

Критический обзор методов электромагнитной бесконтактной передачи энергии

Е. А. Фролова¹, Н. А. Доброскок²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹eafrolova@stud.etu.ru, ²nadobroskok@etu.ru

Аннотация. В статье проведён сравнительный анализ методов передачи энергии, основанных на электромагнетизме: неизлучающих переменных электрических, магнитных и электромагнитных полях. Рассмотрены примеры практической реализации приведенных технологий. Предложен многокритериальный подход анализа целесообразности практической реализации конкретного метода передачи энергии, включающий различные технические характеристики. В ходе сравнительного анализа на основе предложенного подхода показано, что наиболее эффективным и перспективным в разработке способом является метод резонансной индуктивной передачи энергии.

Ключевые слова: бесконтактная передача энергии, электромагнетизм, резонансная индуктивная связь, гибридная бесконтактная связь

I. ВВЕДЕНИЕ

Благодаря возросшему в настоящее время интересу к изучению негативного антропогенного влияния человека на окружающую среду, исследователи обратили свое внимание на вклад двигателей внутреннего сгорания в общий уровень атмосферных выбросов. По данным Международного энергетического агентства на 2019 год [1] выбросы автомобилей и других транспортных средств составляли 27 % от общего загрязнения воздуха в мире. В городах же согласно источникам [2-4] выбросы от автомобилей и других транспортных средств могут составлять уже от 35 до 70 % от общего количества выбросов загрязняющих веществ. Решением этой проблемы стали разработка и постепенное введение в городскую инфраструктуру безопасных и экологически чистых в эксплуатации видов транспорта на основе: водородных двигателей или топливных элементов, пневмопривода, электропривода и др. Среди них самыми недорогими и удобными для производства и эксплуатации оказались транспортные средства на электрическом приводе.

За последние 10 лет количество наземного электрического транспорта в мире выросло: с нуля до более чем 10 миллионов единиц [5], что привело к возникновению проблемы интеграции их в городскую среду. Для накопления и хранения энергии в электрифицированном транспорте используются аккумуляторные батареи, которые необходимо заряжать каждые несколько сотен километров пробега или передвижения. На данный момент, для зарядки аккумуляторов преимущественно применяются пантографы или кабели, использование которых сопровождается рядом проблем: относительно малая мощность передаваемой энергии (как следствие, долгое время зарядки аккумуляторов большой ёмкости), в случае с зарядными кабелями – большой вес, сложность организации автоматизированной зарядки. Решением

этих проблем может стать использование бесконтактной зарядной инфраструктуры.

Задача беспроводной передачи энергии (БПЭ) интересует исследователей, начиная с момента первых экспериментов Николы Тесла конца XIX века. За прошедшее время накопилось множество методов беспроводной передачи энергии и их исследований. В данной работе будут рассмотрены некоторые из них для выявления наиболее эффективного и перспективного для промышленного применения в мощных устройствах метода бесконтактной передачи энергии.

II. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ БЕСКОНТАКТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ И ПРИМЕРЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

На данный момент существующие системы БПЭ в зависимости от типа поля можно разделить на излучающие (передача энергии в оптическом [6,7] и микроволновом [8] диапазоне) и неизлучающие (передача энергии магнитной индукцией [9], магнитно-резонансной индукцией [10], электростатической индукцией [11] и новыми системами гибридного типа [12]). Классификация приводится в соответствии с иностранными источниками [13, 14], задающими тренды в развитии систем ПБЭ. Классификация систем БПЭ приведена на рис. 1.

Использование излучающих полей ограничено в связи с воздействием на окружающее пространство и, в частности, на здоровье человека, поэтому в данной статье они рассматриваться не будут.

К неизлучающим технологиям относятся аппараты и устройства, работающие в диапазоне частот до 10 МГц для передачи энергии на ближнем (сильно меньше диаметра приемника и передатчика) и среднем (до нескольких длин диаметра приемника и передатчика) расстоянии, посредством так называемых ближних полей (до $1/2\lambda$ от длины электромагнитной волны).

Влияние электромагнитных полей регламентируется документами Международной Комиссии по защите от Неионизирующих Излучений (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) [15, 16].

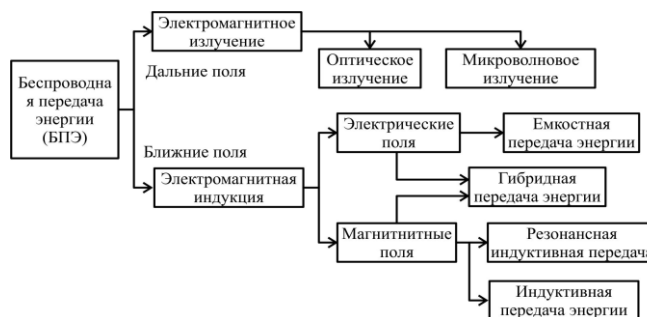


Рис. 1. Типы систем БПЭ

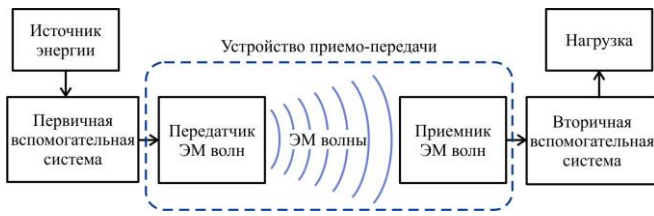


Рис. 2. Обобщенная схема систем БПЭ

В общем случае принцип работы систем БПЭ исследуемого типа можно описать с помощью схемы, представленной на рис. 2. Основной системы является устройством приемо-передачи, где передающая часть через вспомогательные устройства подключена к источнику энергии, а приемник – к потребителю энергии, или нагрузке.

Особенности работы разных систем БПЭ заключаются не только в самой бесконтактной связи, но и в особенностях организации структуры этих систем. В вспомогательные системы входят силовые преобразователи: инверторы и выпрямители, а также цепи компенсации реактивной энергии и цепи согласования импеданса.

В данной статье рассмотрим только принципы работы устройств приемо-передачи неизлучающих систем БПЭ.

А. Индуктивная передача энергии

При индуктивной передаче энергии используется энергия магнитного поля. В качестве приемника и передатчика используются магнитосвязанные катушки L1 (первичная катушка) и L2 (вторичная катушка), как показано на рис. 3.

На первичную катушку L1 подается переменный ток, который индуцирует переменное магнитное поле, воздействующее на вторую катушку L2. Под действием электромагнитной индукции, во второй катушке индуцируется ЭДС, и при замыкании катушки на нагрузку, в контуре начинает протекать индуцированный электрический ток.

В общем случае система индуктивной БПЭ является трансформатором, но в трансформаторах обмотки расположены на общем магнитном сердечнике для сосредоточения и направления большей части магнитного потока, а катушки для БПЭ общего сердечника не имеют, поэтому слабо связаны [17]. Из-за слабой связи, эффективность передачи энергии индуктивным способом сильно зависит от расстояния между катушками. С увеличением расстояния магнитное поле рассеивается, и все большая часть эффективного магнитного потока не доходит до принимающей катушки.

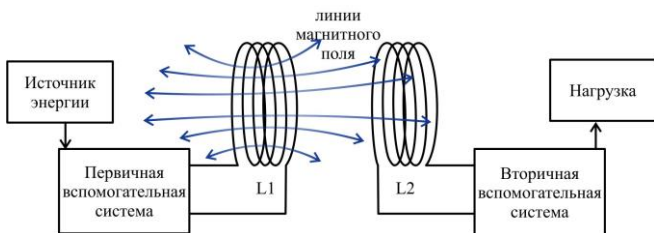


Рис. 3. Схема индуктивной БПЭ

Кроме того, данный способ имеет небольшую эффективность, что ограничивает область его

применения в основном устройствами малой мощности, которые получают питание от существенно более мощной сети. В таком случае потери 20–50 % энергии для работы электроэнергетической системы в целом не критичны. Например, данный способ зарядки используется для смартфонов, электрических зубных щеток [18], электробритв, медицинских имплантируемых устройств [19], но также есть концепции применения для зарядки электротранспорта [18].

В. Резонансно индуктивная передача энергии

Метод резонансной связи аналогичен индуктивной связи, но имеет важную отличительную особенность: для повышения передаваемой мощности контуры, содержащие слабо связанные катушки, дополняются емкостью с целью создания колебательного контура и получения увеличенного значения тока при настройке контура на резонанс. Резонансный ток индуцирует резонансное магнитное поле, которое захватывается настроенным на ту же резонансную частоту принимающим контуром, что в результате приводит к передаче большего количества энергии.

Существуют разные структуры для реализации резонансной связи между передатчиком и приемником: система с 2 катушками, как показано на рис. 4, а (емкостные элементы, создающие резонансный контур, могут располагаться последовательно или параллельно) и система с 4 катушками, как показано на рис. 4, б, две из которых являются резонансно-настроенными контурами-ретрансляторами магнитного поля. Последние системы являются более эффективными, так как катушки-ретрансляторы концентрируют и направляют магнитное поле, что позволяет увеличивать расстояние между катушками и повышает эффективность передачи [20].

Данный метод из-за своих достоинств нашел широкое применение в разных областях: от маломощных устройств (зарядных устройств для смартфонов, планшетов, ноутбуков и т.д.) до более мощных, примеры которых рассмотрим ниже.

Wartsila в 2017 году представила беспроводное зарядное устройство мощностью передачи 1 МВт для электрифицированных морских судов [21]. На данный момент компания сообщает, что у них есть беспроводное зарядное устройство мощностью 2,5 МВт с эффективностью передачи 95–97 % [22].

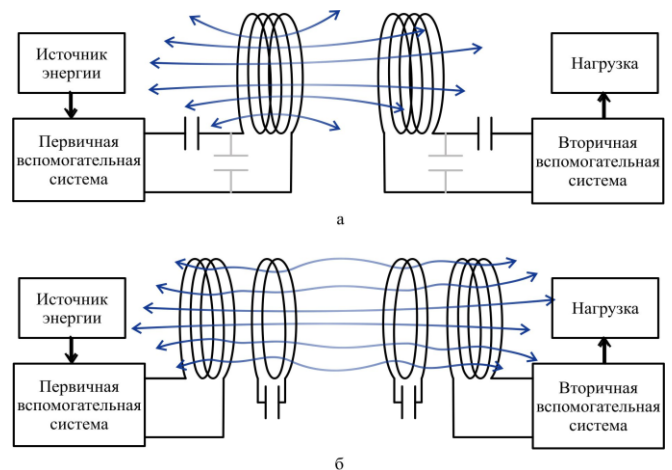


Рис. 4. Схемы резонансно индуктивной БПЭ: а – на двух катушках, б – на четырех катушках

Компания IPT Technology представляет проекты и концепции для беспроводной зарядки наземных и водных транспортных средств, а также решения для промышленного использования [23]. Компания сообщает, что эффективность предлагаемых систем превышает 92 % [24].

В 2015 году была представлена беспроводная система питания высокоскоростного поезда в режиме реального времени мощностью 1 МВт с эффективностью 82,7 %, основанная на этом же принципе [25].

С. Емкостная передача энергии

В отличие от вышерассмотренных методов БПЭ, емкостной метод использует энергию электрического поля. В качестве передатчика и приемника в системе используются электроды в виде металлических пластин, как показано на рис. 5.

Высокочастотное переменное напряжение подается на две первичные пластины Cs1 и Cs2, и под действием электрического поля по законам электрической индукции, на вторичных пластинах Cr1 и Cr2 появляется потенциал и в цепи приемника начинает протекать ток смещения. Между пластинами передатчика и приемника находится зазор, заполненный жидкостной или газообразной средой, выступающей в качестве диэлектрика. Так же как в системе с индуктивной связью, эффективность передачи энергии сильно зависит от расстояния между передающим и принимающим устройством [13]. Для повышения плотности передаваемой мощности, напряжение на первичной обмотке поднимается с помощью усилителя, а затем понижается на вторичной стороне.

Емкостная система БПЭ может использоваться на коротких расстояниях в биомедицинских устройствах [26], для зарядки мобильных устройств и дронов [27, 28]. Более того, разработаны концепции для применения с более мощными устройствами, такими как электромобили [29, 30] и полностью электрические морские суда [31].

Д. Гибридная (индуктивная и емкостная) передача энергии

Последние рассматриваемые системы называются гибридными из-за их особенности: для передачи они используют как индуктивную, так и емкостную связь. Исследования на эту тему начали появляться только недавно (примерно последние 5 лет), и в большинстве обзорных статей по системам БПЭ данный метод даже не рассматривается.

В данных системах на передающей и на принимающей стороне располагаются как катушки для создания индуктивной связи, так и металлические пластины для создания емкостной связи. Данные системы имеют две основные топологии соединения катушек и пластин: последовательное (рис. 6, а) и параллельное (рис. 6, б).

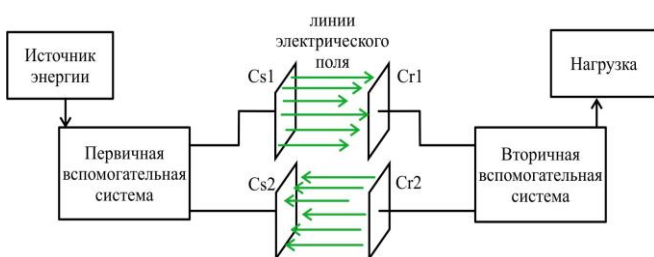


Рис. 5. Схема емкостной БПЭ

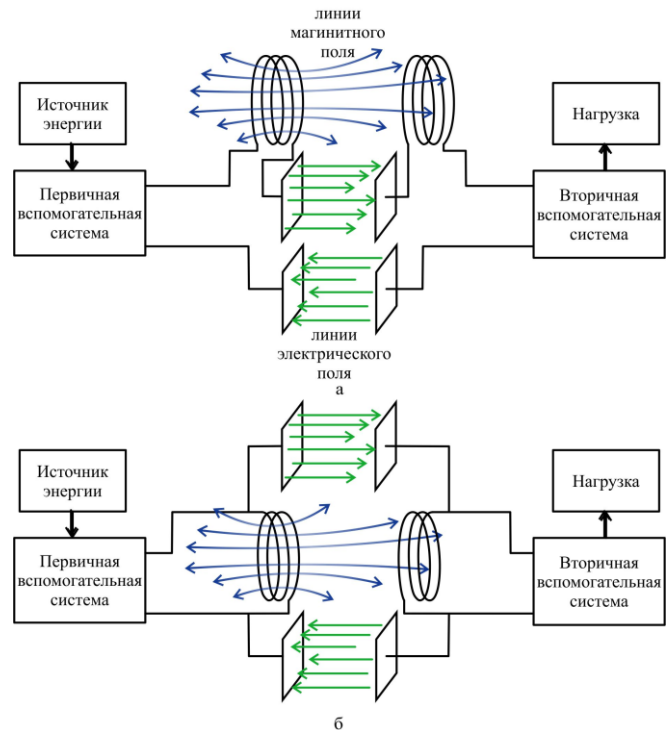


Рис. 6. Схемы структур гибридных БПЭ: а – последовательная топология, б – параллельная топология

Гибридные системы передачи энергии имеют несколько важных преимуществ перед остальными:

- при определенных конструкционных решениях появляется возможность увеличения плотности передаваемой мощности без увеличения площади приемопередатчика [32];
- возможность более эффективного использования емкостных и индуктивных компонентов, используемых в индуктивных и емкостных системах БПЭ для компенсации реактивных мощностей и создания резонанса [33];
- гибридные системы могут показывать большую устойчивость осевым и поперечным смещениям благодаря различным свойствам магнитных и электрических полей [34].

Насколько известно, на данный момент нет практических примеров применения гибридных систем БПЭ. Но есть некоторые концепции и разработки для применения в силовой электронике (передача 1 кВт энергии с эффективностью 91,9 %) [35] и железнодорожных системах (передача 653 кВт энергии с эффективностью 87,7 %, изменение эффективности передачи на 8,3 % при смещении от 0 до 270 мм) [36].

III. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ БПЭ

Сведем показатели рассмотренных систем БПЭ в табл. 1 для дальнейшего сравнения.

В таблице дополнительно выделены характеристики методов БПЭ, обладающих преимуществом перед остальными по конкретному критерию в том случае, если можно однозначно оценить превосходство одних методов над другими.

Из-за разнообразия исследований и топологий систем, значения, приведенные в таблице, представлены качественно, а не количественно.

Показатели сравнения	Методы ПБЭ			
	Индуктивный	Резонансно-индуктивный	Емкостной	Гибридный
Область передачи энергии	Магнитное поле	Магнитное поле	Электрическое поле	Магнитное и электрическое поля
Устройства прямо-передачи	Катушки	Катушки и резонансные контура	Металлические пластины (электроды)	Катушки и металлические пластины
Диапазон действия	Ближний [37]	Средний [37]	Ближний [37]	Средний
Передаваемая мощность	Средняя	Высокая	Средняя	Высокая
Эффективность	Низкая	Высокая	Средняя	Высокая
Рабочие частоты	Гц-кГц	Гц-МГц	кГц-МГц	кГц-МГц
Направление потока силовых линий поля	Всенаправленный	Всенаправленный	Однонаправленный	Всенаправленный и однонаправленный
Эффективная многоадресная передача	Нет	Да [25]	Нет	Нет
Мобильность	Нет	Да [37, 38]	Нет	Да [36]
Опасные воздействующие факторы	Большое рассеяние магнитного поля вызывает вихревые токи в близлежащих металлических материалах	Достаточно безопасно	Оголенные электроды под высоким напряжением	Оголенные электроды под высоким напряжением
Особенности	-	Возможность загибать траекторию поля (эффект домино) [20]	При отсутствии принимающего устройства не излучает электрические волны [31]	Возможность уменьшить генерируемые магнитным полем вихревые токи ^a
Опыт практической реализации	Небольшой	Большой	Небольшой	Нет

^a. При некоторых конструкционных решениях для гибридных систем БПЭ электрическое поле может ограничивать магнитное поле, тем самым уменьшая его связь с близлежащими металлами, а значит и уменьшая паразитные вихревые токи в них [12].

Критерии включают в себя такие показатели как:

- диапазон действия – расстояние между приемником и передатчиком, в котором устройство показывает хорошую эффективность;
- рабочие частоты – диапазон частот, используемый для работы системы;
- направление потока силовых линий – параметр, влияющий на появление в системе паразитных потоков;
- мобильность – зависимость эффективности передачи от осевых и поперечных смещений;
- опыт практической реализации – возможность пользоваться опытом исследователей в разработке и решении возникающих проблем и др.

По результатам сравнения видно, что наиболее приоритетными являются два метода: резонансный индуктивный и гибридный. Они оба показывают хорошие характеристики по мощности, эффективности, мобильности – по всем наиболее важным характеристикам для применения в устройствах большой мощности. Но с учетом опыта практической реализации и технологичности систем БПЭ резонансно-индуктивный метод является на данный момент самым перспективным для разработки и внедрения в электротехнические системы. При этом гибридный метод, несмотря на отсутствие опыта практической коммерческой реализации, имеет хорошие перспективы в будущем.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведен обзор типовых структур систем БПЭ, основанных на неизлучающих методах, а также области их практического и коммерческого применения.

На основе анализа литературы составлен перечень основных показателей качества (критериев), по которым может быть проведено сравнение методов БПЭ, такие как: диапазон действия; величина передаваемой мощности; эффективность; диапазон рабочих частот; возможность и эффективность многоадресной передачи энергии; мобильность; безопасность и опыт практической реализации.

По приведенным показателям качества методов БПЭ можно сделать вывод, что для применения в системах зарядной инфраструктуры транспортных средств, наиболее перспективными являются системы, основанные на резонансно-индуктивном и гибридном методе, последний из которых менее предпочтителен для использования в ближайшей перспективе из-за необходимости проведения дополнительных исследований перед коммерческой реализацией. Однако некоторые приведенные в работе преимущества свидетельствуют о потенциале применения гибридных систем БПЭ в будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Emissions by sector 2019 // International Energy Agency [Электронный ресурс] // URL: <https://www.iea.org/reports/greenhouse-gas-emissions-from-energy-overview/emissions-by-sector> (Дата обращения: 13.11.2021).
- [2] Иванова Ю.П. Историческая роль городского транспорта в чрезвычайном загрязнение воздуха в городе Волгограде / Ю.П. Иванова, О.О. Иванова, И.Ю. Зорин // Инновационные научные исследования в современном мире: Сборник научных статей по материалам IV Международной научно-практической конференции, Уфа, 20 октября 2020 года. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2020. С. 193-197.
- [3] Краснокутская Н.В. Влияние автотранспорта на состояние атмосферного воздуха в городах Хабаровского края / Н.В. Краснокутская // Амурский научный вестник. 2017. № 4. С. 39-43.

- [4] Шленкин А.К. Влияние автомобильного транспорта на окружающую среду / А.К. Шленкин // В мире научных открытий: материалы II Международной студенческой научно-практической конференции. 23-24 мая 2018 г. Ульяновск: УлГАУ, 2018. Том VI, Ч. 4. С. 199-201.
- [5] Global electric vehicle stock by transport mode, 2010-2020 // International Energy Agency [Электронный ресурс] // URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electric-vehicle-stock-by-transport-mode-2010-2020> (Дата обращения: 14.11.2021).
- [6] A. W. S. Putra, H. Kato and T. Maruyama, "Hybrid Optical Wireless Power and Data Transmission System," 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), 2020, pp. 374-376, DOI: 10.1109/WoW47795.2020.9291276.
- [7] K. Jin and W. Zhou, "Wireless Laser Power Transmission: A Review of Recent Progress," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 4, pp. 3842-3859, April 2019, DOI: 10.1109/TPEL.2018.2853156.
- [8] K. Li, K. See, W. Koh and J. Zhang, "Design of 2.45 GHz microwave wireless power transfer system for battery charging applications," 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL), 2017, pp. 2417-2423, DOI: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293542.
- [9] M. Debbou and F. Colet, "Inductive wireless power transfer for electric vehicle dynamic charging," 2016 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), 2016, pp. 118-122, DOI: 10.1109/WoW.2016.7772077.
- [10] Y. Li, Q. Duan and Y. Huang, "Topology and parameter optimization design for magnetic resonance wireless power transfer system," 2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), 2017, pp. 111-116, DOI: 10.1109/WoW.2017.7959376.
- [11] K. Yi, J. Jung, B. Lee and Y. You, "Study on a capacitive coupling wireless power transfer with electric vehicle's dielectric substrates for charging an electric vehicle," 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), 2017, pp. P.1-P.7, DOI: 10.23919/EPE17ECCEurope.2017.8099070.
- [12] X. Chen, S. Yu and X. Yang, "Hybrid wireless power transfer," IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017, pp. 5348-5352, DOI: 10.1109/IECON.2017.8216926.
- [13] M. T. Nguyen, C. V. Nguyen, L. H. Truong, A. M. Le, T. V. Quyen, A. Masaracchia and K. A. Teague, "Electromagnetic Field Based WPT Technologies for UAVs: A Comprehensive Survey," Electronics, vol. 9, no. 3, art. 461, March 2020, DOI:10.3390/electronics9030461.
- [14] Rao, T. S. Chandrasekar and K. Geetha. "Categories, Standards and Recent Trends in Wireless Power Transfer: A Survey." Indian journal of science and technology, vol. 9, iss. 20, pp.1-11, 2016, DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i20/91041
- [15] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Health Phys 99(6):818-836; 2010. Pre-print. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86.
- [16] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). Health Phys 118(00):000-000; 2020. Pre-print. DOI: 10.1097/HP.0000000000001210.
- [17] C. Chen, T. Chu, C. Lin and Z. Jou, "A Study of Loosely Coupled Coils for Wireless Power Transfer," in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 57, no. 7, pp. 536-540, July 2010, DOI: 10.1109/TCSII.2010.2048403.
- [18] s Valtchev, S., Baikova, E., and Jorge, L, "Electromagnetic field as the wireless transporter of energy," Facta Universitatis - Series: Electronics and Energetics, vol. 25, no. 3, pp. 171-181, Desember 2012, DOI:10.2298/fuee1203171v.
- [19] d Minkyu Je; Myung Hoon Sunwoo, "CHAPTER 04 Wireless Power Transfer Circuits for Biomedical Microsystems," in Selected Topics in Biomedical Circuits and Systems , River Publishers, 2021, pp.113-142.
- [20] Z. Zhang, H. Pang, A. Georgiadis and C. Cecati, "Wireless Power Transfer—An Overview," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 2, pp. 1044-1058, Feb. 2019, DOI: 10.1109/TIE.2018.2835378.
- [21] G. Guidi, J. A. Suul, F. Jensen and I. Sorfonn, "Wireless Charging for Ships: High-Power Inductive Charging for Battery Electric and Plug-In Hybrid Vessels," in IEEE Electrification Magazine, vol. 5, no. 3, pp. 22-32, Sept. 2017, DOI: 10.1109/MELE.2017.2718829.
- [22] Charging Marine Vessels // Wartsilä [Электронный ресурс] // URL: <https://www.wartsila.com/marine/build/electrical-and-power-systems/shore-power/charging> (Дата обращения: 16.11.2021).
- [23] Your business is our source of inspiration // IPT Technology [Электронный ресурс] // URL: <https://ipt-technology.com/about-us-businesses/> (Дата обращения: 16.11.2021).
- [24] Frequently Asked Questions About Wireless Inductive Charging // IPT Technology [Электронный ресурс] // URL: <https://ipt-technology.com/faqs-wireless-power-transfer/> (Дата обращения: 16.11.2021).
- [25] J. H. Kim et al., "Development of 1-MW Inductive Power Transfer System for a High-Speed Train," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 10, pp. 6242-6250, Oct. 2015, DOI: 10.1109/TIE.2015.2417122.
- [26] R. Jegadeesan, K. Agarwal, Y. Guo, S. Yen and N. V. Thakor, "Wireless Power Delivery to Flexible Subcutaneous Implants Using Capacitive Coupling," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 65, no. 1, pp. 280-292, Jan. 2017, DOI: 10.1109/TMTT.2016.2615623.
- [27] K. Wang and S. Sanders, "Contactless USB – A capacitive power and bidirectional data transfer system," 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014, 2014, pp. 1342-1347, DOI: 10.1109/APEC.2014.6803481.
- [28] T. M. Mostafa, A. Muharam and R. Hattori, "Wireless battery charging system for drones via capacitive power transfer," 2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), 2017, pp. 1-6, DOI: 10.1109/WoW.2017.7959357.
- [29] D. C. LuDOIs and J. K. Reed, "Brushless Mitigation of Bearing Currents in Electric Machines Via Capacitively Coupled Shunting," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 5, pp. 3783-3790, Sept.-Oct. 2015, DOI: 10.1109/TIA.2015.2434795.
- [30] F. Lu, H. Zhang and C. Mi, "A Two-Plate Capacitive Wireless Power Transfer System for Electric Vehicle Charging Applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 2, pp. 964-969, Feb. 2018, DOI: 10.1109/TPEL.2017.2735365.
- [31] H. Zhang and F. Lu, "Feasibility Study of the High-Power Underwater Capacitive Wireless Power Transfer for the Electric Ship Charging Application," 2019 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), 2019, pp. 231-235, DOI: 10.1109/ESTS.2019.8847929.
- [32] X. Chen, S. Yu and X. Yang, "Hybrid wireless power transfer," IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017, pp. 5348-5352, DOI: 10.1109/IECON.2017.8216926.
- [33] F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann and C. C. Mi, "An Inductive and Capacitive Integrated Coupler and Its LCL Compensation Circuit Design for Wireless Power Transfer," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 5, pp. 4903-4913, Sept.-Oct. 2017, DOI: 10.1109/TIA.2017.2697838.
- [34] D. Vincent, Phuoc Huynh Sang and S. S. Williamson, "Feasibility study of hybrid inductive and capacitive wireless power transfer for future transportation," 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2017, pp. 229-233, DOI: 10.1109/ITEC.2017.7993276.
- [35] B. Luo, T. Long, R. Mai, R. Dai, Z. He and W. Li, "Analysis and design of hybrid inductive and capacitive wireless power transfer for high-power applications," IET Power Electronics, vol. 11, Iss. 14, pp. 2263-1170, Oct. 2018, DOI: 10.1049/iet-pel.2018.5279.
- [36] B. Luo, T. Long, L. Guo, R. Dai, R. Mai and Z. He, "Analysis and Design of Inductive and Capacitive Hybrid Wireless Power Transfer System for Railway Application," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 3, pp. 3034-3042, May-June 2020, DOI: 10.1109/TIA.2020.2979110.
- [37] Nguyen, Minh T., Cuong V. Nguyen, Linh H. Truong, Anh M. Le, Toan V. Quyen, Antonino Masaracchia, and Keith A. Teague 2020. "Electromagnetic Field Based WPT Technologies for UAVs: A Comprehensive Survey" Electronics 9, no. 3: 461. <https://doi.org/10.3390/electronics9030461>.
- [38] S. Das Barman, T. Ahmed and A. H. Ripon, "Study on efficiency enhancement of resonant coupled wireless power transmission using two-side impedance matching," 2015 International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT), 2015, pp. 1-6, DOI: 10.1109/ICEEICT.2015.7307393.