

УДК 621.396.41

С.А. Запольский, В.Н. Школьный, Ю.А. Шиняков

## Анализ способов обеспечения мягкого переключения транзисторов повышающего преобразователя в системах электропитания космических аппаратов

Рассмотрены варианты реализации непосредственных преобразователей напряжения повышающего типа с мягким переключением ключевых элементов, проведено сравнение схемотехнических решений. Показаны преимущества реализации «мягкого» включения транзисторов за счет пассивных цепей в двухфазных схемах преобразователей.

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

**doi:** 10.21293/1818-0442-2017-20-2-116-119

Системы электропитания космических аппаратов (СЭП КА) представляют собой сложный комплекс, решающий задачу обеспечения потребителей электроэнергией необходимого качества. Наиболее часто качество электроэнергии определяется уровнем напряжения на шине питания нагрузки, его отклонением в статическом и динамическом режимах. В настоящее время в качестве силовой части устройства, преобразующего энергию от источников питания – солнечной батареи (БС) и аккумуляторной батареи (АБ), в СЭП КА преимущественно применяются непосредственные преобразователи напряжения (НПН) с широтно-импульсным регулированием. Данный класс преобразователей характеризуется жесткой коммутацией транзисторных ключей, что сопровождается высоким уровнем динамических потерь и электромагнитных помех [1]. Задача увеличения КПД является одной из основополагающих при разработке источников питания, поэтому снижение динамических потерь на ключевых полупроводниковых элементах является актуальной задачей для разработчиков СЭП КА.

Одним из способов обеспечения мягкой коммутации транзисторов является построение преобразователей с резонансным переключением, что реализуется путем включения в цепь дополнительных снабберных цепей. Анализ способов построения повышающего преобразователя с «мягким» переключением произведен применительно к преобразователю энергии БС, имеющему широкий диапазон регулирования, что и является основной целью данной работы.

### Схема повышающего резонансного НПН с импульсным параллельным подключением резонансного контура

Одним из способов достижения мягкого переключения транзисторов в схеме повышающего НПН может быть импульсное подключение резонансного контура параллельно силовому транзистору или диоду с помощью дополнительного транзистора [2–4]. Схема НПН такого типа представлена на рис. 1.

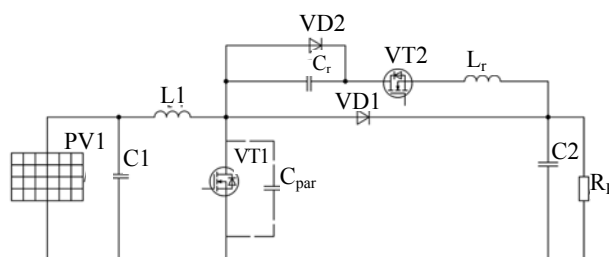


Рис. 1. Схема резонансного НПН повышающего типа, построенная на основе подключения резонансного контура параллельно диоду

Транзистор VT2 в данной схеме выполняет функции дополнительного силового ключа, подключающего резонансный контур в моменты, предшествующие отпиранию основного транзистора VT1. Диод VD2 обеспечивает контур протекания тока дополнительного дросселя  $L_r$ , когда резонансный конденсатор  $C_r$  разряжен, тем самым ограничивая уровень напряжения на полупроводниковых элементах снабберной цепи.

Открытие транзистора VT2 происходит при отсутствии тока в резонансном дросселе  $L_r$  ( $I_{L_r} = 0$ ), через который ток не может нарасти мгновенно. Данный процесс обеспечивает включение транзистора VT2 в нуле тока, динамические потери на включение которого будут определяться преимущественно разрядом собственной паразитной емкости. Открытие основного транзистора VT1 происходит после разряда его паразитной емкости в момент протекания тока по обратному диоду, что исключает динамические потери на включение. Включение транзистора VT2 происходит также в момент проводящего состояния обратного диода [4].

Несмотря на жесткое выключение основного транзистора VT1, данный способ реализации резонансного переключения транзисторов преобразователя позволяет реализовать выключение в нуле напряжения путем установки дополнительного конденсатора параллельно транзистору [4].

Одна из важных особенностей схемы – удвоенное выходное напряжение, прикладываемое к транзистору и диоду снабберной цепи [4], что серьезно

усложняет выбор полупроводниковых элементов, ограниченный радиационно стойкими компонентами. Включение коммутирующего конденсатора параллельно основному транзистору приводит к увеличению запаса энергии в реактивных элементах схемы, которую необходимо перераспределять на каждом периоде. Необходимость в дополнительных интервалах времени на краях диапазона регулирования для восстановления начальных свойств снабберной цепи делает эту схему неэффективной для преобразования энергии БС [5].

#### Схема НПП повышающего типа с мостовой снабберной цепью

Другим известным вариантом обеспечения мягкой коммутации транзисторов НПП повышающего типа является схема с мостовой снабберной цепью, представленная на рис. 2 [5].

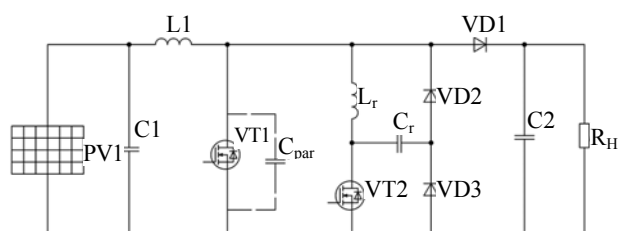


Рис. 2. Схема НПП повышающего типа с мостовой снабберной цепью

В данной схеме происходит предварительное включение дополнительного транзистора VT2, фронт тока которого ограничивается коммутационным дросселем  $L_r$ . Открытие основного транзистора происходит после передачи энергии от его паразитной емкости  $C_{\text{пар}}$  дросселю  $L_r$  в момент открытого состояния обратного диода. Дополнительный транзистор VT2 выключается ZVS (zero volt switching) за счет нарастания фронта напряжения на конденсаторе  $C_r$ . Выключение основного транзистора происходит в жестком режиме [5].

Несмотря на жесткое выключение основного транзистора VT1, данная схема имеет свои преимущества. Максимальный уровень напряжения на полупроводниковых элементах не превышает выходного напряжения. Однако жесткое выключение основного транзистора не единственный недостаток. В момент работы основного транзистора часть энергии запасена в коммутационном дросселе  $L_r$ , что приводит к образованию дополнительного контура протекания тока, а также существенному увеличению тока основного транзистора, следствием чего является рост статических потерь на данном интервале работы преобразователя [5].

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

Другой вариант, позволяющий реализовать мягкое переключение транзисторов канала преобразования энергии от БС, – схема НПП повышающего типа с коммутацией в режиме ZVT-ZVS (zero volt transition – zero volt switching) представленная на рис. 3 [5].

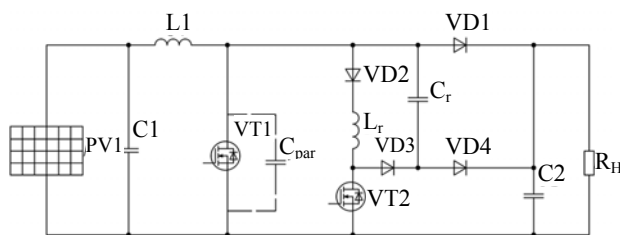


Рис. 3. Схема НПП повышающего типа с коммутацией в режиме ZVT-ZVS

Коммутационные процессы в данной схеме имеют ту же природу, что и в схеме НПП повышающего типа с мостовой снабберной цепью, кроме процесса выключения основного транзистора VT1. Особенность построения снабберной цепи в этой схеме позволяет осуществить выключение при нуле напряжения основного транзистора за счет процесса разряда емкости  $C_r$ , протекающего параллельно процессу заряда паразитной емкости основного силового ключа  $C_{\text{пар}}$  [5].

В схеме НПП повышающего типа с коммутацией в режиме ZVT-ZVS решены проблемы, связанные с запасанием энергии в коммутационном дросселе  $L_r$  на длительный интервал времени, что позволяет избежать серьезного увеличения статических потерь. Однако данное схемотехническое решение предполагает использование четырех дополнительных полупроводниковых элементов: одного транзистора и трех диодов, имеющих свои времена задержки и токи обратного восстановления, что увеличивает интервал времени на краях диапазона регулирования, также необходимо учитывать статические потери на дополнительных элементах, которые будут вносить существенный вклад на высоких частотах преобразования.

#### Схема НПП повышающего типа с «мягким» включением за счет поочередной работы транзисторов с коммутационными дросселями

В схемах НПП повышающего типа с активными снабберами не удастся реализовать включение всех транзисторов при нулевом напряжении (предварительно разряженной паразитной емкости), кроме того, НПП со снабберной цепью имеет ограниченный диапазон регулирования, включение дополнительных полупроводниковых элементов увеличивает массу и серьезно усложняет систему управления преобразователем [5]. Поэтому разработка схемы НПП, позволяющей реализовать «квазимальную» коммутацию без дополнительных активных ключей, сохраняет актуальность. Один из вариантов реализации этого подхода представлен на рис. 4, а [6].

В этой схеме включение транзисторов происходит при нулевом токе, что достигается за счет индуктивности рассеяния магнитосвязанного дросселя, ограничивающей скорость роста тока.

Для упрощения описания коммутационных процессов магнитосвязанный дроссель может быть представлен тремя независимыми индуктивностями (рис. 4, б) [6].

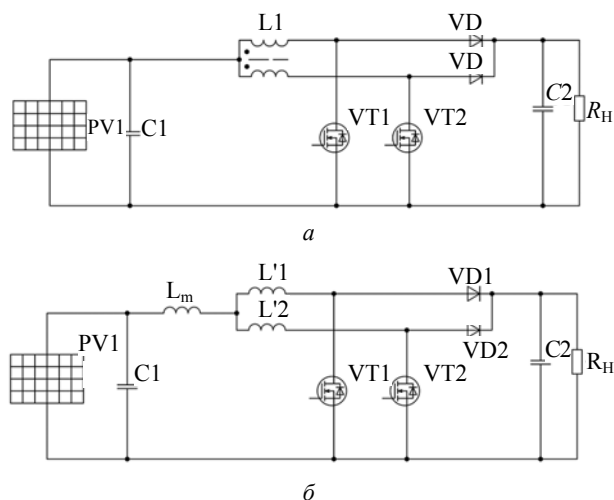


Рис. 4. Схема чередующегося НПП повышающего типа:  
а – с магнитосвязанным дросселем;  
б – с тремя независимыми индуктивностями

Транзисторы преобразователя работают в противофазе с одинаковым коэффициентом заполнения  $\gamma$ , который в данной схеме не может превышать 0,5. Включение в нуле тока ZCS (zero current switching) каждого из транзисторов обеспечивается индуктивностями  $L'_1$ ,  $L'_2$ . В момент проводящего состояния диода VD1 открывается транзистор VT2, паразитная емкость которого разряжается на собственный проводящий канал. Скорость нарастания внешнего тока ограничивается индуктивностью  $L'_2$ . Ток обратного восстановления диода ограничен индуктивностью  $L'_1$ . Выключение обоих транзисторов происходит в жестком режиме.

Несмотря на жесткое выключение транзисторов, их включение осуществляется в нуле тока. Отсутствие резонансных конденсаторов позволяет осуществлять преобразование энергии от БС в полном диапазоне изменения  $\gamma$ . В схеме нет дополнительных контуров протекания тока, которые способны существенно увеличить статические потери в преобразователе.

#### Схема двухфазного повышающего преобразователя с мягкой коммутацией транзисторов

Другая двухфазная схема повышающего преобразователя, позволяющая реализовать мягкую коммутацию транзисторов, приведена на рис. 5 [7].

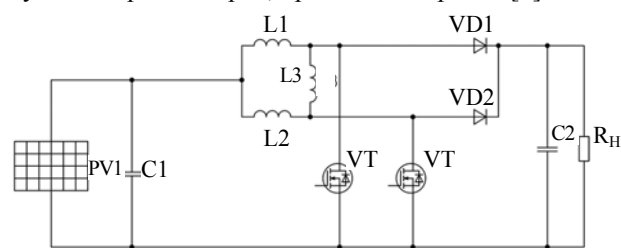


Рис. 5. Схема двухфазного повышающего преобразователя с мягкой коммутацией транзисторов

Преимуществом данной схемы является возможность реализации ZVT включения транзисторов,

если в установившемся режиме работы преобразователя между моментами переключения транзисторов VT2 и VT1 ввести регулируемую паузу, минимальное значение которой фиксировано. Применение частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) позволяет сохранять ZVT-коммутацию при включении транзисторов в широком диапазоне изменения нагрузки. Схема имеет только один дополнительный элемент – коммутирующий дроссель  $L_3$ , индуктивность которого работает в режиме переменных токов [7].

#### Заключение

При выборе снабберной цепи необходимо учитывать специфику коммутационных процессов в повышающих преобразователях с резонансным переключением, которые оказывают влияние на выбор элементной базы и массу преобразователя.

Например, схемы с завышенным максимальным значением напряжения на полупроводниковых элементах не могут быть рекомендованы к применению до появления высоковольтных радиационно стойких транзисторов с малыми временами задержки на переключение, относительно небольшими паразитными емкостями и малым сопротивлением канала сток-исток.

Увеличение количества полупроводниковых элементов в НПП повышающего типа, а также усложнение системы управления такими преобразователями приводят к увеличению площади, занимаемой элементами, что вызывает увеличение массы устройства. Компромиссным вариантом, позволяющим реализовать квазимальное переключение без дополнительных элементов и усложнения системы управления, являются двухфазные схемы повышающего НПП, позволяющие реализовать мягкое включение. Кроме того, такие схемы могут применяться в устройствах, в которых диапазон регулирования выходного напряжения не должен иметь ограничений.

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. Михальченко Г.Я. Научно-технические проблемы электропитания / Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, А.Н. Четин // Труды Всерос. науч.-техн. конф. – М.: ЗАО «ММП-Ирбис», 2011. – С. 21–27.
2. Hua G. Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters / G. Hua, C.S. Leu, F.C. Lee // Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf. – 1992. – P. 55–61.
3. Muhammad H. Rashid Power Electronics Handbook. – London: Academic Press, 2001. – 895 p.
4. Borodin D.B. Direct Boost Converter with Zero Voltage Transition and PWM Control (ZVT-PWM) / D.B. Borodin, V.A. Kabirov, N.P. Vintonyak et al. // International Scientific-Technical Conference APEIE. – 2016. – Vol. 10, No. 1. – 1496 p.
5. Запольский С.А. Анализ способов реализации мягкого переключения транзисторных ключей повышающих

щего преобразователя для энергосистемы космического аппарата / С.А. Запольский, Е.В. Загородских, В.Н. Школьный и др. // Доклады ТУСУРа. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 90–93.

6. Lee P.W. Steady-State Analysis of an Interleaved Boost Converter with Coupled Inductors / P.W. Lee, Y.S. Lee, D.K.W. Cheng, X.C. Liu // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2000. – Vol. 47, No. 4. – P. 787–795.

7. Диксон Р.К. Двухфазный повышающий преобразователь с мягкой коммутацией транзисторов и особенности его динамических свойств / Р.К. Диксон, Ю.Н. Дементьев, Г.Я. Михальченко и др. // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2014. – Т. 324, № 4. – С. 96–101.

---

**Запольский Сергей Александрович**

Мл. науч. сотрудник исследовательского института космических технологий (НИИ КТ) ТУСУРа, аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании ТУСУРа  
Тел.: +7 (382-2) 90-01-83  
Эл. почта: sergeyap-kz@mail.ru

**Школьный Вадим Николаевич**

Гл. конструктор проектирования и испытаний РЭА АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва», Железногорск  
Тел.: +7 (391-9) 72-09-34

**Шиняков Юрий Александрович**

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

Zapolskiy S.A., Shkolnyi V.N., Shiniakov Yu.A.  
**An 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; operation analysis and comparison of the possible decisions were made. The advantages of implementing a soft switching due to passive circuits are shown.

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