

МОДЕЛЬ БЕСПРОВОДНОГО LCC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ЗАРЯДКИ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ

Ковалевский Д.О., Медведева Т.С.

Херсонский технический университет, Геническ

Ключевые слова: резонансный преобразователь, LCC-преобразователь, резонанс, математическая модель, входной импеданс, беспроводная передача электроэнергии.

Аннотация. В работе разработана математическая модель беспроводного LCC-преобразователя для зарядки беспилотных аппаратов, в которой модифицированный синус заменён на реальный. Имеется численное решение полученной математической модели, найдены токи, напряжение на нагрузке и рассчитан коэффициент полезного действия. Построена характеристика входного импеданса. Приведены требования для резонансного режима преобразователя.

A MODEL OF A WIRELESS LCC CONVERTER FOR CHARGING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Kovalevskiy D.O., Medvedeva T.S.

Kherson Technical University, Genichesk

Keywords: resonant converter, LCC converter, resonance, mathematical model, input impedance, wireless power transmission.

Abstract. The work develops a mathematical model of a wireless LCC converter for charging unmanned vehicles, in which the modified sine is replaced by a real one. There is a numerical solution to the mathematical model obtained, the currents and voltage across the load are found, and the efficiency is calculated. The characteristic of the input impedance is constructed. The requirements for the resonant mode of the converter are given.

С ростом количества и качества беспилотных аппаратов, портативной электроники, электрических средств передвижения, умных устройств. Все эти устройства нуждаются в периодическом подзарядке и наиболее простой и безопасный вариант – использование беспроводной системы зарядки. Несмотря на большое количество способов передачи электроэнергии беспроводным путём наибольшее распространение получил индукционный способ передачи [1]. Беспроводное зарядное устройство (БпЗУ) является частным случаем изолированных преобразователей постоянного тока с тем отличием, что между индуктивно связанными катушками нет магнитопровода, а сами катушки имеют значительно большие габариты и находятся на некотором расстоянии друг от друга.

Проектируемые БпЗУ в основном относятся к резонансным преобразователям, поскольку они обеспечивают лучшие синусоидальные формы сигнала и используют собственные колебания для достижения переключения при нулевом напряжении (ZVS) и/или переключения при нулевом токе (ZCS), тем самым устраняя потери при переключении [2]. Таким образом, наличие резонансного контура позволяет обойтись без снабберов при работе на высоких частотах. Полный мостовой преобразователь широко используется в силовых

преобразованиях, поскольку он может достигать мягкого переключения с помощью компонентов LCC, добавленных в схему [3]. К одной из разновидностей БпЗУ можно отнести LCC-преобразователь, изображенный на рисунке 1.

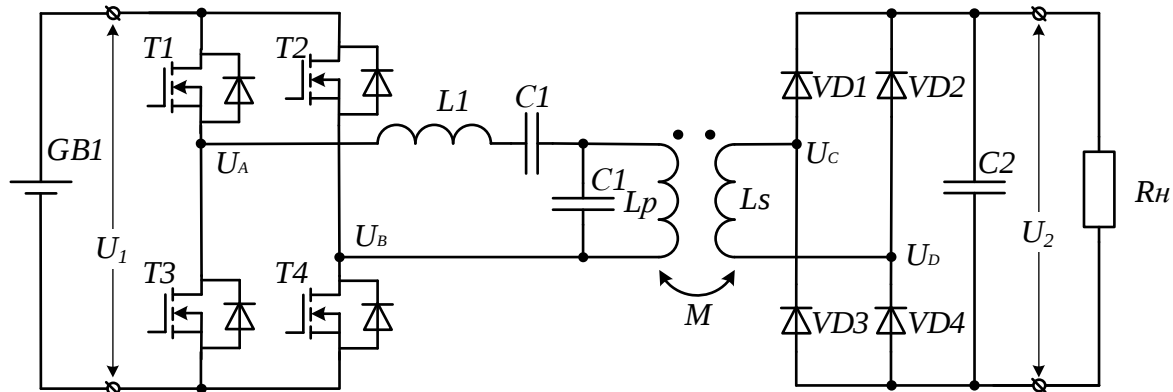


Рис. 1. Принципиальная схема беспроводного LCC-преобразователя

Источник постоянного напряжения $GB1$ и мостовая схема на транзисторах $T1-T4$ может быть заменена на источник модифицированного синуса, который в первом приближении можно заменить на реальный синус. Нагрузку R_H и выпрямительный мост $VD1-VD4$ можно заменить на эквивалентное сопротивление R_{Σ} по следующей формуле [4]:

$$R_{\Sigma} = \frac{8}{\pi^2} R_H,$$

где R_H – сопротивление нагрузки, Ом.

Тогда всю схему, изображенную на рисунке 1, можно привести к переменному току, как это показано на рисунке 2.

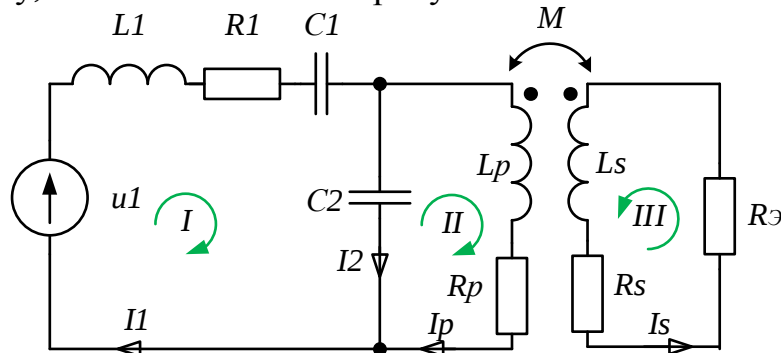


Рис. 2. Эквивалентная беспроводного LCC-преобразователя

Представленная схема легко решается с помощью с помощью законов Кирхгофа в комплексном виде:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_P = 0, \\ \dot{I}_1(R_1 + j(X_{L1} - X_{C1})) + \dot{I}_2(-jX_{C2}) = \dot{U}_1, \\ \dot{I}_P(R_P + jX_{LP}) - \dot{I}_2(-jX_{C2}) + \dot{I}_S jX_M = 0, \\ \dot{I}_S(R_S + jX_{LS} + R_{\Sigma}) + \dot{I}_P jX_M = 0, \end{cases}$$

где I_1 – входной ток, А; I_2 – ток, через резонансный конденсатор $C2$, А; I_P и I_S – ток на передающей и принимающей манитосвязанных катушек, А; R_1 и X_{L1} –

активное и индуктивное сопротивление катушки L_1 , Ом; R_P и X_{LP} – активное и индуктивное сопротивление передающей катушки L_P , Ом; R_S и X_{LS} – активное и индуктивное сопротивление принимающей катушки L_S , Ом; X_{C1} и X_{C2} – емкостные сопротивления конденсаторов C_1 и C_2 , Ом; X_M – сопротивление взаимной индукции катушке L_P и L_S , Ом; U_1 – эквивалентное входное напряжение, В; j – мнимая единица.

Обусловимся следующими значениями: $L_1 = 10$ мкГн; $C_1 = 0,1$ мкФ; $R_1 = R_P = R_S = 50$ мОм; $L_P = L_S = 50$ мкГн; $C_2 = 22$ нФ; $k = 0,3$. Резонансная частота составляет 150 кГц, входное напряжение 100 В.

Численно решив полученную систему уравнения, найдём ток:

$$I_1 = 0,1 \text{ А}, I_2 = 2,122 \text{ А}, I_P = 2,169 \text{ А}, I_S = 0,327 \text{ А}.$$

Потребляемая мощность преобразователя составила 106008 Вт, а мощность на нагрузке составила 8,665 Вт, что обеспечивает коэффициент полезного действия составил 86,6%, что является неплохим показателем для БпЗУ.

Условия для резонансной работы должны быть следующими [5].

1. Чтобы обеспечить мягкую коммутацию и снизить потери, входной импеданс должен быть индуктивным на рабочей частоте:

$$X_{L1} > X_{C1}.$$

Это гарантирует, что ток через ключи будет отставать от напряжения, позволяя им включаться при нулевом напряжении.

2. LCC-схема должна компенсировать реактивную мощность вторичной стороны. Для этого резонансная частота вторичного контура f_{P2} должна совпадать с частотой преобразователя:

$$f_{P2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_P C_2}},$$

где L_P – индуктивность передающей катушки, Гн; C_2 – ёмкость резонансный конденсатор C_2 , Ф.

Это обеспечивает максимальную передачу энергии и снижает потери на реактивных составляющих.

Используя эквивалентную схему беспроводного LCC-преобразователя, можно рассчитать и построить входной импеданс $Z(\omega)$ [6], представленный на рисунке 3:

$$Z(\omega) = j\omega L_1 - \frac{j}{\omega C_1} - \frac{\frac{j}{\omega C_2} R_3}{R_3 - \frac{j}{\omega C_2}},$$

где ω – частота эквивалентного источника переменного напряжения, 1/с; L_1 и C_1 – индуктивность и ёмкость входной цепи соответственно, Гн и Ф; R_3 – эквивалентное сопротивление, Ом.

Из рисунка 3 видно, что резонансный преобразователь имеет минимальное сопротивление, равное 40 Ом при резонансной частоте.

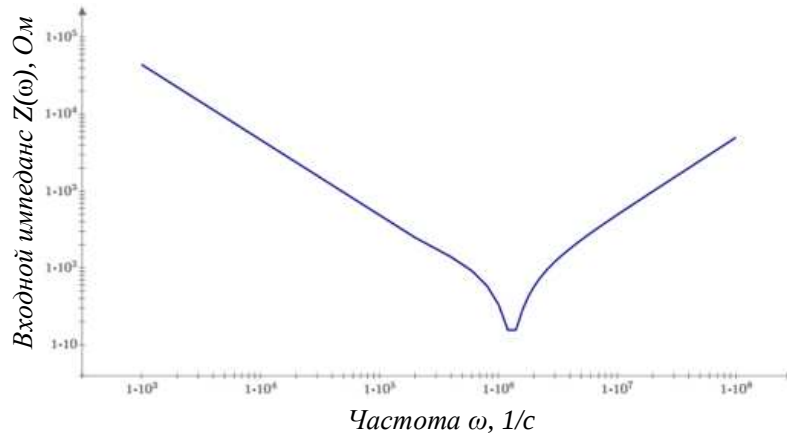


Рис. 3. Входной импеданс беспроводного LCC-преобразователя

Выводы. В статье рассмотрена математическая модель беспроводного LCC-преобразователя. Разработана математическая модель и приведены его характеристики, что значительно опрощают дальнейший расчёт и настройку данных преобразователей для зарядки беспилотных аппаратов.

Список литературы

1. Осипов А.В. Сопоставление энергетических характеристик резонансных LLC- и LCC-преобразователей постоянного напряжения // Доклады ТУСУР. – 2024. – Т. 27, №4. – С. 153-159.
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., Вынга 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. Белов Г.А., Малинин Г.В., Митяшин Н.П. Анализ резонансного преобразователя типа LCC в режиме непрерывного тока LC-контура // Электротехника. – 2024. – № 8. – С. 22-30.

Сведения об авторах:

Ковалевский Дмитрий Олегович – лаборант-исследователь лаборатории «Изучение особенностей беспроводной зарядки для беспилотных аппаратов»;

Медведева Татьяна Сергеевна – лаборант-исследователь лаборатории «Изучение особенностей беспроводной зарядки для беспилотных аппаратов».