

УДК 620.10

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В СЛУЧАЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СБОЕВ В РАБОТЕ ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

© 2010 Н.А. Проценко¹, В.Ю. Лапшин², Ж.М. Бледнова¹

¹Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар

²ОАО «Сатурн», г. Краснодар

Поступила в редакцию 19.10.2010

Приведены результаты моделирования тепловых процессов в случае технологических сбоев в работе литий-ионного аккумулятора (ЛИА) космического назначения. Показано, что в случае технологических сбоев в работе ЛИА максимальное тепловыделение происходит в районе борна. Принята максимально допустимая температура медного провода в районе борна $T_{\text{макс}}=100^{\circ}\text{C}$, которому соответствует время срабатывания байпасного устройства (БУ) 2-3 с. Выработаны рекомендации по оптимальному расположению БУ в аккумуляторной батарее.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, космический аппарат, байпасное устройство, технологические сбои, численное моделирование, тепловые процессы, термодатчики, энергобалансная модель

Обеспечение безотказного функционирования космического аппарата (КА) в течение всего срока активного существования (САС) связано с необходимостью обеспечения бесперебойного электропитания. В качестве вторичных источников энергии КА в настоящее время используются литий-ионные аккумуляторные батареи (ЛИАБ), представляющие собой цепь последовательно или последовательно-параллельно соединенных аккумуляторов, базирующихся на платформе, состоящей из множества конструктивных элементов (рис. 1). Несмотря на то, что в последнее время достигнут определенный прогресс в производстве ЛИА [1], для обеспечения высокого уровня надежности ЛИАБ космического назначения необходимо предусмотреть устройства, парирующие отказ в случае технологических сбоев – байпасные устройства (БУ). Под технологическими сбоями в работе ЛИА, влияющими на тепловые процессы, протекающими внутри него, понимается: деградация электрохимической группы, которая приводит к изменению токов заряда и разряда, изменению времени зарядов и разрядов и, как следствие, к повышению частоты циклирования таких аккумуляторов; обрыв цепи внутри аккумулятора.

Для обеспечения работоспособности аккумуляторной батареи (АБ) в случае технологических сбоев одного из аккумуляторов в АБ предусмотрены специальные выравнивающие (балансирующие) устройства, которые разряжают аккумулятор до напряжения всех остальных ЛИА в цепи, либо через них подзаряжают аккумулятор.

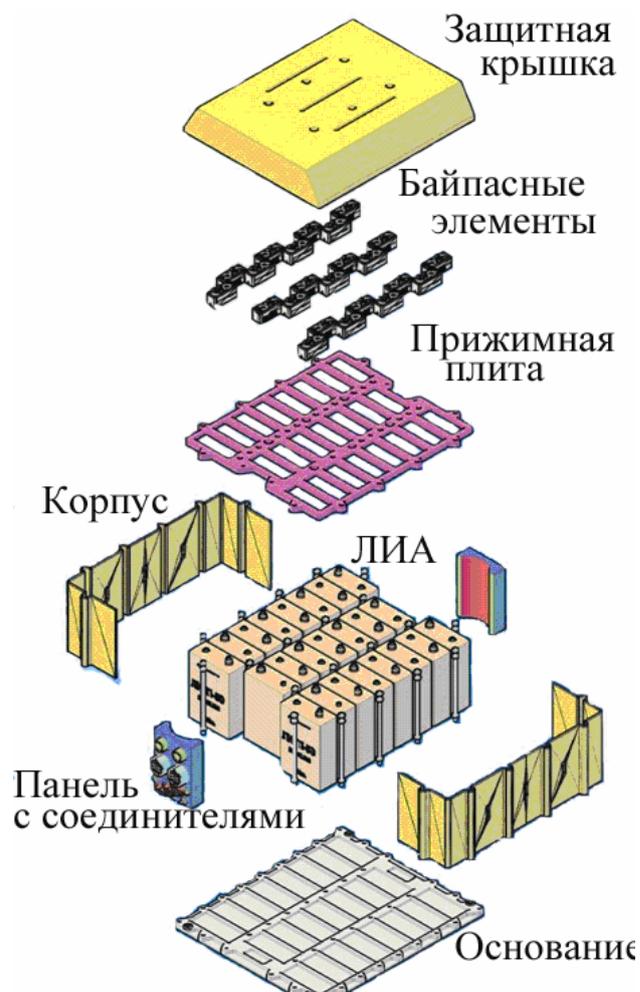


Рис. 1. Элементы ЛИАБ космического назначения

Бледнова Жесфина Михайловна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой динамики и прочности машин. E-mail: blednova@mail.ru

Лапшин Юрий Владимирович, заведующий отделом. E-mail: Lapshin1956@mail.ru

Проценко Николай Александрович, аспирант. E-mail: procenko_n@lisl.ru

В случае значительных изменений характеристик ЛИА или обрыва цепи в аккумуляторе его исключают из последовательной цепи АБ с помощью специальных байпасных (шунтирующих) устройств, создающих обводную цепь вокруг неисправного аккумулятора. После удаления неисправного аккумулятора из общей цепи АБ нагрузка на оставшиеся исправные ЛИА возрастает, что приводит к повышению количества выделяемого тепла. В состав аккумуляторной батареи входит ряд периферийных устройств, назначение которых заключается в повышении надежности и живучести АБ в период длительной автономной работы на орбите. Некоторые из этих устройств являются термочувствительными, в том числе и БУ, так как управление ими происходит посредством нагрева отдельных элементов. Существуют различные конструктивно-технологические решения БУ [2-4]. Перспективными являются БУ с силоприводом, упругий элемент которого изготовлен из материала с эффектом памяти формы (ЭПФ).

При проектировании конструкции АБ для оценки степени влияния температуры элементов АБ на возможность самопроизвольного срабатывания БУ необходимо располагать методикой моделирования протекающих тепловых процессов. Следует отметить, что одним из требований, предъявляемых к БУ, является необходимость обеспечения неразрывности силовой цепи АБ в процессе его срабатывания. При этом неизбежно возникает кратковременное короткое замыкание (КЗ) аккумулятора, исключаемого из силовой цепи. Процесс КЗ сопровождается мощным тепловыделением, которое может привести к взрыву аккумулятора. Интенсивность разогрева деталей аккумулятора и АБ определяется теплоемкостями, тепловыми связями деталей и мощностью тепловыделения. В свою очередь, тепловые связи определяются теплофизическими характеристиками и конструкцией ЛИА и АБ, а мощность тепловыделения – внутренним сопротивлением ЛИА. Таким образом, взрывобезопасность при срабатывании БУ определяется, с одной стороны, скоростью срабатывания БУ (длительностью КЗ), а с другой стороны, оптимальным расположением ЛИА в АБ, соответствующим оптимальным тепловым связям деталей ЛИА и АБ.

Цель работы: разработка расчетно-экспериментальной оценки распределения температур в случае технологических сбоев в работе ЛИА космического назначения и выработка рекомендаций по оптимальному расположению ЛИА в АБ.

Оптимизацию расположения ЛИА в АБ можно провести с помощью численного моделирования тепловых процессов в АБ при КЗ ЛИА [5]. Мощность тепловыделения ЛИА (W_T) описывается следующим выражением:

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

где I – ток (положительный при заряде); $U_{\text{ЛИА}}$ – напряжение ЛИА; $U_{\text{ТН}}$ – термонеutralное напряжение ЛИА. Ток и напряжение ЛИА определяются с помощью энергобалансной модели ЛИА, представляющей собой зависимость внутреннего сопротивления ЛИА от температуры, которую идентифицируют по результатам испытаний [5].

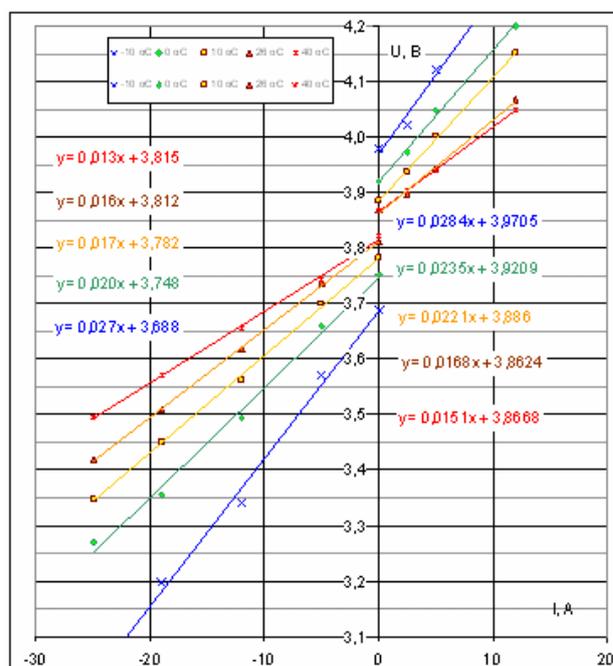


Рис. 2. Напряжения ЛИА при степени заряженности 0,5 емкости

Моделирование тепловых процессов в ЛИАБ. Численное моделирование тепловых процессов в АБ при КЗ ЛИА проводится путем совместного решения уравнений теплопроводности и разряда ЛИА. Для этого разработана энергобалансная модель ЛИА и выполнена ее идентификация по результатам испытаний аккумулятора емкостью 25 А·ч (ЛИА-25), определены теплофизические параметры ЛИА. Для использования в тепловой модели наиболее подходит упрощенная модель напряжения ЛИА, описываемая следующим уравнением:

$$U_{\text{ЛИА}} = U_0 + R_{з/р} \cdot I, \quad (2)$$

где U_0 – напряжение разомкнутой цепи; $R_{з/р}$ – зарядное (разрядное) внутреннее сопротивление, зависящее от температуры. Идентификация энергобалансной модели ЛИА проводилась по результатам испытаний аккумуляторов ЛИА-25 (рис 2). Наклоны линейных трендов напряжения при степени заряженности 0,5 емкости приведены в табл. 1.

Температурные зависимости внутреннего сопротивления от температуры наиболее точно описываются уравнениями (рис. 3):

$$R_3 = 0,011 \text{ Ом} + (1,93 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}) \cdot \exp(2407 \text{ K/T}) \quad (3)$$

$$R_p = 0,011 \text{ Ом} + (3,12 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}) \cdot \exp(3459 \text{ K/T}) \quad (4)$$

Таблица 1. Внутреннее сопротивление ЛИА при разных температурах

Температура окружающей среды				
-10°C	0°C	10°C	26°C	40°C
Зарядное сопротивление ЛИА (R _з), Ом				
0,0284	0,0235	0,0221	0,0168	0,0151
Разрядное сопротивление ЛИА (R _р), Ом				
0,0266	0,0200	0,0175	0,0158	0,0125

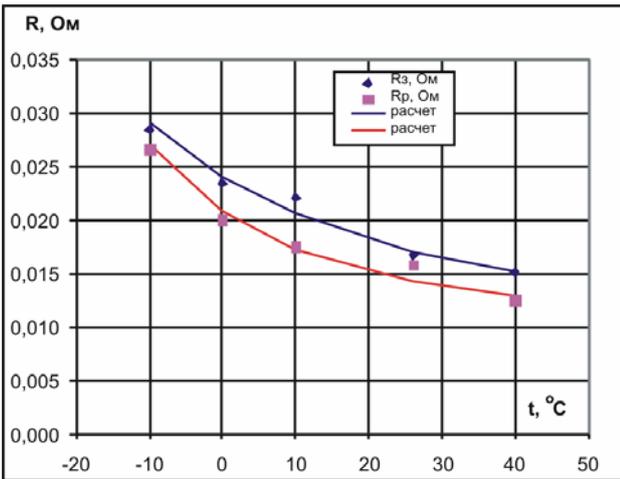


Рис. 3. Зависимости внутреннего сопротивления ЛИА от его температуры

Мощность тепловыделения ЛИА (W_T) в процессе циклирования при зарядном КПД, равном 100% и пренебрежимо малом токе саморазряда, описывается выражением (1). Профиль температуры во времени можно рассчитать по уравнениям теплового баланса, используя циклограмму тепловыделения (1), тепловое сопротивление ($R_{\text{ЛИА}}$) и теплоемкость ЛИА ($C_{\text{ЛИА}}$):

$$W_T = C_{\text{ЛИА}} \cdot \frac{dT}{dt} + \frac{(T - T_{\text{ТП}})}{R_{\text{ЛИА}}} \quad (5)$$

где $T_{\text{ТП}}$ – температура термоплиты.

Идентификация параметров тепловой модели ЛИА проводилась методом подбора по результатам испытаний макетного образца батареи БЛИ-25. На рис. 4 условно показана АБ БЛИ-25 с термодатчиками, установленными в различных местах ЛИАБ. АБ была помещена в зарядно-разрядный стенд с регулируемой температурой термоплиты. В связи с ограничениями стенда, датчик температуры t_9 не использовался и по результатам испытаний определялись тепловые характеристики аккумуляторов G3, G4 и G6.

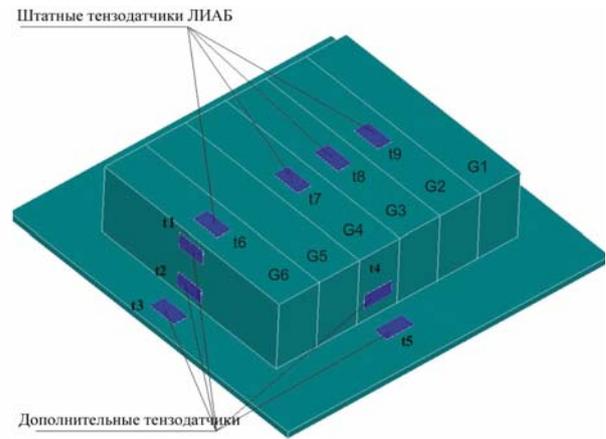


Рис. 4. Расположение термодатчиков на АБ БЛИ-25 в процессе испытаний

Основным методом испытаний при проведении дальнейшего анализа, являлось циклирование АБ по следующему алгоритму: заряд током 10 А (до выбранной установки напряжения) + разряд током 25 А в течении 3 минут. Циклирование проводилось до достижения стабилизации температуры АБ, при фиксированной температуре термоплиты стенда ($T=20^\circ\text{C}$). Тепловое сопротивление для каждого указанного ЛИА определялось интегрированием по последним несколькими циклами до момента отключения (т.е. – достижения стабилизации температуры АБ) по формуле:

$$R_{\text{ЛИА}} = \frac{\int \Delta T dt}{\int U I dt} \quad (6)$$

где $\int \Delta T dt$ – интеграл разности температур на верхней поверхности ЛИА и основании ЛИАБ (к примеру, для аккумулятора G6 это разность показаний датчиков t_6 и t_3); $\int U I dt$ – тепловыделение ЛИА, U – напряжение ЛИА, I – ток через АБ (положительный при заряде). Результаты по определению $R_{\text{ЛИА}}$ представлены в табл. 2. Как видно из табл. 2, повторяемость результатов от первого режима ко второму была достаточно высокой. Более низкие значения R_{G4} , как показал анализ дополнительной информации испытаний, связаны, видимо, с погрешностями эксперимента, а не с иными теплофизическими свойствами аккумулятора G4.

Таблица 2. Определение тепловых сопротивлений ЛИА

Режим	R _{G3}	R _{G4}	R _{G6}
циклирование до U=3,95 В	1,06	0,69	1,13
циклирование до U=4,1 В	1,02	0,67	1,1

Значения $C_{\text{ЛИА}}$ и $U_{\text{ТН}}$ определялись подбором этих параметров при решении уравнения (1) в сравнении с экспериментальными кривыми. Результаты определения $C_{\text{ЛИА}}$ и $U_{\text{ТН}}$ сведены в табл. 3. При моделировании на одном режиме значение $U_{\text{ТН}}$ для всех ЛИА подбиралось одинаковым, что связано с большей точностью определения электрических характеристик ЛИА по сравнению с тепловыми в данном эксперименте.

Сопоставление результатов моделирования и экспериментальных данных представлены на рис. 5.

Тепловое сопротивление ЛИА складывается из тепловых сопротивлений электродного блока ($R_{\text{Б}}$) и зазора между блоком и корпусом ($R_{\text{З}}$):

$$R_{\text{ЛИА}} = R_{\text{Б}} + R_{\text{З}}. \quad (7)$$

Таблица 3. Определение $C_{\text{ЛИА}}$ и $U_{\text{ТН}}$

Режим	$C_{\text{ЛИАГ3}}$, Дж/°С	$U_{\text{ТН Г3}}$, В	$C_{\text{ЛИАГ4}}$, Дж/°С	$U_{\text{ТН Г4}}$, В	$C_{\text{ЛИАГ6}}$, Дж/°С	$U_{\text{ТН Г6}}$, В
циклирование до $U=3,95$ В	1250	3,885	1325	3,885	1250	3,885
циклирование до $U=4,1$ В	1100	4,005	1200	4,005	1100	4,005

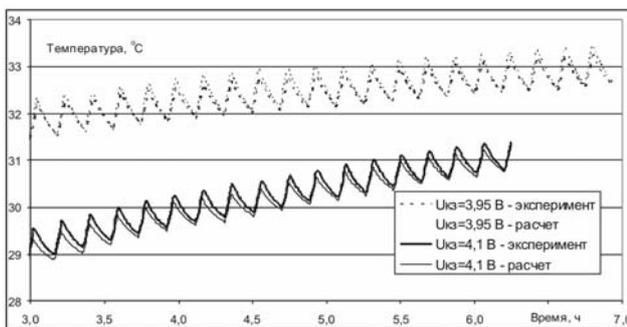


Рис. 5. Изменение температуры при циклировании АКБ до достижения напряжения ЛИА $U=4,1$ В – (а); напряжения ЛИА $U=3,95$ В – (б)

Тепловое сопротивление равномерно тепловыделяющего блока рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{Б}} = H / (2 \cdot \lambda_{\text{Б}} \cdot V \cdot L), \quad (8)$$

где $H=50$ мм – высота блока для ЛИГП-25; $V=38$ мм – ширина блока для ЛИГП-25; $L=135$ мм – длина блока для ЛИГП-25; $\lambda_{\text{Б}}$ теплопроводность блока.

При теплосъёме вдоль электродов теплопроводность блока, в основном, определяется теплопроводностью медных и алюминиевых подложек электродов и составляет расчетную величину около 45 Вт/(м·К). При этом тепловое сопротивление блока получается равным 0,11 К/Вт. По результатам испытаний для аккумулятора Г6 (по разнице температур датчиков t_1 и t_2 , рис. 4) величина теплового сопротивления составила 0,13 К/Вт, что соответствует теплопроводности блока 38 Вт/(м·К). Определяя для ЛИГП-25 $R_{\text{ЛИА}}=1,1$ К/Вт (табл. 2), находим величину теплового сопротивления $R_{\text{З}}$ для ЛИГП-25 – $R_{\text{З}}=0,97$ К/Вт:

$$R_{\text{З}} = \delta / (\lambda_{\text{З}} \cdot V \cdot L), \quad (9)$$

где δ – эффективная величина зазора между блоком электродов и днищем.

Таким образом, для ЛИГП-25, $\delta/\lambda_{\text{З}} = 0,005$ м²·К/Вт. Теплоемкость ЛИА по данным табл. 3 принимается равной $C_{\text{ЛИА}}=1170$ Дж/°С (среднее по режимам значение без учета, по вышеуказанным соображениям, данных по Г4). При массе ЛИГП-25 равной 1,06 кг это соответствует удельной теплоемкости ЛИА $C_{\text{ЛИАуд}}=1100$ Дж/(кг·°С).

Анализируя данные табл. 3 с учетом приведенной модели напряжения ЛИА, можно подобрать зависимость термонейтрального напряжения $U_{\text{ТН}}$ как линейную функцию степени заряженности аккумулятора. В связи с инерционностью электрических процессов, обусловленной наличием емкостей, среднюю степень заряженности ЛИА при указанных режимах циклирования АКБ 6ЛИ-25 можно определить при помощи следующего уравнения:

$$U_{\text{РАСЧ}} = U_{\text{ср раз}} \cdot K_{\text{р}} + U_{\text{ср зар}} \cdot K_{\text{з}}, \quad (10)$$

где $U_{\text{РАСЧ}}$ – рассчитанное по формулам (1-8) значение напряжений разомкнутой цепи (НРЦ) ЛИА, как функция от его степени заряженности; $U_{\text{ср раз}}$ – среднее напряжение разряда ЛИА при циклировании АКБ 6ЛИ-25; $U_{\text{ср зар}}$ – среднее напряжение заряда ЛИА при циклировании АКБ 6ЛИ-25; $k_{\text{р}}$ и $k_{\text{з}}$ – весовые коэффициенты, равные соответственно 25/35 и 10/35 (в соответствии с токами заряда и разряда при циклировании).

Из решения уравнения (10) для указанных режимов следует: при циклировании до $U=3,95$ В средняя степень заряженности $q=0,44$; до $U=4,1$ В средняя степень заряженности $q=0,736$. Эти результаты, а также более ранние данные по циклированию макетного образца АКБ 6ЛИ-10 позволили получить линейную аппроксимацию зависимости $U_{\text{ТН}}$ от степени заряженности ЛИА (11):

$$U_{\text{ТН}} = 3,79 + 0,262 \cdot q, \text{ В} \quad (11)$$

Таким образом, $U_{\text{TH}}=f(q)$, $C_{\text{ЛИАуд}}$, $\lambda_{\text{Б}}$ и $\delta/\lambda_{\text{з}}$ – идентифицированные теплофизические характеристики. Имея эти характеристики можно достаточно точно определить температуру той или иной точки АБ, используя программное обеспечение для теплового моделирования. В процессе моделирования установлено, что наиболее критичным элементом конструкции является борн ЛИА, в объеме которого происходит тепловыделение за счет КЗ. По соображениям локализации неисправности ЛИА (т.е. отсутствия разгерметизации борна) максимально допустимая температура медного провода в районе борна принята $T_{\text{макс}}=100^{\circ}\text{C}$. Этому критерию соответствует время срабатывания байпасного устройства менее 2-3 с.

Выводы:

1. Разработана и идентифицирована энергобалансная модель ЛИА, представляющая собой зависимость внутреннего сопротивления ЛИА от температуры.

2. Экспериментально определены следующие теплофизические характеристики ЛИА: удельная теплопроводность электродного блока 38 Вт/(м·К); удельная теплоемкость блока 1,1 кДж/кг·К; удельное тепловое сопротивление зазора между блоком электродов и корпусом ЛИА 0,005 м²·К/Вт; зависимость термонеutralного напряжения ЛИА от степени заряженности.

3. Выполненное моделирование тепловых процессов в АБ с использованием полученных теплофизических характеристик показало, что при работе в штатном режиме на конец САС с

учетом деградационных процессов тепловыделение и температура наиболее опасных узлов не достигает критических значений; в случае технологических сбоев максимальное тепловыделение происходит в области борна; в целях обеспечения безопасности принята допустимая температура борна 100^oC, что соответствует времени срабатывания байпасного устройства 2-3 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по проекту 1.2.1 / 6803 (2009-2010)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Померанцева, Е.А. Наноструктурированные материалы для современных литиевых источников тока. Обзор. Под ред. Т.Л. Куловой, А.М. Скундина. Код доступа: <http://www.nanometer.ru/users/pomeran.html>
2. Бледнова, Ж.М. Пути обеспечения безопасности и ресурса литий-ионных аккумуляторных батарей космического назначения / Ж.М. Бледнова, В.В. Галкин, Н.А. Махутов, Н.А. Проценко // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2010. №1. С. 43-54.
3. Пат. № 2392494 Термомеханический силопривод / Авторы: Ж.М. Бледнова., В.В. Галкин, М.И. Чаевский и др. Приоритет от 25.12.2008. Оpubл. 20.06.2010.
4. Решение о выдаче патента по заявке № 2009101701. Байпасный переключатель / Авторы: В.В. Галкин, Ю.М. Шевченко, Ж.М. Бледнова, Н.А. Проценко. Приоритет от 20.01.09; Оpubл. 27.07.2010.
5. 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. Отчет по проекту № 2.1.2/6803. Рук. Бледнова Ж.М., (2 этап), Краснодар, 2009. – 116 с.

CALCULATED-EXPERIMENTAL ESTIMATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN CASE OF TECHNOLOGICAL FAILURES IN OPERATION OF LITHIUM-IONIC ACCUMULATOR FOR SPACE PURPOSE

© 2010 N.A. Protsenko¹, V.Yu. Lapshin², J.M. Blednova¹

¹ Kuban State Technological University, Krasnodar

² Open JSC "Saturn", Krasnodar

Results of modeling the thermal processes in case of technological failures in operation of lithium-ionic accumulator (LIA) for space purpose are resulted. It is shown, that in case of technological failures in operation of LIA the maximal heat release occurs in born area. As much as possible admissible temperature of copper wire in born area is accepted as $T_{\text{макс}}=100^{\circ}\text{C}$ to which there corresponds an operate time of bypass device (BD) about 2-3 sec. Recommendations on optimum arrangement of BD in accumulator battery are worked out.

Key words: *lithium-ionic accumulator, space vehicle, bypass device, technological failures, numerical modeling, thermal processes, thermodes, power-balanced model*

Jesfina Blednova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Dynamics and Durability of Machines. E-mail: blednova@mail.ru

Yuriy Lapshin, Chief of the Department. E-mail: Lapshin1956@mail.ru

Nikolay Protsenko, Post-graduate Student. E-mail: procenko_n@lisl.ru