

*На правах рукописи*



**Хандорин Михаил Михайлович**

**МЕТОД, АЛГОРИТМЫ И МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УСТРОЙСТВО  
ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ЛИТИЙ-ИОННОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ  
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и Акционерном обществе «Научно-производственный центр «Полус»

**Научный руководитель –**

доктор технических наук профессор  
**Букреев Виктор Григорьевич**

**Официальные оппоненты:**

**Иванчура Владимир Иванович,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования  
Института космических и информационных технологий  
Сибирского федерального университета,  
г. Красноярск

**Орлов Павел Евгеньевич**  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
Научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники

**Ведущая организация –**

Акционерное общество  
«Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», г. Железногорск

Защита состоится «18» октября 2018 г. в 15 часов 15 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.03 Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ТУСУРа по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146, а также на официальном сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/wppcdymd>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Зыков Дмитрий Дмитриевич

**Актуальность работы.** Создание новых космических платформ, таких как «Экспресс-1000Н», «Экспресс-2000» и «ГЛОНАСС-К2» (АО «ИСС» им. акад. М.Ф. Решетнева), предполагало существенное увеличение мощности полезной нагрузки систем электропитания космического аппарата (КА) при сохранении его массы. Это требование и определило использование в составе систем электропитания КА литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ), обладающих высокими удельными энергетическими характеристиками. Практическая эксплуатация ЛИАБ на автономных аппаратах невозможна без применения специализированных блоков электроники (БЭ) для защиты батареи от недопустимых уровней разряда и перезаряда, выравнивания напряжения аккумуляторов и отключения при их отказе.

Разработка блока электроники ЛИАБ, позволяющего решить все вышеперечисленные задачи, была выполнена одним из ведущих предприятий космической отрасли – АО «НПЦ «Полус». Однако данный блок электроники и его известные аналоги не обеспечивают определение степени (*SOC*) заряженности, остаточной ( $Q_2$ ) емкости и технического (*SOH*) состояния аккумуляторов ЛИАБ.

В настоящее время оценка параметров ЛИАБ возлагается на бортовой вычислительный комплекс (БВК) космического аппарата и наземные службы сопровождения его эксплуатации. Это приводит к усложнению программного обеспечения БВК и задержке принятия критически-важных решений, таких как отключение деградировавших и неисправных аккумуляторов, снижающих емкость АБ или отключении части нагрузки для защиты батареи от критического разряда. Такое решение неприемлемо для космических аппаратов, функционирующих на низких и средних орбитах, где наработка АБ может достигать 50000 циклов за срок активного существования в 5 – 7 лет, а длительность цикла заряда-разряда аккумуляторов измеряется десятками минут, и задержка в принятии решения может привести к отказу всей батареи. Ситуация осложняется еще и тем, что низкоорбитальные космические аппараты, как правило, используются группами, что еще больше увеличивает объем телеметрической информации о состоянии подсистем КА для наземных служб.

При нештатных режимах работы бортовых систем необходимо иметь достоверную количественную оценку технического состояния аккумуляторной батареи в автоматическом режиме на борту космического аппарата при принятии решений о продлении ресурса или выводе его из эксплуатации.

Вопросам разработки блоков электроники ЛИАБ космических аппаратов посвящено значительное количество научных публикаций, в том числе и практического характера, например, монография Patel M.R. «Spacecraft power systems». В книге рассмотрены основные характеристики, алгоритмы работы и способы построения систем контроля и управления ЛИАБ, однако этот труд рассматривает заявленную тему лишь в самом общем виде.

Большая работа по созданию современных блоков электроники ЛИАБ космических аппаратов выполняется отечественными предприятиями: АО «НПЦ «Полус», АО «АВЭКС», НИИ АЭМ ТУСУР, а также зарубежными фирмами: Thales Alenia, Aeroflex и другими. Несмотря на то, что эти блоки электроники включают в себя схему автономной балансировки аккумуляторов, они не имеют функций оценки степени заряженности и технического состояния батареи.

Разработкой методов оценки технического состояния ЛИАБ занимались Liu D., Wang H., He H., Безручко К.В., Галкин В.В., а также Томашевский Ю.Б. и многие другие.

Так в публикациях He H. показаны методы построения фильтра Р. Калмана для оценки степени заряженности аккумуляторной батареи, а в работах Chang W.Y. показано

применение искусственных нейронных сетей для той же цели. Сотрудниками АО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнева разрабатывались методы оценки степени заряженности ЛИА на основе нечеткой логики.

Очевидно, что оценка технического состояния ЛИАБ непосредственно связана с построением ее математической модели. Исследованиям математических моделей ЛИАБ на основе эквивалентных схем замещения посвящены работы Иванчуры В.И., Безручко К.В., Не Н. 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.

**Объектом исследования** является система управления литий-ионной аккумуляторной батареей космического аппарата.

**Предмет исследования:** методы и алгоритмы системы управления ЛИАБ, применяемые для оценки ее степени заряженности и технического состояния.

**Цель работы** состоит в повышении точности оценки степени заряженности и технического состояния ЛИАБ в системе электроснабжения космического аппарата при ограничениях на массогабаритные показатели и потребляемую мощность устройств контроля и управления батареями.

**Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:**

1. Выполнить анализ существующих методов оценивания параметров ЛИАБ с точки зрения их вычислительной сложности и точности, а также анализ характеристик промышленно выпускаемых блоков электроники.

2. Разработать математическую модель ЛИАБ, отличающуюся низкой вычислительной сложностью при выполнении на микроконтроллере численных расчетов в реальном времени.

3. Разработать метод оценивания степени заряженности, остаточной емкости и технического состояния ЛИАБ и соответствующие алгоритмы, пригодные для выполнения на микроконтроллере с ограниченными вычислительными возможностями.

4. Выполнить верификацию и исследование разработанного метода и алгоритмов при помощи математического моделирования и экспериментальной установки.

5. Разработать технические решения системы управления ЛИАБ для внедрения алгоритмов оценивания ее характеристик.

**Методы исследования.** Для достижения заявленной цели в работе использовались методы интегрального исчисления, численные методы решения дифференциальных уравнений, методы интерполяции, методы компьютерного моделирования и натурных испытаний. Для обработки численных данных результатов исследования использовались статистические методы.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов и выводов диссертационной работы подтверждается корректным применением математических методов, компьютерным моделированием и хорошей сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Научная новизна работы:**

– 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;

– предложен метод оценки остаточной емкости и степени заряженности ЛИАБ на основе ее математической модели, учитывающий саморазряд батареи и работающий без прерывания режима эксплуатации при ограничениях на вычислительные ресурсы микропроцессорной измерительной системы;

– 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.

**Теоретическая значимость работы** состоит в разработке новой математической модели литий-ионного аккумулятора с нестационарными параметрами и метода оценивания характеристик аккумуляторной батареи в режиме реального времени.

**Практическая значимость работы:**

– разработаны технические решения резервированного микропроцессорного устройства, позволяющего в реальном времени обеспечить оценивание характеристик ЛИАБ системы электропитания космического аппарата;

– создан комплекс программ для микропроцессорного устройства, построенного на отечественной элементной базе специального назначения, и реализующего функции контроля и защиты ЛИАБ, оценивание ее характеристик.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Полученные технические решения применяются в промышленно выпускаемых блоках электроники ЛИАБ космических аппаратов (АО «НПЦ «Полус»).

Созданные экспериментальная установка и программное обеспечение для исследования и отработки методов и алгоритмов оценки параметров ЛИАБ используются в научно-исследовательской работе на АО «НПЦ «Полус» и в учебном процессе подготовки магистрантов и аспирантов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Личный вклад автора.** Автором совместно с научным руководителем разработан способ оценки степени заряженности и остаточной емкости литий-ионного аккумулятора. Соискателем самостоятельно выполнена разработка экспериментальных установок, алгоритмического и программного обеспечения, а также проведена верификация математических моделей литий-ионной аккумуляторной батареи и способов оценивания ее параметров путем постановки серии экспериментов с последующей обработкой данных статистическими методами.

**В работе автор защищает следующие положения:**

1. Математическую модель ЛИА на основе схемы замещения Тевенина с перенастраиваемыми параметрами при изменении температуры и деградации в процессе эксплуатации, позволяющая получить погрешность измеряемых сигналов в пределах от  $\pm 5$  до  $\pm 7$  %.

2. Метод оценивания степени заряженности, остаточной емкости, степени деградации ЛИАБ и алгоритмы их вычисления, обеспечивающие точность определения оценок не хуже  $\pm 7,6 \dots 10,3$  % во всем температурном диапазоне эксплуатации батареи при выполнении не более  $10^2$  арифметических операций с плавающей точкой.

3. Схемотехнические решения и элементы программного обеспечения блока электроники ЛИАБ, способного оценивать степень заряженности, остаточную емкость и уровень деградации батареи в режиме реального времени, позволяющие улучшить его массогабаритные характеристики в 1,3 раза, а энергопотребление в 1,5 раза по сравнению с блоком электроники предыдущего поколения и обеспечивающие достоверность оценок характеристик батареи при отказах аппаратуры.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления по п. 2. Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик; по п. 4. Разработка научных подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих надежность, контроль и диагностику функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были представлены на научно-технических конференциях и семинарах: «XVII Международная научная конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева» (Красноярск, 2013), «IV Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (IV Козловские чтения)» (Самара, 2015), «XIX научно-техническая конференция «Электронные и электромеханические системы и устройства» (Томск, 2016), «IV Научно-технической конференции молодых специалистов АО «ИСС» (Железногорск, 2017) и в период аспирантской подготовки докладывались на семинарах отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики НИ ТПУ и отделения автономной энергетики и преобразовательной техники АО «НПЦ «Полюс».

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

**Во введении** приведено обоснование актуальности проблемы, поставлены цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая ценность, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведен краткий обзор содержания глав.

**В главе 1** приведен краткий анализ существующих блоков электроники ЛИАБ ведущих отечественных и зарубежных производителей, приведены их основные характеристики, достоинства и недостатки. Рассматриваются методы и алгоритмы оценки *SOC* и технического состояния батареи с обзором отечественной элементной базы. Выдвинуты требования к методам и алгоритмам оценки *SOC* батареи, которые могут быть реализованы в блоке электроники космического аппарата.

Системы контроля состояния и параметров ЛИАБ для космических аппаратов достаточно разнообразны. Иногда такие приборы изготавливаются в единственном экземпляре для конкретного изделия, однако чаще типовые приборы применяются на нескольких аппаратах, построенных на одной платформе или даже различных платформах.

В таблице 1 приведены основные функции различных устройств контроля ЛИАБ космического аппарата. Из таблицы 1 видно, что приборы, применяемые для контроля параметров и защиты литий-ионной аккумуляторной батареи, не выполняют функцию автоматической диагностики аккумуляторной батареи в процессе эксплуатации как по оценке остаточной емкости и степени заряженности, так и по оценке степени деградации элементов батареи. Эти функции возлагаются на вычислительный комплекс космического аппарата либо на наземные службы.

Сравнение основных методов оценки *SOC* ЛИАБ с точки зрения достигаемой точности и вычислительной сложности приведены в таблице 2.

В итоге можно отметить, что представленные методы не в полной мере отвечают требованиям к методу оценки остаточной емкости и степени заряженности ЛИАБ, которые могут быть использованы в составе устройств контроля параметров аккумуляторной батареи космического аппарата.

Таблица 1 – Функции устройств контроля ЛИАБ КА

Наименование прибора	Организация-разработчик	Основные функции	Масса, кг	Потребляемая мощность, Вт	Ресурс, лет
Battery Electronic Unit (BEU)	Aeroflex	– измерение напряжения АБ; – защита АБ от выхода за допустимые режимы; – балансировка АБ по напряжению; – управление байпасными переключателями	3,85 (1 батарея 24 ячейки)	12	15
Battery Electronic Unit (BEU)	Thales Alenia	– измерение напряжения АБ; – защита АБ от выхода за допустимые режимы; – балансировка АБ по напряжению; – управление байпасными переключателями	3,85 (1 батарея 12 ячеек)	12	15
Блок электроники аккумуляторной батареи (БЭ АБ)	НИЦ «Полус»	– измерение напряжения АБ; – защита АБ от выхода за допустимые режимы; – балансировка АБ по напряжению; – управление байпасными переключателями	13 (2 батареи 24 ячейки)	30	15
Модуль контроля и управления (МКУ)	НИИ АЭМ ТУСУР	– измерение напряжения АБ; – защита АБ от выхода за допустимые режимы; – балансировка АБ по напряжению	Нет данных	Нет данных	Нет данных

Таблица 2 – Сравнительная оценка методов оценки SOC ЛИАБ

Название метода	Примерная точность оценки SOC ЛИАБ, %	Вычислительная сложность (количество операций с плавающей точкой на одну итерацию)	Дополнительные особенности
Счетчик ампер-часов	От 3 (не может быть выше точности измерения тока) до 20 (без калибровки)	3	Не учитывает саморазряд батареи. Требуется калибровка по напряжению
Фильтр Калмана с использованием модели Тевенина	5	$\approx 3 \cdot 10^3$	–
Фильтр Калмана с использованием DP-модели	3	$\approx 10^4$	–
Нейронная сеть	1	От $\approx 10^4$ до $5 \cdot 10^5$	Требуется обучения на значительном количестве экспериментальных данных

Из проведенного обзора методов оценки степени заряженности и технического состояния ЛИА становится понятно, что метод оценки *SOC* и *SOH*, который может применяться в устройстве контроля параметров аккумуляторной батареи космического аппарата должен соответствовать следующим требованиям:

- обеспечивать высокую точность оценки степени заряженности и остаточной емкости аккумуляторной батареи;
- учитывать саморазряд батареи;
- обеспечивать возможность подстройки параметров модели батареи в процессе эксплуатации;
- предполагать минимальный объем тестовых испытаний для построения модели батареи.

Условия эксплуатации космической техники налагают на данные алгоритмы дополнительные требования:

- алгоритм должен иметь минимальную вычислительную сложность, в том числе и при подборе параметров модели, для использования на микроконтроллерах с низким энергопотреблением;
- алгоритм должен иметь максимальную защищенность от помех, возникающих при воздействии ТЗЧ, ВЭП и других внешних факторов;
- алгоритм должен давать минимальную ошибку при накоплении систематической погрешности измерительных устройств с течением времени.

При создании новых электронных устройств для космических аппаратов важнейшим фактором является обеспечение независимости от импортных компонентов. Проведенный анализ элементной базы показывает, что создание блока электроники ЛИАБ на доступной элементной базе возможно.

**В главе 2** рассмотрено построение математической модели ЛИА и ЛИАБ на основе модели Тевенина, показано введение в модель переменных параметров для адекватного представления эффектов, происходящих в батарее при заряде-разряде и при изменении температуры. Приведен способ прямого вычисления параметров полученной модели в ходе циклов заряда-разряда АБ. Проведена оценка адекватности построенной модели и методики оценки ее параметров.

Наименее затратной с точки зрения вычислительной сложности моделью, которая описывает динамические процессы в аккумуляторе при изменении зарядно-разрядного тока, является модель Тевенина, которая в модифицированном виде записывается уравнением:

$$\dot{U}_m(t) = \frac{1}{\tau} (E_0 - IR_s - U_m(t)), \quad (1)$$

где  $U_m$  – напряжение на выводах аккумулятора,  $I$  – ток аккумулятора,  $R_s$  – полное внутренне сопротивление,  $\tau$  – постоянная времени.

Такая модель хорошо описывает поведение ЛИА, когда степень его заряженности, изменяется в небольших пределах. Степень заряженности, как правило, определяется соотношением:

$$SOC = \frac{Q_2(t)}{Q_1}, \quad (2)$$

где  $Q_2(t)$  – текущая остаточная емкость батареи, изменяющаяся при заряде и разряде, А·ч;  $Q_1(t)$  – емкость полностью заряженной батареи, А·ч.

Известно, что при существенном изменении *SOC* значения параметров аккумулятора также будут изменяться. Таким образом, чтобы описать поведение ЛИА на всей

разрядной характеристике необходимо дополнить модель уравнениями, задающими изменение параметров в зависимости от  $SOC$ :  $E_0(SOC)$ ,  $R_s(SOC)$  и  $\tau(SOC)$ .

Для описания зависимости  $E_0(SOC)$  используем кубическую сплайн-интерполяцию. Как будет показано в дальнейшем, зависимости  $R_s(SOC)$  и  $\tau(SOC)$  могут иметь значительные перепады значений между узлами интерполяции, поэтому целесообразно использовать для них кусочно-линейную интерполяцию.

Для оценки значения  $E_0$  в узлах интерполяции выберем из множеств входящих значений измеряемых параметров ЛИА такие элементы, соответствующие моментам времени  $j$ , в которых значение тока  $I_j$  и производной от напряжения  $\dot{U}_b$  равны нулю:

$$\begin{cases} I_j = 0; \\ \dot{U}_j = 0; \\ E_0 = U_{b_j}. \end{cases} \quad (3)$$

Такое состояние соответствует завершению всех переходных процессов в батарее.

После того, как значение  $E_0$  определено, для оценки значения  $R_s$  необходимо выбрать из множеств входящих значений измеряемых параметров ЛИА такие элементы, соответствующие моментам времени  $j$ , которые соответствуют разряду батареи постоянным током после завершения переходных процессов. Параметр  $R_s$  вычисляется следующим образом:

$$\begin{cases} I_j \neq 0; \\ \dot{U}_j \approx 0; \\ R_s = \frac{U_j - E_0}{I_j}. \end{cases} \quad (4)$$

Параметр  $\tau$  может быть определен путем выбора из множеств входящих значений измеряемых параметров ЛИА таких элементов, которые соответствуют условию:

$$\begin{cases} I_j = 0; \\ \dot{U}_{b_j} \neq 0; \\ \tau = \frac{E_0 - U_{b_j}}{\dot{U}_{b_j}}. \end{cases} \quad (5)$$

Выполнение условия (5) соответствует протеканию переходных процессов в ЛИА после отключения тока  $I$ .

При больших значениях  $\tau$  точность оценки по формуле (5) снижается из-за малой величины  $\dot{U}_{b_j}$ .

В этом случае имеет смысл выполнять оценку  $\tau$  путем подсчета времени, прошедшего с момента отключения тока  $I$  до достижения напряжения  $U_b$  величины  $0,632E_0$ .

С учетом уравнения (1) и интерполяции параметров модели при изменении  $SOC$  и температуры батареи  $T$  новая математическая модель ЛИА будет описываться системой уравнений (6).

Система уравнений (6) позволяет определить напряжение на выводах аккумулятора на основе знаний степени заряженности и параметров его математической модели. Так как напряжение на выводах аккумулятора может быть измерено непосредственно, то данная модель может быть проверена на адекватность путем сравнения с эталонной моделью ЛИА или с реальным аккумулятором.

$$\left\{ \begin{array}{l}
\dot{U}_m(t) = \frac{1}{\tau(T)} (E_0(T) - IR_s(T) - U_m(t)); \\
E_{0_{T_{\min}}}(SOC) = a_{E_{0_{T_{\min}}}} + b_{E_{0_{T_{\min}}}} \cdot SOC + c_{E_{0_{T_{\min}}}} \cdot SOC^2 + d_{E_{0_{T_{\min}}}} \cdot SOC^3; \\
E_{0_{T_{\max}}}(SOC) = a_{E_{0_{T_{\max}}}} + b_{E_{0_{T_{\max}}}} \cdot SOC + c_{E_{0_{T_{\max}}}} \cdot SOC^2 + d_{E_{0_{T_{\max}}}} \cdot SOC^3; \\
E_0(T) = E_{0_{T_{\min}}}(SOC) + \frac{E_{0_{T_{\max}}}(SOC) - E_{0_{T_{\min}}}(SOC)}{T_{\max} - T_{\min}} (T - T_{\min}); \\
R_{S_{T_{\min}}}(SOC) = a_{R_{S_{T_{\min}}}} + b_{R_{S_{T_{\min}}}} \cdot SOC; \\
R_{S_{T_{\max}}}(SOC) = a_{R_{S_{T_{\max}}}} + b_{R_{S_{T_{\max}}}} \cdot SOC; \\
R_S(T) = R_{S_{T_{\min}}}(SOC) \exp\left(\left(\ln\left(\frac{R_S(T_{\min})}{R_S(T_{\max})}\right)\right) / \left(\frac{1}{T_{\min}} - \frac{1}{T_{\max}}\right)\right) \left(\frac{1}{T_{\min}} - \frac{1}{T_{\max}}\right)\right); \\
\tau_{T_{\min}}(SOC) = a_{\tau_{T_{\min}}} + b_{\tau_{T_{\min}}} \cdot SOC; \\
\tau_{T_{\max}}(SOC) = a_{\tau_{T_{\max}}} + b_{\tau_{T_{\max}}} \cdot SOC; \\
\tau(SOC) = \tau_{T_{\min}}(SOC) + \frac{\tau_{T_{\max}}(SOC) - \tau_{T_{\min}}(SOC)}{T_{\max} - T_{\min}} (T - T_{\min}); \\
Q_1(T) = Q_{1_{\min}} + \frac{Q_{1_{\max}} - Q_{1_{\min}}}{T_{\max} - T_{\min}} (T - T_{\min}); \\
SOC(t) = \left( Q_1(T) - \int_0^t I(t) dt \right) / Q_1(T),
\end{array} \right. \quad (6)$$

где  $a, b, c, d$  – параметры интерполяционных функций соответствующих параметров,  $T_{\min}, T_{\max}, T$  – минимальная, максимальная и текущая температура батареи.

Программный пакет Simulink среды Matlab 2015 имеет встроенную модель аккумуляторной батареи, позволяющую имитировать поведение литий-ионного аккумулятора при температурных возмущениях. Эта модель использовалась в качестве имитационной модели, которая сравнивалась с аналитической моделью. Модель настроена для имитации аккумулятора SAFT VL48E с номинальной емкостью 48 А·ч.

Для построения модели системы «батарея – система управления – силовая часть» использовались компоненты пакета «Sim Power Systems». Результаты моделирования представлены на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что разработанная на основе модели Тевенина новая модель (6) адекватно отражает поведение литий-ионного аккумулятора в условиях температурных возмущений. Погрешность оценки напряжения литий-ионного аккумулятора не превысила  $\pm 0,8$  %, за исключением зоны глубокого разряда, в которой погрешность составила минус 4,5 %, что также является приемлемой величиной.

Аналогичный эксперимент, проведенный с батареей 8ЛИ40 на экспериментальной установке, показал, что погрешность расчета напряжения батареи не превысила 5 %, за исключением области глубокого разряда, где она возрастает до 7 %.

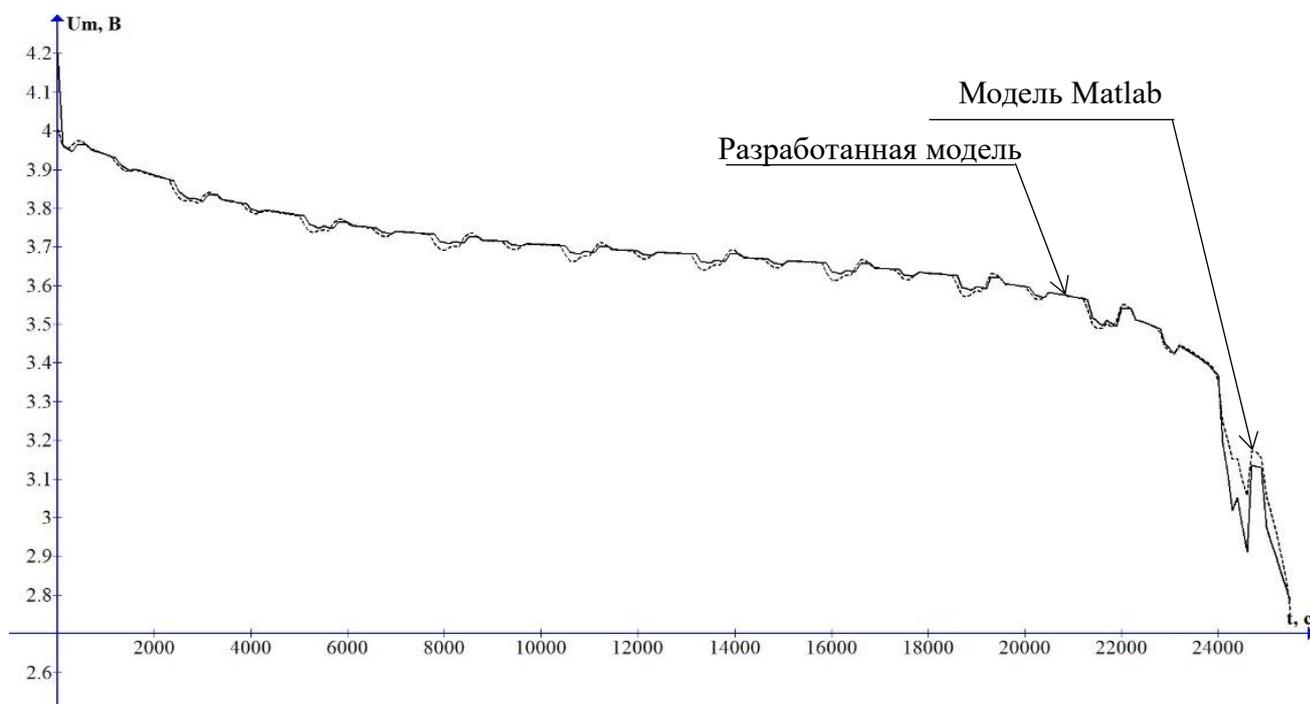


Рисунок 1 – График зависимости напряжения аккумулятора от времени

В главе 3 приведены методы и алгоритмы оценки  $SOC$  батареи и ее технического состояния на основе построенной ранее модели. Проведена оценка точности представленных методов путем компьютерного моделирования в среде Matlab. Дана оценка влияния погрешностей измерений на точность работы алгоритмов.

Модель ЛИА (6), как уже отмечалось ранее, достаточно адекватно описывает проявление процессов, происходящих в нем только для некоторого известного значения степени заряженности, и очевидно, что по мере протекания разрядно-зарядного тока степень заряженности аккумулятора будет изменяться. Данные изменения будут приводить к появлению разности  $\varepsilon(t)$  между напряжением  $U_{\text{ЛИА}}(t)$  на выходе аккумулятора и оценкой  $U_m(t)$  этого напряжения по модели:

$$\varepsilon(t) = U_{\text{ЛИА}}(t) - U_m(t). \quad (7)$$

Согласно системе уравнений (6) параметры модели будут связаны со степенью заряженности  $SOC$ . Введем поправку  $\delta_j(\varepsilon)$  для коррекции степени заряженности ЛИА по мере накопления ошибки по напряжению. Таким образом, оценка степени заряженности  $SOC_i$  в любой момент времени будет описываться соотношением:

$$SOC_i = SOC_0 + \sum_{j=0}^i \delta_j(\varepsilon), \quad (8)$$

где  $SOC_0$  – начальная степень заряженности;  $\delta_j(\varepsilon)$  – поправочный коэффициент в предыдущие моменты времени.

Таким образом, используя поправку  $\delta(\varepsilon)$  при вычислении значений  $SOC_i$ , можно получить примерное равенство:  $SOC_i \approx SOC$ . Примем пропорциональную зависимость между поправочным коэффициентом и ошибкой  $\varepsilon(t)$  по напряжению аккумулятора:

$$\delta(\varepsilon) = k\varepsilon(t), \quad (9)$$

где  $k$  – нормировочный множитель.

Из (7) и (9) очевидно, что для определения коэффициента  $k$  можно воспользоваться формулой:

$$k = \frac{SOC_{\max} - SOC_{\min}}{E_{0\max} - E_{0\min}}, \quad (10)$$

где  $SOC_{\max}$ ,  $SOC_{\min}$ , соответственно, максимальное и минимальное значение  $SOC$ ,  $E_{0\max}$ ,  $E_{0\min}$ , соответственно, максимальное и минимальное значения ЭДС аккумулятора, определяемые его паспортными данными.

Минимальное значение  $k$  не должно быть меньше величины изменения  $SOC$  за интервал времени измерения  $\Delta t$  при максимально возможном токе  $I_{\max}$ , в противном случае невозможно обеспечить сходимость вычислительного процесса:

$$k = \frac{I_{\max} \cdot \Delta t}{Q_1}. \quad (11)$$

Приведем алгоритм оценки степени заряженности ЛИАБ по описанному методу. Входными данными для алгоритма являются: начальное значение  $\hat{SOC}_{0i}$  для каждого аккумулятора, параметры модели, напряжение  $U_{\text{ЛИА}_i}$ , измеренное на отдельном  $i$ -ом аккумуляторе, ток  $I$ , протекающий через батарею. Внутренние параметры алгоритма: для каждого аккумулятора – текущая  $E_0(SOC, T)$  ЭДС, полное внутреннее  $R_S(SOC, T)$  сопротивление, постоянная  $\tau(SOC, T)$  времени, текущая полная емкость  $Q_1(T)$  аккумулятора, текущее значение оценки напряжения аккумулятора  $\hat{U}_{\text{ЛИА}_i}$ , текущее значение оценки  $SOC_i$ . Блок схема алгоритма приведена на рисунке 2.

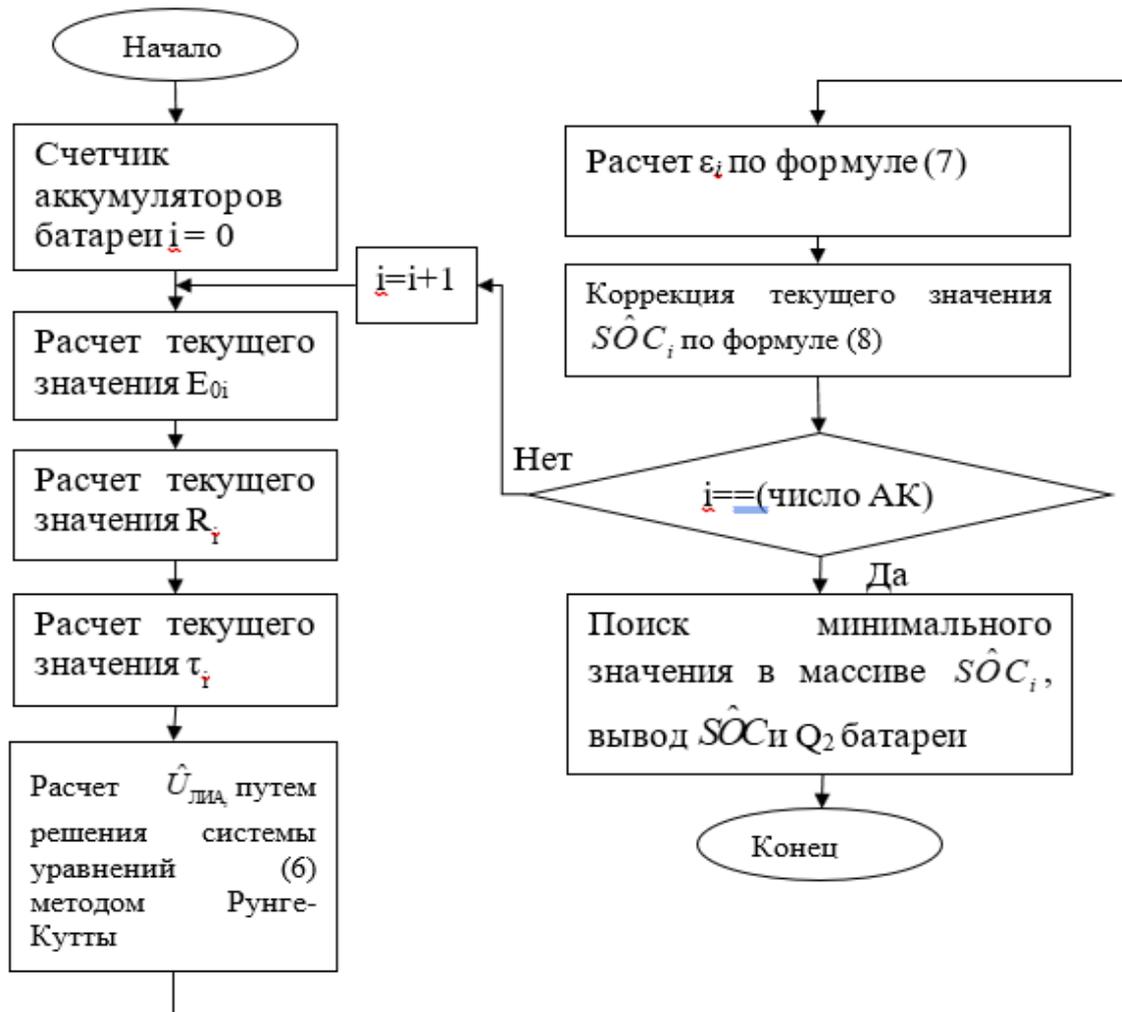


Рисунок 2 – Алгоритм оценки степени заряженности аккумулятора

Вышеописанный алгоритм требует для своей работы значения параметров модели каждого ЛИА батареи, которые должны быть определены в ходе эксперимента.

Оценка параметров модели должна быть произведена при минимальном токе  $I_{\min}$ , при котором будет использоваться батарея. При этом профиль тока должен иметь форму меандра с длительностью импульса 15 минут.

Входными данными для алгоритма являются: напряжение  $U_{\text{ЛИА}_i}$ , измеренное на отдельном  $i$ -ом аккумуляторе, ток  $I$ , протекающий через батарею, температура батареи, минимально допустимое напряжение  $U_{\text{ЛИА}_{\min}}$  разряда аккумулятора.

Блок-схема алгоритма оценки параметров модели для каждой температуры представлена на рисунке 3.

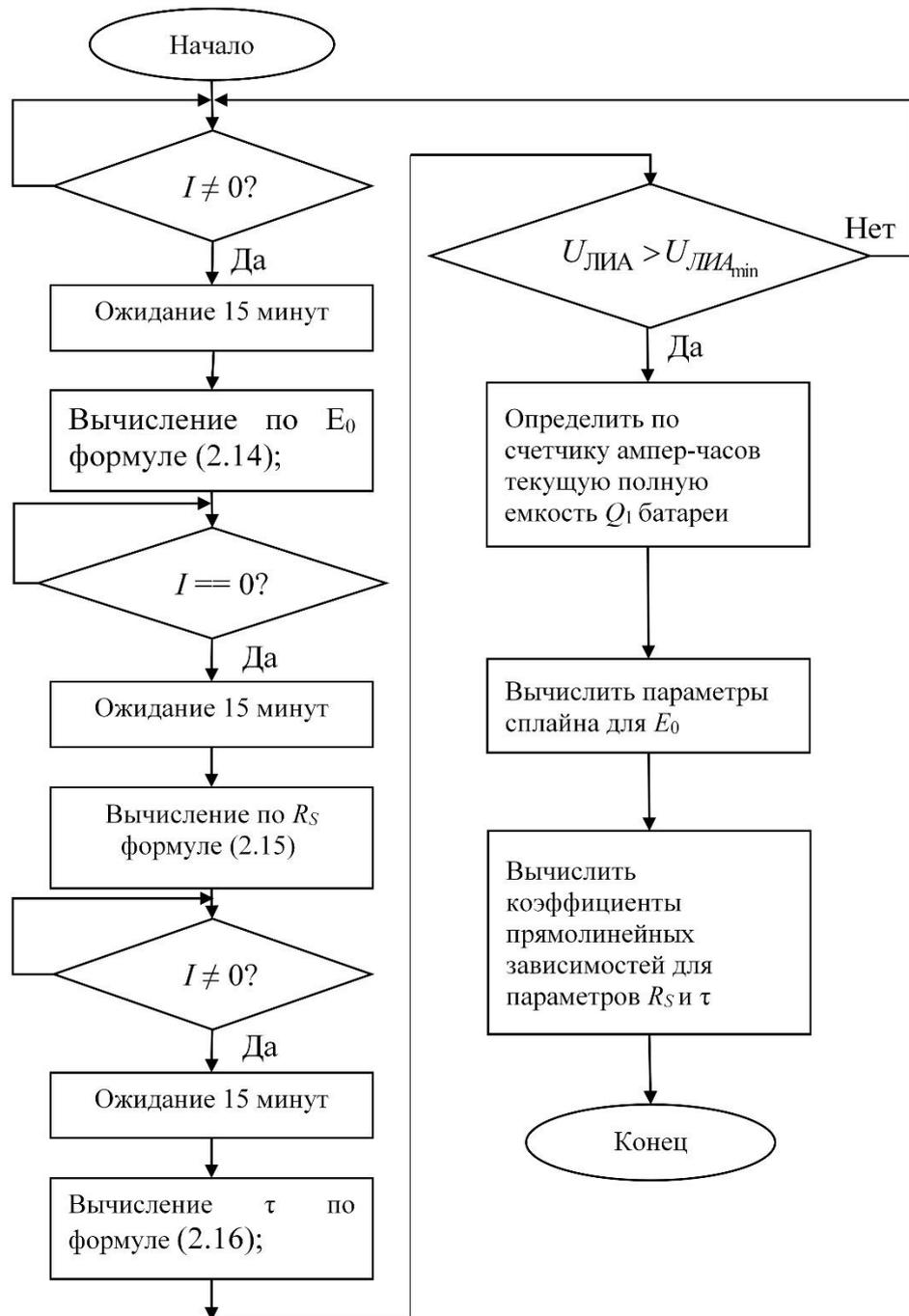


Рисунок 3 – Алгоритм оценки параметров модели

Полная емкость ЛИА  $Q_0$ , как правило, известна в начальный момент его использования и по мере эксплуатации будет снижаться. Для оценки текущего технического состояния ЛИА, как правило, применяется коэффициент, определяемый как отношение текущей полной емкости ЛИА  $Q_1$  к начальной:

$$SOH = \frac{Q_1}{Q_0}. \quad (12)$$

В реальной системе электропитания происходят неполные циклы разряда-заряда аккумулятора, поэтому построение алгоритма определения полной емкости при частичном заряде и разряде представляет собой важную задачу. Кроме того, данный алгоритм должен учитывать потерю полной емкости батареи за счет увеличения внутреннего сопротивления. Для этой цели был разработан новый алгоритм на основе известного Impedance Track. Новый алгоритм позволяет определить текущее техническое состояние ЛИА без прерывания режима его работы, а также учитывает изменение внутреннего сопротивления ЛИА. Для оценки текущей полной емкости при помощи счетчика ампер-часов определяется изменение емкости аккумулятора ( $Q_2(t_1) - Q_2(t_2)$ ) за интервал времени ( $t_2 - t_1$ ), по описанной выше методике определяется изменение степени заряженности ЛИА ( $SOC(t_1) - SOC(t_2)$ ), текущая полная емкость батареи вычисляется по формуле:

$$Q_1 = \frac{(Q_2(t_1) - Q_2(t_2))}{(SOC(t_1) - SOC(t_2))}. \quad (13)$$

Изменение внутреннего сопротивления оценивается при отключении тока нагрузки в процессе штатной работы ЛИА по формуле (4).

Для проверки точности разработанных алгоритмов воспользуемся пакетом математического моделирования Simulink среды Matlab 2015.



Рисунок 4 – погрешность оценки степени заряженности при изменении температуры

Из представленных на рисунке 4 графиков видно, что погрешность оценки степени SOC заряженности не превышает 8,43 %.

Моделирование оценки полной емкости батареи было проведено при температуре 0 °С и при температуре +20 °С. В первом случае значение  $Q_1$ , оцененное по модели составило 43,84 А·ч при истинном значении 43,72 А·ч, во втором случае – результат оценки  $Q_1$  по модели был 51,07 А·ч, при истинном значении 52,15 А·ч. Таким образом, методика оценки полной емкости батареи обеспечивает приемлемую точность около  $\pm 2$  %.

Моделирование влияния систематической погрешности на точность работы алгоритмов показала, что наибольшее влияние на погрешность оценки SOC оказывает систематическая погрешность измерения напряжения аккумулятора. При увеличении погрешности измерения напряжения более  $\pm 15$  мВ погрешность оценки SOC возрастает в два раза и становится более 15 %. Погрешность измерения тока влияет на точность оценки SOC незначительно. Погрешность измерения температуры также оказывает существенное влияние на точность оценки SOC.

**В главе 4** рассмотрены экспериментальные установки для проверки точности алгоритмов оценки SOC батареи и ее технического состояния, приведены результаты экспериментов. Кроме того, представлены основные технические решения, необходимые для построения блока электроники, выполняющего алгоритм оценки SOC ЛИАБ и ее технического состояния.

Полнофункциональный вариант экспериментальной установки был разработан для работы с батареей 8ЛИ40 ЖЦПИ.563562.004 ТУ номинальной емкостью 40 А·ч и выполняет следующие функции:

- измерение напряжений ячеек АБ;
- измерение текущего тока;
- измерение температуры АБ при помощи встроенных термодатчиков;
- заряд АБ током до 5 А;
- разряд АБ при помощи имитатора нагрузки током до 10 А;
- защиту АБ от эксплуатации в режимах, не предусмотренных техническими условиями.

Основные характеристики этого варианта экспериментальной установки приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики экспериментальной установки

Параметр	Диапазон измерений	Погрешность измерения
Напряжение ЛИА	0...5 В	$\pm 0,04$ %
Напряжение АБ	0...40 В	$\pm 0,2$ %
Ток батареи	От минус 10 до +10 А	$\pm 0,5$ %
Температура батареи	От минус 10 до +40 °С	$\pm 2$ °С
Точность установки тока	0...10 А	$\pm 0,5$ %

Установка была собрана в одной из лабораторий АО «НПЦ «Полюс», ее внешний вид представлен на рисунке 5. Основные модули установки обозначены цифрами: 1 – Персональный компьютер, 2 – блок контроля и управления, 3 – блок балансировочных резисторов, 4 – имитатор нагрузки Актаком АТН-8301, 5 – зарядное устройство (источник питания Keysight N8736A), 6 – ЛИАБ 8ЛИ40.

Встроенное ПО выполняет следующие функции:

- измерение параметров АБ (ток, напряжение, температура);
- аварийное отключение АБ от ЗУ и ИН при недопустимом значении температуры или напряжения;
- балансировка ячеек АБ по напряжению;

- управление подключением ИН и ЗУ к АБ;
- обмен данными с ПК;
- вычисление степени заряженности и оценка полной емкости АБ в реальном времени;
- вычисление параметров модели АБ и ее температурных характеристик.

Построение программного обеспечения экспериментальной установки с выделением алгоритмов оценки параметров ЛИАБ в отдельные модули позволяет использовать их в других проектах без существенной переработки исходного кода.

Скомпилированная программа имеет объем 25 Кбайт, для работы используется 7,2 Кбайт ОЗУ. Таким образом, разработанное ПО может выполняться на микроконтроллерах с ограниченными ресурсами и малым энергопотреблением. На разработанное ПО получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ<sup>1</sup>.

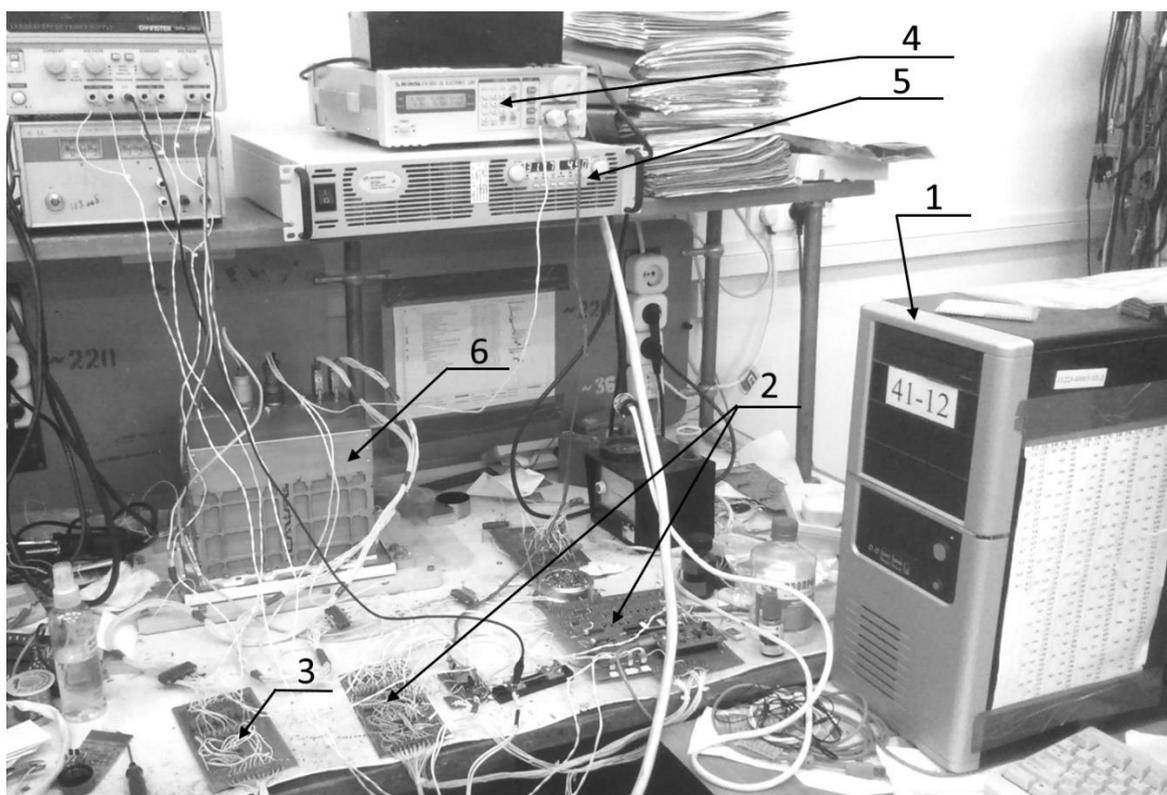


Рисунок 5 – Внешний вид экспериментальной установки

Установленное на ПК программное обеспечение, выполняет следующие функции:

- сбор и представление в удобном для пользователя виде данных от БКиУ;
- протоколирование получаемых данных для последующего анализа;
- настройка измерительной части БКиУ.

Для оценки точности разработанной методики, оценки остаточной емкости ЛИАБ применялся широко распространенный метод сравнения новой методики с эталонным счетчиком ампер-часов. Результаты эксперимента представлены на рисунке 7.

<sup>1</sup> Свид. 2017618778 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Оценка остаточной емкости литий-ионной батареи в режиме реального времени / М.М. Хандорин, В.Г. Букреев; заявитель и правообладатель федеральное государственное автономное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU). – №2017615630; заявл. 13.07.17; опубл. 8.08.17, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

Погрешность оценки остаточной емкости в начальный момент времени работы алгоритма незначительно превышает 10 %. По мере работы алгоритма погрешность снижается и остается на уровне 6 %.

Для накопления статистики было проведено несколько циклов заряда-разряда ЛИАБ, в ходе которых определялась погрешность оценки остаточной емкости и степени заряженности. При проведении эксперимента было произведено 5 циклов заряда и разряда: 1 цикл при температуре 0 °С, 1 цикл при температуре +38 °С, 2 цикла при температуре +30 °С, 1 цикла при +10 °С.

В течение 5 циклов было проведено 33708 измерения, в каждой точке определена погрешность  $Q_1(t)$ , приведенная к шкале  $\Delta Q_1(t)$ . Полученные данные были обработаны в программе Matlab. Максимальная погрешность оценки  $\Delta Q_1$  составила 10,29 %. Максимальная погрешность оценки  $\Delta Q_1$  в узлах интерполяции составила 7,8 %.

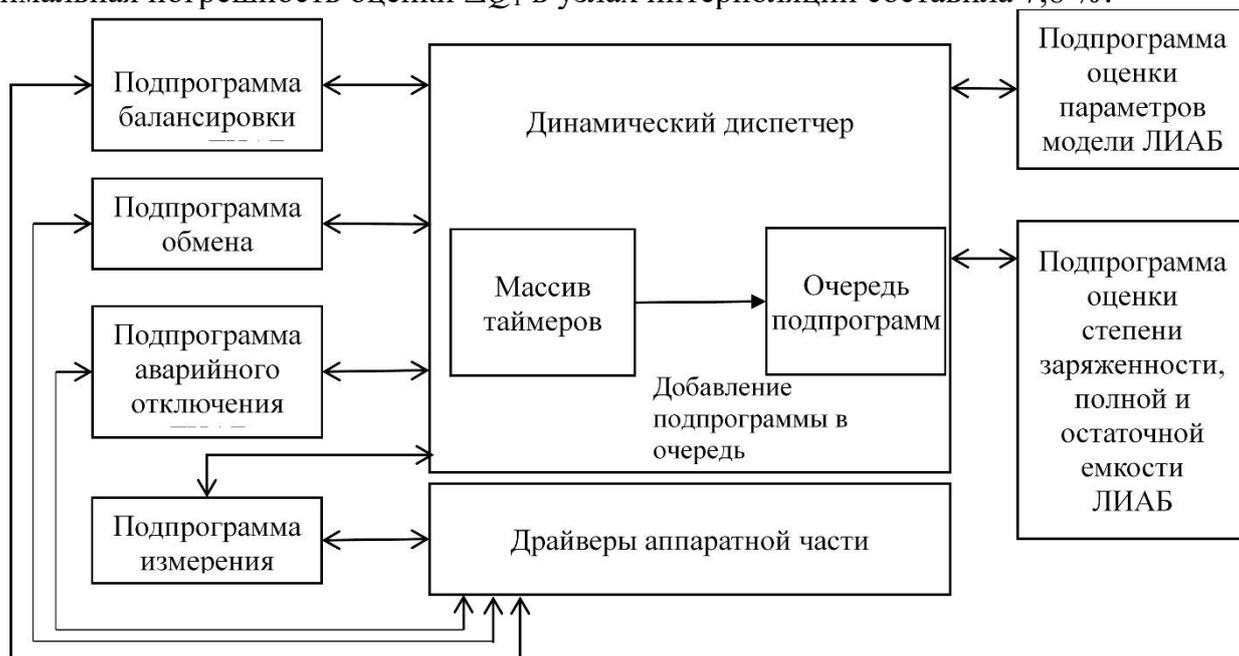


Рисунок 6 – Структура программного обеспечения экспериментальной установки

Оценка вычислительной сложности разработанного метода по количеству операций с плавающей точкой показывает, что на одну итерацию алгоритма требуется порядка  $2 \cdot 10^2$  операций, что более чем на порядок меньше по сравнению с фильтром Калмана. При этом разработанный метод обеспечивает сопоставимую точность до 7,8 % по сравнению с 5 % у фильтра Калмана. Новый метод оценки степени заряженности и остаточной емкости литий-ионного аккумулятора защищен патентом РФ<sup>2</sup>.

Проведенные экспериментальные исследования убедительно доказывают, что представленная методика и алгоритм оценки степени заряженности и остаточной емкости литий-ионной аккумуляторной батареи являются работоспособными.

<sup>2</sup> Пат. 2621885 Российская Федерация, МПК G01R 31/6. Способ оценки остаточной емкости литий-ионного аккумулятора / Букреев В. Г., Хандорин М. М.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Научно-производственный центр «Полус». – № 2015145496; заявл. 22.10.15; опубл. 07.06.17, Бюл. № 16.

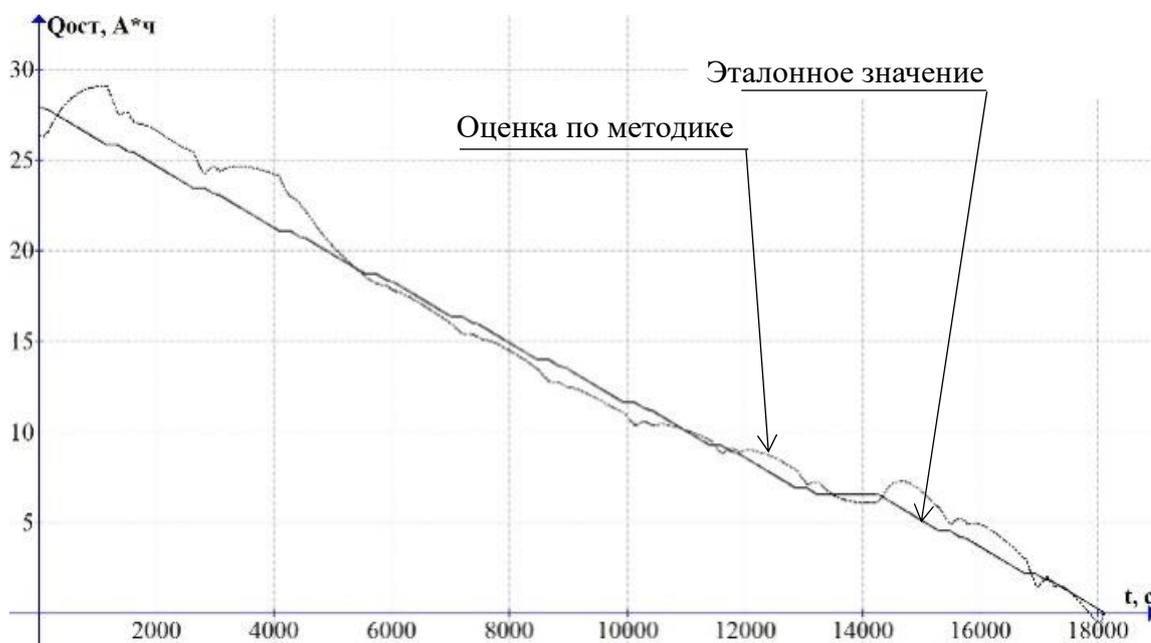


Рисунок 7 – График зависимости оценки остаточной емкости батареи от времени (пунктирной линией) и график зависимости эталонного счетчика ампер-часов

При создании экспериментальной установки были разработаны и опробованы новые элементы аппаратной и программной части блока контроля и защиты аккумуляторной батареи, в том числе программное обеспечение оценки параметров литий-ионного аккумулятора, зарегистрированное в качестве программы для ЭВМ.

Целями при разработке нового прибора стали снижение массы, энергопотребления и повышение надежности. Кроме того, двухканальная организация прибора позволяет выполнять алгоритм оценки *SOC* и *SOH* батареи, так как канал освобождается от задачи синхронизации с другими каналами.

Поставленные цели достигаются за счет введения в блок электроники трехканального устройства управления резервом, построения устройства контроля и устройства управления по двухканальной схеме, с введением функций диагностики отказов. Кроме того, в устройство управления вводится энергонезависимая память для реализации функции перепрограммирования из аппаратуры пользователя.

Структурная схема устройства управления нового блока электроники приведена на рисунке 8.

Устройство управления состоит из двух резервирующих друг друга каналов, один из которых находится в активном, а другой в отключенном состоянии. Каждый канал состоит из микроконтроллера (МК), контроллера периферийных устройств (КПУ), отвечающего за выдачу внешних сигналов, контроллера памяти (КП), управляющего распределением памяти, сторожевого таймера (СТ), постоянного (ПЗУ) и перепрограммируемого постоянного запоминающего устройства (ППЗУ), а также оперативного запоминающего устройства (ОЗУ). Введение в канал ППЗУ обеспечивает возможность изменения логики работы прибора в процессе эксплуатации. Объем памяти программ ПЗУ и ППЗУ составляет 48 Кбайт, объем ОЗУ 16 Кбайт, что позволяет внедрять в него ПО оценки остаточной емкости и технического состояния ЛИАБ.

Устройство управления резервом (УУР), которое входит в состав устройства управления, контролирует исправность устройства управления по следующим параметрам:

- превышение напряжения питания данного уровня;

- периодичность сброса сторожевого таймера;
- достоверность кода ключа в специальном регистре.

По результатам конструирования было установлено, что предложенное техническое решение позволяет улучшить массогабаритные характеристики в 1,3 раза и снизить энергопотребление в 1,5 раза, по сравнению с блоком электроники предыдущего поколения. При этом повышена надежность блока и расширены функциональные возможности, что является важнейшим критерием качества для космической аппаратуры.

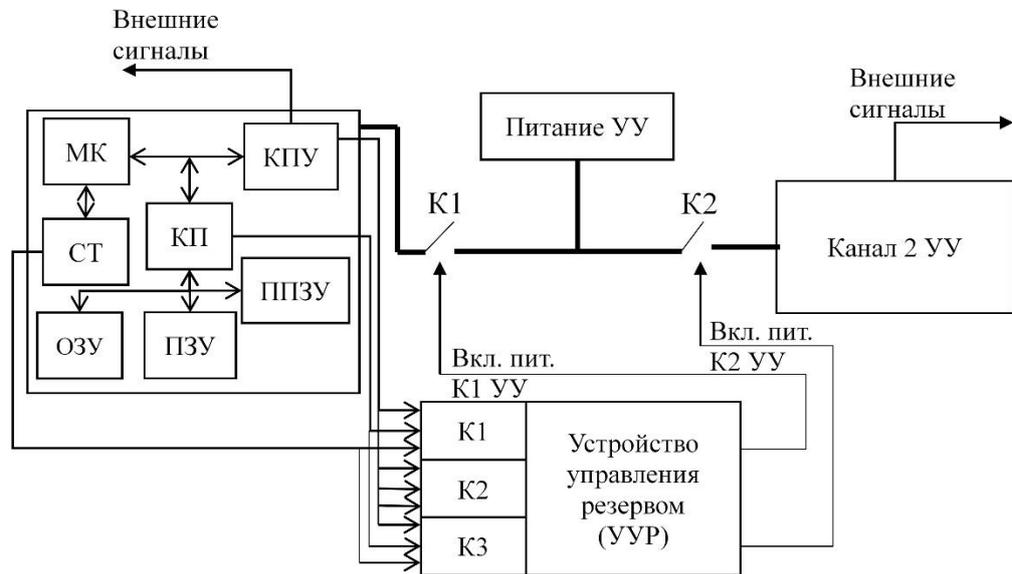


Рисунок 8 – Структурная схема устройств управления нового блока электроники АБ

Внешний вид нового блока электроники в части устройства управления приведен на рисунке 9.

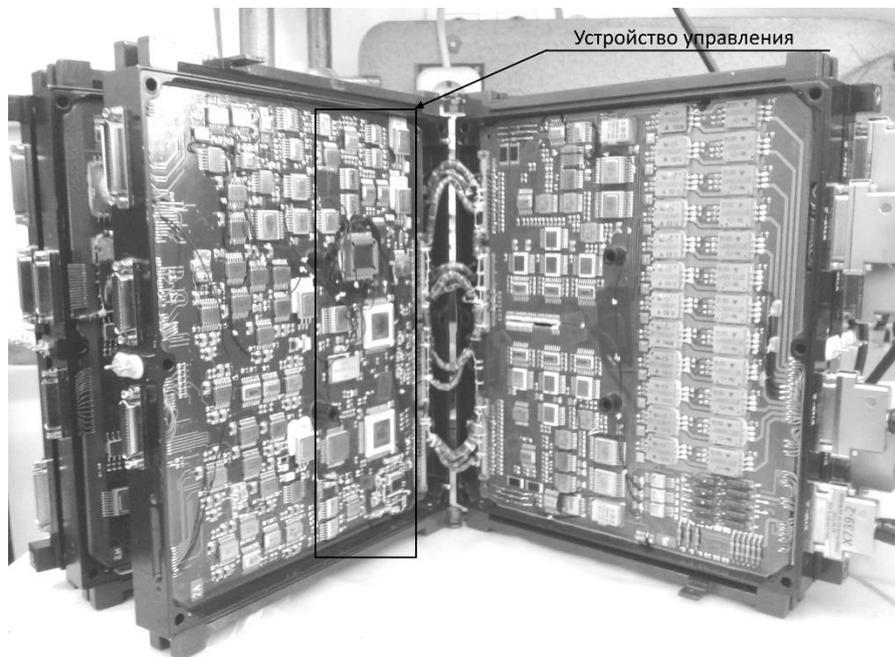


Рисунок 9 – Внешний вид блока электроники ЛИАБ второго поколения в части устройства управления

**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, акты внедрения результатов работы.

### **Заключение**

Выполненные в работе научные исследования представлены следующими новыми результатами.

1. В ходе исследования была разработана математическая модель ЛИА на основе схемы замещения Тевенина, отличающаяся тем, что она адекватно отображает его поведение при различной степени заряженности и при изменяющейся температуре. При этом вычислительная сложность (количество уравнений в системе) разработанной модели существенно ниже, чем у существующих аналогов. Был также предложен метод оценки параметров модели ЛИА, отличающийся тем, что параметры математической модели ЛИА оцениваются без использования затратной процедуры оптимизации целевой функции. Предложенная математическая модель ЛИА и методика оценки ее параметров были проверены при помощи программы математического моделирования Matlab Simulink. Суммарная погрешность математической модели и метода оценки параметров ЛИА, определенная по вычислению напряжения ЛИА, не превысила  $\pm 0,8$  %. При проверке на экспериментальной установке с батареей 8ЛИ40 погрешность составила  $\pm 5$  %.

2. На основе предложенной модели аккумулятора были разработаны способы оценки степени SOC заряженности, полной  $Q_1$  и остаточной емкости  $Q_2$  литий-ионной аккумуляторной батареи, позволяющие повысить точность оценки указанных параметров за счет адаптации параметров математической модели каждого аккумулятора батареи, а также определить техническое состояние аккумуляторов батареи по изменению параметров модели. При помощи программы математического моделирования Matlab Simulink предложенные методики были проверены на адекватность. Установлено, что оценка SOC и  $Q_2$  батареи возможна с погрешностью  $\pm 8,43$  % и  $\pm 7$  % соответственно, а оценка  $Q_1$  – с погрешностью  $\pm 2$  %.

3. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие осуществлять оценку параметров ЛИАБ по разработанным методикам в режиме реального времени, которые были проверены на специально разработанной экспериментальной установке. Установлено, что оценка SOC и  $Q_2$  батареи возможна с погрешностью  $\pm 10,28$  %, а оценка  $Q_1$  – с погрешностью  $\pm 4$  %. Точность оценки SOC и  $Q_2$  батареи может быть улучшена до  $\pm 7,8$  % при увеличении числа узлов интерполяции.

4. Разработано техническое решение нового устройства – блока электроники ЛИАБ, позволяющее использовать предложенные алгоритмы и программное обеспечение. Предложенное техническое решение позволяет улучшить массогабаритные характеристики в 1,3 раза и снизить энергопотребление в 1,5 раза по сравнению с блоком электроники предыдущего поколения.

#### **Научные публикации по теме диссертации:**

##### ***В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:***

1. Хандорин М.М., Букреев В.Г. Оценка остаточной емкости литий-ионного аккумулятора на основе эталонной модели // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2014. – № 1(53). – С. 94 – 97.

2. Хандорин М.М., Букреев В.Г. Оценка остаточной емкости литий-ионного аккумулятора в режиме реального времени // Электрохимическая энергетика. – 2014. – Т. 14., № 2. – С. 65 – 69.

3. Хандорин М. М. Букреев В. Г. Экспериментальная проверка алгоритма оценки остаточной емкости литий-ионной аккумуляторной батареи для применения на космическом аппарате // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2017. – № 3. – С. 45 – 55.

4. Хандорин М.М., Букреев В.Г. Методика оценки остаточной емкости литий-ионной аккумуляторной батареи // *Доклады ТУСУРа*. – 2017. – Т. 21. – № 2. – С. 120 – 122.

#### ***Патент РФ на изобретение***

Пат. 2621885 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/6. Способ оценки остаточной емкости литий-ионного аккумулятора / Букреев В. Г., Хандорин М. М. ; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Научно-производственный центр «Полюс». – № 2015145496 ; заявл. 22.10.15 ; опубл. 07.06.17, Бюл. № 16.

#### ***Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ***

Свид. 2017618778 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Оценка остаточной емкости литий-ионной батареи в режиме реального времени / М.М. Хандорин, В.Г. Букреев; заявитель и правообладатель федеральное государственное автономное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU). – №2017615630; заявл. 13.07.17; опубл. 8.08.17, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

#### ***Список публикаций в трудах международных и российских конференциях***

1. Хандорин М.М., Букреев В.Г. Оценка остаточной емкости литий-ионного аккумулятора на основе эталонной модели // *Решетневские чтения: материалы XVII Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (12 – 14 нояб. 2013 г., Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2013. – Ч. 2. – С. 80 – 82.*

2. Хандорин М.М., Букреев В.Г. Выравнивание напряжений аккумуляторов литий-ионной аккумуляторной батареи методом индивидуального дозаряда // *Материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (IV Козловские чтения). – (14 – 18 сент. 2015, г. Самара) / под общ. ред. А.Н. Кирилина / СамНЦ РАН. – Самара, 2015. – С. 281 – 283.*

3. Хандорин М.М. Эффективная оценка параметров литий-ионной аккумуляторной батареи космического аппарата // *IV науч.-техн. конф. молодых специалистов АО «ИСС».: сб. тез. – Красноярск, 2017. – С. 102 – 104.*

4. Хандорин М.М., Букреев В.Г. Экспериментальная установка для оценки параметров моделей литий-ионного аккумулятора // *Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. трудов. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2016. – С. 394 – 398.*