

РЕЗОНАНСНАЯ LC-СИСТЕМА БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ УРОВНЕЙ МОЩНОСТИ

*Соболев В.С., Полтавец Г.Р., Гилюк Е.В.
Херсонский технический университет, Геническ*

Ключевые слова: магнитная связь, беспроводная передача энергии, резонансный преобразователь, совместимость энергии, резонанс.

Аннотация. В этой работе предлагается метод достижения высокой выходной мощности около 20 кГц и низкой выходной мощности около 85 кГц в одной и той же беспроводной системе зарядки путем регулировки частоты системы. Система также может достигать нулевого фазового угла на двух частотах одновременно. Этот метод улучшает совместимость беспроводной системы зарядки береговой сети порта, уменьшает размер оборудования беспроводной системы зарядки и делает беспроводную зарядку аппаратов более удобной.

LC RESONANT WIRELESS CHARGING SYSTEM TO PROVIDE MULTIPLE POWER LEVELS

*Sobolev V.S., Poltavets G.R., Giluk E.V.
Kherson Technical University, Genichesk*

Keywords: magnetic coupling, wireless energy transmission, resonant converter, energy compatibility, resonance.

Abstract. This work uses a method to achieve a low output power of about 20 kHz and a low output power of about 85 kHz in the same wireless charging system by adjusting the frequency of the system. The system can also produce a zero phase angle at two frequencies at the same time. This method ensures that the wireless charging system matches the shore power grid, reduces the device size of the wireless charging system, and makes the wireless charger more convenient.

Технология беспроводной передачи энергии позволяет осуществлять бесконтактную передачу электроэнергии от электросети или батарей к электрооборудованию. Благодаря своим преимуществам удобства, гибкости, безопасности и эффективности, она решает множество проблем, возникающих при традиционных методах подачи электроэнергии с помощью электрического контакта.

С ростом числа беспилотных аппаратов (БПА) увеличился и спрос на их зарядку. В настоящее время она осуществляется при помощи кабеля. Использование проводов имеет ряд недостатков таких, как: износ кабеля, повреждение контактов, разные стандарты разъемов для передачи энергии и т.д. Беспроводная зарядка не имеет вышеупомянутых недостатков, обеспечивая более удобный и безопасный вариант для зарядки БПА [1]. Однако большинство существующих беспроводных зарядных устройств могут выводить только одну мощность, а разные аппараты имеют разные уровни поддерживаемой мощности [2].

Предлагается беспроводная система зарядки на основе резонансного LC контура. Используя ее характеристики, в одной и той же системе беспроводной передачи энергии, достигнуты выходные постоянные частоты 20 кГц и 85 кГц при сохранении нулевого фазового угла. Выходная мощность системы на частотах 20 кГц и 85 кГц будет отличаться. Эта система обеспечивает реальный способ для

двухдиапазонной беспроводной зарядки, повышает эффективность и совместимость и способствует широкому применению технологии беспроводной зарядки [3].

Для изучения характеристик системы беспроводной передачи энергии резонансного LC контура рассмотрим схему на рисунке 1. На нём показана общая принципиальная схема системы беспроводной передачи энергии, U_{dc} как вход постоянного тока, Q_1 – Q_4 как инвертор полного моста и D_1 – D_4 как выпрямитель полного моста. C_1 и C_2 являются резонансной емкостью первичной и вторичной сторон системы. Анализируя принцип работы схемы по рисунку 1, можно сопоставить ее со схемой системы, показанной на рисунке 2.

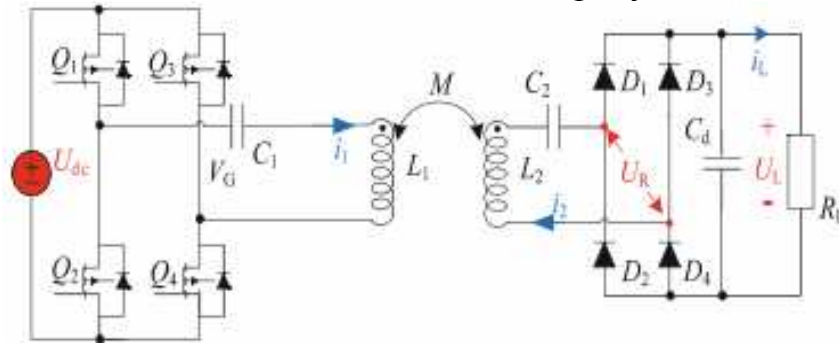


Рис. 1. Принципиальная схема системы беспроводной зарядки резонансного LC контура

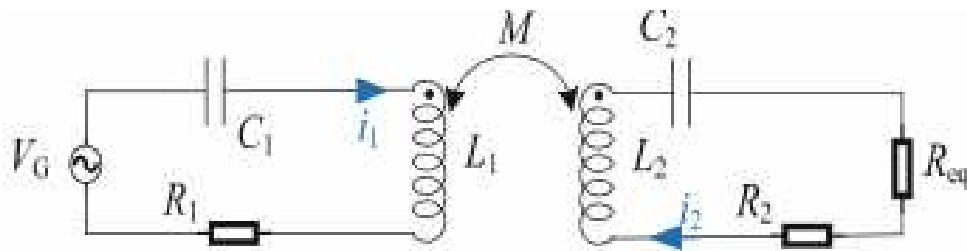


Рис. 2. Эквивалентная схема системы беспроводной зарядки резонансного LC контура

На рисунке 2: I_1 , I_2 – это первичный и вторичный ток, C_1 , C_2 – конденсаторы, L_1 , L_2 – катушки индуктивности, V_G – источник питания, R_1 – внутреннее сопротивление первичной катушки (включая потери в обмотке, потери в сердечнике, потери в экранировании и т.д.), R_2 – внутреннее сопротивление вторичной катушки, R_L представляет нагрузку, а M – взаимная индуктивность между первичной и вторичной катушками, i – мнимая единица.

Производим расчет сопротивлений эквивалентной схемы:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1 = i\omega L_1 + \frac{1}{i\omega C_1} + R_1, \\ Z_2 = i\omega L_2 + \frac{1}{i\omega C_2} + R_2 + R_L, \\ Z_r = \frac{(\omega M)^2}{Z_2}, \\ Z_{in} = \frac{Z_1 Z_2 + R_L Z_1 + (\omega M)^2}{Z_2 + R_L}, \\ R_{eq} = \frac{8R_L}{\pi^2}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где Z_1 , Z_2 – первичное и вторичное сопротивление системы, Z_r – сопротивление

отражения вторичного края системы к первичному, Z_{in} – входное сопротивление системы, R_{eq} – эквивалентная нагрузка системы, ω – частота колебаний.

Анализируя Z_{in} , мы можем достичь нулевого фазового угла Z_{in} на частотах 20 кГц и 85 кГц, проектируя параметры, что означает, что мнимая часть равна нулю [4]. Выражение мнимой части входного импеданса Im системы выглядит следующим образом:

$$\text{Im}(Z_{in}) = \frac{2R_{eq} \left(2R_{eq} \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) + R_1 \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right)}{\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_1} \right)^2 + 4R_{eq}^2} - \frac{\left(2R_1 R_{eq} + \omega M^2 - \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right) \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_1} \right)}{\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_1} \right)^2 + 4R_{eq}^2}. \quad (3)$$

Выходную мощность системы P_{out} можно получить из уравнения:

$$P_{out} = I_2^2 R_{eq}.$$

Бифуркация частоты – это перестройка характера движения системы, переход её в новое качественное состояние при малом плавном изменении одного или нескольких параметров. Когда происходит бифуркация, то коэффициент связи между передающей катушкой и приемной катушкой очень высок [5, 6]. Таким образом, мы можем использовать эту функцию для выбора двух частот пересечения нуля и проектирования параметров системы для достижения высокого выходного усиления на одной частоте и низкого выходного усиления на другой частоте, соответствующих двум различным типам судов.

Для проверки эффективности предлагаемого метода была построена система беспроводной передачи энергии с выходной мощностью 2,5 кВт на частоте 20 кГц и 350 Вт на частоте 85 кГц на базе системы беспроводной передачи энергии резонансного LC контура.

Используя уравнение (2) строится график зависимости фазового угла и входного сопротивления от частоты системы (рис. 3).

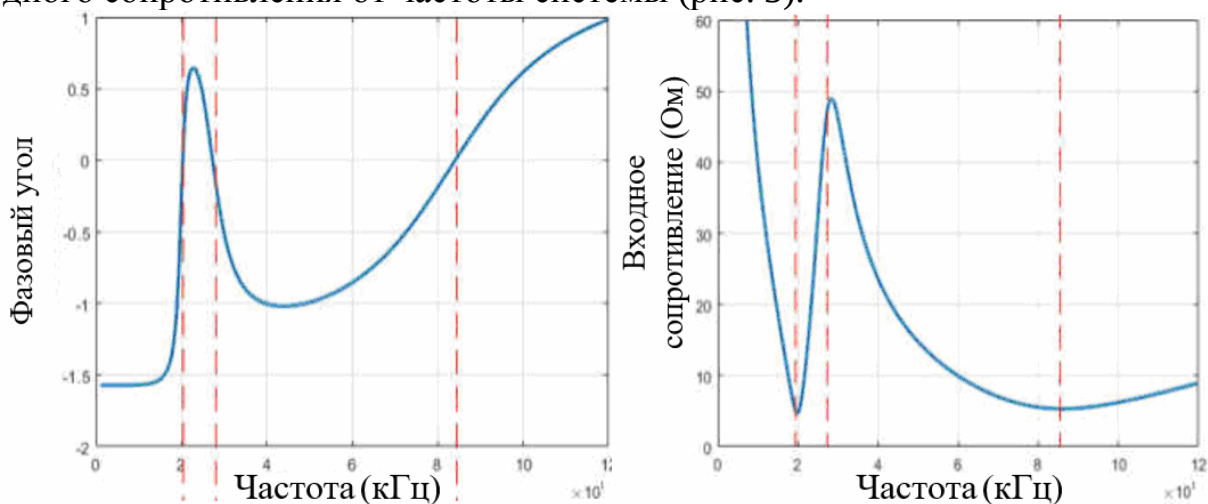


Рис. 3. График зависимости фазового угла и входного сопротивления от частоты системы

По результатам моделирования видно, что первый график пересекает 0 на частотах 20 кГц, 35 кГц и 85 кГц. Частоту 35 кГц исключаем, по причине того, что входное сопротивление слишком велико и КПД будет слишком низок. Следуя из результатов математического моделирования, выходная мощность составляет 2,4 кВт при 20 кГц и 350 Вт при 85 кГц.

Выводы. Были изучены характеристики системы резонансного LC контура. В ходе изучения характеристик системы было обнаружено, что система резонансного LC контура имеет характеристики бифуркации частоты. При проектировании параметров системы выходная мощность может составлять 2,4 кВт при 20 кГц и 350 Вт при 85 кГц в одной и той же системе. Системе нужно только изменить частоту, чтобы достичь нулевого фазового угла на выходе двух типов мощности в одном и том же устройстве. Это улучшает совместимость систем беспроводной передачи энергии с несколькими уровнями мощности, обеспечивая лучшее продвижение технологии беспроводной передачи энергии.

Список литературы

1. Татуйко П.С. Математическое описание режимов работы резонансного преобразователя напряжения с последовательным LC-резонансным контуром // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2022. – № 1 (15). – С. 73-79.
2. Медведева Т.С., Кустов А.С., Авдеев Б.А. Применение беспроводного симметричного LLC преобразователя для обмена электроэнергией между беспилотными аппаратами // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. – 2024. – № 7. – С. 183.
3. Zhang G., Zhang X., Fu C., Qi B. Application of Improved Linear Active Disturbance Rejection Control in LLC Converters for Battery Formation // 3rd International Conference on Energy Engineering and Power Systems (EEPS). 2023, pp. 680-684.
4. Авдеев Б.А., Вынгра А.В. Экспериментальное исследование жёсткости выходной характеристики мостового преобразователя постоянного тока // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Т. 66, №4. – С. 92-97.
5. Attanasio R.A., Ademane H., Hyslop J., Vitale G. GaN Based LCC Converter for Lithium-Ion Battery Chargers // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 2023, pp. 2489-2495.
6. Столярова А.А., Михальченко С.Г. Сравнительный анализ последовательных LC- и LLC-резонансных преобразователей // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – Томск: ТУСУР, 2015. – №1-1. – С. 212-216.

Сведения об авторах:

Соболев Вячеслав Сергеевич – лаборант-исследователь лаборатории «Изучение особенностей беспроводной зарядки для беспилотных аппаратов».

Полтавец Глеб Романович – лаборант-исследователь лаборатории «Изучение особенностей беспроводной зарядки для беспилотных аппаратов».

Гилюк Евгений Владимирович – лаборант-исследователь лаборатории «Изучение особенностей беспроводной зарядки для беспилотных аппаратов».