

УДК 621.314

А.В. Осипов, И.М. Журавлев

Резонансные преобразователи постоянного напряжения с кодо-импульсным регулированием

Рассмотрены характеристики преобразователей постоянного напряжения с кодо-импульсным регулированием. Предложена бестрансформаторная топология резонансного преобразователя с однополярным кодо-импульсным регулированием, обеспечивающая регулирование одной полуволны тока резонансного контура. Показана линейность пульсации тока резонансного контура, что позволяет проводить анализ на основе эквивалентных схем понижающих преобразователей постоянного напряжения. Получены зависимости амплитуды пульсации тока резонансного контура от кратности модуляции.

Ключевые слова: последовательный резонансный преобразователь, кодо-импульсное регулирование, бестрансформаторная топология.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-2-97-102

Применение резонансных преобразователей является перспективным направлением повышения энергетической эффективности преобразования энергии в первую очередь из-за возможности обеспечения мягкой коммутации транзисторов [1, 2]. Однако их широкому внедрению препятствуют сложные алгоритмы управления, реализующие непрерывное широтно-импульсное регулирование, требующее подстройки частоты для сохранения режима мягкой коммутации. Поэтому часто применяются резонансные преобразователи с дискретным регулированием, которое может быть реализовано релейным или кодо-импульсным способом [3–5].

При кодо-импульсном регулировании (КИР) управляющее воздействие в преобразователе реализуется формированием набора импульсов, имеющего определенное сочетание интервалов вынужденных и свободных колебаний, определяемое заданным кодом. Поэтому данный метод регулирования заключается в управлении полупериодами тока резонансного контура, при реализации понижающего регулирования он состоит в изменении числа полупериодов потребления тока от источника питания к числу полупериодов передачи тока в нагрузку.

Наиболее широкое применение системы управления с КИР нашли в установках индукционного нагрева, так как при характерных для этих систем высоких значениях добротности колебательного контура он позволяет регулировать в широком диапазоне непрерывный ток нагрузки с малыми пульсациями [3–5]. В целом КИР может применяться и в преобразователях постоянного напряжения, в частности, в системах электропитания с буферным включением аккумуляторной батареи, напряжение которой является напряжением нагрузки, в этом случае зарядный ток аккумулятора не требует высокой точности стабилизации, и КИР может успешно применяться.

В резонансных преобразователях дискретное регулирование, в отличие от непрерывного, не требует подстройки частоты для сохранения резонансного режима работы, что позволяет существенно упростить систему управления. Кроме того, изолированным резонансным преобразователям, постро-

енным на основе двойного активного моста, присущи большие массогабаритные показатели [6–8], обусловленные, прежде всего, наличием согласующего трансформатора [6–12]. Поэтому в данной работе поставлена цель синтеза бестрансформаторного резонансного преобразователя с КИР.

Кодо-импульсное регулирование в изолированном резонансном преобразователе

В общем случае резонансный преобразователь постоянного напряжения с КИР может быть реализован по классической структуре (рис. 1, а). Регулирование выходного напряжения при КИР достигается изменением количества импульсов напряжения инвертора, подключаемых к контуру за период модуляции T_m , на котором, таким образом, присутствуют интервал вынужденных колебаний $T_{имп}$ (резонансный контур подключается к инвертору) и интервал свободных колебаний T_0 (контур отключен от инвертора и замкнут на нагрузку) (рис. 1, б). Поэтому инвертор в режиме кодо-импульсного регулирования имеет два временных интервала, кратных периоду колебаний синусоидального тока: интервал потребления тока, при котором путем поочередного замыкания диагоналей инвертора напряжение прикладывается к контуру, и интервал закоротки, образованный открытым состоянием двух смежных транзисторов инвертора, при котором напряжение инвертора равно нулю. Рабочая частота преобразователя постоянна и равна резонансной, что позволяет обеспечить режим мягкой коммутации транзисторов.

В преобразователях постоянного напряжения, в отличие от последовательного инвертора, из-за наличия емкостного фильтра, к контуру прикладывается прямоугольное напряжение

$$\begin{cases} U_{LC} = U_{вх} - U_{вых}, & \text{при } t \in T_{имп}, \\ U_{LC} = U_{вых}, & \text{при } t \in T_0, \end{cases}$$

где U_{LC} – напряжение, прикладываемое к резонансному контуру; $U_{вх}$ – входное напряжение, $U_{вых}$ – выходное напряжение.

Это приводит к линейному росту амплитуды тока контура. Изменение амплитуды тока за один период несущей частоты можно выразить соотношением

$$\Delta I_1 = \pi \cdot \frac{U_{LC_1m}}{\rho}$$

где U_{LC_1m} – первая гармоника напряжения, прикладываемого к контуру, ρ – его волновое сопротивление.

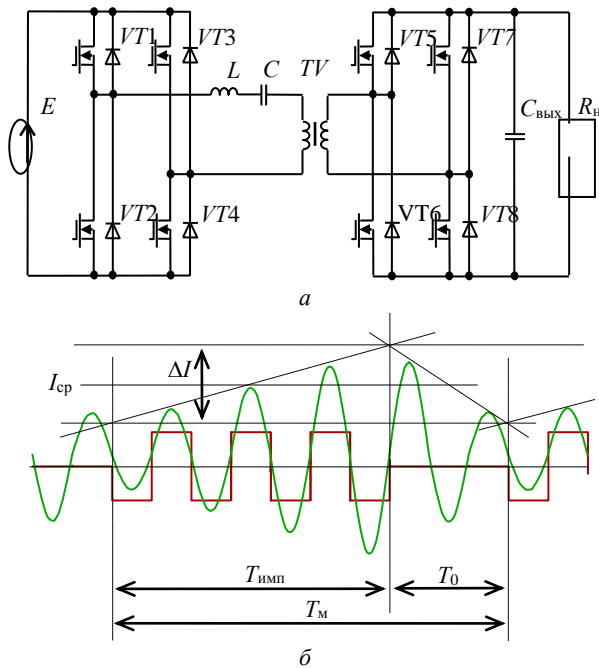


Рис. 1. Резонансный преобразователь с кодо-импульсным регулированием – а; б – диаграммы его работы при $\gamma = 0,7$

Поэтому пульсация амплитуды тока контура на интервале передачи энергии и закоротки

$$\Delta I = 2 \cdot \frac{U_{вх} - U_{ввых}}{\rho} \cdot \gamma \cdot v = 2 \cdot \frac{U_{ввых}}{\rho} \cdot (1 - \gamma) \cdot v,$$

где $\gamma = T_{имп} / T_m$ – отношение количества периодов вынужденных колебаний к количеству периодов на интервале модуляции; v – кратность резонансной частоты к частоте модуляции.

Учитывая линейную регулировочную

$$U_{ввых} = \gamma \cdot U_{вх}$$

при фиксированном входном напряжении, амплитуда пульсаций может быть выражена

$$\Delta I = 2 \cdot \frac{U_{вх}}{\rho} \cdot \gamma \cdot (1 - \gamma) \cdot v.$$

Таким образом, амплитуда пульсаций определяется волновым сопротивлением и не зависит от нагрузки.

Бестрансформаторный резонансный преобразователь с кодо-импульсным регулированием

Бестрансформаторный преобразователь построен на основе мостового инвертора, включенного по вольтодобавочной структуре (рис. 2, а). Такое включение инвертора не требует трансформатора для получения постоянного напряжения на нагрузке. Были попытки реализации похожей топологии с дискретным регулированием [13, 14], однако, точность в указанных работах достигалась увеличением

количества элементарных ячеек, завышающих массу и снижающих КПД. В данном случае, при реализации КИР, на интервале вынужденных колебаний, инвертор подает на последовательный LC-колебательный контур напряжение, равное разности входного и выходного напряжений, как и в структуре (рис. 1, а).

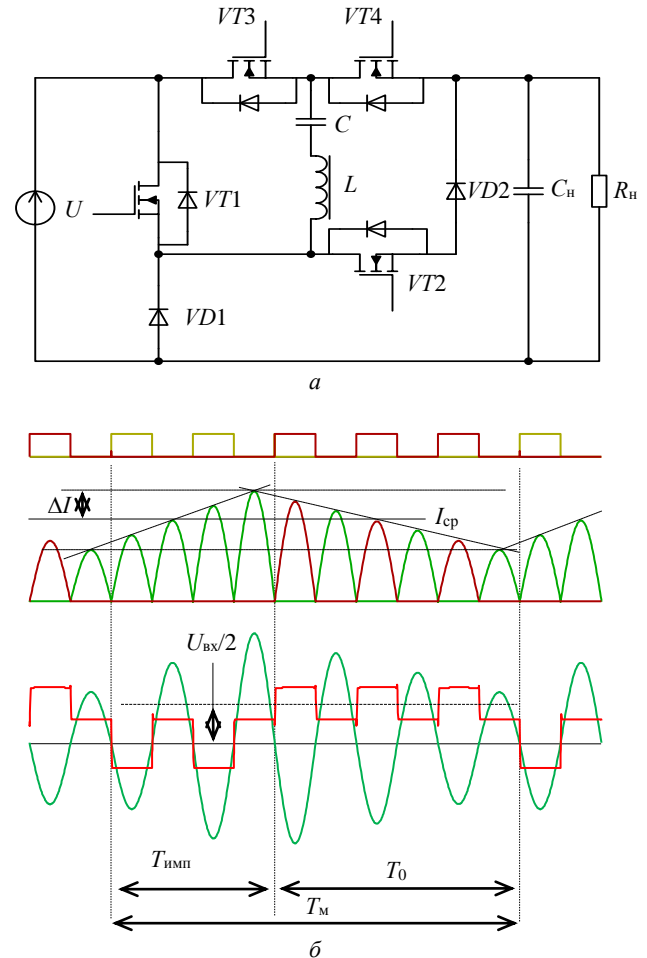


Рис. 2. Бестрансформаторный резонансный преобразователь с однополярным кодо-импульсным регулированием – а; б – диаграммы его работы при $\gamma = 0,4$

На интервале свободных колебаний в преобразователе необходимо сформировать контур протекания тока в нагрузку без входного источника, что в данном случае реализуется выключением транзистора $VT1$, ток в этом случае протекает по цепи $VD1-VT4$. Энергия, запасенная в резонансном контуре, передается в нагрузку. Для блокирования отпирающего обратного диода транзистора $VT2$ в схему вводится диод $VD2$. Таким образом, преобразователь обеспечивает КИР одной из диагоналей инвертора, т.е. однополярное КИР. Диаграммы работы преобразователя при регулировании приведены на рис. 2, б. Отличие бестрансформаторного преобразователя в том, что интервал затухания состоит из вынужденного полупериода и свободного, поэтому на контуре образуется постоянная составляющая $U_{LC} = U_{вх}/2$. В этом случае регулировочная примет вид

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \cdot \frac{1+\gamma}{2}, \quad (1)$$

а пульсация амплитуды тока контура будет описываться уравнением

$$\Delta I = \frac{U_{\text{ВХ}}}{\rho} \cdot \gamma \cdot (1-\gamma) \cdot v, \quad (2)$$

показывающим, что такой преобразователь характеризуется в 2 раза меньшей амплитудой пульсаций, чем классический (см. рис. 1, а). При нормировании к амплитуде тока резонансного контура при $\gamma = 1$

$$I_0 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_{\text{Н}}} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_{\text{АС}}},$$

где $R_{\text{АС}}$ – активное сопротивление по переменному току.

$$\Delta I^* = \frac{\Delta I}{I_0} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{v}{Q} \cdot \gamma \cdot (1-\gamma) = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\gamma \cdot (1-\gamma)}{Q_k}, \quad (3)$$

где $Q_k = Q/v$ – добротность резонансного контура, соотношенная к кратности модуляции.

Среднее значение амплитуды тока резонансного контура

$$I_{\text{ср}}^* = \frac{I_{\text{ср}}}{I_0} = \frac{1+\gamma}{2}.$$

Зависимость пульсаций амплитуды тока резонансного контура от относительной длительности интервала вынужденных колебаний показана на рис. 3. Границу прерывистого режима можно обозначить равенством переменных и постоянной составляющих тока контура $\Delta I^* = I_{\text{ср}}^*$.

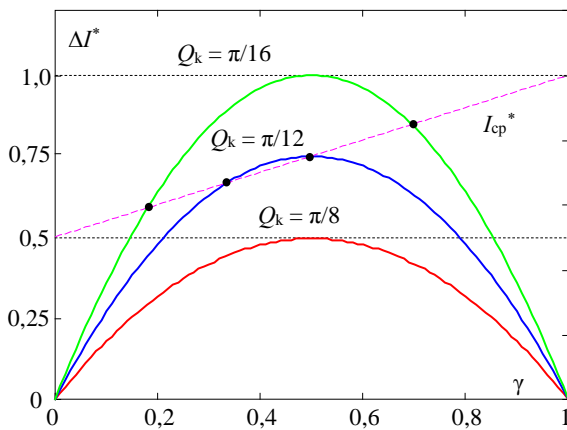


Рис. 3. Амплитуда пульсаций тока резонансного контура при разных добротностях

Следует сказать, что приведенные схемы преобразователей имеют линейный характер изменения амплитуды тока контура, который может описываться известными эквивалентными схемами со сглаживающим дросселем. В этом отношении резонансный преобразователь с однополярным регулированием эквивалентен понижающему преобразователю с неполной глубиной регулирования (рис. 4).

В таком преобразователе регулировочная характеристика также описывается (1), а пульсация тока – выражением

$$\Delta I = U_{\text{ВХ}} \cdot \gamma \cdot (1-\gamma) \cdot \frac{T_M}{2L},$$

которое эквивалентно полученному для резонансной схемы (2). Таким образом, анализ резонансных преобразователей постоянного напряжения можно проводить методом эквивалентной схемы понижающего преобразователя, сделав замену:

$$L_{\text{ЭКВ}} = \rho \cdot \frac{T_M}{4 \cdot v}. \quad (4)$$

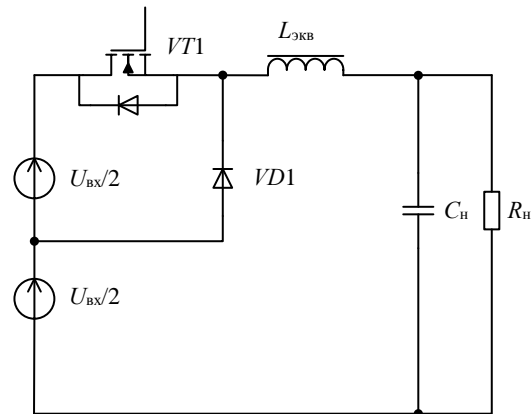


Рис. 4. Эквивалентная схема однополярного резонансного преобразователя с КИР

Моделирование резонансного преобразователя с КИР в режиме заряда аккумулятора энергией солнечной батареи

В режиме заряда аккумулятора (АБ) энергией солнечной батареи (СБ) выходное напряжение фиксируется напряжением АБ, а входное напряжение, т.е. напряжение СБ, определяется регулировочной характеристикой (1), что позволяет задавать величину тока заряда АБ. Следует сказать, что вольт-амперная характеристика (ВАХ) СБ имеет два характерных участка: участок стабильного тока и участка стабильного напряжения, понижающий характер регулирования диктует работу именно на ветви напряжения ВАХ СБ. Ветвь напряжения ВАХ СБ можно аппроксимировать линейной зависимостью, что имитируется последовательным соединением ЭДС и резистора, обеспечивающего нужный наклон ВАХ [15–19].

На ветви напряжения ВАХ СБ линейна и определяется выражением

$$I_{\text{СБ}} = \frac{U_{\text{ХХ}} - U_{\text{СБ}}}{R_{\text{Ш}}}, \quad (5)$$

где $I_{\text{СБ}}$ – ток солнечной батареи; $U_{\text{ХХ}}$ – напряжение холостого хода солнечной батареи; $U_{\text{СБ}}$ – напряжение солнечной батареи; $R_{\text{Ш}}$ – сопротивление резистора, обеспечивающего наклон ВАХ.

Тогда, с учетом (5), регулировочная характеристика зарядного тока АБ

$$I_{\text{АБ}} = \frac{U_{\text{ХХ}} - U_{\text{АБ}} \cdot \frac{2}{1+\gamma}}{R_{\text{Ш}}} \cdot \frac{2}{1+\gamma}.$$

Пульсация амплитуды тока контура

$$\Delta I = U_{СБ} \cdot \frac{\nu}{\rho} \cdot \gamma \cdot (1 - \gamma),$$

$$\Delta I = 2U_{АБ} \cdot \frac{\nu}{\rho} \cdot \gamma \cdot \frac{1 - \gamma}{1 + \gamma}.$$

В ходе исследования преобразователя была разработана имитационная модель резонансного преобразователя в среде Micro-Cap 11.0 (рис. 5, б). Аккумуляторная батарея имитировалась источником напряжения $U_{АБ} = 50$ В, солнечная батарея – последовательным соединением источника напряжения $U_{ХХ} = 100$ В и резистора $R_{Ш} = 10$ Ом, обеспечивающего наклон ветви напряжения ВАХ и максимальный зарядный ток при $\gamma = 1$, равный

$$I_{АБ,м} = \frac{U_{ХХ} - U_{АБ}}{R_{Ш}} = 5,45 \text{ А}.$$

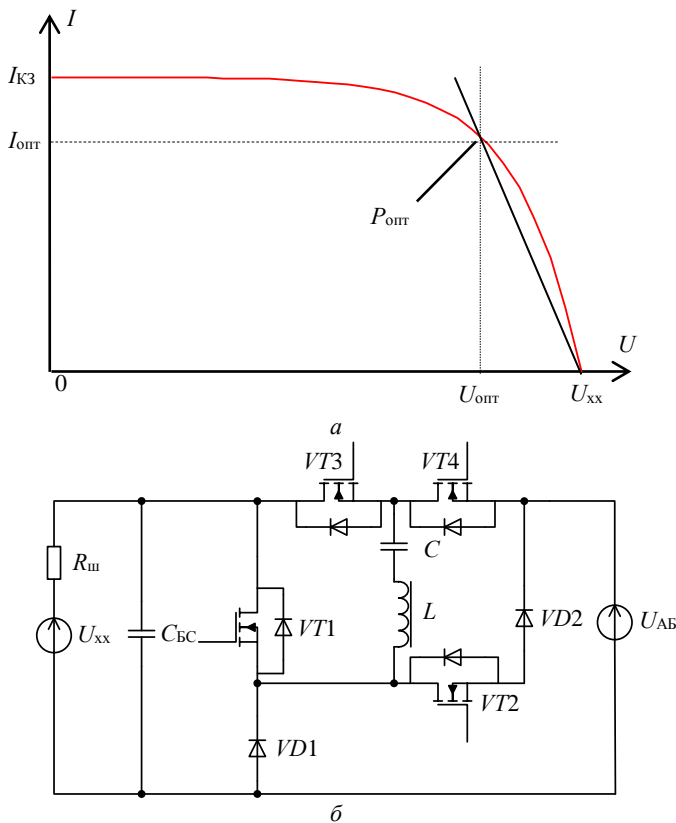


Рис. 5. ВАХ СБ – а; резонансный бестрансформаторный преобразователь в режиме заряда аккумулятора – б

Параметры резонансного контура $L = 30$ мкГн, $C = 84$ нФ обеспечивают резонансную частоту колебательного контура $f = 100$ кГц и волновое сопротивление контура $\rho = 20$ Ом.

Регулировочная характеристика в данном режиме нелинейна, что обусловлено наклоном ВАХ СБ. Максимальная пульсация тока резонансного контура соответствует $\gamma = 0,4$. Границей перехода в прерывистый режим тока резонансного контура при заданном можно считать кратность модуляции $\nu = 4$. Увеличение периода модуляции свыше $\nu = 4$ нецелесообразно из-за перехода в режим прерывистого

тока, что приводит к неоправданному завышению габаритной мощности элементов резонансного контура.

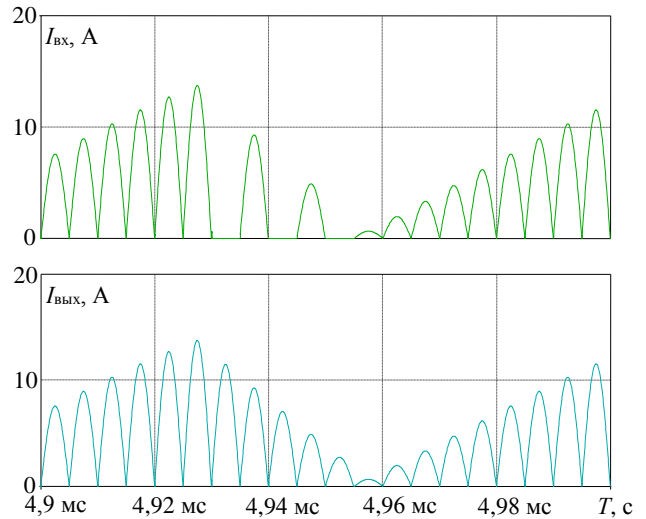


Рис. 6. Результаты моделирования на границе прерывистого режима при $\nu = 8$, $\gamma = 5/8$

В ходе работ были получены характеристики, приведенные на рис. 7.

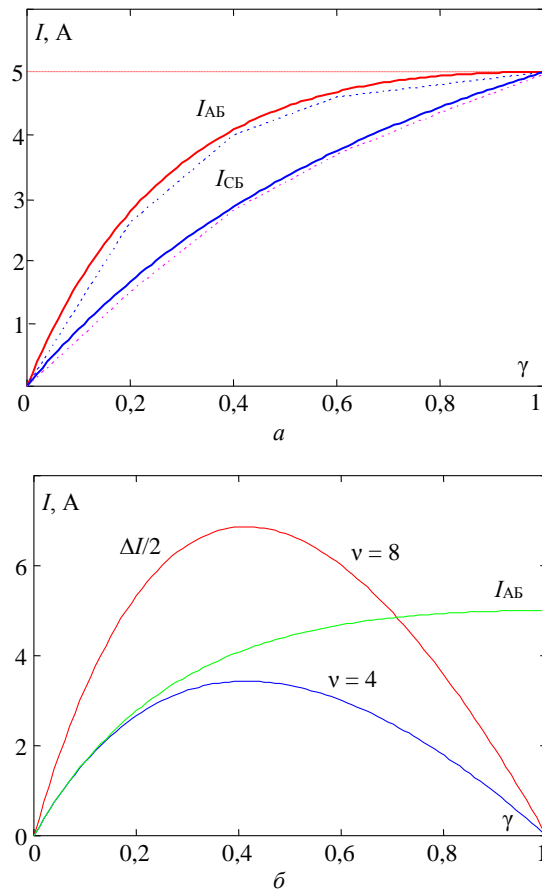


Рис. 7. Регулировочные характеристики в режиме заряда при $U_{ХХ} = 100$ В, $U_{АБ} = 50$ В – а; пульсация амплитуды тока резонансного контура в режиме заряда при $U_{ХХ} = 100$ В, $U_{АБ} = 50$ В – б

Заключение

Кодо-импульсное регулирование в резонансных преобразователях постоянного напряжения характеризуется линейным изменением амплитуды тока, определяемым добротностью контура. Это позволяет применять для анализа таких преобразователей эквивалентные схемы непосредственных преобразователей.

Бестрансформаторный преобразователь обеспечивает регулирование одной полуволной, что ограничивает диапазон регулирования и уменьшает амплитуду пульсаций в 2 раза. КПД предложенного преобразователя снижают дополнительные диоды $VD1$, $VD2$, необходимые для формирования интервала свободных колебаний.

Литература

- Осипов А.В. Вольтодобавочный последовательный резонансный преобразователь с изменяемой структурой для систем электропитания / А.В. Осипов, Е.В. Ярославцев, Е.Ю. Буркин, В.В. Свиридов // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 3. – С. 27–37.
- Осипов А.В. Последовательный резонансный преобразователь для систем электропитания от аккумуляторов / А.В. Осипов, В.Н. Школьный, Ю.А. Шиняков, Е.В. Ярославцев, И.С. Шемолин // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 103–110.
- Земан С.К. Кодово-импульсный способ регулирования технологического параметра преобразователя частоты установки индукционного нагрева / С.К. Земан, О.Е. Сандырев // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2007. – Т. 310, № 1. – С. 191–196.
- Пат. 2 286 000 РФ, МПК Н 02 М 7/527. Способ управления резонансным инвертором со встречно-параллельными диодами / О.Е. Сандырев, С.К. Земан, Е.В. Ярославцев. – № 2 005 112 039 / 09, заявл. 21.04.2005; опубл. 20.10.2006, Бюл. № 29. – 7 с.
- Пат. 2 319 282 РФ, МПК Н 02 М 7/527. Способ регулирования выходного напряжения преобразователя частоты / С.К. Земан, А.В. Осипов, О.Е. Сандырев. – № 2 006 141 429 / 09, заявл. 23.11.2006; опубл. 10.03.2008, Бюл. № 7. – 10 с.
- Multiport energy router for satellite based on high-frequency transformer / Kang Qing, Zhang Xuan, Xing Ji, Li Feng, Shi Haiping // European Space Power Conference. – 2019. – P. 305–308.
- Cavalcante F.S. Design of a 5 kW high output voltage series-parallel resonant DC-DC converter / F.S. Cavalcante, J.W. Kolar // Proceedings of the 34th IEEE Power Electronics Specialists Conference. – 2003. – Vol. 4. – P. 1807–1813.
- Bidirectional dual active bridge series resonant converter with pulse modulation / Zoran Pavlovic, Jesus Oliver, Pedro Alou, Oscar Garcia, Jose Cobos // 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. – 2012. – P. 503–508.
- Hillers A. Design of a highly efficient bidirectional isolated LLC resonant converter / A. Hillers, D. Christen, J. Biela // 15th International Power Electronics and Motion Control Conference. – 2012. – Vol. 13. – P. 1–8.
- An AC-link bidirectional DC-DC converter with synchronous rectifier / Hirose Toshiro, Nishimura Keisuke, Kimura Takayuki, Matsuo Hirofumi // 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. – 2010. – P. 351–357.

11. Dianbo Fu. Topology investigation and system optimization of resonant converter: PhD. – Virginia Polytechnic Institute and State University, 2010. 211 p.

12. Welday Gebremedihnn Gerekiel. Galvanic isolated bidirectional resonant converter DC-DC LLC: PhD. – Norwegian University of Science and Technology, 2014. 108 p.

13. Изолированные системы электроснабжения для объектов сельского хозяйства / Л.Г. Зотов, Ю.В. Ким, А.Д. Мехтиев, В.В. Югай, И.И. Мулкібай // Актуальные проблемы современности. – 2015. – Т. 1. – С. 67–71.

14. Резонансные конвертеры постоянного тока на основе структур с переключаемыми конденсаторами для автономных систем / Л.Г. Зотов, А.Д. Мехтиев, В.В. Югай, А.Н. Коновалова // Актуальные проблемы современности. – 2015. – Т. 3. – С. 88–91.

15. Power assessment indices of solar arrays under MPPT and DET methods for spacecraft / Zhang Xuan, Kang Qing, Yu Wentao, Xing Jie, Li Feng, You Xiangan // European Space Power Conference. – 2019. – P. 321–325.

16. Choudhary P.K. Implementation of soft-switching boost converter with a resonant circuit / P.K. Choudhary, N. Gupta // International Journal of Technology Enhancements and Emerging Engineering Research. – 2014. – Vol. 2, № 4. – P. 108–110.

17. Modeling and power management of a LEO small satellite electrical power system / E. Mostacciolo, L. Iannelli, S. Sagnelli, F. Vasca, R. Luisi, V. Stanzione // European Control Conference. – 2018. – P. 2738–2743.

18. Bhat A.K.S. Analysis and design of LCL-Type series resonant converter // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1994. – Vol 41, № 1. – P. 118–124.

19. Schofield D. Design and implementation of a COTS, GaN-based power converter for spacecraft applications // European Space Power Conference. – 2019. – P. 314–317.

Осипов Александр Владимирович

Канд. техн. наук, зав. лаб. каф. промышленной электроники (ПрЭ) Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр., д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-44-75
Эл. почта: ossan@mail.ru

Журавлев Иван Михайлович

Аспирант каф. ПрЭ ТУСУР
Тел.: +7-908-021-37-24
Эл. почта: iv_zhuravlev@mail.ru

Osipov A.V., Zhuravlev I.M.

Resonant DC-DC Converter with Code-pulse control

Characteristics of DC-DC voltage converters with code-pulse regulation are considered. The transformerless resonant converter topology with one-pole code-pulse regulation, that implement regulation by half-wave resonance current, is proposed. Resonant circuit current amplitude dependence by regulation accuracy is established. Analysis method based on an equivalent circuit of a DC-DC buck converter is proposed. It is shown that accuracy increase leads to a rise of an amplitude of resonant circuit current.

Keywords: serial resonant converter, code-pulse regulation, transformerless topology.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-2-97-102

References

1. Osipov A.V., Yaroslavtsev E.V., Burkin E.Y., Sviridov V.V. [Booster series resonant transformer with variable structure for power supply system's]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo-Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 27–37 (in Russ).
2. Osipov A.V., Shcolnyi V.N., Shinyakov Y.A., Yaroslavtsev E.V., Shemolin I.S. [Serial resonance converter for discharge of batteries space vehicles power system]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 103–110 (in Russ).
3. Zeman S.K., Sandyrev O.E. [Code-pulse regulation method for technological parameter of the frequency converter of the induction heating installation]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo-Assets Engineering*, 2007, vol. 310, no. 1, pp. 191–196 (in Russ).
4. Sandyrev O.E., Zeman S.K., Yaroslavtsev E.V. *Sposob upravleniya rezonansnim invertorom so vstrechno-parallelnymi diodami* [Control method for resonance inverter with counter-parallel diodes]. Patent RF, no. 2286000, 2005 (in Russ).
5. Zeman S.K., Osipov A.V., Sandyrev O.E. *Sposob regulirovaniya vyhodnogo napraygeniya preobrazovatelja chastoti* [Output voltage regulation method for frequency converter]. Patent RF, no. 2319282, 2006 (in Russ).
6. Qing Kang, Xuan Zhang, Ji Xing, Feng Li, Hai-ping Shi. Multiport energy router for satellite based on high-frequency transformer. *European Space Power Conference*, 2019, pp. 305–308.
7. Cavalcante F.S., Kolar J.W. Design of a 5 kW high output voltage series-parallel resonant DC-DC converter. *Proceedings of the 34th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2003, vol. 4, pp. 1807–1813.
8. Pavlovic Zoran, Oliver Jesus, Alou Pedro, Garcia Oscar, Cobos Jose. Bidirectional dual active bridge series resonant converter with pulse modulation. *2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks*, 2012, pp. 503–508.
9. Hillers A., Christen D., Biela J. Design of a highly efficient bidirectional isolated LLC resonant converter. *15th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2012, vol. 13, pp. 1–8.
10. Hirose Toshiro, Nishimura Keisuke, Kimura Takayuki, Matsuo Hirofumi. An AC-link bidirectional DC-DC converter with synchronous rectifier. *36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010, pp. 351–357.
11. Dianbo Fu. *Topology investigation and system optimization of resonant converter*: PhD. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2010. 211 p.
12. Welay Gebremedihm Gerekiel. Galvanic isolated bi-directional resonant converter DC-DC LLC: PhD. – Norwegian University of Science and Technology, 2014. 108 p.
13. Zotov L.G., Kim Y.V., Mehtiev A.D., Yugay V.V., Mylkibay I.I. [Insulated power supply systems for objects of agriculture]. *Actual modern issue*, 2015, vol. 1, pp. 67–71 (in Russ).
14. Zotov L.G., Mehtiev A.D., Yugay V.V., Konovalova A.N. [Resonant converters DC structure-based switched-capacitor for autonomous systems]. *Actual modern issue*, 2015, vol. 3, pp. 88–91 (in Russ).
15. Xuan Zhang, Qing Kang, Wentao Yu, Jie Xing, Feng Li, Xiangyan You. Power assessment indices of solar arrays under MPPT and DET methods for spacecraft. *European Space Power Conference*, 2019, pp. 321–325.
16. Choudhary P.K., Gupta N. Implementation of soft-switching boost converter with a resonant circuit. *International Journal of Technology Enhancements and Emerging Engineering Research*, 2014, vol 2, no. 4, pp. 108–110.
17. Mostacciolo E., Iannelli L., Sagnelli S., Vasca F., Luisi R., Stanzone V. Modeling and power management of a LEO small satellite electrical power system. *European Control Conference*, 2018, pp. 2738–2743.
18. Bhat A.K.S. Analysis and design of LCL-Type series resonant converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1994, vol/ 41, no. 1, pp. 118–124.
19. Schofield D. Design and implementation of a COTS, GaN-based power converter for spacecraft applications. *European Space Power Conference*, 2019, pp. 314–317.

Aleksandr V. Osipov

Candidate of Engineering Science, Head of laboratory,
Tomsk State University of Control System
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-44-75
Email: ossan@mail.ru

Ivan M. Zhuravlev

Postgraduate student TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-908-021-37-24
Email: iv_zhuravlev@mail.ru