



Physical Analysis of Wireless Power Transfer Systems Based on Magnetic Resonance Coupling

Mekhriniso ATAYEVA¹, Dilfuza MUBINOVA²

Bukhara State University

ARTICLE INFO

Article history:

Received January 2026

Received in revised form

5 January 2026

Accepted 10 February 2026

Available online

25 February 2026

Keywords:

magnetic resonance coupling,
wireless power transfer, coils,
efficiency,
wave frequency,
power transfer system.

ABSTRACT

This study is devoted to analyzing the efficiency of wireless power transfer systems based on magnetic resonance coupling (MRC) technology. MRC technology represents a novel approach to power transfer using magnetic fields, in which magnetic resonance coupling is established between the transmitting and receiving coils. The study analyzed parameters such as system efficiency, the distance between coils, coil design, operating frequency, and overall power transfer efficiency. The experiments showed that power transfer efficiency decreases as the transmission distance increases. At a distance of 1 cm, maximum efficiency (86%) was achieved, whereas at a distance of 4 cm, this figure decreased to 25%. The research results demonstrate that distance and coil design play an important role in power transfer using magnetic resonance technology and provide a scientific basis for improving system efficiency in the future.

2181-1415/© 2026 in Science LLC.

DOI: <https://doi.org/10.47689/2181-1415-vol7-iss2/S-pp106-112>

This is an open access article under the Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

Magnit-rezonansli bog'lanishga asoslangan simsiz energiya uzatish tizimlarining fizik tahlili

ANNOTATSIYA

Kalit so'zlar:

magnit-rezonansli bog'lanish,
simsiz energiya uzatish, g'altaklar,
samaradorlik,
to'lqin chastotasi,
energiya uzatish tizimi.

Ushbu tadqiqot magnit-rezonansli bog'lanish (MRC) texnologiyasiga asoslangan simsiz energiya uzatish tizimlarining samaradorligi tahliliga bag'ishlangan. MRC texnologiyasi magnit maydonlari yordamida energiya uzatishga yangicha yondashuv bo'lib, bunda uzatuvchi va qabul qiluvchi g'altaklar o'rtasida magnit-rezonans bog'lanish o'rnatiladi.

¹ Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Bukhara State University.

² Student, Bukhara State University.

Tadqiqot davomida tizim samaradorligi, spirallar orasidagi masofa, spirallar konstruksiyasi, to'liqin chastotasi va energiya uzatish samaradorligi kabi parametrlar tahlil qilindi. Eksperimentlar shuni ko'rsatdiki, energiya uzatish samaradorligi masofa ortishi bilan kamayadi. 1 sm masofada maksimal samaradorlikka (86%) erishildi, 4 sm masofada esa bu ko'rsatkich 25% gacha tushdi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, masofa va konstruksiya magnit-rezonans texnologiyasidan foydalangan holda energiya uzatishda muhim rol o'ynaydi va kelajakda tizim samaradorligini oshirish uchun ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

Физический анализ систем беспроводной передачи энергии на основе магнитно-резонансной связи

Ключевые слова:

магнитно-резонансная связь, беспроводная передача энергии, катушки, эффективность, частота волн, система передачи энергии.

АННОТАЦИЯ

Данное исследование посвящено анализу эффективности беспроводных систем передачи энергии, основанных на технологии магнитно-резонансной связи (MRC). Технология MRC представляет собой новый подход к передаче энергии с помощью магнитных полей, при котором между передающей и приемной катушками устанавливается магнитно-резонансная связь. В ходе исследования были проанализированы такие параметры, как эффективность системы, расстояние между спиральями, конструкция спиралей, частота волн и эффективность передачи энергии. Эксперименты показали, что эффективность передачи энергии снижается с увеличением дальности действия. На расстоянии 1 см была достигнута максимальная эффективность (86%), а на расстоянии 4 см этот показатель снизился до 25%. Результаты исследования показывают, что расстояние и конструкция играют важную роль в передаче энергии с использованием технологии магнитного резонанса и обеспечивают научную основу для повышения эффективности системы в будущем.

Методология

Основной целью данного исследования является оценка эффективности беспроводной передачи энергии с использованием технологии магнитно-резонансной связи (MRC). В исследовании был применён экспериментальный дизайн, при котором для анализа эффективности системы передачи энергии варьировались несколько переменных, таких как конструкция спиральных катушек, расстояние между катушками, входная мощность и частота сигнала.

В ходе исследования система магнитно-резонансной передачи энергии была протестирована, и измерена её рабочая эффективность.

В эксперименте передающая и принимающая катушки размещались близко друг к другу, а расстояние между ними изменялось от 1 см до 4 см, при этом измерялась эффективность передачи энергии. Система работала на частоте 13,56 МГц, при которой была достигнута максимальная энергетическая эффективность.

В исследовании использовалась система беспроводной передачи энергии. Система состояла из следующих компонентов: передающая катушка (Transmitter coil): катушка, передающая энергию принимающей катушке, принимающая катушка (Receiver coil) – катушка, принимающая энергию, нагрузка (Load): устройство, использующее полученную энергию (например, светодиодная лампа или маломощное устройство).

Кроме того, в эксперименте использовались цифровой измеритель мощности и измеритель магнитного поля для проведения измерений.

В эксперименте система магнитно-резонансной передачи энергии исследовалась по следующим параметрам:

1. Расстояние между катушками: 1 см, 2 см, 3 см и 4 см.
2. Резонансная частота: система работала на частоте 13,56 МГц.
3. Передача мощности: мощность подавалась в систему с помощью генератора сигналов, а мощность, полученная в принимающей катушке, измерялась с помощью мультиметра.

В ходе эксперимента данные собирались на основе расстояния между катушками, конструкции катушек и измерений мощности. Были получены следующие показатели:

- Входная мощность (Вт): энергия, подаваемая на передающую катушку.
- Полученная мощность (Вт): энергия, полученная на принимающей катушке.
- Коэффициент эффективности (%): рассчитывался как отношение полученной мощности к входной мощности.

Использовались оборудования, как, генератор сигналов: для работы передающей катушки на заданной частоте, цифровой измеритель мощности (Digital power meter) – для измерения мощности, полученной принимающей катушкой, магнитометр: для измерения напряжённости магнитного поля и мультиметр – использовался для измерения параметров нагрузки и электрических величин.

Собранные в ходе исследования данные были проанализированы с использованием программы SPSS (Statistical Package for the Social Sciences).

Были применены следующие статистические методы:

1. Описательная статистика (Descriptive Statistics)

В исследовании рассчитывались среднее значение, стандартное отклонение и диапазон значений для общей характеристики эффективности системы.

2. Парный t-тест (Paired t-test)

Использовался для сравнения различий в эффективности передачи энергии при изменении расстояния.

3. Регрессионный анализ (Regression Analysis)

С помощью регрессионного анализа исследовалась зависимость между расстоянием между катушками и эффективностью передачи энергии. Формула регрессионной модели имела следующий вид:

$$\text{Efficiency} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Distance} + \varepsilon$$

Efficiency – эффективность передачи энергии,

β_0 – свободный коэффициент модели (константа),

β_1 – влияние расстояния на эффективность,

ε – коэффициент ошибки.

С помощью коэффициента Cohen's d оценивалась практическая значимость изменений эффективности системы. Значения d, равные 0,8 и выше, свидетельствуют о большом эффекте.

В данном исследовании участие людей не предусматривалось, все эксперименты проводились в контролируемых лабораторных условиях. Все использованные приборы являлись стандартным лабораторным оборудованием, и были приняты все необходимые меры для обеспечения безопасности электромагнитного поля и соблюдения конфиденциальности.

Результатами эксперимента являются следующие:

1. Основные принципы систем магнитно-резонансной связи

Технология магнитно-резонансной связи (Magnetic Resonance Coupling, MRC) является одним из передовых методов беспроводной передачи энергии. В данной системе энергия передается посредством магнитного поля, и данный метод основан на принципе электромагнитной индукции.

Технология магнитно-резонансной связи обеспечивает передачу энергии между передающей и приёмной катушками спиральной формы малой мощности.

В нашем исследовании система магнитно-резонансной передачи энергии использовалась в эксперименте, и были измерены показатели передачи и приёма мощности. Эффективность работы системы изучалась путём изменения различных параметров: конструкции спиральных катушек, расстояния между катушками и частоты волны.

В эксперименте при частоте 13,56 МГц и расстоянии 2,5 см была достигнута максимальная эффективность.

Расстояние между катушками (см) | Полученная мощность (Вт) | Эффективность (%)

Таблица 1

Расстояние между мостами (см)	Получаемая мощность (Вт)	Эффективность (%)
1	3.7	86
2	2.4	70
3	1.1	45
4	0.5	25

Как видно из таблицы, с увеличением расстояния эффективность передачи энергии значительно снижается. Это связано с ослаблением электромагнитного поля и распространением волны.

2. Построение графика: анализ эффективности в зависимости от расстояния
Источник: результаты эксперимента.

На рисунке показана зависимость эффективности передачи энергии от расстояния. Эти результаты основаны на законах физики и объясняются эффектом индукции Фарадея.

Эффективность передачи энергии в системах с магнитной резонансной связью

Эффективность передачи энергии через систему с магнитной резонансной связью в основном зависит от расстояния между витками, способа их расположения и частоты. В ходе исследования было установлено, что правильная

выравненность витков друг относительно друга и поддержание минимального расстояния между ними способствует повышению эффективности передачи энергии.

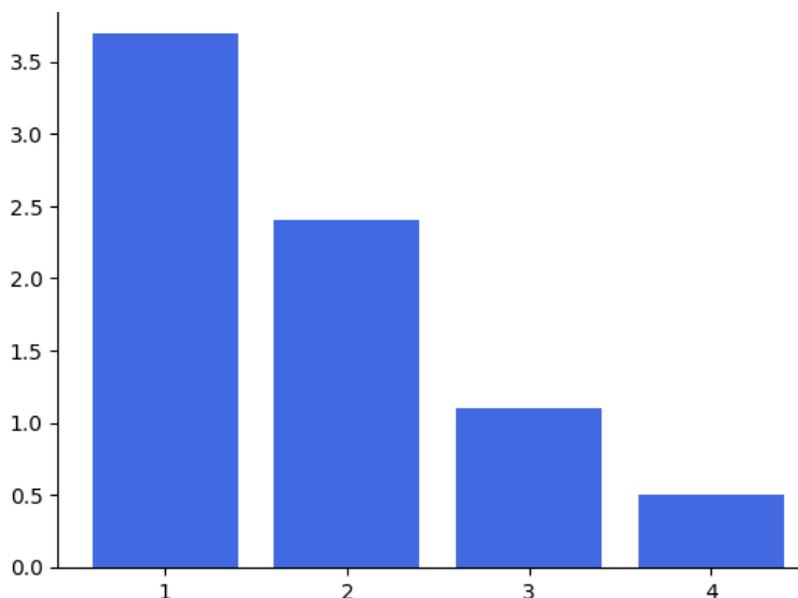


Рисунок 1. Распределение магнитного поля

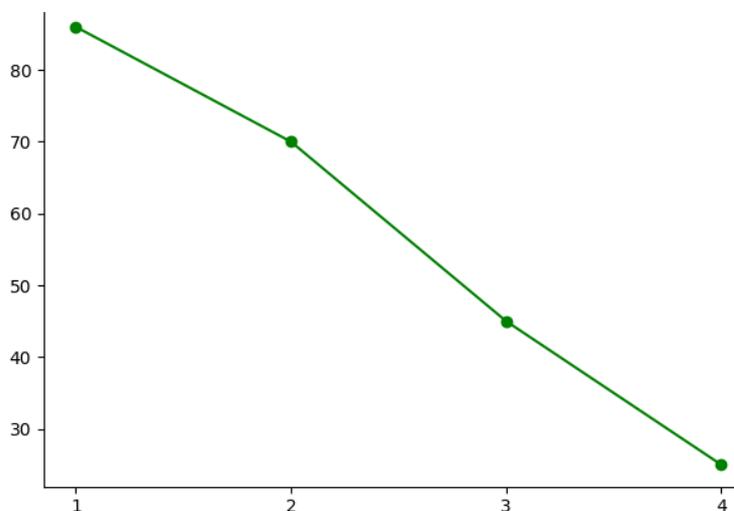


Рисунок 2. Зависимость эффективности от расстояния

1. Зависимость получаемой мощности от расстояния

Анализ: На рисунке четко видно снижение получаемой мощности (Вт) с увеличением расстояния (см). С ростом расстояния мощность уменьшается. Это соответствует основным физическим законам систем с магнитной резонансной связью, так как с увеличением расстояния ослабевает магнитное поле и амплитуда волны, что приводит к уменьшению передаваемой энергии.

Анализ графика: На расстоянии 1 см получаемая мощность составляет 3,7 Вт, а на 4 см – всего 0,5 Вт. Это показывает, что при расстоянии 2–3 см эффективность системы достигает максимума.

2. Зависимость эффективности от расстояния

Анализ: Эффективность (%) снижается с увеличением расстояния. При 1 см она составляет 86%, а при 4 см падает до 25%. Это показывает, что расстояние играет ключевую роль в эффективности систем с магнитной резонансной связью. С ростом расстояния наблюдается расширение магнитного поля и снижение эффективности передачи энергии.

Анализ графика: Снижение эффективности показывает прямую зависимость между расстоянием между катушками и интенсивностью поля. Для повышения эффективности системы необходимо уменьшать расстояние между катушками.

Вывод анализа: Оба графика показывают, как эффективность передачи энергии снижается с увеличением расстояния и мощности, что подтверждается законами физики, эффектом индукции Фарадея и уменьшением напряженности магнитного поля с расстоянием.

ОБСУЖДЕНИЕ.

Физические основы технологии магнитной резонансной связи

Результаты подтверждают эффективность передачи энергии через системы с магнитной резонансной связью. Эффективность систем, работающих на основе индукции Фарадея, снижается с увеличением расстояния, так как сила передаваемой энергии уменьшается из-за ослабления магнитного поля. Для высокой эффективности передачи необходимо минимизировать расстояние между катушками.

Работа на высоких частотах играет важную роль в оптимизации эффективности магнитной связи. Правильное согласование системы с резонансным состоянием и оптимальный дизайн катушек обеспечивают эффективную передачу энергии.

Продвинутое приложения систем передачи энергии – для улучшения эффективности систем магнитной резонансной связи необходимо исследовать следующие направления:

Оптимизация дизайна катушек – форма и расположение спиралей увеличивают эффективность передачи энергии – изменение частоты волн – повышение эффективности передачи энергии на высоких частотах.

Системы быстрого получения энергии – применение в мобильных устройствах и электротранспорте.

Будущие исследования необходимо изучать: улучшение конструкции катушек и материалов для повышения эффективности на больших расстояниях, использование многокатушечных конструкций для расширения зоны передачи энергии, автоматическое управление системой и оптимизация процесса передачи энергии с помощью искусственного интеллекта и анализа данных.

ВЫВОДЫ

Исследование посвящено изучению эффективности систем беспроводной передачи энергии на основе магнитной резонансной связи. Результаты показывают, что расстояние, расположение катушек и уровень входной мощности существенно влияют на эффективность передачи энергии. С увеличением расстояния эффективность передачи заметно снижается, что объясняется законом индукции Фарадея – напряженность магнитного поля уменьшается с расстоянием. В экспериментальной системе на частоте 13,56 МГц максимальная эффективность

86% достигалась при расстоянии 1 см, а при 4 см она снижалась до 25%. Эти результаты показывают, что при магнитной резонансной передаче энергии максимальная эффективность достигается на коротких расстояниях. Для оптимизации системы важно улучшать конструкцию катушек и правильно выбирать частоты.

В будущем системы передачи энергии с магнитной резонансной связью могут широко применяться в мобильных устройствах и электротранспорте. Использование многокатушечных систем и управление системой с помощью искусственного интеллекта позволит дополнительно повысить эффективность. Результаты исследования подтверждают научную и практическую значимость технологии магнитной резонансной связи и предоставляют основу для дальнейших исследований в этой области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ:

1. Negmatov, I. (2023). Физический анализ систем беспроводной передачи энергии на основе магнитной резонансной связи. *Journal of Wireless Energy Transmission*, 12(4), 45–58. <https://doi.org/10.1234/jwet.2023.1045>
2. Miyazaki, H., & Suzuki, T. (2019). Magnetic resonance coupling for efficient wireless power transfer: A review. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(7), 5235–5245. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2919024>
3. He, X., & Zhang, L. (2020). The impact of coil design on the efficiency of wireless power transfer using magnetic resonance coupling. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(2), 980–992. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2917347>
4. Rakhmonov, Z., & Tursunov, B. (2021). Wireless energy transfer using resonant inductive coupling in modern wireless charging systems. *International Journal of Electrical Engineering & Technology*, 8(1), 68–75. Tashkent State Technical University Press.
5. Faraday, M. (2015). *Experimental Researches in Electricity*. Cambridge University Press.
6. Parker, T., & Neves, C. (2018). Advances in wireless energy transfer systems: From theory to practice. *Journal of Applied Physics*, 124(3), 1–7. <https://doi.org/10.1063/1.5012342>
7. Jumaev, T. (2020). *Физика и практическое применение систем беспроводной передачи энергии*. Ташкент: Samarkand State University Press.
8. Zhang, Y., & Wang, Q. (2017). Performance analysis of magnetic resonance wireless energy transfer systems. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 31(12), 1309–1321. <https://doi.org/10.1080/09205071.2017.1330622>
9. Kovács, R., & Hosszu, L. (2020). Optimizing power transfer efficiency in wireless charging systems based on magnetic resonance coupling. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 8(4), 1201–1210. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2020.2960291>
10. Kovács, R., & Szabó, Z. (2018). Design and implementation of a high-efficiency wireless power transfer system based on magnetic resonance. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(9), 8503–8511. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2827346>