

УДК 621.316.722.1

Н.Н. Цебенко, А.В. Иванов, В.А. Пчельников,  
А.А. Правикова, В.М. Рулевский, А.В. Фёдоров

## Сравнение вариантов реализации модуля контроля и управления литий-ионных аккумуляторных батарей

Проведено сравнение двух вариантов реализации модуля контроля и управления, предназначенного для работы в составе литий-ионной аккумуляторной батареи.

**Ключевые слова:** контроль параметров, измерение напряжения, литий-ионная аккумуляторная батарея.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-2-103-107

В настоящее время литий-ионные аккумуляторные батареи (ЛИАБ) благодаря своим преимуществам широко применяются как в гражданской, так и в военной технике. Основные достоинства ЛИАБ – это высокая удельная емкость и большое количество рабочих циклов. Например, серийно выпускаются ЛИАБ с емкостью до 300 А·ч, а опытные образцы с емкостью 1000 А·ч. Однако, эксплуатация батареи, состоящей из последовательно соединенных элементов на основе Li-ion, имеет ряд особенностей, основная из которых – возможность перегрева в процессе эксплуатации [1].

Аккумуляторная батарея (АБ) состоит из аккумуляторных элементов (АЭ), которые стараются подобрать с достаточно близкими техническими параметрами при изготовлении АБ, а именно токи саморазряда при хранении, скорость деградации материалов электродов, внутреннее сопротивление при зарядно-разрядном цикле и т.д. В силу вышесказанного значения напряжений на элементах аккумуляторной батареи должны быть как можно ближе друг к другу (например, от 3,782 до 3,785 В), однако их заряд возможен с определенной точностью.

АБ на основе литий-ионных аккумуляторных элементов (ЛИАЭ) в силу особенностей электрохимических процессов, протекающих в них, имеют повышенные требования к контролю их параметров в процессе эксплуатации. Неидентичность характеристик ЛИАЭ, необходимых для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик АБ, ставит задачу либо повышения требований к технологическому процессу изготовления ЛИАЭ, что ведёт к резкому удорожанию изделий, либо введения в состав ЛИАБ модуля контроля параметров АБ и управления режимом заряда-разряда (МКУ), задачей, которой является контроль напряжения на элементах АБ и выполнение процедуры балансировки в процессе эксплуатации [2].

В процессе эксплуатации батареи, состоящей из соединенных последовательно АЭ, все эти факторы приводят к образованию так называемого «окна» ( $DU$ ), которое равно разности напряжений самого заряженного ( $U_{\max}$ ) и самого разряженного ( $U_{\min}$ ) аккумулятора (рис. 1), т.е. примерно равные напряжения начинают различаться значительно. При увеличении «окна» емкость батареи будет снижаться, так

как максимально и минимально допустимые величины напряжений на одном из аккумуляторов будут достигаться раньше, чем полный заряд или разряд всей батареи. В результате расширение «окна» приводит к снижению емкости до недопустимо малой величины.

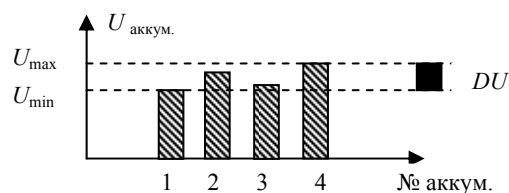


Рис. 1. «Окно» разбаланса, снижающее емкость

В настоящее время в состав аккумуляторных батарей с целью повышения их надежности и продления срока службы вводится электронный блок со схемой контроля параметров аккумуляторов и управления режимом заряда-разряда. Общепринятое название этого блока – модуль контроля и управления (МКУ). В силу особенностей работы литий-ионных аккумуляторов наличие МКУ обязательно, так как при его отсутствии при любых нештатных ситуациях или даже при технологическом разбросе параметров отдельных аккумуляторов в батарее может привести к её перегреву и, даже выводу из строя [3].

Использование МКУ обеспечивает повышение надежности и продление срока эксплуатации АБ за счет выравнивания напряжений на последовательно соединенных аккумуляторных элементах и позволяет использовать АБ с максимальной отдачей по емкости. Данное решение позволяет добиться следующего: повысить безопасность при эксплуатации ЛИАБ, увеличить эффективность зарядно-разрядного цикла, обеспечить выдачу параметров о состоянии батареи в вышестоящие системы или оператору, что значительно повышает эксплуатационные характеристики АБ. Модули контроля и управления могут быть реализованы на различной элементной базе, например на основе специализированных интегральных микросхем, что позволяет получить малые габариты, либо на элементной базе общего назначения, что ведет к увеличению габаритов, но при этом позволяет расширять функциональные возможности [4, 5].

Функциональные требования, предъявляемые к МКУ:

- связь с бортовой центральной вычислительной машиной (БЦВМ);
- контроль напряжений ЛИАЭ и ЛИАБ;
- контроль температуры ЛИАБ;
- балансировка (нивелирование разности напряжения на отдельных ЛИАЭ ЛИАБ);
- анализ текущего состояния параметров ЛИАБ и формирование сигналов запрета / разрешения для управления процессами безопасного заряда / разряда батареи [6, 7].

Дополнительными требованиями, характерными для изделий военной и космической техники, являются надёжность и, в частности, сохранение работоспособности при отказе одного или нескольких радиоэлектронных компонентов (РЭК). Для выполнения требований по отказоустойчивости, надёжности и безопасности необходимо дублирование подсистем изделия [8].

Таким образом, исходя из приведённого выше перечня требований к МКУ, можно выделить несколько основных подсистем, которые при проектировании в силу их функциональных особенностей также будут выполнены отдельным модулем [9, 10]. В частности, такими подсистемами могут быть:

- контроль напряжения – модуль измерения напряжения (МИН);
- контроль температуры – модуль измерения сопротивления (МИС);
- балансировка – модуль коммутации балансировочных резисторов (МКБР);
- связь с центральной вычислительной машиной – модуль контроллера (МК).

К изделиям космического назначения часто предъявляется противоречивое требование высокой надёжности и минимальной массы. Основным способом повышения надёжности является резервирование. Применение резервирования обычно связано с увеличением массы, объема, стоимости изготовления. Для получения оптимальных массогабаритных показателей применяются различные способы резервирования: нагруженный, ненагруженный, облегченный резерв. В зависимости от конкретных условий резервироваться могут системы, модули или отдельные элементы [11].

Для измерительных модулей, кроме требований погрешности измерения, также появляется требование оценки достоверности измерений. Данное требование, при условии парирования неисправности любого РЭК в тракте измерения, можно обеспечить выполнением устройства контроля по мажоритарной схеме [12].

Структура преобразования информации по мажоритарной схеме в общем случае приведена на рис. 2. Такая схема применяется в системах с нагруженным резервом, где 1, 2, ...,  $n$  – одинаковые устройства преобразования информации, работающие параллельно ( $n$  – общее число элементов);  $O$  – мажоритарный орган [13];  $X_1, X_2, X_n$  – измеряемые величины;  $Y_1, Y_2, Y_n$  – сигналы от устройств 1, 2, 3;

$Y$  – выдаваемый во внешнюю цепь сигнал, равный большинству сигналов от измерителей.

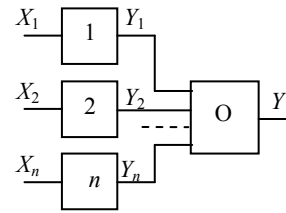


Рис. 2. Схема мажоритарного резервирования в общем виде

Данный вариант резервирования принято называть методом «голосования большинством». Очевидным является то, что для его корректной работы число обрабатываемых параллельных измерительных цепей должно быть не менее трех.

На рис. 3, вариант 1, приведен частный случай реализации указанного метода, где  $A_1$  – контроллер МКУ на базе микропроцессорного устройства;  $B_1, B_2$  и  $B_3$  – идентичные каналы измерения напряжений ЛИАЭ и ЛИАБ.

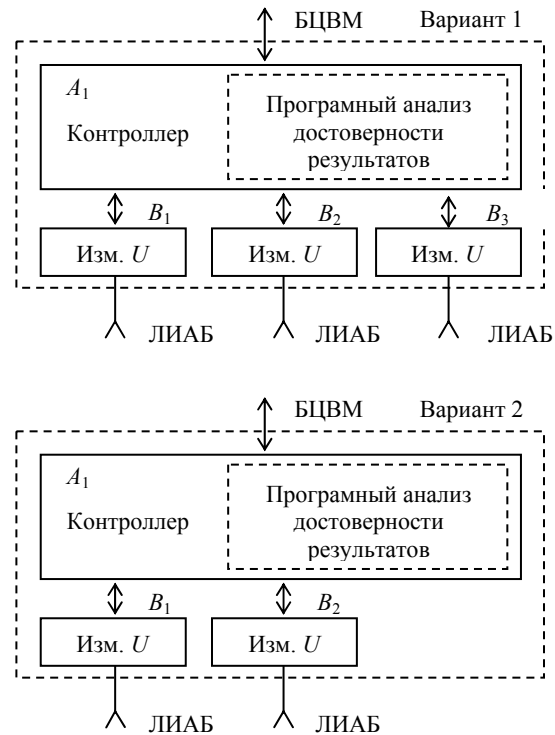


Рис. 3. Варианты реализации системы измерения напряжения

В данном случае анализ достоверности результатов измерений напряжений ЛИАБ по трём массивам выполняется реализацией программного мажоритарного одноимённых параметров. Истинным значением принимается:

- среднее значение трёх измеренных значений при условии, что их три попарные разности не превышают величины, принятой за допуск;
- среднее значение двух измеренных значений наиболее близких друг другу, при условии, что одна из трёх попарных разностей превышает величину, принятую за допуск;

– среднее значение двух измеренных значений, наиболее близких друг другу, при условии, что две из трёх попарных разностей превышает величину, принятую за допуск;

– прочее принимается как неисправность подсистемы измерения напряжения.

Таким образом, при принятии решения достоверности результата измерения используются три аппаратных канала измерения, три массива измеренных значений, дополнительный критерий допуска, мера, обусловленная собственной погрешностью каналов измерения, и контроллер с ПО в качестве мажоритарного элемента.

Так как для изделий космического применения лимитирующим фактором является масса, то целесообразно оптимизировать способ резервирования. Учитывая тот факт, что объектом контроля является ЛИАБ, характеристики которой заранее и достаточно точно известны, то можно проводить проверку достоверности измерений, основываясь на свойствах ЛИАБ.

В качестве дополнительных критериев оценки достоверности результатов измерения можно использовать следующие свойства ЛИАБ:

– сумма напряжений всех ЛИАЭ равна полному напряжению ЛИАБ (с учётом погрешности измерения и падений напряжений на токопроводящих соединителях ЛИАЭ одной ЛИАБ);

– напряжения ЛИАЭ находятся в определённом диапазоне;

– полное напряжение ЛИАБ находится в определённом диапазоне;

– при наличии тока заряда или разряда падение напряжения на внутреннем сопротивлении ЛИАЭ вносит равные погрешности как в измеряемые напряжения ЛИАЭ, так и в измеряемое напряжение ЛИАБ, и его можно не учитывать.

Исходя из вышеприведённого, подсистему контроля напряжений ЛИАЭ и ЛИАБ можно реализовать в виде, приведённом на рис. 1, вариант 2, с использованием двух каналов измерения ( $B_1, B_2$ ).

Соответственно подсистема измерения напряжения МКУ может быть выполнена двухканальной, состоящей из основного и резервного каналов. Причём каждый канал выполняет как поэлементный контроль напряжений, так и контроль напряжения всей ЛИАБ. Результат измерений подвергается анализу на соответствие приведённым выше особенностям ЛИАБ, на основании чего принимается решение о исправности каналов. По умолчанию МКУ в качестве результата измерения предоставляет данные по основному каналу измерения.

Таким образом, при принятии решения достоверности результата измерения используются два аппаратных канала измерения, два массива измеренных значений, дополнительный критерий на основе свойств ЛИАБ и контроллер с ПО в качестве устройства принятия решения.

Сравнение различных способов реализации системы измерения напряжения представлено в таблице.

Различные способы реализации системы измерения напряжения

№ п/п	МКУ (мажоритар)	МКУ (на основе свойств ЛИАБ)
1	Три канала измерения напряжений ЛИАЭ и ЛИАБ	Два канала измерения напряжений ЛИАЭ и ЛИАБ
2	Контроллер (программный анализ достоверности результата измерений – мажоритар)	Контроллер (программный анализ достоверности результата измерений – на основе свойств ЛИАБ)

Проведем сравнение надежности двух способов реализации подсистемы измерения напряжения. Понятие резервирования будем определять согласно [14].

Вариант 1. Мажоритарное резервирование (с дробной кратностью, при которой два и более однотипных элементов резервируются одним и более резервными элементами) [15].

Вероятность безотказной работы мажоритарной системы при условии, что все элементы имеют одинаковую надежность [14], находится по формуле

$$R_1(t) = \sum_{i=0}^m C_n^i \cdot Q^i(t) \cdot P^{n-i}(t) = \quad (1)$$

$$= P^3(t) + 3 \cdot (1 - P(t)) \cdot P^2(t) = 3 \cdot P^2(t) - 2 \cdot P^3(t),$$

где  $m$  – количество резервных элементов;  $n$  – общее число элементов;  $C_n^i$  – биномиальный коэффициент из  $n$  по  $i$ ;  $P(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента;  $Q(t)$  – вероятность отказа  $i$ -го элемента

Вариант 2. Нагруженный резерв.

Вероятность безотказной работы системы с постоянно включенным резервом при условии, что все элементы имеют одинаковую надежность [3], находится по формуле

$$P_2(t) = 1 - (1 - P(t))^{m+1} = 1 - (1 - P(t))^2 = 2 \cdot P(t) - P^2(t),$$

где  $m$  – количество резервных элементов;  $P(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента.

Рассчитаем отношение вероятностей безотказной работы ( $\Delta_p$ ) первого варианта относительно второго: следовательно,  $R_1 < P_2$ .

$$\Delta_p = \frac{R_1}{P_2} = \frac{2P \cdot (P - 1,5)}{P - 2} < 1 \text{ при } 0 < P < 1.$$

Проведем сравнение массы двух способов реализации подсистемы измерения напряжения. Оценку будем производить на конкретном примере. На рис. 4 приведен пример реализации подсистемы измерения напряжения по варианту 1, соответственно при реализации по варианту 2 система будет содержать на один элемент ИЗ меньше. В обоих вариантах И<sub>г</sub> – измеритель, а ПП – обязательная для их нормального функционирования подсистема питания. Ориентировочные размеры на рис. 4 указаны в миллиметрах.

Для данного сравнения сделаем следующие допущения: измерители и подсистема питания имеют одинаковую удельную массу, масса пропорциональна площади, занимаемой на печатной плате, подсистема

тема питания остается неизменной. Из рисунка видно, что площадь, занимаемая подсистемой питания, составляет около 35% от площади, занимаемой измерителем. Таким образом, масса варианта 1 будет равна

$$M_1 = 3M_0 + 0,35M_0.$$

Масса варианта 2 будет равна:

$$M_2 = 2M_0 + 0,35M_0,$$

где  $M_0$  – масса измерителя.

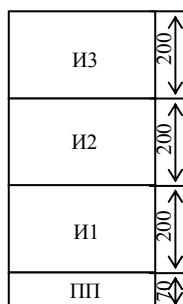


Рис. 4. Компоновка подсистемы измерения по варианту 1

Определим выигрыш по массе при втором способе реализации, для чего рассчитаем отношение масс ( $\Delta_M$ ) варианта 2 относительно варианта 1:

$$\Delta_M = \frac{M_2}{M_1} = \frac{2,35M_0}{3,35M_0} = 0,7.$$

Таким образом, выигрыш в массе составляет 30%.

**Вывод.** Реализация подсистемы измерения на основе свойств ЛИАБ в сравнении с мажоритарным способом будет иметь следующие преимущества: содержит меньшее количество элементов, обладает большей надежностью и обеспечивает выигрыш по массе 30%.

#### Литература

1. Рыкованов А. Система баланса Li-ion аккумуляторных батарей // Силовая электроника. – 2009. – №1. – С. 52–55.
2. Хромов А. В. Литий-ионные аккумуляторные батареи низкоорбитальных космических аппаратов // Вопросы электромеханики. – М., 2016. – Т. 152. – С. 20–28.
3. Hannana M.A., Lipub M.S.H., Hussainb A., Mohamedb A. A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations// Renewable and Sustainable Energy Reviews. – October 2017. – Vol. 78. – PP. 834–854.
4. Варламов Д.О., Яблочкин С.И., Еременко В.Г. Устройство выравнивания напряжения на ячейках Li-Ion аккумуляторной батареи и его моделирование в программе P-Spice // Матер. междунар. науч.-техн. конф. ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». – М., 2012. – С. 9–14.
5. Moore S., Schneider P. A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems // SAE Technical Paper 2001-01-0959. – 2001.
6. Ouyang Q., Chen J. Optimal Cell-to-Cell Balancing Topology Design for Serially Connected Lithium-Ion Battery Packs // IEEE transactions on sustainable energy. – 2018. – Vol. 1. – PP. 350–360.
7. Ouyang Q., Chen J., Zheng J., Hong Y. SOC Estimation-Based Quasi-Sliding Mode Control for Cell Balancing in

Lithium-Ion Battery Packs // IEEE transactions on industrial electronics. – 2018. – Vol. 4. – PP. 3427–3436.

8. Белоножко П.П. Космическая роботехника. Современное состояние, перспективные задачи, тенденции развития. Аналитический обзор // Наука и образование / МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 2016. – С. 110–153.

9. Dong-Hua Zhang, Guo-Rong Zhu, Shao-Jia He et al. Balancing Control Strategy for Li-Ion Batteries String Based on Dynamic Balanced Point// Energies. – 2015. – Vol. 8. – PP. 1830–1847.

10. Yusof M.S., Toha S.F., Kamisan N.A. et al. Battery Cell Balancing Optimisation for Battery Management System // International Conference on Mechanical, Automotive and Aerospace Engineering. – 2016.

11. Цебенко Н.Н., Иванов А.В., Ракитин Г.А. и др. Модуль контроля и управления для литий-ионных аккумуляторных батарей // Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований. – Вып. 2. – Химки, 2017. – С. 484–491.

12. Половко А.М. Основы теории надежности: практикум / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 560 с.

13. Иьуду К.А. Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем: учеб. пособие для вузов по спец. «Вычислительные машины комплексы, системы и сети». – М.: Высш. шк., 1989. – 216 с.

14. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

15. Денисенко В. Аппаратное резервирование в промышленной автоматизации. – Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. – 2008. – № 2. – С. 90–99.

#### Цебенко Николай Николаевич

Зав. лаб. НИИ автоматизации и электромеханики (НИИ АЭМ) ТУСУРа  
Белинского ул., 53, г. Томск, Россия, 634034  
Тел.: +7 (382-2) 55-61-96 доб. 13-06  
Эл. почта: tnn@niiuem.tomsk.ru

#### Иванов Александр Валериевич

Вед. инж. НИИ АЭМ ТУСУРа  
Белинского ул., 53, г. Томск, Россия, 634034  
Тел.: +7 (382-2) 56-37-46  
Эл. почта: ivanovnii@sibmail.com;

#### Пчельников Виктор Алексеевич

Зам. директора по НР НИИ АЭМ ТУСУРа  
Белинского ул., 53, г. Томск, Россия, 634034  
Тел.: +7 (382-2) 56-00-59  
Эл. почта: pchelnikov@niiuem.tomsk.ru

#### Правикова Александра Александровна

Мл. науч. сотр. НИИ АЭМ ТУСУРа  
Белинского ул., 53, г. Томск, Россия, 634034  
Тел.: +7 (382-2) 55-61-96  
Эл. почта: bezruchenko@niiuem.tomsk.ru

#### Рулевский Виктор Михайлович

Канд. техн. наук, директор НИИ АЭМ ТУСУРа  
Белинского ул., 53, г. Томск, Россия, 634034  
Тел.: +7 (382-2) 55-61-96  
Эл. почта: rulevsky@niiuem.tomsk.ru

**Фёдоров Александр Владимирович**

Зав. лаб. НИИ АЭМ ТУСУРа

Белинского ул., 53, г. Томск, Россия, 634034

Тел.: +7 (382-2) 55-56-80

Эл. почта: fedorov@niiuem.tomsk.ru

Tsebenko N.N., Ivanov A.V., Pchel'nikov V.A., Pravikova A.A., Rulevskiy V.M., Fedorov A.V.

**Comparison of the implementation options of the module for monitoring and controlling lithium-ion batteries**

The article compares two versions of the monitoring and control module, intended for operation as a part of a lithium-ion battery.

**Keywords:** parameter control, voltage measurement, lithium-ion rechargeable battery.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-2-103-107

*References*

- Rykovanov A. Sistema balansa Li-ion akkumulyatornykh batarey. [Balancing system for Li-ion rechargeable batteries] *Silovaya elektronika*, vol. 1, 2009, pp. 52–55 (In Russ.).
- Khromov A.V. Lithium-ion batteries of low-orbit spacecraft. [Litiy-ionnyye akkumulyatornye batarei nizkoorbitalnykh kosmicheskikh apparatov] *Voprosy elektromekhaniki*, 2016, vol. 152, pp. 20–28 (In Russ.).
- Hannana M.A., Lipub M.S.H., Hussainb A., Mohamedb A. A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, October 2017, vol. 78, pp. 834–854.
- Varlamov D.O., Yablochkin S.I., Eremenko V.G. Ustroystvo vyravnivaniya napryazheniya na yacheykakh Li-Ion akkumulyatornoy batarei i ego modelirovanie v programme P-Spice. [Device for voltage equalization on cells of Li-Ion battery and its simulation in P-Spice program] *Avtomobil i traktorostroenie v Rossii: priority razvitiya i podgotovka kadrov: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii AAI, posvyashchennoy 145-letiyu MGTU «MAMI»*, 2012, pp. 9–14 (In Russ.).
- Moore S., Schneider P. A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems. *SAE Technical Paper* 2001-01-0959, 2001.
- Ouyang Q., Chen J. Optimal Cell-to-Cell Balancing Topology Design for Serially Connected Lithium-Ion Battery Packs. *IEEE transactions on sustainable energy*, 2018, vol. 1, pp. 350–360.
- Ouyang Q., Chen J., Zheng J., Hong Y. SOC Estimation-Based Quasi-Sliding Mode Control for Cell Balancing in Lithium-Ion Battery Packs. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2018, vol. 4, pp. 3427–3436.
- Belonozhko P.P. Kosmicheskaya robotekhnika. Sovremennoe sostoyanie, perspektivnye zadachi, tendentsii razvitiya. Analiticheskii obzor. [Space robotics. Current state, long-term tasks, development trends. Analytical review] *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N. E. Baubana*, Moscow, 2016, pp. 110–153 (In Russ.).
- Dong-Hua Zhang, Guo-Rong Zhu, Shao-Jia He, Shi Qiu, Yan Ma, Qin-Mu Wu, Wei Chen. Balancing Control Strategy for Li-Ion Batteries String Based on Dynamic Balanced Point, *Energies*, 2015, vol. 8, pp. 1830–1847.
- Yusof M.S., Toha S.F., Kamisan N.A., Hashim W.N., Abdullah A. Battery Cell Balancing Optimisation for Battery Management System. *International Conference on Mechanical, Automotive and Aerospace Engineering*, 2016.
- Tsebenko N.N., Ivanov A.V., Rakitin G.A., Rulevskii V.M., Fedorov A.V. Modul kontrolya i upravleniya dlya litii-ionnykh akkumulyatornykh batarei. [Control and management module for lithium-ion batteries] *Aktualnye voprosy proektirovaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya fundamentalnykh i prikladnykh nauchnykh issledovaniy*, Khimki, 2017, vol. 2, pp. 484–491 (In Russ.).
- Polovko A.M. *Osnovy teorii nadezhnosti. Praktikum* [Fundamentals of the reliability theory]. A.M. Polovko, S.V. Gurov, SPb.: BKhV-Peterburg, 2006 (In Russ.).
- Iyudu K. A. *Nadezhnost, kontrol i diagnostika vychislitelnykh mashin i sistem: Ucheb. posobie dlya vuzov po spets. «Vychislitelnye mashiny kompleksy, sistemy i seti»*. [Reliability, control and diagnostics of computers and systems]. M.: Vyssh. shk., 1989 (In Russ.).
- GOST 27.002-89. *Nadezhnost v tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya*. [Reliability in techniques. Basic concepts. Terms and Definitions] (In Russ.).
- Denisenko V. Apparatnoe rezervirovanie v promyshlennoy avtomatizatsii. Vol. 1 [Hardware redundancy in industrial automation] *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii*, 2008, vol. 2, pp. 90–99.

**Nikolai N. Tsebenko**

Head of laboratory, NII AEM TUSUR  
53, Belinskogo st., Tomsk, Russia, 634034  
Phone: +7 (382-2) 55-61-96 dob. 1306  
Email: tnn@niiuem.tomsk.ru

**Aleksandr V. Ivanov**

Lead Engineer, NII AEM TUSUR  
53, Belinskogo st., Tomsk, Russia, 634034  
Phone: +7 (382-2) 56-37-46  
Email: ivanovnii@sibmail.com

**Viktor A. Pchel'nikov**

Vice director NII AEM TUSUR  
53, Belinskogo st., Tomsk, Russia, 634034  
Phone: +7 (382-2) 56-00-59  
Email: pchel'nikov@niiuem.tomsk.ru

**Aleksandra A. Pravikova**

Junior researcher, NII AEM TUSUR  
53, Belinskogo st., Tomsk, Russia, 634034  
Phone.: +7 (382-2) 55-61-96  
Email: bezruchenko@niiuem.tomsk.ru

**Viktor M. Rulevskii**

PhD, Director, NII AEM TUSUR  
53, Belinskogo st., Tomsk, Russia, 634034  
Phone: +7 (382-2) 55-61-96  
Email: rulevsky@niiuem.tomsk.ru

**Aleksandr V. Fedorov**

Head of laboratory, NII AEM TUSUR  
53, Belinskogo st., Tomsk, Russia, 634034  
Phone: +7 (382-2) 55-56-80  
Email: fedorov@niiuem.tomsk.ru