

УДК 621.314

С.А. Запольский, Е.В. Загородских, В.Н. Школьный, Ю.А. Шиняков, А.В. Осипов

## Анализ способов реализации мягкого переключения транзисторных ключей повышающего преобразователя для энергосистемы космического аппарата

Рассмотрены варианты реализации непосредственных преобразователей напряжения повышающего типа с мягким переключением ключевых элементов посредством введения активных снабберных цепей, выполнен анализ их работы и проведено сравнение схемотехнических решений. Предложены рекомендации по проектированию непосредственных преобразователей напряжения повышающего типа для систем электропитания космических аппаратов.

**Ключевые слова:** система электропитания, повышающий преобразователь, мягкая коммутация, снабберная цепь, коэффициент полезного действия.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-2-90-93

В зависимости от положения космического аппарата (КА) по отношению к Солнцу электропитание бортовой аппаратуры осуществляется от солнечных (БС) или аккумуляторных (АБ) батарей. В настоящее время сохраняется тенденция, направленная на проектирование и создание систем электропитания (СЭП) с повышенным до 100 В выходным напряжением. Получаемое от указанных источников напряжение должно быть преобразовано до уровня напряжения, соответствующего напряжению бортовой сети. В качестве таких согласующих устройств используются импульсные преобразователи, в частности, широкое распространение получила схема непосредственного преобразователя напряжения повышающего типа (НПН), так как она позволяет реализовать шунтовой регулятор энергии солнечных батарей и обладает малым количеством элементов. В результате напряжение на солнечной батарее ограничивается на уровне, не превышающем напряжение выходной стабилизированной шины 100 В, что исключает появление ряда трудностей проектирования высоковольтных СЭП, связанных со значительным охлаждением панелей БС при нахождении КА в тени Земли [1].

Использование «классической» схемы непосредственного преобразователя напряжения повышающего типа с «жесткой» коммутацией ключевых полупроводниковых элементов не позволяет избежать высокого уровня динамических потерь и электромагнитных помех, поэтому все чаще появляются работы, посвященные разработке преобразователей с мягкой коммутацией ключевых полупроводниковых элементов. Предлагаются десятки различных вариантов реализации мягкой коммутации ключевых элементов на основе пассивных и активных снабберных цепей, из анализа которых следует, что последние обладают наибольшим КПД, хотя и вынуждают разработчиков усложнять систему управления [2–15].

Целью настоящей работы является анализ вариантов реализации НПН с активной снабберной цепью на основе моделирования в среде LTSpice и

разработка рекомендаций по проектированию непосредственных преобразователей напряжения повышающего типа для систем электропитания космических аппаратов.

Ниже рассматриваются два варианта схемотехнического обеспечения режима мягкой коммутации основного транзистора в преобразователях такого типа.

### Схема НПН с мостовой снабберной цепью

Одним из вариантов реализации преобразователя напряжения с мягким переключением является схема НПН с мостовой снабберной цепью, приведенная на рис. 1 [2–5, 10–14].

Непосредственный преобразователь напряжения повышающего типа состоит из дросселя  $L_1$ , транзистора  $VT_1$ , диода  $VD_3$  и конденсатора  $C_3$ . Снабберная цепь состоит из дополнительного ключа  $VT_2$ , дросселя  $L_2$ , конденсатора  $C_2$  и диодов  $VD_1$  и  $VD_2$ . Конденсатор  $C_{\text{пар}}$  – паразитная емкость транзистора  $VT_1$ .

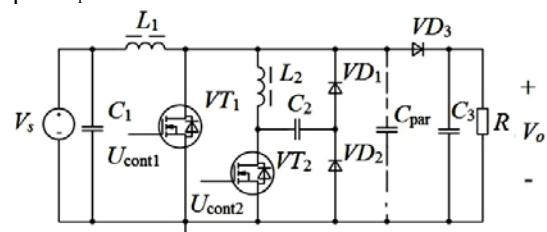


Рис. 1. Схема НПН с мостовой снабберной цепью

На рис. 2 изображены диаграммы работы НПН. В начальный момент времени диод  $VD_3$  открыт и ток протекает через нагрузку  $R$ , тогда:

$$i_{VD3} = I_{L1}, \quad i_{VT1} = i_{VT2} = i_{L2} = 0, \quad u_{C2} = 0, \quad u_{C_{\text{пар}}} = U_{\text{вых}}.$$

При подаче управляющего сигнала на транзистор  $VT_2$  он открывается, а диод  $VD_3$  закрывается. Наличие дросселя  $L_2$  обеспечивает плавное нарастание внешнего тока, протекающего через транзистор  $VT_2$ . Однако наличие паразитной емкости в транзисторе не позволяет полностью устранить динамические потери, так как происходит разряд последней на сопротивление канала транзистора.

В литературе такой вид включения называется «коммутация в нуле тока». Зачастую ее разделяют на два режима: ZCS (zero current switching) и ZCT (zero current transition).

Режим ZCS обеспечивает плавное нарастание тока транзистора, но не устраняет потери полностью, а лишь уменьшает их, что обусловлено разрядом паразитной емкости транзисторного ключа на проводящий канал. Скорость нарастания тока зависит от индуктивности дросселя  $L_2$ .

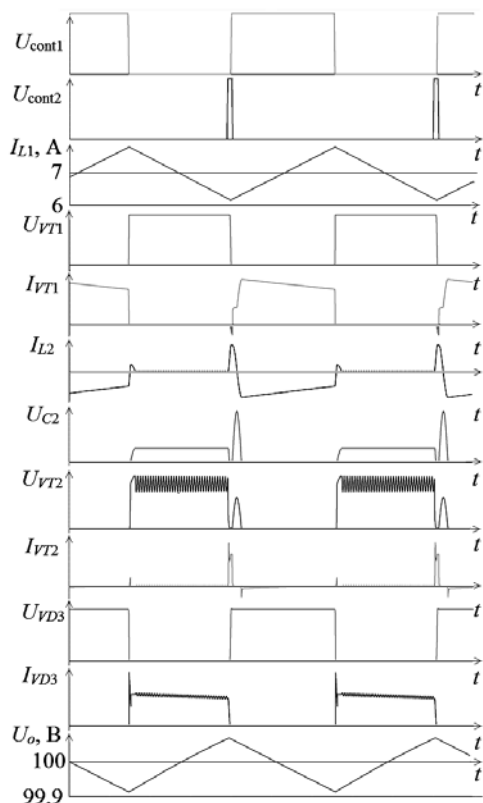


Рис. 2. Диаграммы токов и напряжений НПП с мостовой снабберной цепью:  $U_{cont1}$ ,  $U_{cont2}$  – управляющие импульсы транзисторов  $VT_1$ ,  $VT_2$  соответственно;  $I_{L1}$  – ток дросселя  $L_1$ ;  $U_{VT1}$  – напряжение на транзисторе  $VT_1$ ;  $I_{VT1}$  – ток транзистора  $VT_1$ ;  $I_{L2}$  – ток дросселя  $L_2$ ;  $U_{C2}$  – напряжение на конденсаторе  $C_2$ ;  $U_{VT2}$  – напряжение на транзисторе  $VT_2$ ;  $I_{VT2}$  – ток транзистора  $VT_2$ ;  $U_{VD3}$  – напряжение на диоде  $VD_3$ ;  $I_{VD3}$  – ток диода  $VD_3$ ;  $U_o$  – напряжение на выходе преобразователя

Режим ZCT обеспечивается при включенном обратном диоде и, следовательно, при разряженной паразитной емкости транзистора. То есть во время включения транзистора через него не протекает ток, а значит, потери определяются статическими характеристиками обратного диода.

Также существуют еще два режима: ZVS (zero volt switching) и ZVT (zero volt transition). Условия их обеспечения совпадают с ZCS и ZCT, но в качестве накопителя энергии вместо дросселя выступает конденсатор.

Когда ток дросселя  $L_2$  достигнет уровня тока  $I_{L1}$ , начинается обмен реактивной энергией между дросселем  $L_2$  и паразитной емкостью  $C_{par}$  транзистора

$VT_1$ , последняя будет отдавать накопленную энергию в дроссель. После окончания этого процесса напряжение  $U_{Cpar}$  упадет до нуля, а ток в дросселе  $L_2$  достигнет максимального значения. По окончании этого процесса открывается обратный диод транзистора  $VT_1$ , что позволяет мягко открыть его в режиме ZVT. Хотя транзистор  $VT_1$  открыт, ток через него начнет протекать только после закрытия транзистора  $VT_2$ . Входной ток начинает протекать через  $VT_1$ , а ток транзистора  $VT_2$  будет протекать через диод  $VD_1$ , заряжая конденсатор  $C_2$  до максимального значения.

Энергия, накопленная в дросселе  $L_2$ , полностью переходит в конденсатор  $C_2$ , после чего начинается обратный процесс – передача энергии от конденсатора  $C_2$  в дроссель  $L_2$  по контуру  $C_2$ - $L_2$ - $VT_1$ - $VD_2$ . В результате этого процесса возникает колебательный процесс, который определяет максимальный ток транзистора  $VT_1$ .

Максимальное значение тока  $I_{VT1max}$  будет иметь место в транзисторе в течение всего дальнейшего открытого состояния транзистора, и при больших значениях  $\gamma$  на нем будут выделяться значительные статические потери.

После закрытия транзистора  $VT_1$  его паразитная емкость  $C_{par}$  заряжается суммой входного тока  $I_{L1}$  и тока дросселя  $I_{L2}$ . Процесс заряда конденсатора  $C_{par}$  происходит значительно быстрее разряда, так как ток заряда конденсатора почти на порядок больше, при этом ток дросселя  $L_2$  практически не уменьшается.

По окончании заряда паразитного конденсатора  $C_{par}$  начнется передача энергии входного источника и энергии накопленной в дросселе  $L_2$ , в нагрузку через основной диод  $VD_3$ . После чего коммутационные процессы заканчиваются, и цикл повторяется в соответствии с частотой преобразования.

В результате анализа процессов, протекающих в схеме НПП с мостовой снабберной цепью, можно выделить ряд существенных недостатков:

- малое время задержки при выключении основного транзистора, следовательно, необходимо выбирать транзисторы с малыми временами восстановления;

- во время открытого состояния транзистора  $VT_1$  и закрытого состояния транзистора  $VT_2$  ток протекает через обратный диод последнего и образуется дополнительный контур  $VT_2$ (body-VD)- $L_2$ - $VT_1$ , это приводит к удвоению протекающего через  $VT_1$  тока и, следовательно, к росту статических потерь.

#### Схема НПП с коммутацией в режиме ZVT-ZVS

Еще один вариант реализации НПП с мягким переключением, который может быть использован для построения СЭП КА, представлен на рис. 3 [2, 7–9].

Здесь непосредственный преобразователь напряжения повышающего типа включает дроссель  $L_1$ , транзистор  $VT_1$ , диод  $VD_3$  и конденсатор  $C_3$ . Снабберная цепь состоит из дополнительного ключа  $VT_2$ , дросселя  $L_2$ , конденсатора  $C_2$  и диодов  $VD_1$ ,  $VD_2$

и  $VD_4$ . Конденсатор  $C_{\text{par}}$  – паразитная емкость транзистора  $VT_1$ .

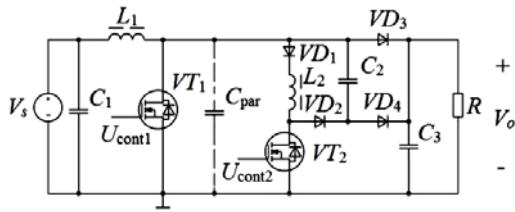


Рис. 3. Схема НПП с коммутацией в режиме ZVT-ZVS

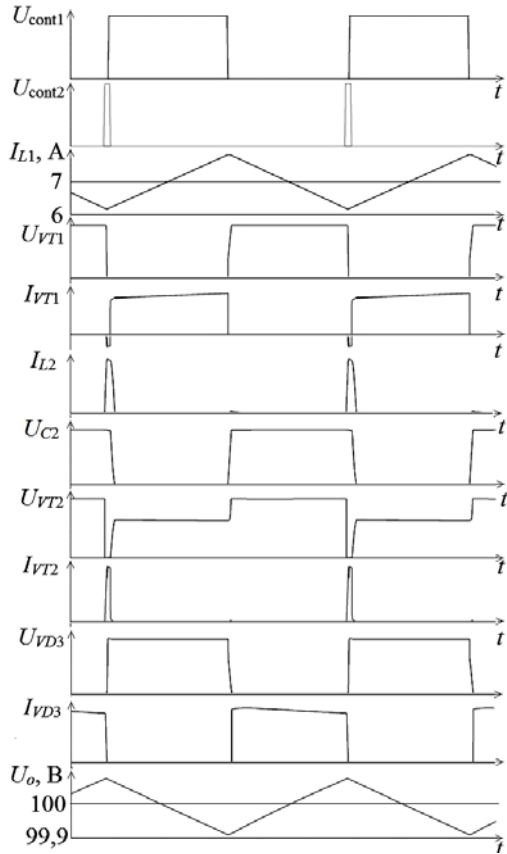


Рис. 4. Диаграммы токов и напряжений НПП с коммутацией в режиме ZVT-ZVS:

$U_{\text{cont1}}$ ,  $U_{\text{cont2}}$  – управляющие импульсы транзисторов  $VT_1$ ,  $VT_2$  соответственно;  $I_{L1}$  – ток дросселя  $L_1$ ;  $U_{VT1}$  – напряжение на транзисторе  $VT_1$ ;  $I_{VT1}$  – ток транзистора  $VT_1$ ;  $I_{L2}$  – ток дросселя  $L_2$ ;  $U_{C2}$  – напряжение на конденсаторе  $C_2$ ;  $U_{VT2}$  – напряжение на транзисторе  $VT_2$ ;  $I_{VT2}$  – ток транзистора  $VT_2$ ;  $U_{VD3}$  – напряжение на диоде  $VD_3$ ;  $I_{VD3}$  – ток диода  $VD_3$ ;  $U_o$  – напряжение на выходе преобразователя

Процессы, протекающие в данной схеме, рассмотрены в [7, 8]. В начальный момент времени ток протекает через диод  $VD_3$ , а цепь мягкой коммутации не активна. Диаграммы работы схемы представлены на рис. 4.

После включения транзистора  $VT_2$  ток через дроссель  $L_2$  начинает нарастать до тех пор, пока не станет равным входному току. После чего энергия, запасенная в конденсаторе  $C_{\text{par}}$ , передается в дроссель  $L_2$ , что вызывает в нем небольшое возрастание тока. Вследствие разницы между током дросселя  $I_{L2\text{max}}$  и током  $I_{L1}$  откроется встречно-параллельный диод транзистора  $VT_1$ . В момент открытого состоя-

ния этого диода открывается транзистор  $VT_1$ , но в это время через него не протекает ток. После закрытия транзистора  $VT_2$ , весь входной ток начнет протекать через транзистор  $VT_1$ , а дроссель  $L_2$  будет передавать накопленную энергию в конденсатор  $C_2$ . К моменту закрытия транзистора  $VT_2$  дроссель  $L_2$  передаст необходимое для заряда до выходного напряжения количество энергии в конденсатор  $C_2$ . Дальнейший сброс энергии с дросселя приводит к открытию диода  $VD_4$ , через который в нагрузку начнет протекать часть входного тока. Этот процесс будет продолжаться до полного сброса энергии с дросселя  $L_2$ . Далее диод  $VD_4$  закроется, весь входной ток будет пропускать транзистор  $VT_1$ . После его выключения начнутся два параллельных процесса: разряд конденсатора  $C_2$  и заряд конденсатора  $C_{\text{par}}$  входным током. Входной ток разделяется на две ветви и протекает по двум контурам. После окончания этих процессов диод  $VD_4$  закрывается и открывается диод  $VD_3$ . Далее процессы повторяются.

В результате анализа процессов, протекающих в рассмотренной схеме, можно сделать ряд выводов:

- практически на всем этапе работы основного ключа реактивная энергия запасена в конденсаторе  $C_2$  и не требует дополнительных контуров протекания тока, что не вызывает дополнительных статических потерь;

- наличие возможности сбросить часть энергии дросселя  $L_2$  в нагрузку во время работы основного транзистора не позволяет конденсатору  $C_2$  зарядиться выше уровня выходного напряжения;

- заряд паразитной емкости происходит током гораздо меньше входного, что позволяет мягко выключать основной транзистор в нуле напряжения ZVS.

#### Заключение

Схемы со снабберными цепями для осуществления мягкой коммутации транзисторов имеют определенные особенности. В первую очередь, это необходимость осуществления таких процессов в схеме, как сброс энергии с дополнительного дросселя и перезаряд дополнительного конденсатора. Эти процессы требуют определенного времени, что ограничивает возможности работы схемы по минимальному/максимальному времени открытого состояния транзистора.

Сброс энергии с паразитной емкости основного транзистора происходит до его открытия, что предотвращает потери мощности на включение. Однако для дополнительного транзистора нет возможности сброса энергии до включения, его паразитная емкость разряжается на собственный проводящий канал.

При введении в НПП снабберной цепи, содержащей дополнительный транзистор, необходимо учитывать задержку на его переключение, чтобы обеспечить его коммутацию в режиме ZCS. Следовательно, время переходных процессов в схеме обуславливается необходимостью поочередного переключения двух транзисторов в мягком режиме.

В зависимости от необходимости работать на больших или малых  $\gamma$  частотные возможности схе-

мы с одной и той же снабберной цепью разные. Соответственно, при использовании разных снабберных цепей они тоже различаются. С точки зрения энергетических характеристик снабберные цепи, в которых реактивная энергия запасается в конденсаторе, а не в дросселе, обладают лучшими показателями, так как они не требуют создания дополнительных контуров.

Ввиду необходимости передачи энергии от солнечной батареи в нагрузку на всем диапазоне открытого состояния силового ключа применение снабберных цепей при больших и малых  $\gamma$  может привести к большим броскам тока в схеме, так как реактивные элементы снабберной цепи не будут успевать сбрасывать энергию и возвращаться в исходное состояние. В этом случае не рекомендуется открывать дополнительный транзистор на момент малого (большого) значения  $\gamma$ .

Работа выполнена в рамках реализации Постановления Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218, и договора между АО «ИСС» и Минобрнауки РФ от 01.12.2015 г. № 02.G25.31.0182.

#### Литература

1. Соустин Б.П. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчур, А.И. Чернышев, Ш.Н. Исляев. – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская изд. фирма, 1994. – 318 с.
2. An Overview to Soft-Switching Boost Converters for Fotovoltaic / B. Abdi, A. Safaei, J.S. Moghani, H. Askarian Abyaneh // International Journal of Computer and Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 5, No. 1 – P. 18–21.
3. Umadevi K. A PV Based High Boost Step-Up DC-DC Converter / K. Umadevi, S. Sankarananth, R. Arun Kumar // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2015. – Vol. 4, No. 2. – P. 197–210.
4. Kumar R. A New Soft Switching ZCS and ZVS High Frequency Boost Converter with an HI-Bridge Auxiliary Resonant Circuit to Drive a BLDC Motor // International Journal of Scientific and Research Publications. – 2014. – Vol. 4. – P. 1–5.
5. Abhijith A.R. ZVS Boost converter with an Auxiliary Resonant Circuit / A.R. Abhijith, R.P. George John, K.J. Joseph // International Journal of Engineering Research and General Science. – 2015. – Vol. 3. – P. 1072–1078.
6. Мелешин В.И. Управление транзисторными преобразователями электроэнергетики / В.И. Мелешин, Д.А. Овчинников. – М.: Техносфера, 2011. – 576 с.
7. Bodur H. A new ZVT-ZCT-PWM DC-DC converter / H. Bodur, A.F. Bakan // IEEE Trans. Power Electron. – 2004. – Vol. 19, No. 3. – P. 676–684.
8. Bodur H. A new ZVT-ZCT-PWM DC-DC converter / H. Bodur, A.F. Bakan // IEEE Trans. Power Electron. – 2010. – Vol. 25, No. 8. – P. 2093–2105.
9. Altintas N. A Novel ZVT-ZCT-PWM Boost Converter / N. Altintas, A. Faruk Bakan, I. Aksoy // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2014. – Vol. 29, No. 1. – P. 256–265.
10. Kumar R. A New Soft Switching ZCS and ZVS High Frequency Boost Converter with an HI-Bridge Auxiliary Resonant Circuit to Drive a BLDC Motor // International

Journal of Scientific and Research Publications. – 2014. – Vol. 4, No. 7. – P. 1–5.

11. Tomaszuk A. High Efficiency High Step-up DC/DC Converters a Review / A. Tomaszuk, A. Krupa // Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. – 2011. – Vol. 59, No. 4. – P. 475–483.

12. 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, No. 4. – P. 108–110.

13. High Frequency Boost Converter Employing Soft Switching Auxiliary Resonant Circuit / G. Naresh Goud, Y.L. Deepa, G.D. Babu, P. Rajasekhnar, N. Gangadher // International Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2012. – Vol. 1, No. 4. – P. 19–24.

14. Prakash J. Design of Soft Switching Interleaved Boost Converter for Photovoltaic Application / J. Prakash, S.K. Sahoo // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2015. – Vol. 9, No. 4. – P. 296–308.

#### Запольский Сергей Александрович

Инженер научного исследовательского института космических технологий (НИИ КТ) ТУСУРА  
Тел.: +7 (382-2) 90-01-83  
Эл. почта: sergeyzap-kz@mail.ru

#### Загородских Евгений Вячеславович

Мл. науч. сотрудник НИИ КТ,  
аспирант каф. промышленной электроники ТУСУРА  
Тел.: +7 (382-2) 90-01-83  
Эл. почта: eugenetic@yandex.ru

#### Школьный Вадим Николаевич

Гл. конструктор проектирования и испытаний РЭА  
АО «Информационные спутниковые системы»  
им. акад. М.Ф. Решетнева», г. Железногорск  
Тел.: +7 (391-9) 72-09-4

#### Шиняков Юрий Александрович

Д-р техн. наук, директор НИИ КТ ТУСУРА  
Тел.: +7 (382-2) 90-01-83  
Эл. почта: shua@main.tusur.ru

#### Осипов Александр Владимирович

Канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник НИИ КТ ТУСУРА  
Тел.: +7 (382-2) 90-01-83  
Эл. почта: ossan@mail.ru

Zapolskiy S.A., Zagorodskikh E.V., Shkolnyi V.N.,  
Shiniykov Yu.A., Osipov A.V.

#### Analysis of soft-switching boost-converters for the spacecraft power system

The paper outlines the ways to realize soft-switching boost-converters by means of connection of active snubbers. The operation analysis and comparison of the possible decisions were made. Recommendations to design boost-converters for the spacecraft power system were given.

**Keywords:** power system, boost-converter, soft-switching, snubber, coefficient efficiency.