



ул. Ленина, д. 52, г. Железногорск, ЗАТО Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация, 662972  
Тел.: (3919) 728008, 64500, Факс: (3919) 722635, 56146, e-mail: office@iss-reshetnev.ru, http: //www.iss-reshetnev.ru

от 20.09.2018 г. исх № НТС-08/31  
на № 20/2411 от 08.08.2018 г.

Председателю диссертационного совета  
Д 212.268.03 при Томском  
государственном университете систем  
управления и радиоэлектроники (ТУСУР),  
доктору технических наук,  
профессору  
Шелупанову А.А.

пр. Ленина, 40, г. Томск, 634050

Тема: Отзыв на диссертационную  
работу Хандорина М.М.

**Уважаемый Александр Александрович!**

Высылаю Вам отзыв ведущей организации АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнева» на диссертационную работу М.М. Хандорина «Метод, алгоритмы и микропроцессорное устройство оценивания параметров литий-ионной аккумуляторной батареи космического аппарата», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления.

Приложение: «Отзыв...» в 2х экз., на 7 листах каждый.

Главный ученый секретарь НТС,  
доктор технических наук, профессор

*С уважением*

Е.Н. Головенкин



ул. Ленина, д. 52, г. Железногорск, ЗАТО Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация, 662972  
Тел. (3919) 76-40-02, 72-24-39, Факс (3919) 72-26-35, 75-61-46, e-mail: office@iss-reshetnev.ru, http://www.iss-reshetnev.ru  
ОГРН 1082452000290, ИНН 2452034898

«УТВЕРЖДАЮ»

Председатель Президиума НТС,  
Генеральный директор АО «Информационные  
спутниковые системы» им. академика  
М.Ф. Решетнёва», Заслуженный создатель  
космической техники, лауреат  
Государственной премии РФ и премий  
Правительства Российской Федерации в  
области науки и техники, доктор технических  
наук, профессор, Заслуженный деятель науки  
Российской Федерации, член-корреспондент  
РАН



Н.А. Тестоедов

«20 сентября» 2018 г.

## О Т З Ы В

ведущей организации АО «Информационные спутниковые системы»  
им. академика М.Ф. Решетнёва» на диссертацию

**Хандорина Михаила Михайловича**

**«Метод, алгоритмы и микропроцессорное устройство оценивания параметров литий-ионной аккумуляторной батареи космического аппарата»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

### Актуальность исследований

Внедрение в космические аппараты (КА) современных литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) потребовало создания специализированных блоков электроники для их контроля и защиты от нештатных режимов работы. Как показывает анализ технических решений разработанных в настоящее время устройств, производимых как зарубежными Aeroflex, Thales Alenia, так и отечественными АО «НПЦ «Полнос», АО «АВЭКС», НИИ

АЭМ ТУСУР фирмами, в настоящий момент не решены задачи оценки степени заряженности, остаточной емкости и технического состояния батареи. Точная оценка степени заряженности и остаточной емкости ЛИАБ в реальном времени необходима для КА, работающих на низких и средних орбитах, для аппаратов с интенсивно меняющейся нагрузкой в течении сеанса, а также при возникновении нештатной ситуации на борту КА. При этом, в условиях ограниченных вычислительных ресурсов бортовой аппаратуры космического аппарата, обеспечение режима реального времени для ресурсоёмких алгоритмов будет затруднено.

Разработкой методов оценки технического состояния ЛИАБ занимались Liu D., Wang H., He H., Безручко К.В., Галкин В.В., Томашевский Ю.Б. и многие другие. Так в публикациях He H. показаны методы построения фильтра Калмана для оценки степени заряженности аккумуляторной батареи, а в работах Chang W.Y. - применяются искусственные нейронные сети.

Исследованиям математических моделей ЛИАБ на основе эквивалентных схем замещения посвящены работы Иванчуры В.И., Безручко К.В., He H. а также коллектива компании Saft и многих других. Однако известные подходы и методы оценки степени заряженности и технического состояния ЛИАБ космического применения невозможно реализовать по следующим причинам: высокая вычислительная сложность, требование дополнительных аппаратных средств, или недостаточная точность при длительном сроке эксплуатации батареи.

Вышеизложенное, позволяет сделать вывод о том, что задача создания блока электроники ЛИАБ, выполняющего оценку остаточной емкости, степени заряженности и технического состояния ЛИАБ **является актуальной**, а ее решение имеет важное практическое значение.

Представленная на отзыв диссертационная работа Хандорина М.М. выполнена на 147 листах машинописного текста, включая 5 таблиц, 55 рисунков, список литературы, включающий 86 наименований и 3 приложения, состоит из введения, 4 глав и заключения.

**Во введении** автор обосновал актуальность диссертационных исследований, представил их научную новизну и практическую ценность полученных результатов.

**В первой главе диссертации** приведен краткий обзор существующих блоков электроники ЛИАБ ведущих и зарубежных производителей, приведены их основные характеристики, достоинства и недостатки. Также в первой главе автор рассмотрел существующие методы и алгоритмы оценки SOC и технического состояния батареи. Кроме того, приведен анализ отечественной, высоконадежной элементной базы и выдвинуты требования к методам и алгоритмам оценки степени заряженности аккумулятора (SOC) батареи, которые могут быть реализованы в блоке электроники космического аппарата.

**Во второй главе** автором рассмотрено построение математической модели литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) и литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) на основе модели Тевенина, показано введение в модель переменных параметров для адекватного представления эффектов, происходящих в аккумуляторе при заряде-разряде и при изменении температуры. Также приведен способ прямого вычисления параметров полученной модели в ходе циклов заряда-разряда АБ. Приведено количественное сравнение характеристик построенной модели с реальной ЛИАБ и методики определения ее параметров в тестовом режиме.

**В третьей главе** Хандориным М.М. приведены метод и алгоритмы оценки SOC батареи и ее технического состояния на основе математических и имитационных моделей. Проведена оценка точности представленных метода и алгоритмов путем компьютерного моделирования в среде Matlab. Дана оценка влияния погрешностей измерительных устройств на точность работы алгоритмов.

**В четвертой главе** автор рассмотрел экспериментальные установки для проверки точности алгоритмов оценки SOC батареи и ее технического состояния, а также привел результаты экспериментальных исследований. Кроме того, в данной главе представлены основные аппаратно-программные решения, необходимые для построения блока электроники, выполняющего алгоритм оценки SOC ЛИАБ и ее технического состояния.

**В заключении** приведены основные теоретические и практические результаты научных исследований.

**В приложении** представлен листинг программного кода алгоритмов оценивания степени заряженности аккумуляторной батареи и ее технического состояния, копии патента на изобретение и свидетельства на программный продукт

### **Научная новизна и основные результаты исследований**

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- разработана новая математическая модель литий-ионной аккумуляторной батареи, отличающаяся меньшей вычислительной сложностью по отношению к аналогам при сравнимой точности;
- разработаны эффективные методы оценки параметров модели;
- разработан метод оценки остаточной емкости и степени заряженности батареи и алгоритмы, реализующие его на микроконтроллере в режиме реального времени.

В целом научную новизну рецензируемой диссертации составляют следующие положения.

1. Предложена новая математическая модель литий-ионного аккумулятора на основе схемы замещения Тевенина, отличающаяся использованием сплайн-функций при

определении ее параметров в режимах заряда-разряда с учетом влияния температуры и деградации аккумулятора и обладающая малой вычислительной сложностью;

2. Предложен метод оценки остаточной емкости и степени заряженности ЛИАБ на основе ее математической модели, основанный на подстройке значения текущей степени заряженности при помощи линейной функции, учитывающий саморазряд батареи и работающий без прерывания режима эксплуатации при ограничениях на вычислительные ресурсы микропроцессорной измерительной системы;

3. Созданы алгоритмы оценки остаточной емкости и степени заряженности батареи на основе перенастройки параметров математической модели каждого аккумулятора, отличающиеся низкой вычислительной сложностью при реализации на микроконтроллере в реальном времени.

### **Практическая ценность результатов исследований**

Разработанные математические модели и методы оценки степени заряженности остаточной емкости ЛИАБ позволили разработать алгоритмы и программное обеспечение оценки параметров ЛИАБ в режиме реального времени и технические решения для создания резервированного блока электроники космического аппарата.

Практическая ценность диссертационного исследования состоит в том, что элементы системы управления ЛИАБ, разработанные в ходе исследования, применяются в разработке прибора контроля и защиты аккумуляторной батареи (ПКЗ АБ-П).

### **Достоверность и обоснованность основных результатов исследований**

Основные положения, выводы и рекомендации, полученные в диссертации, обоснованы и аргументированы. Сформулированная в диссертации задача была исследована и решена на основе корректного использования методов интегрального исчисления, численных методов решения дифференциальных уравнений, методов интерполяции, методов компьютерного моделирования и натурных испытаний. Для обработки численных данных результатов исследования использовались статистические методы.

Достоверность полученных результатов и выводов диссертационной работы подтверждается:

- корректным применением математических методов;
- компьютерным моделированием;
- хорошей сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

## Апробация и публикации

Результаты исследований автора прошли апробацию и одобрены учеными и специалистами на международных, всероссийских, региональных научно-практических конференциях и технических семинарах.

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ: 4 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, одна работа в рецензируемом журнале, 4 публикации в материалах всероссийских и международных конференций, один патент на изобретение и одно свидетельство на программный продукт.

Диссертационная работа в целом имеет законченный характер, достаточно подробно проиллюстрирована и соответствует профилю специальности 05.13.05 - «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления».

### Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Проведенное диссертационное исследование необходимо продолжить в плане повышения точности оценки остаточной и полной емкости аккумуляторной батареи, а так же совершенствования методик подстройки параметров модели в процессе эксплуатации.

Для предприятий, занимающихся разработкой космических аппаратов и их систем таких, как АО «ИСС» и АО «НПЦ «Полус» можно рекомендовать следующие результаты диссертационной работы:

- метод оценки остаточной, полной емкости ЛИАБ и ее технического состояния может быть внедрен, как в приборы контроля и защиты ЛИАБ, так и в алгоритмы вычислительного комплекса космического аппарата;

- устройство управления с холодным резервом может применяться в составе блока электроники ЛИАБ.

### Замечания и недостатки диссертационной работы

1. В работе принято допущение о том, что увеличение погрешности оценки параметров ЛИАБ при больших глубинах разряда (более 90 %) не отражается на качестве оценки, поскольку работа ЛИАБ в данном режиме осуществляется крайне редко. Действительно, штатная эксплуатация ЛИАБ в составе СЭП КА не предполагает разряд ЛИАБ до 100 % от её максимальной энергоёмкости. Кроме того, из экспериментально полученных зависимостей остаточной емкости ЛИАБ от напряжения известно, что распределение емкости по напряжению ЛИАБ смещено в область высоких напряжений. Вместе с тем, более точная оценка остаточной энергоемкости при значительной глубине разряда могла бы обеспечить необходимое уточнение значений напряжения ЛИАБ, при котором следует прекращать ее разряд во избежание необратимых изменений в ЛИАБ вследствие переразряда.

2. На листе 104 указано, что введение в состав прибора ПКЗ АБ энергонезависимой памяти связано с необходимостью введения корректировок в логику управления зарядом. Вместе с тем, логика управления зарядом не связана с наличием или отсутствием в составе ПКЗ АБ энергонезависимой памяти.

3. На листе 68 указан профиль тока разряда (рисунок 3.4) и сказано, что данный профиль является периодической последовательностью. Однако значение тока в начале последовательности (в отметке 0 с) не соответствует значению тока в конце последовательности (в отметке ~4100 с). Что невозможно для периодического повторения. Кроме этого, не дано пояснение, почему выбран именно такой профиль тока разряда.

4. На листе 92 указан объём разработанного ПО, а на листе 105 указаны объёмы памяти, применяемой в блоке электроники. Из представленной информации следует, что разработанная программа занимает около половины располагаемой памяти. Однако не указано, какой объём занимают прочие программы, обеспечивающие выполнение прибором своих целевых функций контроля и управления ЛИАБ.

Указанные замечания не имеют принципиального характера и не снижают в целом положительной оценки диссертационной работы М.М. Хандорина.

#### **Заключение**

1. Диссертационная работа Хандорина Михаила Михайловича выполнена на высоком научно-техническом уровне, является законченной научно-исследовательской, квалификационной работой, основные результаты которой достаточно полно представлены в публикациях и использованы в проектных.

2. Автором диссертации сформулирована и решена важная научно-техническая задача создания блока электроники ЛИАБ, выполняющего оценку остаточной емкости, степени заряженности и технического состояния ЛИАБ.

3. Соискателем разработана совокупность теоретических, технических, методических и инженерных решений, внедрение которых можно рассматривать как вклад в развитие научного направления, связанного с реализацией элементов и устройств контроля и защиты литий-ионных аккумуляторных батарей.

4. Автореферат диссертации в целом отражает ее содержание.

5. Диссертационная работа по своей актуальности, научной новизне и практической значимости отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Хандорин Михаил Михайлович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления».

Диссертационная работа Хандорина Михаила Михайловича, автореферат и настоящий отзыв были всесторонне обсуждены и одобрены на научном семинаре отдела бортовых систем электропитания КА и заседании Президиума НТС АО «Информационные спутниковые системы» им. Академика М.Ф. Решетнева». (Протокол № 10 от 18 сентября 2018г.)

Главный учёный секретарь НТС,  
Заслуженный создатель космической техники,  
Заслуженный инженер России,  
Действительный член Российской и  
Международной инженерных академий,  
Лауреат премий Правительства РФ,  
доктор технических наук, профессор



20.09.2018г.

Е.Н. Головенкин

Начальник отдела  
бортовых систем электропитания  
космических аппаратов



М.В. Нестеров