

На правах рукописи



Брянцев Андрей Анатольевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО
ИМИТАТОРА ЛИТИЙ-ИОННОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ
БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в Инженерной школе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национального исследовательского Томского политехнического университета» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ) и Акционерном обществе «Научно-производственного центра «Полюс» (АО «НПЦ «Полюс»)

Научный руководитель:

Букреев Виктор Григорьевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Симонов Борис Ферапонтович,
доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник
ФГБУН Института горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск

Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры вычислительной
техники ФГБОУ ВО «Юго-Западный
государственный университет», г. Курск

Защита состоится: «10» ноября 2021 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.12 на базе ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, д. 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53а, и на сайте <https://dis.tpu.ru>

Автореферат разослан: «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
ДС.ТПУ.12, к.т.н., доцент



Андреев Михаил Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Условия и особенности эксплуатации литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) предполагают использование имитаторов таких источников тока при наземных испытаниях энергопреобразующей аппаратуры (ЭПА) систем электропитания (СЭП) космических аппаратов (КА).

Имитация основных частей ЭПА СЭП КА является важнейшим этапом, от надежного и успешного выполнения которого в полной мере зависит конечный результат тестирования электронной аппаратуры и блоков – как отдельных функциональных узлов, так и целых комплексов. Выполнение таких работ, как квалификационные испытания блоков конкретной ЭПА СЭП и отработка технических решений ее составных элементов требует создания специализированных имитаторов ЛИАБ (ИЛИАБ).

Разработка ИЛИАБ различного исполнения посвящены многие научные исследования российских организаций: АО «Информационные Спутниковые Системы» имени академика М.Ф. Решетнева», АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», АО «Научно-производственный центр «Полус», НИИ автоматики и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, АО «Авиационная электроника и коммуникационные системы», ООО «Фирма «Информтест» и др. Работы по созданию ИЛИАБ также ведутся известными зарубежными фирмами: Digatron Power Electronics, Arbin Instruments, Energy Solutions, Eiffage Clemessy, Erzia, Ametek и др.

Исследованию специализированных ИЛИАБ посвящены работы таких отечественных ученых, как А.А. Камусин, Ю.Т. Котов, Е.А. Мизрах, А.В. Михайлов, В.Н. Мишин, В.О. Эльман, А.Г. Юдинцев и др. В этой области также известны работы зарубежных ученых: Н. Biechl, W.Y. Chang, Y.P. Chen, L.A. Dessaint, D. Feng, V. Ramadesigan, J. Sun, O. Tremblay и др.

Для тестирования СЭП КА необходимо выполнить набор функций в различных режимах – от выдачи телеметрии о значениях напряжения и температуры батареи до автоматического определения параметров отдельных аккумуляторов, свойства которых изучены недостаточно, что значительно затрудняет создание ИЛИАБ. Принципы построения и конфигурация промышленно выпускаемых ИЛИАБ не позволяют в полной мере выполнить наземные испытания СЭП с учетом воспроизведения индивидуальных характеристик каждого аккумулятора батареи.

Успешность выполнения наземных испытаний СЭП в значительной степени зависит от полноценной имитации отдельных литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) и возможности автоматизации процесса тестирования ЭПА. Поэтому теоретические исследования и вопросы разработки имитатора ЛИАБ актуальны и имеют большую практическую ценность.

В работе поставлена и решена важная **научно-техническая задача** обеспечения требуемого качества имитации характеристик ЛИАБ в режиме ее заряда или разряда.

Объектом исследования является ЛИАБ в режиме ее заряда или разряда.

Предмет исследования: модели ЛИА и ЛИАБ, схемотехнические и алгоритмические решения имитатора батареи.

Целью настоящей работы является повышение точности и расширение функциональных возможностей ИЛИАБ при наземных испытаниях ЭПА СЭП КА.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Провести анализ и сравнительную оценку структур ИЛИАБ, определить требования к основным параметрам специализированного имитатора ЛИАБ.
2. Исследовать математическое моделирование статических и динамических процессов в электрических схемах замещения ЛИА.
3. Создать алгоритмы определения параметров модели ЛИА.
4. Разработать схемотехнические решения и программное обеспечение ИЛИАБ.
5. Разработать стендовое оборудование для испытаний опытных образцов ИЛИАБ.

Методы исследования. В качестве основных методов теоретического исследования использовались принципы построения электротехнических устройств и силовой преобразовательной техники, методы аналитического моделирования химических источников тока, методы математического моделирования и численного решения систем линейных дифференциальных уравнений. Имитационное моделирование проводилось с применением программной среды MatLab Simulink. Теоретические результаты подтверждались экспериментальными исследованиями на стендовом оборудовании с применением промышленно выпускаемых ЛИАБ (АО «Сатурн»).

Достоверность научных результатов подтверждается строгим обоснованием расчетных методик и принимаемых допущений, корректным использованием современных методов научных исследований, а также проведением экспериментов на макетных и опытно-промышленных образцах. Все разделы диссертационной работы логически взаимосвязаны, а выводы и рекомендации органично вытекают из теоретических и экспериментальных материалов работы.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана математическая модель ЛИА, учитывающая изменяемый характер ЭДС и поляризационной составляющей внутреннего сопротивления аккумулятора и обеспечивающая исследование зависимости выходного напряжения от емкости в статических и динамических режимах работы.
2. Предложен алгоритм определения параметров модели ЛИА, повышающий точность воспроизведения зависимости выходного напряжения от емкости за счет введения эмпирических коэффициентов, определенных при приемо-сдаточных испытаниях.
3. Разработана имитационная модель ЛИАБ, включающая модели аккумуляторов, байпасных переключателей коммутационного типа, датчика температуры и позволяющая обеспечить максимальное соответствие электрических характеристик реальной батареи.
4. Предложена структура ИЛИАБ, обеспечивающая высокую функциональную эффективность тестирования ЭПА СЭП путем агрегирования требуемого количества имитаторов ЛИА (ИЛИА).

Практическая значимость работы:

1. Создан программный продукт в пакете MatLab Simulink, реализующий имитационную модель ЛИАБ и позволяющий исследовать динамические процессы в аккумуляторах с возможностью прогноза изменения параметров ЛИАБ при решении задач балансировки, дозарядки или исключения неисправного аккумулятора из состава батареи.
2. Разработана программа работы контроллера ИЛИА, позволяющая осуществить управление, контроль состояния силовой части имитатора с отображением

информации на персональном компьютере для решения задач автоматизации процессов при наземных испытаниях ЭПА СЭП КА.

3. Разработан и внедрен в промышленную эксплуатацию имитатор ЛИАБ, обеспечивающий рекуперацию энергии при тестировании ЭПА СЭП в режиме заряда и разряда батареи.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Структура имитатора ЛИАБ позволяет использовать требуемое количество ИЛИА с рекуперацией энергии в режиме заряда батареи при тестировании ЭПА СЭП КА.

2. Модифицированная математическая модель ЛИА учитывает изменяемый характер ее параметров и позволяет исследовать статические и динамические режимы работы аккумулятора.

3. Аппаратно-программный комплекс для имитации характеристик ЛИАБ и его алгоритмическое обеспечение позволяют с требуемой точностью обеспечить испытания ЭПА СЭП КА.

Личный вклад автора. Научные результаты, выносимые на защиту и составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. В ряде публикаций проведена проверка адекватности математической модели ЛИА и алгоритма определения ее параметров [1, 2]; представлены технические решения по реализации ИЛИАБ [3 – 6]; разработаны и сформулированы основные принципы построения современных ИЛИАБ [7 – 15]. Автор непосредственно участвовал в разработке математических моделей и аппаратно-программных средств, в проведении экспериментальных исследований, в обработке количественных и качественных данных, создании специализированного ИЛИАБ, внедренного в промышленное производство.

Реализация результатов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы в виде схмотехнических и программных решений использованы при разработке ИЛИАБ для тестирования ЭПА СЭП КА в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ АО «Научно-производственный центр «Полус» (г. Томск).

Методика расчета параметров модели ЛИА, позволяющая обоснованно подойти к определению характеристик ЛИАБ с учетом датчика температуры и байпасного переключателя, используется в образовательном процессе Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета при подготовке студентов по направлению 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника.

Подтверждением промышленного использования результатов диссертационной работы является размещение информации о ИЛИА в Государственном реестре средств измерений (ГРСИ) Российской Федерации, актах внедрения и испытаний ИЛИАБ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. В соответствии с формулой специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы в диссертации содержатся теоретические и экспериментальные исследования, позволившие изучить системные свойства, выполнить математическое и имитационное моделирование химических источников тока ЭПА СЭП КА (пункт 1), выполнить структурный и параметрический синтез аппаратно-программных ИЛИАБ, реализовать алгоритмы эффективного определения параметров модели ЛИА (пункт 3).

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях:

VII Международная научно-техническая конференция «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск, 2015 г.);

XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2015 (г. Омск, 2015 г.);

XIX научно-техническая конференция «Электронные и электромеханические системы и устройства» (г. Томск, 2015 г.);

Научно-техническая конференция молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства» (г. Томск, 2018 г.);

Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Программно-техническое обеспечение автоматизированных систем» (г. Барнаул, 2018 г.);

V Международная научно-практическая конференция, посвященная Дню космонавтики, «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (г. Красноярск, 2019 г.);

XX научно-техническая конференция «Электронные и электромеханические системы и устройства» (г. Томск, 2020 г.).

В период аспирантской подготовки результаты исследований докладывались на семинарах отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики НИ ТПУ и отделения автономной энергетики и преобразовательной техники АО «НПЦ «Полус».

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 15 научных работах, в том числе: 2 публикациях в изданиях, входящих в перечень ВАК для диссертаций, 4 патентах РФ, 9 публикациях в сборниках материалов научно-технических конференций.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 136 наименований. Диссертация изложена на 129 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка, 9 таблиц, 5 приложений на 30 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности диссертационной работы, поставлены цели и задачи исследования. Сформулирована научная новизна и практическая значимость выполненных исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен краткий обзор существующих ИЛИАБ отечественных и зарубежных производителей, приведены их основные характеристики, недостатки и достоинства. Рассмотрены методы и алгоритмы определения параметров модели ЛИАБ путем агрегирования моделей ЛИА. Определены требования к алгоритмам вычисления параметров модели ЛИАБ, которые могут быть использованы при тестировании ЭПА СЭП КА.

В результате обзора промышленно выпускаемых ИЛИАБ установлено, что их разнообразие определяется конкретной задачей при тестировании ЭПА СЭП КА. Чаще всего такие специализированные устройства изготавливаются в единичном экземпляре.

Промышленно выпускаемые ИЛИАБ (табл. 1) не обладают:

– возможностями для проведения диагностики ЛИА в составе ЛИАБ при тестировании ЭПА СЭП КА в реальном времени;

– возможностью проверки метрологических требований, предъявляемых к испытываемым приборам, таким как блок электроники с функциями контроля и защиты ЛИАБ.

Результаты сравнительной оценки основных методов, используемых для моделирования и определения параметров ЛИА, приведены в таблице 2.

Следует отметить, что представленные методы и алгоритмы не в полной мере используются при построении ИЛИАБ, в частности для определения параметров ЛИА в реальном времени.

Таблица 1 – Основные характеристики и функции некоторых типов ИЛИАБ

Техническая характеристика	Значение характеристики прибора			
	БИАБ-200ЛИ (НИИ АЭМ ТУСУР)	БИАБ-100ЛИ (НИИ АЭМ ТУСУР)	ТЕСТ-1101 (ИНФОРМТЕСТ)	BSS (АМТЕК)
Максимальное зарядное напряжение, В	110	110	140	200
Минимальное разрядное напряжение, В	40	3	0	15
Диапазон зарядного тока, А	30	30	50	60
Диапазон разрядного тока, А	200	200	150	250
Количество имитируемых элементов ЛИА, шт.	24	24	48	Отсутствует
Диапазон измерения напряжения ЛИА, В	2 – 5	1,5 – 4,2	0,0 – 4,5	Отсутствует
Дискретность регулирования ЛИА, мВ	5	5	10	Отсутствует
Точность воспроизведения напряжения ЛИА, %, не менее	±0,15	±0,15	±0,1	Отсутствует
Количество имитируемых датчиков температуры, шт.	12	10	16	3
Диапазон изменения сопротивления, Ом	99 – 120	99 – 120	95 – 120	95 – 120
Дискретность регулирования сопротивления, Ом	0,1	0,1	0,1	0,1
Точность воспроизведения сопротивления, %, не менее	0,1	0,1	0,1	0,1
Имитация байпасного переключателя	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Имитация режима дозаряда ЛИА в составе ЛИАБ	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Имитация режима балансировки ЛИА в составе ЛИАБ	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Использование имитационной модели ЛИА, ЛИАБ в режиме реального времени	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует

В результате анализа требований к ИЛИАБ установлено, что алгоритмы определения параметров модели батареи должны обладать следующими свойствами:

- минимальный объем экспериментальных данных при определении параметров модели ЛИА, ЛИАБ и ее построения;
- определение параметров модели ЛИАБ в процессе эксплуатации ЛИАБ;

– минимальная ошибка при накоплении систематической погрешности измерительных устройств на протяжении всего времени тестирования ЭПА СЭП КА;

– возможность прогнозирования изменений параметров аккумуляторной батареи на основании полученных результатов тестирования.

Таблица 2 – Методы, применяемые для определения параметров ЛИА

Метод	Преимущества	Недостаток	Дополнительные сведения
Счетчик ампер-часов	Простота реализации. Возможность использования в качестве основы для других методов	Точность результатов может достигать от 10 до 20 %	–
Аппроксимация	Простота реализации. Возможность использования в качестве основы для других методов. Возможность исследования процессов в статическом режиме заряда-разряда ЛИА с точностью результатов не хуже 10 %	Отсутствует возможность исследования процессов в динамическом режиме работы ЛИА. Чувствительность к точности измеряемого тока	Отсутствие алгоритма определения параметров ЛИА. Необходимость в большом количестве экспериментальных данных
Фильтр Калмана	Гибкость при настройке. Возможность использования в качестве основы для других методов. Возможность исследования процессов в динамическом режиме заряда-разряда ЛИА, точность результатов может достигать от 3 до 5 %	Количество операций с плавающей точкой на одну итерацию – около 10^4	Отсутствие алгоритма определения параметров ЛИА. Необходимость в большом количестве экспериментальных данных
Нейронная сеть	Реализация алгоритма определения параметров ЛИА. Возможность исследования процессов в динамических режимах работы ЛИА, точность результатов может достигать до 1 %	Количество операций с плавающей точкой на одну итерацию – около 10^5	Неопределенность количества персептронов на этапе обучения эпох, их склонность к переобучению. Необходимость в большом объеме экспериментальных данных

Для обеспечения точности метрологических требований, предъявляемых к испытываемым приборам блока электроники с функциями контроля и защиты ЛИАБ, необходимо выполнение следующих условий:

– формирование напряжения постоянного тока от 2 до 4,5 В с шагом установки не более 0,2 мВ;

– регулирование по внешним командам скорости изменения напряжения от 0,2 до 1 мВ/с;

– измерение установленного напряжения с погрешностью не более ± 1 мВ;

– имитация работы датчика температуры ЛИА с сопротивлением от 80 до 120 Ом и погрешностью не более $\pm 0,1$ Ом;

– имитация работы коммутатора байпасного переключателя, исключающего неисправный аккумулятор из общей схемы батареи ЛИАБ;

– измерение тока дозаряда ЛИА не более чем на 1 А. Погрешность измерения тока дозаряда должна быть не более $\pm 0,5$ %.

При создании имитатора всей ЛИАБ необходимо выполнение ИЛИА дополнительных функций:

- последовательное соединение требуемого количества ИЛИА в батарее;
- рекуперация энергии, выделяемой за счет протекания тока заряда до 30 А, в источник энергии с напряжением от 27 до 100 В.

Во второй главе рассматривается построение математической и имитационной моделей ЛИА и ЛИАБ на базе эквивалентных электрических схем замещения¹ (рис. 1).

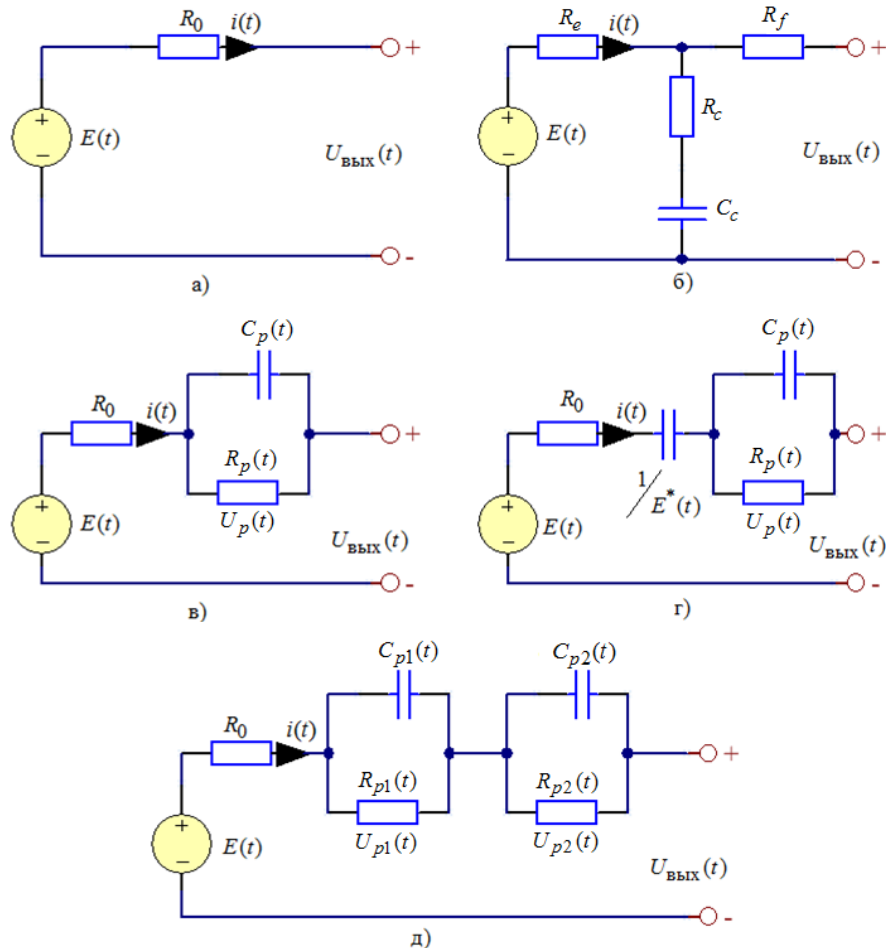


Рисунок 1 – Эквивалентные электрические схемы замещения ЛИА:

а) – модель R; б) – модель RC; в) – модель Тевенина;
г) – модель PNGV; д) – модель DP

Модели аккумулятора обычно разделяются на статические и динамические, отражающие изменения токов и напряжений для вышеприведенных схем замещения. Статической является модель R, остальные динамические модели связаны с внутренним импедансом ЛИА. Однако эти модели имеют общий недостаток в классическом исполнении, а именно не отражают изменения ЭДС аккумулятора в процессе отдачи или приема энергии.

Исходя из заявленных требований к модели ЛИАБ были рассмотрены динамические модели ЛИА. Особенность динамических моделей заключается в достаточно большом количестве неизвестных переменных – не менее сорока. Это значительно затрудняет построение динамической модели ЛИАБ, состоящей из десяти и более аккумуляторов, обычно применяемых в СЭП КА.

¹ He N. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach / H. He, R. Xiong, J. Fan // Energies. 2011. No. 4. P. 582–598.

Модифицированная динамическая модель ЛИА² на основе схемы замещения Тевенина и модели Шеферда записывается следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \frac{dU_p(t)}{dt} = \frac{i(t)}{C_p^*} - \frac{U_p(t)}{R_p^* C_p^*}, \\ U_{\text{вых}}(t) = E_0 - K \frac{Q_{\text{Max}}}{Q_{\text{Max}} - Q_{\Sigma}(t)} + A e^{(-B Q_{\Sigma}(t))} \pm R_0 i(t) + U_p(t), \end{cases}$$

где $i(t)$, R_0 , $U_p(t)$, R_p^* , C_p^* , E_0 , K , Q_{Max} , $Q_{\Sigma}(t)$, A , B – соответственно зарядно-разрядный ток; постоянное сопротивление аккумулятора; поляризационное напряжение; эквивалентные значения поляризационных сопротивлений и емкости; максимальное напряжение; поляризационная составляющая внутреннего сопротивления аккумулятора; полная емкость; емкость, полученная или отданная за интервал времени t ; экспоненциальные составляющие процессов заряда-разряда аккумулятора.

Отличительными признаками предлагаемой модели ЛИА являются:

- возможность отражения изменения ЭДС и поляризационной составляющей внутреннего сопротивления ЛИА в процессе отдачи или приема энергии;
- минимальный объем экспериментальных данных при построении;
- минимальное количество неизвестных переменных – не более пяти.

Для вычисления значений коэффициентов в системе уравнений предложено воспользоваться данными производителя ЛИАБ или провести экспериментальные исследования (рис. 2).

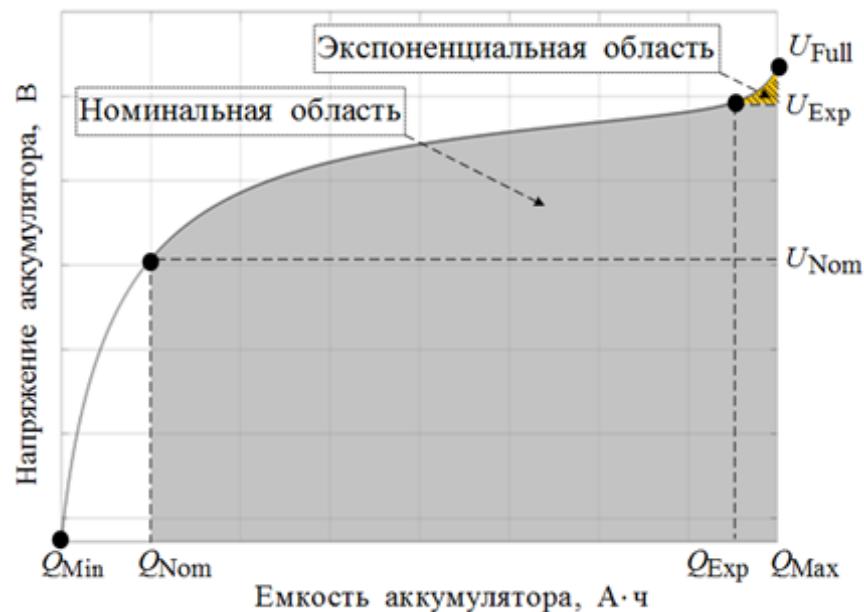


Рисунок 2 – Зависимость напряжения аккумулятора от емкости в режиме заряда:

U_{Full} , U_{Exp} , Q_{Exp} , U_{Nom} , Q_{Nom} , Q_{Min} – соответственно максимальное допустимое напряжение, экспоненциальное напряжение, экспоненциальная емкость, номинальное напряжение, номинальное и минимальное значения емкости

Для определения параметров модели создан алгоритм (рис. 3), учитывающий особенности эксплуатируемого аккумулятора ЛИАБ ЭПА СЭП КА.

² Брянецев А.А. Методика определения параметров динамической модели литий-ионного аккумулятора / А.А. Брянецев, В.Г. Букреев, А.А. Шилин // Доклады ТУСУР. 2019. Т. 22, № 4. С. 96–101.

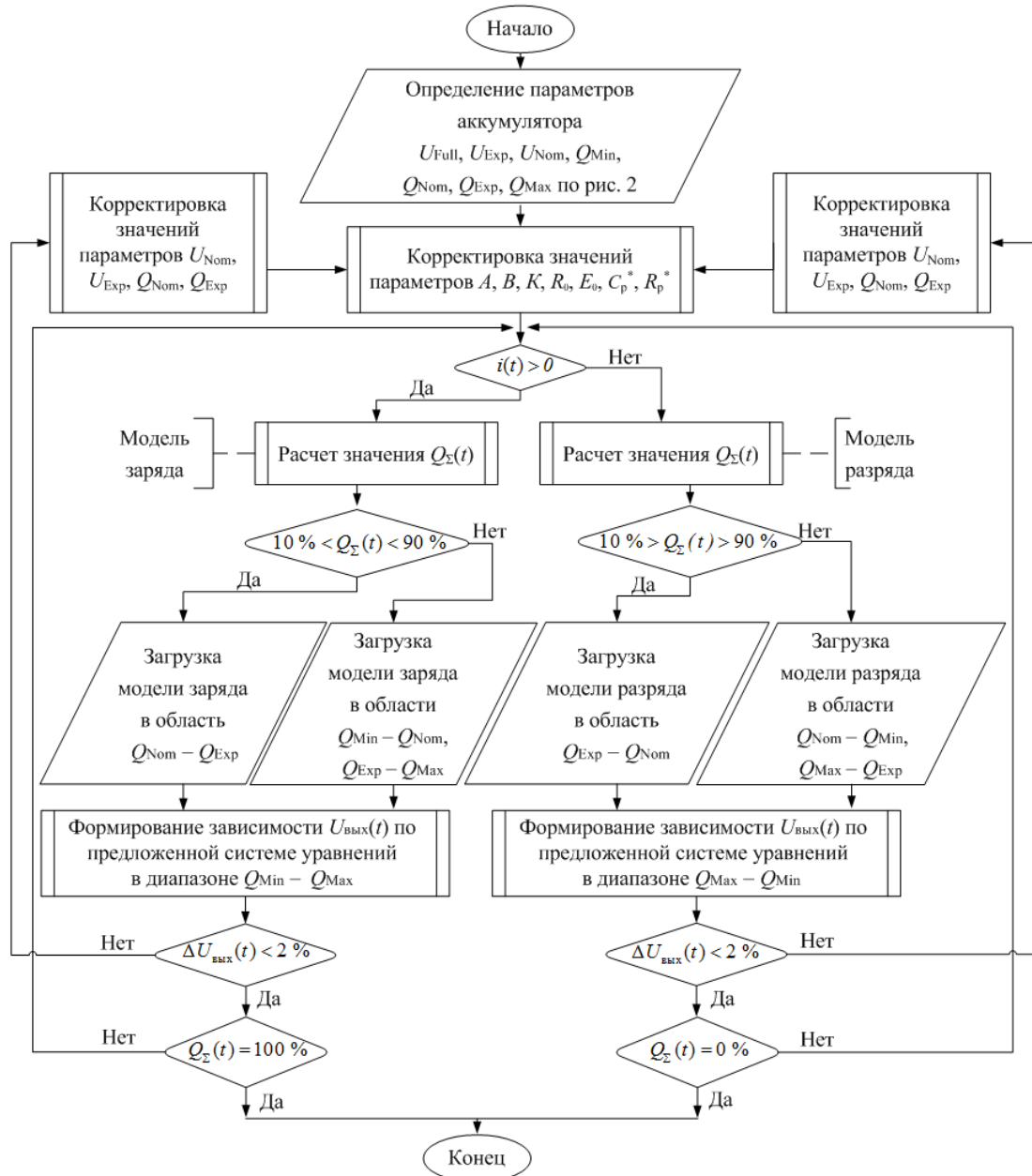


Рисунок 3 – Алгоритм определения параметров динамической модели ЛИА
Алгоритм включает следующие измерительные и вычислительные операции:

- расчет необходимых переменных для модели;
- считывание направления тока для построения модели заряда или разряда;
- определение емкости, полученной или отданной аккумулятором в течение времени цикла;
- определение выходного напряжения и минимизация разницы модельных данных и значений, полученных от производителя ЛИАБ, путем подстройки параметров модели методом градиентного спуска.

Эти операции повторяются до момента достижения имитации полного заряда или разряда аккумулятора.

Для проверки работоспособности имитатора батареи и алгоритма определения ее параметров создана имитационная модель ЛИАБ в программной среде Matlab Simulink (рис. 4). Адекватность этой модели подтверждена результатами сравнения ее характеристик с данными, полученными на основании экспериментальных исследований батареи 8ЛИ40.

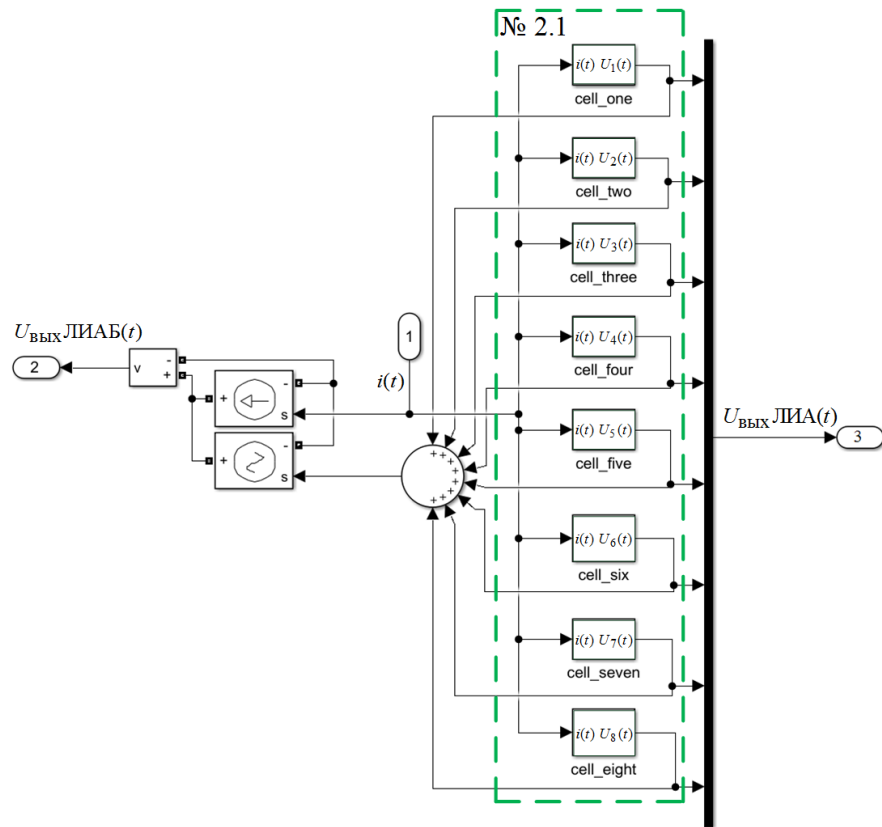


Рисунок 4 – Имитационная модель ЛИАБ, разработанная в среде Matlab Simulink

Модель ЛИАБ состоит из восьми моделей аккумуляторов, в каждой из которых имеются модели термодатчика³ и байпасного переключателя коммутационного типа⁴. Алгоритм вычисления параметров модели аккумулятора позволяет определить напряжение имитируемой батареи 8ЛИИ40 в динамическом режиме с точностью не более $\pm 1,2\%$, а в статическом – не более $\pm 0,6\%$ на всем диапазоне цикла заряда или разряда ЛИАБ (рис. 5).

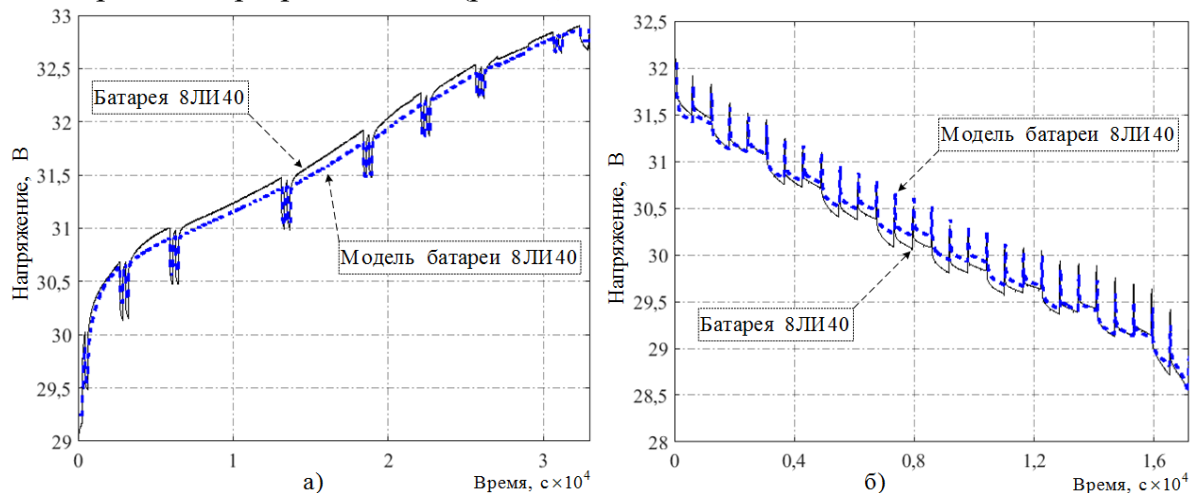


Рисунок 5 – График зависимости выходного напряжения батареи 8ЛИИ40 (сплошная линия) и ее модели (пунктирная линия) от времени:
а) – в режиме заряда; б) – в режиме разряда

³ High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells / T. Huria [et al.] // International Electric Vehicle Conference (4–8 March, 2012, Greenville, USA). 2012. P. 1–8.

⁴ Брянецев А.А. Исследование имитационной модели литий-ионного аккумулятора с байпасным переключателем в среде Simulink Matlab / А.А. Брянецев, Е.С. Волкова, В.С. Шабалов // Программно-техническое обеспечение автоматизированных систем : сб. докладов. Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2018. С. 30–32.

В третьей главе представлены структурно-функциональная схема ИЛИА⁵ (рис. 6) и его схемотехническое решение на основе микропроцессора отечественного производства с программной реализацией алгоритма вычисления параметров модели аккумулятора.

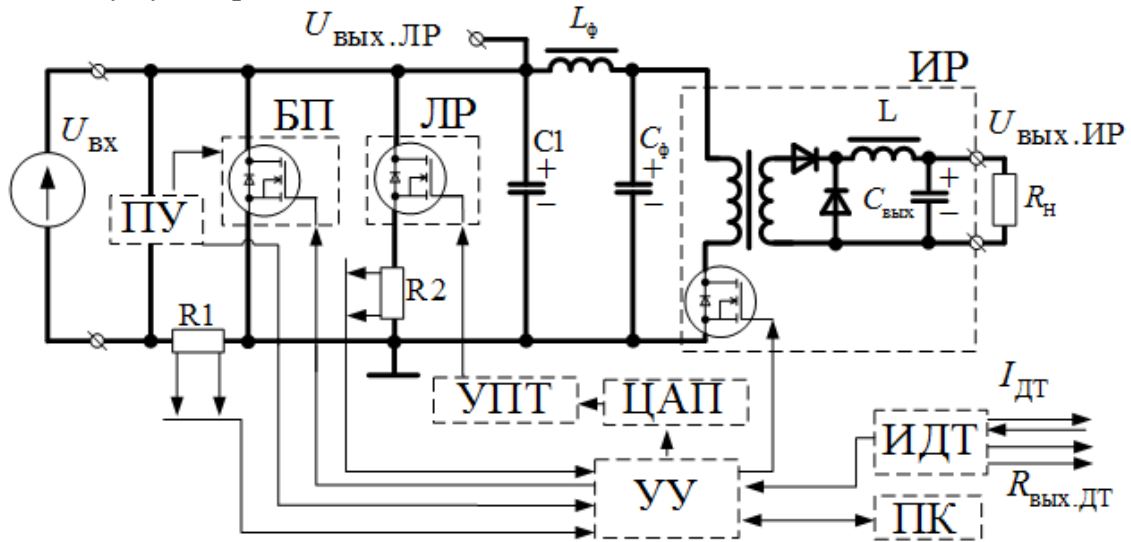


Рисунок 6 – Структурно-функциональная схема ИЛИА:

ПУ – пороговое устройство, БП – байпасный переключатель, ЛР – линейный регулятор, УПТ – усилитель постоянного тока, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, УУ – устройство управления, ПК – персональный компьютер, L_{Φ} , C_{Φ} – элементы заграждающего фильтра, ИР – импульсный регулятор, ИДТ – имитатор датчика температуры

ПУ совместно с ключом БП защищает ИЛИА и контролируемую аппаратуру от превышения выходного напряжения ИЛИА сверх допустимых уровней при отказах ЭРИ. Силовой ключ БП предназначен для исключения аккумулятора из состава ЛИАБ путем замыкания силовых цепей. Шунт R1 предназначен для контроля токов дозаряда аккумулятора, выдаваемых из проверяемой аппаратуры. ИДТ предназначен для имитации температурного датчика сопротивления.

Принцип работы схемы заключается в стабилизации напряжения на зажимах имитатора шунтирующим регулятором тока, состоящим из параллельно включенных ЛР и ИР. Напряжение стабилизации задается ПК через УУ и может изменяться с заданной скоростью. Характеристики ИЛИА обеспечиваются ЛР, а ИР обеспечивает сброс избыточной мощности в источник постоянного тока. При протекании тока заряда через ИЛИА выходное напряжение стабилизируется ЛР и ИР. Напряжение стабилизации ИЛИА задается ЦАП. Сигнал ошибки между заданным напряжением с выхода ЦАП и напряжением ИЛИА усиливается УПТ и подается на ЛР. ЛР стабилизирует ток нагрузки на уровне 30 А. Для снижения тепловых потерь напряжение с шунта R2 поступает на управление ИР, который начинает отбор мощности и рекуперацию ее в источник постоянного тока. При этом ток, протекающий через ЛР, уменьшается.

При подаче команды на задействование БП происходит размыкание силовых цепей ИЛИА, при этом измерительные цепи остаются задействованными. Это позволяет определить метрологические характеристики ЭПА, а также проверить логику функционирования как при задействовании БП, так и в режиме хранения

⁵ Имитатор литий-ионного аккумулятора с рекуперацией энергии / А.А. Брянецв [и др.] // Электронные и электромеханические системы и устройства : сб. науч. трудов Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2016. С. 136–138.

(когда ток заряда с внешних клемм « $U_{\text{вх}}$ » отсутствует). В этом случае ИЛИА формирует и стабилизирует напряжение на накопительном конденсаторе $C1$ небольшой емкости с помощью регулирующего элемента ЛР. УУ осуществляет измерение напряжений с требуемой точностью 24-разрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП).

Таким образом, разработанная схема ИЛИА позволяет имитировать характеристики реального ЛИА при помощи предложенной модели, а использование ИР обеспечивает рекуперацию энергии при протекании зарядного тока через ИЛИА и способствует уменьшению тепловых потерь более чем в три раза.

Программное обеспечение микропроцессорного имитатора с реализацией алгоритма определения параметров модели ЛИА в виде отдельного программного модуля позволяет применять его в других проектах с незначительной корректировкой исходного кода.

Приведем алгоритм формирования выходного напряжения ИЛИА (рис. 7), реализованный в УУ. Входными данными для алгоритма является ранее предложенный вариант (см. рис. 3), который включает следующие измерительные и вычислительные операции:

- калибровка измерительного (АЦП) и преобразующего (ЦАП) устройств;

- измерение тока для обеспечения сброса избыточной мощности в источник постоянного тока и для определения параметров модели ЛИА;

- преобразование ЦАП значения, полученного из алгоритма определения параметров модели ЛИА, в выходное напряжение, измерение АЦП преобразованного значения напряжения;

- калибровка АЦП и ЦАП в случае расхождения выходного напряжения ИЛИА более чем на 3 мВ.

Эти операции повторяются до момента достижения имитации полного заряда ИЛИА. Установленное на ПК программное обеспечение выполняет следующие функции:

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

Программное обеспечение имитатора обеспечивает два режима работы алгоритма вычисления параметров модели ЛИА. Первый режим предусматривает расчет необходимых коэффициентов по экспериментальным значениям U_{Nom} , U_{Exp} , U_{Full} , Q_{Nom} , Q_{Exp} , Q_{Max} . Второй режим предоставляет возможность работы с предварительно вычисленными значениями коэффициентов A , B , K , R_0 , E_0 . Тем самым создается база значений коэффициентов модели аккумулятора,

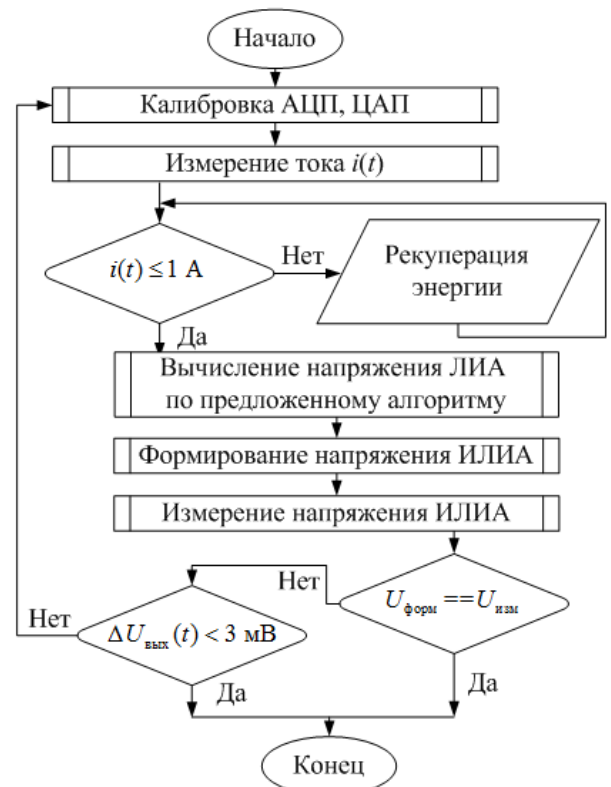


Рисунок 7 – Алгоритм формирования выходного напряжения ИЛИА

используемых для статического анализа результатов экспериментов и позволяющих приблизиться к поставленной задаче по имитации ЛИА и ЛИАБ.

В четвертой главе рассмотрена реализация ИЛИА⁶ в режиме заряда, приведены методика определения параметров модели ЛИА в режиме заряда, а также экспериментальная установка (рис. 8) и необходимое стендовое оборудование⁷.

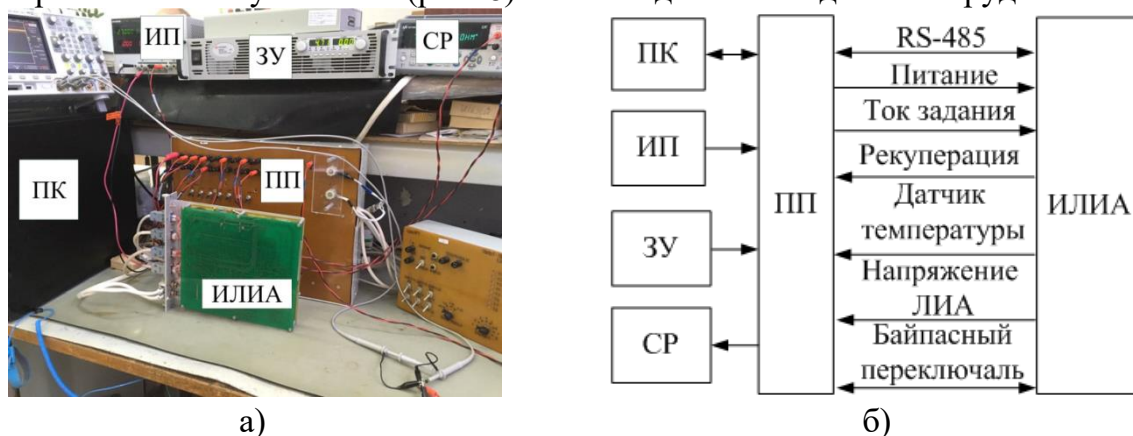


Рисунок 8 – Экспериментальная установка: а) – внешний вид; б) – структура (ПК – персональный компьютер; ИП – источник питания;

ЗУ – зарядное устройство; СР – средство измерения;

ПП – пульт проверки ИЛИА с возможностью использования БП^{8,9})

Экспериментальный стенд позволяет оценить реакцию имитатора на ток задания и определить параметры модели ЛИА. Команды от персонального компьютера передаются в ИЛИА по гальванически развязанному интерфейсу RS-485.

В качестве источника питания ИЛИА используется первый канал прибора GPD-73303S, второй канал выполняет функции дозарядного устройства с предельным значением по току до 3 А. В роли зарядного устройства служит источник питания постоянного тока N8736A с предельным значением по току до 85 А. Электронная нагрузка обеспечивается прибором АТН-8301 и используется для рекуперации энергии. Эталоным измерительным устройством является цифровой мультиметр 34401A.

При проведении экспериментальных исследований необходимо соблюдать методику для обеспечения оптимальной работоспособности алгоритма определения параметров модели ЛИА. Так, для лучшей имитации характеристик аккумулятора целесообразно использовать как модели заряда, так и модели разряда ЛИА.

Для формирования модели заряда необходимо:

- обеспечить номинальный профиль зарядного тока в ЛИАБ;
- обеспечить изменение выходного напряжения ЛИАБ от минимального до максимального допустимого значения.

Для формирования модели разряда необходимо:

⁶ Пат. 165168 Российская Федерация, МПК Н 01 М 10/42, Н 02 J 7/00. Имитатор литий-ионного аккумулятора / А.А. Брянцев, А.Н. Ильин, В.Г. Букреев, В.М. Попов, Л.А. Качин. № 2015153649/07 ; заявл. 14.12.2015 ; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 28.

⁷ Пат. 161796 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/40. Устройство для испытаний комплекса автоматики и стабилизации космического аппарата в режиме имитации заряда литий-ионной аккумуляторной батареи / А.А. Брянцев, А.Н. Ильин, В.Г. Букреев, Г.Г. Галаткина. № 2015153655/28 ; заявл. 14.12.2015 ; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 13.

⁸ Пат. 162152 Российская Федерация, МПК Н 01 Н 37/00, В 64 G 1/42. Байпасное устройство / Брянцев А.А., Букреев В.Г., Проценко Н.А., Шевченко Ю.М. № 2015117311/04 ; заявл. 06.05.2015 ; опубл. 27.05.2016, Бюл. № 15.

⁹ Пат. 141789 Российская Федерация, МПК Н 01 Н 37/00. Байпасное устройство / Брянцев А.А., Букреев В.Г., Проценко Н.А., Шевченко Ю.М. № 2013154124/07 ; заявл. 05.12.2013 ; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.

- обеспечить номинальный профиль разрядного тока в ЛИАБ;
- обеспечить изменение выходного напряжения ЛИАБ от максимального до минимального допустимого значения.

В рамках программного обеспечения персонального компьютера разработан дополнительный модуль в программной среде RAD Studio XE8, который выполняет следующие функции:

- подготовка и отображение данных от ИЛИА;
- протоколирование данных для последующего определения напряжения $U_{\text{вых}}(t)$ и его анализа;
- реализация в имитаторе ЛИАБ модели конкретного аккумулятора.

Для определения работоспособности и адекватности разработанного алгоритма применялся распространенный метод сравнения полученных результатов с эталонными экспериментальными данными.

На этапе эксперимента рассматривался аккумулятор типа ЛИГП-40, для которого были определены необходимые параметры модели ЛИА в режиме заряда-разряда (табл. 3).

Из приведенных параметров следует, что внутреннее сопротивление ЛИА остается постоянным в начале разряда, однако начинает быстро возрастать при уменьшении емкости, также увеличиваются поляризационная емкость и сопротивление.

Для получения статистических данных были проведены экспериментальные циклы заряда-разряда ЛИА, в ходе которых ее поведение сравнивалось с ИЛИА для вычисления погрешности алгоритма определения параметров динамической модели ЛИА. Полученные данные были обработаны в программе Simulink Matlab.

Таблица 3 – Параметры модели аккумулятора ЛИГП-40

Параметр	Значение	
	в режиме заряда	в режиме разряда
$i(t)$, А	4,4	22
A	0,35	0,55
B	0,05	0,05
K	0,01	0,009
E_0 , В	3,811	3,811
R_0 , Ом	0,00018	0,00667
R_p , Ом	0,00018	0,00667
C_p , Ф	10000	10000
τ , с	3,535	13,35
t , ч	11,22	2,35

Максимальная погрешность $\Delta U_{\text{вых}}(t)$ определения напряжения аккумулятора составляла не более $\pm 2\%$.

В ходе второго этапа эксперимента вычислялась точность алгоритма определения параметров модели ЛИА в режиме заряда током 4,4 А и в режиме разряда током 22 А. По результатам экспериментов создана модель аккумулятора ЛИГП-40 с заводскими параметрами, которые определялись с помощью предложенного алгоритма. Установлено, что максимальная погрешность характеристик моделей ЛИГП-40 не превышает $\pm 1,5\%$ на всем диапазоне цикла заряда-разряда ЛИАБ и ИЛИАБ.

Из таблицы 4 следует, что метрологические и технические характеристики¹⁰ ИЛИА (рис. 9) удовлетворяют требованиям, предъявляемым к подобным специализированным устройствам, и превосходят характеристики известных аналогов, приведенные в таблице 1.

¹⁰ ГРСИ РФ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://all-pribors.ru/opisanie/69035-17-ilia-78514> (дата обращения: 24.03.2021).

Таблица 4 – Метрологические и технические характеристики ИЛИА

Наименование характеристики	Значение
Диапазон формируемого напряжения постоянного тока, В	От 2 до 4,5
Скорость изменения выходного напряжения, мВ/с	От 0,2 до 1
Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерений напряжения постоянного тока, мВ	$\pm 1,0$
Диапазон воспроизведения электрического сопротивления постоянному току, Ом	От 80 до 120
Пределы допускаемой абсолютной погрешности воспроизведения электрического сопротивления постоянному току, Ом	$\pm 0,1$
Диапазон измерений силы постоянного тока дозаряда, А	От 0 до 1
Пределы допускаемой приведенной к верхнему значению диапазона измерений погрешности измерения силы постоянного тока дозаряда, %	$\pm 0,5$
Диапазон протекания постоянного тока заряда, А	От 0 до 30
Масса, кг, не более	2,5
Значение тока потребления, А, не более	0,3
Напряжение питания от источника постоянного тока, В	28 ± 3
Средняя наработка, ч, не менее	25 000
Срок службы, лет, не менее	12



Рисунок 9 – Внешний вид промышленно выпускаемого имитатора ЛИА

Предложен усовершенствованный вариант микропроцессорного ИЛИАБ, где устройство разделяется на силовой и информационный модули (рис. 10).

Устройство содержит силовые выходные клеммы с положительным выводом, подключенным к двуправленному источнику постоянного тока, отрицательный вывод которого подключен к отрицательной обкладке нагрузочного устройства рекуперационного типа. Дополнительно вводятся имитатор байпасного переключателя аккумулятора с информационным внешним входом, измерительный электрический шунт, подключенный измерительным выходом к входу операционного усилителя, аналого-цифровой преобразователь. При этом первый, второй, третий и четвертый выходы контроллера, в котором заложен алгоритм определения параметров модели ЛИА, подключены соответственно к имитатору датчика температуры аккумулятора, имеющему информационный выход, имитатору байпасного переключателя, имитатору формирования напряжения аккумулятора, имеющему информационный выход, и гальванически развязанному интерфейсу, подключенному к персональному компьютеру, с которого предусмотрено управление двуправленным источником постоянного тока и устройством рекуперационного типа.

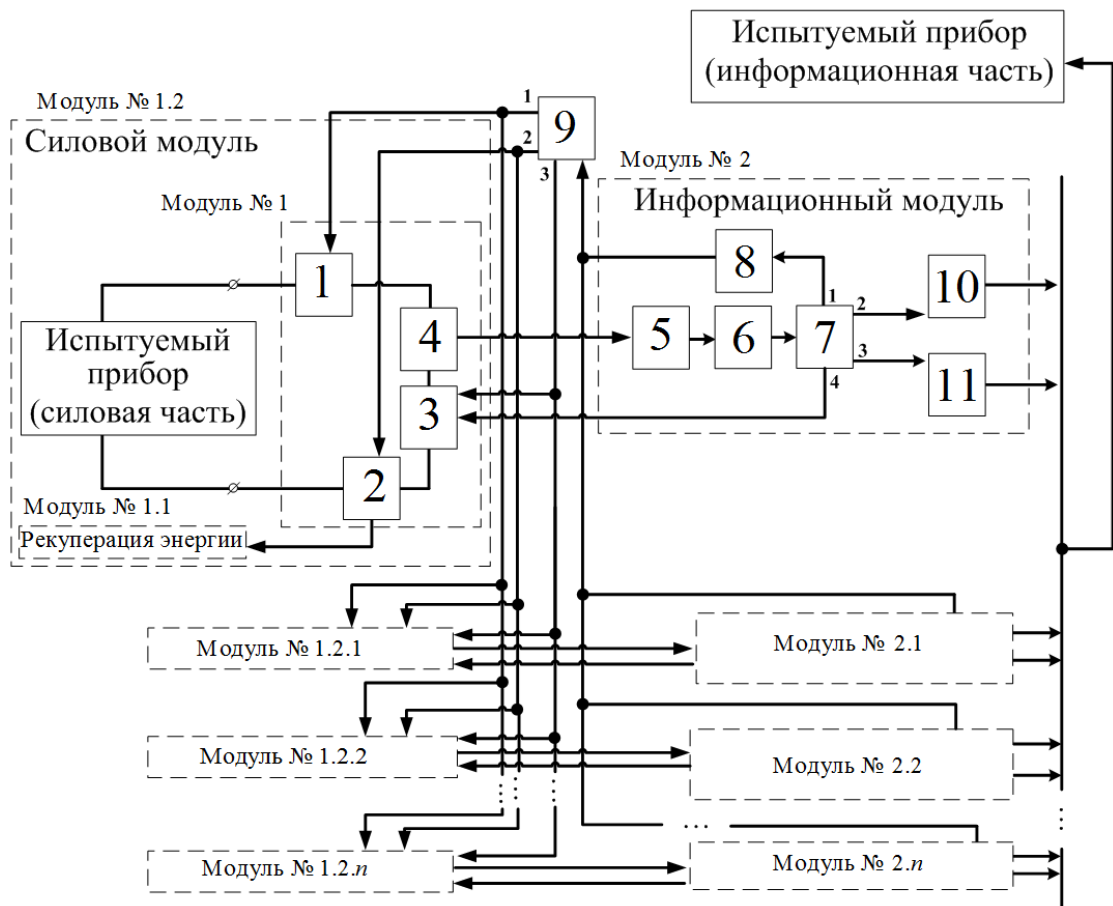


Рисунок 10 – Структура модифицированного варианта ИЛИАБ путем агрегирования микропроцессорного ИЛИА:

- 1 – двунаправленный источник постоянного тока; 2 – устройство рекуперационного типа; 3 – имитатор байпасного переключателя;
 4 – измерительный электрический шунт; 5 – операционный усилитель;
 6 – аналого-цифровой преобразователь; 7 – микропроцессорный контроллер;
 8 – гальванически развязанный интерфейс; 9 – персональный компьютер;
 10 – имитатор датчика температуры; 11 – имитатор напряжения аккумулятора

Предложенный вариант усовершенствованного микропроцессорного ИЛИАБ функционирует следующим образом.

По силовой шине с измерительного шунта 4 напряжение, пропорциональное току, поступает на первый вход операционного усилителя 5 и усиливает разностный сигнал, поступающий на аналого-цифровой преобразователь 6. В контроллер с алгоритмом определения параметров модели ЛИА 7 передаются цифровые коды, соответствующие определенным значениям напряжения и температуры имитируемого аккумулятора. После преобразования задающее значение напряжения поступает с контроллера на первый вход гальванически развязанного интерфейса 8 с последующим управлением через персональный компьютер 9 двунаправленным источником постоянного тока 1 для имитации силовой составляющей имитатора ЛИА. Цифровая имитация напряжения ЛИА 11 формируется цифро-аналоговым преобразователем. Имитация датчика температуры 10 осуществляется алгоритмом, реализованным на персональном компьютере. Отбор избыточной мощности и ее рекуперация обеспечиваются устройством рекуперационного типа 2 или двунаправленным источником постоянного тока 1 в

режиме электронной нагрузки с возможностью рекуперации энергии в питающую сеть или дополнительную полезную нагрузку.

Предложенная структура имитатора ЛИА позволяет повысить его производительность, расширить функциональные возможности имитатора ЛИАБ и более полно использовать алгоритмическое обеспечение для определения параметров модели батареи.

В заключении изложены основные результаты диссертационного исследования, отражающие решение научно-технической задачи.

В приложениях А, Б, В, Г, Д соответственно представлены: результаты моделирования ЛИА, листинг программного кода алгоритмов определения параметров модели ЛИА, копии патентов РФ, акты внедрения результатов работы в промышленность и учебный процесс, акт испытаний в целях утверждения типа ИЛИА в ГРСИ РФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены научные исследования и техническая реализация специализированного имитатора ЛИАБ для наземных испытаний ЭПА СЭП КА и получены следующие новые результаты:

1. Предложенные структуры имитаторов ЛИА создают условия для максимального учета изменяемых характеристик аккумуляторов путем агрегирования их имитаторов в ИЛИАБ и обеспечивают воспроизведение режимов заряда, дозаряда и балансировки аккумуляторов с рекуперацией избыточной энергии на полезную нагрузку при проведении испытаний ЭПА СЭП КА.

2. Разработанные статические и динамические модели ЛИА и ЛИАБ на основе схем замещения Шеферда и Тевенина позволяют учесть изменение ЭДС и поляризационной составляющей внутреннего сопротивления ЛИА в процессе отдачи или приема энергии, значительно уменьшить число неизвестных переменных (не более пяти). Максимальная погрешность алгоритма определения параметров моделей аккумулятора не превышает $\pm 2\%$ в режимах имитации заряда и разряда аккумуляторов ЛИАБ.

3. Созданный испытательный стенд позволяет полноценно выполнить экспериментальные исследования микропроцессорного ИЛИАБ с необходимым количеством ИЛИА. Наличие персонального компьютера в составе стенда предоставляет возможность автоматизировать не только процесс определения параметров моделей ЛИА, но и все операции, связанные с тестированием ЭПА СЭП КА.

4. Разработанный на отечественных элементах микропроцессорный ИЛИАБ, реализующий созданные алгоритмы и программное обеспечение, позволяет существенно расширить функциональные возможности данного класса имитаторов и превосходит по своим характеристикам имеющиеся аналоги.

5. Проведенные экспериментальные исследования ИЛИА на испытательном стенде подтвердили корректность принятых допущений при создании имитационных моделей ЛИА, расхождение результатов теоретических и экспериментальных данных не превышает ± 3 мВ.

6. Разработанная серия промышленных образцов ИЛИА используется АО «НПЦ «Полус» при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Характеристики опытного образца ИЛИА, зарегистрированного в ГРСИ РФ, № 69035-17, соответствуют требуемым значениям.

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Брянцев А.А. Алгоритм определения параметров модели Шеферда для построения имитатора литий-ионного аккумулятора / А.А. Брянцев, В.Г. Букреев // Доклады ТУСУР. 2019. Т. 22, № 1. С. 95–99.

2. Брянцев А.А. Методика определения параметров динамической модели литий-ионного аккумулятора / А.А. Брянцев, В.Г. Букреев, А.А. Шилин // Доклады ТУСУР. 2019. Т. 22, № 4. С. 96–101.

Патенты РФ

3. Пат. 161796 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/40. Устройство для испытаний комплекса автоматики и стабилизации космического аппарата в режиме имитации заряда литий-ионной аккумуляторной батареи / А.А. Брянцев, А.Н. Ильин, В.Г. Букреев, Г.Г. Галяткина. № 2015153655/28 ; заявл. 14.12.2015 ; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 13.

4. Пат. 165168 Российская Федерация, МПК Н 01 М 10/42, Н 02 J 7/00. Имитатор литий-ионного аккумулятора / А.А. Брянцев, А.Н. Ильин, В.Г. Букреев, В.М. Попов, Л.А. Качин. № 2015153649/07 ; заявл. 14.12.2015 ; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 28.

5. Пат. 162152 Российская Федерация, МПК Н 01 Н 37/00, В 64 G 1/42. Байпасное устройство / Брянцев А.А., Букреев В.Г., Проценко Н.А., Шевченко Ю.М. № 2015117311/04 ; заявл. 06.05.2015 ; опубл. 27.05.2016, Бюл. № 15.

6. Пат. 141789 Российская Федерация, МПК Н 01 Н 37/00. Байпасное устройство / Брянцев А.А., Букреев В.Г., Проценко Н.А., Шевченко Ю.М. № 2013154124/07 ; заявл. 05.12.2013 ; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.

В других изданиях

7. Брянцев А.А. Оценка переходного сопротивления контактов байпасного устройства аккумуляторной батареи / А.А. Брянцев, В.Г. Букреев, Н.А. Проценко // Электромеханические преобразователи энергии : сб. докладов. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2013. С. 247–249.

8. Брянцев А.А. Повышение эксплуатационной надежности байпасного устройства / А.А. Брянцев, В.Г. Букреев // Современные техника и технологии : сб. трудов XX Международной науч.-практ. конф. Томск, 2014. С. 221–222.

9. Брянцев А.А. Повышение ресурса байпасного устройства литий-ионного аккумулятора / А.А. Брянцев, В.Г. Букреев, Н.А. Проценко // Электромеханические преобразователи энергии : материалы VII Международной науч.-техн. конф. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2015. С. 223–228.

10. Имитатор литий-ионного аккумулятора с рекуперацией энергии / А.А. Брянцев [и др.] // Электронные и электромеханические системы и устройства : сб. науч. трудов Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2016. С. 136–138.

11. Брянцев А.А. Исследование модели литий-ионного аккумулятора в среде Simulink Matlab / А.А. Брянцев // Электронные и электромеханические системы и устройства : тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов / АО «НПЦ «Полус». Томск, 2018. С. 40–42.

12. Брянцев А.А. Исследование имитационной модели литий-ионного аккумулятора с байпасным переключателем в среде Simulink Matlab / А.А. Брянцев, Е.С. Волкова, В.С. Шабалов // Программно-техническое обеспечение автоматизированных систем : сб. докладов. Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2018. С. 30–32.

13. Брянцев А.А. Алгоритм определения параметров динамической модели литий-ионного аккумулятора / А.А. Брянцев, В.Г. Букреев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. науч. трудов. Красноярск : Изд-во СибГАУ. 2019. Т. 1. С. 575–578.

14. Брянцев А.А. Алгоритм оценки параметров имитационной модели аккумулятора для построения имитатора литий-ионной аккумуляторной батареи / А.А. Брянцев, В.Г. Букреев // Электронные и электромеханические системы и устройства : тез. докл. XX науч.-техн. конф. / АО «НПЦ «Полус». Томск, 2020. С. 19–20.

15. Брянцев А.А. Метод оценки параметров имитационной модели аккумулятора для построения имитатора литий-ионной аккумуляторной батареи / А.А. Брянцев, В.Г. Букреев, Н.А. Проценко // Электронные и электромеханические системы и устройства : сб. науч. трудов. Томск : Изд-во Том. гос. ун-та, 2021. С. 77–83.