

Индукционная беспроводная зарядка БПЛА: исследование и пути оптимизации

Н.И. Царицон, Т.Г. Кормин

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б. Н. Ельцина*

Аннотация: Представлены результаты исследования индукционных методов беспроводной зарядки для аккумуляторов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Проведено экспериментальное моделирование передачи энергии с использованием индуктивной связи. Определены основные факторы, влияющие на эффективность системы: расстояние между катушками, точность их выравнивания и тепловые потери. Показано, что энергетические потери при увеличении расстояния достигают 45 %, а при смещении катушек на 3 см эффективность передачи снижается более чем на 45 %. Разработаны рекомендации по повышению эффективности, включая оптимизацию материалов катушек, увеличение частоты передачи энергии, автоматизацию выравнивания катушек и введение активного охлаждения. Полученные результаты формируют основу для дальнейшего совершенствования систем беспроводной зарядки БПЛА.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, индукционные методы, резонансная индукция, беспилотные летательные аппараты, оптимизация систем зарядки.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят широкое применение в мониторинге окружающей среды, доставке грузов, сельском хозяйстве и поисково-спасательных операциях [1,2]. Одним из основных ограничений их использования является ограниченная автономность, обусловленная необходимостью частой зарядки аккумуляторов [3].

Современные технологии беспроводной передачи энергии (Wireless Power Transfer, WPT) предоставляют новые возможности для повышения автономности БПЛА [4]. Среди них индуктивная передача энергии (Inductive Power Transfer, IPT) выделяется высокой стабильностью на малых расстояниях и возможностью передачи энергии через непроводящие материалы [4].

Вместе с тем IPT-технологии сталкиваются с проблемами потерь энергии, чувствительности к точности совмещения катушек и ограничениями по дальности передачи.

Целью данного исследования является разработка и экспериментальная оценка индукционной системы беспроводной зарядки БПЛА с последующей оптимизацией её параметров.

Научная новизна заключается в экспериментальной идентификации факторов потерь и разработке практических рекомендаций по их минимизации.

1. Обзор литературы.

1.1 Принципы индукционной передачи энергии. Индукционная передача энергии основана на явлении электромагнитной индукции, описанном М. Фарадеем. При совпадении резонансных частот передающей и приёмной катушек достигается эффективная передача энергии. Исследования Kurs и Karalis показали, что резонансная настройка увеличивает дальность передачи до нескольких метров и снижает потери на 20–30 % [3].

1.2 Материалы катушек. Качество материалов существенно влияет на эффективность систем. Применение нанокристаллических ферритов позволяет сконцентрировать магнитный поток и повысить эффективность передачи энергии до 50 % [5].

1.3 Влияние расстояния и выравнивания катушек. Эффективность передачи энергии резко снижается при увеличении расстояния между катушками свыше 3 см [6] и при смещении приёмной катушки более чем на 2 см [7]. Для минимизации потерь применяются многокатушечные конструкции и системы автоматического выравнивания.

1.4 Высокочастотные системы. Передача энергии на частотах выше 100 кГц позволяет уменьшить размеры катушек и повысить эффективность до 91,3 % [8], однако требует применения материалов с низкими тепловыми потерями.

1.5 Современные системы беспроводной зарядки. Современные беспроводные зарядные системы стремятся преодолеть ограничения

традиционных технологий за счёт интеграции адаптивных контуров управления и новых материалов, в том числе для зарядки дронов в движении.

1.7 Обсуждение ключевых выводов. Анализ литературы показал, что несмотря на значительные достижения в области беспроводной зарядки, остаются нерешённые проблемы:

1. Потери энергии: даже в современных системах уровень потерь достигает 35%.
2. Чувствительность к расстоянию и выравниванию: решения в виде автоматических систем совмещения требуют значительных затрат.
3. Зависимость от материалов: совершенствование ферритов и использование метаматериалов является важным направлением для дальнейших исследований.

2. Экспериментальные исследования.

В рамках исследования разработана экспериментальная система беспроводной зарядки с индуктивной передачей энергии, выполненная по топологии последовательного соединения LC-контуров (series-series, SS) для минимизации потерь. Система включает передающую и приёмную катушки, оптимизированные для зарядки аккумуляторов 3S LiPo.

Экспериментальная установка состоит из:

- Передающей катушки диаметром 10 см из медного провода 1 мм без ферритового сердечника;
 - Приёмной катушки, аналогичной по конструкции, размещённой на высоте 3–4 мм над передающей;
 - Источника питания (24 Вт, 50 кГц);
 - Системы мониторинга на основе мультиметра для контроля мощности на входе и выходе.
-

Разработана система беспроводной зарядки на основе индуктивной передачи энергии с последовательным соединением LC-контуров (Series–Series, SS). Система включает:

- передающую и приёмную катушки диаметром 10 см из медного провода 1 мм (без ферритовых сердечников),
- источник питания (24 Вт, 50 кГц),
- модуль управления BMS,
- систему мониторинга мощности на входе и выходе.

Основные элементы схемы: MOSFET-транзисторы IRF3205, контроллер IR2153D, мостовой выпрямитель и резонансные конденсаторы. Таблица основных компонентов приведена в Таблице 1.

Таблица № 1

Таблица элементов и функций системы беспроводной зарядки

Элемент	Значение	Функция
V4	24 В	Источник питания.
U1 (IR2153D)	-	Контроллер генерации управляющих сигналов.
R1 и R2	10 кОм, 1 кОм	Определение частоты работы генератора управляющих сигналов.
C1 и C3	1 нФ, 1 мкФ	Сглаживание и фильтрация управляющих сигналов.
Q1 и Q2 (IRF3205)	-	MOSFET-транзисторы.
R3 и R4	22 Ом	Ограничение тока на затворах MOSFET-транзисторов.
C4 и C5	4 мкФ	Конденсаторы резонансного контура.
TR1	Трансформатор	Индуктивная передача энергии между передающей и приемной сторонами системы.
D1–D4 (10BQ040)	-	Диоды мостового выпрямителя.
C6, C7 и C8	330 нФ, 2200 мкФ, 1000 мкФ	Фильтрация выпрямленного напряжения.
L1	12 В (нагрузка)	Модель нагрузки, имитирующая аккумулятор для тестирования системы.

Методика экспериментов включала:

- измерение потерь энергии при изменении расстояния между катушками (3–30 мм),
- анализ влияния смещения катушек (0–3 см),
- оценку тепловых потерь в процессе зарядки.

Экспериментальная установка представлена на «рис. 1».

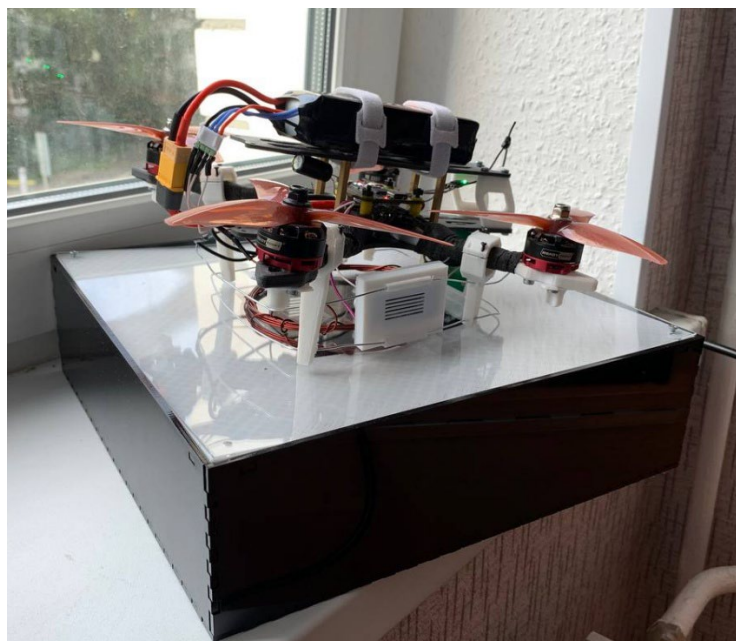


Рис. 1. – Экспериментальная установка

Результаты тестирования представлены в Таблице 2.

Таблица №2

Результаты тестирования системы беспроводной зарядки.

Параметр	Значение
Частота передачи энергии	50 кГц
Максимальная мощность	15 Вт
Энергетические потери	До 45%
Время зарядки (3S, 2700 мА·ч)	120 минут
Температура катушек	До 60 °С

Результаты и их обсуждение

При расстоянии 3 мм энергетические потери составили около 35 %, при 1 см – до 45 %, а при 3 см зарядка становилась нестабильной.

При полном совмещении катушек потери составляли 25 %. Смещение на 1 см увеличивало их до 30 %, на 3 см — до 45 %.

Температура катушек достигала 60 °С за 30 минут работы, что снижало эффективность передачи на 5–10 % и вызывало нестабильность.

Максимальная мощность передачи составила 24 Вт, однако эффективность системы ограничена из-за потерь при увеличении расстояния, смещении катушек и перегреве.

Обсуждение результатов

Для повышения эффективности системы предложено:

- использование современных ферритовых материалов;
- увеличение частоты передачи энергии;
- внедрение систем автоматизированного выравнивания катушек;
- оптимизация тепловых характеристик через использование эффективных материалов и активного охлаждения.

Эти результаты формируют основу для дальнейшего совершенствования систем беспроводной зарядки и разработки более стабильных и энергоэффективных решений.

3. Оптимизация систем беспроводной зарядки.

На основе проведённых исследований предложены следующие направления повышения эффективности:

1. Улучшение материалов катушек: использование нанокристаллических ферритов и медных проводников высокой чистоты позволяет уменьшить потери на рассеяние магнитного поля и нагрев.

2. Увеличение частоты передачи энергии: работа в диапазоне 100–200 кГц снижает размеры катушек и повышает эффективность передачи, при условии применения материалов с низкими тепловыми потерями.

3. Автоматизация выравнивания катушек: интеграция магнитных сенсоров и сервоприводов снижает потери при смещении катушек на 20 %.

4. Автоматическое выравнивание резонансной частоты: технологии динамической коррекции частоты или адаптации на основе измерения расстояния между катушками повышают стабильность передачи энергии.

5. Тепловая оптимизация: использование активных систем охлаждения обеспечивает стабильность работы при длительных режимах передачи энергии.

6. Интеграция современных технологий: применение адаптивных систем управления мощностью и технологий ИИ позволяет прогнозировать состояние системы и оптимизировать процесс зарядки в реальном времени.

В данной работе проведено исследование индукционной системы беспроводной зарядки аккумуляторов БПЛА. Эксперименты показали, что при максимальной мощности передачи 24 Вт эффективность системы ограничивается тепловыми потерями, зависимостью от расстояния между катушками и их несовмещением.

Литература

1. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1971. 487 с.
2. Jaafari S., El Hafdaoui H., Ajabboune K. Optimization of circular coils with ferrite boxes for enhanced efficiency in wireless power transfer for electric vehicles // GEITS. 2024. DOI: 10.1016/j.geits.2024.100195.
3. Campi T., Cruciani S., Feliziani M., Maradei F. High efficiency and lightweight wireless charging system for drone batteries // Proceedings of the 2017 AEIT International Annual Conference. Cagliari, Italy. 20–22 September 2017.

4. Karalis A., Joannopoulos J.D., Soljacic M. Efficient wireless nonradiative mid-range energy transfer // *Annals of Physics*. 2008. Vol. 323, No. 1. pp. 34–48. DOI: 10.1016/j.aop.2007.04.017.
5. Covic G.A., Boys J.T. Inductive power transfer // *Proceedings of the IEEE*. 2013. Vol. 101, No. 6. pp. 1276–1289
6. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J.D., Fisher P., Soljacic M. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances // *Science*. 2007. Vol. 317, No. 5834. pp. 83–866. DOI: 10.1126/science.1143254.
7. Li X., Xiao H., Zhang H., Liu Z., Peng W. A 5.8 GHz π -stub decoupling network for receiving antenna arrays in microwave wireless power transmission // *Energies*. 2022. Vol. 15. Article 8703.
8. Narayanamoorthi R., Kacor P., Bernat P. Design of dual frequency Class E resonant converters for simultaneous wireless power and data transfer in low power applications // *Results in Engineering*. 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103558.
9. Пчельников Ю.Н. Особенности медленных волн и возможности их нетрадиционного применения // *Журнал радиотехнических и электронных коммуникаций*. 2003. Т. 48, №4. С. 494–507.
10. Пчельников Ю.Н., Елизаров А.А., Пчельников А.Г. Механизм беспроводной зарядки для уличных устройств // *Труды 23-й Международной Крымской конференции «Микроволновая и телекоммуникационная техника»*, Севастополь, 2013 г. С. 1058–1059.
11. Strassner B., Chang K. Microwave power transmission: historical milestones and system components // *Proceedings of the IEEE*. 2013. Vol. 101, No. 6. pp. 1379–1396.
12. Читтур П.К., Чоккалингам Б., Михет-Попа Л. Обзор беспроводной зарядки БПЛА: основы, приложения, методы зарядки и стандарты // *IEEE Access*. 2021. Т. 9. С. 69235–69266.

13. Широков И.Б. Способ беспроводной передачи электрической энергии высокой частоты: патент на изобретение № 2704602 С1 Россия. МПК H02J 50/00, СПК H02J 50/20, H02J 50/90, H01Q 7/08. Опубл. 30.10.2019. Бюл. № 31.

14. Yan Y., Shi W., Zhang X. Design of UAV wireless power transmission system based on coupling coil structure optimization // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2020. 2020. Article 67.

15. Клевцов С.И. Моделирование алгоритма краткосрочного прогнозирования изменения быстроизменяющейся физической величины в реальном времени // Инженерный вестник Дона, 2012, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/920

References

1. Vol'man V.I., Pimenov Yu.V. Texnicheskaya e'lektrodinamika.[Technical electrodynamics]. M.: Svyaz', 1971. 487 p.
2. Jaafari S., El Hafdaoui H., Ajabboune K. GEITS. 2024. DOI: 10.1016/j.geits.2024.100195.
3. Campi T., Cruciani S., Feliziani M., Maradei F. Proceedings of the 2017 AEIT International Annual Conference. Cagliari, Italy. 20–22 September 2017.
4. Karalis A., Joannopoulos J.D., Soljacic M. Annals of Physics. 2008. Vol. 323, No. 1. pp. 34–48. DOI: 10.1016/j.aop.2007.04.017.
5. Covic G.A., Boys J.T. Proceedings of the IEEE. 2013. Vol. 101, No. 6. pp. 1276–1289
6. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J.D., Fisher P., Soljacic M. Science. 2007. Vol. 317, No. 5834. pp. 83–866. DOI: 10.1126/science.1143254.

7. Li X., Xiao H., Zhang H., Liu Z., Peng W. A. Energies. 2022. Vol. 15. Article 8703.
8. Narayanamoorthi R., Kacor P., Bernat P. Results in Engineering. 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103558.
9. Pchel'nikov Yu.N. Zhurnal radiotekhnicheskix i e'lektronny'x kommunikacij. 2003. T. 48, №4. S. 494–507.
10. Pchel'nikov Yu.N., Elizarov A.A., Pchel'nikov A.G. Trudy` 23-j Mezhdunarodnoj Kry'mskoj konferencii «Mikrovolnovaya i telekommunikacionnaya texnika», Sevastopol`, 2013 g. S. 1058–1059.
11. Strassner B., Chang K. Proceedings of the IEEE. 2013. Vol. 101, No. 6. pp. 1379–1396.
12. Chittur P.K., Chokkalingam B., Mixet-Popa L. IEEE Access. 2021. T. 9. S. 69235–69266.
13. Shirokov I.B. Sposob besprovodnoj peredachi e'lektricheskoy e'nergii vy`sokoj chastoty`[Method of wireless transmission of high-frequency electrical energy]: patent na izobretenie № 2704602 C1 Rossiya. MPK H02J 50/00, SPK H02J 50/20, H02J 50/90, H01Q 7/08. Opubl. 30.10.2019. Byul. № 31. Yan Y., Shi W., Zhang X. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2020. 2020. Article 67.
14. Klevczov S.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/920.

Дата поступления: 29.04.2025

Дата публикации: 25.06.2025