

УДК 621.396.41

А.В. Осипов, И.С. Шемолин, В.Н. Школьный, Р.А. Латыпов

Двухнаправленный вольтодобавочный преобразователь с активным выпрямителем для заряда-разряда аккумулятора в системах электропитания

Рассмотрен двухнаправленный вольтодобавочный преобразователь с активным выпрямителем для заряда-разряда аккумулятора систем электропитания космических аппаратов. Показано, что применение активного выпрямителя не только существенно снижает статические потери, но и позволяет реализовать режим заряда аккумуляторной батареи, при этом выпрямитель работает в режиме инвертора тока с жестким включением транзисторов. Кроме того, активный выпрямитель обеспечивает линейность регулировочной характеристики на всех нагрузках до холостого хода за счет возможности рекуперации энергии выходного фильтра. Предложен способ регулирования преобразователем, заключающийся в одновременном отпирании всех транзисторов выпрямителя для получения интервала непосредственного соединения аккумуляторной батареи и выходного фильтра, т.е. замкнутости преобразователя, что обеспечивает минимальные статические потери на этом интервале. Рассмотрены коммутационные процессы, показано, что в вольтодобавочном преобразователе с предложенным управлением в режиме разряда включение транзисторов регулируемой стойки происходит в жестком режиме, а включение остальных транзисторов преобразователя сопровождается предварительным разрядом паразитных емкостей и происходит в режиме ZVS. В инверторе это достигается за счет инерционности тока индуктивности рассеяния трансформатора, а в выпрямителе за счет непрерывности тока сглаживающего дросселя. Разработан макет преобразователя, экспериментально подтвердивший сделанные в работе выводы.

Ключевые слова: система электропитания, вольтодобавочный преобразователь, мягкая коммутация.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-119-126

Аккумуляторная батарея (АБ) является важным звеном любой системы электропитания (СЭП), в том числе космического аппарата, так как формирует постоянное питающее напряжение на теневых участках орбиты, при этом ее заряд обеспечивается на освещенных участках. Силовой преобразователь энергии АБ, как правило, выполняется на основе повышающего непосредственного преобразователя [1–4] с дополнительным каскадом ограничения выходного тока. Увеличение мощности СЭП повышает требования к энергетическим характеристикам преобразователя, основными из которых являются массогабаритные показатели и КПД. В этой связи реализация силового преобразователя с промежуточным высокочастотным звеном [5–11, 14] имеет существенные перспективы из-за высокой удельной мощности таких преобразователей. Кроме того, такие схемы являются двухнаправленными, т.е. обеспечивающими возможность заряда АБ за счет работы активного выпрямителя в режиме инвертора. Анализ работы такого преобразователя в резонансном режиме проведен в [7], однако показано, что обтекание обоих мостов общим током, пропорциональным нагрузке, завышает статические потери. При этом применение кремниевых радиационно стойких транзисторов, имеющих большие значения паразитных емкостей, ограничивает рабочую частоту преобразователя, со снижением которой эффективность от применения резонансной схемы уменьшается, а недостаток, связанный с увеличенными статическими потерями, становится более принципиальным.

Учитывая, что в СЭП космических аппаратов диапазон напряжения АБ изначально согласован с выходным напряжением таким образом, что макси-

мальное значение напряжения АБ близко к выходному, появляется возможность использования вольтодобавочной схемы преобразователя [12]. Вольтодобавочные схемы, преобразующие неполный поток энергии, имеют меньшие статические потери и более высокий КПД. Однако препятствием является необходимость обеспечения режима ограничения тока при перегрузках, что неспособна обеспечить вольтодобавочная схема. В [8] это решается реализацией выпрямителя с нулевой точкой на ключах переменного тока, что ухудшает характеристики преобразователя. Усугубляет ситуацию удвоенное напряжение, прикладываемое к ключам, неизбежное в схеме с нулевой точкой, что заставляет выбирать транзисторы с большим сопротивлением канала.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование энергетических характеристик и коммутационных процессов вольтодобавочного преобразователя в режиме разряда и заряда АБ.

Вольтодобавочный преобразователь в режиме разряда

Классический вольтодобавочный преобразователь (рис. 1) представляет собой инвертор напряжения на транзисторах $VT1-VT4$, выпрямитель на транзисторах $VT5-VT8$ и выходной LC-фильтр. Инвертор и выпрямитель образуют звено промежуточного высокочастотного преобразования части энергии источника, необходимой для формирования требуемого выходного напряжения, которое является суммой входного напряжения и добавленного регулируемого напряжения высокочастотного звена. Дополнительный транзистор VT_d и диод VD_d служат для ограничения тока нагрузки в режиме перегрузки или короткого замыкания.

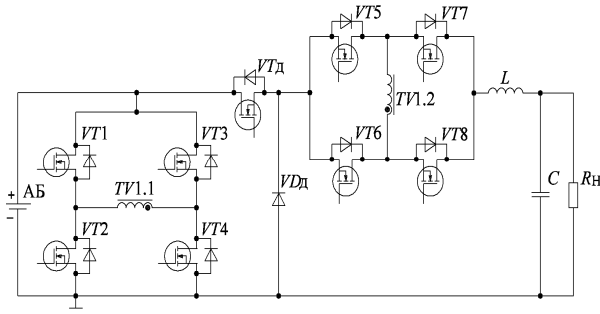


Рис. 1. Вольтодобавочный преобразователь энергии АБ

Регулирование напряжения преобразователя основано на фазовом сдвиге управляющих импульсов транзисторов регулируемой стойки инвертора $VT3, VT4$ относительно нерегулируемой $VT1, VT2$ [3, 5, 8, 9]. Управляющие импульсы транзисторов выпрямителя формируются сложением управляющих импульсов диагоналей инвертора. Реализация такого управления приводит к появлению двух интервалов – вольтодобавки и непосредственного соединения АБ с LC -фильтром (закорачивание преобразователя). Интервал вольтодобавки $t_{ВД}$ ($t_0 - t_1$), образованный отпиранием транзисторов одной из диагоналей инвертора и соответствующей диагонали выпрямителя, характеризуется подачей на вход LC -фильтра напряжения U_{LC} . Интервал закорачивания t_3 ($t_1 - t_2$) формируется отпиранием смежных транзисторов инвертора и всех транзисторов выпрямителя, закорачивающих обмотки трансформатора, напряжение выпрямителя равно нулю, и на вход LC -фильтра подается напряжение U_{AB} . Следует отметить, что на интервале закоротки статические потери существенно меньше, чем на интервале добавки, и определяются сопротивлением открытого канала одного транзистора, что является минимально возможным. Поэтому общие статические потери зависят от напряжения АБ, увеличиваясь по мере увеличения глубины регулирования.

Реализация выпрямителя на активных ключах позволяет сохранить непрерывность тока дросселя и линеаризовать регулировочную характеристику во всем диапазоне изменения выходной мощности, которая отражена следующим соотношением:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{AB}} \cdot \left(1 + \frac{\gamma}{K_{\text{тр}}} \right),$$

или по отношению к напряжению АБ

$$U_{\text{вых}}^*(\gamma) = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{AB}}} = \left(1 + \frac{\gamma}{K_{\text{тр}}} \right).$$

Учитывая, что в СЭП космических аппаратов, как правило, минимальное значение напряжения АБ меньше выходного не более чем в 2 раза, оптимальный коэффициент трансформации близок к $K_{\text{тр}} = 1$. Поэтому зависимость длительности импульсов от напряжения АБ (рис. 2)

$$\gamma(U_{\text{AB}}^*) = \frac{1}{U_{\text{AB}}^*} - 1.$$

Суммарная мощность статических потерь транзисторов пропорциональна относительной длительности импульса γ , в случае постоянной нагрузки относительно мощности потерь одного транзистора $P_{\text{ст.}VT}$ статические потери определяются соотношением

$$P_{\text{ст}}^*(\gamma) = \frac{P_{\text{ст}}}{P_{\text{ст.}VT}} = 3\gamma + 1.$$

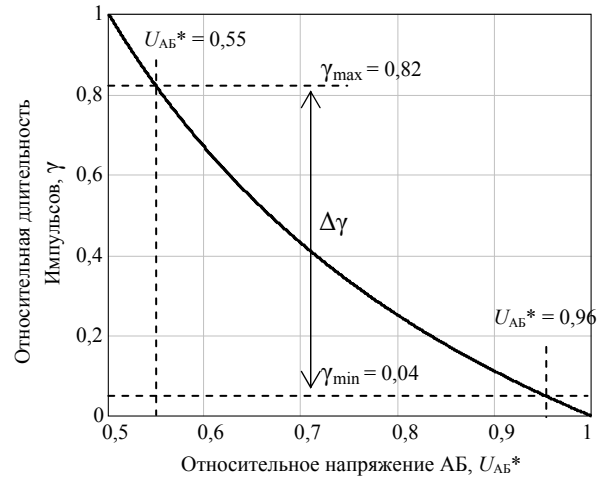


Рис. 2. Зависимость напряжения АБ от длительности импульсов напряжения в относительных единицах

Из приведенной регулировочной характеристики видно, что диапазон регулирования выходного напряжения ограничен, как и у всех вольтодобавочных схем, коэффициентом трансформации, который может быть подобран под требуемый диапазон изменения входного напряжения.

По отношению к непосредственному повышающему преобразователю, активно применяемому в СЭП космических аппаратов, вольтодобавочная схема имеет особенности, одна из которых – расположение сглаживающего дросселя на выходе преобразователя. Это уменьшает емкость выходного фильтра, так как ток конденсатора является переменной составляющей тока сглаживающего дросселя и имеет небольшую пульсацию, в то время как в непосредственном повышающем преобразователе ток конденсатора имеет полную глубину пульсаций. Неполная глубина регулирования, реализуемая в вольтодобавочном преобразователе, позволяет уменьшить амплитуду пульсаций напряжения U_{LC} на входе LC -фильтра, а значит, и пульсации тока дросселя. Это позволяет значительно уменьшить массу элементов LC -фильтра в вольтодобавочном преобразователе по сравнению с топологиями непосредственных преобразователей, имеющих полную глубину регулирования, а соответственно и полную амплитуду пульсаций.

С другой стороны, недостатком преобразователя является большая переменная составляющая потребляемого тока, что может вызвать недопустимый нагрев АБ. Однако даже незначительная входная индуктивность, роль которой может выполнять индуктивность соединения АБ, решает эту проблему.

Проведен анализ коммутационных процессов вольтодобавочного преобразователя, приведены диаграммы токов и напряжений (рис. 3) и контуры протекания тока для каждого интервала (рис. 4).

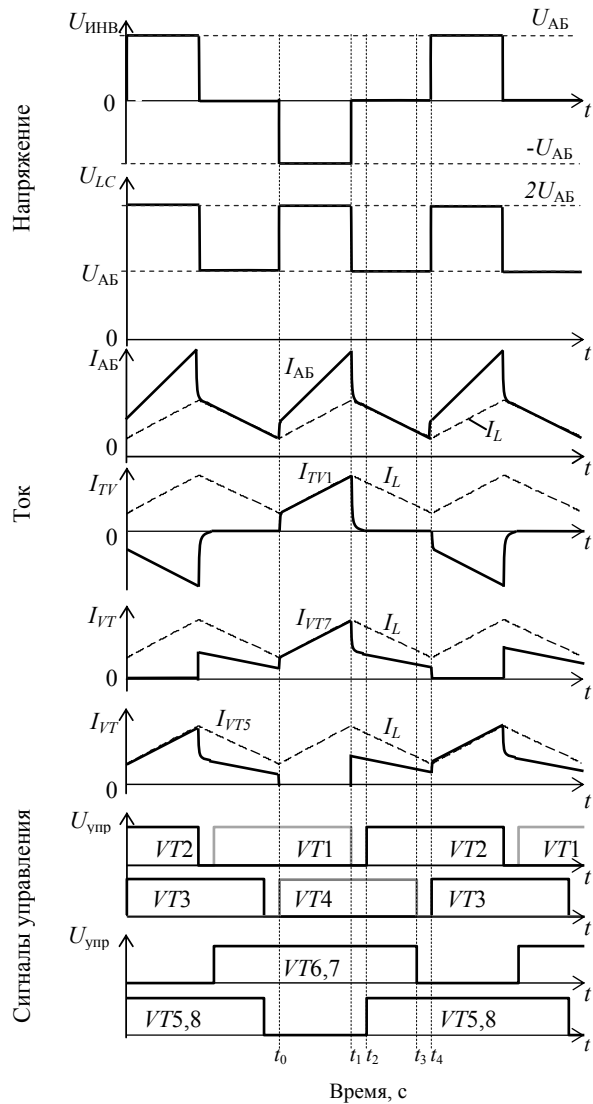


Рис. 3. Диаграммы работы вольтодобавочного преобразователя в режиме разряда АБ

Преобразователь работает следующим образом: на интервале вольтодобавки ($t_0 - t_1$) открыты транзисторы инвертора $VT1, VT4$ и транзисторы выпрямителя $VT6, VT7$, что обеспечивает вольтодобавку к входному напряжению и рост тока сглаживающего дросселя. В момент времени t_1 выключается транзистор $VT1$, что приводит к окончанию интервала вольтодобавки. На интервале паузы ($t_1 - t_2$), за счет наличия паразитной индуктивности рассеяния L_S ток трансформатора продолжает протекать в прежнем направлении и перезаряжает паразитные емкости транзисторов $VT1$ и $VT2$ таким образом, что емкость транзистора $VT2$ разряжается, а емкость транзистора $VT1$ заряжается до напряжения U_{AB} . Затем отпирает обратный диод транзистора $VT2$ и закорачивает первичную обмотку трансформатора.

Одновременно с разрядом паразитной емкости транзистора $VT2$ происходит процесс разряда паразитных емкостей транзисторов выпрямителя $VT5, VT8$. После процесса разряда следует открытие обратных диодов транзисторов.

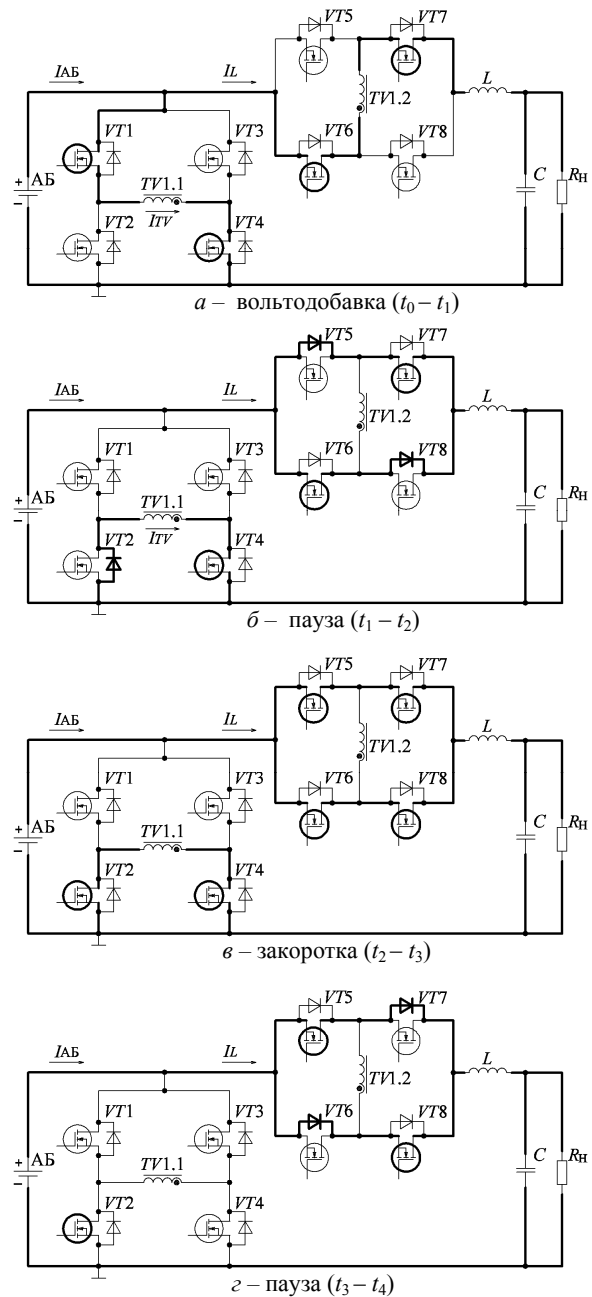


Рис. 4. Контуры протекания тока в режиме разряда АБ

По истечении межкоммутационной паузы в момент времени t_2 происходит включение транзистора нерегулируемой стойки инвертора $VT2$ и транзисторов $VT5, VT8$ выпрямителя. Включение этих транзисторов будет мягким за счет предварительно разряженной паразитной емкости сток-исток. Преобразователь переходит в режим закоротки ($t_2 - t_3$), в котором к дросселю прикладывается обратное напряжение $U_{вых} - U_{AB}$, что обеспечивает уменьшение тока сглаживающего дросселя.

В момент времени t_3 выключаются транзистор VT_4 , а также транзисторы VT_6 , VT_7 . Ток, протекающий по транзисторам VT_6 , VT_7 , шунтируется их обратными диодами, поэтому выключение мягкое. На интервале паузы ($t_3 - t_4$) к дросселю по-прежнему приложено обратное напряжение $U_{\text{вых}} - U_{\text{АБ}}$. Ток дросселя продолжает падать вплоть до начала следующего интервала вольтодобавки. Первичная обмотка трансформатора также закорочена. Таким образом, на интервалах паузы так же, как и на интервале закоротки происходит непосредственное соединение АБ с LC-фильтром.

По истечении межкоммутационной паузы в момент времени t_4 происходит включение транзистора регулируемой стойки инвертора VT_3 , которое произойдет жестко. Включение приводит к появлению нарастающего тока в трансформаторе, уменьшению тока в обратных диодах выпрямителя и переходу в интервал вольтодобавки. Далее процессы повторяются.

Таким образом, в вольтодобавочном преобразователе с описанным управлением в режиме разряда включение транзисторов регулируемой стойки VT_3 , VT_4 происходит жестко, а включение остальных транзисторов преобразователя сопровождается предварительным разрядом паразитных емкостей и происходит мягко. В инверторе это достигается за счет инерционности тока индуктивности рассеяния трансформатора, а в выпрямителе – за счет непрерывности тока сглаживающего дросселя.

Вольтодобавочный преобразователь в режиме заряда АБ

При избытке солнечной энергии вольтодобавочный преобразователь за счет реализации выпрямителя на активных ключах может работать в режиме инвертора тока, что позволяет реализовать заряд АБ. В этом случае ток дросселя меняет направление, а инвертор выполняет функцию выпрямителя [13].

Инвертор тока осуществляет преобразование тока дросселя в переменный с широтно-импульсным регулированием. При этом, как и в случае разряда, интервал закорачивания образуется фазовым сдвигом управляющих импульсов транзисторов регулируемой стойки выпрямителя VT_3 , VT_4 относительно нерегулируемой VT_1 , VT_2 , а управляющие импульсы транзисторов инвертора тока формируются сложением управляющих импульсов диагоналей выпрямителя. Соответственно, это приводит к появлению двух интервалов – интервала токовой добавки ($t_{\text{ТД}}$), при котором ток АБ является суммой тока дросселя и тока выпрямителя, и интервала закорачивания инвертора тока, в этом случае ток АБ равен току дросселя.

Коммутационные процессы в преобразователе в режиме заряда и разряда во многом похожи. Из диаграмм работы преобразователя в режиме заряда (рис. 5) видно, что на интервале токовой добавки ток заряда АБ является суммой тока дросселя L и тока трансформатора TV_1 . Таким образом, на интер-

вале токовой добавки, при $K_{\text{тр}} = 1$ зарядный ток является удвоенным током дросселя, а на интервале закоротки ток заряда равен току дросселя. Контуры протекания тока для каждого интервала показаны на рис. 6. На интервале закоротки ($t_0 - t_1$) открыты нижние транзисторы инвертора VT_2 , VT_4 и все транзисторы выпрямителя. К дросселю прикладывается напряжение $U_{\text{вых}} - U_{\text{АБ}}$, что обеспечивает рост зарядного тока. Первичная обмотка трансформатора при этом закорочена открытыми транзисторами инвертора и не участвует в обмене энергией между АБ и выходной шиной. На данном интервале ток дросселя является зарядным током АБ. В момент времени t_1 , выключаются транзистор инвертора VT_4 и транзисторы выпрямителя VT_6 , VT_7 . Это приводит к коммутационным перегрузкам из-за последовательного включения дросселя и индуктивности рассеяния трансформатора, имеющих разные значения токов. Следовательно, в момент коммутации на закрывшихся транзисторах VT_6 , VT_7 возникает перенапряжение, поэтому в такой схеме рекомендовано уменьшение индуктивности рассеяния трансформатора или применение демпфирующих цепей.

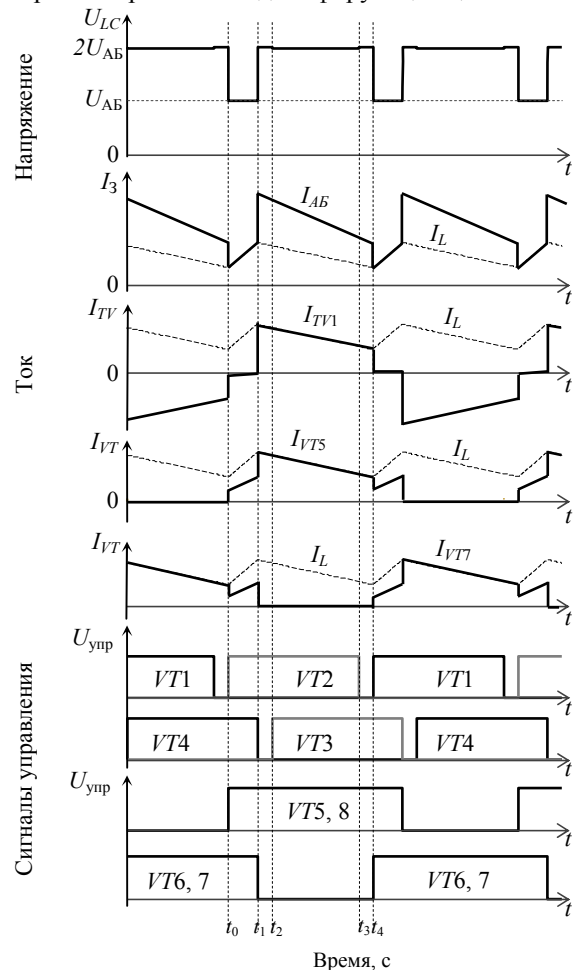


Рис. 5. Диаграммы работы вольтодобавочного преобразователя в режиме заряда АБ

На интервале паузы ($t_1 - t_2$) ток дросселя начинает протекать через трансформатор, разряжая ем-

кость сток-исток и отпирая обратный диод транзистора VT3, что обеспечивает его последующее мягкое включение. С данного момента времени трансформатор TV1 начинает передавать ток в АБ, который складывается с током дросселя, к дросселю прикладывается разность напряжений $2U_{AB} - U_{вых}$, которая обеспечивает уменьшение его тока. В момент времени t_2 мягко включается транзистор VT3, шунтирующий уже открытый диод. В момент времени t_3 транзистор VT2 мягко выключается, так как его ток шунтируется обратным диодом и продолжает протекать в прежнем направлении на интервале паузы ($t_3 - t_4$).

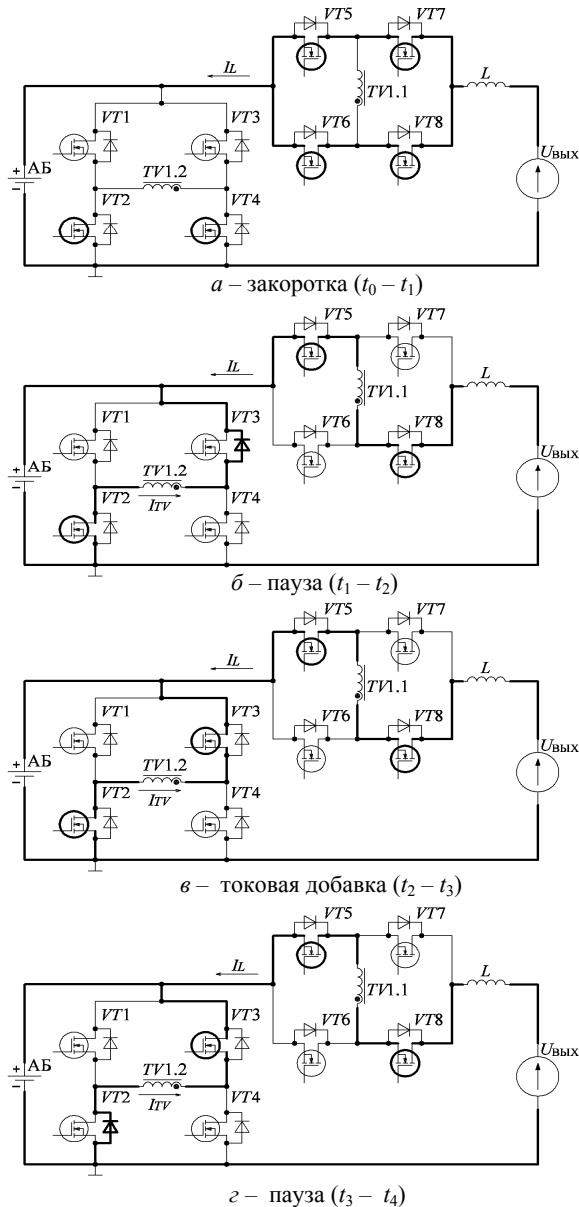


Рис. 6. Контур протекания тока в режиме заряда АБ

В момент времени t_4 , происходит жесткое включение транзисторов выпрямителя VT6, VT7 и инвертора VT1, через который закорачивается первичная обмотка трансформатора. К дросселю вновь прикладывается напряжение $U_{вых} - U_{AB}$, обеспечи-

вая рост зарядного тока. Далее процессы повторятся в другой полярности.

Таким образом, коммутация транзисторов выпрямителя жесткая, а в инверторе жестко коммутируются только транзисторы нерегулируемой стойки.

Экспериментальные результаты

Для экспериментальной проверки полученных результатов был спроектирован макет исследуемого вольтодобавочного преобразователя, состоящего из мостовых преобразователей на транзисторах IRFP4868, трансформатора с коэффициентом трансформации $K_{тр} = 1$, выполненного на магнитопроводе ELP 38/8/25 (феррит № 87). Дроссель индуктивностью $L = 20$ мкГн на магнитопроводе E32/6/20 с зазором $g = 0,5$ мм (феррит № 87) и выходной конденсатор, состоящий из 5 конденсаторов K73-11-160В – 5,6 мкФ с общей емкостью $C = 28$ мкФ. Работа преобразователя проиллюстрирована осциллограммами тока дросселя, тока трансформатора, напряжений на транзисторах при стабилизации выходного напряжения $U_{вых} = 100$ В на нагрузке $R_n = 12$ Ом для различных интервалов вольтодобавки (рис. 7).

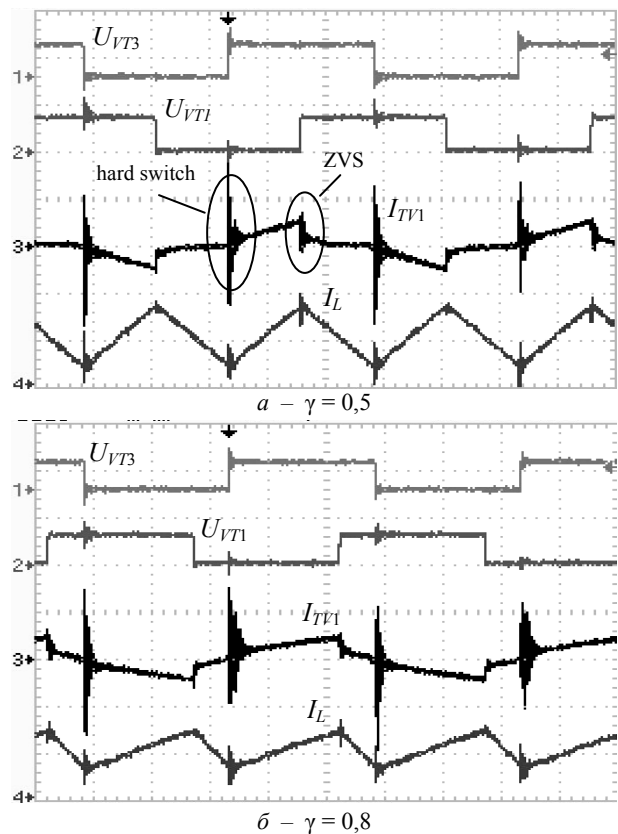


Рис. 7. Осциллограммы токов дросселя (8 А/дел) и трансформатора (16 А/дел) и напряжений на транзисторах (100 В/дел) вольтодобавочного преобразователя в режиме разряда АБ на частоте 40 кГц

Осциллограммы в целом подтверждают сделанные в работе выводы, в частности, показывают уменьшение тока трансформатора при увеличении входного напряжения, что обеспечивает уменьшение статических потерь; можно отметить неблагоприятный коммутационный процесс в инверторе

при переходе из состояния короткого замыкания в состояние вольтодобавки.

Заключение

Представленный вольтодобавочный преобразователь с активным выпрямителем благодаря предложенному способу регулирования обладает уменьшенными статическими потерями, что позволяет существенно повысить КПД преобразования до 97% и открывает широкие возможности практического применения исследуемой схемы. Малые статические потери делают схему наиболее эффективной в области низких частот, традиционных для космической аппаратуры, реализуемой на кремниевых транзисторах с большими затворными емкостями.

Применение вольтодобавочной схемы уменьшает мощность реактивных элементов по отношению к непосредственному повышающему преобразователю, так как преобразуется часть потока энергии. Однако это достигается путем существенного увеличения количества транзисторов и усложнения управления, поэтому такая топология преобразователя эффективна на больших мощностях при массе реактивных элементов, превышающей массу транзисторов и драйверов.

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

Литература

1. Казанцев Ю.М. Система электроснабжения космического аппарата с интегрированным повышающим преобразователем напряжения / Ю.М. Казанцев, К.Г. Гордеев, А.Ф. Лекарев, А.М. Гаврилов // Вопросы электромеханики: Труды ВНИИЭМ. – 2011. – Т. 125, № 6. – С. 42–44.
2. Диксон Р.К. Двухфазный повышающий преобразователь с мягкой коммутацией транзисторов и особенности его динамических свойств / Р.К. Диксон, Ю.Н. Дементьев, Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, С.М. Семенов // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2014. – Т. 324, № 4 – С. 96–101.
3. Mikhhalchenko G. Bifurcation Behavior in Multi-Parallel Interleave Buck Converter / G. Mikhhalchenko, S. Mikhhalchenko // Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference on. – 2015. – № 5. Doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147147.
4. Mikhhalchenko S.G. Applying a mathematical model for determining power section ratings of a buck-boost converter / S.G. Mikhhalchenko, V.I. Apasov // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2016 17th International Conference of Young Specialists on. – 2016. – № 8. Doi: 10.1109/EDM.2016.7538788.
5. Кобзев А.В. Модуляционные источники питания РЭА / А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко, Н.М. Музыченко. – Томск: Радио и связь, Том. отд., 1990. – 366 с.
6. Розанов Ю.К. Полупроводниковые преобразователи со звеном повышенной частоты. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 184 с.
7. Последовательный резонансный преобразователь электропитания от аккумуляторов / А.В. Осипов, В.Н. Школьный, Ю.А. Шиняков, Е.В. Ярославцев, И.С. Шемоллин // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 103–110. Doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-103-110.
8. Birchenough A.G. The Series Connected Buck Boost Regulator Concept for High Efficiency Light Weight DC

Voltage Regulation // First International Energy Conversion Engineering Conference. – Portsmouth, VA, United States, 17–21 Aug. 2003. – P. 11. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20030093550.pdf>. (accessed: 6.04.2018).

9. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – Ч. 2 – 197 с.
10. Doncker De R.W.A.A. A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for highpower applications / R.W.A.A. De Doncker, D.M. Divan, M.H. Kheraluwala // IEEE Transaction on Industry Applications. – 1991. – Vol. 27, No. 1. – P. 63–73.
11. Jang Y. A New PWM ZVS Full-Bridge Converter / Y. Jang, M.M. Jovanovic // IEEE Trans. Power Electron. – 2007. – Vol. 22, No. 5. – P. 987–994.
12. Кобзев А.В. Энергетическая электроника: учеб. пособие / А.В. Кобзев, Б.И. Коновалов, В.Д. Семенов. – Томск: Том. межвузовский центр дистанционного образования. – 2010. – 164 с.
13. Системы электропитания космических аппаратов на основе регулируемых инверторов тока / А.В. Осипов, Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, М.М. Черная, А.А. Ткаченко // Изв. Том. политехн. ун-та: Техника и технологии в энергетике. – 2014. – Т. 324, № 4. – С. 102–109.
14. Ayyanar R. Active input-voltage and load-current sharing in input-series and output-parallel connected modular DC-DC converters using dynamic input-voltage reference scheme / R. Ayyanar, R. Giri, N. Mohan // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2014. – Vol. 19, No. 6. – P. 1462–1473.

Осипов Александр Владимирович

Канд. техн. наук, ст. науч. сотр. НИИ космических технологий (НИИ КТ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-903-914-09-67
Эл. почта: ossan@mail.ru

Шемоллин Илья Сергеевич

Магистрант каф. промышленной электроники, инженер НИИ КТ ТУСУР
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-906-948-91-55
Эл. почта: ilya.shemolin@mail.ru

Школьный Вадим Николаевич

Гл. конструктор проектирования и испытаний радиоэлектронной аппаратуры (РЭА)
АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева
Ленина ул., д. 52, г. Железногорск, Россия, 662972
Тел.: +7 (391-9) 72-09-4

Латыпов Раимджан Акмальханович

Инженер-конструктор сектора разработки и испытаний опытных образцов унифицированных модулей силовой бортовой аппаратуры
АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнева
Ленина ул., д. 52, г. Железногорск, Россия, 662972
Тел.: +7-904-896-99-51
Эл. почта: raimdzhan.latypov@gmail.com

Osipov A.V., Shemolin I.S., Shkolnyi V.N., Latypov R.A.
Bidirectional booster converter with an active rectifier for charge-discharge of a battery in power systems

The paper considers a bidirectional booster converter with an active rectifier to charge-discharge a battery of power systems of space vehicles. It is shown that the use of an active rectifier not only substantially reduces static losses, but also allows the charging of an accumulator battery to be realized, while the rectifier operates in a current inverter mode with a rigid inclusion of transistors. In addition, the active rectifier provides linearity of the control characteristic at all loads to idling due to the possibility of energy recovery of the output filter. A method to regulate a converter is proposed, which consists in the simultaneous unlocking of all rectifier transistors to obtain the interval for the direct connection of the battery and the output filter, i.e. the inverted state of the converter, which ensures minimal static losses in this interval. The switching processes are considered, it is shown that in the booster converter with the proposed control in the discharge mode, the switching of the adjustable rack transistors occurs in a hard mode, and the inclusion of the remaining transistors of the converter is accompanied by a preliminary discharge of parasitic capacitances and occurs in the ZVS mode. In the inverter this is achieved due to the inertia of the inductor current dissipation of the transformer, and in the rectifier due to the continuity of the current of the smoothing inductor. A prototype of the converter was developed, which experimentally confirmed the conclusions drawn in the work.

Keywords: power supply system, booster converter, soft switching.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-119-126

Reference

1. Kazantsev Yu.M., Gordeev K.G., Lekarev A.F., Gavrilov A.M. Sistema elektrosnabzheniya kosmicheskogo apparata s integrirovannym povyshayushchim preobrazovatelem napryazheniya [The system of power supply of a spacecraft with an integrated high-voltage converter]. *Voprosy elektromekhaniki Trudy VNIIEM*. [Issues in Electromechanics. Proceedings of VNIIEM], 2011, vol. 125, no. 6, pp. 42–44. (In Russ.)
2. Dixon R.K., Dement'ev Yu.N., Mikhail'chenko G.Ya., Mikhail'chenko S.G., Semenov S.M. Dvukhfaznyi povyshayushchii preobrazovatel' s myagkoi kommutatsiei tranzistorov i osobennosti ego dinamicheskikh svoystv [Two-phase boost-converter with soft switching of transistors and features of its dynamic properties]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2014, vol. 324, no. 4, pp. 96–101. (In Russ.)
3. Mikhailchenko G., Mikhailchenko S. Bifurcation Behavior in Multi-Parallel Interleave Buck Converter. *Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference on*, 2015, no. 5. Doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147147.
4. Mikhailchenko S.G., Apasov V.I. Applying a mathematical model for determining power section ratings of a buck-boost converter. *Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2016, 17th International Conference of Young Specialists on*, 2016, no. 8. Doi 10.1109/EDM.2016.7538788.
5. Kobzev A.V., Mikhail'chenko G.Ya., Muzychenko N.M. *Modulyatsionnye istochniki pitaniya REA* [Modulation power sources for radioelectronic equipment]. Tomsk, Radio i svyaz', Tomskii otdel [Radio and communications, Tomsk department], 1990. 366 p. (In Russ.)

6. Rozanov Yu.K. *Poluprovodnikovye preobrazovateli so zvenom povyshennoi chastoty* [Semiconductor converters with a rung of increased frequency]. Moscow, Energoatomizdat, 1987. 184 p. (In Russ.)

7. Osipov A.V., Shinyakov Yu.A., Yaroslavtsev E.V., Shemolin I.S. *Posledovatel'nyi rezonansnyi preobrazovatel' elektropitaniya ot akkumulyatorov* [Series resonant converter for discharge of batteries space vehicles power systems]. *Doklady TUSUR* [Proceedings of TUSUR University], 2017, vol. 20, no. 2, pp. 103–110. Doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-103-110. (In Russ.)

8. Birchenough A.G. The Series Connected Buck Boost Regulator Concept for High Efficiency Light Weight DC Voltage Regulation. *First International Energy Conversion Engineering Conference*. Portsmouth, VA, United States, 17–21 Aug. 2003, pp. 11. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20030093550.pdf>. (accessed: 6.04.2018).

9. Zinov'ev G.S. *Osnovy silovoi elektroniki*. Uchebnik [Basic of power electronics: a textbook]. Novosibirsk, NGTU publ., 2000, pt. 2. 197 p. (In Russ.)

10. Doncker De R.W.A.A., Divan D.M., Kheralwala M.H. A threephase soft-switched high-power-density DC/DC converter for highpower applications. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 1991, vol. 27, no. 1, pp. 63–73.

11. Jang Y. A., Jovanovic M.M. New PWM ZVS Full-Bridge Converter. *IEEE Trans. Power Electron*, 2007, vol. 22, no. 5, pp. 987–994.

12. Kobzev A.V., Konovalov B.I., Semenov V.D. *Energeticheskaya elektronika*. Uchebnoe posobie [Energy Electronics: A Tutorial]. Tomsk, Tomskii mezhvuzovskii tsentr distantsionnogo obrazovaniya [Tomsk Interuniversity Center for Distance Education], 2010. 164 p. (In Russ.)

13. Osipov A.V., Shinyakov Yu.A., Otto A.I., Chernaya M.M., Tkachenko A.A. Power supply systems of spacecraft based on adjustable current inverters. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii v energetike* [Technics and technologies in power engineering], 2014, vol. 324, no. 4, pp. 102–109. (In Russ.)

14. Ayyanar R., Giri R., Mohan N. Active input-voltage and load-current sharing in input-series and output-parallel connected modular DC-DC converters using dynamic input-voltage reference scheme. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol. 19, no. 6, pp. 1462–1473.

Alexander V. Osipov

Doctor of Engineering Sciences, Senior science fellow
 Research Institute of space technology Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
 40, Lenin Av., Tomsk, Russia, 634050
 Phone.: +7-903-914-09-67
 Email: ossan@mail.ru

Ilya S. Shemolin

Master student dep. of industrial electronics, Research Institute of space technology Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
 40, Lenin Av., Tomsk, Russia, 634050
 Phone.: +7-906-948-91-55
 Email: ilya.shemolin@mail.ru

Vadim N/ Shkolny

Chief designer of design and testing
of communications-electronics equipment JSC
«Information Satellite Systems»
named after Acad. M.F. Reshetnev
52, Lenina st., Zheleznogorsk, Russia, 662972
Phone: +7 (391-9) 72-09-4

Raimjan A. Latipov

Engineer-designer, sector of development and testing
of prototypes of unified modules of power-on-board equipment
of the JSC «Information Satellite Systems »
named after Acad. M.F. Reshetnev
52, Lenina st., Zheleznogorsk, Russia, 662972
Phone: +7-904-896-99-51
Email: raimdzhlan.latypov@gmail.com