

**Проценко Николай Александрович**

**Разработка байпасного устройства аккумуляторных батарей  
космического назначения с термомеханическим  
преобразователем на основе материала с эффектом памяти формы**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск - 2013 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кубанский государственный технологический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Бледнова Жесфина Михайловна

Официальные оппоненты: Букреев Виктор Григорьевич, доктор технических наук, профессор.  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кафедра электропривода и электрооборудования, профессор

Тарасов Сергей Юльевич, доктор технических наук.  
Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, лаборатория физики упрочнения поверхности, старший научный сотрудник

Ведущая организация: ОАО «НПЦ «Полюс», г. Томск

Защита состоится 30 апреля 2013 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д212.269.11 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7, аудитория 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Автореферат разослан 29 марта 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета к.т.н., доцент

Ю.Н. Дементьев

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность.** Система электропитания бортовых систем космических аппаратов (КА) – жизненно важный элемент обеспечения их надежной работы. Все возрастающие требования к удельным весовым характеристикам бортовых источников питания и увеличение срока их активного существования вызывают необходимость поиска новых путей решения этой задачи, новых материалов и технологий. Наиболее энергоемкими среди всех перезаряжаемых химических источников тока являются литий-ионные аккумуляторы (ЛИА). Для обеспечения безотказной работы аккумуляторных батарей (АБ) космического аппарата необходимо предусматривать байпасные устройства (БУ), парирующие отказ неисправного аккумулятора. Использование низковольтных контактов в качестве коммутаторов БУ для переключения силовых цепей АБ при локализации аварийных ЛИА является наиболее эффективным решением.

Исследованиями физических явлений в низковольтных силовых контактах, созданием технологий их изготовления и условиями работы в вакууме занимались известные ученые и конструкторы: Р. Хольм, И.С. Таев, О.Б. Брон, Б.К. Буль, В.В. Усов, И.В. Крагельский, С.Б. Айнбиндер и др. Однако до настоящего времени отсутствуют промышленно выпускаемые байпасные устройства, обеспечивающих высоконадежное отключение аварийного ЛИА в течение всего срока активного существования космического аппарата с предварительным тестированием в производственных условиях.

Важным фактором при эксплуатации БУ является влияние переходного электрического сопротивления контактов, значение которого определяется не только конструкцией и характеристиками используемых материалов, но и технологией изготовления элементов байпасного устройства с учетом тепловыделения и КПД аккумуляторных батарей.

Кроме того, существующие в настоящее время БУ отечественного и зарубежного производства имеют принципиальный недостаток - невозможность обратной проверки работоспособности на стадии изготовления и приемосдаточных испытаний. Эта задача может быть решена за счет использования функциональных материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) в термомеханическом преобразователе фиксатора, разрешающего переключение силовых контактов байпасного устройства.

Значительный вклад в теоретические исследования материалов с ЭПФ и прикладные аспекты их реализации в различных изделиях внесен российскими (М.И. Алымов, В.А. Андреев, С.П. Беляев, А.Е. Волков, В.Г. Курдюмов, В.А. Лихачев, А.И. Лотков, Н.А. Махутов, А.А. Мовчан, А.И. Разов, Н.Н. Реснина, В.Г. Пушкин, В.Е. Панин, С.Д. Прокошкин, В.Н. Хачин, М.А. Хусаинов, С.В. Шишкин и др.) и зарубежными учеными (С.М. Вейман, О. Ооцука, Э. Хорнбоген и др.).

Однако отсутствие оптимальной технологии изготовления силовых элементов из материалов с эффектом памяти формы служит препятствием при минимизации массогабаритных параметров термомеханического преобразователя БУ.

Таким образом, актуальными задачами являются: создание новых конструкций байпасных устройств, повышающих уровень эксплуатационной без-

опасности функционирования ЛИАБ космических аппаратов; пути улучшения технологии изготовления элементов БУ, обеспечивающие необходимые характеристики срабатывания силовых контактов.

**Объектом исследования** является байпасное устройство для коммутации электрических цепей литий-ионной аккумуляторной батареи космического аппарата.

**Предметом исследования** является конструкция байпасного устройства литий-ионной аккумуляторной батареи и технологии изготовления его элементов.

**Цель работы** состоит в улучшении характеристик байпасного устройства, гарантирующего необходимый уровень надежности литий-ионных аккумуляторных батарей космического назначения в процессе эксплуатации.

**Задачи исследования:**

- анализ особенностей и тенденция развития байпасных устройств ЛИАБ космического назначения, формулировка путей повышения эксплуатационных характеристик;
- разработка тепловой модели ЛИАБ для определения необходимого времени срабатывания БУ и максимальной допустимой температуры термомеханического преобразователя из материала с ЭПФ с экспериментальной проверкой расчетных значений;
- разработка новых конструктивно-технологических решений БУ с термомеханическими преобразователями на основе современных материалов и технологий;
- разработка математических моделей усилий исполнительного механизма и силовых контактов БУ;
- разработка технологии изготовления силовой контактной группы для снижения переходного сопротивления;
- решение задачи оценки реактивных усилий и напряжений в упругом термомеханическом элементе из материалов с ЭПФ;
- разработка технологии изготовления термомеханического преобразователя с оптимизацией режимов обработки материала с ЭПФ;
- экспериментальная проверка БУ на устойчивость к воздействию эксплуатационных факторов с оценкой вероятности безотказной работы предложенных конструктивно-технологических решений.

**Методы исследования.** В диссертационной работе использовались: теория электрических аппаратов, технология машиностроения, физическое и математическое моделирование, электронная микроскопия и физические методы исследования. Оценка адекватности результатов теоретических исследований осуществлялась на экспериментальных стендах и опытных образцах байпасного устройства.

**Достоверность полученных результатов** исследований обеспечивается использованием современного оборудования и методов исследования, а также согласованностью результатов теоретических и экспериментальных исследований, сравнительной оценкой с результатами работ других авторов.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- разработаны конструкции байпасного устройства с термомеханическим преобразователем на основе материала с эффектом памяти формы, позволяющие обеспечить многократную проверку работоспособности на стадии изготовления и испытаний при заданной вероятности безотказной работы в процессе эксплуатации устройства;
- предложены модели усилий исполнительного механизма и силовых контактов байпасного устройства, учитывающие условия возникновения искровых разрядов и дуги между подвижным и неподвижными контактами;
- оптимизированы режимы термообработки материала с эффектом памяти формы, обеспечивающие максимальное усилие при перемещении фиксатора исполнительного механизма байпасного устройства.

**Практическая ценность работы:**

- разработана технология изготовления силовой контактной группы байпасного устройства, позволяющая получить минимальное переходное сопротивление контактов;
- предложена технология изготовления термомеханического преобразователя байпасного устройства, сочетающая классическую технологию изготовления пружин с технологией производства изделий из материалов с эффектом памяти формы;
- разработана тепловая модель, позволяющая определить граничные значения температур фазовых превращений материала с ЭПФ для термомеханического преобразователя, учитывающая характеристики среды в КА.

**Основные защищаемые положения:**

- конструкции БУ с термомеханическим преобразователем на основе материала с ЭПФ, впервые позволившие обеспечить многократную проверку работоспособности на стадии изготовления и испытаний при заданном уровне вероятности безотказной работы устройства;
- модели усилий исполнительного механизма и силовых контактов БУ, учитывающие динамический характер условий возникновения искровых разрядов и дуги между подвижным и неподвижными контактами;
- тепловая модель ЛИАБ, позволяющая определить предельно допустимое время переключения БУ и граничные значения температуры фазовых переходов материала с ЭПФ, используемого в термомеханическом преобразователе байпасного устройства ЛИАБ космического назначения;
- технология изготовления силовой контактной группы БУ, позволяющая получить минимальное переходное сопротивление контактов;
- технология изготовления термомеханического преобразователя, сочетающая классическую технологию изготовления пружин с технологией производства изделий из материалов с ЭПФ для обеспечения оптимальных реактивных усилий.

**Реализация результатов работы.** Работа выполнялась в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно - технологического комплекса России на 2007-2012 годы»; Федеральной космической программы России на 2006-2015 годы, (подраздел: перспективные технологии и обеспечение надежности ракетно-

космической техники), предусматривающей разработку интеллектуальных датчиков, новых конструкционных и функциональных материалов, систем измерения, контроля, диагностики и аварийной защиты ракетно-космической техники, а также повышение надежности космических комплексов; при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проекты 2.1.2/6803 2009-2010 гг. и 2.1.2/9426-2011г.) по НИР «Разработка физико-технологических основ создания высоконадежных электромеханических устройств с использованием материалов с памятью формы для обеспечения эффективной и надежной работы литий-ионных аккумуляторных батарей космического назначения».

Разработанное БУ внедрено в производство на ОАО «Сатурн» (г. Краснодар) и используется для локализации неисправных аккумуляторов ЛИАБ космических аппаратов «Глонасс – К2». Результаты исследований также используются в учебном процессе при подготовке студентов Кубанского государственного технологического университета по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» по курсу «Механика материалов и конструкций».

**Апробация результатов диссертации.** Результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: II Всероссийской конференции «Информационные технологии в авиационной и космической технике - 2009» М.: МАИ, 2009 г.; IV Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», Екатеринбург, 2009; III Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» DFMN-2009, ИМЕТ им. А.А. Байкова, Москва, 2009; международной конференции «Актуальные проблемы прочности» Витебск 2012; Международной конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» М.: ИМАШ РАН, 2012; European Symposium on Martensitic Transformations ESOMAT-2012; Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем», Красноярск, 2009, 2012; XVIII научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства», Томск, 2010; Всероссийской научно-практической конференции «Современные наукоемкие инновационные технологии в машиностроении», Самара, 2010; научно-технических семинарах кафедры электропривода и электрооборудования Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Публикации.** Результаты выполненных исследований отражены в 25 публикациях, в том числе: 5 в научно-технических журналах, определенных перечнем ВАК, 2-х патентах РФ на изобретение и решении на выдачу патента на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 167 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня литературы и приложения, в том числе 78 рисунков, 20 таблиц, перечня литературы из 76 наименований и 3-х приложений на 3-х страницах.

### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность выполняемой разработки, сформулирована цель диссертационной работы, научная новизна и практическая ценность исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

**В первой главе** выполнен анализ отказов ЛИА в АБ космического аппарата, которые парируются байпасным устройством путем создания обводной электрической цепи неисправного аккумулятора. Обзор известных конструкций промышленно выпускаемых БУ (NEA (США) для SAFT (Франция), Mitsubishi Electric (Япония), НПЦ «Полус» (Россия)), используемых для оснащения ЛИАБ КА, отражает их существенный недостаток – невозможность проверки срабатывания каждого образца устройства на этапе приемо-сдаточных испытаний перед установкой в ЛИАБ, что повышает вероятность отказа этого узла.

Определены основные требования, предъявляемые к байпасному устройству ЛИАБ космических аппаратов: обеспечение максимальной надежности срабатывания БУ с возможностью проверки его работоспособности при минимальных массогабаритных характеристиках; контактная группа БУ должна иметь минимальное переходное сопротивление и обеспечить неразрывность электрической цепи батареи во время переключения силовых контактов (табл. 1).

Таблица 1 - Количественная оценка требований предъявляемых к БУ космического аппарата.

|                                                                     |       |
|---------------------------------------------------------------------|-------|
| Переходное сопротивление силовой контактной группы, не более, мкОм: | 500   |
| Масса, не более, г,                                                 | 60    |
| Время переключения, не более, мс                                    | 0,5   |
| Вероятность безотказной работы, не хуже                             | 0,999 |

Для выполнения требования возможности проведения пробных срабатываний БУ при сохранении высоких удельных массогабаритных характеристик

предложено использовать термомеханический преобразователь из сплава с ЭПФ в конструкции фиксатора исполнительного механизма. Материалы ЭПФ обладают значительным циклическим ресурсом, что обеспечивает проведение всех наземных испытаний и гарантирует активацию БУ на орбите в составе космического аппарата.

Среди существующих силовых элементов термомеханических преобразователей наиболее рациональными для использования в конструкции БУ ЛИАБ являются пружины витые и тарельчатые из материалов с ЭПФ. В тарельчатой пружине инициирование памяти формы осуществляется плоским нагревательным элементом, установленным между несколькими пружинами, а в витых пружинах различной конструкции – пропусканием тока управления при наличии электроизоляционного слоя между витками.

**Вторая глава** содержит анализ тепловых режимов работы ЛИАБ в процессе эксплуатации, которые могут оказать существенное влияние на работоспособность БУ, в частности, на возможность ложного срабатывания термомеханического преобразователя. В космическом аппарате интенсивность нагрева элементов аккумуляторной батареи определяется теплоемкостями, тепловыми связями элементов и мощностью тепловыделения с учетом температуры окружающей среды. Мощность тепловыделения, в свою очередь, существенно зависит от времени короткого замыкания байпасным устройством неисправного аккумулятора.

Для оценки теплофизических параметров аккумулятора разработана энергобалансная модель ЛИА, основанная на уравнении энергетического баланса:

$$W_T = (U_{\text{ЛИА}} - U_{\text{ТН}}) \cdot I \quad (1)$$

где:  $W_T$  - мощность тепловыделения аккумулятора при циклировании;  $U_{\text{ЛИА}}$  - напряжение, соответствующее текущей температуре аккумулятора;  $U_{\text{ТН}}$  - термонейтральное напряжение;  $I$  - ток, протекающий через аккумулятор (имеет положительное значение при заряде ЛИА).

При определении мощности  $W_T$  тепловыделения аккумулятора в циклах «заряд-разряд» предполагается, что КПД в процессе заряда ЛИА принимает максимальное значение, а ток саморазряда пренебрежимо мал.

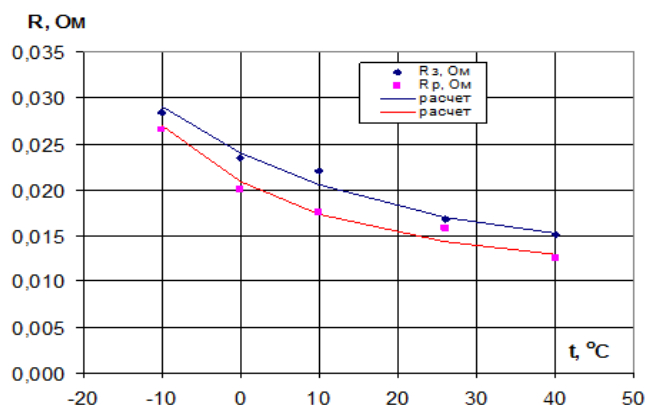


Рис. 1 Зависимость внутреннего сопротивления аккумуляторов типа ЛИГП-25 (ОАО «Сатурн») от температуры

Изменение температуры литий-ионного аккумулятора можно рассчитать по уравнению теплового баланса, используя циклограмму тепловыделения, по формуле (1) при известных значениях теплового сопротивления  $R_{\text{ЛИА}}$  и теплоемкости  $C_{\text{ЛИА}}$ :

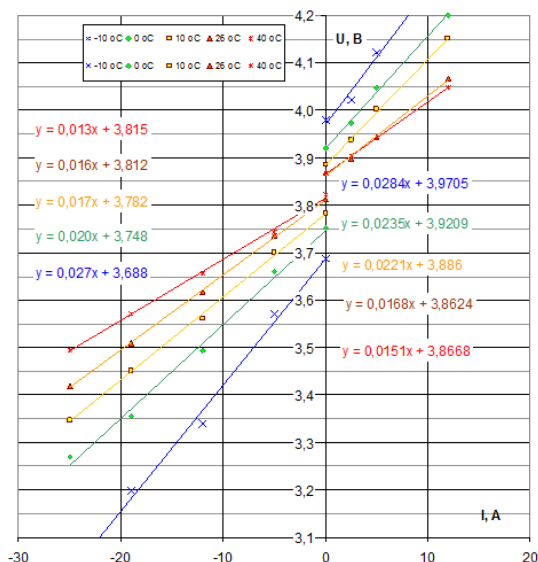


Рис. 2 Напряжения аккумуляторов типа ЛИГП-25 (ОАО «Сатурн») при степени заряженности равной 0,5

ного ЛИА определялось интегрированием по последним нескольким режимным циклам «заряд – разряд» до момента отключения (достижения стабилиза-

На основе экспериментальных и теоретических исследований установлено, что такие параметры аккумулятора, как зарядное  $R_z$  и разрядное  $R_p$  сопротивления, определяющие установившиеся значения напряжения аккумулятора, существенно зависят от температуры (рис.1).

При этом вольт-амперную характеристику аккумулятора для разных температур, с определенной точностью, можно аппроксимировать линейной зависимостью (рис. 2).

$$W_T = C_{\text{ЛИА}} \frac{dT}{dt} + \frac{(T - T_{\text{ТП}})}{R_{\text{ЛИА}}}, \quad (2)$$

где:  $T$  - температура аккумулятора;  $T_{\text{ТП}}$  – температура термоплаты.

Идентификация параметров тепловой модели ЛИА проводилась методом подбора по результатам испытаний на примере опытного образца батареи 6ЛИ-25. На рис. 3 схематично представлена конструкция АБ 6ЛИ-25 с установленными термодатчиками. Для испытаний АБ помещается в зарядно-разрядный стенд с регулируемой температурой термоплаты. Тепловое сопротивление  $R_{\text{ЛИА}}$  для каждого указан-

ции температуры АБ). Значения  $C_{\text{ЛИА}}$  и  $U_{\text{ТН}}$  определялись подбором их значений при решении уравнения (1) в сравнении с экспериментальными кривыми.

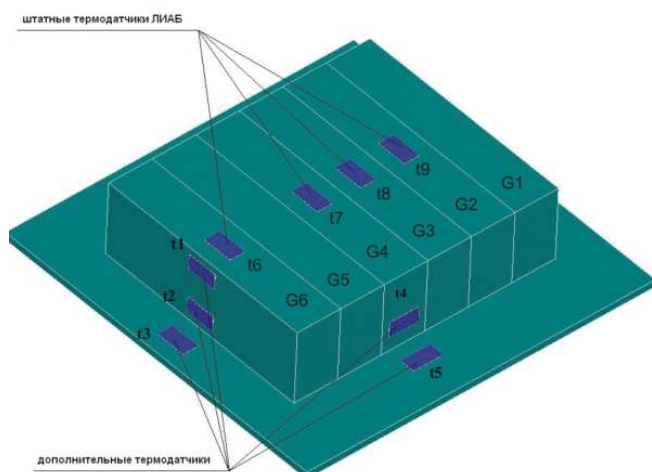


Рис. 3 Расположение термодатчиков на АБ 6ЛИ-25

Критериями работоспособности БУ является время его срабатывания, при котором возникающее вследствие короткого замыкания тепловыделение в объеме ЛИА не приводит к значениям температур соседних ЛИА выше  $90^{\circ}\text{C}$  и значению температуры медного провода в районе борна выше  $100^{\circ}\text{C}$ . Ограничение по температуре провода в районе борна определено из соображений сохранения герметичности ЛИА и локализации неисправности.

При моделировании тепловых процессов в ЛИАБ приняты следующие допущения: задача распределения температуры в системе решается в двумерной области и рассматривается фрагмент АБ, состоящий из одного ряда ЛИА, в числе которых находится ЛИА с коротким замыканием (рис.4); ЛИА с КЗ является крайним и теплопередача через провод от ЛИА с к.з. осуществляется к одному соседнему аккумулятору; в соответствии с энергобалансной моделью ЛИА в расчетах используется усредненная по объему ЛИА (в каждый интервал времени) температура; блок электродов занимает весь внутренний объем ЛИА; в районе борна и БУ теплофизические характеристики элементов определяется только массогабаритными характеристиками силовых проводов.

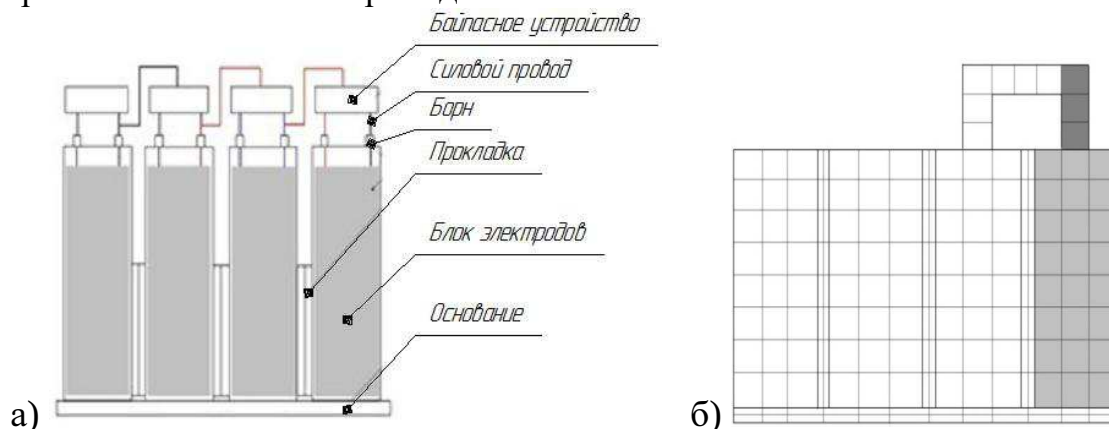


Рис. 4 Схема расположения ЛИА в АБ – а); расчетная сетка для решения уравнения теплопроводности – (б)

Результаты моделирования тепловых процессов в ЛИАБ в случае отказа одного из аккумуляторов на основе разработанной модели представлены на рис. 5. Максимальный нагрев провода в районе борна ЛИА с к.з. происходит в момент окончания работы БУ (рис. 5) при  $t_{\text{БУ}} = 3 \text{ с}$ . Поэтому оптимальным значением критерия безопасной работы БУ следует считать время срабаты-

ния  $t_{\text{БУ}} < 2-3 \text{ с}$ . Тепловая модель ЛИА позволяет достаточно точно прогнозировать мощность тепловыделений при разных режимах эксплуатации АБ. Модель адекватна для аккумуляторов, полученных масштабированием, в конструкции которых использованы одинаковые материалы электрохимической группы.

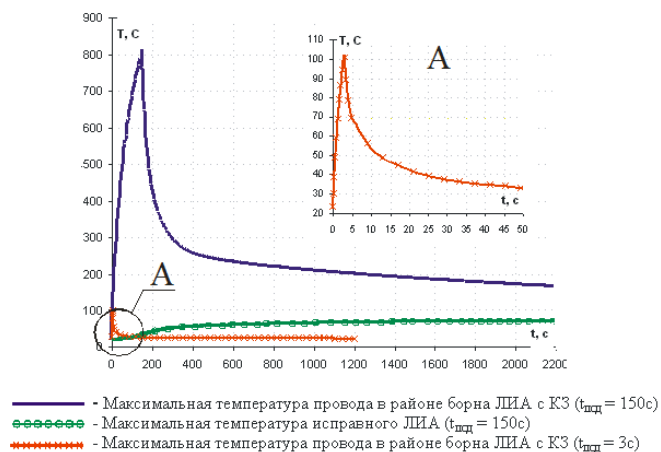


Рис. 5 Температура провода в районе борна и температура исправного ЛИА

рекомендован сплав на основе TiNi, по составу, близкий к эквиаtomному. Изменение интервала мартенситных превращений сплава на основе TiNi регулировалось термомеханической обработкой.

**В третьей главе** предложены конструкции исполнительного механизма и силовой контактной группы БУ. Байпасное устройство (рис. 6) состоит из корпуса 1 с рабочей пружиной 2, штока 3 с подвижным контактом 4, неподвижных контактов 5, штока фиксатора 6, термомеханического преобразователя на основе термочувствительного элемента с ЭПФ 7, электрического нагревательного элемента 8.

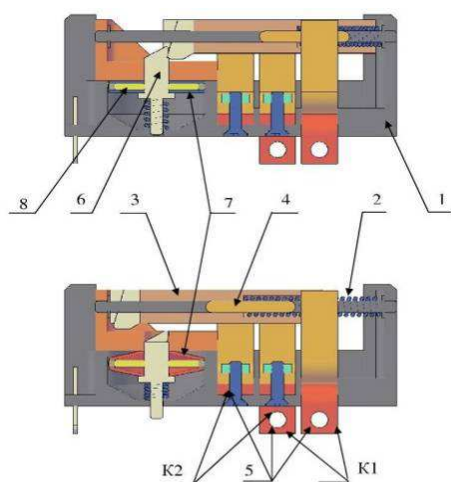


Рис. 6 Байпасное устройство с силовым элементом в форме тарельчатых пружин (патент № 2415489)

При выходе из строя или снижении характеристик аккумулятора на электронагревательный элемент 8 соответствующего БУ подается напряжение, термомеханический преобразователь 7 нагревается. При фазовом переходе преобразователь 7 генерирует механические усилия и перемещает шток фиксатора 6 вниз, освобождая путь движению штока 3 с подвижным контактом 4 под действием рабочей пружины 2. Подвижный контакт 4, на определенный промежуток времени, замыкает нормально разомкнутые контакты К2, а затем размыкает нормально замкнутые контакты К1. При этом общая цепь соединения аккумуляторов не разрывается в процессе переключения. Этот вариант БУ имеет существенное пре-

В результате детального анализа режимов работы и конструкций аккумуляторных батарей и БУ с учетом температур хранения и эксплуатации АБ определена минимальная температура начала обратного мартенситного превращения в материале с ЭПФ термомеханического преобразователя БУ, которая составила  $80^{\circ}\text{C}$  и максимальная температура конца данного фазового перехода, примерно  $120^{\circ}\text{C}$ . На основе анализа источников информации для термопреобразователя БУ

имущество перед аналогичными устройствами других производителей. Отличительная особенность конструкции заключается в том, что исполнительный механизм и фиксатор выделены в отдельные узлы, движение которых осуществляется последовательно и независимо друг от друга. Скорость перемещения исполнительного механизма и такой важный параметр как время КЗ ЛИА не зависят от времени разогрева термомеханического преобразователя и скорости перемещения фиксатора, а определяется скоростью движения штока и линейным размером установленного на нем подвижного контакта.

Расчет силового элемента БУ в форме тарельчатых пружин из сплава TiNi, выполненный с использованием термомеханической диаграммы, показал, что для обеспечения необходимого перемещения штока  $\delta = 2,4 \text{ мм}$  достаточно двух колец (размеры: толщина тарельчатой пружины  $h = 0,5 \text{ мм}$ , внутренний

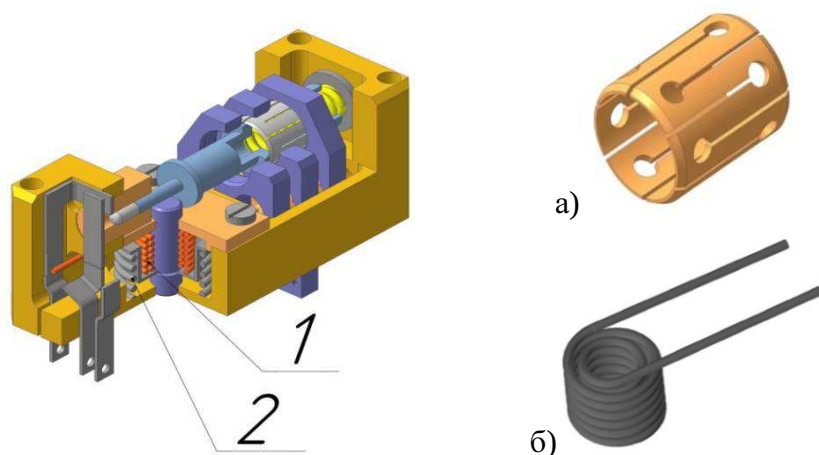


Рис. 7 БУ с контактной группой в виде трех неподвижных соосных контактов и подвижного контакта в виде разрезной втулки (цанги а) - подвижный контакт БУ; б) - термомеханический преобразователь из материала с ЭПФ в виде двойной концентрической пружины (1) (патент № 2392494, решение о выдаче патента по заявке № 2011122292, опуб. 07.12.2012)

радиус  $R_1 = 2 \text{ мм}$ , и наружный радиус  $R_2 = 8 \text{ мм}$  при коэффициенте трения  $f_{тр} = 0,25$ ), предварительно деформированных на угол  $\varphi = 13,049^\circ$  (рис. 6), при этом генерируемое усилие составляет  $\approx 77 \text{ Н}$ .

Другой вариант БУ фактически является модернизацией конструкции, описанной выше. Модернизация связана, в первую очередь, с более технологичной конструкцией контактной группы,

обеспечивающей наименьшее, по сравнению с другими вариантами БУ, переходное сопротивление контактов. В результате изменения конструкции разработана контактная группа, состоящая из трех неподвижных контактов с соосными отверстиями, в которых перемещается подвижный контакт (рис. 7б). Подвижный контакт представляет собой втулку (цангу) с разрезами для придания свойств плоской пружины. Это обеспечивает постоянное поджатие элементов подвижного и неподвижных контактов. Кроме того, шесть разрезов с каждой стороны делят втулку на 12 параллельных проводников, каждый из которых имеет точки соприкосновения с неподвижными контактами. Такая конструкция позволяет значительно снизить переходное электрическое сопротивление контактов.

Конструкция термомеханического преобразователя на основе материала с ЭПФ для перемещения штока фиксатора БУ, в первом варианте состоит из двух тарельчатых пружин и расположенного между ними нагревательного элемента (рис. 6). Во втором варианте исполнения (рис. 7) термомеханический преобразователь представляет собой двойную концентрическую пружину 1 (рис. 7б).

Двойная пружина необходима для того чтобы увеличить усилие, развиваемое при нагреве, и увеличить омическое сопротивление, так эта пружина одновременно является и нагревателем. Для возврата в исходное положение пружины 1 в конструкции предусмотрена линейно упругая контрпружина 2, которая развивает усилие, достаточные для сжатия остывшей пружины 1.

Задача определения реактивных усилий  $P$  силового элемента в форме двойной концентрической пружины решена из условия, что перераспределение жесткостей между двумя связанными между собой концентрическими пружинами из материалов с ЭПФ, является нелинейной и происходит в соответствии с условными моментами инерции (рис.8). Исходными данными являются: радиус проволоки  $r_0$ ; радиус навивки наружной и внутренней пружин  $R_1$  и  $R_2$ ; число витков  $n$ ; модуль сдвига  $G$  материала; экспериментально определяемые параметры  $E$  и  $m$ , учитывающие особенности структуры, химического состава, термообработки и определяемые по термомеханической диаграмме деформирования. Полное перемещение силового элемента  $\lambda$  определяется (3)

$$\Delta\lambda_1 = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \Delta P^{\frac{1}{m}} \cdot R^{\frac{2m+1}{m}} \cdot \left[ \left( \frac{(\cos(a))^{2m+2}}{G \cdot J_{kr}} \right)^{\frac{1}{m}} + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{(\sin(2a))^{m+1}}{2E \cdot J_x} \right)^{\frac{1}{m}} \right] \quad (3)$$

где  $J_{kr} = \frac{2\pi}{m+3} (r_0 \cdot 2)^{m+3}$  и  $J_x = 1.02 \cdot (r_0 \cdot 2)^{m+3}$  - условные моменты инерции пружин.

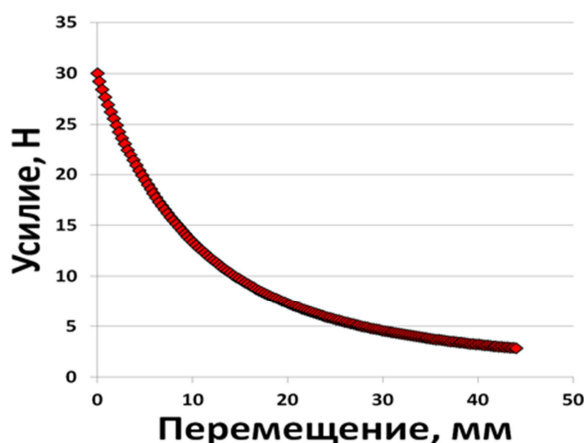


Рис. 8 Реактивные усилия, возникающие при срабатывании силового элемента БУ ( $r_0=0,4$  мм)

При разработке БУ проведен анализ выполнения требований назначения, что предполагает моделирование процессов, происходящих во время его срабатывания, начиная с момента подачи управляющего сигнала и заканчивая остановкой штока исполнительного механизма после полного его перемещения.

В диссертации предложена модель длительности  $\tau_{ТП}$  перемещения штока фиксатора БУ с учетом времени нагрева термомеханического преобразователя до температур фазовых переходов в материале с эффектом памяти формы:

$$\tau_{ТП} = \frac{\Delta t \cdot (c_{пруж} \cdot m_{пруж} + c_{шток} \cdot m_{шток} + c_{стакан} \cdot m_{стакан} + c_{контрпруж} \cdot m_{контрпруж})}{I^2 \cdot \rho \frac{1}{S}} + \sqrt{\frac{s \cdot m}{(F - ks) - (F_{контр} - k_{контр} s) - F_{тр}}} \quad (4)$$

где:  $c$  – удельная теплоемкость пружины с ЭПФ, штока, стакана, контрпружины;  $m$  – масса пружины с ЭПФ, штока, стакана, контрпружины;  $\Delta t$  – изменение температуры;  $I$  – значение электрического тока в цепи термомеханического преобразователя;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала с ЭПФ;  $l$  – длина пружины с ЭПФ;  $S$  – площадь сечения проводника;  $k$  – коэффи-

коэффициент пропорциональности изменения усилия пружины с ЭПФ;  $k_{\text{контр}}$  – коэффициент пропорциональности изменения усилия контрпружины;  $s$  – величина перемещение штока;  $m$  – масса штока и стакана;  $F$  – сила генерируемая пружиной с ЭПФ;  $F_{\text{контр}}$  – сила развиваемая контрпружиной;  $F_{\text{тр}}$  – сила трения.

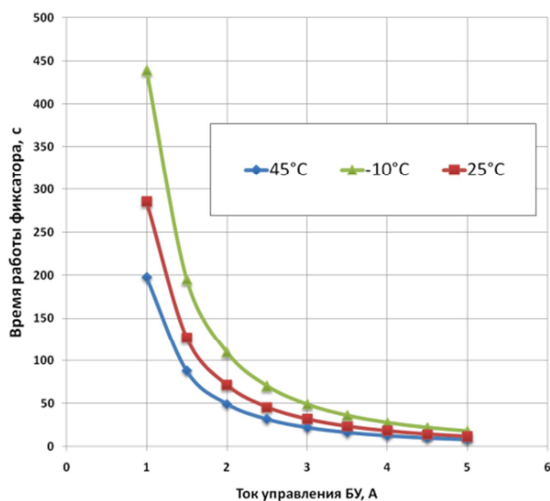


Рис. 9 Зависимость времени работы фиксатора от величины тока управления при различных температурах АБ

$$\tau_{\text{ИМ}} = \sqrt{\frac{s \cdot m}{(F - ks) - \left[ \left( \tau_0 \cdot \frac{1 - \mu^2}{E} \cdot a_r \right)^{\frac{1}{2}} + \beta \right] \cdot (P_{\text{разж}} + 2 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 \left[ \ln \frac{2 \cdot a}{r \cdot \left( 1 + \sqrt{\left( \frac{a}{l} \right)^2 + 1} \right)} + 0.25 \right])}} \quad (5)$$

где:  $I$  – ток через контакты, А;  $a_1$  – расстояние между неподвижными контактами (при штатных токах разряда и заряда аккумулятора), мм;  $a_2$  – расстояние между неподвижными контактами (при токах к.з. аккумулятора), мм;  $r$  – радиус неподвижного контакта, мм;  $l$  – длина неподвижного контакта, мм.;  $\tau_0$  – сдвиговое сопротивление, кгс/мм<sup>2</sup>;  $\Theta$  – упругая постоянная материала;  $\alpha_r$  – коэффициент гистерезисных потерь;  $f_{\text{тр}}$  – коэффициент трения между подвижным и неподвижным контактами;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости, кгс/см<sup>2</sup>;  $P_{\text{разж}}$  – усилие разжатия подвижного контакта;  $\beta$  – коэффициент упрочнения молекулярной связи.

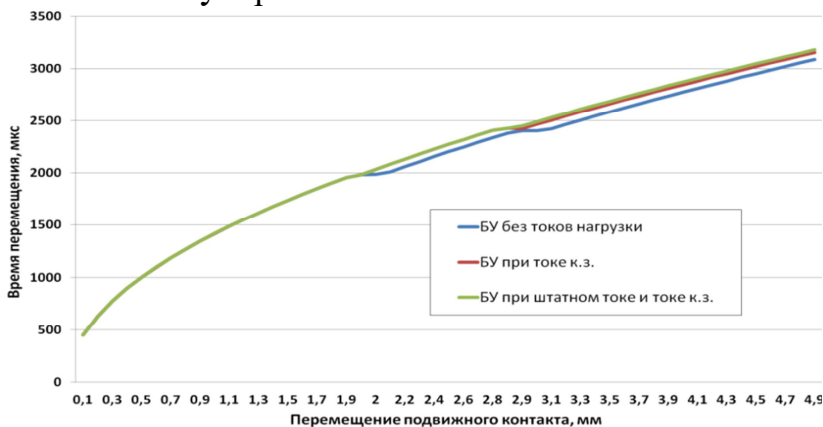


Рис. 10 График движения подвижного контакта при разных токах, проходящих через силовую контактную группу

короткого замыкания аварийного аккумулятора, а также замедление скорости перемещения из-за воздействия на контакты БУ электродинамических усилий.

Моделирование выполнено для всего диапазона температур эксплуатации ЛИАБ, следовательно, и байпасного устройства. Результаты моделирования представлены на рис. 9.

Разработана модель длительности  $\tau_{\text{ИМ}}$  перемещения штока исполнительного механизма с подвижным контактом БУ. Эта модель учитывает электродинамические усилия (ЭДУ), которые возникают в контактной группе БУ во время прохождения по ней токов заряда или разряда ЛИАБ и токов к.з..

Токи короткого замыкания и, вызванные ими ЭДУ, увеличивают длительность перемещения подвижного контакта и длительность, при котором отключаемый аккумулятор находится в замкнутом состоянии (рис. 10). На графике наблюдаются моменты начала и окончания короткого замыкания аварийного аккумулятора, а также замедление скорости перемещения из-за воздействия на контакты БУ электродинамических усилий.

Выполненный анализ возможности сваривания силовых контактов показал, что температура локального перегрева в области стягивания токов равна для золота  $37^{\circ}\text{C}$ , а для серебра  $26^{\circ}\text{C}$ , что значительно ниже максимально допустимых значений для этих материалов. На основании проведенных исследований можно утверждать, что падение напряжения и температура на контактных площадках БУ не приводят к процессу рекристаллизации контактного материала и подтверждает отсутствие возможности сваривания их во время эксплуатации устройства.

В четвертой главе изложена технология изготовления силовых контактов БУ, позволившая снизить их переходное сопротивление. Целью отработки технологии являлось достижение стабильности размеров деталей, входящих в узел силовой контактной группы, отработка приемов совместной обработки деталей не только в процессе механической обработки, но и в процессе нанесения различных покрытий, позволяющих повысить точность деталей, как на этапе изготовления, так и на этапе сборки БУ.

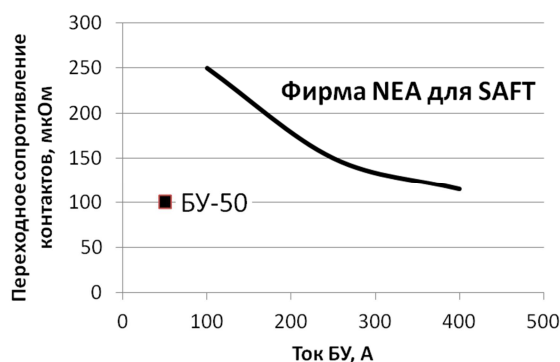


Рис. 11 Сравнение переходного сопротивления БУ с лучшими мировыми аналогами

В результате удалось снизить переходное сопротивление силовой контактной группы со значения 250 мкОм до стабильных значений, равных 100–130 мкОм (рис. 11).

Для изготовления силового элемента БУ использовалась проволока из сплава Ti-50,1 ат. % Ni. Проволока изготавливалась методом ротационной ковки и горячего волочения.

Температуры мартенситных превращений на различных этапах технологического процесса изготовления проволоки следующие: промежуточное сечение (5,3×5,3) мм; отжиг  $800^{\circ}\text{C}$ , 1 ч, охлаждение на воздухе от  $800^{\circ}\text{C}$  до  $\sim 500^{\circ}\text{C}$ , затем охлаждение под струей воды:  $M_s = 65(\pm 3)^{\circ}\text{C}$ ;  $M_f = 32(\pm 3)^{\circ}\text{C}$ ;  $A_s = 77(\pm 3)^{\circ}\text{C}$ ;  $A_f = 95(\pm 3)^{\circ}\text{C}$ , проволока 0,8 мм, отжиг  $800^{\circ}\text{C}$ , 1 ч, охлаждение на воздухе от  $800^{\circ}\text{C}$  до  $\sim 500^{\circ}\text{C}$ , затем охлаждение под струей воды:  $M_s = 58(\pm 3)^{\circ}\text{C}$ ;  $M_f = 34(\pm 3)^{\circ}\text{C}$ ;  $A_s = 73(\pm 3)^{\circ}\text{C}$ ;  $A_f = 88(\pm 3)^{\circ}\text{C}$ .

Предложенная технология изготовления термопреобразователя из сплава TiNi включает закалку, отжиг, протяжку, навивку пружины в специальном приспособлении, отжиг, термофиксацию под нагрузкой в течение 12 час при  $T = 130^{\circ}\text{C}$ . Исследования показывают, что после термофиксации наблюдается изменение характеристических температур обратного мартенситного превращения в сторону низких температур ( $A_f$  снижается со 106 до  $100^{\circ}\text{C}$ ) при сохранении фазового состава. При этом наблюдается увеличение эффекта восстановления формы на 3–4 % и достигает 92–93%. Указанное снижение температуры  $A_f$  находится в пределах требований технических условий, а увеличение эффекта восстановления повышает уровень надежности БУ.

Технология изготовления термомеханического преобразователя в виде двойной концентрической пружины из сплава с ЭПФ, объединяющая техноло-

гии изготовления классических линейно упругих пружин и особенности технологии наведения памяти формы в материалах с ЭПФ, позволили в сочетании с проведенной оптимизацией режимов термообработки добиться генерации наибольших усилий в силовом элементе БУ (рис. 12).

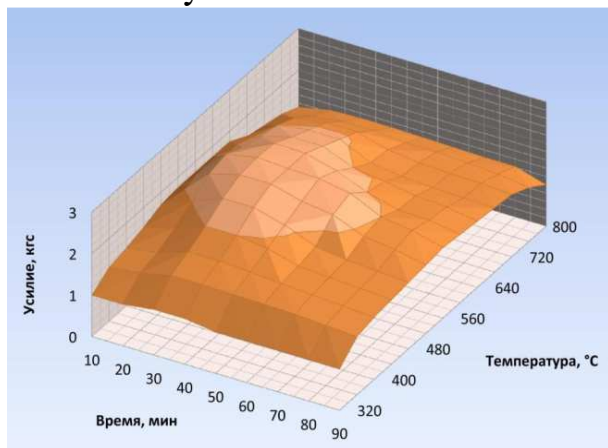


Рис. 12 Зависимость реактивного усилия силового элемента БУ в виде двойной концентрической пружины из сплава TiNi от температуры отжига и времени выдержки

Для байпасных устройств, используемых в настоящее время типов ЛИА на 50А, 100А и 200А, предложен единый конструктивно-технологический принцип. Различие характеристик БУ определяется необходимым усилием срабатывания термомеханического преобразователя. Для оценки величины необходимого реактивного усилия термомеханического преобразователя БУ типового ряда ЛИАБ выполнен расчет методом последовательных догрузений для двойной концентрической пружины при

условии параллельной работы. Значения реактивных усилий и массогабаритные характеристики БУ типового ряда ЛИА приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Технические характеристики байпасных устройств ЛИАБ

| Типовой ряд ЛИА                                   | ЛИА 50   | ЛИА 100  | ЛИА 200  |
|---------------------------------------------------|----------|----------|----------|
| Рабочий диаметр силового элемента, мм             | 8        | 10       | 12       |
| Наружный диаметр проволоки, мм                    | 0,8      | 1,0      | 1,2      |
| Количество витков силового элемента               | 12       | 16       | 20       |
| Длина пружины, мм                                 | 153,4    | 131,0    | 126,4    |
| Реактивные напряжения $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа | 153,6    | 131      | 126,4    |
| Масса байпасного устройства, г                    | 60       | 70       | 80       |
| Габаритные размеры, мм                            | 57×24×22 | 57×26×25 | 65×30×28 |

Анализ полученных характеристик предлагаемых конструкций БУ убедительно доказывает

возможность выполнения жестких требований, предъявляемых к байпасным устройствам ЛИАБ современных космических аппаратов. Так, при увеличении номинальных значений коммутируемых токов в 4 раза, массогабаритные размеры возрастают, в среднем, не более чем в 1,3 раза.

**В пятой главе** описано влияние эксплуатационных факторов КА на работу байпасного устройства. К эксплуатационным факторам относятся такие факторы космического пространства (ФКП) как невесомость, вакуум, различного рода излучения и метеорные частицы. Анализ предполагаемых воздействий ФКП показал, что БУ спроектировано и установлено в АБ таким образом, что от излучения космического характера БУ защищают крышка и детали батареи. Проведенный расчет показал, что время встречи АБ с метеорной частицей, имеющей фатальный вес для разрушения БУ, составляет порядка  $3,6 \cdot 10^9$  ч (112 лет).

В процессе стендовых испытаний БУ подвергалось воздействию гармонической и случайной вибрации с перегрузкой величиной 22g, одиночных и многократных ударов, имитирующих отделение ступеней ракеты-носителя (до 300g) и транспортировку автомобильным транспортом. Такие испытания бай-

пасного устройства проводились на следующих стендах: вибростенд Dactron; ударная установка УУМ 100/150-100. Моделирование влияния внешней среды на БУ при смене солнечных и теневых участков орбиты космического аппарата обеспечивалось температурными режимами в термокамере типа КТХ-1 и КТХБ-0,16-155 Х.037.0003. Установлено, что после всех тестовых испытаний БУ сохранило свои параметры и работоспособность.

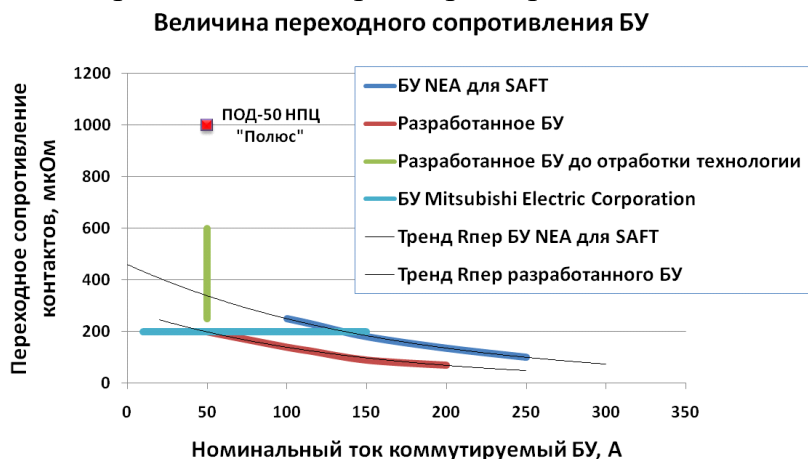


Рис. 13 Сравнительная оценка величины  $R_{пер}$  зарубежных и отечественных производителей БУ

силовой контактной группы.

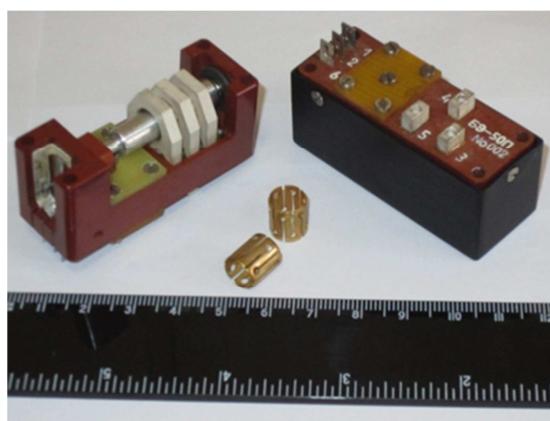


Рис. 14 Промышленный образец байпасного устройства на коммутируемые токи 50А

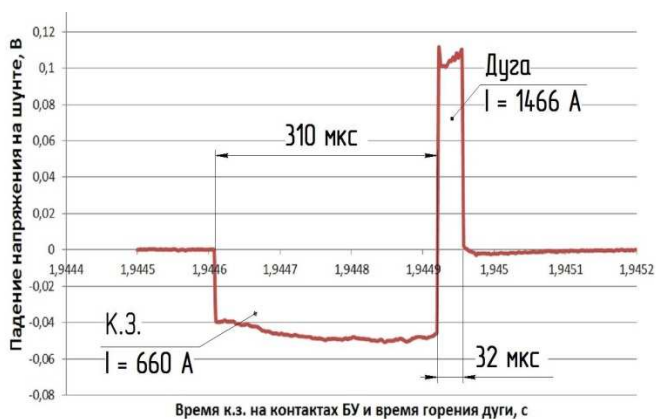


Рис. 15 Изменение напряжения на шунте во время короткого замыкания ЛИА ( $R_{ш}=75 \text{ мкОм}$ )

В результате проведения экспериментальных исследований разработанного байпасного устройства (рис. 14) при отключении ЛИА типа ЛИГП-50 установлено, что выполняются требования по быстродействию срабатывания и отсутствуют нежелательные последствия, связанные с искровыми и дугowymi явлениями (рис. 15). Как следует из графика (рис. 15), работа контактов происходит стабильно, без дребезга и резких изменений переходного сопротивления. Возникновение дуги связано с перенапряжениями, возникающими вследствие индуктивности силовых проводов, соединяющих отключаемый аккумулятор и байпасное устройство.

Для оценки надежности байпасного устройства в составе ЛИАБ использовались методика и расчетные формулы, рекомендованные для изделий космической техники (Надежность электрорадиоизделий: Единый справочник М: ВНИИ «Электрон-стандарт», 1992. Т. 1,3,4: Изделия электротехнические. ГОСТ Р51901.14-2007 Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы

методы. Реут Е.К., Саксонов И.Н. Электрические контакты. Воениздат, 1971 г. Прытков С.В., Горбачева В.М. Борисов А.А. и др. Надежность электрорадиоизделий. Справочник. М.: 22 ЦНИИ МО РФ, 2006).

Разработанная конструкция байпасного устройства и предложенные технологии изготовления его элементов позволяют обеспечить вероятность безотказной работы байпасного устройства на уровне 0,999.

Экономическая эффективность рассчитывалась без учета стоимости мероприятий по парированию повышенной массы АБ космического аппарата. Так, по сравнению с ЛИАБ, в котором вероятность производственного дефекта выше 0,001, экономический эффект составит минимум 30 млн. рублей в год. В случае, если вероятность производственного дефекта удастся свести к значениям ниже 0,001, то экономический эффект составит, примерно 5 млн. рублей в год.

**В заключении** изложены основные результаты исследований, представленных в диссертационной работе.

**В приложении** приведены акты внедрения результатов исследований в промышленность и учебный процесс, копии патентов на изобретения.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. В результате анализа известных конструкций байпасных устройств для ЛИАБ определены основные требования к характеристикам БУ современных космических аппаратов: вероятность безотказной работы не хуже 0,999; обеспечение устойчивой коммутации тока короткого замыкания аккумулятора при условии неразрывности электрической цепи, минимальное переходное сопротивление силовых контактов, проверка работоспособности каждого промышленно выпускаемого изделия на стадии изготовления и приемо-сдаточных испытаний с возможностью дальнейшей эксплуатации на космическом аппарате, минимальные массогабаритные характеристики.

2. На основе разработанной тепловой модели ЛИАБ и экспериментальных исследований на испытательном оборудовании установлено, что максимальное тепловыделение происходит в борне аккумулятора при его коротком замыкании. С учетом действия токов короткого замыкания определены предельные значения характеристик срабатывания байпасного устройства: максимально допустимая температура - 100°C и длительность срабатывания в пределах 2-3 с.

3. Разработана конструкция байпасного устройства ЛИАБ, обеспечивающая снижение массогабаритных характеристик за счет использования в качестве исполнительного механизма БУ термомеханического преобразователя из материала с эффектом памяти формы. Применение материала с ЭПФ позволило впервые обеспечить многократную проверку работоспособности байпасного устройства без снижения уровня надежности.

4. Предложена технология изготовления силовых контактов БУ, позволяющая снизить величину переходного сопротивления до значений, сопоставимых с лучшими мировыми аналогами; в процессе отработки технологии сформулированы требования к точности изготовления и сборки элементов контактной группы БУ и качеству сопрягаемых поверхностей.

5. Проведены исследования деформационно-силовых характеристик термопреобразователя БУ из сплава TiNi и разработана методика его термосиловой подготовки на определенную величину деформации памяти формы, при которой во время обратного мартенситного превращения силовой элемент генерирует напряжения, достаточные для срабатывания БУ. Предложена методология контроля и управления структурными (температуры фазовых превращений) и механическими характеристиками (рабочий ход и усилие срабатывания) термопреобразователя БУ из материала с ЭПФ. Выполненные экспериментальные исследования влияния эксплуатационных факторов (циклического изменения температуры, гармонических и случайных вибраций, однократных и многократных ударов) на силовые элементы термопреобразователя БУ подтвердили сохранение в нем деформаций и напряжений памяти формы.

6. Разработана необходимая документация для выпуска промышленных серий байпасных устройств ЛИАБ космического назначения на предприятии ОАО «Сатурн» (г. Краснодар). Результаты исследования внедрены применительно к аккумуляторным батареям космического аппарата «Глонасс-К2» с экономическим эффектом не менее 5 млн. руб. в год.

**Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

1. Бледнова Ж.М., Галкин В.В., Махутов Н.А., Проценко Н.А. Пути обеспечения безопасности и ресурса литий-ионных аккумуляторных батарей космического назначения. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2010. - № 1. С. 43-54.

2. Проценко Н.А., Лапшин В.Ю., Бледнова Ж.М. Расчетно-экспериментальная оценка распределения температур в случае технологических сбоев в работе литий-ионного аккумулятора (ЛИА) космического назначения. Известия Самарского научного центра РАН, 2010. – Т.12. - № 4(3). С. 596-600.

3. Бледнова Ж.М. Лапшин В.Ю., Проценко Н.А. Моделирование тепловых процессов ЛИАБ космического назначения в случае отказа одного из аккумуляторов. Труды Академэнерго, 2011. - № 4. - С.117-127.

4. Бледнова Ж.М., Галкин В.В., Проценко Н.А. Байпасное устройство с использованием материалов с эффектом памяти формы для обеспечения работоспособности ЛИАБ космического назначения. Журнал «Полет», 2011. - №6. - С. 58-60.

5. Галкин В.В., Бледнова Ж.М., Проценко Н.А. Оценка ресурса байпасного устройства литий-ионной аккумуляторной батареи космического назначения с силоприводом из материалов с памятью формы. Журнал «Полет», 2012. - №5. - С. 20-27.

6. Бледнова Ж.М., Галкин В.В., Проценко Н.А. Байпасное устройство с использованием материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) для обеспечения работоспособности ЛИАБ космического назначения в случае технологических сбоев. Проблемы безопасности полетов, 2011. - № 3.- С. 64-70.

7. Галкин В.В., Лихоносов С.Д., Лапшин В.Ю., Шевченко Ю.М., Кулыга В.П., Проценко Н.А. Результаты наземной отработки литий-ионной аккумуляторной батареи космического назначения //7 международная конференция

- «Авиация и космонавтика-2008»: Тезисы докладов. - М.: Из-во МАИ-ПРИНТ, 2008. - С. 207.
8. Проценко Н.А., Галкин В.В., Лихоносов С.Д., Шевченко Ю.М. Устройство защиты литий-ионной аккумуляторной батареи. //Тез. докладов 2-я Всероссийская конференция ученых, молодых специалистов и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике – 2009», Москва, 20-24 апреля 2009г. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. - С. 35.
9. Проценко Н.А., Бледнова Ж.М. Инженерно-технологические аспекты обеспечения надежности химических источников тока космического назначения. Машиностроение. Сб. научных статей. Краснодар: Изд-во КубГТУ.- 2009.- С.82-85.
10. Бледнова Ж.М., Галкин В.В., Махутов Н.А., Проценко Н.А. Конструктивно-технологические методы обеспечения безопасности и ресурса химических источников тока космического назначения. Сб. материалов III Межд. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов "DFMN2009"». М.: ИМЕТ РАН, 2009. - Т 2.- С. 171-173.
11. Бледнова Ж.М., Галкин В.В., Махутов Н.А., Проценко Н.А. Пути обеспечения безопасности и ресурса литий-ионных аккумуляторных батарей космического назначения. Тр. Конференции «Безопасность и живучесть технических систем». Красноярск, 2009. – С. 112-116.
12. Шевченко Ю.М., Галкин В.В., Проценко Н.А. Повышение энергетической эффективности литий-ионных аккумуляторных батарей для систем электропитания космических аппаратов конструктивными способами при сохранении надежности. Материалы XII Международной конференции «Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах». Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2012.- С. 55-57.
13. Бледнова Ж.М., Галкин В.В., Проценко Н.А. Использование материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) для обеспечения надежности литий-ионных аккумуляторных батарей космического назначения. Тез. докл. IV Российской научно-техн. конф. «Ресурс и диагностика материалов и конструкций». Екатеринбург 26-28 мая 2009. Екатеринбург. – С. 157.
14. Галкин В.В. Шевченко Ю.М., Проценко Н.А. Байпасный переключатель для литий-ионной аккумуляторной батареи. Тез. докл. XVIII научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства» Томск, 22-23 апреля 2010. Томск - С. 25-27.
15. Проценко Н.А., Бледнова Ж.М. Интеллектуальный термопривод космического назначения. Машиностроение. Сб. научных статей. Краснодар, Изд-во КубГТУ, 2011. – С.133-140.
16. Проценко Н.А., Мышевский И.С. Проектировочный расчет силового элемента байпасного устройства ЛИАБ в форме тарельчатых пружин из материала с ЭПФ. Машиностроение. Сб. научных статей. Краснодар, Изд-во КубГТУ, 2009. – С. 74-77.
17. Procenko N.A., Blednova Zh.M., Structural-mechanical Control of Bypass Reactivity in lisb for Space Application using Alloys with Shape Memory Effect / European Symposium on Martensitic Transformations Esomat-2012, September 9-16, Sankt-Peterburg, Russia. P.112.

18. Бледнова Ж.М, Проценко Н.А., Мышевский И.С. Влияние термовременных и механических воздействий на эксплуатационные свойства силового элемента байпасного устройства ЛИАБ космического назначения из материала с ЭПФ. Сборник материалов 53 международной конференции «Актуальные проблемы прочности». 2-5 октября 2012. Витебск, Беларусь, 2012. – С. 54-57.

19. Бледнова Ж.М, Галкин В.В., Проценко Н.А. Технологическая эффективность и функциональная надежность байпасного устройства ЛИАБ с силовым приводом из материала с эффектом памяти формы в условиях космического пространства. Труды 4-й Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем» 9-13 октября 2012. Красноярск, 2012. – С 112-116.

20. Бледнова Ж.М, Проценко Н.А., Мышевский И.С. Управление структурой и комплексом функционально-механических свойств силового элемента термопривода байпасного устройства из материала с эффектом памяти формы для работы в экстремальных условиях космического пространства. Материалы международной конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» 21-23 октября 2012 г. М.: ИМАШ РАН им. А.А. Благодатова, 2012. - С. 12.

21. Проценко Н.А., Авдеенко А.Б., Бледнова Ж.М. Оценка Влияние факторов космического пространства на функциональные свойства сплава с ЭПФ на основе TiNi. Машиностроение. Сб. научных статей. Краснодар, Изд-во КубГТУ, 2011.- С. 127-133.

22. Protsenko N.A., Blednova Zh.M. Structural-mechanical Control of Bypass Reactivity in LISB for Space Application using Shape Memory Alloys. Materials Science Forum Vols. 738-739 (2013) pp 601-606.

23. Патент РФ № 2392494 Термомеханический силовый привод / Бледнова Ж.М., Галкин В.В., Чаевский М.И., Мышевский И.С., Проценко Н.А. Оpub. 20.06.2010.

24. Патент РФ № 2415489 Байпасный переключатель / Галкин В.В., Шевченко Ю.М., Бледнова Ж.М. Проценко Н.А. Оpubл. 27.03.2011.

25. Решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 2011122292 Байпасный переключатель для космического аппарата. Приоритет от 01.06.2011. Оpubл. 07.12.2012.

**Личный вклад автора.** В публикации [1], [7], [10] - [12] автором выполнен анализ особенностей и тенденций развития БУ ЛИАБ. В публикациях [2], [3] автором лично выполнена экспериментальная проверка тепловой модели. В публикациях [4], [6], [8], [9], [14], и патентах [23], [24], [25] - разработана конструкция БУ, разработана технология изготовления контактов силовой контактной группы и термомеханического преобразователя из материала с ЭПФ. В публикациях [15] - [18], [20], [22] определены реактивные усилия в термомеханическом преобразователе с оценкой влияния термовременных и механических воздействий. В публикациях [5], [13], [19], [21] выполнено исследование рабочих поверхностей контактов БУ, рекомендованы мероприятия по улучшению качества их рабочей поверхности; выполнена экспериментальная проверка БУ на устойчивость к воздействию эксплуатационных факторов с оценкой вероятности безотказной работы.