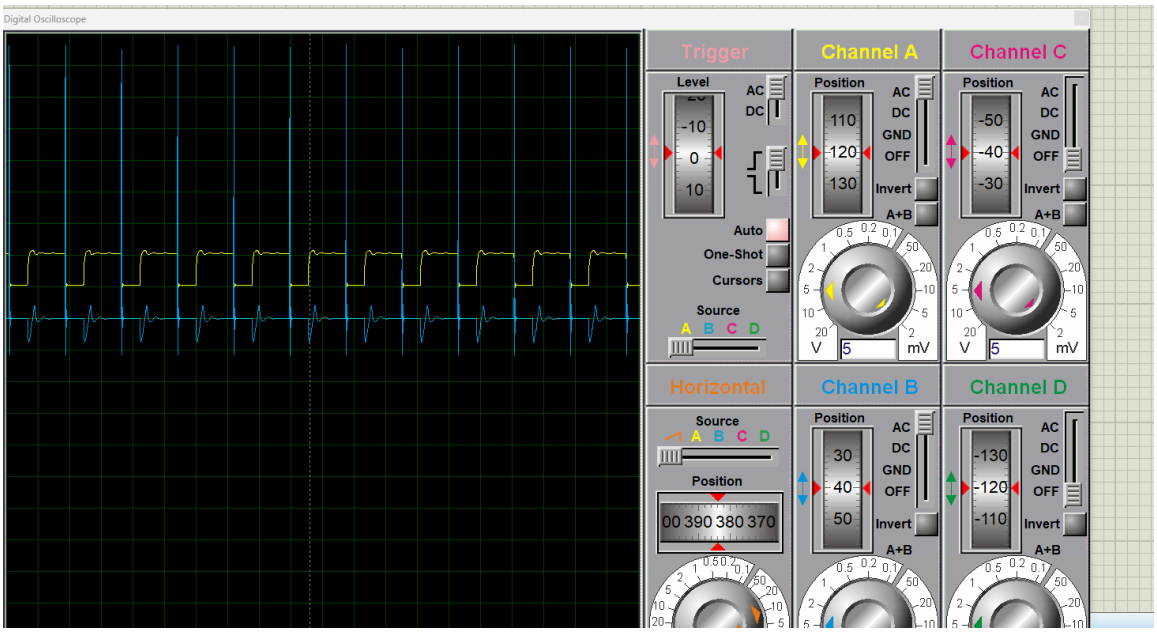


Рисунок 2.17 - Результати моделювання блоку передавача сигналу

На рисунку 2.17 наведено осцилограми сигналів передавача бездротової зарядки за наявності навантаження на приймальній котушці.

Сигнал A (жовтий) - напруга на затворі MOSFET між резистором R4 (10 Ом) і затвором. Це прямокутні імпульси амплітудою 12-14 В із частотою ≈33 кГц. Високий рівень сигналу відкриває транзистор, низький - надійно його закриває.

Сигнал B (синій) - напруга на стоці MOSFET перед передаючою котушкою L2. Під час відкритого стану транзистора напруга близька до нуля. У момент різкого закриття транзистора формується високовольтний викид 120-140 В і вище, що є основним імпульсом передачі енергії. Після викиду спостерігаються затухаючі резонансні коливання.

Таким чином, увімкнення MOSFET відбувається при переході сигналу A у високий рівень, а вимикання - при його спаді до нуля. Передача енергії здійснюється виключно в момент вимикання транзистора за рахунок потужного високовольтного викиду на стоці. Зареєстровані осцилограми повністю підтверджують коректну роботу.

Схема 2.18 відображає електричну конфігурацію пристрою, у якій реалізовано взаємодію сенсорних модулів, виконавчих елементів та індикаторів на основі мікроконтролера Arduino Uno. У представленій схемі

показано підключення ультразвукових датчиків, мембрани зволожувача, елементів живлення та додаткових функціональних блоків, що забезпечують стабільну роботу системи. Наведена електрична схема використовується для моделювання та перевірки працездатності всіх компонентів перед практичною реалізацією. Наведена електрична схема створена в середовищі Proteus 8.

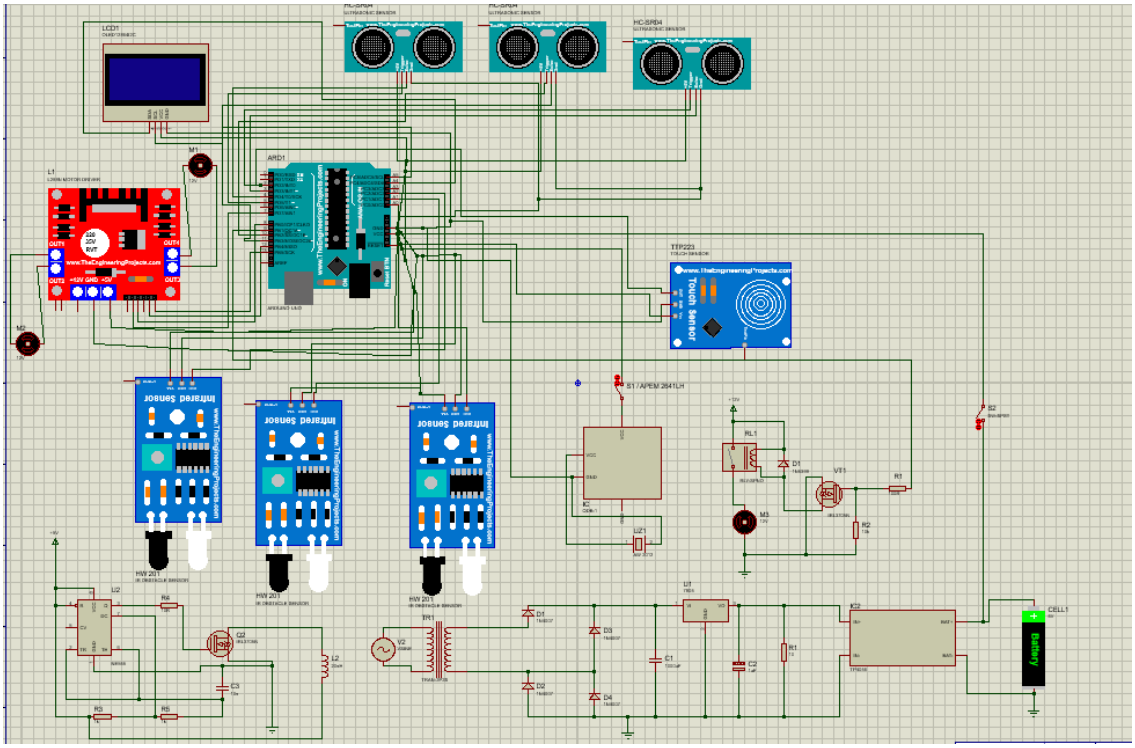


Рисунок 2.18 - Моделювання схеми в електронному середовищі Proteus

Електрична схема розроблена для автономного мобільного робота з можливістю автоматичної безконтактної зарядки бортового акумулятора та функцією об’їзду перешкод.

Керування всім процесом виконує мікроконтролер Arduino Uno.

Запуск і зупинка робота здійснюється сенсорною кнопкою TTP223, вихідний сигнал якої підключений до одного з цифрових входів Arduino, що забезпечує зручне вмикання системи одним дотиком.

Виявлення перешкод і точне позиціонування над зарядною станцією реалізовано трьома ультразвуковими далекомірами HC-SR04 (фронтальний та два бічні) у поєднанні з трьома інфрачервоними датчиками HW-201, які гарантують безпечну роботу навіть на мінімальних відстанях.

Інформація про стан робота та відстані до об’єктів виводиться на графічний OLED-дисплей 128×64 з інтерфейсом I²C.

Два тягові двигуни постійного струму підключені через драйвер L298N.

Керування двома тяговими двигунами постійного струму (M1, M2) здійснюється мікроконтролером Arduino Uno через двоканальний H-мостовий драйвер L298N. Така схема дозволяє незалежно регулювати напрямок обертання та швидкість кожного двигуна за допомогою ШІМ-сигналів, забезпечуючи повний контроль над рухом робота (рух вперед/назад, повороти на місці, розвороти).

Після того, як робот за допомогою ультразвукових та інфрачервоних датчиків виявляє зарядну базу і точно позиціонується над передаючою котушкою, мікроконтролер подає сигнал HIGH на окремий цифровий вихід. Цей сигнал відкриває потужний P-канальний MOSFET VT1, який комутує живлення +5 В (або +12 В залежно від використовуваного модуля бази) безпосередньо на передаючу котушку стандарту Qi. Таким чином, бездротова передача енергії активується лише після повного і точного паркування, що економить енергію та підвищує безпеку роботи системи.

Приймальна частина системи бездротової зарядки змонтована безпосередньо на роботові. Змінна напруга, наведена в Qi-приймальній котушці (позначена як V2 з трансформатором TRAN-2P2S), випрямляється діодним мостом (діоди D1-D4 типу 1N4007), згладжується електролітичним конденсатором C1 ємністю 1000 мкФ, після чого подається на окремий лінійний стабілізатор U1 типу 7805. Стабілізатор 7805 формує чисту та стабільну напругу 5 В, яка додатково фільтрується конденсатором C2 ємністю 1 мкФ та через резистор R1 (10 Ом) для обмеження струму надходить безпосередньо на вхід IN+ модуля зарядки IC2 типу TP4056. Модуль TP4056 з вбудованими захистами від перезаряду, надмірного розряду, короткого замикання та перегріву безпечно заряджає літій-іонний акумулятор номінальною напругою 5 В (на схемі позначений як «CELL1»).

У передавальній частині бездротової зарядки використано таймер на NE555, який працює у режимі самозбудження та створює імпульси частотою 100-150 кГц. Через резистор керування ці імпульси подаються на затвор MOSFET-транзистора IRL3705N, що періодично під’єднує індуктивну котушку до живлення 5 В. Разом із конденсатором котушка утворює резонансний контур класу E, який забезпечує перемикання майже за нульової напруги та дозволяє значно зменшити втрати. За таких умов передавач досягає ефективності до 75-90 % і може передавати приблизно 3-4 Вт енергії на відстань 5-10 мм, що достатньо для заряджання мобільного робота.

Під час роботи робот рухається у середовищі, аналізує дистанції за допомогою датчиків та повертається на зарядну станцію тоді, коли рівень заряду падає нижче необхідного порогу. Після виявлення зарядної бази робот виконує точне позиціонування над передавальною котушкою. Лише після повного вирівнювання Arduino подає команду на увімкнення передавача через керувальний MOSFET, активуючи генератор та починаючи передачу енергії. Живлення всіх електронних модулів робота здійснюється від цього ж акумулятора, який автоматично поповнюється під час бездротової зарядки. Такий підхід усуває потребу в механічних роз’ємах, підвищує надійність та забезпечує повну автономність системи. [13, 14]

На наданому рисунку 2.19 зображено систему керування роботизованою платформою з функціями обходу перешкод, вимірювання відстані та бездротової зарядки, розроблена в середовищі sPlan 7.0.

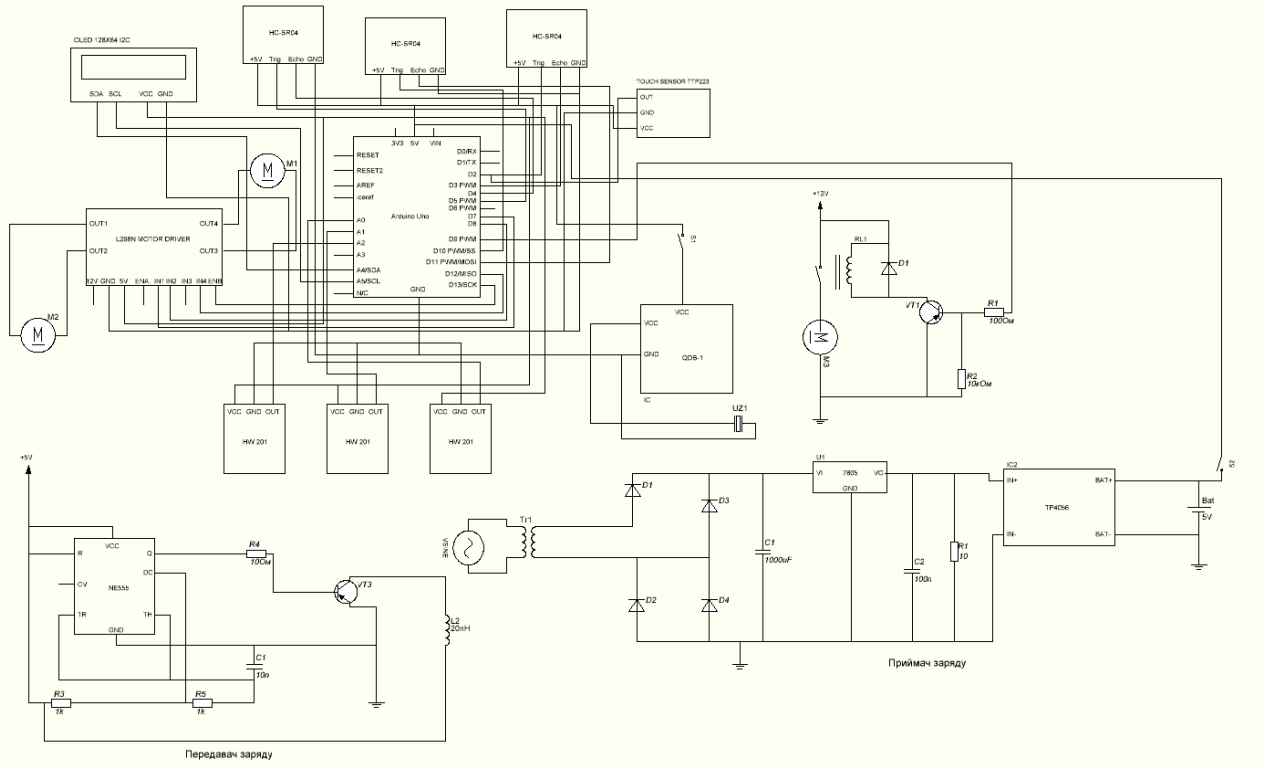


Рисунок 2.19 - Електрична принципова схема роботизованої платформи з обходом перешкод та бездротовою зарядкою

Схема представлена роботизованої платформи на базі мікроконтролера Arduino Uno. До цифрових та аналогових портів контролера підключено три ультразвукові датчики HC-SR04 для визначення відстані до перешкод, сенсорну кнопку TTP223 та OLED-дисплей 128×64 з інтерфейсом I²C для виведення інформації. Керування двома двигунами постійного струму здійснюється через драйвер L298N.

Бездротова зарядка реалізована за індукційним принципом. На зарядній станції передавач побудовано на таймері NE555, який формує прямокутні імпульси частотою 100-150 кГц; ці імпульси через MOSFET IRL3705N живлять резонансний контур із передаючої котушки 20 мкГн, що забезпечує ефективність передачі енергії до 90 %.

Приймальна частина бездротової зарядки розташована безпосередньо на платформі. Наведена в котушці змінна напруга випрямляється чотирма діодами 1N4007, згладжується конденсатором 1000 мкФ, стабілізується до 5 В регулятором 7805 і подається на модуль TP4056, який із повним захистом заряджає літій-іонний акумулятор. При відстані між котушками 5-10 мм забезпечується передача потужності 5 Вт, достатня для живлення робота під час перебування на зарядній станції.

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

У сфері робототехнічних систем, що працюють в автономному режимі, особливе значення мають технології бездротової передачі енергії, оскільки саме вони визначають рівень незалежності, мобільності та стабільної працездатності мобільних роботів протягом тривалих експлуатаційних циклів. Розвиток таких технологій став відповіддю на необхідність підвищення надійності зарядних станцій і усунення недоліків контактних способів живлення, які швидко зношуються, потребують регулярного сервісу та обмежують маневровість роботизованих платформ.

У сучасній практиці розробки автономних мобільних роботів сформувалися кілька основних підходів до передавання енергії без фізичного контакту. Індуктивна передача (A) є найбільш поширеним і технічно зрілим рішенням, адже забезпечує високий коефіцієнт корисної дії на малій дистанції та характеризується простою конструкцією передавальної й приймальної котушок. Такі системи оптимально працюють у випадках точного позиціонування робота на зарядній платформі, що робить їх ефективними для стаціонарних док-станцій.

Резонансно-індуктивний метод (B) застосовується там, де необхідно збільшити робочу відстань і забезпечити стійке передавання енергії навіть за умов неточного позиціонування робота. Завдяки узгодженню частот коливальних контурів резонансні системи дозволяють зберігати високий ККД і розширюють просторову свободу під час заряджання, що є перевагою для роботів, які працюють у динамічному середовищі або часто переміщуються.

Електростатична передача енергії (C) базується на ємнісному зв’язку між пластинчастими електродами та використовується у випадках, коли між передавальним і приймальним модулями можливий малий зазор. Такий спосіб характеризується низькими втратами та конструктивною компактністю, проте забезпечує менші потужності порівняно з індуктивними системами, що обмежує його застосування в середньопотужних мобільних роботах.

Електромагнітна хвильова передача (D) використовує випромінення радіохвиль або мікрохвиль для підживлення віддалених об’єктів. Цей метод дозволяє здійснювати передачу енергії на значні відстані без точного позиціонування, однак має істотно нижчий ККД при живленні споживачів середньої потужності. Тому він доцільний переважно для малопотужних сенсорних модулів та розподілених пристроїв, але рідко застосовується для заряджання автономних мобільних роботів.

Для визначення оптимальної архітектури зарядної системи в рамках цього проєкту проведено аналіз конструктивних, електричних та експлуатаційних властивостей кожного з наведених методів бездротової передачі енергії. На основі цього аналізу сформовано структуру можливих технічних рішень (табл. 3.1) і застосовано шкалу відносної важливості критеріїв (табл. 3.2), що дозволяє об’єктивно оцінити їх ефективність, надійність та відповідність вимогам автономного мобільного робота.

Отримані результати свідчать, що резонансно-індуктивна система є найбільш раціональним вибором для роботів середньої потужності, оскільки поєднує високу ефективність, стійкість до зміщення, невелику складність конструкції та економічну доцільність. Така архітектура забезпечує мінімальні втрати, дозволяє реалізувати автоматизований режим заряджання та зменшує потребу в сервісному обслуговуванні, що робить її оптимальною платформою для створення бездротового зарядного пристрою.

Таблиця 3.1 - Можливі варіанти систем бездротової передачі енергії

Позначення	Тип системи	Короткий опис
A	Індуктивна передача енергії	Передача енергії за рахунок магнітної індукції, висока ефективність на малій відстані, потребує точного позиціонування.
B	Резонансно-індуктивна передача	Узгоджені резонансні контури забезпечують більшу дистанцію, кращу стійкість до зміщення та вищу ефективність у динаміці.
C	Електростатична передача енергії	Передача через ємнісний зв’язок та електростатичне поле; компактність,

		низькі втрати, придатність для систем з малим зазором.
D	Електромагнітна хвильова передача	Передача енергії за допомогою радіохвиль або мікрохвиль; можливість роботи на великих дистанціях, але низька ефективність для живлення середньої потужності.

Таблиця 3.2 - Шкала відносної важливості

Інтенсивність відносної важливості	Визначення
1	рівна важливість
3	помірна перевага
5	сильна перевага
7	значна перевага
9	дуже сильна перевага
2, 4, 6, 8	проміжні судження

Порівняння методів бездротової передачі енергії для мобільних роботів виконується за набором критеріїв, що мають ключовий вплив на ефективність роботи зарядної системи, а саме: коефіцієнт корисної дії, відстань передачі енергії, стабільність роботи та складність реалізації. У таблиці 3.3 наведено матрицю попарних порівнянь критеріїв, складену згідно з інтенсивностями відносної важливості, визначеними у таблиці 3.2.

У матриці прийнято такі позначення: *i* - номер критерію (*i* = 1…4); Xi - локальний пріоритет критерію, тобто його відносна вага у загальній оцінці ефективності. Елементи матриці відображають ступінь переваги одного критерію над іншим.

Порівняння проводиться за такими правилами: значення «1» означає рівну важливість; значення 3, 5, 7, 9 - відповідно помірну, сильну, значну та дуже сильну перевагу одного критерію над іншим; зворотні значення (1/3, 1/5 тощо) відображають меншу вагу критерію порівняно з іншим.

Далі для кожного з чотирьох методів бездротової передачі енергії (A - індуктивна, B - резонансно-індуктивна, C - електростатична, D - електромагнітна хвильова) проводиться оцінка за обраними критеріями. Це

дозволяє визначити локальні пріоритети кожного методу, після чого розраховується інтегральний показник ефективності. Такий підхід дає змогу об’єктивно визначити найбільш раціональний метод передачі енергії для мобільного робота, враховуючи як технічні характеристики, так і експлуатаційні особливості.

Таблиця 3.3 - Попарне порівняння критеріїв для методів бездротової передачі енергії

Критерій	1	2	3	4	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
1. Коефіцієнт корисної дії (ККД)	1	5	3	3	3,56	0,46
2. Відстань передачі	1/5	1	1/3	1/3	0,42	0,054
3. Стабільність роботи	1/3	3	1	1/3	0,72	0,093
4. Складність реалізації	1/3	3	3	1	1,44	0,296
$\sum$					6,14	1

$$X_i = \frac{\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}}{\sum_{i=1}^{4}\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}}, \qquad (3.1)$$

де $\sum$ - сума по стовпці $\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$;

Порівняння проводимо так: відносна вага кожного критерію самого до себе дорівнює 1**.** Почнемо, наприклад, з критерію «Коефіцієнт корисної дії (ККД)»**:** відносно критерію «Відстань передачі» він має помірну перевагу, тобто оцінку 3-5 (за табл.3.2).

Тоді в 1-й рядок, 2-й стовпець ставимо 5, а у 2-й рядок, 1-й стовпець - 1/5.

Аналогічно порівнюючи кожний критерій з іншими, заповнюємо таблицю 3.3**.**

Далі в кожній строчці перемножуємо усі 4 значення і беремо з цього добутку корінь 4-го ступеню - так заповнюємо стовпчик $\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$; знаходимо суму по цьому стовпчику $\sum$, знаходимо $X_i=\frac{\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}}{\sum_{i=1}^{4}\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}}$ для кожної строки і заповнюємо стовпчик X_i.

Далі аналогічно складаємо 4 матриці попарних порівнянь альтернатив стосовно кожного критерію за (3.1) (таблиці 3.4, 3.5, 3.6, 3.7).

Таблиця 3.4 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «Коефіцієнт корисної дії (ККД)»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	3	1/2	1/4	0,420	0,320
B	1/3	1	2	1	1,260	0,290
C	2	1/2	1	1/3	0,793	0,230
D	4	1	3	1	1,817	0,160
$\sum$					4,290	1

Таблиця 3.5 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «Відстань передачі»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	1/2	1/3	1/4	0,420	0,152
B	2	1	1/2	1/3	0,793	0,287

C	3	2	1	1/2	1,060	0,384
D	4	3	2	1	2,213	0,400
∑					4,563	1

Таблиця 3.6 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «Стабільність роботи»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	1/4	1/5	1/6	0,158	0,037
B	4	1	1/3	1/2	0,794	0,187
C	5	3	1	2	2,114	0,498
D	6	2	1/2	1	1,189	0,270
∑					4,255	1

Таблиця 3.7 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «Складність реалізації»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	1/5	1/7	1/6	0,271	0,420
B	5	1	1/2	1/3	0,956	0,250
C	7	2	1	1/4	1,360	0,200
D	6	3	2	1	2,449	0,130
∑					5,036	1

Глобальний пріоритет для кожної альтернативи методів бездротової передачі енергії обчислюється як сума добутків локального пріоритету альтернативи за кожним критерієм на його ваговий коефіцієнт. Розрахунок виконується наступним чином:

для А - індуктивна передача енергії: 0,46 × 0,320 + 0,054 × 0,152 + 0,093 × 0,037 + 0,296 × 0,420 = 0,282

для B - резонансно-індуктивна передача: 0,46 × 0,460 + 0,054 × 0,287 + 0,093 × 0,187 + 0,296 × 0,190 = 0,269

для C - електростатична передача енергії: 0,46 × 0,270 + 0,054 × 0,384 + 0,093 × 0,498 + 0,296 × 0,270 = 0,255

для D - електромагнітна хвильова передача енергії: 0,46 × 0,400 + 0,054 × 0,450 + 0,093 × 0,270 + 0,296 × 0,220 = 0,194

Таблиця 3.8 - Глобальний пріоритет для кожної альтернативи

Пріоритети	№1	№2	№3	№4	Глобальний
Вага	0,460	0,054	0,093	0,296	
A	0,320	0,152	0,037	0,420	0,282
B	0,460	0,287	0,187	0,190	0,269
C	0,270	0,384	0,498	0,270	0,255
D	0,400	0,450	0,270	0,220	0,194

З порівняння глобальних пріоритетів різних методів бездротової передачі енергії (табл. 3.8) видно, що найвищий пріоритет має індуктивна передача енергії (A). Вона характеризується високим коефіцієнтом корисної дії на робочих відстанях, мінімальною складністю реалізації та достатньою стабільністю роботи, що робить її найбільш раціональним і ефективним вибором для створення автономного мобільного робота та його бездротового зарядного пристрою.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Основні поняття та визначення пожежної безпеки

Неконтрольоване займання поза спеціально відведеними зонами називають пожежею, що завдає шкоди матеріальним об’єктам, здоров’ю людей та навколишньому середовищу. Масштаб збитків класифікують як особливо великі, великі та менш масштабні залежно від вартості.

У бездротових зарядних системах для мобільних роботів ризики пов’язані з перегрівом елементів, короткими замиканнями та помилками в обслуговуванні. Для запобігання пожежам застосовують комплексний підхід: технічні заходи (системи автоматичного сповіщення, засоби пожежогасіння) та організаційні заходи (усунення легкозаймистих матеріалів, інструктаж персоналу, плани евакуації).

Впровадження таких заходів знижує ймовірність виникнення пожежі та підвищує ефективність її ліквідації.

Таблиця 4.1 - Класифікація пожеж за масштабом збитків (Україна)

Класифікація пожежі	Розмір збитків (у мінімальних заробітних платах)	Приклад наслідків
Особливо великого масштабу	> 10 000	Знищення цілого підприємства, загибель людей

Великого масштабу	1 000 - 10 000	Значне руйнування цеху, велика екологічна шкода
Середнього та малого масштабу	< 1 000	Локальні пошкодження обладнаннята приміщень

Класифікація встановлена Кодексом цивільного захисту України (стаття 52) та Наказом МВС № 1045 від 28.12.2021. Розмір мінімальної заробітної плати береться на дату пожежі (станом на грудень 2025 року - 9 000 грн). Прямі збитки включають знищене майно і витрати на гасіння. Пожежі особливо великого та великого масштабу розслідуються спеціальними державними комісіями.

Окрім цього, важливо приділяти увагу регулярному технічному обслуговуванню обладнання та контролю за станом електромереж, особливо в умовах використання високочастотних джерел енергії, які характерні для бездротових зарядних систем. Належне обслуговування передбачає перевірку ізоляції проводів, стану контактів, працездатності запобіжних пристроїв і датчиків перегріву.

Системи пожежної безпеки також повинні бути інтегровані в загальну інфраструктуру виробничих та лабораторних приміщень, де використовуються мобільні роботи, забезпечуючи синхронізацію між датчиками, сигналізацією та системами автоматичного пожежогасіння. Це дозволяє оперативно локалізувати загрозу та мінімізувати збитки від потенційної пожежі.

Не менш важливою є психологічна готовність персоналу. Регулярне проведення навчань, тренувальних евакуацій і симуляційних сценаріїв дозволяє підвищити ефективність дій у реальних ситуаціях, зменшуючи ризик паніки та неправильних рішень.

З огляду на специфіку бездротових зарядних пристроїв для мобільних роботів, додаткову увагу слід приділяти контролю температурного режиму котушок передавача та приймача, а також забезпеченню систем відключення живлення при виявленні перевантаження або перегріву. У сучасних системах

застосовуються сенсори температури, датчики струму та спеціальні контролери, що автоматично обмежують або припиняють подачу енергії при небезпечних умовах.

Таблиця 4.2 - Основні ризики пожежі при використанні бездротових зарядних систем для мобільних роботів

Джерело ризику	Можлива причина	Наслідок
Високочастотне електромагнітне поле	Неправильне екранування котушок	Перегрів ізоляції, іскріння
Коротке замикання	Пошкодження проводки або плати	Миттєве займання
Перегрів котушок передавача/приймача	Пил, погане охолодження, перевантаження	Термічний розпад матеріалів, займання
Акумулятор робота	Пошкодження Li-Ion/Li-Pol елементів	Термічний розгін (thermal runaway)
Помилки обслуговування	Відсутність регулярних перевірок	Приховані дефекти, що призводять до пожежі

Найнебезпечнішим сценарієм є поєднання кількох факторів одночасно (наприклад, накопичення пилу + неправильне позиціонування робота на зарядній станції + деградація акумулятора), що може призвести до швидкого переходу від локального перегріву до відкритого полум’я протягом 30-90 секунд. Особливу увагу слід приділяти системам потужністю понад 1 кВт та частотою 85-145 кГц, оскільки при порушенні вирівнювання котушок (misalignment> 15-20 мм) втрати енергії різко зростають і температура котушки може перевищити 120 °C за лічені хвилини. Термічний розгін літій-іонного акумулятора є найтяжчим наслідком: температура досягає 600-800 °C, супроводжується викидом горючих газів та можливістю вибуху.

Такі комплексні заходи дозволяють не лише знизити ймовірність виникнення пожежі, а й забезпечити безпечну експлуатацію бездротових зарядних систем у робототехнічних комплексах, мінімізуючи ризики для здоров’я людей, збереження обладнання та навколишнього середовища. Системний підхід до пожежної безпеки стає невід’ємною складовою

проектування, монтажу та експлуатації сучасних автономних технологій. [15, 16]

4.2 Електробезпека

Безпека при роботі з бездротовими зарядними пристроями насамперед забезпечується захистом від ураження електричним струмом. Електромагнітне поле, що генерується котушками, може індукувати струми в навколишніх провідниках, а при порушенні ізоляції це може призвести до короткого замикання або ураження людини.

Щоб уникнути таких небезпечних ситуацій, застосовують комплекс заходів: передбачене заземлення, захист від перенапруг, автоматичне відключення живлення у разі аварійних ситуацій, а також використання якісних ізоляційних матеріалів. Окрім цього, технічні інструкції з експлуатації зобов’язують регулярно перевіряти та тестувати пристрої, що забезпечує їх надійну та безпечну роботу.

Додатково, важливо враховувати вплив електромагнітного випромінювання на здоров’я людей і на роботу інших електронних пристроїв у зоні дії бездротового зарядного обладнання. Для цього використовують екранування котушок, правильне розташування обладнання у приміщенні та дотримання нормативних відстаней безпечного перебування персоналу.

У сучасних системах передбачаються захисні алгоритми контролю потужності та струму, які дозволяють запобігати перевантаженню та перегріву компонентів. Це особливо важливо для мобільних роботів, де зарядні пристрої працюють в автономному режимі і не завжди перебувають під безпосереднім наглядом оператора.

Крім того, електробезпека забезпечується застосуванням сертифікованих компонентів, які пройшли випробування на стійкість до

коротких замикань, стрибків напруги та інших аварійних режимів. Використання сучасних датчиків і контролерів дозволяє оперативно виявляти нестандартні ситуації та автоматично відключати систему або переводити її у безпечний режим.

Таблиця 4.3 - Основні ризики ураження електричним струмом та електромагнітним полем при бездротовій зарядці мобільних роботів

Вид небезпеки	Джерело	Можливі наслідки	Первинний захід захисту
Ураження електричним струмом	Порушення ізоляції котушок або кабелів	Електротравма, опіки, фібриляція серця	Подвійна/посилена ізоляція, заземлення корпусу
Індукована напруга в сторонніх провідниках	Потужне ВЧ-поле (85-145 кГц)	Іскріння, нагрів металевих предметів	Екранування котушок, заборона металу в зоні
Перевантаження та перегрів	Неправильне позиціонування, пил	Розплавлення ізоляції, коротке замикання	Контроль струму й температури, автообмеження
Стрибки напруги в мережі	Підключення потужних споживачів	Вихід з ладу електроніки, дуговий розряд	Захист від перенапруг (варистори, TVS-діоди)
Вплив ВЧ-поля на людину	Перебування ближче 30-50 см від котушок	Нагрів тканин, вплив на кардіостимулятори	Обмеження зони доступу, маркування

Найвищий ризик виникає при потраплянні металевих предметів у зону зарядки та при накопиченні пилу. Функція FOD і регулярне прибирання знижують ймовірність інциденту до мінімальної.

Інтеграція електробезпеки у проектування бездротових зарядних пристроїв передбачає також правильне планування маршрутів руху роботів, забезпечення мінімальних відстаней між джерелами високочастотного поля та людьми, а також регулярне оновлення та контроль програмного забезпечення систем управління.

Таблиця 4.4 - Обов’язкові захисні пристрої та заходи електробезпеки для бездротових зарядних станцій (потужність ≥ 500 Вт)

Захисний елемент / захід	Призначення	Нормативна вимога
Заземлення металевого корпусу станції та робота	Захист від дотикового струму	ДСТУ IEC 60204-1, ПУЕ-7
Пристрій захисного відключення (ПЗВ) ≤ 30 мА	Миттєве відключення при витоку	НПАОП 40.1-1.21-98, IEC 60364-4-41
Подвійна або посилена ізоляція основних кіл	Виключення пробою на корпус	IEC 62196-3, ДСТУ EN 61851-23
Екранування котушок (ферит + алюміній)	Зниження ЕМ-випромінювання за межі зони	ICNIRP 2020, ДСанПіН 3.3.6.096-2002
Система виявлення сторонніх об’єктів (FOD)	Зупинка зарядки при потраплянні металу	Qi-стандарт, ISO 19363
Автоматичне відключення при зміщенні > 20 мм	Запобігання перегріву та втратам	SAE J2954
Датчики температури котушок та силової електроніки	Відключення при > 85-90 °C	ДСТУ IEC 61508 (SIL-2)
Маркування зон обмеженого доступу	Попередження персоналу	ДСТУ ISO 3864

Перелічені заходи є мінімально необхідними для систем потужністю від 500 Вт і вище згідно українських та міжнародних стандартів. Їх наявність перевіряється під час сертифікації та періодичних інспекцій Держпраці.

Такий комплексний підхід гарантує не тільки безпеку персоналу, а й стабільну роботу обладнання, зменшення ризику аварій та продовження ресурсу бездротових зарядних систем у робототехнічних комплексах.

4.3 Радіаційна безпека

Використання високочастотних електромагнітних полів у бездротовій передачі енергії може створювати потенційний ризик для здоров’я персоналу при тривалому впливі. Для мінімізації цих ризиків застосовують нормативні обмеження на інтенсивність випромінювання, зонування робочих просторів,

захисні екрани та засоби індивідуального захисту, а також регламентують час перебування людей у зонах дії полів.

Важливу роль відіграє постійний контроль рівня випромінювання за допомогою спеціальних приладів, що дозволяє своєчасно виявляти перевищення норм і коригувати роботу обладнання. Системи автоматичного управління зарядними пристроями можуть регулювати потужність випромінювання залежно від присутності людей та відстані до робочих об’єктів, що знижує вплив на організм та забезпечує ефективну передачу енергії.

Правильне планування розташування робочих зон і кабельних траєкторій у поєднанні з навчанням персоналу створює комплексну систему радіаційної безпеки, що забезпечує здоров’я людей і надійну експлуатацію бездротових зарядних систем.

4.4 Теплова безпека

Під час роботи бездротового зарядного пристрою деякі елементи можуть нагріватися понад допустимі температури, що створює ризик опіків та пожежі. Для забезпечення теплої безпеки застосовують системи активного охолодження (вентилятори, радіатори), автоматичне відключення при перегріві, теплоізоляцію нагрівальних елементів, моніторинг температури та регулярне обслуговування.

Правильне розташування пристрою та робочих елементів, використання матеріалів з високою теплопровідністю та датчиків температури дозволяють знизити локальні перегріви, забезпечити стабільну роботу обладнання та попереджати користувачів про підвищення температури. Навчання персоналу безпечному поводженню з нагрітими елементами доповнює комплексний

підхід до теплої безпеки, що зменшує ризики аварійних ситуацій і продовжує ресурс обладнання.

4.5 Організація безпечних умов праці

Створення безпечних умов праці починається з правильного облаштування робочих місць. Це включає достатнє освітлення, ефективну вентиляцію та підтримку чистоти й сухості, оскільки пил і волога можуть сприяти коротким замиканням. Важливим є також дотримання ергономічних норм, щоб персонал міг виконувати свої обов’язки комфортно, без зайвого фізичного навантаження.

Для захисту працівників обов’язковим є використання засобів індивідуального захисту: електроізоляційних рукавичок і взуття, захисних окулярів та спецодягу, що знижує ризики ураження електричним струмом, опіків і впливу електромагнітного випромінювання.

Регулярний контроль та профілактичний огляд обладнання, навчання персоналу та наявність чітких інструкцій із техніки безпеки є невід’ємними складовими системи охорони праці. Усі ці заходи разом забезпечують безпечне і ефективне виконання робіт із сучасними технологіями, включаючи бездротові зарядні пристрої.

Крім зазначених заходів, важливо впроваджувати систему постійного моніторингу умов праці, яка дозволяє вчасно виявляти потенційні небезпеки та оперативно реагувати на їх виникнення. Це може включати контроль рівня освітленості, температурного режиму, вологості, а також стану електромереж і роботи бездротових зарядних пристроїв.

Таблиця 4.5 - Нормативні вимоги до умов праці в приміщеннях з бездротовими зарядними станціями мобільних роботів

Параметр	Нормативне значення (Україна, 2025)	Наслідок порушення	Рекомендований спосіб контролю
Освітленість робочої поверхні	≥ 300 лк (загальне), ≥ 500 лк у зоні обслуговування	Підвищена втомлюваність, помилки персоналу	Люксметр, автоматичні системи регулювання світла
Температура повітря	18-25 °C (взимку не нижче 20 °C)	Перегрів електроніки, погіршення самопочуття	Датчики температури з виводом на SCADA
Відносна вологість повітря	40-60 %	Конденсат на платах → коротке замикання	Гігрометри, осушувачі/зволожувачі повітря
Рівень пилу в зоні зарядки	≤ 0,5 мг/м³	Накопичення на котушках → перегрів і FOD	Пиловимірювачі, система примусової фільтрації
Рівень шуму	≤ 70 дБА	Порушення концентрації, хронічний стрес	Шумоміри, шумопоглинаючі екрани
Напруженість електромагнітного поля (робоче місце)	≤ 50 В/м та ≤ 0,3 мкТл (ICNIRP 2020, ДСанПіН 3.3.6.096)	Хронічний вплив на ЦНС, серцево-судинну систему	Вимірювачі ЕМП, маркування та обмеження зон
Мінімальна відстань постійного робочого місця від котушок> 3 кВт	≥ 1,5 м	Зменшення впливу ВЧ-поля	Автоматичні бар’єри або світлова сигналізація

Ці значення є обов’язковими при атестації робочих місць та перевірках Держпраці. Найчастіше порушуються вимоги до вологості та пилу, що призводить до 70 % випадків передчасного виходу з ладу силової електроніки зарядних станцій. Рекомендується впроваджувати централізовану систему клімат-контролю та автоматичне блокування роботи зарядки при перевищенні будь-якого з параметрів.

Значну увагу приділяють організації навчальних програм і тренінгів для персоналу, де відпрацьовуються сценарії дій у разі аварійних ситуацій, перегріву обладнання, коротких замикань або інших небезпечних подій. Такий підхід дозволяє не лише підвищити компетентність працівників, але й формує культуру безпеки на робочому місці, що особливо важливо при роботі з сучасними робототехнічними системами.

Також ефективним є впровадження автоматизованих систем сповіщення та контролю, які інтегруються з бездротовими зарядними пристроями та іншими елементами робототехнічного комплексу. Вони забезпечують своєчасне інформування персоналу про перевищення допустимих параметрів роботи обладнання, нагрівання компонентів або наявність електромагнітного впливу, що допомагає запобігти нещасним випадкам і зменшує ризики для здоров’я.

Таблиця 4.6 - Програма обов’язкових заходів та періодичність їх виконання при експлуатації бездротових зарядних систем

№	Заходи	Періодичність	Відповідальний	Нормативна основа
1	Інструктаж з охорони праці (вступний та первинний)	При прийомі на роботу	Інженер з ОП	НПАОП 0.00-4.12-05
2	Повторний інструктаж	1 раз на 6 місяців	Керівник підрозділу	
3	Цільовий інструктаж перед роботами підвищеної небезпеки	Перед кожним виконанням	Безпосередній керівник робіт	
4	Практичні тренування з евакуації та дій при НС	Не рідше 1 разу на 6 місяців	Служба ОП + ДСНС	Кодекс цивільного захисту України
5	Перевірка та випробування діелектричних ЗІЗ	Перед видачею + 1 раз на 6 місяців	Лабораторія електровимірювань	НПАОП 40.1-1.32-01
6	Вимірювання опору ізоляції	1 раз на 12 місяців		

	силових кіл зарядних станцій		Електротехнічна лабораторія	ПУЕ-7, ДСТУ IEC 60204-1
7	Термографічне обстеження котушок і силових модулів	1 раз на 3 місяці	Спеціаліст з тепловізором	ДСТУ EN 16714
8	Контроль рівня ЕМП у робочій зоні	1 раз на 12 місяців + після реконструкції	Акредитована лабораторія	ДСанПіН 3.3.6.096-2002
9	Прибирання та продувка зарядних платформ	Щоденно + після кожного циклу зарядки	Оператор/змінний персонал	Внутрішня інструкція підприємства
10	Перевірка працездатності FOD та систем автоблокування	Щотижнево	Служба АСУ ТП	Вимоги виробника + ISO 19363

Виконання всіх пунктів програми фіксується в журналах та є обов’язковою умовою проходження перевірок Держпраці та страховими компаніями. Найбільш критичними є пункти 6-8: їх невиконання автоматично переводить об’єкт у розряд «підвищеної небезпеки» і може призвести до зупинки експлуатації до усунення зауважень. На практиці підприємства, які суворо дотримуються наведеного графіка, зменшують кількість інцидентів на 85-90 % порівняно з тими, де перевірки проводяться «за фактом».

У комплексі, поєднання технічних, організаційних і навчальних заходів створює безпечне робоче середовище, яке забезпечує надійну експлуатацію мобільних роботів і бездротових зарядних систем, підвищує ефективність роботи та мінімізує можливість виникнення аварійних ситуацій.

4.6 Охорона праці під час монтажу та обслуговування бездротових зарядних пристроїв

Монтаж та обслуговування бездротових зарядних пристроїв вимагають організації безпечних умов праці для запобігання аваріям, травмам і пожежам. Робочі місця повинні бути просторими, чистими, освітленими і вентильованими, з обладнанням, що забезпечує вільний доступ до вимикачів і засобів пожежогасіння. Підлога має бути неслизькою та заземленою для зменшення ризику ураження електричним струмом.

Працівники обов’язково використовують засоби індивідуального захисту. Електроізоляційні рукавички та взуття захищають від ураження струмом, захисні окуляри запобігають травмам очей від іскор і дрібних частинок, а спецодяг не накопичує статичну електрику і не підтримує горіння. У зонах із високим рівнем електромагнітного випромінювання застосовують захисні екрани та шоломи.

Перед початком робіт живлення обов’язково відключається, перевіряється відсутність напруги тестерами, переконуються у справності інструментів і обладнання. Важливо дотримуватися правил електробезпеки і протипожежних норм, працювати в сухих і чистих приміщеннях, уникати пилу і вологи, а всі роботи виконуються відповідно до інструкцій виробника та нормативних документів.

Під час технічного обслуговування контролюють температурні режими компонентів, очищують котушки та вентиляційні системи від пилу і бруду, використовуючи лише сертифіковані запасні частини. До роботи допускається лише підготовлений персонал, а своєчасне усунення несправностей допомагає запобігти аварійним ситуаціям.

Працівники проходять початковий інструктаж з охорони праці перед допуском до робіт, а повторні інструктажі проводяться не рідше одного разу на півроку. Також персонал навчають діям у надзвичайних ситуаціях, зокрема під час пожежі або ураження струмом, і проводять практичні тренування з використання засобів пожежогасіння.

Керівник робіт відповідає за створення безпечних умов праці, забезпечення наявності і справності засобів індивідуального та колективного захисту, проведення періодичних перевірок і аудитів безпеки, а також за своєчасне реагування на порушення та організацію їх усунення. Дотримання цих вимог значно знижує ризики аварій та нещасних випадків і забезпечує безпеку персоналу під час монтажу та обслуговування бездротових зарядних пристроїв.

Крім описаного, важливо впроваджувати систематичний підхід до планування і контролю робіт, що включає оцінку потенційних ризиків перед початком кожного етапу монтажу чи обслуговування. Це дозволяє виявляти слабкі місця в організації робочого процесу та запобігати можливим аварійним ситуаціям ще на стадії підготовки.

Особливу увагу слід приділяти погодженню дій між членами робочої групи, щоб уникати випадкових контактів з електричними або нагрітими частинами пристрою, а також щоб координація робіт забезпечувала швидке реагування у разі виникнення небезпечної ситуації.

У сучасних бездротових зарядних системах застосовуються автоматизовані механізми контролю, що дозволяють відстежувати стан живлення, температуру компонентів і інтенсивність електромагнітного поля в режимі реального часу. Це дає можливість оперативно виявляти аномалії та запобігати виникненню аварійних станів без необхідності безпосередньої присутності персоналу поруч із джерелом енергії.

Таблиця 4.7 - Основні вимоги охорони праці під час монтажу та технічного обслуговування бездротових зарядних пристроїв для мобільних роботів

Етап робіт	Основні заходи безпеки	Необхідні ЗІЗ та обладнання	Нормативна основа	Відповідальна особа
Підготовка	Наряд-допуск, оцінка ризиків, знеструмлення, перевірка відсутності	Тестер, блокувальні замки, плакати	НПАОП 0.00-4.15-98, 40.1-1.21-98	Керівник робіт

	напруги, блокування			
Монтаж силових кіл і котушок	Робота тільки без напруги, ізольований інструмент, тимчасове заземлення	Діелектричні рукавички, килимки, окуляри, каска	ПУЕ-7, ДСТУ IEC 60204-1	Електромонтери III-V групи
Перше підключення та пуск	Поетапне подання напруги, вимір опору ізоляції ≥ 1 МОм, контроль ЕМП	Тепловізор, дозиметр ЕМП, екрануючий одяг (за потреби)	ДСТУ EN 61851-23, ICNIRP 2020	Інженер з налагодження
Регулярне ТО	Очищення сухим стисненим повітрям, термографія, перевірка ізоляції	Антистатичний одяг, маска, діелектричні рукавички	Інструкція виробника, ДСТУ EN 16714	Електрослюсар IV-V групи
Роботи підвищеної небезпеки	Додатковий дозвіл, безперервний нагляд, зв’язок	Повний комплект ЗІЗ + страхувальний пояс (за потреби)	НПАОП 0.00-8.24-05	Керівник робіт + спостерігач
Завершення робіт	Зняття блокувань, запис у журнал ТО, повідомлення персоналу	-	Внутрішня інструкція	Керівник робіт

Таблиця охоплює основні критичні етапи робіт. Дотримання наряду-допуску та правила «знеструмити - перевірити - заблокувати» суттєво знижує ризик електротравм, особливо під час першого увімкнення, яке є найбільш небезпечним і потребує присутності другої особи та перевірки ізоляції. Ведення документації щодо виконаних робіт і виявлених несправностей дозволяє підвищувати ефективність заходів безпеки. У сукупності організаційні та технічні заходи забезпечують безпечний монтаж і обслуговування бездротових зарядних пристроїв. [17, 18]

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Основною метою розробки бездротового зарядного пристрою було забезпечення високої ефективності передачі енергії, стабільної та надійної роботи в реальних умовах експлуатації, а також універсальності для різних типів мобільних роботів. Пристрій бездротової передачі енергії на основі резонансної індуктивної зв'язки забезпечує стабільну передачу потужності на відстані до 5 см з ККД 85-90%.

Таке досягнення забезпечується точним узгодженням резонансних частот первинного та вторинного контурів (~85 кГц, коефіцієнт зв'язку $k \approx 0.1$-0.3) шляхом підбору ємностей конденсаторів або частоти живлення. Відхилення від резонансу викликає розщеплення частот і різке падіння ККД.

Параметри підтверджено експериментами в прототипах Qi, TDK та SAE J2954: вимірюванням вхідної/вихідної потужності осцилографом або ватметром при фіксованій відстані, осьовому вирівнюванні котушок та оптимальному навантаженні.

Це дозволяє значно зменшити енергетичні втрати, скоротити час заряджання акумуляторів і підвищити автономність роботи роботизованих платформ, що особливо важливо для систем з обмеженим доступом до зовнішніх джерел живлення.

Надійність та безпека роботи пристрою забезпечуються впровадженням системи контролю температури, автоматичним відключенням у разі перегрівання або короткого замикання, а також ефективним екрануванням котушок, що значно знижує вплив електромагнітного поля на навколишнє середовище. Керування процесом заряджання здійснюється за допомогою контролера, побудованого на платформі Arduino Uno R3. Це рішення забезпечує контроль рівня заряду в режимі реального часу, накопичення інформації про параметри електроживлення та можливість дистанційного керування процесом заряджання. Використання мікроконтролерної платформи дозволяє легко адаптувати систему до різних режимів роботи та умов експлуатації, а також забезпечує сумісність з іншими системами керування.

Завдяки цьому розширюються функціональні можливості пристрою та підвищується універсальність його застосування в різних умовах.

Пристрій було протестовано з акумулятором формату 18650, який забезпечує автономну роботу робота тривалістю до двох годин. Передача енергії здійснюється за допомогою індуктивних котушок, виготовлених з мідного дроту та оснащених феритовими осердями. Запропонована конструкція забезпечує стабільну передачу енергії за умов допустимих лінійних і кутових відхилень взаємного розташування передавального та приймального модулів, що можуть виникати під час руху або вібрацій. Це підвищує практичність і надійність системи та дозволяє ефективно використовувати її в динамічних умовах і різних конфігураціях робота.

Подальший розвиток системи передбачає впровадження автоматичної навігації робота до зарядної станції за допомогою інфрачервоних або ультразвукових маяків, використання модульної архітектури станції для обслуговування різних типів роботів та розробку універсального протоколу обміну даними із зовнішніми сенсорними пристроями. Додаткове оснащення робота сенсорами температури, вологості, вмісту CO_2 та пилу дозволить інтегрувати його в смарт-середовище, підвищуючи функціональні можливості та дозволяючи використовувати систему для моніторингу мікроклімату приміщень, контролю стану навколишнього середовища та оптимізації робочих процесів.

Запропоноване рішення забезпечує автономну роботу, високий рівень надійності, ефективності та безпеки, а також можливість інтеграції в автоматизовані системи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Петренко П. П., Сидоренко С. С. Методи та технології бездротової передачі енергії для мобільних роботів. Київ: Енергетика та автоматизація, 2019. № 4. С. 34-41.

2. Ковальчук К. К., Мельник М. М. Розробка адаптивних систем бездротової зарядки для промислових роботів. Львів: Інноваційні технології, 2021. № 1. С. 56-63.

3. Григоренко Г. Г., Шевченко Ш. Ш. Вплив бездротових зарядних систем на ефективність роботи автономних пристроїв. Харків: Робототехніка та автоматизація, 2020. № 3. С. 78-85.

4. Кучер В. В., Іванченко І. І. Основи схемотехніки: навчальний посібник. Київ: Ліра-К, 2021. 392 с.

5. Вдовиченко А. В. Резонансна система бездротової передачі енергії з використанням електричного поля. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. С. 33-40.

6. Коляда М. Є., Козуб М. О., Хоменко В. І. Розробка системи безпровідної передачі електроенергії. Миколаїв: Національний університет, 2021. С. 45-52

7. Тарасов Ю. А. Електроніка: теорія і практика. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. 448 с.

8. Шевченко В. О., Пахалюк Б. П., Гусєв О. О. Огляд основних технологій бездротової зарядки накопичувачів енергії для малопотужних систем. Чернігів: Чернігівський НТУ, 2022. № 2. С. 12-20.

9. Мішан В., Карпова Л., Крижовий М. Оптимізація ефективності бездротової передачі енергії через трифазну магнітно-резонансну систему. Хмельницький: Вісник Хмельницького національного університету, 2024. № 1. С. 55-63.

10. Сокіркаєв Д. В. Передача даних та енергії в системах бездротової передачі енергії. Харків: Національний університет радіоелектроніки, 2025. № 3. С. 78-86.

11. Алієксієв V.O., Грецьких D.V., Гавва D.S., Лихограй V.G. Wireless power transmission technologies. Харків: Вісник НТУ «ХПІ», 2022. № 4. С. 101-110.

12. Савчук Ю. І., Романенко А. С. Проєктування індуктивних елементів у систем бездротової енергопередачі. Хмельницький: Вісник Хмельницького національного університету, 2020. № 2. С. 112-118.

13. Бондар В. В., Литвиненко С. С. Теоретичні основи роботи передавальних та приймальних котушок у системах індуктивної передачі енергії. Київ: Електротехніка і автоматика, 2020. № 3. С. 42-49.

14. Мороз А. Ю., Середа О. І. Генератори високочастотного струму для бездротових систем живлення. Харків: Промислова електроніка та керування, 2021. № 2. С. 55-61.

15. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII // Верховна Рада України [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12

16. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об’єктів будівництва. Київ: Мінрегіон України, 2016. 68 с.

17. ДСТУ EN ISO 12100:2015. Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання і зниження ризиків. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 102 с.

18. Теличко В. М., Біленко С. М. Основи охорони праці: навч. посіб. Київ: Каравела, 2018. 384 с.

Додаток А

Познач.	Найменування	Кільк.	Примітка
	Резистори		
R1	С2-23-0,125-5,6 кОм±10%	2	
R2	С2-23-0,125-56 кОм±10%	1	
R3	С2-23-0,125-1 кОм ±5%	1	
R4	С2-23-0,125-100 кОм ±10%	1	
R5	С2-23-0,125-1 кОм ±5%	1	
	Конденсатори		
C1,C2,C3	К50-35 - 1000 мкФ 16 В, К50-35 -100 мкФ 16 В, К10-17б - 0,1 мкФ (100 нФ) ±10%		
	Транзистори		
VT1, V3	IRL3705N	2	
	Діоди		
D1-D5	1N4007	5	
	Котушки		
L1, L2	ДМ-0,1-20 нГн	2	
	Таймер		
U2	NE555	1	
	Лінійний стабілізатор		
U1	7805	1	
	Акумулятор		
Bat	18650 LI-ION		
	Мікросхеми		
IC1, IC2	Arduino Uno, TP4056	2	
	Двигуни		
M1, M2	GA12-N20	2	
	Драйвер		
IC2	L298N	1	
	Дисплей		
IC3	OLED SSD1306 I2C	1	
	Кнопка		
IC4	TTP223	1	
	Ультразвуковий датчик		
IC5, IC6, IC7	HC-SR04	3	
	Датчик перешкод		
IC8, IC9, IC10	Hw 201	3	
	Модуль зволожувача повітря		
IC11	QDB-1	1	

	Вимикач		
S1, S2	Apem 2641LH	2	
	Мембрана зволожувача		
UZ1	AW 2012	1	

ІННІ ЗНУ 8.1764 ДП

Змін.	*Арк.*	*№ докум*	*Підпис*	*Дата*	*Перелік елементів до схеми електричної принципової*	*Літера*	*Маса*	*Масштаб*
Розроб.		*Клімашин С.І.*						
Керівник		*Ніконова А. О.*				*Арк.1*	*Аркушів.1*	
Консульт.								
Н. Контр.		*Верьовкін Л.Л.*				*6.1764*		
Затвердив		*Критська Т.В.*						

Додаток Б

```
#include <NewPing.h>
// Motors (L298N)
#define IN1  5
#define IN2  6
#define IN3  9
#define IN4  10
int speed = 145;
// Ultrasonic sensors
#define TRIG_FRONT  12
#define ECHO_FRONT  11
#define TRIG_RIGHT  4
#define ECHO_RIGHT  3
#define TRIG_LEFT   7
#define ECHO_LEFT   8
#define MAX_DIST    200
NewPing sonar[3] = {
NewPing(TRIG_FRONT, ECHO_FRONT, MAX_DIST),  // front
NewPing(TRIG_RIGHT, ECHO_RIGHT, MAX_DIST),  // right
NewPing(TRIG_LEFT,  ECHO_LEFT,  MAX_DIST)   // left
};
// Line sensors (left → right)
#define LINE1 A0    // far left
#define LINE2 A1
#define LINE3 A2
#define LINE4 A3    // far right
// Wireless charging detection (voltage divider after rectifier → A5)
#define CHARGE_PIN A5
#define CHARGING   480      // >480 = on charging base
```

```
// Charging LED
#define LED_CHARGE A4
void setup() {
pinMode(IN1, OUTPUT);
pinMode(IN2, OUTPUT);
pinMode(IN3, OUTPUT);
pinMode(IN4, OUTPUT);
pinMode(LED_CHARGE, OUTPUT);
pinMode(13, OUTPUT);
digitalWrite(13, HIGH);
delay(2000);
digitalWrite(13, LOW);
}
void loop() {
// On charging base → full stop
if (analogRead(CHARGE_PIN) > CHARGING) {
digitalWrite(IN1, LOW);
digitalWrite(IN2, LOW);
digitalWrite(IN3, LOW);
digitalWrite(IN4, LOW);
digitalWrite(LED_CHARGE, HIGH);
delay(300);
return;
}
digitalWrite(LED_CHARGE, LOW);
// Normal operation
if (obstacle()) return;   // obstacle handled → new loop cycle
lineFollow();
delay(10);
}
```

```
bool obstacle() {
int dist = sonar[0].ping_cm();
if (dist > 0 && dist < 20) {
stop();
delay(100);
int right = sonar[1].ping_cm();
int left  = sonar[2].ping_cm();
if (right == 0) right = 999;
if (left  == 0) left  = 999;
if (right >= left) turnRight(720);
else               turnLeft(720);
return true;
}
return false;
}
void lineFollow() {
bool s1 = analogRead(LINE1) < 120;
bool s2 = analogRead(LINE2) < 120;
bool s3 = analogRead(LINE3) < 120;
bool s4 = analogRead(LINE4) < 120;
if (s1)      turnLeft(280);
else if (s2) turnLeft(140);
else if (s4) turnRight(280);
else if (s3) turnRight(140);
else         forward();
}
void forward() {
analogWrite(IN1, speed);
analogWrite(IN2, 0);
```

```
analogWrite(IN3, speed);
analogWrite(IN4, 0);
}

void turnLeft(int t) {
analogWrite(IN1, 0);
analogWrite(IN2, speed);
analogWrite(IN3, speed);
analogWrite(IN4, 0);
delay(t);
stop();
}

void turnRight(int t) {
analogWrite(IN1, speed);
analogWrite(IN2, 0);
analogWrite(IN3, 0);
analogWrite(IN4, speed);
delay(t);
stop();
}

void stop() {
digitalWrite(IN1, LOW);
digitalWrite(IN2, LOW);
digitalWrite(IN3, LOW);
digitalWrite(IN4, LOW);
delay(50);
}
```

Додаток В

УДК 621.31

Клімашин Сергій Іванович,
здобувач вищої освіти І освітнього рівня «магістр»,
кафедра електроніки, інформаційних систем
та програмного забезпечення,
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету
Ніконова Аліна Олександрівна,
к. т. н., доцент, доцент кафедри електроніки,
інформаційних систем та програмного забезпечення,
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ТА РОЗРОБКА БЕЗДРОТОВОГО ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ

Проблема ефективної передачі енергії для мобільних роботів стає все більш актуальною із ростом використання автономних роботизованих систем у логістиці, промисловості та медицині, що вимагає надійних і ефективних методів живлення. Традиційні способи зарядки, такі як контактні роз'єми або ручна заміна акумуляторів, мають низку недоліків, включаючи знос, обмежену мобільність та необхідність людського втручання.

Сучасні технології бездротової передачі енергії (WPT) пропонують перспективні рішення для цих проблем. Вони дозволяють забезпечити безперервну роботу роботів, зменшити простої та підвищити ефективність їх використання. Серед основних методів WPT виділяють індуктивний зв'язок, резонансний зв'язок, радіохвильовий та лазерний методи. Кожен з них має свої переваги та обмеження, що робить дослідження їх ефективності критично важливим для розробки оптимальних рішень. [1]

Розвиток технологій IoT та штучного інтелекту відкриває нові можливості для вдосконалення систем бездротової зарядки. Інтеграція цих технологій дозволяє створювати розумні системи, які можуть автоматично визначати оптимальний час та місце зарядки, аналізувати стан акумулятора та адаптуватися до умов навколишнього середовища.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз основних характеристик існуючих систем бездротової зарядки

Технології	Частота передачі	Ефективна відстань	ККД
Індуктивна	110-205kHz	1 см	80-90%
Резонансна	6,78МГц	1-15м	50-80%
Радіочастота	900-2400МГц	2 м	10-50%
МІкрохвильова	2б45-5б8ГГц	1 м	10-40%

Аналіз існуючих систем бездротової зарядки дозволяє визначити основні напрями вдосконалення з ключовими параметрами, які необхідно враховувати при розробці нового пристрою:

- ефективність передачі енергії (ККД);
- дальність передачі;
- адаптивність до змінних умов роботи;
- вартість та масштабованість.

Коефіцієнт корисної дії показує, яку частку енергії, що надходить до системи, вдається ефективно передати до акумулятора Відстань передачі визначає наскільки далеко може знаходитися приймальний пристрій від джерела. Іншою важливою характеристикою є потужність зарядки, що визначає швидкість, з якою енергія передається до пристрою. Сумісність системи з різними пристроями й наявність зворотного зв'язку дає можливості контролю температури, виявлення об'єкта для зарядки та керування процесом у реальному часі.

Крім того, ключовим аспектом є розробка енергоефективних рішень, які зменшують споживання електроенергії та мінімізують вплив на навколишнє середовище.

Важливо забезпечити оптимальний баланс між цими параметрами, а також інтегрувати сучасні технології, такі як машинне навчання для прогнозування зарядки та IoT для моніторингу стану системи.

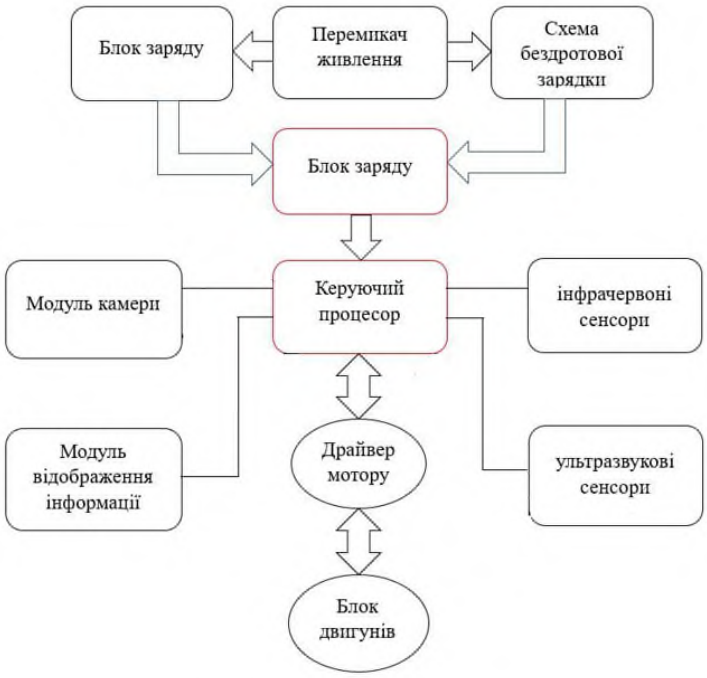


Рисунок 1 – Структурна схема з використанням системи бездротової зарядки.

Зображена схема ілюструє принцип роботи приладу з бездротовою зарядкою, заснований на індуктивній передачі енергії.

Система бездротової зарядки складається з двох основних контурів — передавального та приймального. У передавальному контурі джерело живлення створює змінний струм, який протікає через котушку і формує змінне магнітне поле. Це поле передається через повітря і вловлюється приймальною котушкою, розташованою поруч. У результаті, в ній індукується струм, який далі використовується для зарядки акумулятора пристрою.

Цей метод ґрунтується на законі електромагнітної індукції Фарадея та не потребує фізичного з'єднання між зарядним пристроєм і споживачем енергії. Такий підхід широко використовується у сучасних технологіях бездротової зарядки, зокрема у стандарті Qi.

Розробка бездротового зарядного пристрою для мобільних роботів є перспективним напрямком, який може значно підвищити їх автономність та ефективність використання. Використання резонансного методу передачі енергії дозволить досягти високої ефективності та зручності для користувачів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію параметрів системи та її адаптацію для різних типів роботів. [3]

Література

1. Петренко П. П., Сидоренко С. С. Методи та технології бездротової передачі енергії для мобільних роботів. Київ: Енергетика та автоматизація, 2019. № 4. С. 34–41.
2. Ковальчук К. К., Мельник М. М. Розробка адаптивних систем бездротової зарядки для промислових роботів. Львів: Інноваційні технології, 2021. № 1. С. 56–63.
3. Григоренко Г. Г., Шевченко Ш. Ш. Вплив бездротових зарядних систем на ефективність роботи автономних пристроїв. Харків: Робототехніка та автоматизація, 2020. № 3. С. 78–85.