

П.С. Татуйко, Г.А. Федяева, А.И. Беззубенко  
(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

### RESEARCH OF RESONANT VOLTAGE CONVERTERS

*Выполнен аналитический расчёт и определение режимов работы резонансных преобразователей с последовательным резонансным LC контуром, параллельным резонансным LC контуром, последовательно-параллельным резонансным LCC контуром и последовательно-параллельным резонансным LLC контуром, обосновано применение полумостового резонансного LLC преобразователя с последовательным резонансным контуром в системах электрооборудования транспортных средств.*

*The analytical calculation and determination of the operating modes of resonant converters with a series resonant LC circuit, parallel resonant LC circuit, series-parallel resonant LCC circuit and series-parallel resonant LLC circuit are performed. the application of a semi-bridge resonant LLC Converter with a series resonant circuit in vehicle electrical equipment systems is justified.*

*Ключевые слова: резонансный преобразователь, аналитический расчёт, передаточные функции, транспортные средства, энергоэффективность.*

*Keywords: resonant converter, analytical calculation, transfer function, the vehicle energy efficiency.*

С точки зрения повышения энергоэффективности полупроводниковые резонансные преобразователи (РП) с «мягкой» коммутацией ключей на современном этапе являются в целом весьма удачным решением для применения в устройствах электропитания и системах индукционного заряда аккумуляторных батарей (АКБ) электрических и гибридных транспортных средств. Однако в силу многообразия схемных решений, весьма актуально исследование и сравнительный анализ различных типов РП для выбора топологии, целесообразной в системе электрооборудования транспорта.

В общем случае источник вторичного электропитания, функционирующий по принципу резонансного переключения транзисторов, имеет структуру, представленную на рис. 1. Передаточная функция  $H(s)$  данного преобразователя определяется выражением:

$$H(s) = \frac{U_r(s)}{U_g(s)},$$

где  $U_r(s)$  – напряжение на нагрузке,  $U_g(s)$  – входное напряжение



Рис.1. Структурная схема резонансного преобразователя

Ключевым функциональным узлом данных преобразователей является резонансный контур, обусловленный резонансной индуктивностью и резонансной ёмкостью (и различной их комбинацией). Тип преобразователя определяется, исходя из способа соединения данных компонентов. Токи и напряжения, сформированные в резонансном контуре, передаются в нагрузку.

Несмотря на всё многообразие существующих резонансных преобразователей, наибольшее распространение получили следующие [1]:

- РП с последовательным резонансным контуром;
- РП с параллельным резонансным контуром;
- РП с последовательно-параллельным резонансным контуром.

На основе схем замещения произведён аналитический расчёт и определение режимов работы резонансных преобразователей с последовательным резонансным LC контуром, параллельным резонансным LC контуром, последовательно-параллельным резонансным LCC контуром и последовательно-параллельным резонансным LLC контуром. Выявлено, что для преобразователей с последовательным резонансным LC контуром при малых нагрузках практически невозможна регулировка выходного напряжения. Теоретически, частота коммутации силовых полупроводниковых ключей должна быть бесконечной, чтобы регулировать выходное напряжение преобразователя при работе на холостом ходу. Для РП с параллельным резонансным LC контуром отсутствует проблема работы с малой нагрузкой, однако существует проблема, связанная с тем, что в процессе работы в резонансном контуре осуществляется циркуляция большой реактивной мощности, ввиду чего присутствуют большие потери при выключении силовых ключей даже при малой нагрузке.

Полупроводниковый преобразователь с последовательно-параллельным резонансным LCC контуром включает комбинацию последовательного и параллельного резонансных контуров и демонстрирует характеристики, свойственные данным топологиям преобразователей. При работе РП в режиме, близком к режиму холостого хода, РП работает как преобразователь с параллельным LC резонансным контуром. При увеличении нагрузки данный преобразователь начинает работать как преобразователь с последовательным LC резонансным контуром. Несмотря на то, что РП преобразователь с последовательно-параллельным LCC резонансным контуром способен функционировать при малой величине нагрузки, сохраняя выходное

напряжение в заданном диапазоне значений, величина реактивной мощности, циркулирующей в резонансном контуре, всё ещё оказывает существенное влияние на эффективность устройства, особенно при работе на холостом ходу.

Выявленные особенности функционирования описанных выше РП ограничивают их применение в составе систем электроснабжения транспортных средств. Данные проблемы решены в РП с последовательно-параллельным LLC резонансным контуром [2].

Определено, что РП с последовательно-параллельным LLC резонансным контуром способен функционировать при малой величине нагрузки, сохраняя выходное напряжение в заданном диапазоне значений. Также как при полной нагрузке, так и в режиме работы, близком к режиму холостого хода, построенный по данной топологии РП имеет высокие значения коэффициента полезного действия при широком диапазоне входных напряжений питающей сети.

Определено, что импеданс РП с LLC колебательным контуром вычисляется по следующей формуле:

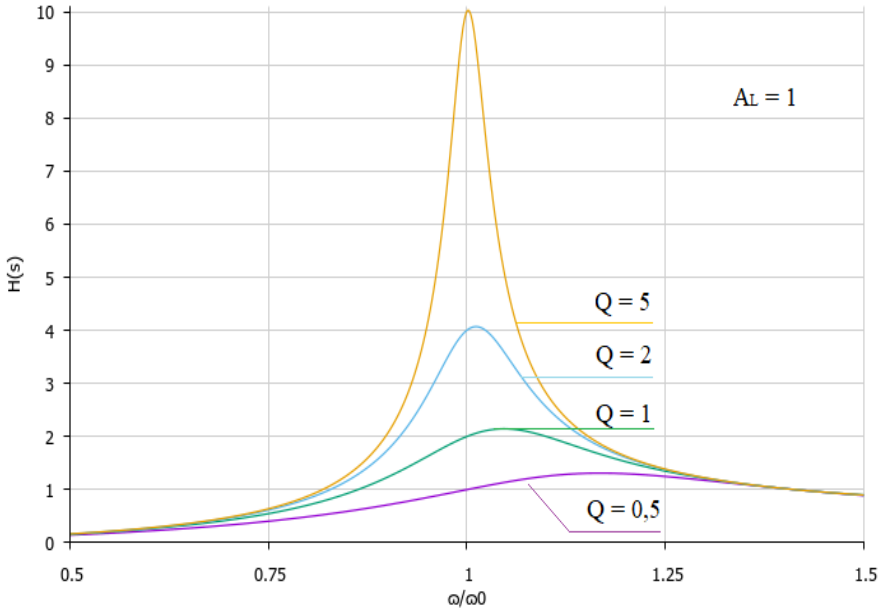
$$|Z| = Z_0 Q \sqrt{\frac{(1 + A_L)^2 \left[ 1 - \left( \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \right] + \frac{1}{Q^2} \left( \frac{\omega}{\omega_0} \cdot \frac{A_L}{A_L + 1} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}{1 + \left[ Q \left( \frac{\omega_0}{\omega} \right) (1 + A_L) \right]^2}},$$

где  $Z_0$  – импеданс контура на резонансной частоте,  $Q$  – добротность резонансного контура, определяемая параметрами компонентов резонансного контура и величиной нагрузки,  $\omega$  – частота коммутации ключей,  $\omega_0$  – резонансная частота колебательного контура,  $A_L$  – коэффициент, равный отношению величины индуктивности намагничивания трансформатора  $L_m$  к величине индуктивности резонансного дросселя  $L_r$  [2].

График зависимости величины передаточной функции РП с последовательно-параллельным LLC контуром от частоты коммутации полупроводниковых ключей при различных значениях нагрузки представлен на рис. 2. При номинальной нагрузке преобразователь функционирует на резонансной частоте ( $\omega = \omega_0$ ). В режиме работы, близком к режиму холостого хода ( $Q=0,5$ ), рабочая частота преобразователя увеличивается, что соответствует экстремуму графика передаточной характеристики. Диапазон рабочих частот РП определяется коэффициентом  $A_L$ , который определяет реакцию преобразователя на изменение величины нагрузки.

При малом значении коэффициента  $A_L$  при изменении режима работы от номинального до режима близкого к холостому ходу, наблюдается существенное увеличение частоты коммутации ключей, в то время как при большом значении коэффициента  $A_L$  рабочий диапазон частот оказывается

сильно ограничен, реакция передаточной функции на изменение нагрузки существенно увеличивается. Подходящие для практического применения режимы работы наблюдаются при нахождении коэффициента  $A_L$  в диапазоне  $0,125 \dots 0,5$ .



*Рис. 2. Зависимость передаточной функции РП с последовательно-параллельным LLC резонансным контуром от частоты коммутации при  $A_L=1$*

Таким образом, РП с последовательно-параллельным LLC контуром эффективно функционирует в широком диапазоне изменения нагрузки, что весьма важно для применения на электротранспорте.

### Список литературы

1. Yang, B. "Topology Investigation for Front End DC/DC Power Conversion for Distributed Power System," Ph.D dissertation, Dept. Elect. Comput. Eng. Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA, Sep. 2003.
2. Tatyko, P.S. Energy-efficient Half-bridge Voltage Converter for Vehicle Electrical Systems / P.S. Tatyko, G.A. Fedyaeva, V.V. Kobishanov, V.P. Fedorov // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2019, pp. 461-464.

*Материал поступил в редколлегию 20.10.20.*