

УДК 621.31

ББК 32.859

И.М. ЖУРАВЛЕВ, И.Е. ЛЫСЕНКО,
М.Е. ХЛЫСТУНОВ, Д.О. ДУДАРЬКОВ, А.Г. СТРУГОВЕЦ**КОМПЛЕКСНЫЙ АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Ключевые слова: энергопреобразующая аппаратура, космический аппарат, преобразователи электрической энергии, надежность, КПД, коэффициент удельной мощности.

Усложнение полезной нагрузки космических аппаратов приводит к необходимости применения нестандартных схемотехнических решений. Анализ научно-технических публикаций показал, что на сегодняшний день отсутствует формализованная методика проектирования энергопреобразующей аппаратуры для космических аппаратов. В имеющихся публикациях, как правило, рассматривается алгоритм проектирования с учетом одного (КПД) либо двух критериев (КПД, массогабаритные характеристики). При этом вопросы обеспечения безотказной работы энергопреобразующей аппаратуры рассматриваются недостаточно, что приводит к последующей отбраковке большей части предлагаемых схемотехнических решений и снижает эффективность разработчика.

Цель исследования – сформировать алгоритм проектирования энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов, учитывающий требования по надежности, КПД и коэффициенту удельной мощности.

Материалы и методы. При выполнении работ использовались основные положения общей теории цепей и общей теории надежности технических систем. Все расчеты проводились в Mathcad 15.0.

Результаты исследования. В статье поэтапно рассмотрен процесс проектирования на примере преобразователей постоянного напряжения – понижающего и повышающего типов. Показано, что учет требований надежности приводит к снижению массогабаритных показателей (за счет дополнительной массы резервирующих элементов) и КПД (за счет потерь мощности на резервирующих элементах). Рассмотрены преобразователи с промежуточным звеном переменного тока – на основе двойного активного моста (мостового инвертора с активным выпрямителем) и вольтодобавочной схемы. Из приведенного анализа видно, что применение преобразователей со звеном переменного тока в составе энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов затруднено из-за низких показателей безотказности работы и массогабаритных показателей.

Выводы. Схема энергопреобразующей аппаратуры космического аппарата должна обеспечивать функционирование в случае, как минимум, единичного отказа произвольного полупроводникового элемента силовой части преобразователя. При этом наибольшую перспективность для применения имеют схемы с минимальным количеством силовых элементов. Полученные уравнения показывают, что энергетические характеристики преобразователя необходимо оценивать после выполнения работ по обеспечению надежности.

Введение. Отличием процесса разработки энергопреобразующей аппаратуры (ЭПА) космических аппаратов (КА) от разработки аналогичной ЭПА для наземного применения являются повышенные требования к надежности преобразователей энергии [3, 6, 7, 10], что обусловлено высокой стоимостью изделия и невозможностью проведения плановых/оперативных ремонтных работ. Наиболее емко суть требований по надежности описывается формулировкой «ЭПА должна обеспечивать заданные энергетические характеристики в течение всего срока активного существования КА при N отказах произвольного элемента ЭПА».

При оценке надежности ЭПА можно принять допущение, что она определяется надежностью наиболее нагруженного элемента, которая обратно пропорциональна величине его электрической и тепловой нагрузки [6, 7, 9]. Учитывая, что наибольшая электрическая и тепловая нагрузка приходится на элементы силовой части ЭПА КА, можно говорить о приоритетности анализа уровня нагрузки на силовую часть ЭПА при разработке преобразователей энергии. Требуемый уровень надежности для системы управления, измерительных и телеметрических функциональных узлов (ФУ), а также вспомогательных систем и подсистем, как правило, обеспечивается за счет пониженной электрической нагрузкой, а также резервирования и мажоритарной обработки входных и выходных сигналов.

Дополнительной особенностью при проектировании ЭПА КА является необходимость обеспечения максимально возможного коэффициента удельной мощности ($K_{ум}$, Вт/кг, рассчитывается как отношение максимальной выходной мощности ЭПА на рабочем участке орбиты к массе ЭПА) [3, 4]. Следует учитывать, что доступная для размещения ЭПА площадь и масса внутри КА жестко ограничены и это приводит к необходимости применения схем с наименьшим количеством крупногабаритных элементов, таких как дроссели, трансформаторы, транзисторы и т.п.

Соответственно, комплексное выполнение требований по обеспечению бесперебойного электропитания КА с заданными энергетическими, массогабаритными и надежностными характеристиками требует от разработчика ЭПА поиска компромисса при решении трех взаимосвязанных задач:

1) обеспечение требуемого по ТЗ уровня надежности ЭПА за счет дополнительного резервирования отдельных элементов и ФУ ЭПА, а также снижения нагрузки на них. Это приводит к увеличению КПД, однако снижает $K_{ум}$ ЭПА;

2) обеспечение максимально возможного $K_{ум}$ ЭПА за счет минимизации числа элементов и ФУ ЭПА, а также работы в предельно допустимых режимах. Это позволяет использовать элементы с минимальным запасом по току/напряжению/мощности, повышая КПД, однако значительно снижает вероятность безотказной работы (ВБР) как отдельных элементов, так и ФУ ЭПА;

3) обеспечение максимально возможного КПД ЭПА, что может требовать в зависимости от типа элемента как работы в облегченном режиме, так и в предельно допустимом.

Анализ научно-технической литературы [3, 6, 7, 10] показал, что в настоящий момент отсутствует формализованная методика проектирования ЭПА, позволяющая провести оперативный расчет и оценку применимости схемотехнических решений, планируемых к применению в ЭПА КА.

Цель исследования – сформировать алгоритм проектирования преобразователя энергии для КА с учетом требований по надежности, КПД и $K_{ум}$ ЭПА.

Материалы и методы. При выполнении работ применялись основные положения общей теории цепей, а также положения общей теории надежности технических систем. Все расчеты проводились в Mathcad 15.0.

Результаты исследования. Предлагаемый алгоритм, приведенный на рис. 1, условно можно разделить на пять этапов: выбор схемы преобразователя энергии, расчет электрических и массогабаритных показателей, оценка уровня

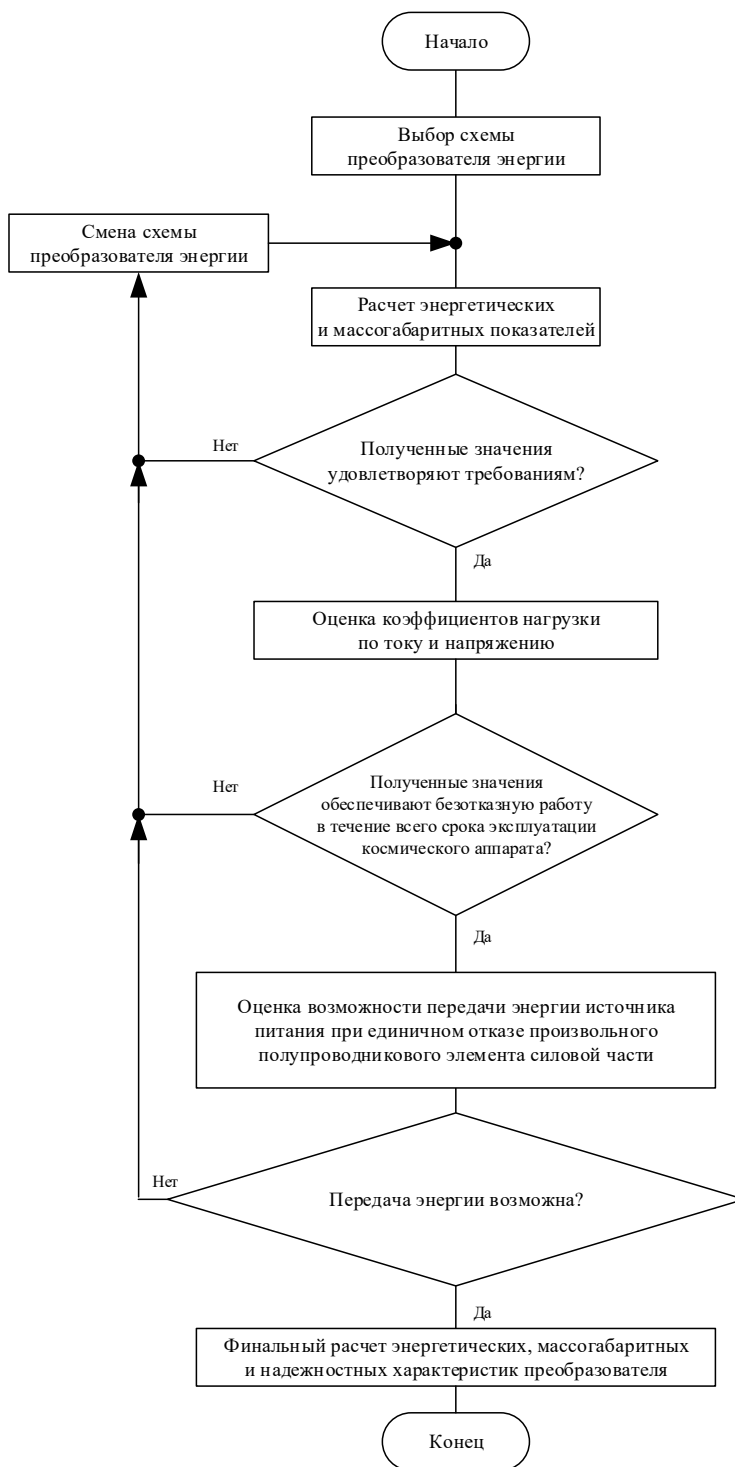


Рис. 1. Алгоритм проектирования ЭПА КА

нагрузки элементов и ФУ ЭПА, расчет надежности работы преобразователя в условиях нормальной работы и единичного отказа произвольного полупроводникового элемента. Переход на следующий этап допустим лишь при выполнении требований предыдущего, в противном случае необходимо изменение схемотехники преобразователя и повторный расчет.

Выбор схемы преобразователя энергии. Наибольшее распространение в энергопреобразующих комплексах КА акционерного общества «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва) получили стабилизаторы напряжения на основе схемотехники непосредственных преобразователей (рис. 2). Принцип работы подобных преобразователей подробно разобран в литературе [1, 4, 5], поэтому в настоящей статье не приводится. Источник питания преобразователя энергии обозначен функциональным блоком, поскольку может быть как источником тока (при питании от СБ, рабочая область – ветвь тока), так и источником напряжения (при питании от АБ; при питании от СБ, рабочая область – ветвь напряжения).

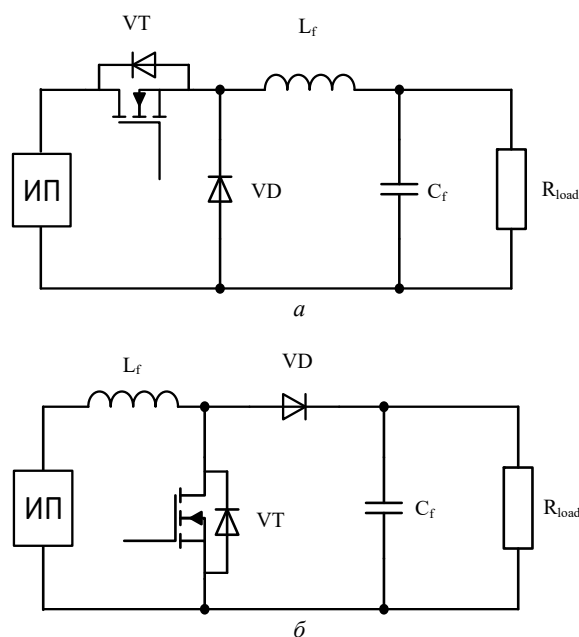


Рис. 2. Схемы ЭПА:

a – на основе понижающего преобразователя;
б – на основе повышающего преобразователя

Для дальнейшего анализа необходимо перейти к функциональным схемам силовой части, описывающим задействованные элементы ЭПА в основных рабочих режимах (рис. 3).

Рассматриваются два режима работы преобразователя – режим передачи энергии из источника питания в нагрузку и режим регулирования выходного напряжения. Поскольку в настоящем алгоритме рассматривается лишь ЭПА,

принимается допущение, что источники питания, нагрузка и системы управления идеальны – они обладают бесконечно большим $K_{УМ}$, не имеют паразитных параметров, КПД и ВБР всегда равен 100%. Соответственно, данные блоки можно исключить из дальнейшего анализа.

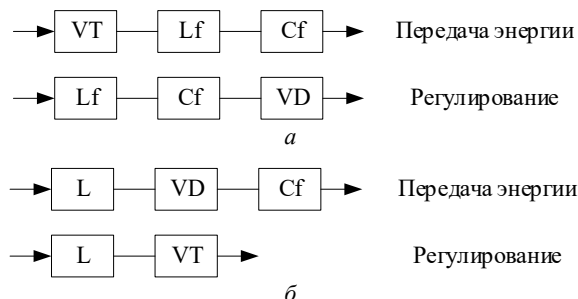


Рис. 3. Пути протекания энергии:

а – для понижающего преобразователя; б – для повышающего преобразователя

Расчет электрических и массогабаритных показателей. Уравнение КПД преобразователя энергии при условии непрерывности тока дросселя L_f будет иметь следующий вид:

$$\eta = \frac{P_{load}}{P_{load} + \Delta P_{L_f} + \Delta P_{C_f} + \int_0^{T_{sw}} (\Delta P_{VT} \cdot \gamma + \Delta P_{VD} \cdot [1 - \gamma]) dt},$$

где ΔP_{L_f} , ΔP_{C_f} , ΔP_{VT} , ΔP_{VD} – потери мощности на соответствующих элементах схемы, Вт; P_{load} – мощность нагрузки, Вт; T_{sw} – период рабочей частоты, с; γ – относительная длительность импульса управления транзистором.

$K_{УМ}$ можно рассчитать по формуле

$$K_{УМ} = \frac{P_{load}}{\eta} \cdot \frac{1}{M_{ЭПА}},$$

где $M_{ЭПА}$ – масса энергопреобразующей аппаратуры (общая), кг.

Оценка уровня нагрузки элементов и функциональных узлов ЭПА. С целью обеспечения требуемой надежности ЭПА КА при выборе элементов в расчетах дополнительно учитывается коэффициент ослабления нагрузки (КОН) на элемент [3, 6, 7]. В общем виде КОН рассчитывается как соотношение нагрузки на элемент в облегченном режиме к номинальной нагрузке на элемент

$$K_{ОН} = \frac{X_{ОР}}{X_{НР}},$$

где $X_{ОР}$ – значение параметра (напряжения/тока/мощности и т.д.) элемента в облегченном режиме работы; $X_{НР}$ – значение параметра (напряжения/тока/мощности и т.д.) элемента для предельно допустимого режима работа.

Значение $X_{ОР}$ зависит от типа элемента, технологии его изготовления, требуемой длительности работы элемента и иных параметров, но, как правило, заводы-изготовители определяют его в диапазоне 0,6–0,8 от предельно допустимого

значения параметра. К примеру, для применения полевого транзистора в облегченном режиме для схемы с напряжением источника питания 100 В, высокочастотными коммутационными выбросами, равными 15 В, и коэффициентом ослабления нагрузки 0,75 необходим транзистор с предельно допустимым напряжением сток-исток не менее

$$U_{DS} = \frac{100 + 15}{0,75} = 153,4 \text{ В.}$$

Анализ номенклатуры применяемых полупроводниковых элементов показал, что промышленностью массово выпускаются транзисторы с максимальным напряжением сток-исток 100, 150 и 200 В. Соответственно, для приведенного случая, допустимо применение транзисторов с напряжением сток-исток не менее 200 В. При этом снижение амплитуды выбросов напряжения до 10 В позволяет использовать транзисторы с максимальным напряжением 150 В, повышая КПД преобразователя за счет снижения сопротивления сток-исток элемента.

В случае, если параметры облегченного режима не заданы производителем напрямую, можно воспользоваться формулами из [9]. К примеру, для кремниевых полевых транзисторов надежность работы в облегченном режиме можно рассчитать

$$\lambda_6 = \frac{1}{T_{\text{обл}} K_{\phi} K_{\varepsilon} K_{\text{пр}} K_p} = \frac{A^{-1} e^{-\theta_1} e^{-\theta_2}}{T_{\text{обл}} K_{\phi} K_{\varepsilon} K_{\text{пр}}},$$

$$\theta_1 = \frac{N_T}{273 + t + (175 - t_{\text{пер_макс}}) + \Delta t \cdot \frac{P_{\text{раб}}}{P_{\text{макс}}} \cdot \left(\frac{t_{\text{пер_макс}} - t_{\text{сниж}}}{150} \right)},$$

$$\theta_2 = \frac{273 + t + (175 - t_{\text{пер_макс}}) + \Delta t \cdot \frac{P_{\text{раб}}}{P_{\text{макс}}} \cdot \left(\frac{t_{\text{пер_макс}} - t_{\text{сниж}}}{150} \right)}{T_M},$$

где $T_{\text{обл}}$ – длительность работы в облегченном режиме, ч; K_{ϕ} – коэффициент, зависящий от функционального назначения; K_{ε} – коэффициент, зависящий от условий жесткости эксплуатации; $K_{\text{пр}}$ – коэффициент, зависящий от уровня приемки; K_p – коэффициент, зависящий от режима работы; A , N_T , T_M , Δt – постоянные модели, справочные величины; t – температура корпуса, °С; $t_{\text{пер_макс}}$ – максимально допустимая температура перегрева корпуса, °С; $t_{\text{сниж}}$ – максимальная температура корпуса, для которой температура перехода не превышает $t_{\text{пер_макс}}$ (при 100% электрической нагрузке), °С; $P_{\text{раб}}$ – рабочая мощность рассеивания для облегченного режима работы, Вт; $P_{\text{макс}}$ – максимально допустимая мощность рассеивания при температуре $t_{\text{сниж}}$, Вт.

Оценка нагрузки элементов по току и напряжению зависит от алгоритма функционирования схемы, однако при сравнении схем между собой можно утверждать следующее:

1) для понижающего преобразователя характерна повышенная нагрузка транзистора и диода по прикладываемому напряжению (равная максимальному напряжению источника питания), что приводит к необходимости использования

высоковольтных элементов, имеющих большое сопротивление сток–исток и прямое падение напряжения. Вместе с тем нагрузка по току снижена, поскольку ток дросселя определяется разницей между входным и выходным напряжениями, что обеспечивает снижение статических потерь мощности;

2) для повышающего преобразователя характерна сниженная нагрузка транзистора и диода по прикладываемому напряжению (ограниченная максимальным напряжением на нагрузке), что позволяет применять полупроводники с минимальным сопротивлением сток–исток и прямым падением напряжения. Однако повышенная нагрузка по току, определяемая максимальным током источника питания и нагрузки, приводит к увеличению потерь мощности в ПРЭ.

Принимая во внимание то, что для полупроводниковых элементов отсутствует линейная зависимость между максимальным напряжением сток–исток (коллектор–эмиттер) и сопротивлением сток–исток (коллектор–эмиттер) либо прямым падением напряжения на диоде, нельзя утверждать об однозначном приоритете понижающего или повышающего преобразователя с позиции минимального тепловыделения.

Расчет надежности работы преобразователя в условиях нормальной работы. Уравнения, позволяющие оценить минимальную надежность преобразователя, можно вывести из основных режимов работы. С учетом допущения, что рассматриваются только те элементы, через которые протекает ток, получим следующие формулы:

$$\lambda_{buck} = \min(\lambda_{VT_on}; \lambda_{VT_off}) = \min(\lambda_{VT} \cdot \lambda_{Lf} \cdot \lambda_{Cf}; \lambda_{VD} \cdot \lambda_{Lf} \cdot \lambda_{Cf}),$$

$$\lambda_{boost} = \min(\lambda_{VT_on}; \lambda_{VT_off}) = \min(\lambda_{Lf} \cdot \lambda_{VT}; \lambda_{Lf} \cdot \lambda_{VD} \cdot \lambda_{Cf}).$$

где λ_{buck} – вероятность безотказной работы понижающего преобразователя в течение САС КА; λ_{boost} – вероятность безотказной работы повышающего преобразователя в течение САС КА; $\lambda_{VT_on} / \lambda_{VT_off}$ – вероятность безотказной работы, когда транзистор замкнут/разомкнут; λ_{Lf} , λ_{Cf} , λ_{VT} , λ_{VD} – вероятность безотказной работы соответствующих элементах схемы.

Расчет надежности работы преобразователя в условиях отказа произвольного полупроводникового элемента. Как видно из рис. 2, единичный отказ произвольного полупроводникового элемента преобразователя может привести к неприемлемому снижению энергетических характеристик энергопреобразующего комплекса. Для понижающего преобразователя:

- 1) отказ диода на короткое замыкание (КЗ) приводит к закорачиванию выходной шины электропитания и источника питания;
- 2) отказ диода или транзистора на обрыв приводит к потере канала преобразования энергии и электрогенерирующих мощностей;
- 3) отказ транзистора на КЗ приводит к повышению напряжения на выходной шине электропитания выше допустимого уровня – до максимального напряжения источника питания.

Для повышающего преобразователя:

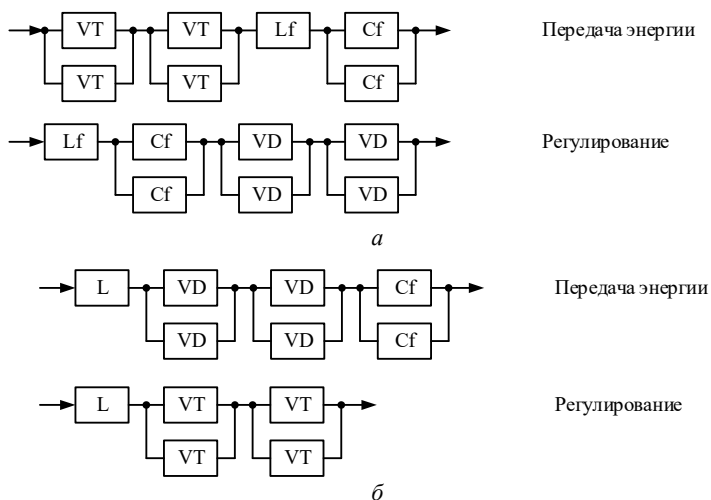
- 1) отказ диода на КЗ приводит к прямому подключению источника питания к нагрузке, что приводит к повышению напряжения на выходной шине электропитания выше допустимого уровня – до максимального напряжения источника питания;

2) отказ транзистора на КЗ приводит к безвозвратному снижению энергогенерирующих/энергозапасающих мощностей (солнечной или аккумуляторной батареи);

3) отказ диода или транзистора на обрыв приводит к потере канала преобразования энергии и электрогенерирующих мощностей.

Соответственно, в процессе проектирования необходимо обеспечить доработку схемотехнического решения для возможности функционирования преобразователя при единичном отказе произвольного элемента силовой части [3, 6, 7]. При этом моточные элементы, такие как дроссели и трансформаторы, не резервируются ввиду сложностей их параллельного соединения, а конденсаторы подключаются через плавкие перемычки, обеспечивающие их отключение от схемы при отказе.

Как видно из схемы предлагаемого решения (рис. 4), простое резервирование на отказ элементов на КЗ и на обрыв приводит к избыточному росту числа элементов преобразования энергии и снижает $K_{УМ}$. Поскольку в ЭПА КА применяются многоканальные схемы, подобный подход приведет к катастрофическому падению $K_{УМ}$, так как резервирование необходимо обеспечить для каждого канала преобразования энергии.



Оптимальным решением является вынос всех параллельно соединенных элементов преобразователя в отдельный, дополнительный канал преобразователя энергии (рис. 5), обеспечивающий работу при отказе произвольного элемента в любом из каналов на обрыв. Соответственно, для выполнения условий по обеспечению необходимых характеристик электропитания при N отказах произвольных элементов необходимо обеспечить N последовательно включенных элементов

в каждом канале преобразователя и N -е количество дополнительных каналов преобразования энергии.

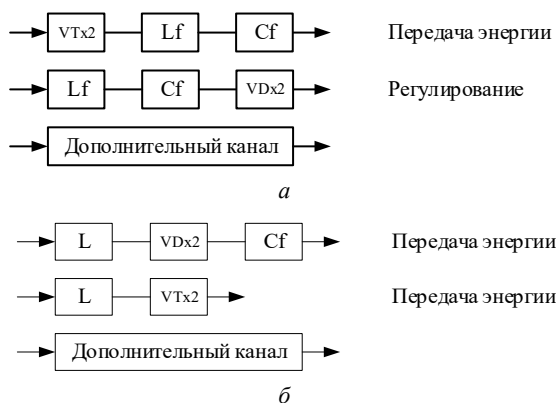


Рис. 5. Оптимизированная резервированная силовая часть:
 а – для понижающего преобразователя; б – для повышающего преобразователя

Как видно из рис. 5, для компенсации единичного отказа полупроводниковых элементов на КЗ необходимо их дублирование. При этом алгоритм работы транзисторных ключей для резервированных преобразователей энергии (рис. б) должен быть видоизменен следующим образом:

- первый транзистор (основной) переключается по основному алгоритму, обеспечивая стабилизацию выходного параметра;
- второй транзистор (резервный) находится в постоянно замкнутом состоянии, обеспечивая нормальную работу схемы;
- при отказе резервного транзистора на КЗ алгоритм работы преобразователя не изменяется;
- при отказе основного транзистора на КЗ резервный транзистор начинает коммутацию по основному алгоритму работы, обеспечивая стабилизацию выходного параметра.

Соответственно, после резервирования преобразователя на N -е число отказов необходимо провести окончательный расчет основных электрических и массогабаритных параметров.

Принимая допущение, что одновременно может произойти только один отказ, оценить минимальную надежность канала преобразователя энергии можно как

$$\lambda_{buck_rsrvd} = \min(\lambda_{VT_on}; \lambda_{VT_off}) = \min(\lambda_{VT}^N \cdot \lambda_{Lf} \cdot \lambda_{Cf}^N; \lambda_{VD}^N \cdot \lambda_{Lf} \cdot \lambda_{Cf}^N),$$

$$\lambda_{boost_rsrvd} = \min(\lambda_{VT_on}; \lambda_{VT_off}) = \min(\lambda_{Lf} \cdot \lambda_{VT}^N; \lambda_{Lf} \cdot \lambda_{VD}^N \cdot \lambda_{Cf}^N).$$

где λ_{buck_rsrvd} – вероятность безотказной работы резервированного понижающего преобразователя в течение САС КА; λ_{boost_rsrvd} – вероятность безотказной работы резервированного повышающего преобразователя в течение САС КА; N – число последовательно включенных резервирующих элементов.

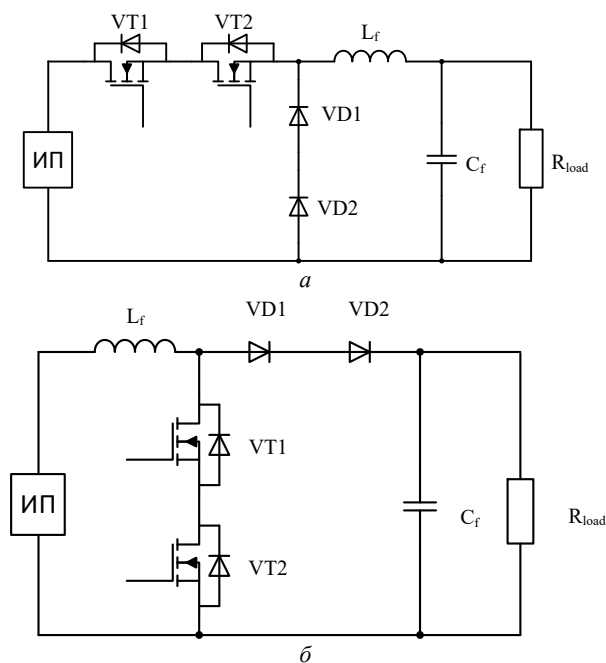


Рис. 6. Схема резервированной ЭПА:
 а – на основе понижающего преобразователя;
 б – на основе повышающего преобразователя

Уравнение КПД резервированных преобразователей при условии непрерывности тока дросселя L_f будет иметь следующий вид:

$$\eta = \frac{P_{load}}{P_{load} + \Delta P_{L_f} + \Delta P_{C_f} + N \cdot \int_0^{T_{sw}} (\Delta P_{VT} \cdot \gamma + \Delta P_{VD} \cdot [1 - \gamma]) dt}$$

Как видно из приведенных формул, для сохранения надежности преобразователя при резервировании отдельных элементов необходимо обеспечить облегченный режим работы элементов, обеспечивая при этом минимальное падение $K_{ум}$ ЭПА и сохраняя высокий КПД. Аналитический поиск оптимального соотношения между КПД, $K_{ум}$ и надежностью для ЭПА КА является на данный момент нерешенной задачей. Таким образом, оценку энергетических, надежностных и массогабаритных показателей ЭПА КА необходимо проводить постфактум (руководствуясь требованиями ТЗ по надежности).

Применение в ЭПА преобразователей со звеном переменного тока. Учет вышеназванных особенностей проектирования ЭПА КА приводит к невозможности использования основных схем преобразователей энергии со звеном переменного тока (рис. 7). Несмотря на высокие показатели КПД оригинальных схем [2, 8], резервирование транзисторов внутри канала преобразования энергии на КЗ/обрыв приводит к резкому падению $K_{ум}$ ЭПА. Введение резервирования отказа элемента на КЗ/обрыв за счет дополнительного

канала преобразования энергии приводит к ситуации, когда на один рабочий канал приходится два резервных, что снижает $K_{ум}$ ЭПА втрое относительно номинального значения.

Если же рассмотреть непосредственные и инверторно-трансформаторные преобразователи в составе многоканальной ЭПА по критерию резервирования транзисторов, то можно эмпирически вывести следующее соотношение:

$$N_{\text{транз_общ}} = N_{\text{кан}} \cdot (N_{\text{транз_осн}} + N_{\text{транз_рез}}) = 2 \cdot N_{\text{кан}} \cdot N_{\text{отк}} \cdot N_{\text{транз_кан}},$$

где $N_{\text{транз_общ}}$ – общее количество транзисторов в ЭПА, шт; $N_{\text{кан}}$ – общее количество каналов преобразования энергии в ЭПА, включая резервные, шт; $N_{\text{транз_осн}}$ – количество основных транзисторов в одном канале преобразования энергии, шт; $N_{\text{транз_рез}}$ – количество резервных транзисторов в одном канале преобразования энергии, шт; $N_{\text{отк}}$ – количество отказов, при которых должны обеспечиваться заданные характеристики электропитания; $N_{\text{транз_кан}}$ – общее количество транзисторов в одном канале преобразования энергии, шт.

Приведенная формула демонстрирует, что при одинаковом количестве каналов преобразователя количество транзисторов в инверторно-трансформаторных преобразователях будет в 8 раз больше. Снижение числа каналов преобразования энергии для повышения $K_{ум}$ ЭПА приведет к резкому снижению надежности всего энергопреобразующего комплекса КА, поскольку отказ одного преобразователя будет приводить к потере не одной, а нескольких секций энергогенерации.

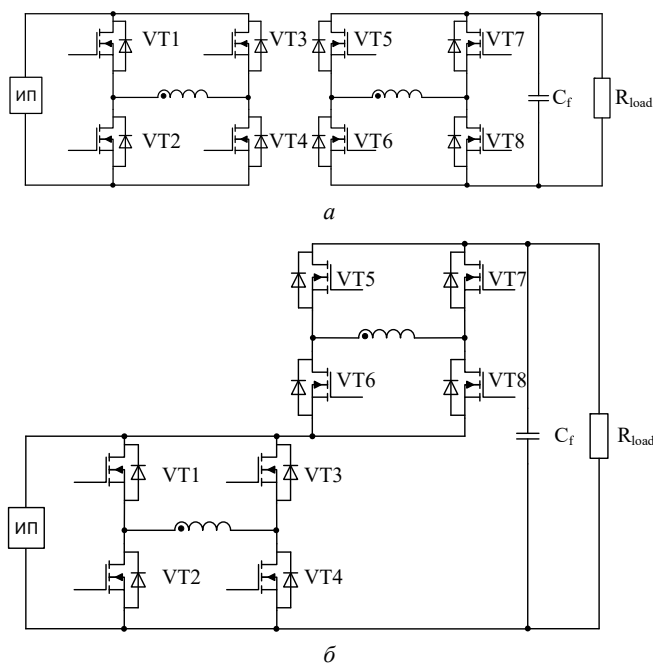


Рис. 7. Преобразователи со звеном переменного тока:
а – двойной активный мост; *б* – вольтодобавочный преобразователь

При этом для схемы двойного активного моста отсутствие резервирования элементов приводит к невозможности прямой передачи энергии от источника питания в нагрузку с заданным КПД, поскольку происходит замагничивание магнитопровода трансформатора из-за работы на одной полуволне. Возможность принудительного размагничивания за счет смены алгоритма коммутации обеспечивает резкое снижение КПД из-за перехода в режим прерывистого тока и выход в режим повышенной нагрузки на элементы, увеличивая вероятность отказа канала преобразователя энергии.

Схема вольтодобавочного преобразователя позволяет обеспечить прямую передачу энергии (либо функционирование в режиме эквивалента последовательного преобразователя) при единичном отказе, однако такой подход требует выбора всех транзисторов под максимальные значения токов и напряжений, что нивелирует преимущество разделения потока энергии от источника питания. Кроме того, $K_{ум}$ такого преобразователя будет как минимум вдвое меньше аналогичного последовательного преобразователя, что ставит вопрос о целесообразности применения.

Выводы. В статье приведен алгоритм проектирования ЭПА КА с учетом требований по надежности, КПД и $K_{ум}$. Подробно рассмотрены основные этапы и особенности проектирования преобразователей энергии на основе понижающего и повышающего преобразователей.

Показано, что в применяемых многоканальных преобразователях энергии надежность работы обеспечивается резервированием полупроводниковых элементов путем последовательного соединения, а также увеличением количества каналов преобразования энергии.

Из предложенного алгоритма следует, что оценку энергетических и массогабаритных показателей ЭПА необходимо проводить после обеспечения требуемого уровня надежности преобразователей энергии.

Литература

1. Алгоритмы управления многоканальным шунтовым стабилизатором напряжения с цифровой системой автоматического управления / *И.М. Журавлев, А.С. Асочаков, А.А. Дружинин и др.* // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2021. Т. 24, № 2. С. 84–90.
2. Вольтодобавочный резонансный преобразователь энергии солнечной батареи с активным выпрямителем / *И.М. Журавлев, М.Е. Хлыстунов, А.В. Осипов и др.* // Решетневские чтения. 2018. Т. 1. С. 297–299.
3. *Меньшиков В.А., Рудаков В.Б., Сычев В.Н.* Контроль качества космических аппаратов при отработке и производстве. Оптимизация и управление рисками. М.: Машиностроение–Полет, 2009. 400 с.
4. *Кобзев А.В.* Многозонная импульсная модуляция. Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии. Новосибирск: Наука, 1979. 304 с.
5. *Кобзев А.В., Михальченко Г.Я., Музыченко Н.М.* Модуляционные источники питания РЭА. Томск: Радио и связь, 1990. 336 с.
6. *Патраев В.Е., Шангина Е.А.* Надежность технических систем космических аппаратов. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019. 66 с.
7. Проектирование надежных спутников связи. Томск: Раско, 1993. 221 с.
8. Последовательный резонансный преобразователь для систем электропитания от аккумуляторов / *А.В. Осипов, В.Н. Школьный, Ю.А. Шиняков и др.* // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20, № 2. С. 103–110.

9. Справочник нормативного характера. М.: 22 ЦНИИИ МО РФ, 2006. 641 с.

10. Saleh J.H., Castet J-F. Spacecraft Reliability and Multi-State Failures: A Statistical Approach: John Wiley & Sons Limited, Inc, 2011. 206 p.

ЖУРАВЛЕВ ИВАН МИХАЙЛОВИЧ – инженер-конструктор 2-й категории, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», Россия, Железногорск (zhuravlevim@iss-reshetnev.ru).

ЛЫСЕНКО ИЛЬЯ ЕВГЕНЬЕВИЧ – инженер-конструктор, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», Россия, Железногорск (lysenkoie@iss-reshetnev.ru).

ХЛЫСТУНОВ МИХАИЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ – инженер-конструктор 3-й категории, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», Россия, Железногорск (hlystunovme@iss-reshetnev.ru).

ДУДАРЬКОВ ДЕНИС ОЛЕГОВИЧ – инженер-конструктор 3-й категории, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», Россия, Железногорск (dudarkovdo@iss-reshetnev.ru).

СТРУГОВЕЦ АНДРЕЙ ГРИГОРЬЕВИЧ – начальник группы, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», Россия, Железногорск (strugovetsag@iss-reshetnev.ru).

Ivan M. ZHURAVLEV, Илья Е. LYSENKO, Mikhail E. KHLYSTUNOV,
Denis O. DUDARKOV, Andrey G. STRUGOVETS

COMPLEX DESIGNING ALGORITHM FOR SPACECRAFT ENERGY-CONVERTING EQUIPMENT

Key words: energy-converting equipment, spacecraft, electric power converters, reliability, efficiency, relative power coefficient.

Introduction. The complication of the spacecraft payload requires the use of non-standard circuits. The analysis of scientific and technical publications shows that there is no formalized methodology for spacecraft energy-converting equipment designing. Reviewed publications consider some design algorithms taking into account one (efficiency) or two criteria (efficiency, weight and size characteristics). At the same time, the issues of ensuring trouble-free operation of energy-converting equipment are not sufficiently considered which leads to rejection of most part of proposed circuitsolutions and reduces developer efficiency.

The research purpose is to form a spacecraft energy-converting equipment designing algorithm, taking into account the reliability, efficiency and relative power coefficient requirements.

Materials and methods. The main provisions of the electrical circuit theory and the theory of technical systems reliability were used. All calculations were carried out in Mathcad 15.0.

Research results. The article step-by-step discusses the design process using the example of boost and buck voltage converters. It is shown that taking into account the reliability requirements leads to a decrease of weight and size indicators (due to the additional mass of redundant elements) and efficiency (due to power losses on redundant elements). Converters with an AC-current node based on a double active bridge (active front end bridge inverter) and add-voltage circuits are considered. It can be seen that the use of converters with AC-current node in spacecraft energy-converting equipment is complicated because of low reliability or high weight and size meters.

Conclusions. A converter circuit must ensure operation in the event of a single failure of a random power element. At the same time, scheme with a minimum number of power elements have the greatest prospects for application. A converter energy characteristic must be evaluated after ensuring the reliability.

References

1. Zhuravlev I.M., Asochakov A.S., Druzhinin A.A., Lopatin A.A. *Algoritmy upravleniya mnogokanal'nym shuntovym stabilizatorom napryazheniya s tsifrovoy sistemoi avtomaticheskogo upravleniya* [Control algorithms for multichannel shunt voltage converter with digital control system]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2021, vol. 24, no 2, pp. 84–90.
2. Zhuravlev I.M., Hlystunov M.E., Osipov A.V., Lopatin A.A. *Vol'todobavochnyi rezonansnyi preobrazovatel' energii solnechnoi batarei s aktivnym vypryamitelem* [Add-voltage topology resonant solar energy converter with an active rectifier]. *Reshetnevskie chteniya*, 2018, vol. 1, pp. 297–299.
3. Menshikov V.A., Rudakov V.B., Sychev V.N. *Kontrol' kachestva kosmicheskikh apparatov pri otrabotke i proizvodstve. Optimizatsiya i upravlenie riskami* [Spacecraft quality control at during testing and production. Optimization and risk management]. Moscow, Mashinostroenie–Polet Publ., 2009, 400 p.
4. Kobzev A.V. *Mnogozonnaya impul'snaya modulyatsiya. Teoriya i primeneniye v sistemakh preobrazovaniya parametrov elektricheskoi energii* [Multi-zone pulse modulation. Theory and practice application in systems system of parameters converter]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, 304 p.
5. Kobzev A.V., Mihalchenko G.Ya., Muzychenko N.M. *Modulyatsionnye istochniki pitaniya RYeA* [Modulated power supplies converter]. Tomsk, Radio i svyaz Publ., 1990, 336 p.
6. Patraev V.E., Shangina E.A. *Nadezhnost' tehnikeskikh sistem kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft technical systems reliability: textbook manual]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2019, 66 p.
7. *Proektirovaniye nadezhnykh sputnikov svyazi* [Reliable communication satellite designing]. Tomsk, Rasko Publ., 1993, 221 p.
8. Osipov A.V., Shkolnyi V.N., Shinyakov Yu.A., Yaroslavcev E.V., Shemolin I.S. *Posledovatel'nyi rezonansnyi preobrazovatel' dlya sistem elektropitaniya ot akkumulyatorov* [Series resonant converter for discharge of batteries space vehicles power systems]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2017, vol. 20, no 2, pp. 103–110.
9. *Spravochnik normativnogo kharaktera* [Handbook of normative estimation]. Moscow, 2006, 641 p.
10. Saleh J.H., Castet J-F. *Spacecraft Reliability and Multi-State Failures: A Statistical Approach*: John Wiley & Sons Limited. Inc, 2011. 206 p.

IVAN M. ZHURAVLEV – Design Engineer 2th Grade, JSK Academician M.F. Reshetnev Information Satellite System, Russia, Zheleznogorsk (zhuravlevim@iss-reshetnev.ru).

ILYA E. LYSENKO – Design Engineer, JSK Academician M.F. Reshetnev Information Satellite System, Russia, Zheleznogorsk (lysenkoie@iss-reshetnev.ru).

MIKHAIL E. KHLYSTUNOV – Design Engineer 3th Grade, JSK Academician M.F. Reshetnev Information Satellite System, Russia, Zheleznogorsk (hlystunovme@iss-reshetnev.ru).

DENIS O. DUDARKOV – Design Engineer 3th Grade, JSK Academician M.F. Reshetnev Information Satellite System, Russia, Zheleznogorsk (dudarkovdo@iss-reshetnev.ru).

ANDREY G. STRUGOVETS – Head of Department, JSK Academician M.F. Reshetnev Information Satellite System, Russia, Zheleznogorsk (strugovetsag@iss-reshetnev.ru).

Формат цитирования: Журавлев И.М., Лысенко И.Е., Хлыстунов М.Е., Дударьков Д.О., Струговец А.Г. Комплексный алгоритм проектирования энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов // Вестник Чувашского университета. – 2023. – № 4. – С. 85–98. DOI: 10.47026/1810-1909-2023-4-85-98.