

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники  
(институт)

Кафедра Промышленная электроника

11.04.04 – Электроника и нанoeлектроника  
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электронные приборы и устройства  
(направленность (профиль))

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему «Математическая модель аккумуляторных батарей»

Студентка	<u>Копылова Д.С.</u>	_____
	(И.О. Фамилия)	(личная подпись)
Руководитель	<u>Прядилов А.В.</u>	_____
	(И.О. Фамилия)	(личная подпись)
Консультанты	_____	_____
	(И.О. Фамилия)	(личная подпись)
	_____	_____
	(И.О. Фамилия)	(личная подпись)
Руководитель программы д.т.н., профессор <u>В.В. Ивашин</u>	_____	_____
	(ученая степень, звание, И. О.Ф.)	(личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой

«Промышленная электроника» к.т.н, доцент А.А. Шевцов \_\_\_\_\_  
(ученая степень, звание, И.О.Ф.) (личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Тольятти 2016

## **Аннотация**

Темой магистерской диссертации является «Математическая модель аккумуляторных батарей».

В данной работе был проведен обзор и сравнение аккумуляторных батарей, их характеристик и параметров. Произведен анализ основных методов моделирования математических моделей и обзор существующих математических моделей, их достоинства и недостатки. Выбран тип аккумуляторных батарей для исследования и метод моделирования математических моделей.

В ходе выполнения работы было произведено экспериментальное исследование, включающее в себя практическое исследование (независимый эксперимент) и моделирование существующей математической модели аккумуляторных батарей. Разработана математическая модель, учитывающая изменение внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи. Произведено сравнение результатов моделирования существующей модели и разработанной с результатами независимого эксперимента.

Диссертация состоит из трех глав, введения, заключения, списка литературы из 45 наименований. Общий объем работы составляет 89 страниц, 43 рисунков, 7 таблиц.

## Содержание

Список сокращений.....	5
Введение.....	6
Глава 1 Анализ методов моделирования аккумуляторных батарей .....	9
1.1 Типы аккумуляторных батарей.....	9
1.2 Сравнение основных типов аккумуляторных батарей.....	21
1.3 Диагностические параметры АБ.....	23
1.4 Основные эксплуатационные характеристики АБ.....	27
1.5 Основные методы моделирования аккумуляторных батарей.....	29
1.6 Обобщённая структура математических моделей АБ.....	31
1.7 Определение входных и выходных параметров АБ.....	33
1.8 Математические модели аккумуляторных батарей .....	34
1.9 Эквивалентные схемы замещения моделей батарей .....	38
1.10 Альтернативные модели аккумуляторных батарей.....	45
1.11 Статические модели аккумуляторных батарей.....	46
Выводы по главе.....	47
Глава 2 Экспериментальное исследование.....	48
2.1 Практическое определение параметров математической модели.....	48
2.2 Модель аккумуляторной батареи в среде Matlab.....	56
2.3 Математическое моделирование существующей модели.....	68
Выводы по главе.....	69

Глава 3 Разработка математической модели, учитывающей изменение внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи .....	70
3.1 Разработка методики выбора параметров математической модели в среде Mathcad.....	70
3.2 Моделирование разработанной модели в среде Mathcad.....	72
3.3 Сравнение разрядных характеристик существующей и разработанной модели с экспериментально снятыми данными.....	77
Выводы по главе.....	81
Заключение.....	82
Литература .....	85

## **Список сокращений**

АБ – аккумуляторная батарея

Ni-Cad – никель-кадмиевая аккумуляторная батарея

Ni-MH – никель-металлгидридная аккумуляторная батарея

Li-Ion – литий-ионная аккумуляторная батарея

ХИТ – химический источник тока

ЭДС – электродвижущая сила

НРЦ – напряжение разомкнутой цепи

## **Введение**

**Актуальность работы.** В настоящее время аккумуляторные батареи имеют большое значение в современной жизни. Развитие электроники делает все большее количество портативной техники, появляются новые устройства, возрастает потребность в компактных переносных устройствах. Аккумуляторные батареи широко применяются как источники питания и для грамотной разработки систем с их использованием необходимо осуществлять математическое моделирование. В каком бы устройстве аккумуляторная батарея не применялась, ее преждевременный отказ может повлечь последствия разной степени тяжести.

Основными эксплуатационными характеристиками АБ, является ее номинальная емкость. Прямое измерение номинальной емкости связано с разрядом АБ, что занимает много времени и требует отключения АБ от питаемой ею системы. На снижение разрядной емкости аккумуляторной батареи влияет внутреннее сопротивление АБ. Внутреннее сопротивление по большому счету является важной характеристикой аккумуляторной батареи и определяет производительность батареи. В существующих математических моделях внутреннее сопротивление считается постоянным, но на практике внутреннее сопротивление растет. На рост внутреннего сопротивления влияет степень заряженности и температура – это ведет к быстрому падению разрядного напряжения и, в следствие, к снижению разрядной ёмкости аккумулятора.

В связи с этим возникает необходимость в получении достоверной и оперативной информации о текущем состоянии и о эксплуатационных характеристиках АБ. Методы оперативной оценки состояния АБ основываются на характеристиках, полученных косвенно, в результате анализа параметров. Для этого нужна математическая модель, описывающей основные характеристики аккумуляторной батареи.

**Объектами исследования** выступают никель-металлгидридные аккумуляторные батареи.

**Предметом исследования** являются параметры и характеристики аккумуляторных батарей.

**Цель диссертационной работы** – разработка математической модели АБ и методики выбора параметров математической модели, позволяющей повысить достоверность оценки эксплуатационных характеристик.

Для достижения поставленной цели поставлены следующие **задачи**:

1. Экспериментальное исследование (практическое определение параметров математической модели).
2. Моделирование существующих математических моделей АБ.
3. Разработка математической модели аккумуляторной батареи, адекватно описывающей поведение реальной АБ при эксплуатации и диагностике.
4. Разработка методики выбора параметров математической модели.
5. Сравнение разрядных характеристик существующей и разработанной математической модели с экспериментально снятыми данными.

**Методы исследования.** При выполнении исследований применялся комплексный подход, основанный на применении теоретических основ электротехники, цифровой обработки сигналов, математической статистики и метод малых квадратных отклонений. Обработка данных проводилась на персональном компьютере с помощью программного обеспечения, разработанного в среде Matlab/Simulink, а также с помощью электронных таблиц MS Excel.

### **Научная новизна.**

1. Анализ эксплуатационных характеристик АБ по трем параметрам: начальному значению внутреннего сопротивления, начальному значению напряжения холостого хода и емкости.
2. Результаты вычисления эксплуатационных характеристик АБ по методу расчета характеристик с помощью формул, основанному на использовании двух параметров, что повышает достоверность оценки характеристик аккумуляторной батареи.

**Достоверность научных результатов** подтверждается сопоставлением результатов моделирования в среде Matlab/Simulink, Mathcad и физическими экспериментами.



## **Глава 1 Анализ методов моделирования аккумуляторных батарей**

### **1.1 Обзор существующих аккумуляторных батарей.**

Аккумулятор (от лат. accumulator — собиратель, accumulo — собираю, накопляю) — устройство для накопления энергии с целью ее последующего использования. Аккумулятор преобразует химическую энергию в электрическую и по мере надобности наоборот. Заряд АБ производится с помощью пропускания через него электрического тока, при этом вызванные химические реакции приводят к тому, что один из электродов получает положительный заряд, а другой отрицательный. [1]

Аккумуляторы одного типа часто объединяют конструктивно и электрически по несколько штук. Полученная конструкция называется аккумуляторной батареей. Получаемые преимущества напряжение, сила тока, ёмкость или мощность, большие, чем может дать один элемент, емкости по сравнению с напряжением и емкостью отдельного аккумулятора.

Принцип действия аккумулятора исходит из обратимости химических процессов, т.е. при полностью разряженном аккумуляторе, можно восстановить его работоспособность путём заряда, пропуская электрический ток в направлении, обратном направлению при разряде.

Среди множества разновидностей аккумуляторных батарей можно выделить наиболее часто используемые. К ним относятся:

- Никель-кадмиевые аккумуляторные батареи;
- Никель-металлгидридные аккумуляторные батареи;
- Литий-ионные аккумуляторные батареи;
- Литий-полимерные аккумуляторные батареи;
- Свинцово-кислотные аккумуляторные батареи.

Рассмотрим достоинства и недостатки аккумуляторных батарей и их электрические характеристики.

## Никель-кадмиевые аккумуляторные батареи.

Никель-кадмиевые АБ применяются достаточно долго, но при этом обладают невысокой энергетической плотностью (45÷80) Вт·ч/кг. [2]



Ni-Cad аккумуляторные батареи обладают следующими достоинствами:

- Быстрый и простой заряд (даже после продолжительного хранения);
- Большое количество циклов заряд/разряд;
- Хорошая нагрузочная способность и возможность эксплуатации при низких температурах;
- Долгий срок хранения при любом уровне заряда;
- Сохранение стандартной емкости при низких температурах;
- Низкая стоимость;

Недостатки Ni-Cad аккумуляторных батарей:

- Низкая по сравнению с другими типами аккумуляторных батарей энергетическая плотность;
- Эффект памяти и необходимость проведения периодических работ по его устранению;
- Токсичность применяемых материалов;
- Высокий саморазряд - после хранения необходим цикл заряда.

## Электрические характеристики

Номинальное напряжение Ni-Cd аккумуляторных батарей составляет 1,2 В.

Стандартные разрядные характеристики никель-кадмиевых аккумуляторов при разных режимах показаны на рисунке 1.1. [2]

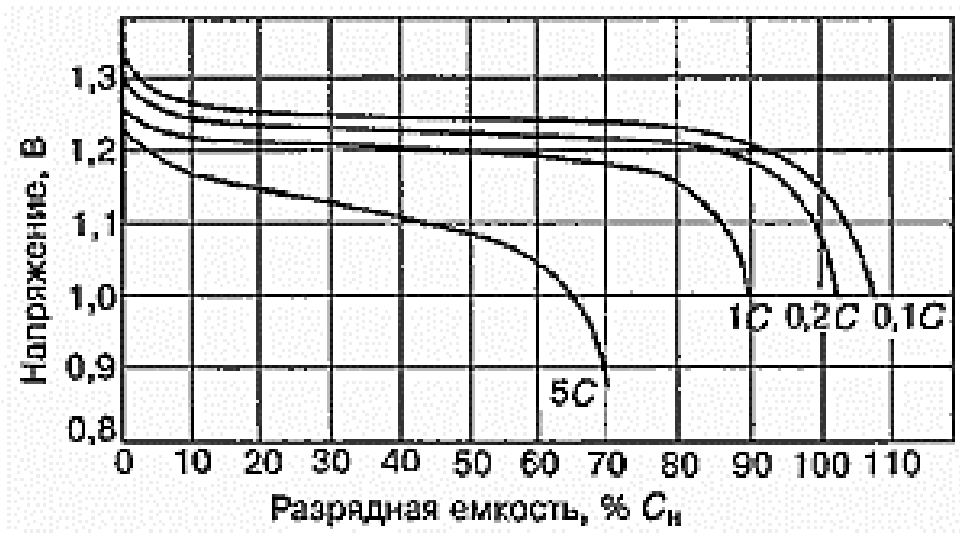


Рисунок 1.1 - Разрядные характеристики Ni-Cd аккумулятора при различных токах разряда

Работоспособность Ni-Cad аккумуляторных батарей отображают кривые зависимости разрядной емкости от температуры и токов нагрузки (рисунок 1.2 и 1.3).

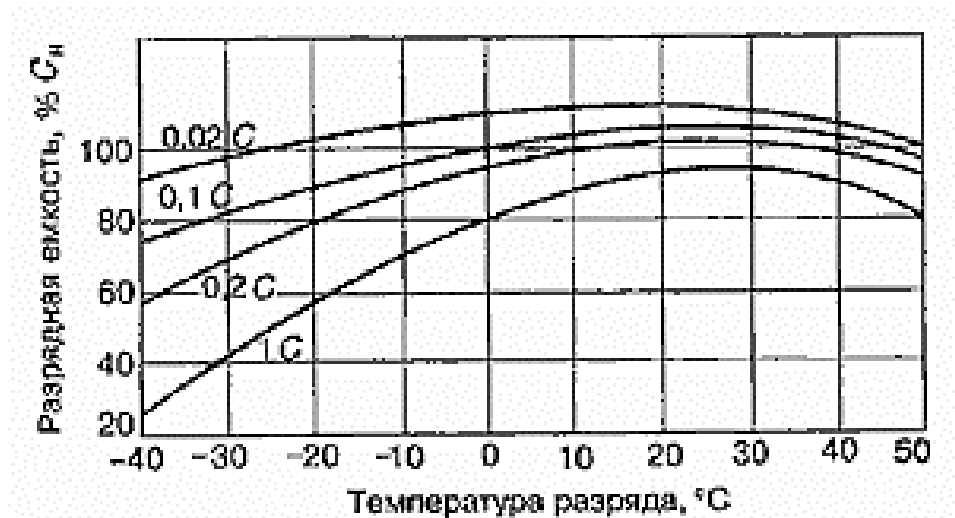


Рисунок 1.2 – Кривые зависимости разрядной емкости от температуры

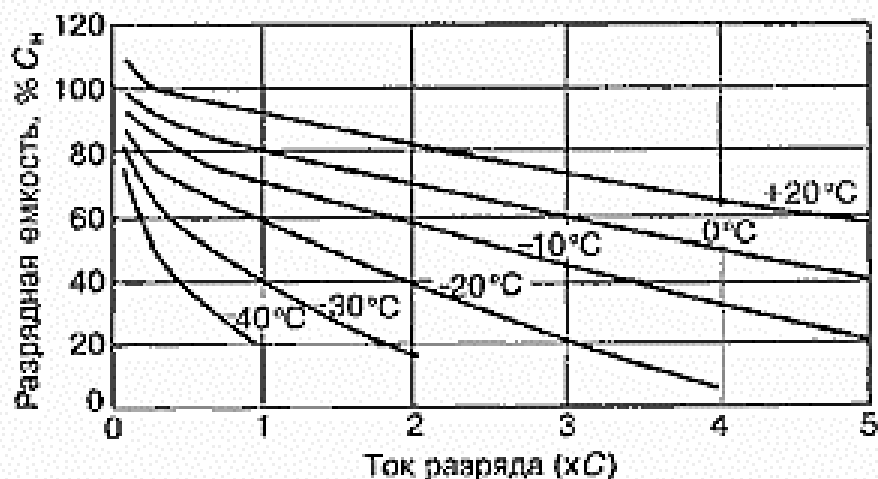


Рисунок 1.3 – Кривые зависимости разрядной емкости от токов нагрузки

Саморазряд Ni-Cd. Процесс саморазряда ведет к утрате емкости и к общему снижению напряжения (на 30-50 мВ). Типичный саморазряд при различных температурах хранения АБ изображен на рисунке 1.4. При хранении аккумуляторов при 0 °С снижение потерь в 2 раза меньше, чем при 20 °С. Из рисунка видно, что при меньшей температуре время хранения увеличивается, а саморазряд уменьшается.

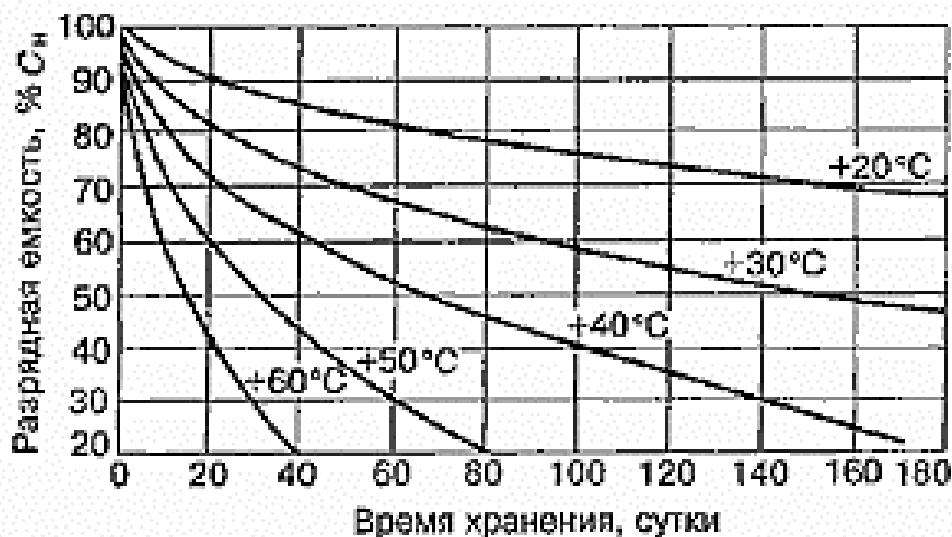


Рисунок 1.4 - Саморазряд при различных температурах хранения

## Никель-металлгидридные аккумуляторные батареи.

Никель-металлгидридные аккумуляторные батареи в последние десятилетия существенно потеснили никель-кадмиевые АБ. Никель-металлгидридные АБ в большинстве случаев применяются в бытовой электронной аппаратуре и в автономных источниках питания портативной аппаратуры.



Достоинство Ni-MH аккумуляторов перед Ni-Cad аккумуляторами – это высокая удельная энергии. По сравнению с Ni-Cad Ni-MH более экологически чистый из-за отказа от кадмия, в связи с этим легче решается проблема утилизации аккумуляторов и могут быть переработаны вторично.

У Ni-MH аккумуляторов "эффект памяти" меньше, чем у Ni-Cad АБ. Они не требуют регулярного контроля при хранении и транспортировке. Также сохраняют работоспособность при температуре от  $-40$  до  $+50$  °С.

Если часто и долго перезаряжать АБ уменьшается разрядное напряжение. Его можно устранить с помощью периодического осуществления нескольких разрядов до 1 В.

Ni-MH аккумуляторы обладают следующими недостатками:

— Эффективно работают в более узком интервале рабочих токов;

- В течении заряда выделяется больше теплоты, по сравнению с зарядом Ni-Cad аккумуляторов,
- Необходимо применения сложного алгоритма заряда из-за выделения большого количества тепла.
- Имеют высокий саморазряд, порядка 30% емкости в месяц;
- периодически требуют контрольно-тренировочного цикла (полный разряд/заряд)

### Электрические характеристики

Напряжение разомкнутой цепи. Величину напряжения разомкнутой цепи  $U_{p.c.}$  Ni-MH аккумуляторной батареи определить точно тяжело из-за зависимости равновесного потенциала оксидно-никелевого электрода от степени окисленности никеля. Заряженный аккумулятор (в течении 24-х часов) имеет напряжение разомкнутой цепи аккумулятора 1,30-1,35 В.

Номинальное разрядное напряжение.  $U_p$  составляет 1,2-1,25 В, при нормированном токе разряда  $I_p = 0,1-0,2C$  ( $C$  - номинальная емкость аккумулятора) при 25°C, конечное напряжение - 1В. С ростом нагрузки напряжение уменьшается (см. рисунок 1.5)

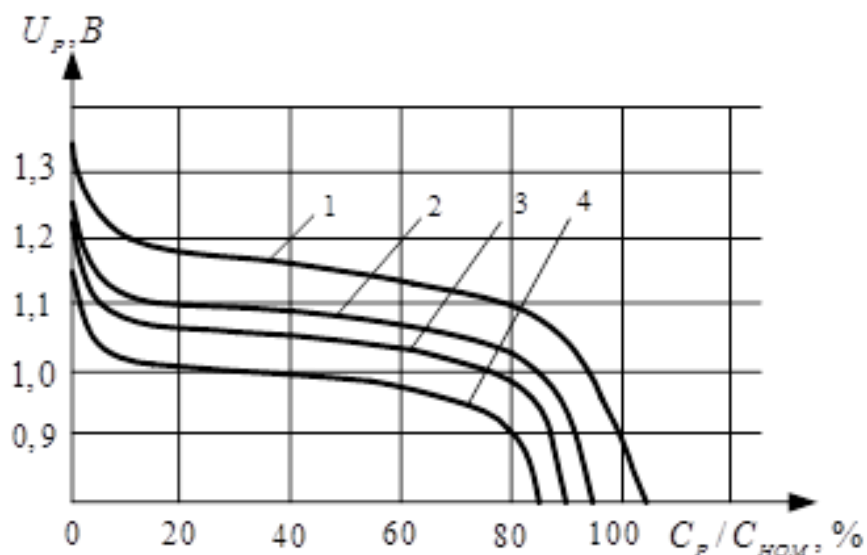


Рисунок 1.5- Разрядные характеристики Ni-MH аккумулятора при температуре 20°C и разных нормированных токах нагрузки:  
1-0,2C; 2-1C; 3-2C; 4-3C

При снижении температуры и уменьшение времени разряда (с повышением нагрузки) емкость аккумулятора уменьшается (см. рисунок 1.6).

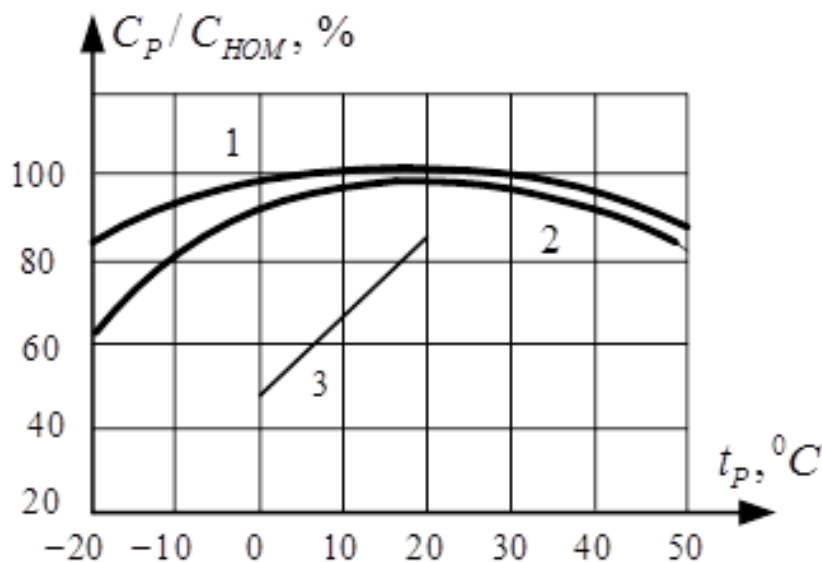


Рисунок 1.6 - Зависимость разрядной емкости Ni-MH аккумулятора от температуры при разных токах разряда:  
1-0,2C; 2-1C; 3-3C

Срок хранения и эксплуатации Ni-MH аккумуляторов. Продолжительное хранение приводит к значительному саморазряду, порядка

30% емкости в месяц, а дальнейшее хранение приводит к уменьшению потерь, порядка до 3-7% в месяц. Если повышать температуру хранения - скорость саморазряда увеличивается (см. рисунок 1.7).

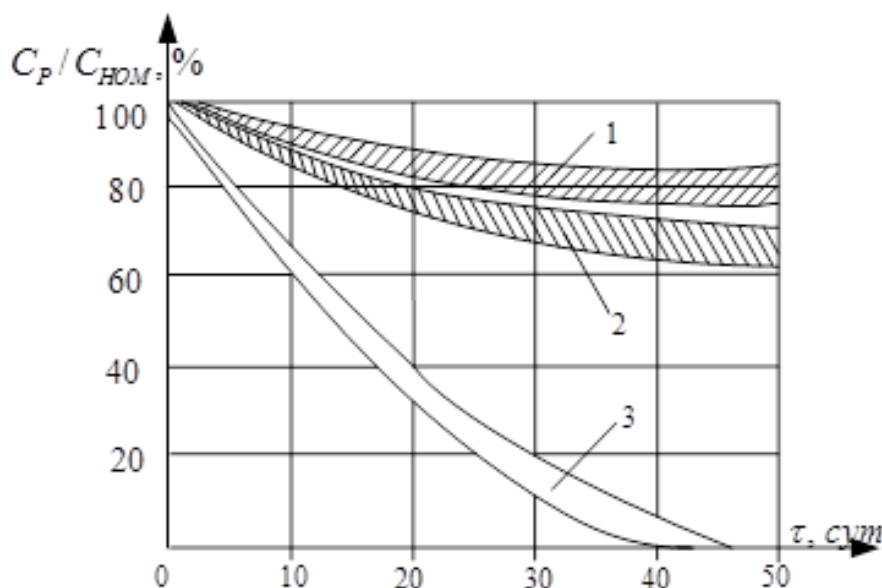


Рисунок 1.7 - Зависимость разрядной емкости Ni-MH аккумулятора от времени хранения при разных температурах:  
1-0°C; 2-20°C; 3-40°C

### Литий-ионные аккумуляторные батареи.

Li-Ion АБ обладают достаточно низкой скоростью саморазряда, порядка 10% от номинальной емкости в месяц и при этом требуют строгого следования правилам эксплуатации и техники безопасности. Li-Ion АБ наилучшим образом подходят для приложений, которым потребна высокая емкость батарей и вместе с тем предъявляются строгие требования к их весу. Обладают хорошими нагрузочными характеристиками и нетребовательны к обслуживанию. Отсутствует «эффект памяти». Выпускают аккумуляторные батареи, состоящие из одного элемента, т.к. на один элемент Li-Ion АБ имеет напряжение в 3,7 В.





Недостатки Li-Ion аккумуляторных батарей:

- Требуется применения схем защиты, которые ограничивают пиковое напряжение на каждом элементе в процессе заряда и предупреждают падение напряжения ниже допустимого значения при разряде.
- Для них свойственно старение вне зависимости от того, использовалась батарея или нет, емкость снижается уже через год.

#### Электрические характеристики

Типичный вид разрядных характеристик Li-Ion аккумуляторов представлен на рисунках 1.8 и 1.9. Из рисунков заметно, что с увеличением тока разряда разрядная емкость аккумулятора незначительно уменьшается и снижается рабочее напряжение. При разряде, если температура ниже 10 °С, возникает такой же эффект. Наряду с этим, при малых температурах, происходит начальная просадка напряжения.

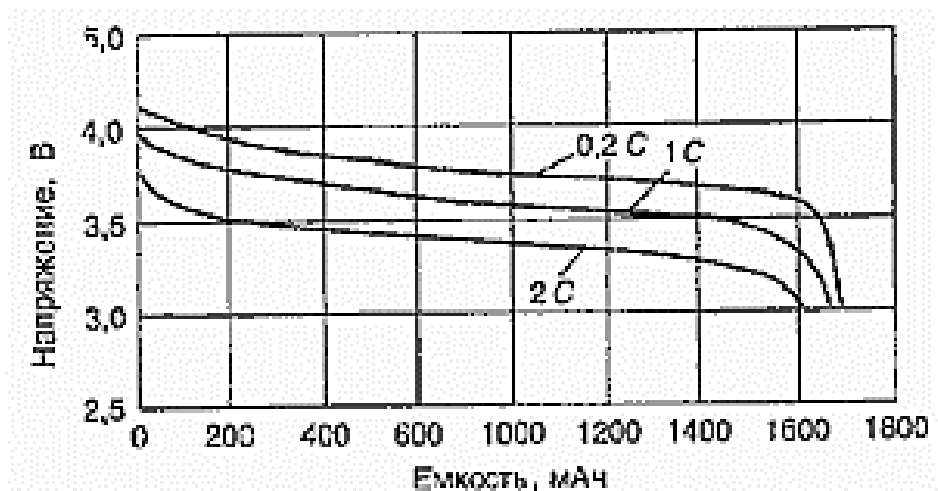


Рисунок 1.8 - Разрядные характеристики Li-Ion аккумулятора при различных токах

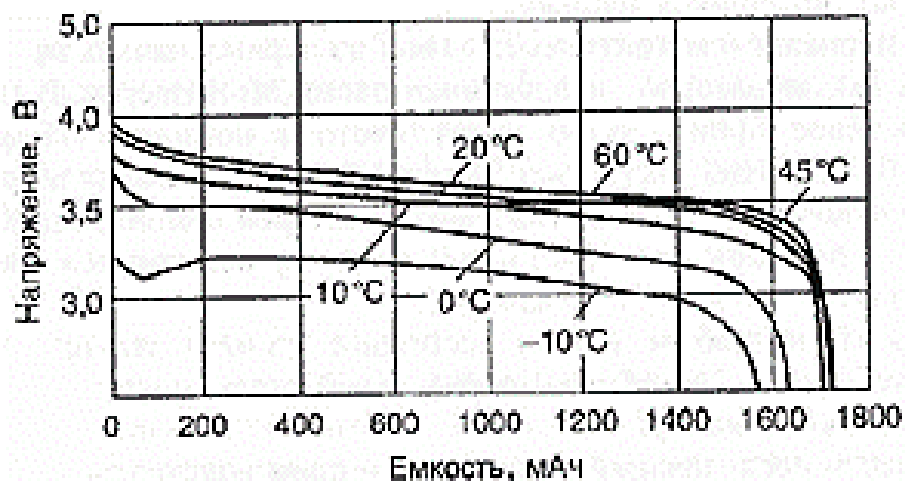
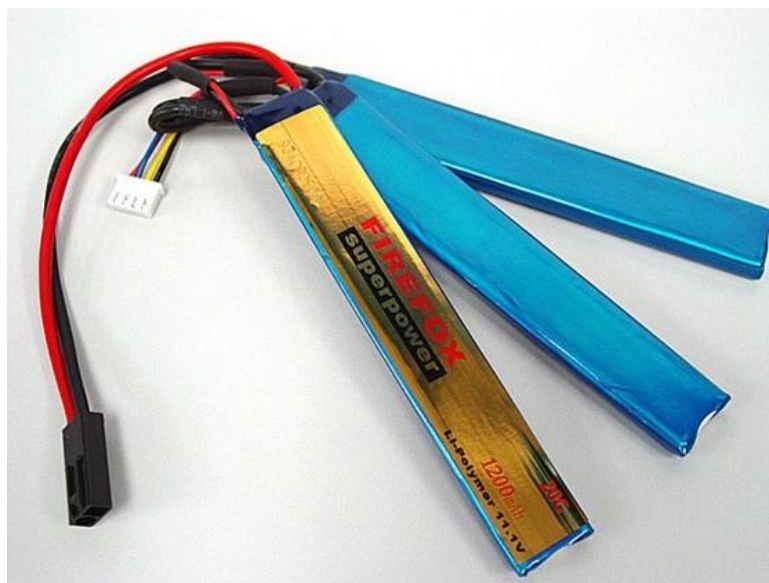


Рисунок 1.9 - Разрядные характеристики Li-Ion аккумулятора при различной температуре

### Литий-полимерные аккумуляторные батареи

Представляют собой более недорогой вариант литий-ионных батарей и обладают высокой энергетической плотностью (100÷130) Вт·ч/кг. Также они, как и литий-ионные АБ, обладают низкой скоростью саморазряда, порядка 10% от номинальной емкости в месяц. Отличаются от литий-ионных АБ тем, что они используют твердый сухой электролит из полимера, не проводящий электрический ток, но пропускающий через себя ионы. Данные АБ проще в

производстве, безопасны и имеют удобную тонкопрофильную геометрию.



Недостатком литий-полимерных батарей является слишком высокое внутреннее сопротивление и оно не позволяет обеспечивать высокие токи.

#### Свинцово-кислотные аккумуляторные батареи

Современные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи имеют высокие удельные энергетические характеристики (до 40 Втч/кг и 100 Втч/л). В состоянии постоянной подзарядки и редком глубоком разряде (буферный режим) при нормальной температуре работоспособны в течение длительного периода (более 10 лет). При полном разряде и заряде (циклический режим) позволяют проводить несколько сотен циклов до потери емкости на 20%. Данные АБ могут работать при температуре от -30 до +50 °С. Так же могут работать при температуре не ниже -15 °С.



### Электрические характеристики

Напряжение разомкнутой цепи повышается линейно с ростом степени заряженности аккумулятора (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 - Зависимость напряжения разомкнутой цепи от степени заряженности

Емкость, приобретенная при разряде в течение 20 часов током  $0,05C$ , считается номинальной. Емкость, отдаваемая аккумулятором, зависит от тока разряда. Типичные разрядные характеристики при различных токах нагрузки показаны на рисунке 1.11.

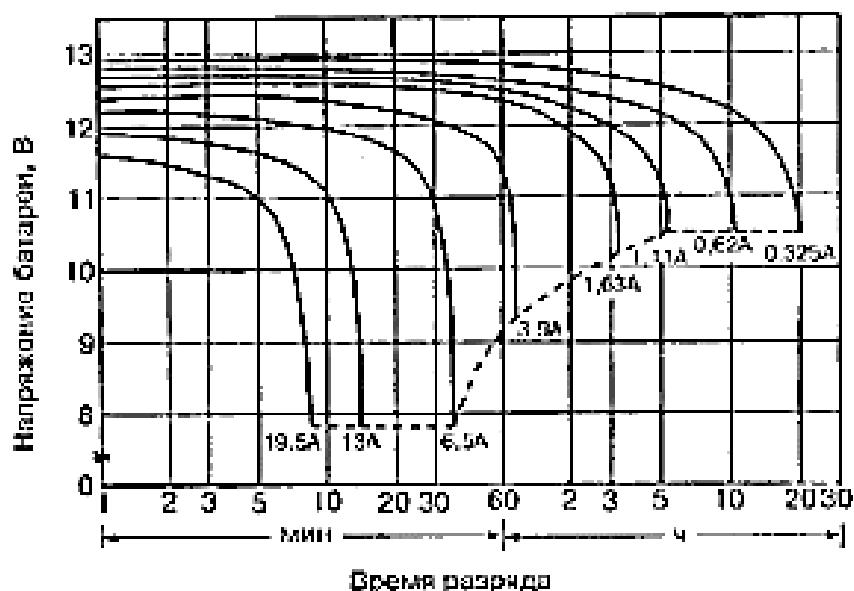


Рисунок 1.11 - Разрядные характеристики герметизированной свинцово-кислотной аккумуляторной батареи

## 1.2 Сравнение основных типов АБ

В таблице 1.1 показаны сравнительные характеристики основных аккумуляторных батарей, рассмотренных в пункте 1.1., с указанием усредненных параметров [2].

Таблица 1.1 — Сравнительные характеристики АБ

Параметр	Свинцово-кислотные	Ni-Cad	Ni-MH	Li-Ion
Удельная плотность энергии, Вт·ч/кг	30-50	45-80	60-120	90-120
Внутреннее сопротивление <sup>1</sup> , Ом	< 100 аккумуляторный блок 12В	100-200 аккумуляторный блок 12В	200-300 аккумуляторный блок 12В	25-50 <sup>2</sup> аккумуляторный блок 12В
Цикл <sup>4</sup>	200-300	1000 <sup>3</sup>	300-500 <sup>3</sup>	1000-2000
Время быстрой зарядки	8-16 ч.	1 ч.	2-4 ч.	1ч.

Продолжение таблицы 1.1

Терпимость к перезарядке	высокая	средняя	низкая	низкая
саморазряд	5%	20% <sup>5</sup>	30% <sup>5</sup>	10% <sup>5</sup>
Номинальное напряжение	2В	1,2 В <sup>7</sup>	1,2 В <sup>7</sup>	3,3 В
Напряжение отсечки при зарядке	Около 2,4 и 2,25			3,6
Напряжение отсечки при разрядке	1,75	1,00		2,8
Пиковый ток нагрузки	5С <sup>9</sup> (0,2С)	20С(1С)	5С (0,5С)	>30С(< 10С )
Температура зарядки	От -20°С до 50°С	От 0°С до 45°С		От -0°С до 45°С
Температура разрядки	От -20°С до 50°С	От -20°С до 65°С		От -20°С до 60°С
Требования к обслуживанию	3-6 <sup>11</sup> месяцев (подзарядка)	30-60 дней (разрядка)	60-90 дней (разрядка)	Не требуется
Требования к безопасности	Термически стабильны	Термически стабильны, обычно используются термопредохранители		Обязательн о защитный контур <sup>12</sup>
Используются с	Конца 1800-х	1950	1990	1999

Надстрочные знаки означают:

<sup>1</sup> - Внутреннее сопротивление АБ зависит от величины миллиампер-часов (мАч), проводки и количества элементов.

<sup>2</sup> -Типоразмер элемента. Он определяет внутреннее сопротивление.

<sup>3</sup> - Жизненный цикл АБ, проходящих регулярное техническое обслуживание.

- <sup>4</sup> - Жизненный цикл АБ зависит от величины разряда, чем меньше величина разряда, тем больше срок службы.
- <sup>5</sup> - Наибольшая скорость саморазряда (после заряда).
- <sup>6</sup> - Защитный контур, который потребляет 3% от запасенной энергии в месяц.
- <sup>7</sup> - Чаще используется номинальное напряжение 1,25; 1,2 В.
- <sup>8</sup> - Низкое внутреннее сопротивление уменьшает падение напряжения под нагрузкой и литий-ионные аккумуляторы часто имеют маркировку с большим значением, чем 3,6В/элемент. Элементы с маркировкой 3,7В и 3,8В полностью совместимы с 3,6В.
- <sup>9</sup> - Способен выдерживать большой импульс тока нагрузки, но нужно время для восстановления.
- <sup>10</sup> – Не рекомендовано заряжать литий-ионные аккумуляторы регулярно при температуре ниже нуля.
- <sup>11</sup> – Необходимо техническое обслуживание для предотвращения сульфатации,
- <sup>12</sup> - Для большинства литий-ионных АБ отсечка происходит, если напряжение меньше чем 2,20В и больше чем 4,30В.

На основании таблицы 1, анализа достоинств и недостатков аккумуляторных батарей и изучения электрических характеристик для исследования выбраны никель-металлгидридные аккумуляторные батареи.

### **1.3 Диагностические параметры АБ**

Для оперативной диагностики аккумуляторных батарей нужно решить следующие проблемы:

- поиск параметров, позволяющих дать точную оценку состояния аккумуляторных батарей;
- для исследуемых батарей получить численное значение параметров;
- исследование существующей или разработка новой аппаратуры для диагностики параметров.

В настоящее время для диагностики используют следующие электрические характеристики аккумуляторных батарей: напряжение разомкнутой цепи, напряжение под нагрузкой и внутреннее сопротивление. Но при диагностике разных типов АБ результаты оказываются различными[4].

#### *Напряжение разомкнутой цепи*

Напряжение разомкнутой цепи – напряжение между выводами аккумуляторной батареи при разомкнутой внешней цепи [5].

Попытки применения напряжения разомкнутой цепи как диагностического параметра использовались в качестве оценки состояния первичных источников тока. Данный параметр незначительно зависит от степени заряженности АБ.

При изменении заряда АБ от 100% до 10% напряжение разомкнутой цепи можно считать равным как для новых аккумуляторных батарей. И это применимо для всех ХИТ.

Затруднения возникают и при оценивании степени заряженности щелочных АБ по напряжению разомкнутой цепи. Трудности возникают из-за того, что НРЦ зависит от многих факторов, которые одинаково влияют на щелочные аккумуляторы.

На рисунке 1.12 показана зависимость напряжения разомкнутой цепи от остаточной емкости для свинцово-кислотных АБ. При их разряде такие факторы как концентрация и электропроводность электролита, которые влияют на значение напряжения разомкнутой цепи, подвергаются изменению линейно и существенно.



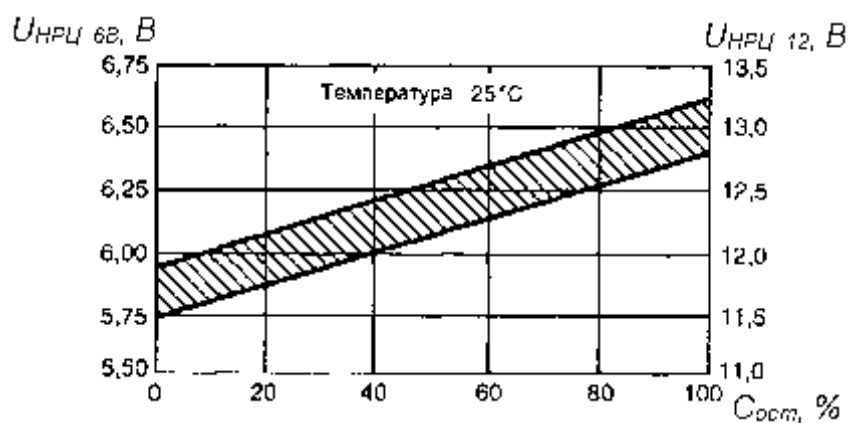


Рисунок 1.12 - Зависимость  $U_{НРЦ}$  от значения остаточной емкости  $C_{ост}$  для свинцово-кислотных аккумуляторов

Для аккумуляторных батарей разных производителей данная зависимость отличаются незначительно, но при этом точность оценки мала.

#### *Напряжение под нагрузкой*

Напряжение под нагрузкой используется когда напряжение разомкнутой цепи не позволяет в полной мере дать оценку состоянию аккумуляторной батареи. Считается, что значение напряжения на выводах батареи является более информативным. Для разных типов аккумуляторных батарей выбирается определенный диапазон значений рабочего напряжения  $U_{раб}$ , который соответствует состоянию АБ в номинальном режиме при его разряде. При разработке и отработке технологии источника тока имеется проблема с обеспечением стабильности рабочего напряжения. Также этот параметр имеет ограниченные возможности для оценивания степени заряженности источника тока [5].

Значение параметра рабочего напряжения зависит от эксплуатации аккумуляторной батареи и от его индивидуальных особенностей, имеет зону низкой чувствительности. Определение величины остаточной емкости по значению рабочего напряжения достаточно затруднительное. Данный параметр позволяет отличить разряженную батарею от батареи, которая сохраняет некоторую энергию.

Если увеличивать ток нагрузки можно оценить индивидуальные особенности источника тока. Для этого за диагностический параметр принимают отклик аккумуляторной батареи на пиковую нагрузку, при этом пиковая нагрузка должна быть по возможности кратковременной .

### *Внутреннее сопротивление*

Внутреннее сопротивление по большому счету является одним из основных характеристик аккумуляторной батареи и определяет производительность батареи. Полное внутреннее сопротивление аккумулятора - это сопротивление, оказываемое прохождению через аккумулятор постоянного разрядного или зарядного тока и состоит из двух составляющих: омического сопротивления и сопротивления поляризации.

Если разряжать аккумулятор постоянным током и после анализировать характеристики напряжения, то можно определить составляющие полного сопротивления: омическое сопротивление и сопротивление поляризации. (Рисунок 1.13)

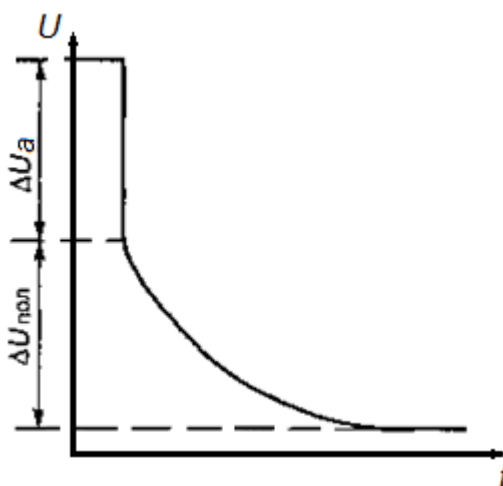


Рисунок 1.13 – Зависимость напряжения  $U$  от времени  $t$  при разряде постоянным током.

Из рисунка видно, что на участке кривой  $\Delta U_a$  при омическом сопротивлении происходит мгновенное падение напряжения. Изменение

сопротивления поляризации приводит к плавному изменению напряжения (участок  $\Delta U_{\text{пол}}$ ).

#### 1.4 Основные эксплуатационные характеристики АБ

Аккумулятор характеризуется основными эксплуатационными параметрами, такими как: электрической емкостью, внутренним сопротивлением, напряжением, током саморазряда и сроком службы. Немаловажными характеристиками можно назвать удельную энергию по массе, ЭДС батареи, степень заряженности, скорости заряда и саморазряда, температура, число циклов заряд/разряд. [6,7,8]

Емкость аккумулятора определяется количеством электричества, которое может отдать батарея при непрерывном разряде с постоянной силой тока.

Емкость АБ характеризуется конструктивными параметрами и эксплуатационными факторами. К первым можно отнести: толщину и пористостью материала электродов и т.д.

Эксплуатационными факторами являются: степень заряженности аккумуляторной батареи и режимом разряда, плотность заливаемого и температурой. Ёмкость выражается в ампер-часах ( $A \cdot ч$ ). Время, в течении которого аккумулятор работоспособен при силе тока 1 А - количество ампер-часов. Производители указывают номинальную ёмкость либо на аккумуляторе, либо на упаковке. Но реальная ёмкость часто не совпадает с номинальной (находится в пределах от 80% до 110% от указанной).

Отношение ёмкости аккумуляторной батареи к массе или к габаритам называется удельной ёмкостью.

При эксплуатации возникает потеря ёмкости аккумуляторной батареи и называется эффектом памяти. Эффект памяти выражается когда приспособливается к рабочему циклу, по которому батарея работала определенный период времени. Если часто заряжать аккумулятор, но при

этом он не полностью разряжен, аккумулятор «запоминает» неразряженное состояние и в последующие разы не может разрядиться полностью и поэтому ёмкость уменьшается. Чем чаще проводить цикл заряда и разряда, то эффект памяти выражается четче. На рисунке 1.12 изображено действие эффекта памяти.

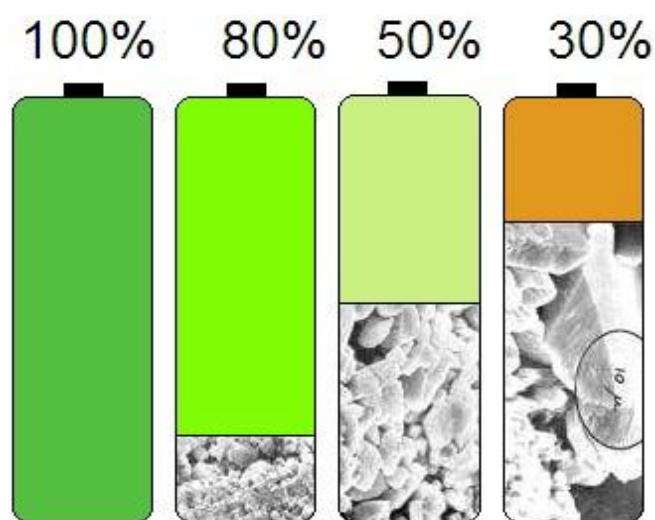


Рисунок 1.14 – Эффект памяти.

Саморазряд АБ является значимым свойством, которое необходимо учитывать для правильной эксплуатации и продления срока ее службы. Саморазряд АБ – это самопроизвольное уменьшение емкости аккумуляторной батареи при отсоединенных от нее потребителях, т. е. при бездействии. Для количественной оценки саморазряда используется величина потерянной аккумулятором за определенное время энергии, выраженная в процентах от значения, полученного сразу после заряда. Саморазряд получается максимальным после зарядки в первые 24 и оценивается как за первые сутки, так и за первый месяц после заряда. Если саморазряд АБ не превышает 1% в сутки, то подобный саморазряд называют естественным. А при значении саморазряда более 1% в сутки, он считается ускоренным, что указывает о неисправности батареи. На скорость саморазряда оказывает воздействие температура и плотность электролита,

отсутствие примесей в электролите и доливаемой в него воде, внешней загрязненности аккумуляторной батареи и срок ее эксплуатации.

Степень заряженности аккумуляторной батареи влияет на плотность электролита. При заряде АБ плотность электролита увеличивается и повышается емкость батареи, достигая наибольших значений при полном ее заряде.

Режим разряда батареи обладает силой разрядного тока и прерывностью. Из-за этого разрядный ток обратно пропорционален емкости аккумуляторной батареи. При прерывистых разрядах отдаваемая емкость выше, чем при непрерывном разряде. Это учитывается при высокой величине разрядного тока, т.е. при стартерном режиме разряда.

Важнейшими техническими свойствами АБ являются ЭДС и напряжение.

ЭДС АБ заключается в разности потенциалов на ее полюсных выводах (данные учитываются без нагрузки). По этой характеристике можно оценить состояние батареи и необходимость подзаряда.

Напряжение АБ заключается в разности потенциалов между ее полюсными выводами, только при наличии тока во внешней цепи в процессе заряда или разряда. Значение напряжения используется при анализе пусковых качеств батареи.

### **1.5 Обзор основных подходов к моделированию АБ**

В процессе разработки новой или модернизации имеющейся технической системы находится решение задачи расчета параметров и изучения процессов в этой системе. Методы оперативной оценки состояния АБ основываются на характеристиках, полученных косвенно, в результате анализа параметров. При вариации расчетов реальную систему представляют в виде математической модели [9,10,11].

Цель математического моделирования - это анализ реальных процессов (в природе или технике) математическими методами.

Для исследования систем математическое моделирование разделяют на: имитационное, аналитическое и комбинированное.

Математическая модель должна представлять собой упрощенное описание реального объекта. Также она должна обеспечивать соответственное отображение свойств объекта, которые подлежат исследованию.

Разработка математической модели может проводиться тремя способами:

1. Описание макрокинетики электрохимических процессов.

Электрохимические процессы (нестационарные процессы) протекают на отдельных электродах аккумуляторной батареи. Для описания необходимо учитывать влияние всех факторов: зависимость теплопроводности от степени заряженности, зависимость тока обмена от температуры и др. При игнорировании того или иного фактора полученные математические модели могут отличаться от реальных характеристик.

2. Описание экспериментальных данных. Такой метод, как описание экспериментальных данных, является наиболее верным для решения задач. Использование результатов практического исследования позволяет избежать неверного аналитического описания характеристик. Но по сравнению с другими способами разработки математической модели данный метод имеет узкую область применения модели.

3. Описание АБ при помощи схем замещения. Для каждой системы, электрохимической или физической, можно составить эквивалентную схему замещения и описать подобающими математическим уравнениям. Для составления схемы замещения нужно соединить определенным образом активные и реактивные элементы

(сопротивления, индуктивности, емкости). Выбранные активные и реактивные элементы показывают тот или иной физико-химический параметр или конструктивный элемент исследуемой системы. Представленное решение полагают наиболее удобным для математического моделирования и упрощает решение задачи.

### 1.6 Обобщенная структура математических моделей АБ

Для разработки любой математической модели аккумуляторной батареи за основу берется схема обобщенной структуры, показанная на рисунке 1.15.

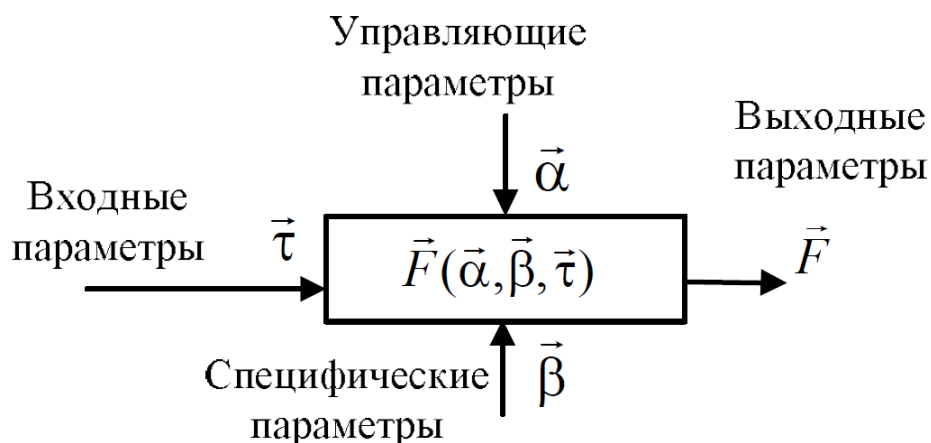


Рисунок 1.15 – Схема обобщенной структуры математической модели

Обобщенная модель аккумуляторных батарей имеет следующий вид:

- Характеристика аккумулятора:  $\vec{F} = \vec{F}(\vec{\alpha}, \vec{\beta}, \vec{\tau})$
- Вектор входных параметров:  $\vec{\tau} \in [\vec{\tau}_{min}, \vec{\tau}_{max}]$
- Вектор управляющих параметров:  $\vec{\alpha} \in [\vec{\alpha}_{min}, \vec{\alpha}_{max}]$
- Вектор специфических параметров:  $\vec{\beta} = \vec{\beta}(\vec{\tau})$ ,

где  $\vec{F}$  – вектор, содержащий характеристики аккумуляторных батарей, изменяющиеся при изменении входных параметров  $\vec{\tau}$ . Вектор параметров  $\vec{\alpha}$

описывает режимы работы батарей. Вектор параметров  $\vec{\beta}$  описывает особенности конкретных батарей.

Вектор  $\vec{\tau}$  – это входные параметры, такие как: время, число циклов заряда и разряда и др. При моделировании разрядной характеристики аккумуляторной батареи ее входным параметром используется время.

Потому как напряжение (напряжение разомкнутой цепи, минимальное напряжения цикла и др.) определяет качество питания нагрузки, то в большинстве случаев именно оно является выходным параметром математической модели.

Под вектором специфических параметров понимаются параметры, характеризующие окружающую среду и характеристики начального состояния АБ. К ним относятся:  $P$  - давление среды,  $\mu$  - относительная влажность воздуха,  $U_0$  – начальное напряжение АБ,  $R_0$  - начальное внутреннее сопротивление АБ,  $C_0$  - начальная заряженность АБ,  $Q_0$  - начальная емкость аккумулятора. Данными параметрами управление не ведется. Пример представлен ниже:

$$\vec{\beta} = \vec{\beta}(P, \mu, U_0, R_0, C_0, Q_0)$$

Для вектора специфических параметров можно записать другой вид уравнения, при необходимости учитывая дополнительные неконтролируемые факторы. Параметры, не поддающиеся управлению, являются функцией входных параметров, в частом случае времени, потому как меняются с изменением значений входных параметров.

Для описания режимов работы АБ используется вектор управляющих параметров, таких как: величина зарядно-разрядных токов  $I$ , температуре  $T$ , предельных значений напряжений  $U_{\min}$  и  $U_{\max}$ , максимальную продолжительность работы АБ  $\tau_{\max}$  и др.:

$$\vec{\alpha} = (T, I, U_{\min}, U_{\max}, \tau_{\max})$$



Управляющие параметры можно задавать константами или как функции, зависящие от входных параметров.

### 1.7 Определение входных и выходных параметров ММ.

При работе в режиме цикла заряда и разряда в период разряда аккумуляторная батарея, согласно заданным значениям по току и напряжению, должна обеспечивать питание нагрузки в течение заданного времени [8,11]. Аккумуляторную батарею можно подключить напрямую к нагрузке или с помощью устройства кондиционирования параметров. Устройствами кондиционирования параметров являются: стабилизаторы напряжения, тока, мощности и т.п. При любом подключении на выходе аккумуляторной батареи имеется некоторое минимальное напряжение  $U_{\min}$ . При таком минимальном напряжении нагрузка или другие устройства не выполняют свои функции. Также для питания нагрузки значимым параметром является продолжительность работы  $\tau_p$  и возможность аккумулятора обеспечить, при токе  $I$ , продолжительность его работы (см. рисунок 1.16).

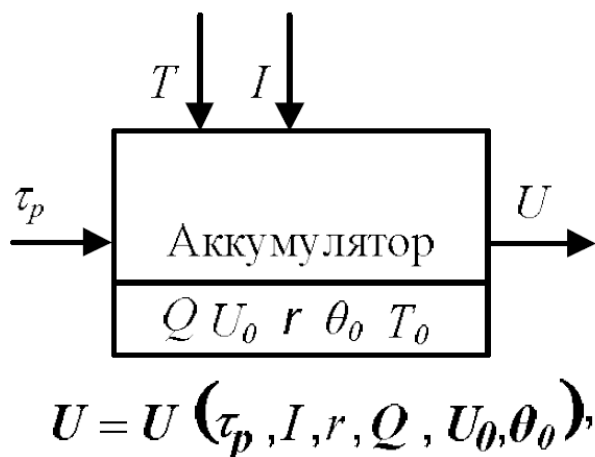


Рисунок 1.16 – Схема структуры математической модели в разрядном режиме

Разрядная емкость  $Q_p$  – это комплексный параметр, характеризующий способность аккумуляторной батареи обеспечить током  $I$  питание нагрузки со временем  $\tau$ :

$$Q_p = \int_0^{\tau_p} I(\tau) \cdot d\tau$$

Разрядная характеристика – это связь между разрядным напряжением АБ и продолжительностью разряда, а следовательно и разрядной емкости.

Из вышесказанного следует что: выходным параметром математической модели аккумуляторной батареи является разрядное напряжение, а входной параметр – это время разряда.

## 1.8 Математические модели аккумуляторных батарей

Построение простых моделей основывается на исследовании протекаемых процессов в проводниках. В таких моделях пренебрегают термодинамическими и квантовыми эффектами. Данные модели могут показать аккумулялированные батареи, но при этом не учитывается процесс изменения напряжения под нагрузкой.

В данной работе рассматриваются 4 метода построения математической модели: на уравнении Пеукерта, на уравнении Шепарда с модификациями, модель Анневера, метод переменных состояния.

### Модель по уравнению Пеукерта

Данное уравнение указывает на зависимость тока разряда батареи и времени разряда «постоянного тока». При увеличении времени разряда постоянного тока, уменьшается ток разряда батареи. [15]

Уравнение имеет вид:

$$I^N \cdot T_i = const ,$$

где  $I$  – разрядный ток (А);

$N$  – постоянная батареи (для обычных кислотных АБ  $N= 53.1$ );

$T_i$  – время разряда при токе  $I$  (с).

При необходимости выявления связи тока с различными скоростями разряда уравнение Пеукерта примет вид:

где  $C$  – скорость разряда, цифры 1 и 2 определяют состояния скорости разряда.

Из данного уравнения можно определить уровень заряда (SOC) при постоянной скорости разряда:

$$SOC = 1 - \frac{I \cdot t}{C}$$

При постоянно изменяющихся скоростях разряда в уравнении уровня заряда должны учитываться дискретные промежутки времени:

Для решения уравнения, предполагается, что должны быть известны электрический ток и скорость разряда ( $C_1$ ). При расчете скорости разряда используется его дискретный вид уравнения. В нем так же учитывается ток в текущем промежутке времени, а в комплексе это приводит к вышеупомянутому уравнению для  $\Delta SOC$ .

#### Модель по уравнению Шепарда и его модификации.

Модель Шепарда [16,17] самая распространенная при анализе моделей аккумуляторных батарей. Она основывается на описании электрохимических свойств батарей в терминах напряжения и тока и имеет вид:

$$E_i = E_0 - R_i \cdot I - K_i \cdot \frac{1}{1-f},$$

где  $E_i$  – напряжение АБ (В);

$E_0$  – напряжение разомкнутой цепи при заряженной батарее на 100% (В);

$R_i$  – внутреннее омическое сопротивление батареи (Ом);

$I$  – мгновенный ток АБ (А);

$K_i$  – сопротивление поляризации (Ом);

$Q$  – емкость АБ (А\*ч)

$$f = \int \frac{I dt}{Q_0} \text{ - отношение аккумулятированных ампер-часов к полной ёмкости}$$

АБ.

Для решения уравнения Шепарда часто используется дискретное значение уровня заряда, найденное по уравнению Пеукерта.

Существуют и модификации к модели Шепарда. Они строятся из дополнений для описания аспектов параметров батареи. Так модель Линдсторма подразумевает улучшенный расчет внутреннего сопротивления, а модель Вуда учитывает вторичные уравнения описания перезаряда и газовой генерации. [17]

### Универсальная модель Анневера

Модель Анневера [18] является упрощенной версией уравнения Шепарда, т.к. Шепард основывался на экстремальных состояниях глубины разряда при малых значениях силы тока. В таких случаях батареи в электрических машинах не используются. Таким образом уравнение Анневера принимает вид:

$$E_i = E_0 - R_i \cdot I - K_i \cdot f$$

При напряжении разомкнутой цепи, формула напряжения аккумуляторной батареи без нагрузки преобразуется в вид:

$$E_i = E_0 - K_i \cdot f$$

Тогда эквивалентная функция внутреннего сопротивления равна:

$$R = R_0 - K_R \cdot f ,$$

где  $R_0$  - внутреннее сопротивление заряженной батареи на 100% (Ом),

$K_R$  - экспериментальная константа.

Данное уравнение имитирует зависимость внутреннего сопротивления от уровня заряда. Объединяя уравнения внутреннего сопротивления с уравнениями мощности, выражение электрического тока в течении разряда примет вид:

$$I = \frac{E_{oc} - \sqrt{E_{oc}^2 - 4 \cdot R \cdot P}}{2 \cdot R}$$

И в течении заряда как:

$$I = \frac{-E_{oc} + \sqrt{E_{oc}^2 + 4 \cdot R \cdot P}}{2 \cdot R}$$

Тогда максимальная мощность,  $P_{max}$ , равна:

$$P_{max} = \frac{E_{oc}^2}{4 \cdot R}$$

### Метод переменных состояния

Согласно широко используемому методу переменных состояния, математическая модель состоит из уравнений состояния и выхода.

Уравнения состояния - это система дифференциальных уравнений, определяющая изменение во времени так называемых переменных состояния, (которые характеризуют текущее состояние системы) в зависимости от текущего значения этих переменных состояния и входных величин. Например, для модели АБ переменной состояния может являться степень заряда батареи, а входными величинами - выходной ток  $I_{вых}$  и температура  $T$ .

Уравнение выхода устанавливает зависимость между выходной величиной (в нашем случае это  $U_{\text{вых}}$  - напряжение на выводах АБ), переменными состояниями и входными величинами.

Для анализа батарей, например, с использованием программ математического моделирования электрических схем, удобно использовать схемы замещения АКБ, являющиеся, по сути, графическим отображением их математических моделей. Здесь  $U_{\text{хх}}$  - напряжение холостого хода, зависящее от заряженности АКБ.  $R_{\text{вн}}$  - внутренне сопротивление, зависящее, например, от заряженности АКБ и температуры (рисунок 1.17).

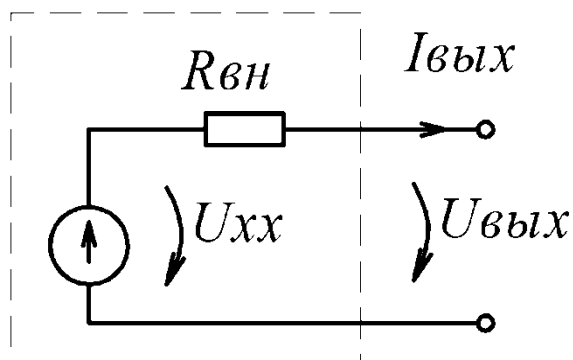


Рисунок 1.17 - Схема замещения АБ.

Последовательное соединение  $U_{\text{хх}}$  и  $R_{\text{вн}}$  соответствует уравнению выхода:

Параметры АКБ (например, емкость и внутренне сопротивление  $R_{\text{вн}}$ ) входят в состав математической модели в виде коэффициентов.

### 1.9 Эквивалентные схемы замещения моделей батарей

Эквивалентная схема замещения аккумуляторной батареи – графическое изображение совокупности ее активных и реактивных параметров. Встречается множество вариантов схем замещения моделей батарей. [17]

## Модель Клекнера

На рисунке 1.18 изображена эквивалентная схема разрядной модели Клекнера и модели Зиммерамана-Петерсона. Зарядная емкость батареи имеет вид конденсатора  $C$  и устанавливается последовательно нагрузке [19,20].

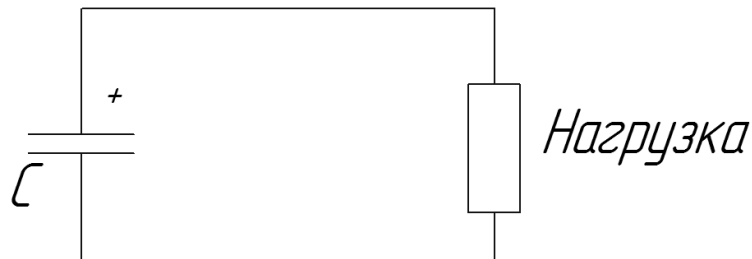


Рисунок 1.18- Разрядная модель Клекнера

Существует расширенная модель Клекнера. В ней конденсатор  $C$  подключается параллельно к последовательно соединенным внутреннему сопротивлению  $R$  и источнику напряжения  $E$  (рисунок 1.19). Такая схема служит для ограничения скорости заряда.

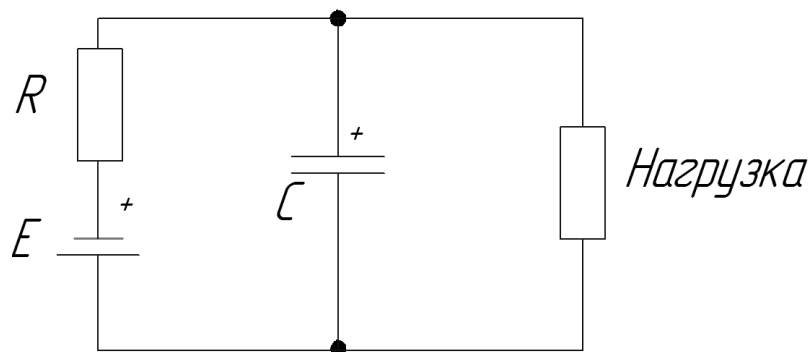


Рисунок 1.19 - Расширенная модель Клекнера

В расширенной модели Клекнера общий ток будет равен сумме электрического тока установившегося состояния и тока зарядной емкости батареи. Электрический ток зарядной емкости рассчитывается как произведение емкости и  $dU/dt$ . Напряжение батареи примет вид функции электрического тока в установившемся состоянии. Получить ее можно при табулировании взвешенных данных.

## Модель батареи Тевенина

Эквивалентная схема модели батареи Тевенина [21] состоит из 4-х составляющих. Источник напряжения  $E$  последовательно соединён внутренним сопротивлением  $R$ . К ним параллельно подключаются конденсатор  $C$  и резистор  $R_2$  (модель перенапряжения) (рисунок 1.20).

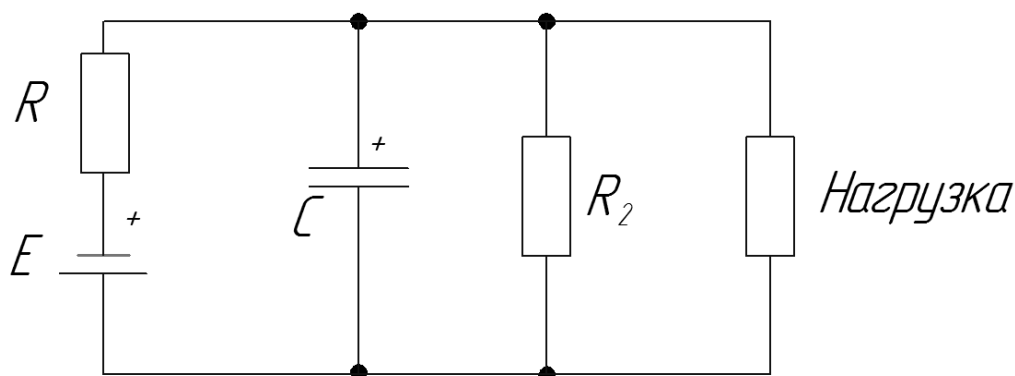


Рисунок 1.20- Модель Тевенина

Недостатком данной модели является не точность. В процессе изменения состояния батареи остальные элементы могут изменить значение.

## Линейная электрическая модель.

Линейная электрическая модель [20,21]- усложненная версия батареи Тевенина. Она состоит из цепи, состоящей из трех резисторов и трех конденсаторов, которые представляют в совокупности перезаряд. Через источник напряжения  $E$  и конденсатор  $C_4$  находится напряжение разомкнутой цепи. Резистор саморазряда подключается параллельно к остальным элементам (рисунок 1.21).



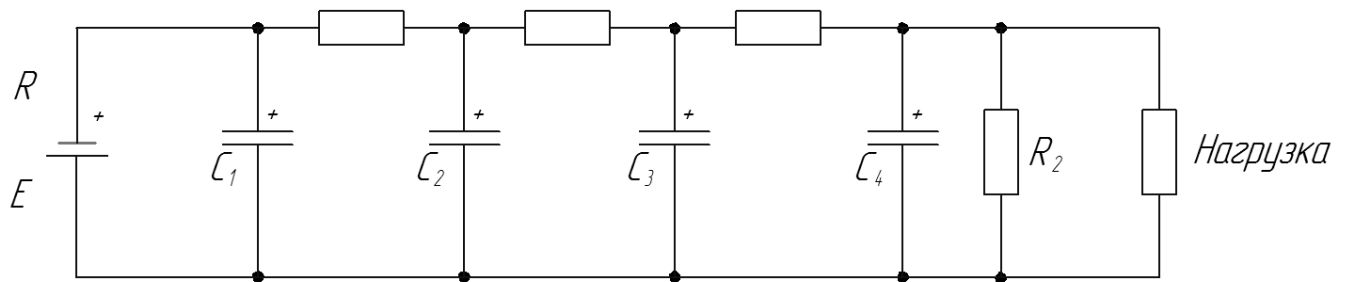


Рисунок 1.21 – Линейная электрическая модель батареи

Модель является более точной, чем модель Тевенина, но значения элементов так же зависят от изменения состояния батареи.

Линейную модель батареи можно представить в виде простого резистора соединённого последовательно с источником питания. Данное представление более не точное, т.к. внутреннее сопротивление учитывается при полном заряде батареи[22].

### Нелинейная электрическая модель

Данная модель представляет собой модернизацию линейной модели. Она состоит из емкости аккумулятора  $C_b$  к которому параллельно подключаются резистор  $R_p$ , имитирующий саморазряд. Напряжение разомкнутой цепи представляется напряжениями  $C_b$  и  $R_p$  (рисунок 1.22).

Цепь перенапряжения последовательно к емкости  $C_b$ . Она показана конденсатором  $C_1$  и параллельной цепью резистора  $R_1$ . Резистор  $R_1$  смоделирован двумя параллельными друг другу идеальными диодами, которые обладают разными значениями сопротивления перенапряжения во время заряда и разряда.

Внутреннее сопротивление  $R_1$  смоделировано двумя параллельными диодами, соединённые последовательно цепи перенапряжения и параллельно цепи емкости аккумулятора

Модель является нелинейной, если элементы  $C_b, R_s, R_p, R_1$  не постоянные, а показаны в виде функции напряжения. При этом резистор  $R_p$

саморазряда имеет дополнительный температурный коэффициент. Емкость  $C_1$  - постоянная величина

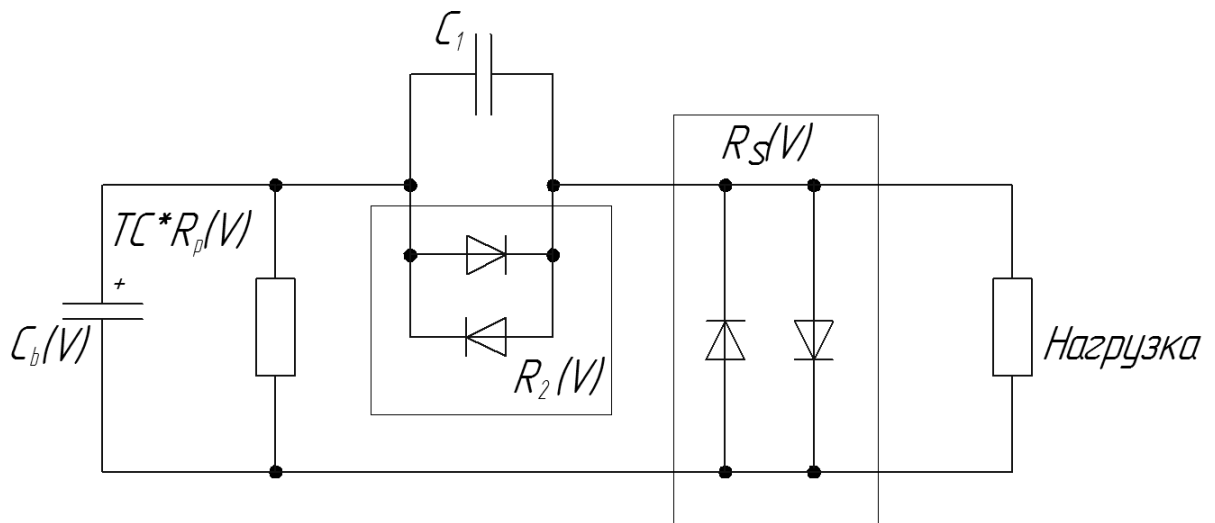


Рисунок 1.22- Нелинейная электрическая модель

Функции изменения сопротивления и емкости определяются экспериментальным методом. Функции параметров батареи следствие приведения характеристик к уравнению:

$$Element_{value} = K \cdot e^{W \cdot (V_m - V_{oc}) \cdot F},$$

где  $K$  - коэффициент усиления;

$W$  - коэффициент длительности импульса

$V_m$  - средний уровень напряжения (В)

$V_{oc}$  - напряжение разомкнутой цепи (В)

$F$  - коэффициент пологости

Температурозависимый коэффициент  $R_p$  смоделирован как:

$$T_C = \frac{R}{R_{ref}} \cdot \frac{T_{ref} - T}{T_{ref}},$$

где  $T_C$  - коэффициент температурной компенсации;

$R$  – сопротивление при температуре  $T$  (Ом);

$R_{ref}$  – сопротивление при опорной температуре (Ом).

### Разрядная дискретная модель батарей

Для разрядной дискретной модели батареи повышающийся зарядный режим показан в следующих формулах в терминах потребления электричества:

$$\Delta SOC = \left( \frac{P_{di}}{E_{di}} \right) \cdot \frac{\Delta t}{36000}$$

$$E_{di} = P_{di} \cdot T_{di}$$

Комбинируя первые два уравнения получаем:

$$\Delta SOC = \frac{\Delta t}{T_{di} \cdot 36000}$$

где  $P_{di}$  – разрядная дискретная плотность мощности;

$E_{di}$  – плотность энергии;

$T_{di}$  – время разряда.

При проведении экспериментального исследования путем разряда батареи при постоянной мощности выявляется зависимость плотности энергии и плотности мощности. Квадратное уравнение зависимости плотности выделения энергии в активной зоне и времени разряда  $T_{di}$  можно записать двумя способами:

$$P_{di} = e^{A \cdot \ln(T_{di})^2 + B \cdot \ln(T_{di}) + C}$$

$$T_{di} = e^{\left( 0.5 \cdot (-B/A + \sqrt{(B/A)^2 - 4(C - \ln(P_{di})) / A}) \right)}$$

где  $A, B, C$  зависимы от приведения измеренных данных,  $C$  – константа при постоянной температуре.

Для изображения изменения температуры электролита для кислотных батарей, Чепмен и Астон [30] предложили следующее уравнение:

$$C = C_k + \ln(1 + 0.012 \cdot (T_k - T))$$

где  $C_k$  – постоянная при температуре  $T_k$ .

#### Динамическая модель с сосредоточенными параметрами.

Данная модель основывается на статической модели [24]. Значение мгновенного напряжения батареи - статическая модель батареи описывает как функцию мгновенного тока заряда и тока разряда значение напряжения батареи. К динамической модели с сосредоточенными параметрами прибавляется явление поляризационной емкости и напряжение, измененное при переходном процессе. На основе вышесказанного показаны три уравнения данной модели:

$$R_{int} \cdot C_p \cdot \frac{dE_{pc}}{dt} = V_{oc} + \frac{R_{int}}{R_b} \cdot E_{tb} - \frac{(R_b + R_{int})}{R_b} \cdot E_{pc}$$

$$R_b \cdot C_i \cdot \frac{dE_{tb}}{dt} = E_{pc} + R_b \cdot I_{tb} - E_{tb}$$

$$E_{tb} = V_{oc} - \left( R_b + \frac{K}{SOC} \right) \cdot I_{tb}$$

Где  $R_{int}$  – внутреннее сопротивление (Ом);

SOC – уровень заряда батареи;

$C_p$  – поляризационная емкость(мкФ);

$E_{pc}$  – падение напряжения(В);

$V_{oc}$  – напряжение разомкнутой батареи (В);

$R_b$  – сопротивление на клеммах батареи (Ом);

$E_{tb}$  – напряжение полюсов батареи (В);

$C_i$  – начальная емкость (мкФ);

$I_{tb}$  – разрядный ток батареи (А);

$K$  – постоянная батареи .

Для кислотной батареи, в последнем уравнении, Пауэлл [68] провел изменения и вывел следующую зависимость:

$$V_{oc} = 338.8 \cdot (0.94246 + 0.05754 \cdot \text{SOC})$$

### **1.10 Альтернативные модели аккумуляторных батарей**

Моделируя отдельные режимы аккумуляторных батарей были созданы альтернативные модели аккумуляторных батарей: гидродинамическую модель и конечно-элементную модель.

#### Гидродинамическая модель.

Данная модель применяет аналогию заряда и разряда при гидродинамическом наполнении батареи и при опустошении двойного бака[25]. Данные баки обладают неравными размерами. Вход и выход наибольшего бака размещен в меньшем из баков. Из-за разного уровня – жидкость может перетекать между баками. Меньший бак опустеет быстрее, если между меньшим и большим баком поток меньше чем выходное потребление. Приведённый пример показывает неспособность батареи выполнять высокий уровень потребления мощности. При перезаряде аккумуляторной батареи объем жидкости в меньшем баке установит давление на входе и скорость зарядки батареи.

#### Конечно-элементная модель.

Для моделирования аккумуляторных батарей разработаны конечно-элементные и конечные химические модели. Отдельные разделяют ячейку на большое количество конечных элементов, а другие применяют ячейку батареи как отдельный элемент. Физико-химические модели, как правило,

имитируют ток и расположение электрического потенциала в ячейке. Разнообразные перемещения, такие как диффузия, миграция и адвекция, обусловлены разными параметрами, такими как плотность потока электролита, выработка газа при перезаряде и пассивностью поверхности электродов. Данное моделирование очень трудоемко и сложно [28,29].

### 1.11 Статические модели аккумуляторных батарей.

Для предсказания рабочих параметров аккумуляторных батарей в обширном диапазоне состояний можно применять таблицы рабочих характеристик АБ. Далее будут рассмотрены методы применения таблиц для предсказания параметров АБ.

Использование зависимости уровня заряда батареи от напряжения разомкнутой цепи, уровня заряда батареи от внутреннего сопротивления применяются в Льюисовском центре. Некоторые исследователи отмечают различия между зависимостями: уровня заряда от характеристик сопротивления для заряда и отдельно для разряды [33]. Данный метод заключается в оценивании напряжения в конце текущего шага ( $V_1$ ), основанном на напряжении начального шага ( $V_0$ ). Таким же способом оценивается внутреннее сопротивление.

$$V_{avg} = 0.5 \cdot (V_0 + V_1)$$

$$R_{avg} = 0.5 \cdot (R_0 + R_1)$$

$$I \cdot R = \left( \frac{V_{avg}}{2} \right) \cdot 2 - \frac{R_{bat}}{R_{avg}}$$

$$I_{avg} = \frac{V_{avg}}{R_{avg}} - \sqrt{I \cdot R}, \text{ при } I \cdot R > 0$$

Для электрического тока значение  $V_{avg}$  можно рассчитать как:

$$V_{avg_{new}} = V_{avg} - I_{avg} * R_{avg}$$

$$SOC_1 = SOC_0 - P \cdot \frac{\Delta t}{3600 \cdot C \cdot V}$$

где  $\Delta t$  – шаг времени (сек);

C – ёмкость аккумуляторной батареи (А·ч).

Данный процесс может повторяться, с обновленными значениями  $V_{avg}$ , пока значение  $SOC_1$  не будет изменяться менее чем на 0.01%.

### **Вывод по 1 главе:**

Проведен аналитический обзор научно-технической литературы, затрагивающих аккумуляторные батареи их достоинства и недостатки и электрические характеристики. После анализа АБ для дальнейшего исследования были выбраны никель-металлгидридные аккумуляторные батареи. Они используются в бытовой электронной аппаратуре, работоспособны в любом положении и в интервале температур от -40 до +50 °С, герметичны, устойчивы к механическим нагрузкам, имеют высокие удельные характеристики и длительный срок службы и хранения, более экологически чистый из-за отказа от кадмия, в связи с этим легче решается проблема утилизации аккумуляторов и могут быть переработаны вторично.

Из обзора основных подходов к моделированию аккумуляторных батарей выбран метод описания данных, полученных в результате эксперимента. Он является наиболее верным для решения задач. Использование результатов практического исследования позволяет избежать неверного аналитического описания характеристик.

## Глава 2 Экспериментальное исследование

Определение состояния объекта, предмета или явления с помощью реализации экспериментального исследования называется диагностикой [34].

Экспериментальное исследование аккумуляторных батарей включает в себя измерение электрических и физических параметров АБ. Такими параметрами являются: напряжение на выводах аккумуляторной батареи, внутреннее сопротивление, максимальный ток, ток стартерного разряда, плотность электролита, длительность разряда или резервная емкость и прочее. А также включает в себя сопоставление значений измеренных параметров со значениями основных эксплуатационных характеристик.

Получается, что для оценки состояния аккумуляторных батарей нужно понимать и знать, как и что оказывает влияние на изменение того или иного параметра. Для получения я необходимых знаний нужно проводить исследования, охватывающие большое количество параметров аккумуляторных батарей и соответствующие им значения основных эксплуатационных характеристик.

### 2.1 Практическое определение параметров математической модели

В процессе исследования аккумуляторных батарей измерялись следующие параметры и характеристики аккумуляторных батарей за время разряда аккумуляторной батареи  $t$  (с):

1. Номинальная электрическая ёмкость, определяемая в стандартных условиях. В работе указана как  $I_s$  (мАч) – суммарный заряд, вытекший из АБ.
2. Выходным параметром является напряжение на нагрузке  $U$  (В).
3. Напряжение разомкнутой цепи  $U_{рц}$  (В). Для это на 2-3 с прекращали разряд и измеряли  $U_{рц}$ .

Кроме определения разрядных характеристик в исследовании была определена величина внутреннего сопротивления  $R_{вн}$ . Для его определения



было снято значение мгновенного тока  $I$  (мА) и значение внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи рассчитывалась по формуле:

Для проведения экспериментального исследования были выбраны аккумуляторы, используемые в легкой бытовой электронной аппаратуре – это никель-металлгидридные аккумуляторные батареи типа:

ВТУ 3000



Camelion 2100 mAh.



Испытательный стенд показан на рисунке 2.3. Структурная схема исследования аккумуляторных батарей изображена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Структурная схема

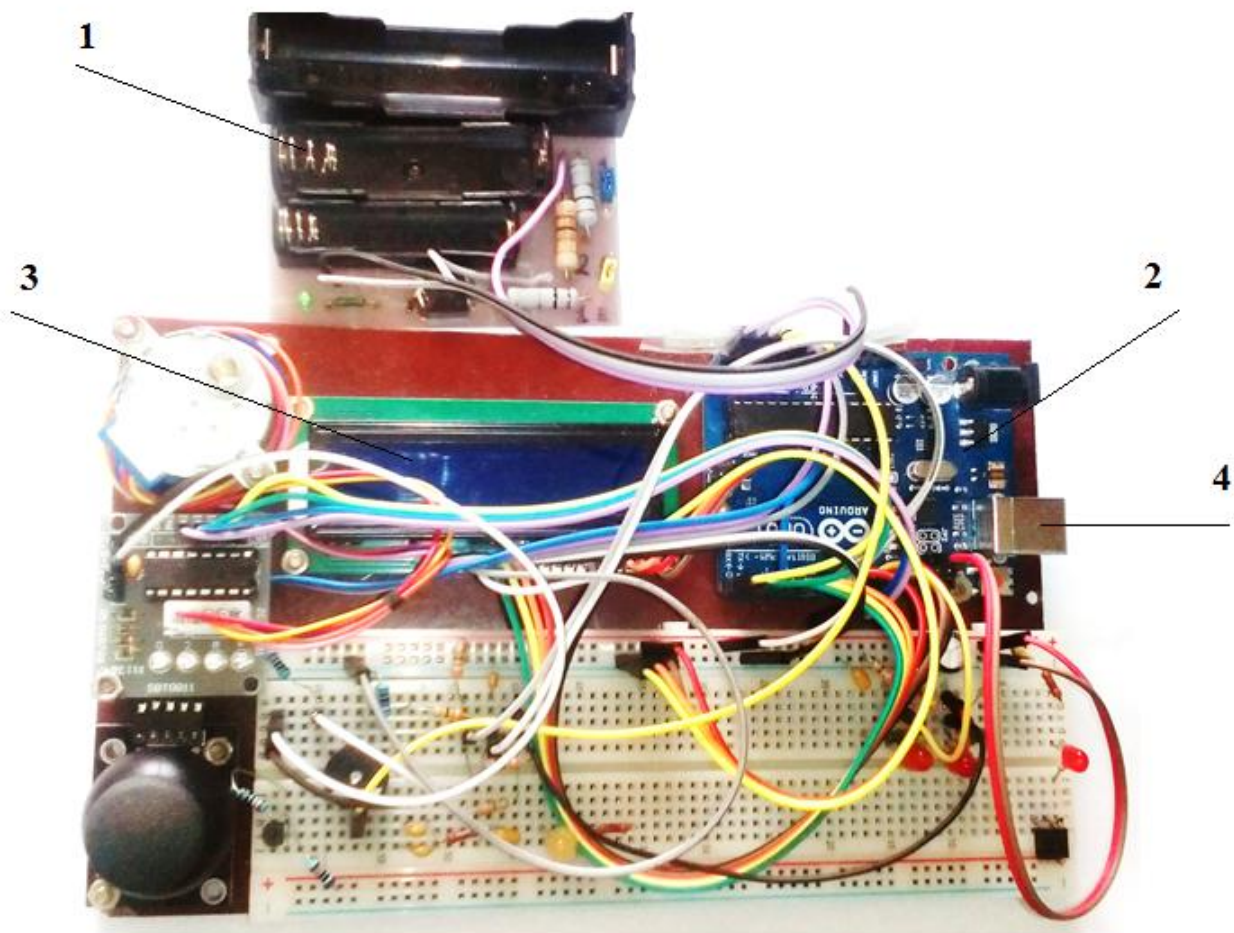


Рисунок 2.2 – Установка для исследования параметров аккумуляторных батарей

Где 1 – разрядный блок ;2 – аппаратная вычислительная платформа Arduino; 3 – ЖК дисплей; 4- USB порт, для подключения к компьютеру.

Схема исследования аккумуляторной батарей достаточно проста (рисунок 2.3)

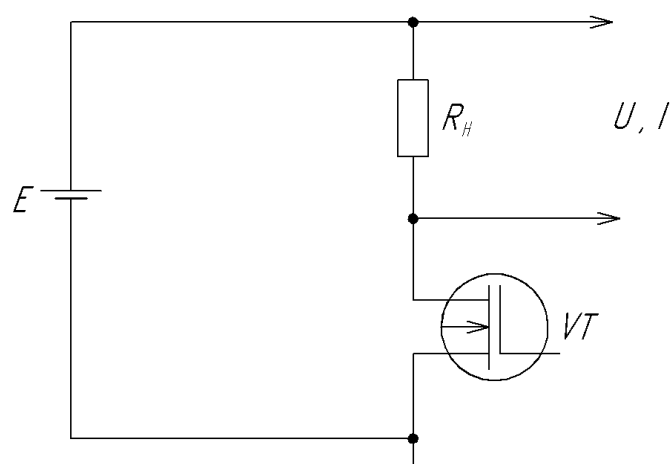


Рисунок 2.3 – Схема исследования АБ

Аккумуляторные батареи в процессе исследования разряжались на нагрузку  $R_H = 1 \text{ Ом}$ .

Результаты измерений показаны в табл. 2.1-2.3. На основании таблиц 2.1 -2.3 построены графики зависимости  $U(t)$ ,  $U_{\text{рц}}(t)$ ,  $R_{\text{вн}}(t)$ .

Таблица 2.1 – Результаты измерений АБ типа ВТУ 3000 (1)

t (сек)	U (В)	$I_s$ (мАч)	I (мА)	$U_{\text{рц}}$ (В)	$R_{\text{вн}}$ (Ом)
0	1,113	0,0	1102	1,233	0,109
60	0,988	16,8	978	1,190	0,206
120	0,958	32,9	949	1,182	0,236
180	0,932	48,5	923	1,173	0,261
240	0,907	63,7	898	1,164	0,287
300	0,877	78,4	868	1,156	0,322
360	0,842	92,6	834	1,139	0,356
420	0,799	106,2	791	1,126	0,413
480	0,761	119,1	753	1,113	0,468
540	0,718	131,4	710	1,096	0,532
600	0,675	142,9	668	1,079	0,605
660	0,610	153,6	604	1,053	0,733
671	0,597	155,4	591	1,053	0,733

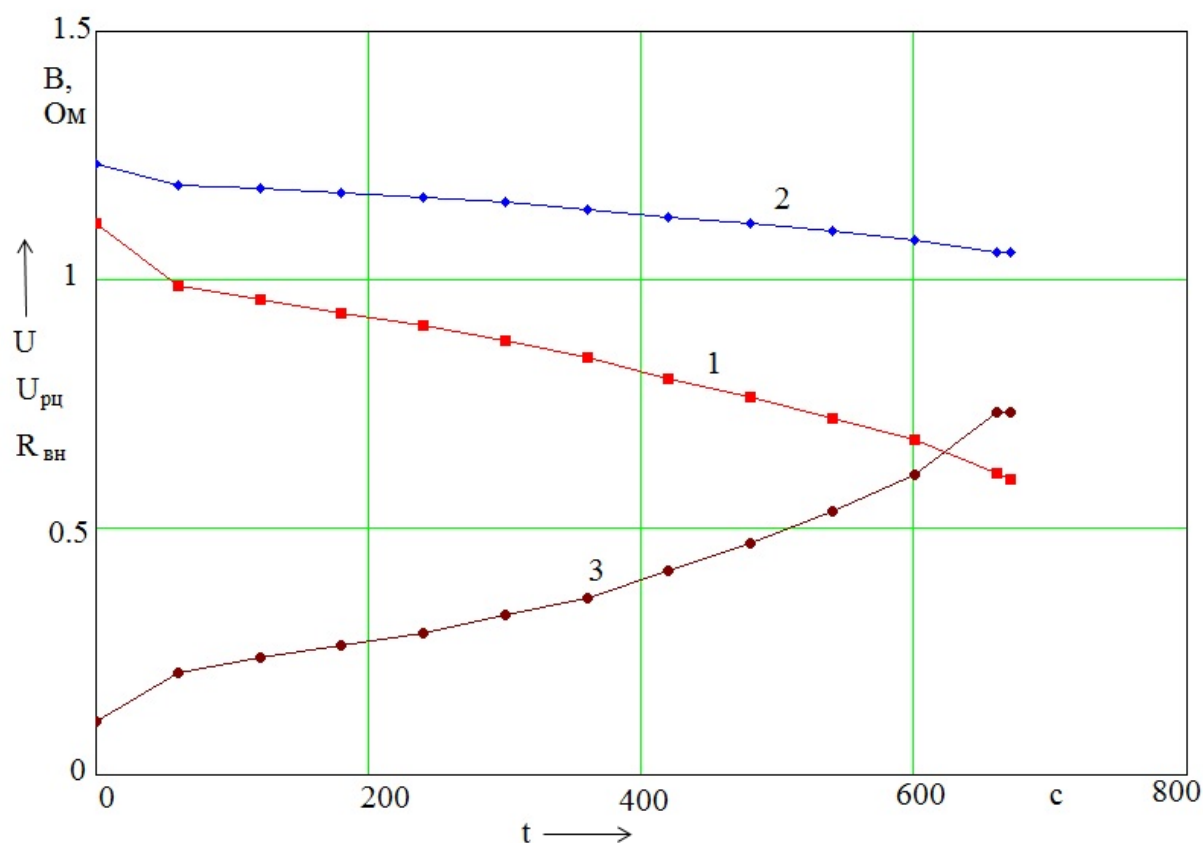


Рисунок 2.4 – Графики зависимости: 1- напряжения на нагрузке  $U$  от времени  $t$ ; 2 - напряжения разомкнутой цепи  $U_{рц}$  от времени  $t$ ; 3 – внутреннего сопротивления  $R_{вн}$  от времени  $t$ .

Таблица 2.2 – Результаты измерений АБ типа ВТУ 3000 (2)

$t$ (сек)	$U$ (В)	$I_s$ (мАч)	$I$ (мА)	$U_{рц}$ (В)	$R_{вн}$ (Ом)
0	1,147	0,0	1136	1,259	0,098
60	1,079	18	1068	1,216	0,129
120	1,074	35,7	1064	1,207	0,125
180	1,070	53,4	1059	1,207	0,130
240	1,066	71	1055	1,207	0,134
300	1,066	88,6	1055	1,207	0,134
360	1,061	106,2	1051	1,203	0,135
420	1,053	123,6	1042	1,199	0,140
480	1,044	141	1034	1,195	0,145

Продолжение таблицы 2

540	1,036	158,1	1025	1,190	0,151
600	1,023	175,1	1013	1,182	0,157
660	1,001	191,8	991	1,169	0,169
720	0,967	208,1	957	1,156	0,198
780	0,920	223,8	910	1,134	0,236
840	0,864	238,5	855	1,109	0,286
900	0,791	252,2	783	1,083	0,373
960	0,726	264,8	719	1,057	0,460
1020	0,653	276,2	647	1,023	0,571

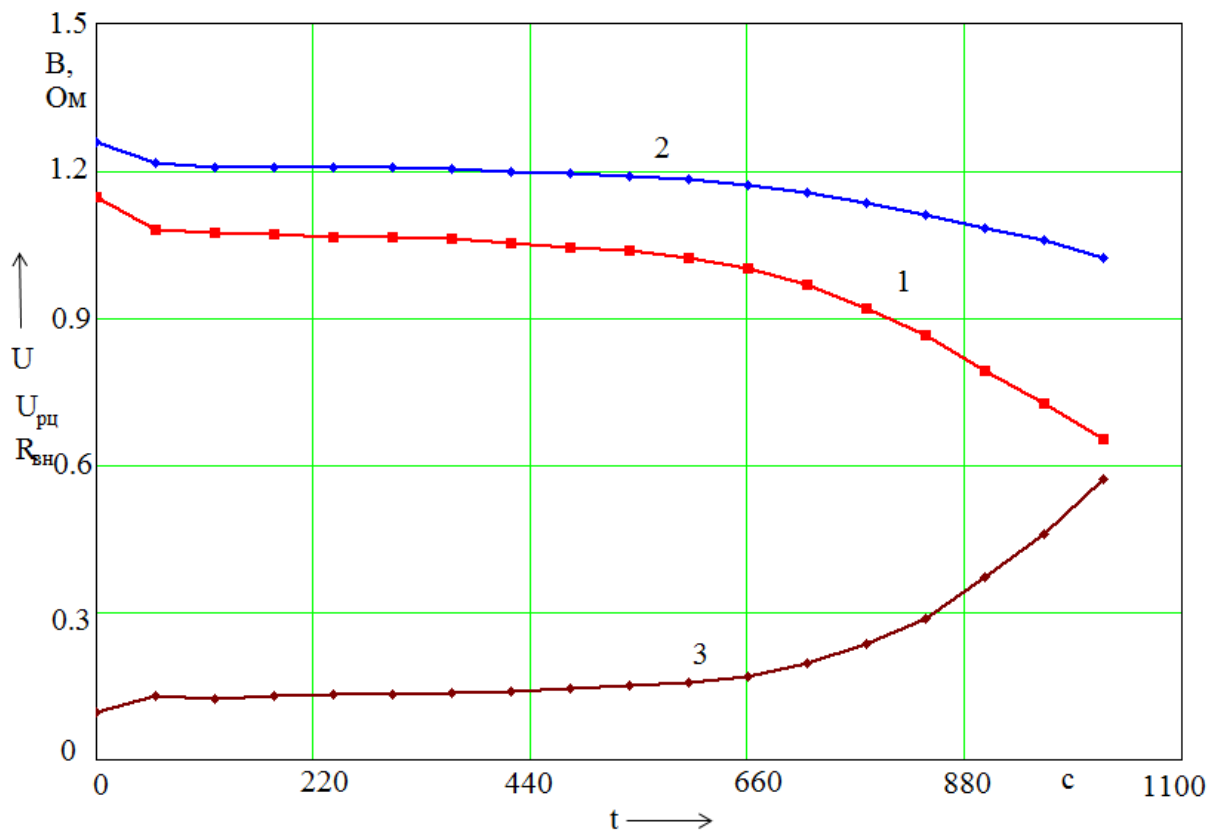


Рисунок 2.5 – Графики зависимости: 1- напряжения на нагрузке  $U$  от времени  $t$ ; 1 - напряжения разомкнутой цепи  $U_{рц}$  от времени  $t$ ; 2– внутреннего сопротивления  $R_{вн}$  от времени  $t$ .

Таблица 2.3 – Результаты измерений АБ типа Camelion 210 mAh

t (сек)	U (В)	I <sub>s</sub> (мАч)	I (мА)	U <sub>рц</sub> (В)	R <sub>вн</sub> (Ом)
0	1,156	0,0	1144	1,341	0,161
120	1,117	37,2	1106	1,298	0,163
240	1,100	73,8	1089	1,276	0,162
360	1,091	110	1081	1,268	0,163
480	1,091	146	1081	1,263	0,159
600	1,087	182	1076	1,255	0,156
720	1,083	217,8	1072	1,250	0,156
840	1,083	253,6	1072	1,250	0,156
960	1,803	289,4	1072	1,246	0,152
1080	1,803	325,1	1072	1,242	0,148
1200	1,079	360,7	1068	1,238	0,149
1320	1,079	396,3	1068	1,238	0,149
1440	1,079	431,9	1068	1,238	0,149
1560	1,079	467,5	1068	1,233	0,145
1680	1,079	503	1068	1,233	0,145
1800	1,074	538,5	1064	1,233	0,149
1920	1,074	574	1064	1,233	0,149
2040	1,070	609,4	1059	1,229	0,150
2160	1,070	644,8	1059	1,225	0,146
2400	1,070	715,5	1059	1,225	0,146
2520	1,066	750,7	1055	1,220	0,147
2640	1,066	785,9	1055	1,220	0,147
2760	1,061	821,1	1051	1,216	0,147
2880	1,061	856,2	1051	1,216	0,147
3000	1,061	891,3	1051	1,212	0,143
3120	1,057	926,3	1047	1,207	0,144
3240	1,057	961,1	1047	1,203	0,140

Продолжение таблицы 3

3360	1,053	995,9	1042	1,203	0,144
3480	1,048	1030,6	1038	1,199	0,145
3600	1,044	1065,1	1034	1,190	0,141
3720	1,040	1099,6	1030	1,186	0,142
3840	1,036	1133,8	1025	1,186	0,147
3960	1,031	1167,9	1021	1,177	0,143
4080	1,023	1201,9	1013	1,169	0,144
4200	1,018	1235,5	1008	1,164	0,145
4320	1,010	1269	1000	1,156	0,146
4440	0,993	1302	983	1,152	0,162
4560	0,928	1334,2	919	1,147	0,238
4680	0,640	1359,4	634	1,134	0,780
4725	0,597	1367,1	591	1,130	0,901

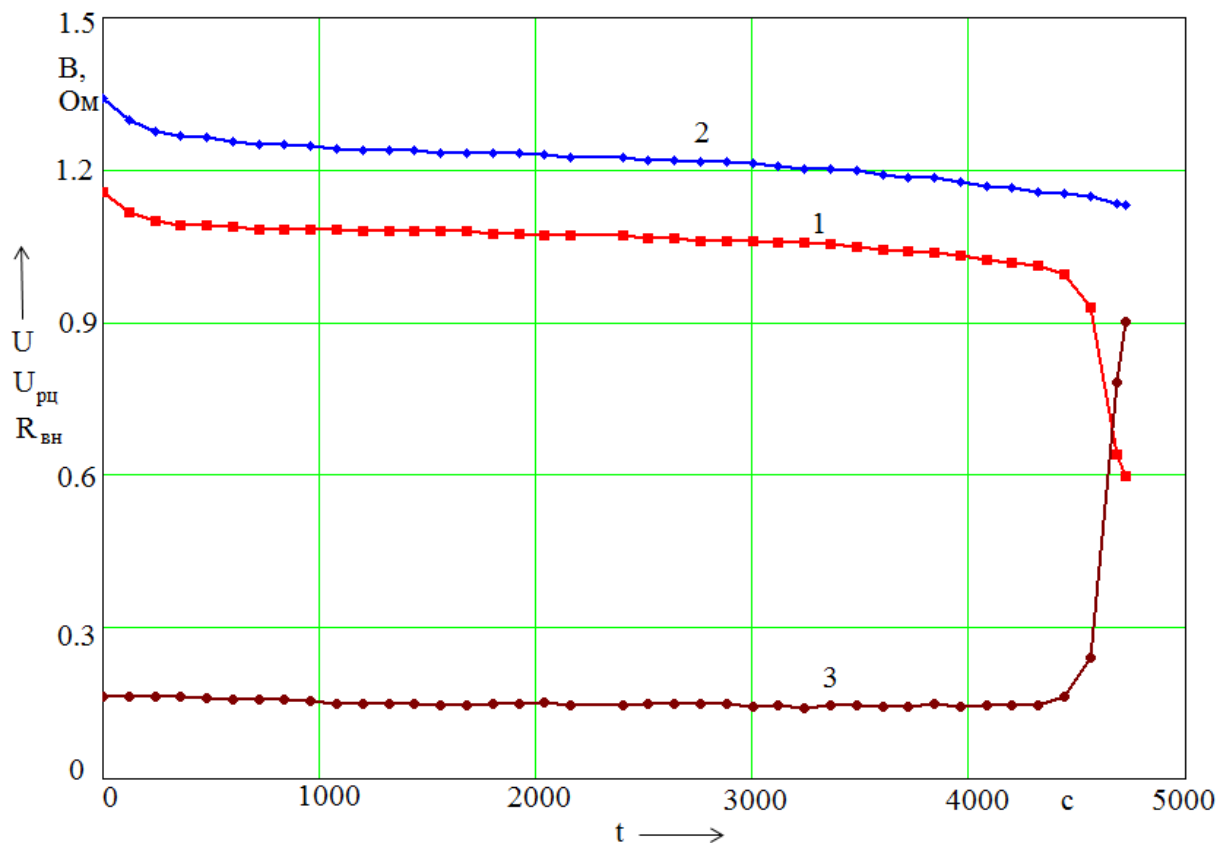


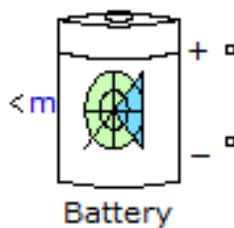
Рисунок 2.6 – Графики зависимости: 1- напряжения на нагрузке  $U$  от времени  $t$ ; 2 – напряжения разомкнутой цепи  $U_{рц}$  от времени  $t$ ; 3 – внутреннего сопротивления  $R_{вн}$  от времени  $t$ .

Как следует из таблиц, большинство из представленных аккумуляторных батарей имеет вполне приемлемые емкостные характеристики, но лучшими характеристиками обладает аккумулятор с большей емкостью. В нашем случае это аккумуляторная батарея типа Camelion 2100 mAh. Проанализировав данные всех трех таблиц за первые минуты разряда напряжение холостого хода  $U_{рц}$  падает на 3,3-5%, при последующем разряде  $U_{рц}$  падает на 0,75 В, в среднем на 4%.

## 2.2 Модель АКБ в среде Matlab.

Батарейный блок реализует обобщенную динамическую модель [37].





Заряд и разряд динамической модели батареи проверяются экспериментально с помощью четырех наиболее известных типов аккумуляторных батарей:

- Никель-кадмиевые;
- Никель-металлгидридные;
- Литий-ионные;
- Свинцово-кислотные.

Особенностью данной модели является простота получения эксплуатационных характеристик. Необходимы всего три параметра для ввода в блок: номинальное напряжение, В (Nominal Voltage); номинальная емкость, А/ч (Rated Capacity); начальное состояние заряда, % (Initial State-Of-Charge).

Эквивалентная схема батареи приведена на рисунке 2.6. [38]

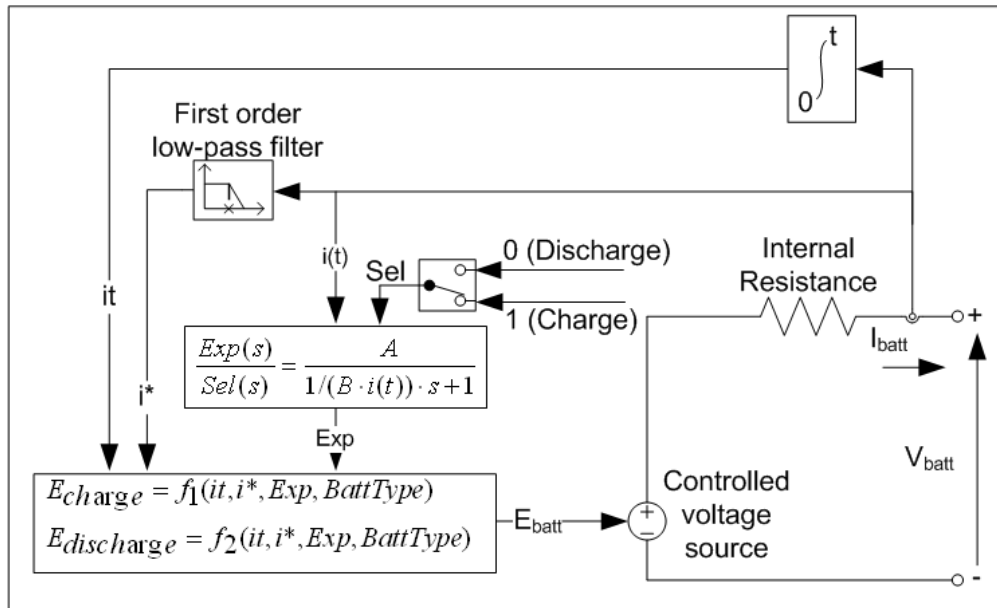


Рисунок 2.7 – Эквивалентная схема АКБ в среде MATLAB

Ниже представлены формулы, рассчитывающие модели разряда и заряда аккумуляторных батарей в батарейном блоке [40]:

#### Для свинцово-кислотных АБ

##### Модель разрядки ( $i^* > 0$ )

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \text{Laplace}^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right).$$

##### Модель зарядки ( $i^* < 0$ )

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \text{Laplace}^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right).$$

#### Для литий-ионной АБ

##### Модель разрядки ( $i^* > 0$ )

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it).$$

##### Модель зарядки ( $i^* < 0$ )

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it).$$

## Для никель-кадмиевой и никель-металлгидридной АБ

### Модель разрядки ( $i^* > 0$ )

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + \text{Laplace}^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right).$$

### Модель зарядки ( $i^* < 0$ )

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{|it| + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + \text{Laplace}^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right),$$

где

$E_{\text{Batt}}$  - нелинейное напряжение (В)

$E_0$  - постоянное напряжение (В)

$Exp(s)$  - экспоненциальная динамика зоны (В)

$Sel(s)$  - представляет режим работы от аккумулятора:

$Sel(s) = 0$  во время разрядки батареи,

$Sel(s) = 1$  во время зарядки аккумулятора.

$K$  - постоянная поляризации ( $\text{Ач}^{-1}$ )

$i^*$  - низкочастотная текущая динамика (А)

$i$  - ток батареи (А)

$it$  - извлеченная емкость (Ач)

$V$  - экспоненциальная емкость ( $\text{Ач}^{-1}$ )

$Q$  - максимальная емкость батареи (Ач)

$A$  - экспоненциальное напряжение (В)

Параметры эквивалентной схемы могут быть изменены, для того чтобы представлять определенный тип батареи, основанные на его разрядных

характеристиках. Типичная разрядная кривая состоит из трех областей (рисунок 2.7) [39].

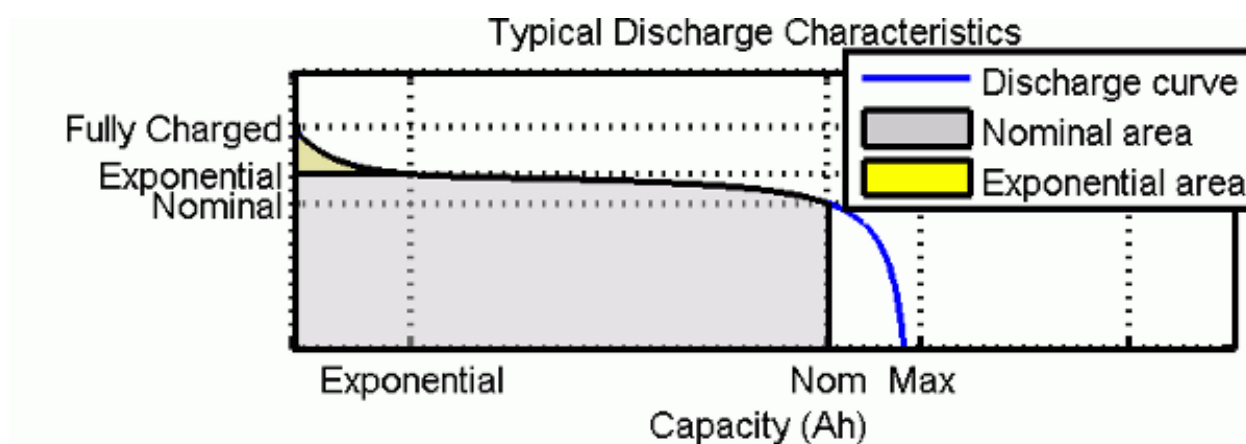


Рисунок 2.8– Типичная разрядная кривая

Первая область представляет собой экспоненциальное падение напряжения, когда аккумулятор заряжен. В зависимости от типа аккумулятора, данная область более или менее широка.

Вторая область показывает напряжение, которое может быть извлечено из аккумулятора, пока напряжение не упадет ниже номинального напряжения батареи.

Третья область показывает полный разряд аккумулятора, когда напряжение падает очень быстро.

## Вкладка блок параметров

**Block Parameters: 200 volts, 6.5 Ah Ni-MH battery**

Battery (mask) (link)

Implements a generic battery that model most popular battery types. Uncheck the "Use parameters based on Battery type and nominal values" parameter to edit the discharge characteristics.

Parameters View Discharge Characteristics Battery Dynamics

Battery type Nickel-Metal-Hydride

Nominal Voltage (V)  
200

Rated Capacity (Ah)  
6.5

Initial State-Of-Charge (%)  
100

Use parameters based on Battery type and nominal values

Maximum Capacity (Ah)  
7

Fully Charged Voltage (V)  
235.5932

Nominal Discharge Current (A)  
1.3

Internal Resistance (Ohms)  
0.30769

Capacity (Ah) @ Nominal Voltage  
6.25

Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]  
[216.9492 1.3]

OK Cancel Help Apply

Тип батареи. Позволяет выбрать тип АБ из списка predetermined моделей поведения для четырех типов батарей:

- Свинцово-Кислотные
- Литий-Ионный
- Никель-Кадмиевые

- Никель-Металлгидридные.

Номинальное напряжение, В. Номинальное напряжение представляет конец линейной зоны характеристик разряда.

Номинальная емкость, А/ч. Номинальная ёмкость - минимальная эффективная емкость батареи.

Начальное состояние заряда, %. Начальное состояние заряда обозначается как SOC. Если значение равно 100%, то аккумулятор является полностью заряженным. А при значении 0% аккумулятор является разряженным («пустым»). Данный параметр употребляется в качестве начального условия для моделирования и не влияет на кривую разряда.

Максимальная емкость, А/ч. Максимальная теоритическая емкость, когда возникает разрыв в напряжении батареи. Значение данного параметра, как правило, равна 105% от номинальной емкости.

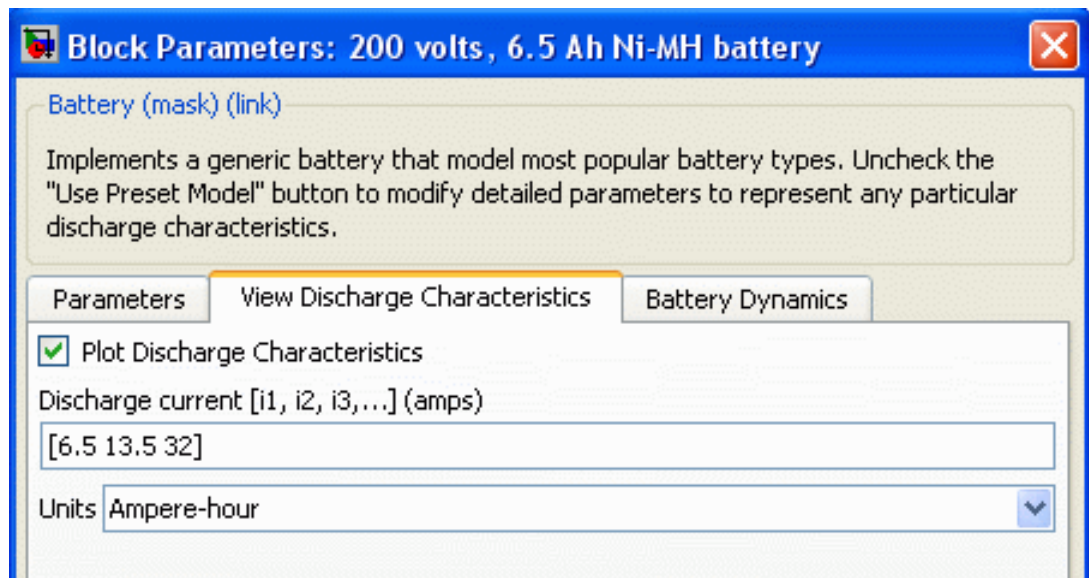
Номинальный ток разряда, А. Номинальный ток разряда, для которых была измерена кривая разряда.

Внутреннее сопротивление, Ом. Внутреннее сопротивление постоянно во время циклов заряда и разряда и не меняется в зависимости от амплитуды тока.

Емкость при номинальном напряжении, А/ч. Пропускная способность извлекается из батареи, пока напряжение не падает ниже номинального напряжения.

Экспоненциальная зона. Напряжение ( $U_{\text{exp}}$ ) и емкость ( $Q_{\text{exp}}$ ) свойственны концу экспоненциальной зоны. Напряжение определяется в интервале  $U_{\text{nom}}$  и  $U_{\text{full}}$ , емкость в интервале от 0 до  $Q_{\text{nom}}$ .

Вкладка вид характеристики разряда.

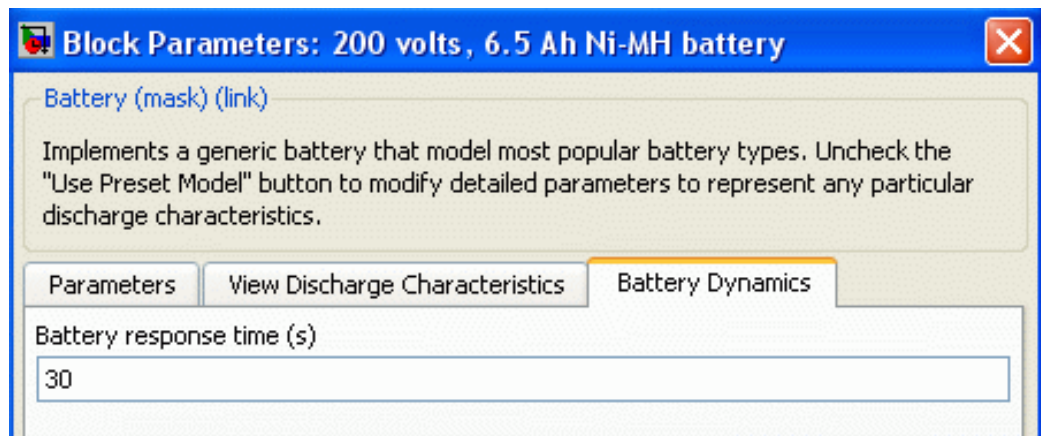


Участок характеристики разряда (Plot Discharge Characteristics). Используется при выборе участков фигуры, содержащую два графика. Первый график показывает номинальную кривую разряда, при номинальном токе разряда, а второй график - кривые разряда при заданных токах. Когда флажок активен, графа остается включенной и обновляется при изменении параметра в диалоговом окне.

Разрядный ток (Discharge current). Позволяет задавать различные значения разрядного тока. Разрядные характеристики этих токов представлены во второй части графика.

Единицы измерения (Units). Данная графа позволяет задавать время или ампер-час в качестве оси X для графика.

Вкладка динамика батареи.



Время отклика батареи, с (на 95% от конечного значения). Это значение представляет динамику напряжения.

Предлагаемая модель основана на определенных допущениях и ограничениях [41]:

Допущения модели:

- внутреннее сопротивление предполагается постоянным во время циклов зарядки и разрядки и не зависит от амплитуды тока;
- параметры модели выводятся из разряда характеристики и принимается равным для зарядки;
- емкость батареи не изменяется в зависимости от амплитуды тока;
- температура не влияет на поведение модели;
- саморазряд отсутствует;
- эффекта памяти отсутствует.

Ограничения модели:

- минимальное напряжение батареи равно 0 V, а максимальное напряжение батареи  $2 \cdot E_0$ .
- минимальная емкость батареи 0 А/ч, а максимальная не может быть больше 100% .



## 2.2 Математическое моделирование существующей модели

В программном обеспечении Matlab/Simulink произведено моделирование батарейного блока Battery. Моделирование произведено согласно схеме, показанной на рисунке 2.9.

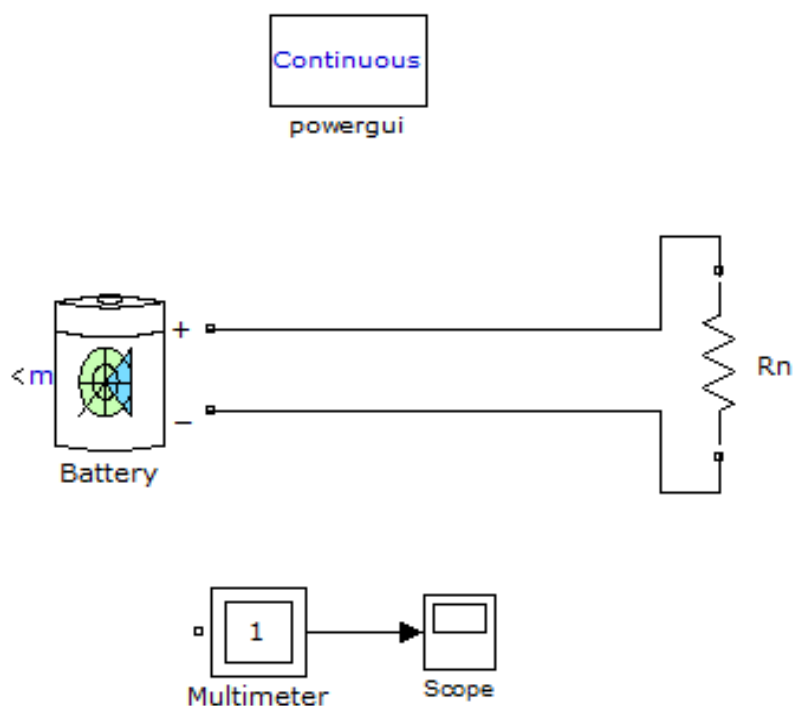


Рисунок 2.9 - Схема моделирования

В блок Battery из списка АБ выбраны никель-металлгидридная аккумуляторная батарея. Согласно практическому исследованию батарейный блок разряжался на нагрузку  $R_n = 1$  Ом. В блок внесены основные данные:  $U$  - номинальное напряжение, В;  $Q$  - номинальная емкость, Ач; SOC - начальное состояние заряда, %. Данные взяты из практического исследования трех аккумуляторных батарей. Выходным параметром является напряжение на нагрузке  $U$  (В).

Для АБ типа ВТУ 3000 (1) начальные значения:

$$U = 1.113 \text{ В}$$

$$Q = 0,155 \text{ Ач}$$

$$\text{SOC} = 100\%.$$

Результат измерения: график зависимости напряжения на нагрузке  $U$  от времени  $t$  показаны на рисунке 2.10.

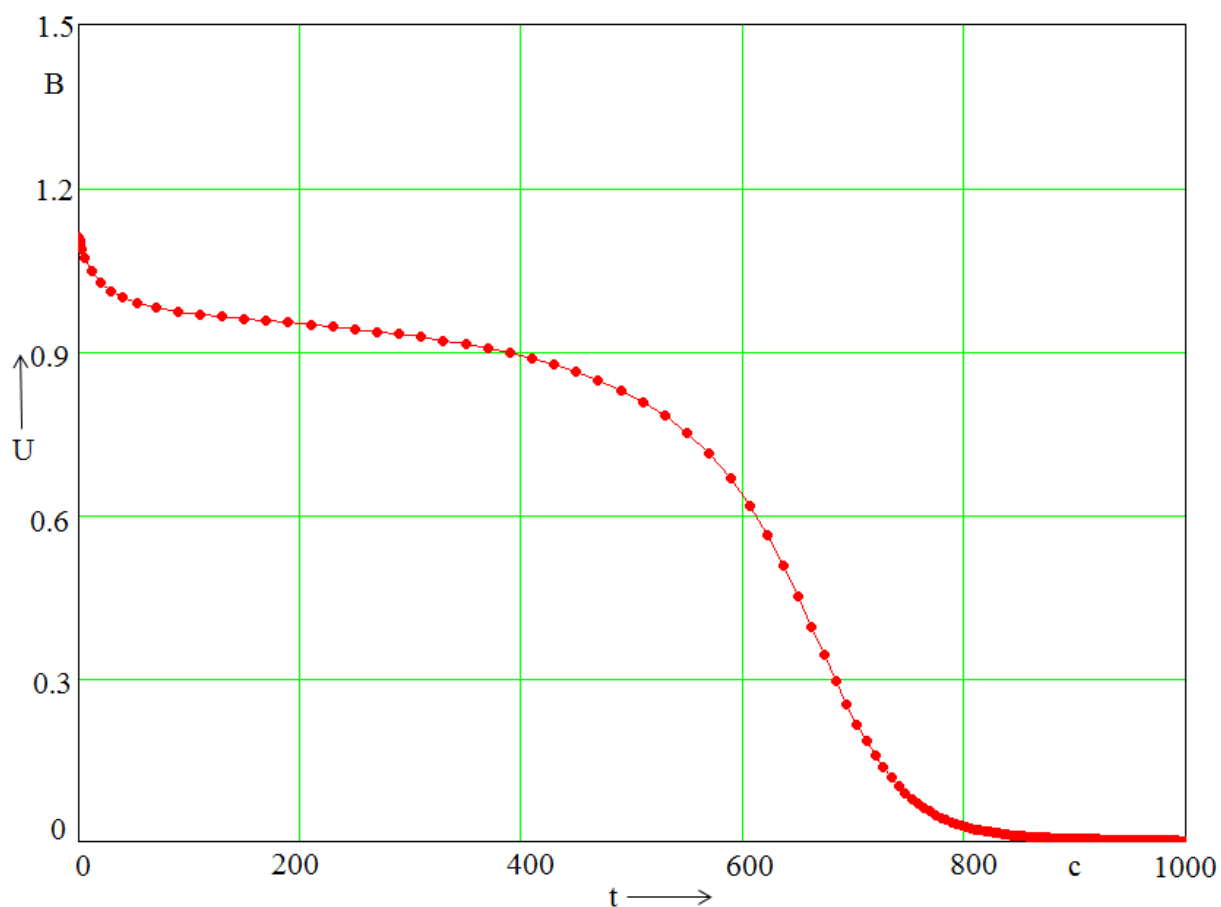


Рисунок 2.10 - Графики зависимости напряжения на нагрузке  $U$  от времени  $t$

Для АБ типа ВТУ 3000 (2) начальные значения:

$$U=1.147 \text{ В}$$

$$Q= 0,276 \text{ Ач}$$

$$\text{SOC}= 100\%.$$

Результат измерения: график зависимости напряжения на нагрузке  $U$  от времени  $t$  показаны на рисунке 2.11.

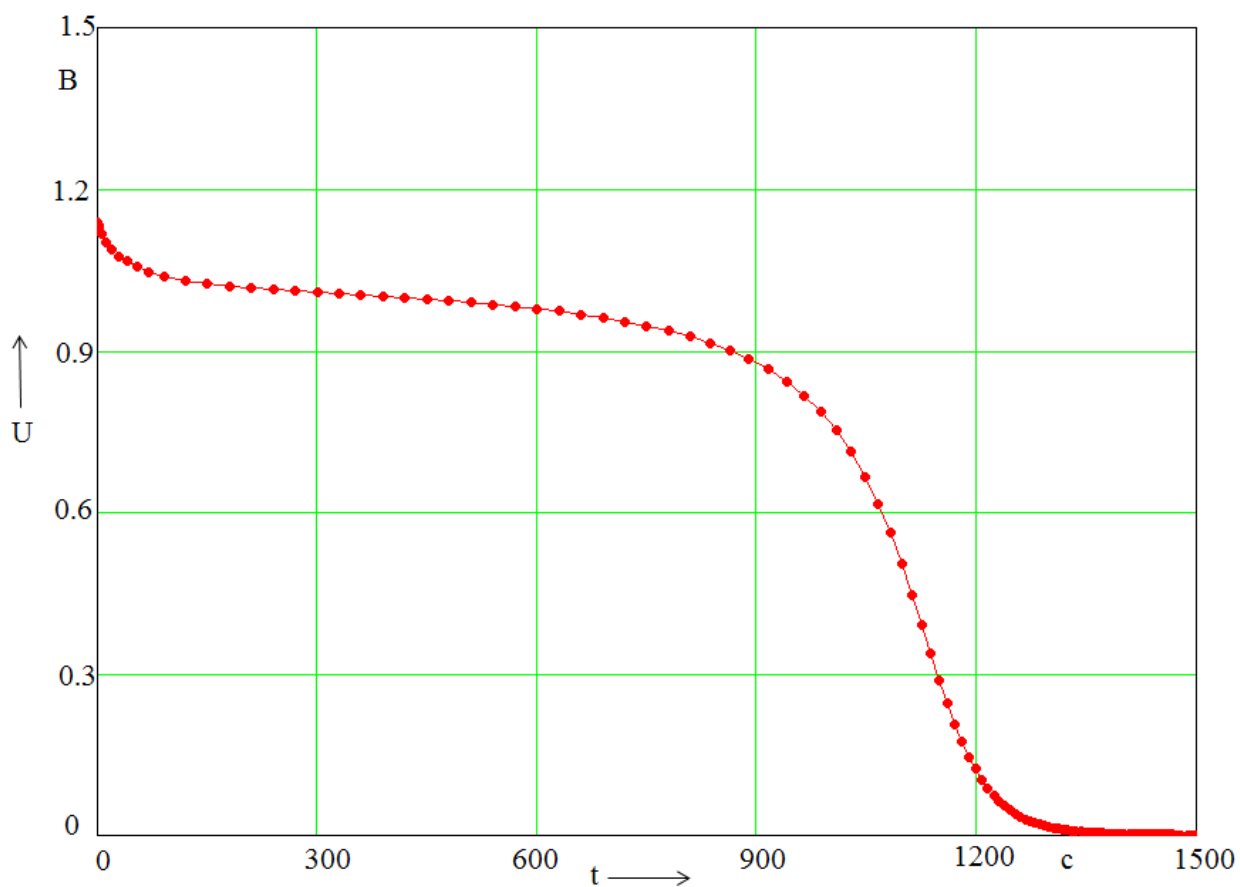


Рисунок 2.11 - Графики зависимости напряжения на нагрузке  $U$  от времени  $t$

Для АБ типа Camelion 2100 mAh начальные значения:

$U = 1.156$  В

$Q = 1,376$  Ач

SOC = 100%.

Результат измерения: график зависимости напряжения на нагрузке  $U$  от времени  $t$  показаны на рисунке 2.12.

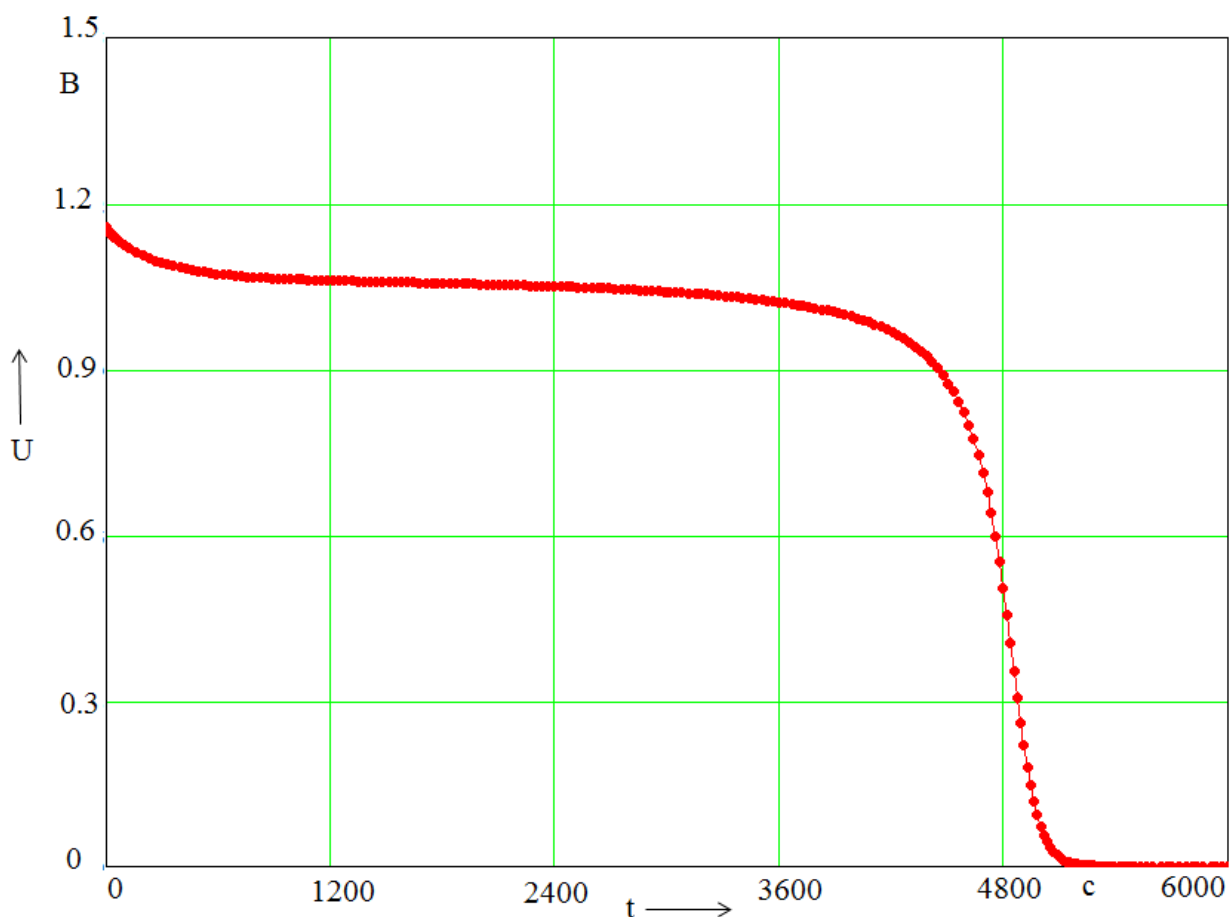


Рисунок 2.12 - Графики зависимости напряжения на нагрузке  $U$  от времени  $t$

Сравнение результатов моделирования и практического исследования произведены в п. 3.2.

### **Вывод по главе:**

При анализе результатов экспериментального исследования большинство из выбранных для исследования аккумуляторных батарей имеет вполне приемлемые емкостные характеристики, но лучшими характеристиками обладает аккумулятор с большей емкостью. В нашем случае это аккумуляторная батарея типа Camelion 2100 mAh. Внутреннее сопротивление возрастает при разряде батареи, что особенно заметно в конце разряда батареи.

Проанализировав данные всех трех таблиц за первые минуты разряда напряжение разомкнутой цепи  $U_{pc}$  падает на 3,3-5%, при последующем разряде  $U_{pc}$  падает на 0,75 В, в среднем на 4%.

Батарейный блок в программном обеспечении Matlab/Simulink позволяет моделировать 4 основных типа аккумуляторных батарей. Особенность данной модели является простота получения эксплуатационных характеристик. Необходимы всего три параметра для ввода в блок: номинальное напряжение; номинальная емкость; начальное состояние заряда. Но блок не учитывает изменение внутреннего сопротивления

Экспериментальное моделирование выбранных для исследования никель-металлгидридных аккумуляторных батарей показало, что математическая модель адекватна на всем протяжении разрядной характеристики.

## **Глава 3 Разработка математической модели аккумуляторной батареи, учитывающей изменение внутреннего сопротивления.**

### **3.1 Разработка методики выбора параметров математической модели в среде Mathcad.**

Из обзора основных подходов к моделированию аккумуляторных батарей выбран метод описания данных, полученных в результате эксперимента.

После изучения публикаций и практического исследования можно сделать вывод: что существующая математическая модель аккумуляторной батареи в среде Matlab/Simulink не позволяет изменять внутреннее сопротивление (предполагается постоянной во время циклов зарядки и разрядки и не зависит от амплитуды тока). Но на практике внутреннее сопротивление батареи возрастает при ее разряде, особенно в конце разряда аккумуляторной батареи.

На рост внутреннего сопротивления влияет степень заряженности и температура – это ведет к быстрому падению разрядного напряжения и, в следствие, к снижению разрядной ёмкости аккумулятора. Внутреннее сопротивление по большому счету является одним из основных характеристик аккумуляторной батареи и определяет производительность батареи.

Для получения достоверной оценки эксплуатационных характеристик предлагается применение математической модели на расчетной основе. Важной особенностью предложенной модели является простота расчета и получения эксплуатационных характеристик. Необходимы всего три параметра аккумуляторной батареи - это начальное значение внутреннего сопротивления, начальное значение напряжения разомкнутой цепи и емкости.

Для разработки математической модели, учитывающей изменение внутреннего сопротивления и установления соотношений, изображающих изменение параметров АБ, используют схему замещения АБ. Изучив источники [45] для разработки математической модели выбрана схема замещения аккумуляторной батареи с подключенной нагрузкой (см. рисунок 3.1).

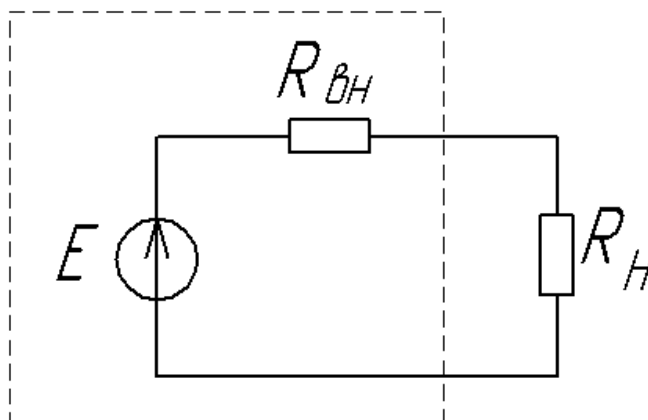


Рисунок 3.1 – Схема замещения АБ

Математическая модель на расчетной основе состоит из трех основных формул: для расчета внутреннего сопротивления, для расчета напряжения разомкнутой цепи и для расчета выходного напряжения аккумуляторной батареи.

Расчет внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи:

$$R_{вн} = R_{вн0} + K_{пол} \cdot S, \quad (3.1)$$

где  $R_{вн0}$  – начальное значение внутреннего сопротивления АБ,

$K_{пол}$  – коэффициент поляризации,

$S$  – степень заряда,

Расчет напряжения разомкнутой цепи:

$$U_{рц} = U_{рц0} + K_{пол} \cdot S, \quad (3.2)$$

где  $U_{рц0}$  – начальное значение напряжения разомкнутой цепи АБ,

$K_U$  – коэффициент уменьшения напряжения разомкнутой цепи при разряде.

Расчет напряжения на нагрузке:

$$U = U_{\text{рц}} - I \cdot R \quad (3.3)$$

где  $R$ - сопротивление на нагрузке.

### 3.2 Моделирование разработанной модели в среде Mathcad.

Для проверки адекватности расчетной модели и последующего сравнения результатов для тех выбранных аккумуляторных батарей произведет расчет параметров по формулам 3.1-3.3 (таблицы 3.1-3.3) и получены эксплуатационные характеристики, показанные на рисунках 3.1-3.3.

Для АБ типа ВТУ 3000 (1) начальные значения:

$R_{\text{вн}0} = 0,109$ ;  $K_{\text{пол}} = 0,1$ ;  $S = 0, 0,05 \dots 1$ ;  $U_{\text{рц}0} = 1,233$ ;  $K_U = 0,18$ ;  $R = 1 \text{ Ом}$ .

Таблица 3.1 – Результаты расчета для АБ типа ВТУ 3000 (1)

S	$R_{\text{вн}}, \text{Ом}$	$U_{\text{рц}}, \text{В}$	U, В
0	1,109	1,053	0,499
0,05	0,776	1,062	0,598
0,1	0,609	1,070	0,666
0,15	0,509	1,08	0,716
0,2	0,442	1,089	0,755
0,25	0,394	1,098	0,787
0,3	0,359	1,107	0,815
0,35	0,331	1,116	0,838
0,4	0,309	1,125	0,859

Продолжение таблицы 3.1



0,45	0,291	1,134	0,879
0,5	0,276	1,143	0,896
0,55	0,263	1,152	0,912
0,6	0,252	1,161	0,927
0,65	0,242	1,17	0,942
0,7	0,234	1,179	0,955
0,75	0,227	1,188	0,968
0,8	0,220	1,197	0,981
0,85	0,214	1,206	0,993
0,9	0,209	1,215	1,005
0,95	0,204	1,214	1,016
1	0,199	1,233	1,028

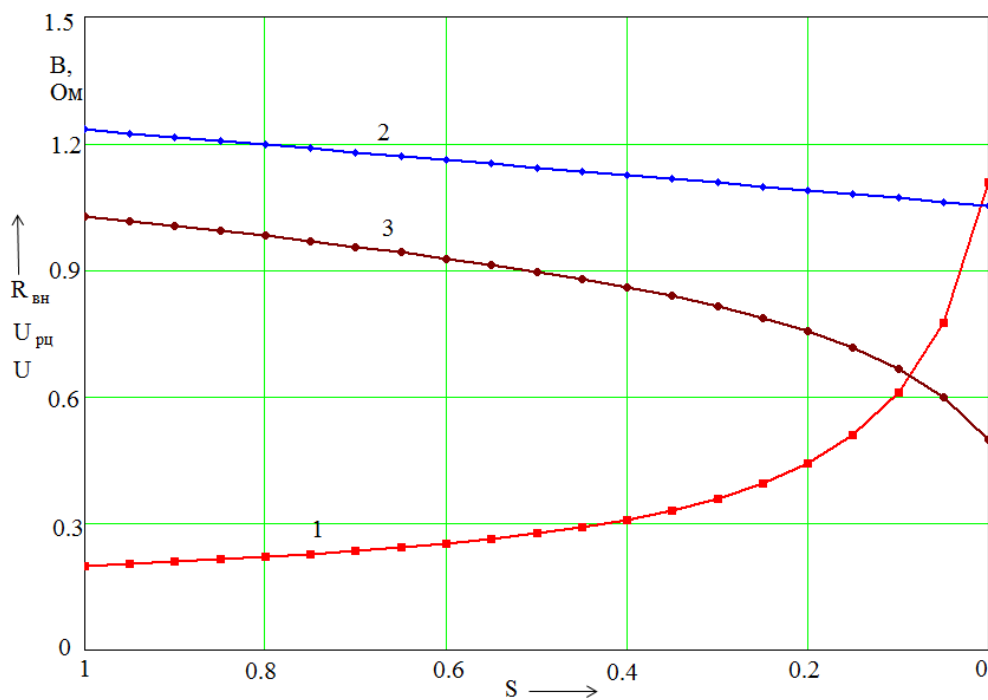


Рисунок 3.1– Графики зависимости для ВТУ 3000 (1): 1- внутреннего сопротивления  $R_{вн}$  от степени заряда  $S$ ; 2 - напряжения разомкнутой цепи  $U_{рц}$  степени заряда  $S$ ; 3 - напряжения на нагрузке  $U$  от степени заряда  $S$ .

Для АБ типа ВТУ 3000 (2) начальные значения:

$R_{вн0} = 0,098$ ;  $K_{пол} = 0,03$ ;  $S = 0, 0,05 \dots 1$ ;  $U_{рц0} = 1,259$ ;  $K_U = 0,247$ ;  $R = 1$  Ом.

Таблица 3.2 – Результаты расчета для АБ типа ВТУ 3000 (2)

S	R <sub>вн</sub> , Ом	U <sub>рц</sub> , В	U, В
0	1,098	1,012	0,482
0,05	0,473	1,024	0,695
0,1	0,329	1,037	0,780
0,15	0,265	1,049	0,829
0,2	0,228	1,061	0,864
0,25	0,205	1,074	0,891
0,3	0,189	1,086	0,914
0,35	0,177	1,098	0,933
0,4	0,168	1,111	0,951
0,45	0,161	1,123	0,968
0,5	0,155	1,136	0,983
0,55	0,150	1,148	0,998
0,6	0,146	1,160	1,103
0,65	0,142	1,173	1,027
0,7	0,139	1,185	1,04
0,75	0,136	1,197	1,054
0,8	0,134	1,21	1,067
0,85	0,132	1,222	1,079
0,9	0,130	1,234	1,092
0,95	0,129	1,247	1,105
1	0,127	1,259	1,117

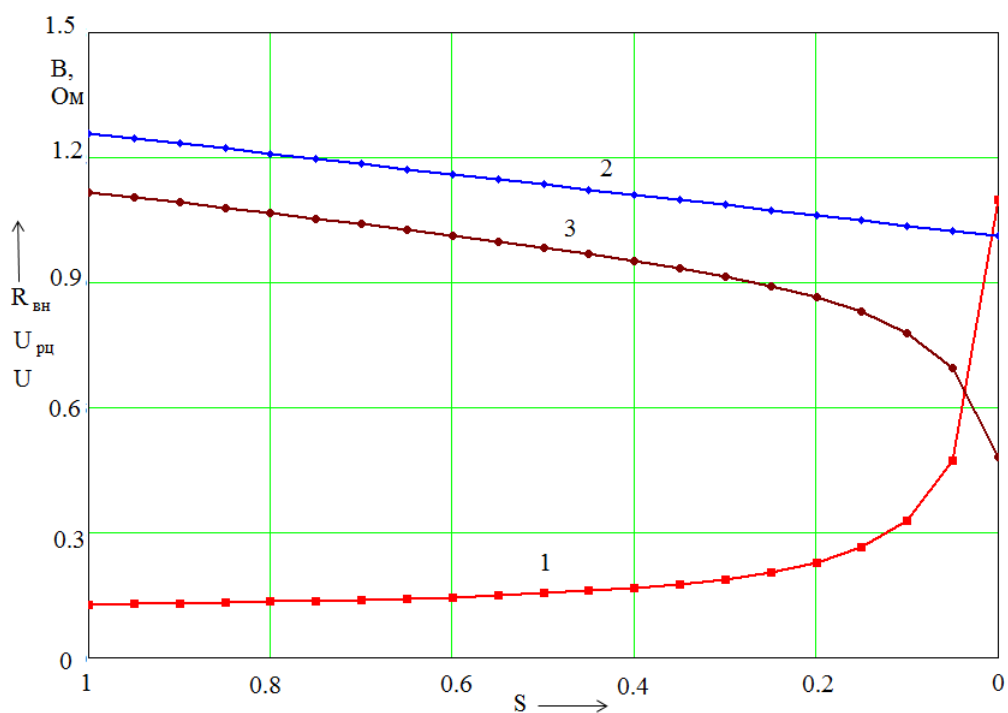


Рисунок 3.2 – Графики зависимости для ВТУ 3000 (2): 1- внутреннего сопротивления  $R_{вн}$  от степени заряда  $S$ ; 2 - напряжения разомкнутой цепи  $U_{рц}$  степени заряда  $S$ ; 3 - напряжения на нагрузке  $U$  от степени заряда  $S$ .

Для АБ типа Camelion 2100 mAh начальные значения:

$R_{вн0} = 0,163$ ;  $K_{пол} = 0,005$ ;  $S = 0, 0,05 \dots 1$ ;  $U_{рц0} = 1,29$ ;  $K_U = 0,16$ ;  $R = 1$  Ом.

Таблица 3.3 – Результаты расчета для АБ типа Camelion 2100 mAh

$S$	$R_{вн}$	$U_{xx}$	$U$
0	1,163	1,13	0,522
0,05	0,254	1,138	0,907
0,1	0,211	1,146	0,947
0,15	0,195	1,154	0,965
0,2	0,187	1,162	0,979
0,25	0,183	1,17	0,989
0,3	0,179	1,178	0,998
0,35	0,177	1,186	1,008

Продолжение таблицы 3.3

S	$R_{вн}, \text{OM}$	$U_{рц}, \text{В}$	U, В
0,4	0,175	1,194	1,016
0,45	0,174	1,202	1,024
0,5	0,173	1,21	1,032
0,55	0,172	1,218	1,039
0,6	0,171	1,226	1,047
0,65	0,171	1,234	1,054
0,7	0,170	1,242	1,062
0,75	0,170	1,25	1,069
0,8	0,170	1,258	1,076
0,85	0,169	1,266	1,083
0,9	0,169	1,274	1,09
0,95	0,168	1,282	1,097
1	0,167	1,29	1,105

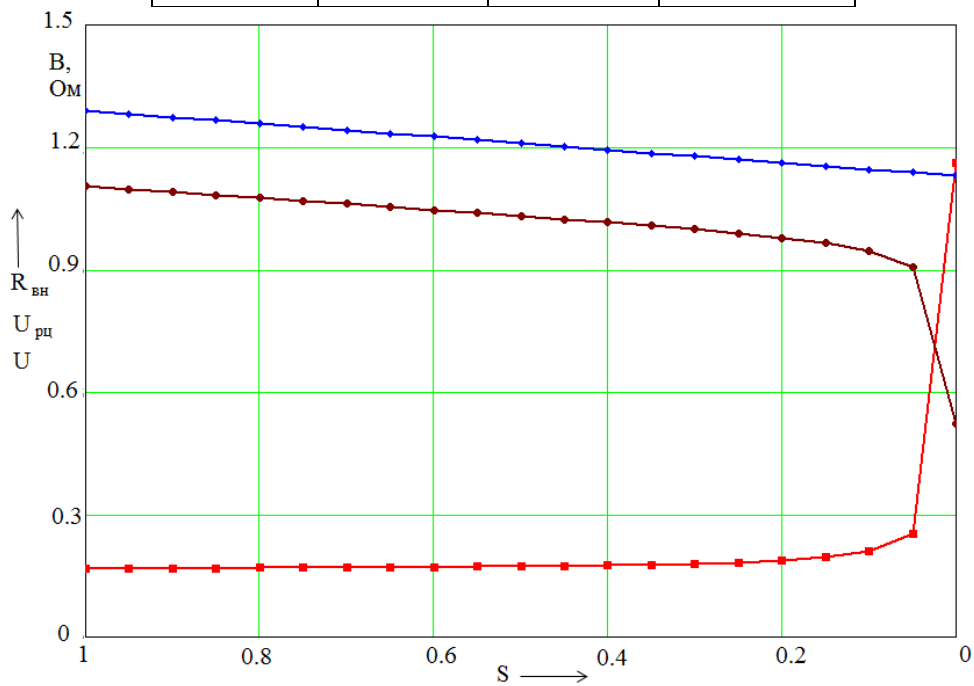


Рисунок 3.3 – Графики зависимости для Camelion 2100 mAh :1- внутреннего сопротивления  $R_{вн}$  от степени заряда S; 2 - напряжения разомкнутой цепи  $U_{рц}$  степени заряда S; 3 - напряжения на нагрузке U от степени заряда S.

### 3.3 Сравнение разрядных характеристик существующей и разработанной математической модели с экспериментально снятыми данными.

Для проверки адекватности математической модели произведено сравнение разрядных характеристик существующей (моделированной) и расчетной математической модели с экспериментально снятыми данными. Результаты сравнения показаны на рисунках 3.4-3.9.

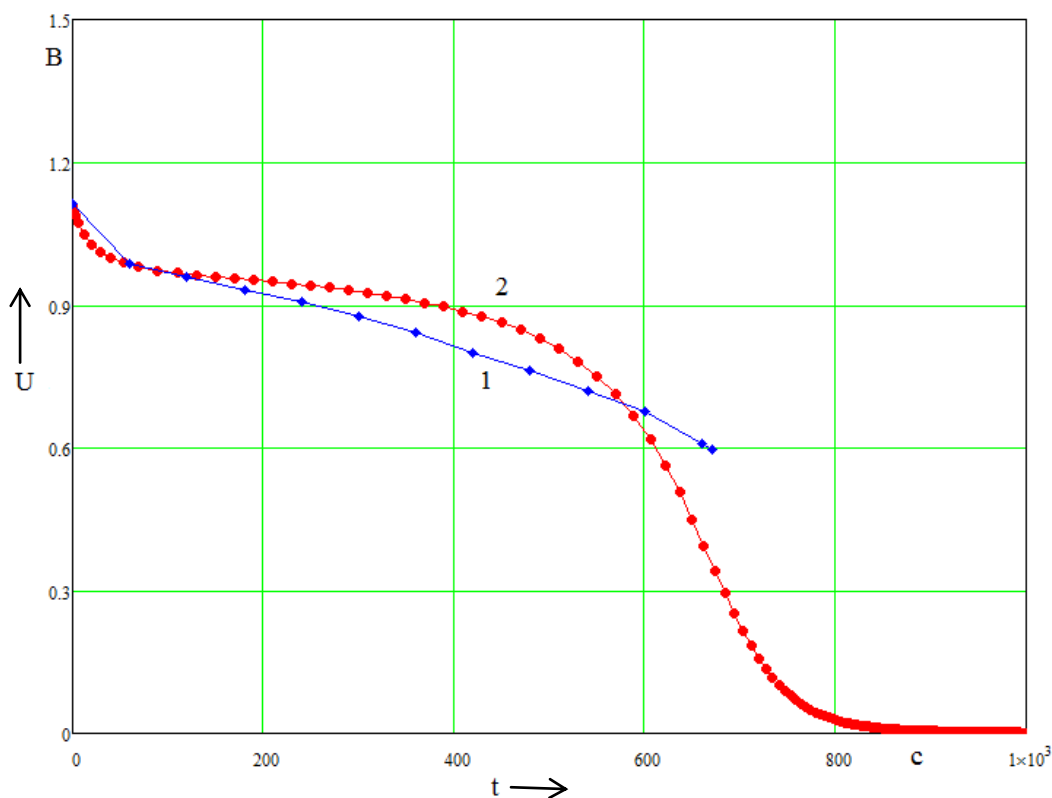


Рисунок 3.4 – Разрядная характеристика АКБ типа ВТУ 3000 (1):  
1 – экспериментальная, 2 – моделированная

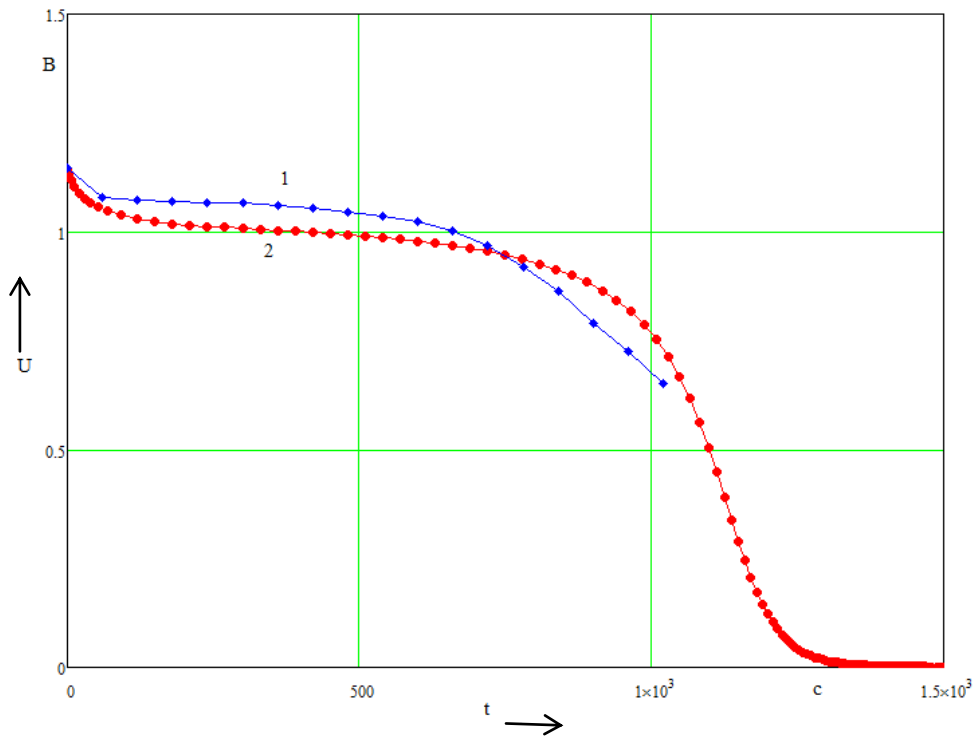


Рисунок 3.5 – Разрядная характеристика АКБ типа BTY 3000 (2):  
1 – экспериментальная, 2 – моделированная

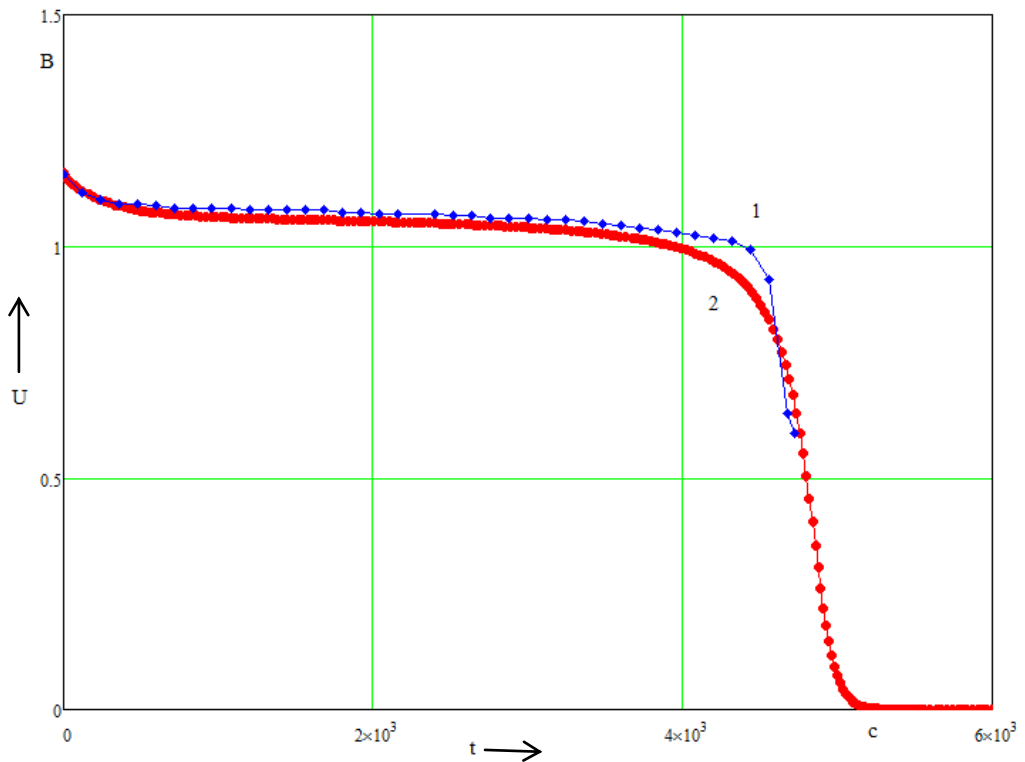


Рисунок 3.6 – Разрядная характеристика АКБ типа Camelion 2100 mAh:  
1 – экспериментальная, 2 – моделированная

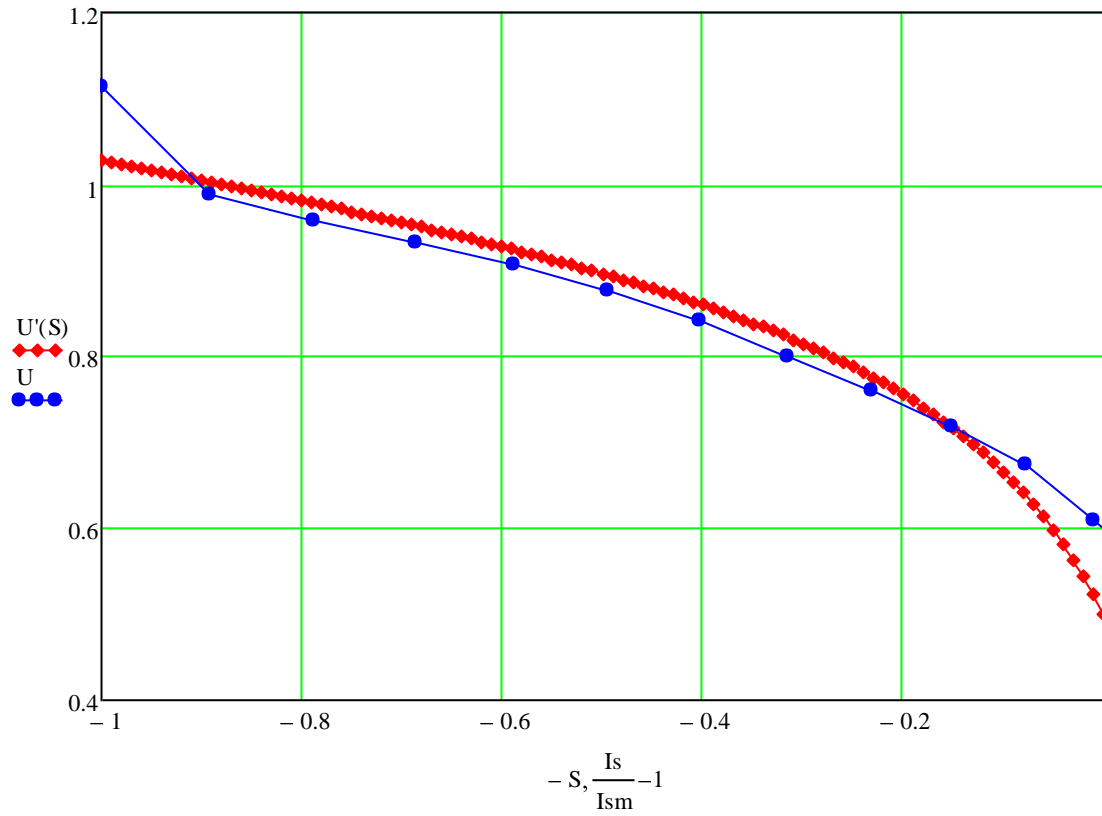


Рисунок 3.7 – Разрядная характеристика АБ типа ВТУ 3000 (1) :  
1 – экспериментальная, 2 – расчетная

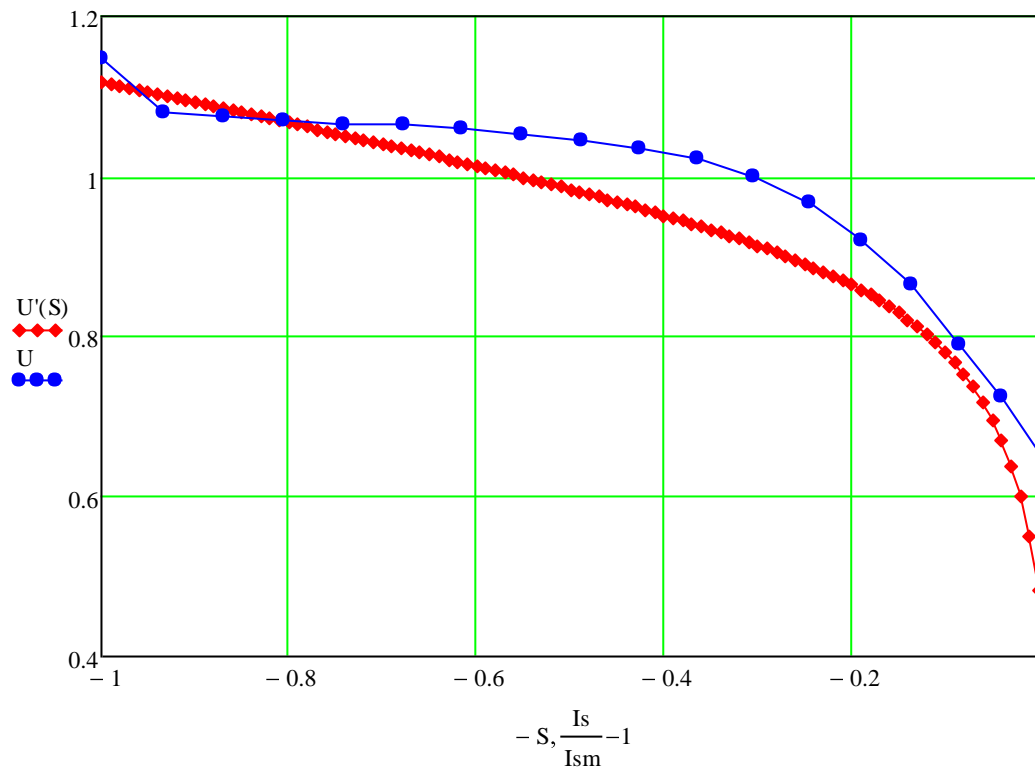


Рисунок 3.8 – Разрядная характеристика АБ типа ВТУ 3000 (2):  
1 – экспериментальная, 2 – расчетная

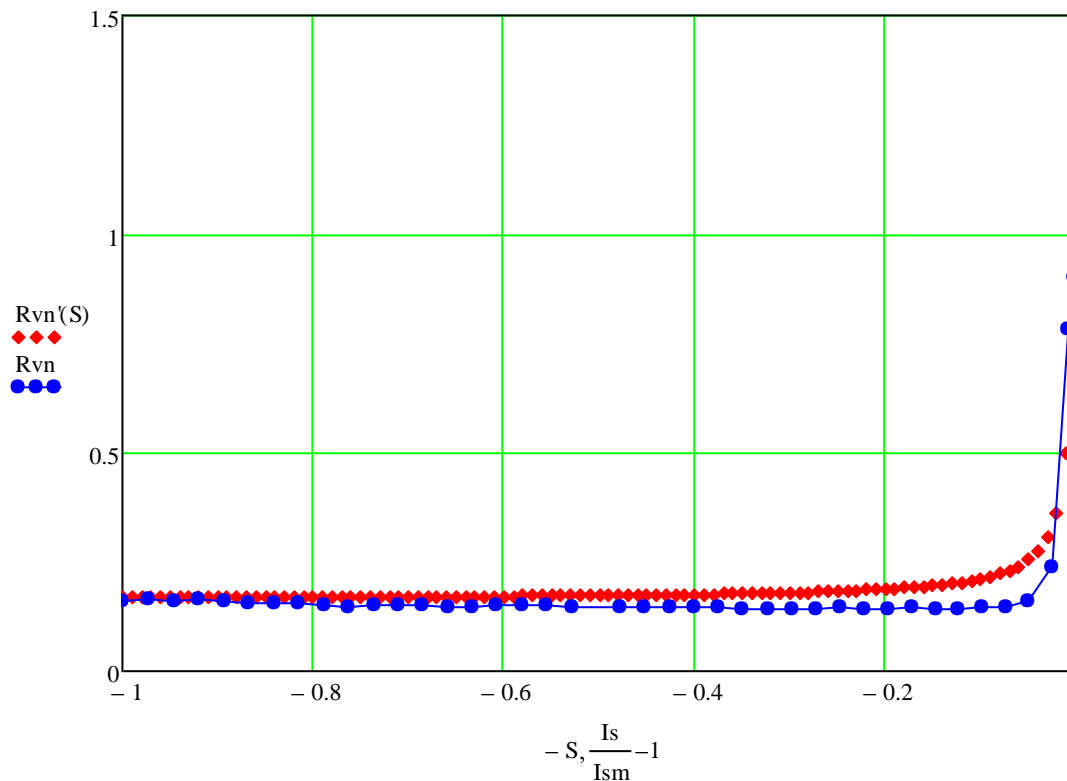


Рисунок 3.9 – Разрядная характеристика АБ типа Camelion 2100 mAh:

1 – экспериментальная, 2 – расчетная

При сравнении разрядных характеристик никель-металлгидридные аккумуляторных батарей было установлено, что существующая и расчетная математические модели адекватны на всем протяжении разрядной характеристики.

Отклонение результатов существующей модели от результатов независимого эксперимента не превышает:

- Для АБ типа для ВТУ 3000 (1) – 6%,
- Для АБ типа ВТУ 3000 (2) – 5%,
- Для АБ типа Camelion 2100 mAh – 2,35 %.

Отклонение результатов расчетной модели от результатов независимого эксперимента:

- Для АБ типа ВТУ 3000 (1) составляет 23 %.
- Для АБ типа ВТУ 3000 (2) составляет 18 %.
- Для АБ типа Camelion 2100 mAh составляет 8 %.



### **Вывод по 3 главе:**

Разработана математическая модель аккумуляторной батареи, учитывающей изменение внутреннего сопротивления. Модель является расчетной и состоит из трех формул. Важной особенностью предложенной модели является простота расчета и получения эксплуатационных характеристик. Необходимы всего три параметра аккумуляторной батареи - это начальное значение внутреннего сопротивления, начальное значение напряжения холостого хода и емкости. Фактически нет необходимости проводить экспериментальное исследование аккумуляторной батареи, занимающей большую затрату времени и высокую трудоемкость.

Сравнение результатов показало, что существующая и расчетная математические модели адекватны на всем протяжении разрядных характеристик. Наименьшее отклонение результатов составляют 2,35 % для существующей модели и 8% для расчетной модели.

## **Заключение**

В ходе выполнения магистерской диссертации выполнены следующие работы:

1. Проведен обзор научно-технической, нормативной методической документации, которая затрагивает научно-технические проблемы, исследуемые в рамках диссертации.

2. Проведено практическое исследование трех аккумуляторных батарей и моделирование существующей математической модели в среде Matlab / Simulink.

3. Разработана математическая модель аккумуляторной батареи, учитывающей изменение внутреннего сопротивления.

4. Проведено сравнение результатов моделирования существующей математической модели, расчетной математической моделью с независимым экспериментальным исследованием.

При выполнении поставленных задач получены следующие результаты:

1. Проведен аналитический обзор научно-технической литературы, затрагивающих аккумуляторные батареи их достоинства и недостатки и электрические характеристики. После анализа АБ для дальнейшего исследования были выбраны никель-металлгидридные аккумуляторные батареи. Они используются в бытовой электронной аппаратуре, работоспособны в любом положении и в интервале температур от -40 до +50 °С, герметичны, устойчивы к механическим нагрузкам, имеют высокие удельные характеристики и длительный срок службы и хранения, более экологически чистый из-за отказа от кадмия, в связи с этим легче решается проблема утилизации аккумуляторов и могут быть переработаны вторично.

Из обзора основных подходов к моделированию аккумуляторных батарей выбран метод описания данных, полученных в результате эксперимента. Он является наиболее верным для решения задач.

Использование результатов практического исследования позволяет избежать неверного аналитического описания характеристик.

2. Анализ результатов практического исследования показал, что большинство из выбранных для исследования аккумуляторных батарей имеет вполне приемлемые емкостные характеристики, но лучшими характеристиками обладает аккумулятор с большей емкостью. В нашем случае это аккумуляторная батарея типа Camelion 2100 mAh. Внутреннее сопротивление возрастает при разряде батареи, что особенно заметно в конце разряда батареи.

Анализ данных практического исследования показал, что за первые минуты разряда напряжение холостого хода  $U_{xx}$  падает на 3,3-5%, при последующем разряде  $U_{xx}$  падает на 0,75 В, в среднем на 4%.

Батарейный блок в программном обеспечении Matlab/Simulink позволяет моделировать 4 основных типа аккумуляторных батарей. Особенность данной модели является простота получения эксплуатационных характеристик. Необходимы всего три параметра для ввода в блок: номинальное напряжение; номинальная емкость; начальное состояние заряда. Но блок не учитывает изменение внутреннего сопротивления

Экспериментальное моделирование выбранных для исследования никель-металлгидридных аккумуляторных батарей показало, что математическая модель адекватна на всем протяжении разрядной характеристики.

3. Разработана математическая модель аккумуляторной батареи, учитывающей изменение внутреннего сопротивления. Модель является расчетной и состоит из трех формул. Важной особенностью предложенной модели является простота расчета и получения эксплуатационных характеристик. Необходимы всего три параметра аккумуляторной батареи - это начальное значение внутреннего сопротивления, начальное значение напряжения холостого хода и емкости. Фактически нет необходимости

проводить экспериментальное исследование аккумуляторной батареи, занимающей большую затрату времени и высокую трудоемкость.

4. Сравнение результатов показало, что существующая и расчетная математические модели адекватны на всем протяжении разрядных характеристик. Наименьшее отклонение результатов составляют 2,35 % для существующей модели и 8% для расчетной модели.

Научная новизна. Анализ эксплуатационных характеристик АБ по трем параметрам: начальному значению внутреннего сопротивления, начальному значению напряжения холостого хода и емкости. Результаты вычисления эксплуатационных характеристик АБ по методу расчета характеристик с помощью формул, основанному на использование двух параметров, что повышает достоверность оценки характеристик аккумуляторной батареи.

Полученные результаты полностью соответствуют поставленным задачам.

## Литература

1. Химические источники тока: Справочник / Под ред. Н. В. Коровина и А. М. Скундина. – М.: Издательство МЭИ, 2003. 740 с., ил.
2. Хрусталева Д. А. Аккумуляторы. – Москва: Изумруд, 2003.
3. Скоков Я.М. Химические источники тока. Стационарные аккумуляторы: Практическое пособие – Минск: ЗАО «Техноперспектива», 2004.
4. Таганова, А.А. Диагностика герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов и универсальный алгоритм их отбора в батарею [Текст]: дис. канд. тех. наук. Ленинград, 1990. - 150 с.
5. Бухаров А. И. и др. Средства заряда аккумуляторов и аккумуляторных батарей: Справочник / А. И. Бухаров, И. А. Емельянов, В. П. Суднов. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 288 с.: ил.
6. Болотовский, В. И. Эксплуатация, обслуживание и ремонт свинцовых аккумуляторов [Текст] / В.И. Болотовский, З.И. Вайсгант. Ленинград: Энергоатомиздат, 1988. - 196 с.
7. Орлов, В.А. Малогабаритные источники тока [Текст] / В.А. Орлов. - 2 изд. Москва: Воениздат, 1970. – 224 с.
8. Романов, В.В. Химические источники тока [Текст] / В.В. Романов, М.Ю. Хашев. Москва: Химиздат, 1968. – 307 с.
9. Васильев К. К. Математическое моделирование систем связи : учебное пособие / К. К. Васильев, М. Н. Служивый. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 170с
10. Савенков В.В. Моделирование, разработка и экспериментальное исследование электротехнических систем питания автономных объектов. Дисс. к.т.н., ВГТУ, Воронеж, 2002.
11. Солнечные энергосистемы космических аппаратов. Физическое и математическое моделирование / К. В. Безручко, Н. В. Белан, Д.Г. Белов и др./ Под ред. акад. НАН Украины С. Н. Конюхова. – Харьков: Гос. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2000. – 515 с.

12. Галушкина Н. Н. Структурная модель щелочного аккумулятора. Релаксационная поляризация / Н. Н. Галушкина, Д. Н. Галушкин // Электрохимическая энергетика. - 2005. - Т.6, №1. - С. 41-45.
13. Галушкин Н. Е. Анализ эмпирических зависимостей, описывающих разряд щелочных аккумуляторов / Н. Е. Галушкин, Н. Н. Галушкина // Электрохимическая энергетика. - 2005. - Т.5, № 1. - С. 43-50.
14. Appelbaum, J and Weiss, R., "Estimation of Battery Charge in Photovoltaic Systems", 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 513-518, 1982
15. Mao Z. and White R. E., J. Electrochem. Soc., 138, 3354 (1991).
16. Mao Z. and White R. E., J. Electrochem. Soc., 139, 1282 (1992).
17. Сазанов А.Б. Математическое моделирование режимов работы аккумуляторных батарей.// Научно-технический журнал «Техника машиностроения», №2, Москва, 2007, «Виращ-центр», стр.27-30.
18. Dalton, P., Cohen, F., "Battery Reinitialization of the Photovoltaic Module of the International Space Station," paper no.20033, Proceedings of the 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Washington DC, July 28-August 2, 2002.
19. Dalton, P., Cohen, F., "International Space Station Nickel-Hydrogen Battery On-Orbit Performance," paper no.20091, Proceedings of the 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Washington DC, July 28-August 2, 2002.
20. Moore, Stephen and Merhdad Eshani, Texas A&M, "An Empirically Based Electrosource Horizon Lead-Acid Battery Model", Strategies in Electric and Hybrid Vehicle Design, SP-1156, 1996, pp.135-138
21. Теньковцев В.В., Центр Б.И., Основы теории и эксплуатации герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд., 1985.
22. Центр Б.И., Лызлов Н.Ю. Металл-водородные электрохимические системы. Теория и практика. Л.: Химия, 1989, 282 с.

23. Большой энциклопедический словарь: [А – Я] [Текст] / ред. А. М. Прохоров. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Большая Российская энциклопедия; Норинт, 1997. – 1408 с.
24. Тищенко А.К., Ганкевич П.Т., Савенков В.В. Особенности проектирования унифицированных высоковольтных систем электроснабжения космических аппаратов// Воронеж. Энергия: Научно-практ. вестник. -1999 -№1-2 стр. 6-17
25. Sources 76 (1998) 210-214
26. Савенков В.В. Моделирование, разработка и экспериментальное исследование электротехнических систем питания автономных объектов. Дисс. к.т.н., ВГТУ, Воронеж, 2002.
27. Солнечные энергосистемы космических аппаратов. Физическое и математическое моделирование / К. В. Безручко, Н. В. Белан, Д.Г. Белов и др./ Под ред. акад. НАН Украины С. Н. Конюхова. – Харьков: Гос. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т»,2000. – 515 с.
28. Dunlop J.D., Rao G.M., Yi T.Y., NASA Handbook for Nickel-Hydrogen Batteries, NASA Reference Pub. 1314, September 1993.
29. Dunlop J.D., Giner J., Van Ommering G., Stockel J.F., Nickel Hydrogen Cell, U.S. Patent 3867299, 1975.
30. Baudry, P. et al, "Electro-thermal modeling of polymer lithium batteries for starting period and pulse power", Journal of Power Sources, Vol 54, pp. 393-396, 1995
31. Merkle, Matthew A., 1997, "Variable Bus Voltage Modeling for Series Hybrid Electric Vehicle Simulation", Master's Thesis, Virginia Tech
32. Electronic-network modelling of rechargeable NiCd cells and its application to the design of battery management system / H.J.Bergveld, W.S.Kruijt, P.H.L.Notten // Journal of Power Sources- 77, - 1999, -P. 143-158.
33. Lvov S.N., MacDonald D.D., Thermodynamic behavior of Ni-Cd and Ni-H<sub>2</sub> batteries over wide ranges of temperatures (0-200 °C), KOH concentrations

- (0.1-20 mol kg<sup>-1</sup>) and H<sub>2</sub> pressure (0.1-500 bar), J. Power Sources 72 (1998) 136-145.
34. Большой энциклопедический словарь: [А – Я] [Текст] / ред. А. М. Прохоров. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Большая Российская энциклопедия; Норинт, 1997. – 1408 с.
  35. Roan, Vernon P. and Anand Raman, U of Florida, "An Approach to Incorporating Age and Electrolyte Temperature Effects on Performance Simulation of Electric/Hybrid Vehicle batteries", American Chemical Society, 1993, pp. 2.229-2.237
  36. Milner P. C. and Thomas U. B., in Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering, Vol. 5, C. W. Tobias, Editor, p. 1, Interscience, New York (1967).
  37. Tremblay, O.; Dessaint, L.-A.; Dekkiche, A.-I., A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles, Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE , pp. 284-289, 9-12 Sept. 2007..
  38. Zhu, C., X. Li, L. Song, and L. Xiang, "Development of a theoretically based thermal model for lithium ion battery pack." Journal of Power Sources. Vol. 223, pp. 155–164.
  39. Saw, L.H., K. Somasundaram, Y. Ye, and A.A.O. Tay, "Electro-thermal analysis of Lithium Iron Phosphate battery for electric vehicles." Journal of Power Sources. Vol. 249, pp. 231–238.
  40. Shepherd, C. M., Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge, Journal of Electrochemical Society, Volume 112, July 1965, pp 657-664.
  41. Rynkiewicz, R., Discharge and charge modeling of lead acid batteries, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1999. APEC '99. Fourteenth Annual , vol.2, no., pp.707-710 vol.2, 14-18 Mar 1999



42. Durr, Matthias; Cruden, Andrew; Gair, Sinclair; Mc-Donald, J.R, Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system, Journal of Power Sources, Volume 161, no 2, Oct 27, 2006, pp. 1400-1411.
43. Kuhn, E.; Forgez, C.; Lagonotte, P.; Friedrich, G., Modelling Ni-MH battery using Cauer and Foster structures, Journal of Power Sources, v 158, no 2 SPEC. ISS., Aug 25, 2006, pp. 1490-1497.
44. Tremblay, O., L.-A. Dessaint, "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications." World Electric Vehicle Journal. Vol. 3, May 13–16, 2009
45. Туркин И. Б. Метод параметрической идентификации схемы замещения химических источников тока / И. Б. Туркин // Авіаційно-космічна техніка і технологія. - 2000. - Вип.15. - С. 136-140.