

УДК. 621.311.6

Ю.А. Андреев, С.Ю. Буров, Ю.А. Кремзуков

Проблемы защиты системы электроснабжения космических аппаратов от короткого замыкания при наземных испытаниях

Предлагается схемное и конструктивное решение быстродействующего блока защиты от коротких замыканий в цепях питания космического аппарата с аккумуляторной и солнечной батареями для предотвращения выхода из строя электронной аппаратуры.

Ключевые слова: короткое замыкание, аккумуляторная батарея, солнечная батарея, космическая аппаратура, наземные испытания, транзисторный двунаправленный ключ, MOSFEET.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-85-91

Система электроснабжения (СЭС) является одной из важнейших бортовых систем, обеспечивающих функционирование автоматических космических аппаратов (КА). СЭС представляет собой совокупность первичных и вторичных источников тока и комплекса автоматики, стабилизации и защиты.

Современные мировые тенденции развития перспективных КА направлены на увеличение эффективности, совершенствование служебных систем и ресурса бортовой аппаратуры и КА в целом. В связи с этим большое внимание уделяется СЭС КА, любые сбои в работе которой приводят к нарушению других систем, а при ее отказе – к завершению срока активного существования КА.

Основной задачей при построении СЭС КА является совершенствование характеристик силовой энергопреобразующей аппаратуры, а именно: улучшение удельных массогабаритных показателей, повышение надежности и долговечности. Для подтверждения заявленных параметров СЭС подвергается испытаниям на всех этапах – от экспериментальной отработки до комплексных испытаний КА. Наземные испытания космических аппаратов и их служебных систем, в том числе испытания энергопреобразующей аппаратуры СЭС на всех этапах производства, являются важной задачей создания высококачественной космической техники на предприятиях ракетно-космической отрасли [1–3].

Наземные испытания КА состоят из нескольких этапов: электрорадиотехнические испытания, интеграционные испытания, испытания на внешние воздействия, испытания после внешних воздействий, приемоиспытания КА.

При наземных испытаниях КА нарушение функционирования какого-либо электрического оборудования или внешнее механическое воздействие на кабельную сеть может привести к возникновению короткого замыкания (КЗ), а в некоторых случаях и возникновению пожара. Особо опасным является КЗ шин питания, идущих непосредственно от аккумуляторной батареи.

Также имеются случаи, когда в результате неопытности или невнимательности при монтаже без снятия напряжения допускались ошибки, приводившие к КЗ.

В силу различных причин такие КЗ могут возникать и при испытаниях КА внутри термобарокамеры (ТБК). В этом случае оперативно «потушить пожар» не представляется возможным. В мировой практике имеются случаи, когда в такой ситуации реально были «потеряны» готовые КА.

В связи с возрастающей энерговооруженностью КА увеличиваются, соответственно, энергетические характеристики аккумуляторных и солнечных батарей и в соответствии с этим возрастают токи короткого замыкания при их возникновении. Минимальные значения активного сопротивления питающих кабелей и их индуктивностей приводят к быстрому нарастанию тока короткого замыкания до предельных величин. На рис. 1 приведен пример экспериментального графика развития тока КЗ для аккумуляторной батареи (АБ) с активным сопротивлением кабеля около 40 мОм и индуктивностью около 10 мкГн.

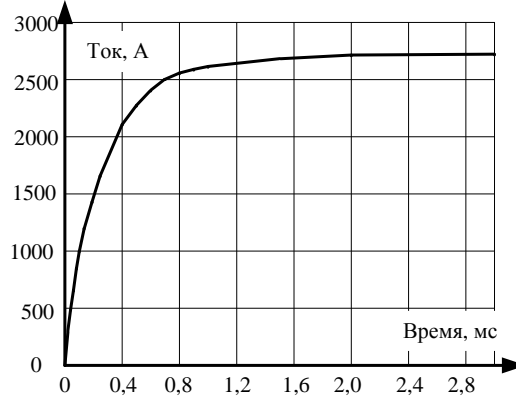


Рис. 1. Изменение тока в цепи АБ при КЗ

Динамика нарастания тока в начальный момент времени определяется в основном индуктивной составляющей нагрузки [4, 5]. Примерная оценка нарастания тока в начальный момент времени возникновения КЗ по приведенному графику подтверждает актуальность задачи поиска решения быстродействующей защиты от КЗ.

Термическая стойкость и сечение шин питания и отдельных проводников обычно рассчитываются с использованием формулы, известной как интеграл Джоуля для импульсного тока, который определяет

количество энергии, выделяющейся в проводнике при протекании электрического тока. Однако при этом нужно учитывать, что увеличение сечения проводников ведет к увеличению веса космического аппарата, что является ограничивающим фактором. Поэтому при таких расчетах не всегда удается полностью обеспечить защиту от любых КЗ, особенно от КЗ, происходящих в цепях, находящихся в непосредственной близости от АБ.

Для защиты от КЗ промышленность предлагает различные автоматические выключатели для цепей переменного и постоянного тока, начиная от простейших тепловых до использующих эффект сверхпроводимости [6–15], появившихся на рынке в последнее время. Минимально достижимое время срабатывания таких выключателей составляет десятки миллисекунд, а для большой перегрузки по току от 3–5 мс [16]. Однако для защиты цепей электронных схем микропроцессорных измерительных и управляющих устройств современных КА такого быстрого срабатывания защиты явно недостаточно. При приведенных выше скоростях нарастания тока КЗ необходимо прерывать его дальнейшее развитие за время, измеряемое единицами микросекунд. Достижение таких характеристик блока защиты (БЗ) возможно только с использованием электронных выключателей.

Такой выключатель, учитывая область применения, должен обладать, кроме быстрого действия на отключение, следующими свойствами:

- двухсторонняя проводимость, как и у механических выключателей;
- низкое сопротивление в открытом состоянии, определяющее низкое падение напряжения при значительных токах, а, следовательно, и малые тепловые потери;
- высокое проходное сопротивление в закрытом состоянии;
- малые утечки тока на корпус;
- хороший запас по напряжению пробоя относительно напряжения шины с аккумуляторной и солнечной батареями;
- иметь возможность рассеяния энергии самоиндукции, возникающей при разрыве шины питания в случае срабатывания защиты от КЗ;

– конструкция и используемая комплектация должны быть рассчитаны как для работы в нормальных климатических условиях, так и для работы в глубоком вакууме, при котором проходят испытания КА.

В первом поколении КА использовались шины питания с напряжением 27–28 В, а система электропитания (СЭП) обладала общей мощностью порядка нескольких киловатт. Однако с расширением функциональности КА, появлением обитаемых научных космических станций, аппаратов для исследования других планет энергопотребление выросло до 20 и более киловатт. В результате потребовался переход СЭП на 100 В шину для улучшения ее удельных энергетических и массогабаритных показателей [17–20]. Это определило параметры проектируемого БЗ:

напряжение – до 100 В; ток – до 200 А. Мощность тепловых потерь при максимальных значениях тока и напряжения была задана не превышающей 200 Вт.

Анализ имеющегося отечественного и зарубежного опыта построения быстродействующих БЗ показал [21–26], что наиболее целесообразным является использование в качестве ключей полевых транзисторов с МОП-структурой (MOSFET англ.), позволяющих при минимальных затратах мощности на управление переключением за счет высокого входного сопротивления иметь высокое быстродействие и низкое сопротивление в открытом состоянии. Однако основной проблемой при поиске подходящих полевых транзисторов как раз стало требование низкого сопротивления в открытом состоянии при напряжении пробоя, не менее как минимум двойного рабочего.

При заданной мощности тепловых потерь, с учетом того, что БЗ, для повышения надежности отключения при возникновении КЗ, должен состоять из двух последовательных ключей, а каждый ключ для требования двухсторонней проводимости должен состоять из двух встречно-последовательно включенных транзисторов, сопротивление транзисторов в открытом состоянии не должно быть более 1 мОм. Упрощенная принципиальная схема такого соединения транзисторов и ключей приведена на рис. 2.

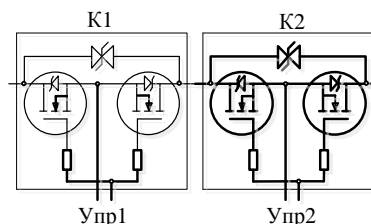


Рис. 2. Принципиальная схема соединения транзисторов и ключей

Транзисторов с такими характеристиками на данном этапе развития полупроводниковой электроники не существует, поэтому для получения требуемых параметров необходимо параллельное включение транзисторов для получения требуемого сопротивления и хорошего запаса по току.

Отличительной особенностью транзисторов с МОП-структурой является возможность их параллельной работы без тщательного подбора сопротивления в открытом состоянии $R_{ds(on)}$.

Известными из открытых источников лучшими отечественными транзисторами в керамических корпусах, позволяющих их применение в СЭС КА, с максимально допустимым постоянным напряжением сток-исток $U_{си\ max} = 200\ В$ на момент разработки БЗ являются транзисторы 2П760И с сопротивлением в открытом состоянии $R_{ds(on)} = 55\ мОм$ и 2П829Г с $R_{ds(on)} = 50\ мОм$. Однако очевидно, что столь значительное сопротивление не позволит использовать данные транзисторы, т.к. при параллельном соединении их количество отрицательно скажется на быстродействии и массогабаритных показателях БЗ.

Учитывая, что изделие предполагается использовать на этапе наземных испытаний КА, в подобных случаях считается возможным применение отдельных комплектующих не в керамических корпусах. Для таких изделий требуется более тщательно проводить предварительную дегазацию для использования их при испытаниях космической аппаратуры в ТБК.

Из отечественных изделий наилучшими характеристиками обладают MOSFEET-модули, аналоги зарубежных IRFK4H250 – МТКП1-80-2 с $R_{ds(on)} = 22$ мОм и МТКП1-100-2 с $R_{ds(on)} = 17$ мОм, а также аналог IRFK6H250 – М6ТКП-140-2 с $R_{ds(on)} = 14$ мОм. Имеющееся у этих модулей низкое сопротивление $R_{ds(on)}$ уже позволяет сконструировать БЗ, используя 20 модулей параллельно. Однако если рассматривать внутреннюю структуру этих изделий, то оказывается, что каждый модуль у первых двух уже включает по четыре параллельно соединенных транзистора, а у последнего шесть, что приводит к пропорциональному увеличению емкости затвора и к усложнению схемы управления. К тому же эти модули имеют значительные габаритные размеры по отношению к корпусам транзисторов ТО-220 или ТО-247, что также может отрицательно сказаться на массогабаритных характеристиках БЗ. Поэтому на момент проектирования было принято решение использовать зарубежный транзистор IRFP4668PbF с типичным значением $R_{ds(on)} = 8$ мОм ($I_d = 130$ А), установив по 10 таких транзисторов параллельно в каждой цепочке двух последовательных ключей. Следует отметить, что в то время, когда БЗ был уже изготовлен и проходил испытания, фирмой Infineon был выпущен транзистор IRF200P222 с еще меньшим типичным значением $R_{ds(on)} = 5,3$ мОм ($I_d = 182$ А), который можно будет использовать при дальнейшем тиражировании БЗ, получив при этом еще меньшие значения тепловых потерь при максимальном токе.

Серьезной проблемой при проектировании стал вопрос выбора датчика тока. Датчик должен обладать возможностью работы на постоянном токе прямого и обратного направлений, минимальной индуктивностью для точного преобразования тока в напряжение в широкой полосе частот. Иметь минимальное сопротивление для удовлетворения требованиям к рассеиваемой мощности на максимальном токе, а также иметь удовлетворительные массогабаритные показатели. Обычный токовый шунт, например из ряда 75 ШИСВ.1, не подходит, хотя имеет достаточную точность 0,2%, в ряду имеются номиналы для измерения тока от 10 до 2000 А, небольшие габариты, простую конструкцию, возможность работы в условиях разряженного пространства. Однако подобный класс шунтов имеет ограниченную рабочую полосу частот вследствие относительно большой индуктивности.

Эквивалентная схема шунта представляет собой активное сопротивление, последовательно с которым включены его паразитная индуктивность и параллельно емкость. Если емкость незначительна и

ею можно пренебречь, то индуктивное сопротивление оказывает существенное влияние. Динамика падения напряжения на шунте определяется формулой

$$U = R_{ш}i + L \frac{di}{dt}. \quad (1)$$

Из формулы видно, что чем больше производная тока, тем большую добавку в сопротивление вносит его индуктивная составляющая. Этой составляющей обычно пренебрегают, если

$$\omega L < 0,05R_{ш}, \quad (2)$$

где ω – эквивалентная частота фронта импульса [27]. Простые расчеты для динамики тока, приведенной на рис. 1, показывают, что для удовлетворения формуле (2) шунт должен иметь индуктивность в сотые доли наногенри. Однако в реальности индуктивность таких шунтов составляет порядка 50–70 нГн.

Специальные конструктивные приемы позволяют снизить паразитную индуктивность шунтов обычной конструкции и примером такого подхода являются, например, шунты с приемлемыми массогабаритными показателями, выпускаемые белорусской фирмой «Аякс» с использованием специальных материалов – фольги из никель-молибденового сплава и сплава «Церазин» [28]. Однако их номенклатура ограничена токами 50 А.

Отечественной и зарубежной промышленностью выпускается ряд малоиндуктивных шунтов трубчатого и коаксиального исполнения, однако рабочая полоса частот их ограничена частотами 10–50 кГц [29–31], а также они имеют значительные массогабаритные показатели для заданного значения максимального тока.

Существуют датчики тока на оптических принципах преобразования и передачи информации, это магнитооптические и акустооптические датчики [32, 33]. Достоинством их является оптическая изоляция от измерительных цепей. Используются в основном в высоковольтных применениях, имеют высокую точность, но диапазон частот до 6 кГц. Выпускаются в основном иностранными производителями.

Перспективным является класс датчиков тока, основанных на эффекте Холла. Этот эффект был открыт еще в XVIII в., но бурное развитие получил с 1990-х годов с появлением новых технологий, позволивших значительно снизить себестоимость производства самих ячеек Холла и интегральных схем на их основе, а также повысить их характеристики точности, полосы пропускания сигналов и величины измеряемых токов. Хорошей особенностью этих датчиков является наличие гальванической изоляции от измерительной цепи. Наибольший интерес для использования в проектируемом устройстве могут иметь датчики в интегральном исполнении, позволяющие их применение в условиях вакуума. Передовые позиции в производстве таких датчиков занимает немецкая фирма SENSITEC [34]. В таблице приведен перечень серий датчиков тока выпускаемых изделий.

Датчики тока фирмы SENSITEC

№ п.п.	Серия	I_{\max} , А	F_{\max} , кГц	Точн., %
1	CFS1000	1000	500	2
2	CMS2000	100	100	0,8
3	CMS3000	100	2000	0,8
4	CDS4000	150	400	0,8

Для нас наиболее близкими по параметрам могут являться датчики из серии CDS4000, имеющие при удовлетворительной точности достаточную полосу пропускания сигналов. Малое внутреннее сопротивление токопроводящей шины, равное 70 микроом, позволяет иметь минимальную мощность тепловых потерь на максимальном токе. Однако, к сожалению, ни один датчик из этой серии по току также не удовлетворяет заданному для проектируемого устройства.

Имеется еще один класс перспективных датчиков, выпускаемых швейцарской фирмой LEM [35, 36]. Отличительной особенностью является использование кольца из магнитного материала, в разрез которого устанавливается преобразователь тока в напряжение, в качестве которого может использоваться в том числе элемент на основе эффекта Холла [37]. Номенклатура изделий фирмы LEM очень широкая, и в ней можно найти по параметрам датчик на нужные значения тока, ширину полосы частот и хорошую точность. Однако данные датчики более близки по исполнению к приборам, имеют модульную структуру и корпус, как правило, из пластика, что ограничивает их применение для работы в глубоком вакууме.

Приведенный обзор показал, что подобрать готовый, выпускаемый промышленностью датчик по параметрам, требуемым для проектируемого устройства, не представляется возможным. Поэтому было решено использовать датчик собственной оригинальной разработки. В качестве базового элемента был взят пленочный безындуктивный резистор в планарном исполнении [38].

Такие резисторы в качестве датчиков тока используются довольно часто, в том числе в устройствах защиты от превышения тока и КЗ [39–41]. Они обеспечивают хорошие характеристики линейности, точности и могут использоваться для измерения величины токов в диапазоне частот до нескольких мегагерц, идеально подходят для условий эксплуатации проектируемого устройства.

Для разработки резистивного шунта были использованы одноваттные 1% резисторы с фактором 2512 номиналом 0,1 Ом. Для снижения мощности тепловых потерь было установлено 200 резисторов параллельно, что дало результирующее сопротивление 0,5 мОм. При максимальном токе 200 А мощность тепловых потерь будет равной 20 Вт. Для отвода тепла резисторы установлены между медными пластинами, отвод тепла от которых производится через теплопроводящие прокладки на корпус БЗ. Изображение шунта приведено на рис. 3.



Рис. 3. Токовый шунт

Шунт был подвергнут тепловому воздействию в диапазоне рабочих температур при эксплуатации изделия, заданной в задании на проектирование (от минус 25 до 40 °С). Испытания подтвердили, что ТКС не превосходит значения, заданного производителем резисторов (600 мм. рт. ст. / К).

Тепловым воздействиям подвергался каждый изготовленный шунт, и при установке в БЗ полученный ТКС прописывается в памяти управляющего микроконтроллера для коррекции показаний измерения тока по температуре. Датчик температуры устанавливается непосредственно на линейке резисторов шунта. Также в непосредственной близости от точки съема сигнала, для снижения помех, устанавливается плата с предварительным усилителем сигнала тока, снимаемого с шунта. Усилитель преобразует сигнал на выходе шунта в дифференциальный для дальнейшей передачи его по витой паре в блок управления БЗ.



Рис. 4. Общий вид блока защиты

Проходное сопротивление ключей, включая шунт, шины и разъемные соединения, не превысило 5 мОм во всем заданном диапазоне температур. Время срабатывания защиты составило менее 5 мкс.

Состояние каждой группы параллельно соединенных транзисторов непрерывно контролируется на состояние замкнуто/разомкнуто, а схема БЗ целиком на сопротивление изоляции относительно корпуса, которое должно быть более 20 МОм.

На рис. 4 приведен вид смонтированного БЗ со снятой крышкой. Габариты БЗ 550×250×100 мм, масса 7 кг.

Заключение

Разработанный блок защиты благодаря высокому быстродействию, которое составляет менее 5 мкс, позволяет предотвратить выход из строя электронной аппаратуры системы электропитания космического аппарата при наземных испытаниях в случае короткого замыкания в цепи аккумуляторной и солнечной батареи.

Проведенные стыковочные испытания БЗ с наземным силовым оборудованием в АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва» подтвердили правильность схемных и конструктивных решений, принятых на этапе разработки.

Литература

1. Автоматизированная система контроля энергопреобразующей аппаратуры систем электропитания космических аппаратов / Ю.А. Кремзуков, В.М. Рулевский, Ю.А. Шиняков, М.Н. Цветков // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 2 (22). – С. 274–280.
2. Аппаратно-программный комплекс автоматизации процессов предстартовых испытаний систем энергообеспечения космических аппаратов / Ю.А. Шурыгин, В.Н. Мишин, Ю.А. Кремзуков // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2–1 (24). – С. 305–309.
3. Автоматизированное рабочее место отработки и испытаний энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата / О.В. Бубнов, Ю.А. Кремзуков, В.А. Пчельников, В.М. Рулевский, Ю.А. Шурыгин // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 35–39.
4. Оценка величины паразитных индуктивностей тоководущих шин в источнике питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока при их размыкании / Н.П. Винтоняк, В.Д. Семенов, В.А. Кабилов, А.В. Кобзев, А.О. Сулайманов // Доклады ТУСУР. – 2016. – № 4 (19). – С. 129–132.
5. Оценка величины перенапряжения в источнике питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока при их размыкании / Н.П. Винтоняк, В.Д. Семенов, В.А. Кабилов, А.В. Кобзев, А.О. Сулайманов // Доклады ТУСУР. – 2017. – № 3 (20). – С. 210–219.
6. Крючков И.П. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования / И.П. Крючков, Б.Н. Неклипаев, В.А. Старшинов. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 461 с.
7. Дураков А.А. Анализ современных автоматических выключателей / А.А. Дураков, М.Ю. Михайлова // Актуальные вопросы технических наук в современных условиях: сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-практ. конф. – СПб.: ИЦРОН, 2015. – С. 205–209.
8. Акимов Е.Г. Автоматические выключатели: справочник / Е.Г. Акимов, М.М. Манухин. – М.: Ай Би Тех, 2005. – 376 с.
9. Колодяжный В.В. Возможности современных автоматических выключателей // Энергетические установки и технологии: сб. тр. Севастоп. гос. ун-та. – Севастополь, 2016. – Т. 2. – С. 43–49.
10. Waiss R. Energy Efficient Low-Voltage DC-Grids for Commercial Buildings / R. Waiss, L. Ott, U. Boeke // IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM). – 2015. – 5 p.
11. Hasla E. DC Task Team Report // IEEE Trans. – 2014. – Vol. 50, No. 5. – P. 2996-3003.
12. Alam M.S. Fault Current Limiters in Power Systems: A Comprehensive Review / M.S. Alam, M.A.Y. Abido, I. El-Amin // Energies. – 2018. – Vol. 11, No. 4. – 24 p.
13. Уайд Р. Электрические сети постоянного тока: новая защита от сверхтоков / Р. Уайд, Ж. Франсуа де Палма, Ж. Гонтье [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elec.ru/articles/elektricheskie-seti-posto-yanogotoka-novaya-zashi/>, свободный (дата обращения: 30.01.2019).
14. Performance Analysis of Surge Current Protection using Superconductors / K. Makinde, F.O. Enemuoh, O.K. Lawal, I. Umar, B. Abudakar, M.K. Mahmood // European Scientific Journal. – 2014. – Vol. 10, No. 19. – P. 183–192.

15. Okakwu I.K. Application of Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) in Power Systems: A Review / I.K. Okakwu, P.E. Okupre, E.A. Ogujor // EJERS, European Journal of Engineering Research and Science. – Vol. 3, No. 7, July 2018. – P. 28–32.

16. Время-токовые характеристики автоматических выключателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zametkielectrika.ru/vremya-tokovye-karakteristiki-avtomaticheskix-vyklyuchatelej/>, свободный (дата обращения: 30.01.2019).

17. Лукьяненко М.В. Энерговооруженность космических аппаратов и бортовые источники электроэнергии / М.В. Лукьяненко, В.С. Кудряшов // Вестник Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнёва. Энергетика. – 2008. – № 1. – С. 141–145.

18. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышов и др. – Новосибирск: Наука: Сиб. изд. фирма, 1994. – С. 318.

19. Нестеришин М.В. Современные системы электропитания космических аппаратов информационного обеспечения производства АО «ИСС» / М.В. Нестеришин, Н.В. Стадухин, П.А. Крючков // Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований: сб. науч. тр. АО «НПО Лавочкина». – 2017. – С. 476-483.

20. Черная М.М. Исследование и разработка энергопреобразующей аппаратуры высоковольтных систем электропитания космических аппаратов: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2017. – 142 с.

21. Пат. 2322744 РФ, МПК H02N 9/02, H03K 17/08. Коммутатор напряжения с защитой от перегрузок по току / А.А. Федосов (РФ). – № 2005134266/09; заявл. 08.11.2005, опубл. 20.04.2008. Бюл. № 11, 6 с.

22. Пат. 2397612 РФ, МПК H03K 17/08, H02M 3/156. Коммутатор напряжения с защитой от перегрузок по току / А.Я. Бичутский (РФ). – № 2009103606/09; заявл. 03.02.2009, опубл. 20.08.2010. Бюл. № 23, 11 с.

23. Пат. 124983 РФ, МПК H01M 10/00. Устройство защиты аккумуляторной батареи от пиковых токовых нагрузок / В.Е. Вдовин, В.А. Цуранов, В.Д. Марков, А.Г. Глазов (РФ). – № 2012123124/07; заявл. 04.06.2012, опубл. 20.02.2013. Бюл. № 5, 2 с.

24. Пат. 114527 РФ, МПК H01M 10/44, H02J 7/00. Устройство заряда аккумулятора и защита его от перегрузок / Е.В. Вдовин, В.А. Цуранов, С.А. Арташин (РФ). – № 2011142150/07; заявл. 18.10.2011, опубл. 10.03.2012. Бюл. № 7, 2 с.

25. Пат. 2500062 РФ, МПК H02N 7/26. Быстродействующее переключающее устройство для аккумуляторной батареи высокой мощности в изолированной сети постоянного тока / Ханс-Юрген Телле (DE), О. Ризиус (DE), А. Шульдт (DE), Г. Альф (DE), В. Маркс (DE). – № 2011104498; заявл. 26.06.2009, опубл. 27.11.2013. Бюл. № 33, 26 с.

26. Пат. 2592600 (РФ), МПК H01M 10/42, H01M 2/34. Вторичная батарея с защитой от перегрузки / У. Дональд П.Х. (TW). – №2015100557/07; заявл. 15.01.2015, опубл. 27.07.2016. Бюл. 21, 10 с.

27. Бочаров Ю.Н. Техника высоких напряжений: учеб. пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. – М.: Юрайт, 2017. – 264 с.

28. Измерительные токовые шунты от 1 до 50 А [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://ajax.by/shunt.html> свободный. (дата обращения: 15.02.2019).

29. Высокоточные шунты постоянного и переменного тока Transmille AC/DC shunts [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vltest.ru/sysfiles/files/Transmille-AC-DC-Shunts.pdf>, свободный (дата обращения: 22.02.2019).

30. Шунты токовые эталонные безреактивные серии ШЭ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mars.nt-rt.ru/images/manuals/ps_shunt.pdf, свободный (дата обращения: 22.02.2019).

31. Пат. 2394294 РФ, МПК H01C 3/00. Безындуктивный шунт / В.П. Гончаренко, К.К. Константинович, М.А. Витальевич (РФ). – № 2009116968/09; заявл. 04.05.2009, опубл. 10.07.2010. Бюл. № 19, 6 с.

32. Евстафьев А.И. Магнитооптический датчик электрического тока повышенной точности / А.И. Евстафьев, М.А. Ураксеев // Электротехнические комплексы и системы. – 2013. – Т. 9, № 1. – С. 84–88.

33. Абраменкова И. Оптические датчики тока и напряжения / И. Абраменкова, И. Корнеев, Ю. Троицкий // Компоненты и технологии. – 2010. – № 8. – С. 60–63.

34. CDS4000 family. Compact AMR current sensors with overcurrent detection [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sensitec.com/about-sensitec>, свободный (дата обращения: 25.02.2019).

35. Whats new at LEM? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.lem.com/en/news>, свободный (дата обращения: 27.02.2019).

36. Прецизионные датчики тока [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.efo-power.ru/BROSHURES_CATALOGS/LEM/High_Precision_Current_Transducers_RUS.pdf, свободный (дата обращения: 27.02.2019).

37. Гиларди М. Новые горизонты технологии датчиков тока на эффекте Холла // Силовая электроника. – 2015. – № 3. – С. 18–22.

38. Садков В.Д. Уточненная модель низкоомных пленочных резисторов с гребенчатой структурой / В.Д. Садков, А.В. Лопаткин // Изв. вузов: Электроника. – 2015. – Т. 20, № 6. – С. 607–615.

39. Колпаков А. Измерение тока в мощных импульсных преобразовательных устройствах // Электронные компоненты. – 2004. – № 2. – С. 77–83.

40. Колпаков А. Резистивные токовые шунты для применений высокой мощности / А. Колпаков, Е. Карташов // Компоненты и технологии. – 2010. – № 3. – С. 84–88.

41. Датчики тока. Резисторные датчики тока в схемах на МК [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nauchebe.net/2011/04/datchiki-toka%C2%A0-rezistornye-datchiki-toka-v-sxemax-na-mk/>, свободный (дата обращения: 27.02.2019).

Андреев Юрий Александрович

Канд. техн. наук, зав. лаб. научно-исследовательского института автоматизации и электромеханики Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (НИИ АЭМ ТУСУР)
Белинского ул., д. 53, г. Томск, Россия, 634034
Тел.: +7-903-914-9344
Эл. почта: niiiaem18@yandex.ru

Буров Сергей Юрьевич

Науч. сотр. НИИ АЭМ ТУСУР
Белинского ул., д. 53, г. Томск, Россия, 634034
Тел.: +7-905-991-3951
Эл. почта: bseyr@mail.ru

Кремзуков Юрий Александрович

Канд. техн. наук, зав. отд. НИИ АЭМ ТУСУР
Белинского ул., д. 53, г. Томск, Россия, 634034
Тел.: +7-903-950-8158
Эл. почта: kremzukov@niiiaem.tomsk.ru

Andreev Y.A., Burov S.Y., Kremzukov Y.A.

Problems of protecting the spacecraft power supply system from short circuit during ground tests of the spacecraft

A schematic and constructive solution is proposed for a high-speed device for protection against short circuits in the power supply circuits of a spacecraft with battery and solar batteries to prevent the breakdown of electronic equipment.

Keywords: battery, solar battery, short circuit, space equipment, ground tests, transistor bi-directional switch, MOSFEET.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-85-91

References

1. Kremzukov Ju.A., Rulevskij V.M., Shinjakov Ju.A., Cvetkov M.N. [Automated control system for energy-converting equipment of spacecraft power supply systems]. *Proceedings of TUSUR University*, 2010, no. 2 (22), pp. 274–280 (in Russ.).

2. Shurygin Ju.A., Mishin V.N., Kremzukov Ju.A. [Hardware and software complex for automation of prelaunch testing processes for spacecraft energy supply systems]. *Proceedings of TUSUR University*, 2011, no. 2–1 (24), pp. 305–309 (in Russ.).

3. Bubnov O.V., Kremzukov Ju.A., Pchel'nikov V.A., Rulevskij V.M., Shurygin Ju.A. [Automated workstation for testing and testing the energy-converting equipment of the spacecraft's power supply system]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 35–39 (in Russ.).

4. Vintonjak N.P., Semenov V.D., Kabirov V.A., Kobzev A.V., Sulajmanov A.O. [Estimation of the parasitic inductance of current-carrying tires in the power supply of the test complex for loading DC circuit breakers when they open]. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, no. 4 (19), pp. 129–132 (in Russ.).

5. Vintonjak N.P., Semenov V.D., Kabirov V.A., Kobzev A.V., Sulajmanov A.O. [Estimation of the overvoltage in the power supply of the test complex for loading DC circuit breakers when they open]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, no. 3 (20), pp. 210–219 (in Russ.).

6. Krjuchkov I.P., Neklipaev B.N., Starshinov V.A. *Raschet korotkih замыkanij i vybor jelektrooborudovanija* [Calculation of short circuits and selection of electrical equipment]. Moscow, Publishing Center «Academy», 2005, – 461 p. (in Russ.).

7. Durakov A.A., Mihajlova M.Ju. [Analysis of modern circuit breakers]. S. Petersburg, *ICDES*, 2015, pp. 205–209 (in Russ.).

8. Akimov E.G., Manuhin M.M. *Avtomaticheskie vykljuchateli. Spravochnik* [Circuit breakers. Directory]. Moscow, «I B Tech» Publ., 2005, 376 p. (in Russ.).

9. Kolodzjzhnyj V.V. [Possibilities of modern circuit breakers]. *Power plants and technologies*. Collection of works of the Sevastopol State University, Sevastopol, 2016, vol. 2, pp. 43–49 (in Russ.).

10. Waiss R, Ott L, Boeke U. Energy Efficient Low-Voltage DC-Grids for Commercial Buildings. *IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, 2015, 5 p.

11. Hasla E. DC Task Team Report. *IEEE Trans*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 2996–3003.

12. Alam S., Abido M.A.Y., El-Amin I. Fault Current Limiters in Power Systems. A Comprehensive Review. *Energies*, vol. 11, issue 4, April 2018, 24 p.

13. Uaid R., Fransua de Palma Zh., Gont'e Zh. *Jel'ektricheskie seti postojannogo toka: novaja zashhita ot sverhtokov* [DC power networks: a new protection against overcurrents]. Available at: <https://www.elec.ru/articles/>

elektricheskie-seti-postoyannogo-toka-novaya-zashi/ (Accessed: January 30, 2019).

14. Makinde K., Enemuoh F.O., Lawal O.K., Umar I., Abudakar B., Mahmood M.K. Performance Analysis of Surge Current Protection using Superconductors. *European Scientific Journal*, July 2014 edition, vol. 10, no. 19, pp. 183–192.

15. Okakwu I.K., Orukpe P.E., Ogujor E.A. Application of Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) in Power Systems. *EJERS, European Journal of Engineering Research and Science*, vol. 3, no. 7, July 2018, pp. 28–32.

16. *Time current characteristics of circuit breakers* [Time current characteristics of circuit breakers]. Available at: <http://zametkielectrika.ru/vremya-tokovye-xarakteristiki-avtomaticheskix-vyklyuchatelej/> (Accessed: January 30, 2019).

17. Luk'janenko M.V., Kudrjashov V.S. [The power ratio of spacecraft and on-board sources of electricity]. *Bulletin of the Siberian State Aerospace University. Academician M.F. Reshetneva: Energetik section*, 2008, vol. 1, pp. 141–145.

18. Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyshov V.I., Isljaev Sh.N. *Sistemy jelektricitaniya kosmicheskix apparatov* [Spacecraft Power Systems]. Novosibirsk, Science, Sib. publishing company, 1994, 318 p.

19. Nesterishin M.V., Staduhin N.V., Krjuchkov P.A. [Modern power supply systems for spacecraft for information support of production of JSC "ISS"]. *Actual issues of designing automatic spacecraft for fundamental and applied research: a collection of scientific papers of NPO Lavochkina JSC*, 2017, pp. 476–483 (in Russ.).

20. Chernaja M.M. *Issledovanie i razrabotka jenergo-preobrazu-jushhej apparatury vysokovol'tnyh sistem jelektricitaniya kosmicheskix apparatov* [Research and development of energy-transforming apparatus for high-voltage power systems for spacecraft]. Cand. Diss., Tomsk, 2017, 142 p.

21. Fedosov A.A. *Kommutator naprjazhenija s zashhitoy ot peregruzok po toku* [Over current switch with overcurrent protection]. Patent RF, no. 2322744, 2008.

22. Bichutskij A.Ja. *Kommutator naprjazhenija s zashhitoy ot peregruzok po toku* [Over current switch with overcurrent protection]. Patent RF, no. 2397612, 2010.

23. Vdovin V.E., Curanov V.A., Markov V.D., Glazov A.G. *Ustrojstvo zashhity akkumuljatornoj batarei ot pikovyh tokovyh nagruzok* [Battery protection device against peak current loads]. Patent RF, no. 124983, 2013.

24. Vdovin E.V., Tsuranov V.A., Artashin S.A. *Ustrojstvo zarjada akkumuljatora i zashhita ego ot peregruzok* [Battery charge device and protection against overload]. Patent RF, no. 114527, 2012.

25. Telle Hans-Jurgen, Rizius O., Shul'dt A., Al'f G., Marks V. *Bystrodejstvujushhee pereklyuchajushhee ustrojstvo dlja akku-muljatornoj batarei vysokoj moshhnosti v izolirovannoj seti postojannogo toka* [High Speed Switching Device for High Power Rechargeable Battery in Isolated DC Network]. Patent RF, no. 2500062, 2013.

26. Donal'd U. *Vtorichnaja batareja s zashhitoy ot peregruzki* [Secondary battery with overload protection]. Patent RF, no. 2592600, 2016.

27. Bocharov Ju.N., Dudkin S.M., Titkov V.V. *Tehnika vysokih naprjazhenij: Ucheb. posobie* [High Voltage Technique: Tutorial]. M., Yurayt, 2017, 264 p.

28. *Izmeritel'nye tokovye shunty ot 1 A do 50 A* [Measuring current shunts from 1 A to 50 A]. Available at: <http://ajax.by/shunt.html> (Accessed: February 15, 2019).

29. *Vysokotochnye shunty postojannogo i peremennogo toka Transmille AC/DC shunts* [High precision DC and AC shunts Transmille AC/DC shunts]. Available at: <http://vltest.ru/sysfiles/files/Transmille-AC-DC-Shunts.pdf> (Accessed: February 22, 2019).

30. *Shunty tokovye jetalonnnye bezreaktivnye serii ShJe* [Shunts current reference reactive Shche series]. Available at: https://mars.nt-rt.ru/images/manuals/ps_shunt.pdf (Accessed: February 22, 2019).

31. Goncharenko V.P., Konstantinovich K.K., Vital'evich M.A. *Bezinduktivnyj shunt* [Without inductive shunt]. Patent RF, no. 2394294, 2010.

32. Evstaf'ev A.I., Urakseev M.A. [High precision magneto-optical current sensor]. *Electrical complexes and systems*, 2013, vol. 9, no 1, pp. 84–88 (in Russ.).

33. Abramenkova I., Korneev I., Troickij Ju. [Optical current and voltage sensors]. *Components and Technology*, 2010, no 8. pp. 60–63 (in Russ.).

34. CDS4000 family. Compact AMR current sensors with overcurrent detection. Available at: <https://www.sensitec.com/about-sensitec> (Accessed: February 25, 2019).

35. What's new at LEM? Available at: <https://www.lem.com/en/news> (Accessed: February 27, 2019).

36. *Precizionnye datchiki toka* [Precision current sensors]. Available at: http://www.efo-power.ru/BROSHURES_CATALOGS/LEM/High_Precision_Current_Transducers_RUS.pdf (Accessed: February 27, 2019).

37. Gilardi M. [New Horizons of Hall Effect Current Sensor Technology]. *Power Electronics*, 2015, no. 3, pp. 18–22 (in Russ.).

38. Sadkov V.D., Lopatkin A.V. [Refined model of low-resistance film resistors with a comb structure]. *University Proceedings, Electronics*, 2015, vol. 20, no. 6, pp. 607–615 (in Russ.).

39. Kolpakov A. [Current measurement in high-power pulse converting devices]. *Electronic components*, 2004, no. 2, pp. 77–83 (in Russ.).

40. Kolpakov A., Kartashov E. [Resistive current shunts for high power applications]. *Components and Technologies*, 2010, no. 3, pp. 84–88 (in Russ.).

41. *Datchiki toka. Rezistornye datchiki toka v shemah na MK* [Current sensors. Resistor current sensors in MK circuits]. Available at: <http://nauchebe.net/2011/04/datchiki-toka%C2%A0-rezistornye-datchiki-toka-v-sxemax-na-mk/> (Accessed: February 27, 2019).

Yury A. Andreev

Candidate of Engineering Sciences,
Head of Laboratory, Research Institute of Automation and Electromechanics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (NII AEM TUSUR) 53, Belinsky st., Tomsk, Russia, 634034
Phone: + 7-903-914-9344
Email: niaaem18@yandex.ru

Sergey Y. Burov

Researcher NII AEM TUSUR
53, Belinsky st., Tomsk, Russia, 634034
Phone: + 7-905-991-3951
Email: bseyr@mail.ru

Yury A. Kremzukov

Candidate of Engineering Sciences NII AEM TUSUR
53, Belinsky st., Tomsk, Russia, 634034
Phone: + 7-903-950-8158
Email: kremzukov@niaaem.tomsk.ru