



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
(РОСАВИАЦИЯ)**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ  
АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

**ФАКУЛЬТЕТ** Авиационных систем и комплексов

**КАФЕДРА** Электротехники и авиационного электрооборудования

**Направление подготовки** 25.06.01 - Аэронавигация и эксплуатация  
(код и наименование направления подготовки)  
авиационной и ракетно-космической техники

**Направленность** 05.22.14 Эксплуатация воздушного транспорта  
(наименование направленности)

**НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

**Тема** Импульсный метод синтеза цифровых портретов авиационных  
литий-ионных источников электроэнергии для задач  
диагностирования и прогнозирования

**Обучающийся:** Кукоба Игорь Иванович  
(Ф.И.О.)

  
(Подпись)

**Научный руководитель:** д.т.н., с.н.с., профессор Давидов А. О.  
(уч. степень, уч. звание, Ф.И.О.)

  
(Подпись)

**Рецензенты:** д.т.н., профессор Старостин И. Е.  
(уч. степень, уч. звание, Ф.И.О.)

  
(Подпись)

к.т.н., доцент, Матюхин К.Н.  
(уч. степень, уч. звание, Ф.И.О.)

  
(Подпись)

**Работа допущена к защите:**

**Заведующий кафедрой** д.т.н., профессор Халютин С. П.  
(уч. степень, уч. звание, Ф.И.О.)

  
(Подпись)

**МОСКВА 2025**

**Актуальность темы:**

Работы ведущих исследовательских организаций разных стран по вопросам использования новейших разработок, связанных с энергообеспечением современной авиационной техники, направлены на повышение удельных показателей энергоустановок со значительным увеличением их ресурса. При эксплуатации воздушно-космических летательных аппаратов стабильная и устойчивая работа системы электроснабжения во многом зависит от характеристик электрохимических аккумуляторов (ЭХ АК) в составе химической батареи (БХ).

Оценка состояния ЭХ АК необходима на разных этапах подготовки и эксплуатации техники:

- подготовка наземного оборудования;
- производство и проверка на стендах на заводе-изготовителе;
- проверка функционирования систем на летно-испытательной станции;
- контроль работоспособности всех систем и агрегатов в полёте, в том числе при возникновении нештатных ситуаций.

Наземное оборудование на аэродроме – это комплекс систем, необходимых для подготовки и обслуживания воздушных судов. Основной задачей системы электроснабжения является удержание значений питающего напряжения большой группы оборудования в заданных пределах при отклонениях параметров электрической сети. Состояние ЭХ АК ИБП проверяют путем измерения фактической емкости батареи разрядом на реальную нагрузку в определённый период времени с использованием специального испытательного оборудования. Идеально, если такую проверку выполняют в тех же режимах, что и испытания, проведенные при вводе батареи в эксплуатацию. Применение комплексного и быстрого подхода при измерении фактической емкости батареи позволяет существенно сократить время определения параметров и характеристик ЭХ АК, а также снизить трудозатраты на их выполнение.

Применение сложных диагностических систем на борту летательного аппарата обеспечивает возможность текущего диагностирования элементов энергоустановок в нормальных и аварийных режимах эксплуатации. Использование метода определения параметров и характеристик электрохимических аккумуляторов с помощью знакопеременных импульсов постоянного тока для определения состояния аккумуляторных батарей в этих диагностических системах позволит за счёт большего числа контролируемых параметров и соответственно более полной картины общего состояния аккумуляторной батареи предотвращать возникновение нештатных ситуаций при эксплуатации воздушных судов.

Таким образом, оценку состояния электрохимических аккумуляторов проводят на разных этапах подготовки и эксплуатации авиационной техники. Отсутствуют методы, которые позволили бы при эксплуатации энергоустановок определить текущее состояние электрохимических аккумуляторов без изменения их штатной работы. В настоящее время в области энергетики российскими и зарубежными специалистами проводятся исследования электрохимических аккумуляторов и совершенствование их характеристик.

Информативным методом контроля состояния ЭХ АК является используемый в энергетике импульсный метод. Однако во всех известных работах, использующих этот метод, отсутствует единый подход для более быстрого и точного определения текущего состояния АК при их эксплуатации, а также не учитываются индивидуальные особенности эксплуатации АК воздушно-космического назначения.

Поэтому метод, который применяли ранее для оценки состояния ЭХ АК на основе импульсного воздействия на АК, необходимо усовершенствовать, что позволит, не меняя режима работы АК, определить комплекс параметров и характеристик АК и предотвратить возникновение нештатных ситуаций эксплуатации авиационных летательных аппаратов путем сокращения времени определения и увеличения количества параметров, которые определяются, что

обеспечивает получение более полной информации об общем состоянии аккумуляторов авиационного назначения.

Таким образом, усовершенствование метода определения параметров электрохимических аккумуляторов при эксплуатации энергоустановок авиационного назначения без изменения режима их работы в существенно короткие сроки является важной научной задачей авиационной отрасли, имеет большое практическое значение.

Литий-ионные аккумуляторы – это ключ к снижению зависимости от ископаемого топлива, поэтому их использование в электрических самолетах является перспективным направлением. В случае эксплуатации аккумуляторной батареи в режимах, отличающихся от рекомендованных производителем, срок службы значительно снижается, поэтому контроль и диагностика аккумуляторов является важной и актуальной задачей.

#### **Цель и задачи исследования:**

Повышение эксплуатационных характеристик аккумуляторной батареи за счет применения импульсного метода синтеза цифровых портретов для задач диагностирования и прогнозирования.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Обзор и анализ методов, применяемых для определения параметров и характеристик электрохимических аккумуляторов современных системы электроснабжения воздушных судов.
2. Усовершенствование метода определения параметров и характеристик электрохимических аккумуляторов авиационной техники с помощью пакета знакопеременных импульсов постоянного тока на аккумулятор.
3. Формирование математических моделей, пригодных для импульсного метода синтеза цифровых портретов для задач диагностирования и прогнозирования летательных аппаратов.

**Объект исследования:** цифровые портреты, включающие в себя электроэнергетические параметры и характеристики, которые характеризуют состояние электрохимических аккумуляторов системы электроснабжения.

**Предмет исследования:** импульсный методы определения электроэнергетических параметров и характеристик электрохимических аккумуляторов системы электроснабжения воздушных судов.

**Методы исследования:** методы физического и математического моделирования электрических, электроэнергетических характеристик и параметров электрохимических аккумуляторов, статистические методы оценки качества математических моделей, методы экспериментальных исследований и методы определения погрешности.

**Научная новизна полученных результатов.**

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что автором:

1. Предложена структура знакопеременных импульсов постоянного тока для воздействия на аккумулятор, с целью определения его параметров при эксплуатации с целью формирования цифровых портретов для задач диагностирования и прогнозирования. Структура отличается согласованностью величин импульсов, их длительности и пауз между ними с параметрами и характеристиками аккумулятора, что позволяет увеличить точность определения параметров и характеристик аккумулятора без изменения режима его работы в короткое время.

2. Разработана математическая модель литий-ионной аккумуляторной батареи системы электроснабжения авиационной техники, которая используется для определения их параметров и характеристик, путем дополнительного учета емкостных параметров в уравнении разрядной характеристики, что позволяет точнее описывать нелинейные участки этой характеристики.

3. Разработан метод синтеза цифровых портретов электрохимических аккумуляторов за счет совместного применения знакопеременных импульсов постоянного тока, усовершенствованной математической модели и получения

возможности использования метода для литий-ионных аккумуляторов авиационного назначения для задач диагностирования и прогнозирования.

**Апробация работы.** Результаты выполненных исследований докладывались и получили положительную оценку:

- на Всероссийской научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвящённые памяти Н.Е. Жуковского» доклад «Обзор методов диагностирования авиационных электрохимических аккумуляторов», МГТУ ГА, г. Москва, 2021 г.

- на Международной 2021 IEEE 22<sup>nd</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE OF YOUNG PROFESSIONALS IN ELECTRON DEVICES AND MATERIALS(EDM) доклад « Review of diagnostic methods for aircraft electrochemical batteries», Алтайский край, 2021 г.

- на Всероссийской научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвящённые памяти Н.Е. Жуковского» доклад «Метод определения параметров и характеристик авиационных литий-ионных аккумуляторов с использованием знакопеременных импульсов постоянного тока», МГТУ ГА, г. Москва, 2022 г.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диагностики авиационных аккумуляторов, в частности исследование процессов в литий-ионных батареях, выполнен обзор современных самолётов на электрической тяге, обзор источников электрической энергии на борту воздушного судна.

**В первой главе** обзор методов оценки состояния аккумуляторов, используемых в системах электроснабжения летательных аппаратов, рассмотрены основные параметры и характеристики аккумуляторов, используемые при диагностике, а так же выполнен анализ особенностей эксплуатации и измерения основных параметров. На основе действующих

нормативно-методических документов выполнен анализ существующих методов определения состояния аккумуляторов.

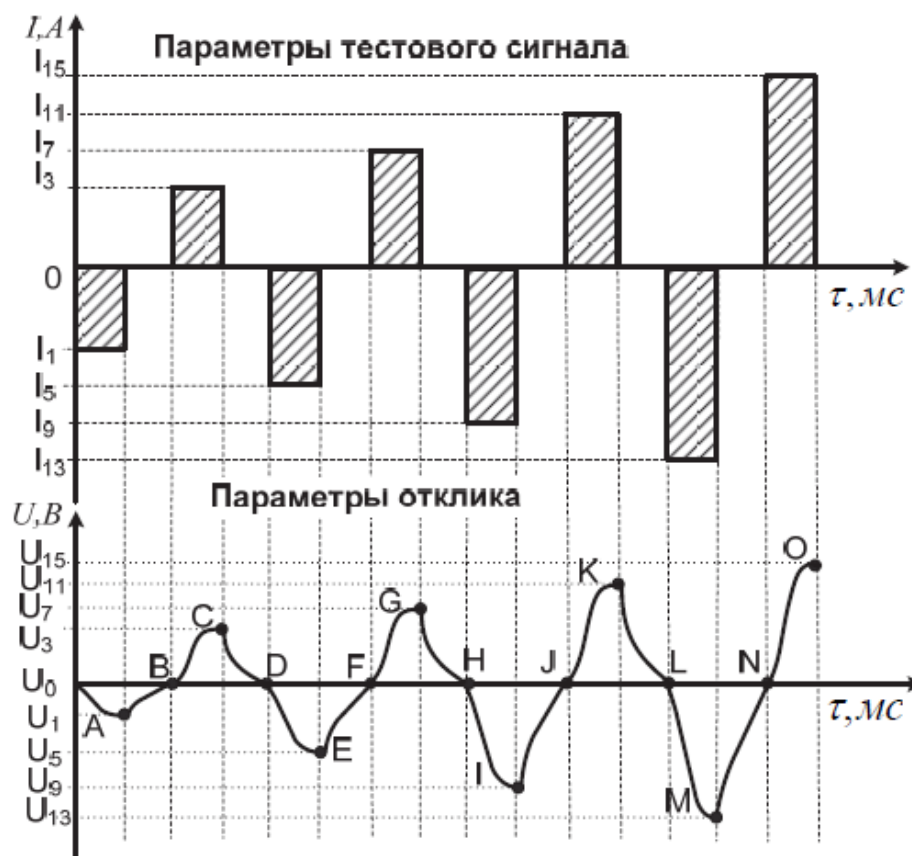
Приведенный выше обзор и анализ показал, что отсутствует единый метод, позволяющий определять комплекс параметров и характеристик АК для быстрого и точного определения их текущего состояния.

Вследствие проведенного анализа, необходимо усовершенствование метода определения параметров и характеристик ЭХ АК с использованием знакопеременных импульсов тока. Метод основывается на взаимосвязи существующей теории электрохимических процессов в АК и определении электроэнергетических параметров и характеристик исследуемого АК и позволяет определить его текущее состояние при эксплуатации СЭС без изменения режима их работы в существенно короткие сроки.

**Во второй главе** рассмотрен предлагаемый метод определения параметров и характеристик аккумуляторов с использованием знакопеременных импульсов постоянного тока и процессы при воздействии данным методом, исследованы отклики по напряжению на воздействие импульсным током на аккумулятор.

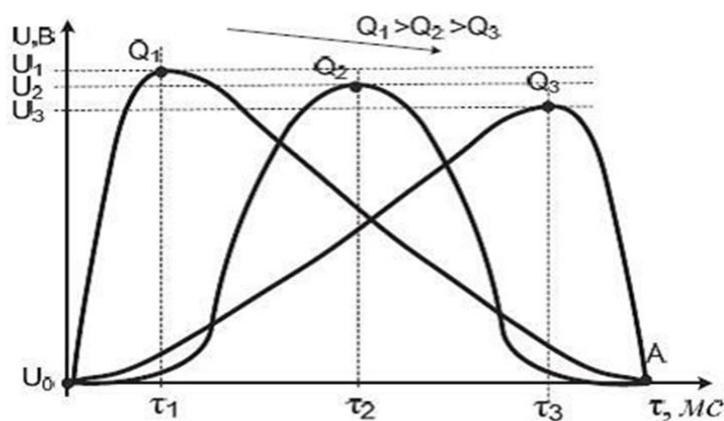
Для решения задачи определения параметров и характеристик авиационных литий-ионных аккумуляторов предлагается метод определения параметров с использованием знакопеременных импульсов тока. Метод основывается на взаимосвязи существующей теории электрохимических процессов в аккумуляторах и позволяет определить его текущее состояние при эксплуатации энергоустановок авиационного назначения без изменения режима их работы.

Таким образом, для определения состояния литий-ионных аккумуляторов требуется усовершенствованный метод определения параметров и характеристик электрохимических аккумуляторов при эксплуатации авиационных систем электроснабжения с использованием знакопеременных импульсов тока с учетом того, что состояние ЭХ АК аккумуляторов оценивать комплексно, быстро и качественно.



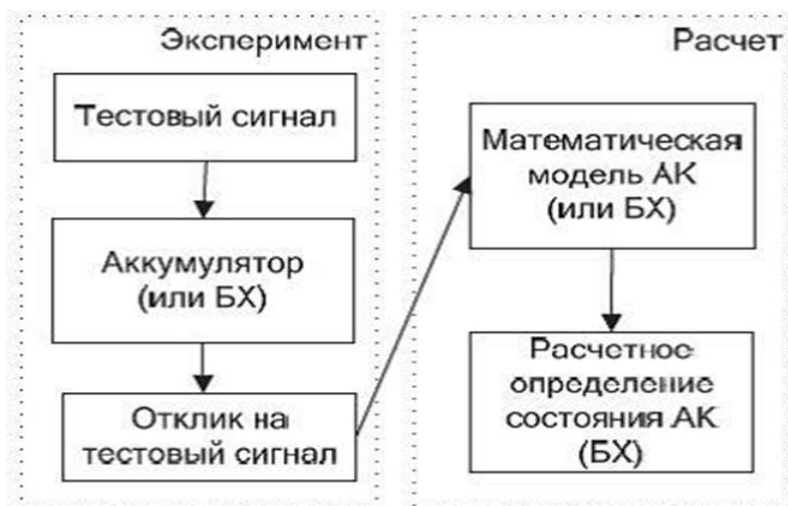
Структура прямоугольных импульсов тока и отклик аккумулятора на этот сигнал по напряжению.

С уменьшением емкости электрохимических аккумуляторов от Q1 до Q3 характеристики отклика изменяются от  $(\tau_1, U_1)$  до  $(\tau_3, U_3)$

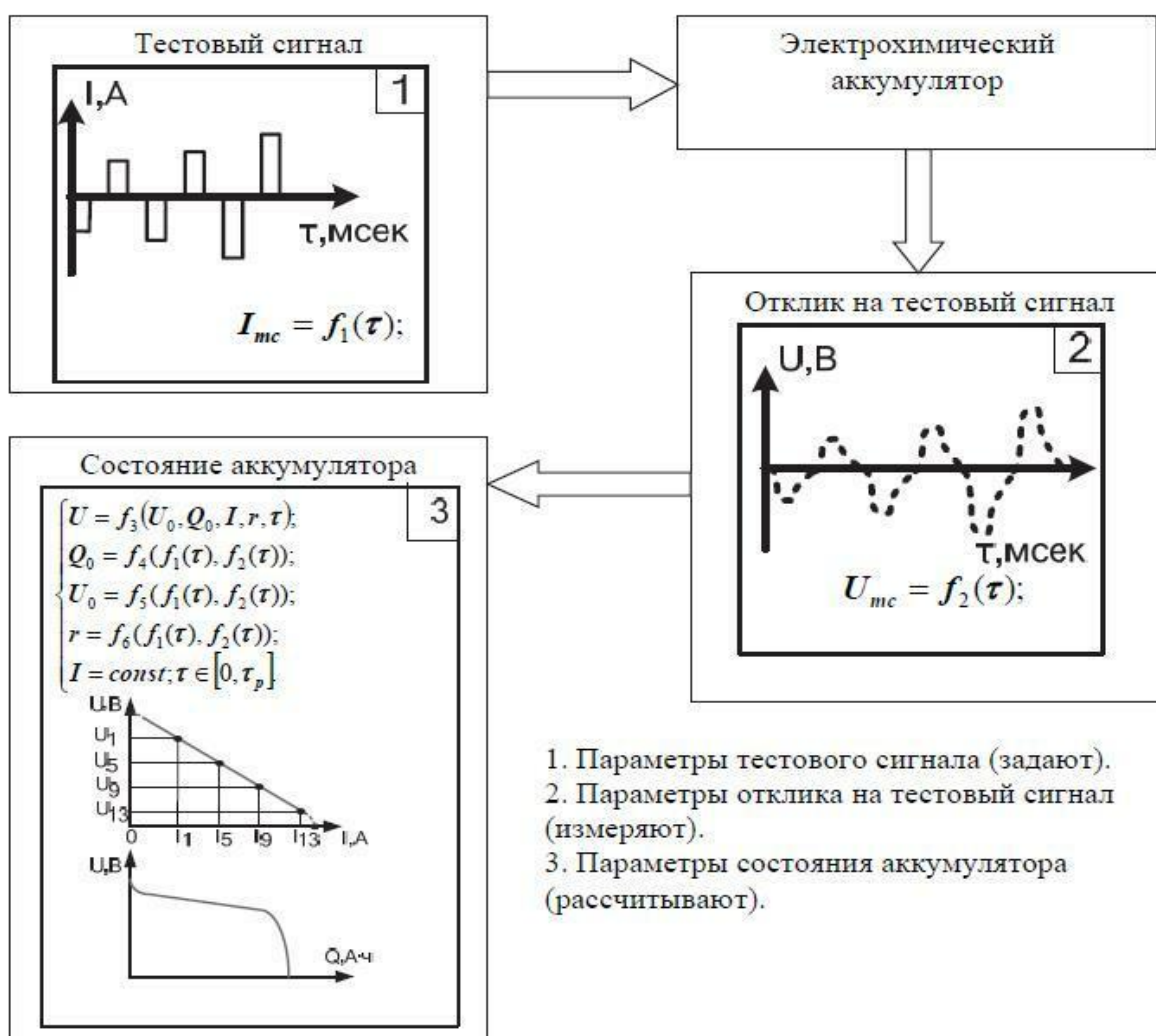


Отклик по напряжению на прямоугольный знакопеременный импульс тока при разных емкостях аккумулятора





Взаимосвязь экспериментальной и расчетной составляющей предложенного метода.



1. Параметры тестового сигнала (задают).
2. Параметры отклика на тестовый сигнал (измеряют).
3. Параметры состояния аккумулятора (рассчитывают).

Структура метода определения параметров.

Предложена идея метода, заключающаяся в анализе отклика аккумулятора на подаваемый тестовый сигнал с дальнейшим расчетным определением

основных параметров и характеристик аккумуляторов с помощью математической модели электрохимических аккумуляторов как составной части предложенного метода.

Результаты исследований позволят использовать новые системы управления накопителями энергии, позволяющие повысить надёжность и безопасность эксплуатации электроэнергетического комплекса воздушного судна в целом.

Из анализа процессов в ЭХ АК при воздействии на АК (пакета прямоугольных импульсов постоянного тока) импульсным током определено следующее:

- анализ процессов в АК при импульсном воздействии на аккумулятор, подтверждает возможность применения импульсов постоянного тока для определения состояния электрохимических аккумуляторов, а также позволяет обосновать необходимость компенсации затрачиваемой емкости на тестовое воздействие с помощью импульса противоположного знака в целях применения предложенного метода в процессе эксплуатации без вмешательства в режим работы ЭХ АК;
- характер отклика по напряжению определяется внутренним состоянием аккумулятора;
- преимущество применения прямоугольной формы импульсного тока перед синусоидальной формой импульсного тока заключается в том, что первая проще в приборной реализации, что позволило определить требования к тестовому сигналу и реализовать предложенный метод в приборах.

**В третьем разделе** представлен анализ методов построения математических моделей электрохимических аккумуляторов и батарей, основанных на фундаментальных уравнениях, эмпирических соотношениях и физико-химической природе деградиационных процессов для формирования требований математической модели электроэнергетических параметров и характеристик ЭХ АК. Математические модели для определения состояния АК должны учитывать взаимосвязь параметров и характеристик аккумуляторов

и режимов их эксплуатации. В качестве уравнений связи могут быть применены статистические, эмпирические и другие зависимости.

Для математического описания разрядных характеристик аккумуляторов применяют следующие эмпирические уравнения:

- обобщенное уравнение Шеферда – Хаскиной – Даниленко:

$$U = E - R \cdot I - \left( \frac{D \cdot q + K \cdot q \cdot I}{Q - q} \right) + A \cdot \left[ \exp \left( -B \frac{q}{Q} \right) - 1 \right];$$

- уравнение Романова (модифицированный вид):

$$U = E - R \cdot I - K \cdot \left( 1 - \exp \left( -\frac{\alpha \cdot q \cdot I}{(Q - q)} \right) \right) + A \cdot \left( \exp \left( -B \frac{q}{Q} \right) - 1 \right).$$

Для исследования возможности применения обобщенного уравнения Шеферда – Хаскина – Даниленко при описании разряда литий-ионных батарей было проведено сравнение экспериментальной разрядной характеристики АК ICP103448SR с расчетной характеристикой.

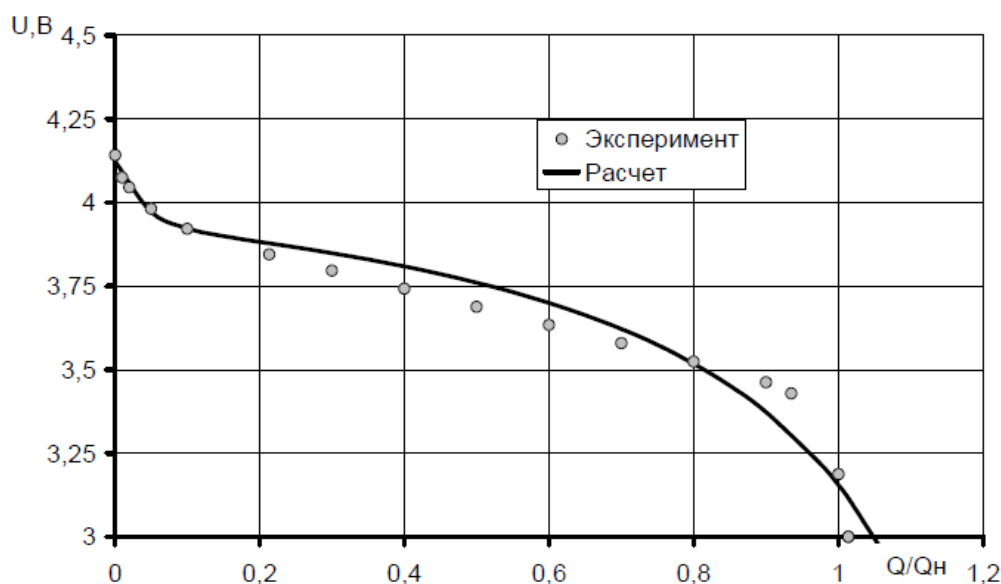
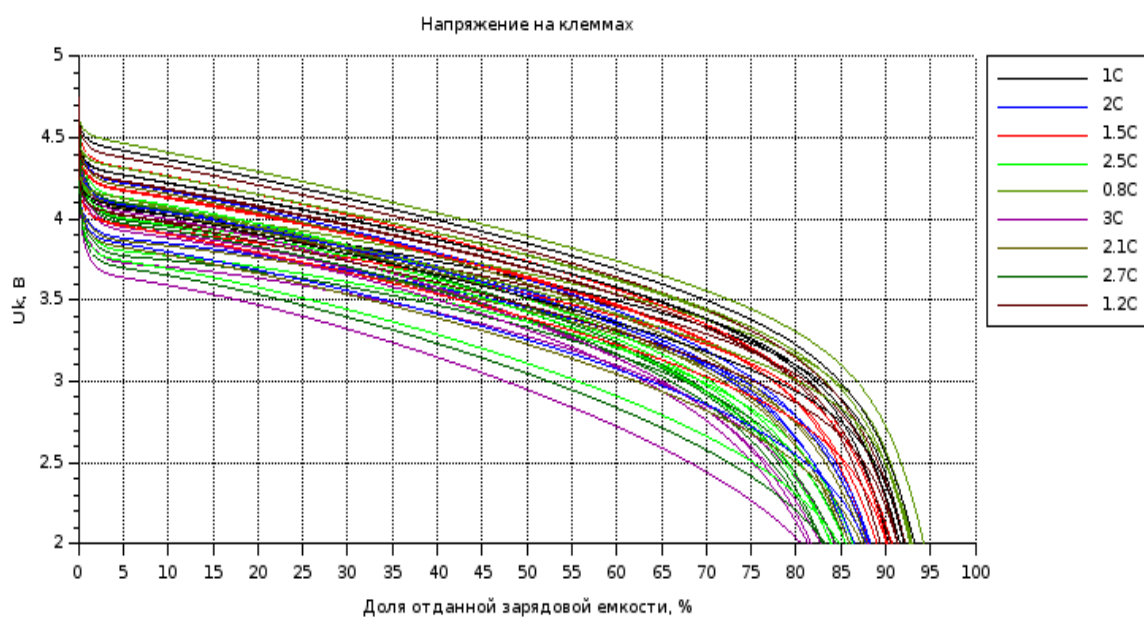


Рисунок 3.1 – Расчетная и экспериментальная разрядные характеристики литий-ионного аккумулятора ICP103448SR

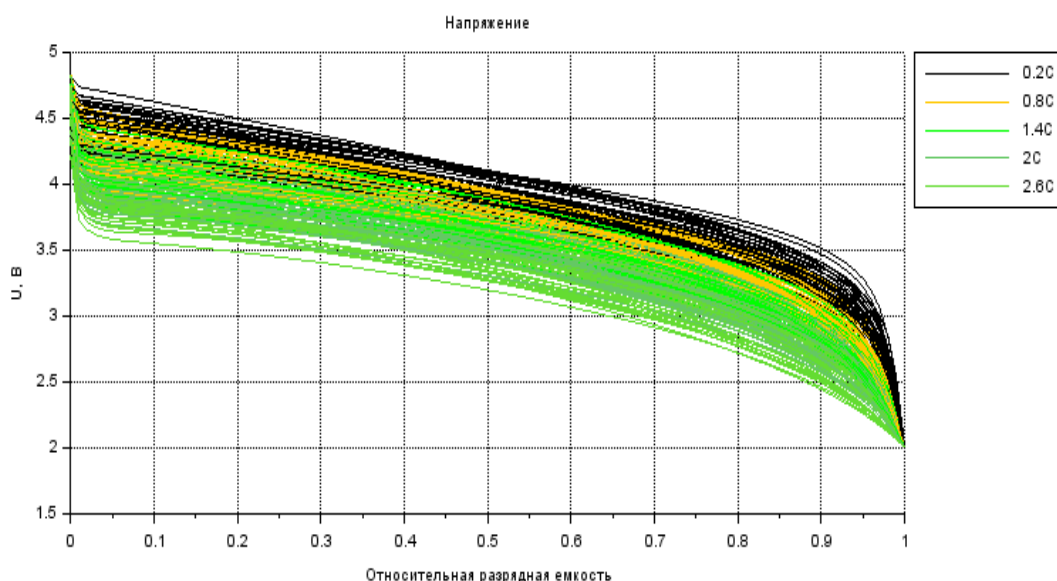
Математическая модель исследуемого объекта (системы) должна обладать высокой точностью, адекватностью и максимально точно описывать процессы,

происходящие в объекте или системе. Для создания таких моделей предлагается использовать метод математического прототипирования энергетических процессов (ММПЭП). Данный метод вытекает из известных начал термодинамики и законов сохранения и обобщает известные формализмы механики, электромагнитной динамики, а также неравновесной нелинейной термодинамики. Помимо этого, ММПЭП учитывает как внутренние силы, обусловленные наличием свободной энергии, так и внешние силы, обусловленные потоками энергии между системой и средой, что является причиной динамических процессов при совершении системой работы.

В результате опытов и расчётов на примере взятого литий-ионного аккумулятора US18650VTC6 были получены характерные разрядные кривые напряжения:



Разрядные постоянным током кривые напряжения литий-ионного аккумулятора при температуре окружающей среды 25°C (1C.... 3C)



Разрядное напряжение, рассчитанное по модели динамики разрядного напряжения литий-ионного аккумулятора серии US18650VTC6 при температуре окружающей среды 25°C.

Рассмотрено применение математической модели для формирования цифровых портретов авиационных литий-ионных аккумуляторов.

В рамках данной работы был разработан протокол информационного обмена литий-ионной аккумуляторной батареи с системой электроснабжения. Информационное взаимодействие литий-ионной аккумуляторной батареи с бортовой системой электроснабжения или системой управления осуществляется с помощью системы контроля (СК).

Система контроля обеспечивает поддержку протокола взаимодействия с системой управления, организацию взаимодействия устройств и агрегатов системы электроснабжения, их непрерывный опрос для получения актуальных значений ключевых показателей устройств, а также отправку на устройства и агрегаты системы электроснабжения управляющих команд при получении от сопряженного устройства соответствующих запросов. СЭС запрашивает состояние аккумуляторной батареи и получает ответ от системы контроля.

Согласно поставленной цели научно-квалификационной работы главным научным результатом является разработка импульсного метода синтеза

цифровых портретов авиационных источников электроэнергии для задач диагностирования и прогнозирования, позволяющий проводить измерения в короткое время, независимо от режима работы аккумулятора, при этом определяя параметры аккумулятора в комплексе.

Усовершенствована математическая модель определения электроэнергетических характеристик литий-ионных аккумуляторов, которая является составной частью предложенного метода, получена путём анализа методов построения математических моделей аккумуляторов и метода математического прототипирования и апробирована при решении задач оценки состояния литий-ионных аккумуляторов.

Модели, построенные с использованием метода математического прототипирования энергетических процессов, обладают значительными преимуществами, особенно при описании сложных систем, таких как литий-ионные аккумуляторы, в сравнении с иными подходами к моделированию.

Модели на основе метода математического прототипирования подходят для прогнозирования состояния системы и диагностики, а также позволяет создавать цифровые двойники систем, которые применяются для мониторинга, управления и оптимизации работы батарей.