

## СРАВНЕНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В КЛЮЧАХ ПОВЫШАЮЩИХ КРИП С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ РЕЗОНАНСНЫМИ КОНТУРАМИ

**Ю.А.Денисов**, докт.техн.наук, **А.Н.Городний**, канд.техн.наук, **В.В.Гордиенко**, канд.техн.наук, **С.А.Степенко**, канд.техн.наук, **Р.Д.Ершов**, **Т.М.Тёплая**  
**Черниговский национальный технологический университет,**  
 ул. Шевченко, 95, Чернигов, 14027, Украина. e-mail: [aleksey.gorodny@gmail.com](mailto:aleksey.gorodny@gmail.com)

*В работе выполнен расчет электромагнитных процессов энергетических показателей в транзисторных ключах повышающих квазирезонансных импульсных преобразователей (КРИП) с параллельным и последовательным резонансными контурами. Расчеты выполнены с использованием операторного метода и метода приписывания результатов изменения тока через транзисторный ключ и напряжения на нем. Для каждого интервала коммутации транзисторных ключей получены аналитические выражения, которые позволили оценить энергетические потери на отдельных интервалах, а также общие потери. Результаты исследования позволили сравнить два преобразователя с одинаковыми параметрами питания, силовой части и нагрузки в зависимости от способа подключения резонансного контура. Библ. 4, табл. 1, рис. 4.*

**Ключевые слова:** резонансный контур, квазирезонансный импульсный преобразователь, транзисторный ключ.

**Введение.** Современные системы вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры в своем составе имеют последовательные и параллельные импульсные преобразователи (ИП) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [1]. С ростом частоты работы ИП улучшаются их удельные параметры, однако это снижает коэффициент полезного действия (КПД) из-за увеличения динамических потерь на транзисторных ключах [2]. Повысить частоту работы и одновременно снизить динамические потери можно в ИП на основе квазирезонансных импульсных преобразователей, переключаемых при нулевом токе (КРИП-ПНТ), в которых регулирование выходной мощности происходит за счет частотно-импульсной модуляции (ЧИМ). Основное применение параллельные ИП находят при разработке повышающих стабилизаторов напряжения постоянного тока [1] и корректоров коэффициента мощности (ККМ) [3].

Оценка энергетических потерь в последовательных КРИП-ПНТ и ИП с ШИМ проведена в статье [2]. Метод анализа коммутационных потерь, используемый в этой работе, позволил учесть влияние параметров силовой части преобразователей, транзисторных ключей и нагрузки на потери в этих ключах.

Целью данной работы является оценка энергетических потерь в ключах параллельных КРИП-ПНТ для оптимизации параметров силовой части и тепловых режимов таких преобразователей.

**Расчет энергетических показателей повышающих КРИП-ПНТ с параллельным и последовательным резонансными контурами.** На рис. 1 показаны временные диаграммы, которые качественно отображают работу транзисторного ключа в параллельном КРИП-ПНТ с учетом его паразитных параметров и соответствуют теоретическим и экспериментальным данным. На рис. 2 показана схема повышающего КРИП-ПНТ с параллельным резонансным контуром.

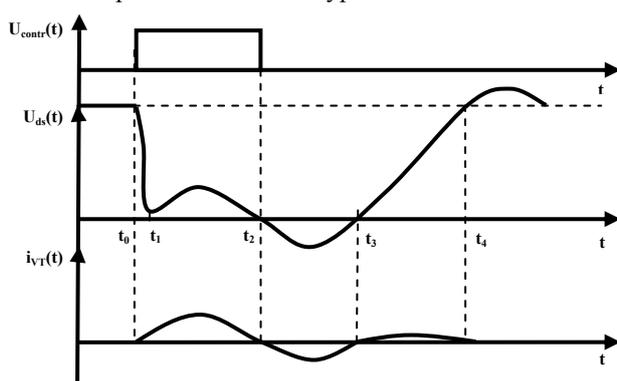


Рис. 1

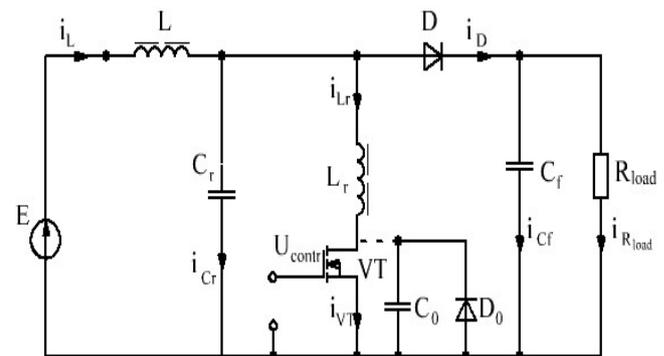


Рис. 2

Процесс переключения содержит пять интервалов коммутации транзистора: интервал включения ( $t_0-t_1$ ); интервал открытого состояния ( $t_1-t_2$ ); интервал открытого состояния, когда ток протекает через обратный диод  $D_0$  ( $t_2-t_3$ ); интервал выключения ( $t_3-t_4$ ); интервал закрытого состояния (энергия из накопительной индуктивности  $L$  передается в нагрузку) ( $t_4-t_0$ ). Условия перехода от одного интервала к другому и, соответственно, от одной эквивалентной схемы к другой, определяется временными диаграммами работы преобразователей (рис. 1).

На рис. 3 показаны эквивалентные схемы замещения для всех интервалов коммутации: а) интервал включения; б) интервал открытого состояния; в) интервал проводимости диода  $D_0$ ; г) интервал выключения.

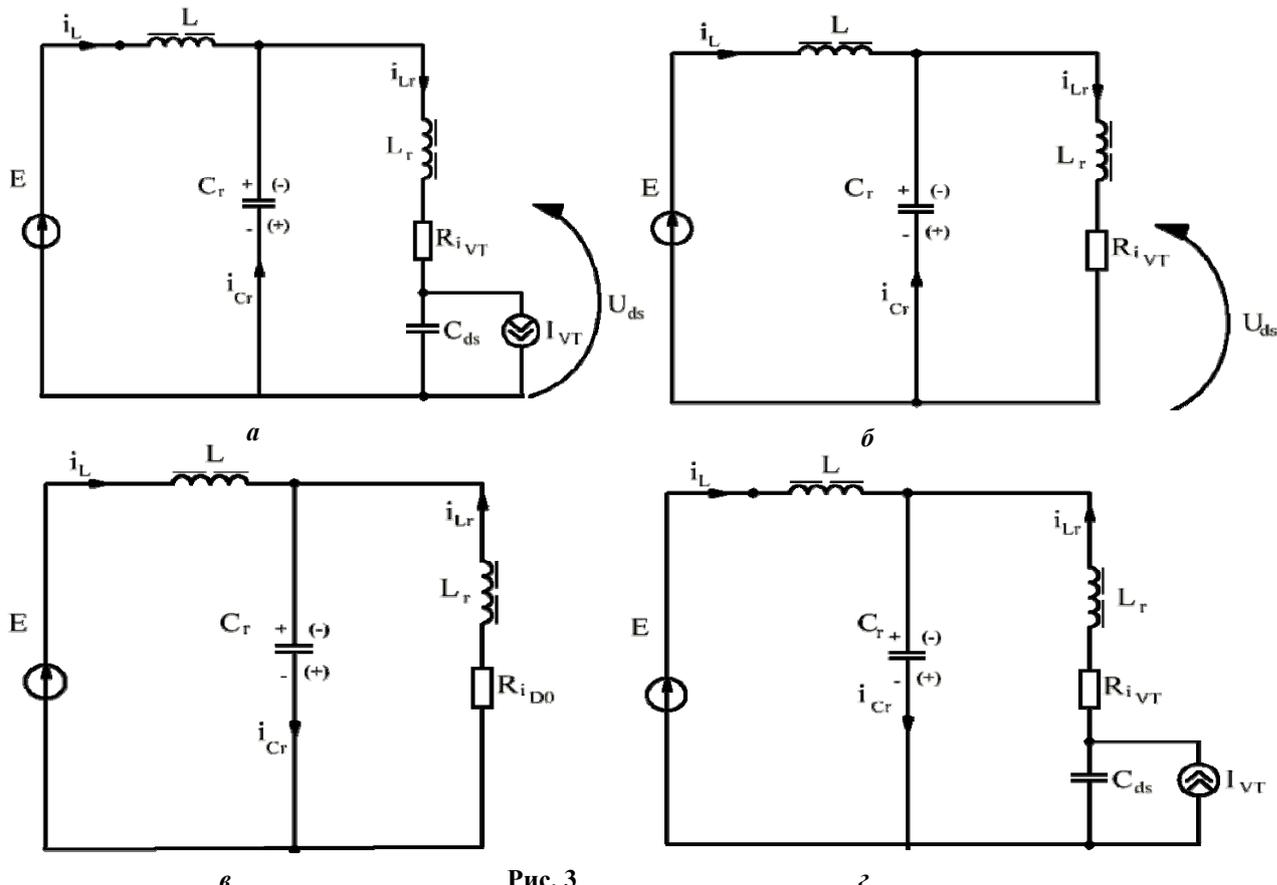


Рис. 3

При расчете потерь пятый коммутационный интервал не учитывался, так как транзистор закрыт, а мощность потерь при этом стремится к нулю. Для каждой эквивалентной схемы замещения с помощью обобщенного метода узловых напряжений определены токи и напряжения транзистора [4]. После этого получена мощность потерь на интервалах

$$P_n = \frac{1}{t_n - t_{n-1}} \int_{t_{n-1}}^{t_n} U_{ds}(t) \cdot I_{VT}(t) dt, \quad (1)$$

где  $U_{ds}$  – напряжение сток-исток;  $I_{VT} = I_{Lr}$  – ток через транзисторный ключ;  $n$  – номер коммутационного интервала.

Например, для первого интервала коммутации матрица проводимостей, векторы-столбцы искоемых напряжений и задающих токов имеют вид

$$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{1}{pL} + \frac{1}{pL_r} + pC_r & -\frac{1}{pL_r} & 0 \\ -\frac{1}{pL_r} & \frac{1}{R_{iVT}} + \frac{1}{pL_r} & -\frac{1}{R_{iVT}} \\ 0 & -\frac{1}{R_{iVT}} + K & \frac{1}{R_{iVT}} + pC_{ds} \end{bmatrix}; \quad [U] = \begin{bmatrix} U_2(p) \\ U_3(p) \\ U_4(p) \end{bmatrix}; \quad [I] = \begin{bmatrix} \frac{E}{p} \cdot \frac{1}{pL} + \frac{L \cdot i_L(t_0)}{p} + U_{Cr}(t_0) \cdot C_r \\ 0 \\ U_{ds}(t_0) \cdot C_{ds} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

С учетом узловых напряжений находим необходимые токи и напряжения для расчета рассеиваемой мощности на первом интервале

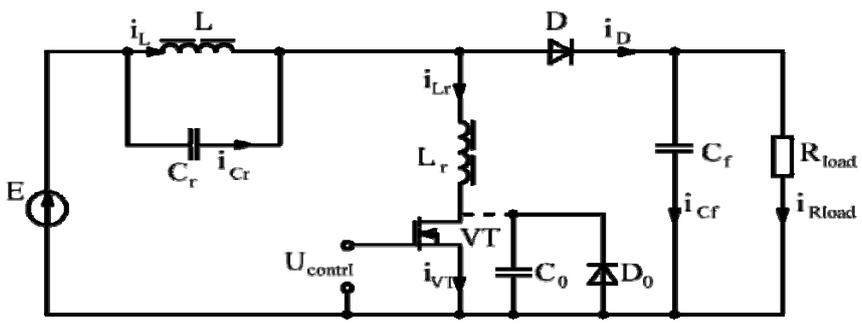


Рис. 4

$$\begin{aligned} i_{Lr}(p) &= i_{RiVT}(p) = \frac{U_3(p) - U_4(p)}{R_{iVT}}; \\ i_L(p) &= \frac{U_2(p) - E/p - Li_L(t_0)}{pL}; \\ U_{DS}(p) &= U_3(p). \end{aligned} \quad (3)$$

На рис. 4 показана схема повышающего КРИП-ПНТ с последовательным резонансным контуром. Эквивалентные схемы замещения для этого преобразователя составлялись

	КРИП-ПНТ с параллельным контуром			КРИП-ПНТ с последовательным контуром		
	<i>P, Вт</i>	<i>Q, мкДж</i>	<i>Q, %</i>	<i>P, Вт</i>	<i>Q, мкДж</i>	<i>Q, %</i>
Интервалы						
Включения	0.360	0.002	0.20	0.120	0.001	0.07
Открытого состояния	5.888	0.650	64.48	1.010	0.257	17.15
Открытого состояния транзистора и диода	1.753	0.180	17.86	0.045	0.007	0.46
Выключения	0.641	0.176	17.46	0.880	1.234	82.32
Всего	2.061	1.008	100	0.670	1.499	100

аналогично предыдущим. Исследовались КРИП-ПНТ с мощностью до 250 Вт, частотой коммутации до 500 кГц, при экспериментальном исследовании использовался ключевой карбидокремниевый транзистор SPW17N80C3. Мощность (*P*) и энергия (*Q*) потерь в транзисторных ключах повышающих КРИП-ПНТ приведены в таблице.

Проведённые исследования потерь мощности на транзисторе КРИП-ПНТ в процессе переключения позволяют сделать следующие **выводы**. Статические потери являются основными (82%) в КРИП с параллельным резонансным контуром, а в КРИП с последовательным контуром преобладают динамические потери (более 82%). Динамические потери можно уменьшить, если устранить влияние паразитного колебательного контура между  $L_T$  и  $C_{ds}$  на время выключения. Статические потери уменьшаются при увеличении индуктивности и уменьшении ёмкости резонансного контура.

1. *Войтенко В.П.* Этапы алгоритма квазиоптимального регулирования в системе с импульсным преобразователем // Технічна електродинаміка.. – 2012. – № 3. – С. 125–126.

2. *Городний А.Н.* Анализ мощности рассеивания транзисторным ключом в последовательных импульсном и квазирезонансном преобразователях // Технічна електродинаміка.. – 2012. – № 3. – С. 75–76.

3. *Шидловський А.К., Жаркін А.Ф., Пазєєв А.Г.* Безперервні наближені моделі перетворювачів змінної напруги в постійну з активною корекцією коефіцієнта потужності // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 6. – С. 11–17.

4. *Denisov Y., Gorodny A., Gordienko V., Yershov R., Stepenko S., Kostyrieva O., Prokhorova A.* Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit // Proceedings of the IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2016), April 19-21, 2016, Kyiv, Ukraine. – 2016. – Pp. 327–332.

УДК 621.316.721

## ПОРІВНЯННЯ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В КЛЮЧАХ ПІДВИЩУЮЧИХ КРИП З ПАРАЛЕЛЬНИМ І ПОСЛІДОВНИМ РЕЗОНАНСНИМИ КОНТУРАМИ

**Ю.О.Денисов**, докт.техн.наук, **О.М.Городній**, канд.техн.наук, **В.В.Гордієнко**, канд.техн.наук,

**С.А.Степенко**, канд.техн.наук, **Р.Д.Єршов**, **Т.М.Тепла**

Чернігівський національний технологічний університет,

вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14027, Україна.

e-mail: [aleksey.gorodny@gmail.com](mailto:aleksey.gorodny@gmail.com)

У роботі виконано розрахунок енергетичних показників електромагнітних процесів в транзисторних ключах підвищуючих квазирезонансних імпульсних перетворювачів (КРИП) з паралельним і послідовним резонансними контурами. Розрахунки виконано з використанням операторного методу і методу припасовування. Для кожного інтервалу комутації отримано аналітичні вирази, які дозволили оцінити енергетичні втрати на кожному інтервалі, а також загальні втрати. Результати дослідження дозволили порівняти два перетворювача з однаковими параметрами живлення, силової частини і навантаження в залежності від способу підключення резонансного контуру. Бібл. 4, табл. 1, рис. 4.

**Ключові слова:** резонансний контур, квазирезонансний імпульсний перетворювач, транзисторний ключ

## COMPARISON OF POWER LOSSES IN SWITCH OF BOOST QRPC WITH PARALLEL AND SERIES RESONANT CIRCUITS

**Yu.O.Denysov, O.M.Gorodny, V.V.Gordienko, S.A.Stepenko, R.D.Yershov, T.M.Tepla**

Chernihiv National University of Technology,

Shevchenka str., 95, Chernihiv, 14027, Ukraine.

e-mail: [aleksey.gorodny@gmail.com](mailto:aleksey.gorodny@gmail.com)

In this work the calculation of energy indicators of electromagnetic processes in power switches of boost quasi-resonant pulse converters (QRPC) with parallel and series resonant circuits is performed. The calculations were performed using the operator method and the method of stitching the results of change of transistor switch current and voltage. For each switching interval the analytical expressions were obtained, which allow to estimate the energy losses at each interval, as well as total losses. The findings made it possible to compare two converters with the same parameters of supply, power stage and load depending on the connection of the resonant circuit. References 4, table 1, figures 4.

**Key words:** resonant circuit, quasi-resonant pulse converter, transistor switch

1. *Voitenko V.P.* Algorithm stages of quasi-optimal regulation in system with a pulse converter // Tekhnichna elektrodynamika. – 2012. – No 3. – Pp. 125–126 (Rus.).

2. *Gorodny A.N.* Analyzing of transistor switch dissipation power in sequential type switched-mode and quasi-resonant zero current switch converters // Tekhnichna elektrodynamika. – 2012. – No 3. – Pp. 75–76 (Rus.).

3. *Shydlovskiy A.K., Zharkin A.F., Paziyeiev A.G.* Continuous approximate model of AC/DC converters with active power factor correction // Tekhnichna elektrodynamika. – 2011. – No 6. – Pp. 11–17 (Ukr.).

4. *Denisov Y., Gorodny A., Gordienko V., Yershov R., Stepenko S., Kostyrieva O., Prokhorova A.* Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit // Proceedings of the IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2016), April 19-21, 2016, Kyiv, Ukraine. – 2016. – Pp. 327–332.

Надійшла 22.01.2016  
Остаточний варіант 26.05.2016