

УДК 621.355.1

А.О. ДАВИДОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ОСНОВНЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРОВ

*В статье рассмотрены основные режимы эксплуатации электрохимических аккумуляторов, приведены схемы подключения аккумулятора в этих режимах и примеры их использования. Рассмотрены электрические параметры электрохимических аккумуляторов, а также проведен сравнительный анализ электрических параметров аккумуляторов различных электрохимических систем. Рассмотрены эксплуатационные параметры электрохимических аккумуляторов. Показана значимость электрических и эксплуатационных параметров при эксплуатации аккумуляторов в различных режимах. Приведены функциональные зависимости основных характеристик и параметров аккумуляторов.*

**Ключевые слова:** электрохимический аккумулятор, режим работы, емкость, ресурс, характеристика, параметр.

### Введение

В современных публикациях не всегда однозначно определены основные параметры и характеристики электрохимических аккумуляторов. Согласно стандарту [1] и литературным данным [2 – 8] параметры и характеристики аккумуляторов можно разделить на несколько категорий: электрические параметры; эксплуатационные характеристики; характеристики надежности; технико-экономические характеристики.

Причем, в зависимости от области применения и режимов эксплуатации на первый план выступают те либо иные параметры. Так, например, аккумуляторы, работающие в циклическом режиме должны оцениваться по совокупности значений основных параметров: реальной емкости, внутреннему сопротивлению, току саморазряда, а для аккумуляторов, работающих в дежурном режиме достаточно оценки только по емкости и саморазряду.

В данной статье мы проведем классификацию режимов эксплуатации аккумуляторов и рассмотрим, какие из электрических параметров и эксплуатационных характеристик являются актуальными при каждом из режимов эксплуатации.

### 1. Основные режимы эксплуатации электрохимических аккумуляторов

Современные электрохимические аккумуляторы, в зависимости от области применения, могут эксплуатироваться в таких режимах (рис. 1): буферный, циклический, дежурный, стартерный, режим основного источника и режим хранения.

**Буферный режим** (режим постоянного подзаряда, float service) – режим при котором аккумулятор всегда подключен к источнику постоянного тока (рис. 2, а). При возрастании токовой нагрузки аккумулятор частично разряжается, а при снижении нагрузки – подзаряжается.

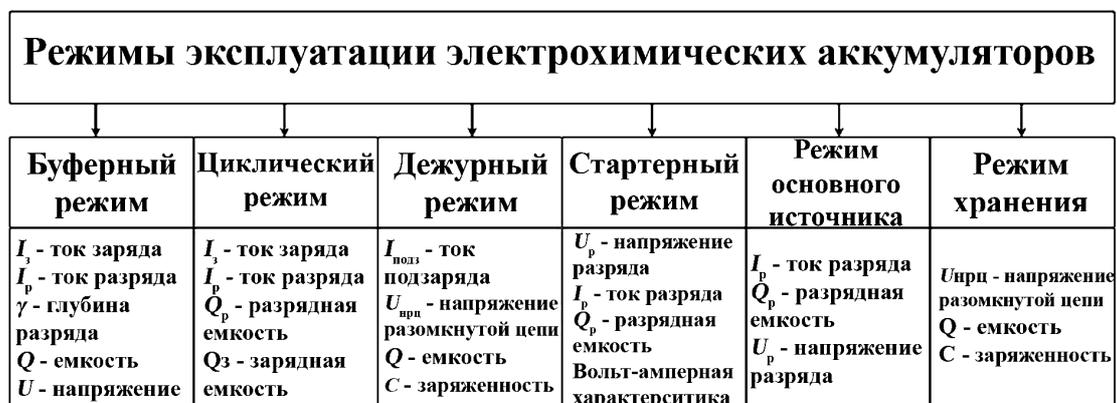


Рис. 1. Режимы эксплуатации электрохимических аккумуляторов

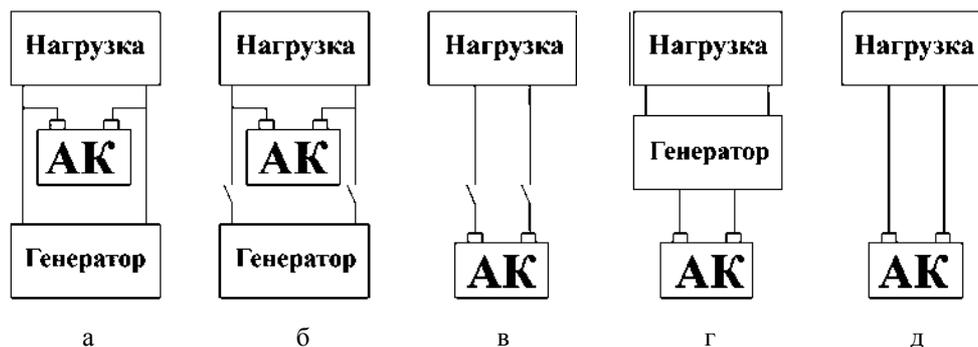


Рис. 2. Схемы подключения аккумуляторов при различных режимах эксплуатации:  
 а – буферный режим; б – циклический режим; в – дежурный режим;  
 г – стартерный режим; д – режим основного источника

При этом также происходит компенсация саморазряда аккумулятора. Таким образом, при таком режиме эксплуатации, аккумулятор включен во внешнюю цепь параллельно с другим источником тока, имеющим близкое напряжение. Целью эксплуатации аккумуляторов в буферном режиме является стабилизация напряжения питания в системе и компенсация энергопотребления при пиковых нагрузках, превышающих мощность основного генератора тока.

**Примеры:** космические аппараты, сетевые блоки питания, источники бесперебойного питания, резервное питание различных приборов и устройств.

**Циклический режим (duty cyclic)** – режим работы, предполагающий последовательное (многократное) проведение заряда и разряда аккумулятора (рис. 2, б). При этом режиме эксплуатации вначале производится заряд аккумулятора и отключение его от зарядного устройства. При этом следующий цикл заряда осуществляется только после разряда аккумулятора или через определенное время для компенсации саморазряда. Разряд может быть полным, непрерывным или прерывистым, также как и заряд может быть полным и неполным (неглубоким).

**Примеры:** различный электротранспорт, мобильные телефоны, шахтерские фонари.

**Дежурный режим (standby conditions)** – режим работы аккумулятора, при котором он в процессе эксплуатации находится в режиме ожидания в заряженном состоянии (рис. 2, в).

Пример: стартовый комплекс во время дежурства.

**Стартерный режим (режим пуска, starting duty)** – режим работы аккумулятора, при котором аккумулятор предназначен для запуска основного генератора тока (рис. 2, г). После запуска основного генератора вся система питается от него, а аккумулятор переключается на заряд.

**Примеры:** автомобильный и авиационный транспорт.

**Режим основного источника** – режим работы, при котором заряженный аккумулятор разряжается на потребителя энергии без дальнейшего заряда (рис. 2, д).

**Пример:** ракета-носитель во время старта, первые космические аппараты.

**Режим хранения (standby mode)** – режим работы аккумулятора, при котором он находится в нерабочем состоянии до ввода в эксплуатацию, либо после консервации (табл. 1).

Таблица 1

Способы хранения аккумуляторов различных электрохимических систем

Параметры хранения	Аккумулятор			
	Ni-Cd	Ni-MH	Pb-H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Li
Рекомендуемое состояние хранения	Разряженный полностью (до 1 В)	Заряженные на 50 %	Заряженные	Заряженные на 50 %
Допускаемый диапазон температуры хранения °С	-20 ... +45	-20 ... +30	-20 ... +45	-20 ... +30
Рекомендуемый диапазон температуры хранения °С	+5 ... +25	+5 ... +25	-15 ... +30	+5 ... +25

## 2. Основные электрические параметры аккумуляторов

В общем виде **напряжение аккумулятора** (battery voltage) – это разность потенциалов между выводами аккумулятора [1].

Однако в электроэнергетике используют несколько понятий напряжения [2]:

– **ЭДС электрохимической системы** (voltage) – теоретическая разность потенциалов аккумулятора, к которому не подключен потребитель:

$$E = \varphi_a - \varphi_k,$$

где  $\varphi_a$  – потенциал анода;  $\varphi_k$  – потенциал катода.

ЭДС электрохимической системы определяется потенциалом электрода, в связи с этим **ЭДС заряженного аккумулятора** различается от **ЭДС разряженного аккумулятора**

**Напряжение при заряде** превышает величину ЭДС, а напряжение аккумулятора **при разряде** всегда ниже величины ЭДС:

$$U_p = E - E_{\Pi} - I \cdot R_{вн},$$

где  $E_{\Pi}$  – ЭДС поляризации;  $I$  – ток разряда;  $R_{вн}$  – внутреннее сопротивление;

– **напряжение разомкнутой цепи** (open-circuit voltage) – разность потенциалов между выводами аккумулятора при разомкнутой внешней цепи;

– **начальное напряжение разряда** (initial potential) – напряжение аккумулятора в начале непрерывного разряда или в начале первого периода разряда при прерывистом разряде (рис. 3, а, точка А);

– **конечное напряжение разряда** (end-of-discharge voltage) – заднее напряжение, ниже которого аккумулятор считается разряженным (рис. 3, а, точка Б);

– **среднее напряжение разряда** (average voltage) – среднее значение напряжений, измеренных через равные интервалы времени в течение непрерывного разряда аккумулятора (рис. 3, а, точка В):

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N U_i,$$

где  $N$  – число замеров (не менее пяти) через одинаковые интервалы времени;

– **номинальное напряжение** (nominal voltage) – условное напряжение, определяемое электрохимической системой аккумулятора.

Графическое изображение зависимости зарядного или разрядного напряжения от времени (емкости) является **разрядными** (рис. 3, а) или **зарядными** (рис. 3, б) **характеристиками аккумулятора**.

В общем виде **емкость аккумулятора** (capacity) – это мера способности аккумулятора накапливать электрический заряд.

Как и в случае напряжения, различают несколько разновидностей емкости аккумулятора [2]:

– **разрядная емкость аккумулятора** (discharge capacity) [1] – это величина, соответствующая количеству электричества в ампер-часах, которое аккумулятор может отдать при разряде от начального до конечного напряжения при определенном режиме разряда:

$$Q_p = \int_0^{\tau} I_p dt;$$

– **зарядная емкость аккумулятора** (storage capacity) – это величина, соответствующая количеству электричества, которое аккумулятор может принять при заряде:

$$Q_3 = \int_0^{\tau} I_3 dt;$$

– **номинальная емкость** (rated capacity) – минимально допустимая емкость аккумулятора, которую тот должен отдавать в режиме работы, указанном заводом-изготовителем. Это указываемая изготовителем емкость, на которую рассчитан аккумулятор.

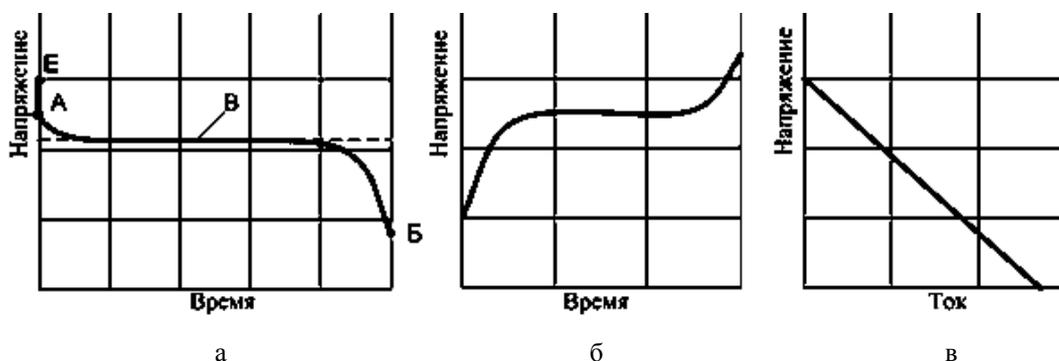


Рис. 3. Схематическое изображение разрядной, зарядной и вольтамперной характеристик аккумуляторов: а – разрядная кривая; б – зарядная кривая; в – вольтамперная кривая; А – начальное напряжение разряда; Б – конечное напряжение разряда; В – среднее напряжение разряда

– **удельная емкость** (specific capacity) – величина равная отношению емкости аккумулятора к его объему  $Q_V = \frac{Q_P}{V}$  или массе  $Q_m = \frac{Q_P}{m}$ ;

– **остаточная емкость** (residual capacity) – величина, соответствующая количеству электричества в ампер-часах, которое частично разряженный химический источник тока может отдать при установленном режиме разряда до конечного напряжения.

Реальное значение емкости нового аккумулятора на момент ввода его в эксплуатацию колеблется от 80 до 110% от номинального значения и зависит от фирмы-изготовителя, условий и срока хранения, а также технологии ввода аккумулятора в эксплуатацию.

Одной из важных характеристик аккумуляторов является **внутреннее сопротивление** (internal resistance) – сумма омического сопротивления аккумулятора и поляризационных сопротивлений его электродов:

$$R = r_{\Pi} + r_{OM}.$$

**Поляризационное сопротивление** электрода (polarization resistance) это сопротивление, численно равное отношению значения поляризации электрода к значению проходящего через электрод тока.

**Омическое сопротивление** аккумулятора (ohmic resistance) это сумма активных составляющих комплексного электрического сопротивления электролита, электродов и других токоведущих деталей аккумулятора.

**Импеданс** электрохимического аккумулятора это сопротивление аккумулятора протекающему через нее переменному току.

Также для характеристики аккумуляторов используют следующие параметры:

– **энергия** (energy), получаемая аккумулятором при заряде или отдаваемая аккумулятором во внешнюю цепь при определенных условиях разряда, равна произведению его емкости на среднее напряжение разряда:

$$W_3 = \int_0^{\tau_3} U_3 \cdot I_3 dt, \quad W_P = \int_0^{\tau_P} U_P \cdot I_P dt;$$

– **удельная энергия** (specific energy, energy density) – отношение энергии химического источника

тока к его объему  $W_V = \frac{Q_P}{V} \cdot \bar{U}_P$  или массе

$$W_m = \frac{Q_P}{m} \cdot \bar{U}_P;$$

– **ток разряда** (discharge rate) – ток, отдаваемый аккумулятором во внешнюю цепь при разряде;

– **ток короткого замыкания** (flash current) – максимальное значение тока разряда аккумулятора при коротком замыкании внешней цепи.

Графическое изображение зависимости напряжения аккумулятора от силы тока называется **вольтамперной характеристикой** (volt-ampere characteristic) (рис. 3, в).

### 3. Основные эксплуатационные характеристики аккумуляторов

**Срок хранения** (storageability time) – период хранения аккумулятора до ввода в эксплуатацию.

В общем случае **срок службы** (lifetime) аккумулятора – это календарная продолжительность от начала эксплуатации аккумулятора до перехода в предельное состояние [1, 5]. Предельное состояние – это состояние аккумулятора, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

**Наработка** (runtime) – время, которое аккумулятор проработал после ввода в эксплуатацию [1, 4]. Нарботка может быть как непрерывной величиной (продолжительность в часах), так и целочисленной величиной (число циклов).

**Ресурс аккумулятора** (life time) – суммарная наработка аккумулятора от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

**Сохранность заряда** (safety charge) – свойство аккумулятора сохранять емкость во время хранения при разомкнутой внешней цепи. Сохранность заряда напрямую зависит от явления **саморазряда** (self-discharge) – потери энергии, обусловленной протеканием в аккумуляторе самопроизвольных процессов. Саморазряд S обычно выражают в процентах потери емкости за сутки [2 – 4]:

$$S = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100,$$

где  $Q_1$  – емкость аккумулятора до хранения;  $Q_2$  – емкость аккумулятора после хранения;  $\tau$  – продолжительность хранения в сутках.

Что касается эксплуатационных характеристик аккумуляторов, следует отметить:

– **срок годности** (useful time) аккумулятора в годах, который равен сумме срока хранения и времени эксплуатации, в течение которого наработка аккумулятора достигает его срока службы;

– **глубина разряда** (depth of discharge) [3, 4] – показывает сколько энергии было забрано из аккумулятора; выражается в процентах от общей емкости;

– **заряженность** (state of charge) – параметр, противоположный глубине разряда. Этот параметр более характерен для аккумуляторов, находящихся в дежурном режиме;

– **отдача по емкости** (capacity efficiency) – отношение количества электричества, отданного аккумулятором нагрузке при разряде, к количеству электричества, полученному аккумулятором от источника электроэнергии при заряде.

– **отдача по энергии** (energy efficiency) – отношение количества энергии, отданной аккумулятором в нагрузку при разряде, к количеству энергии, полученной от источника электроэнергии при заряде;

– **эффективность заряда** (charge efficiency) – процентное отношение емкости полученной аккумулятором при заряде к емкости потраченной на заряд источником электроэнергии;

– **эффективность разряда** (discharge efficiency) – процентное отношение емкости полученной нагрузкой при разряде к емкости отданной аккумулятором;

– **степень заряженности** – отношение остаточной емкости к номинальной; актуальна в случаях, если аккумулятор был не полностью заряжен, либо частично разряжен.

Эксплуатационные характеристики аккумуляторов определяются как конструкцией, так и режимами эксплуатации. Если конкретный тип аккумулятора не имеет явных конструктивных недостатков, то определяющим фактором, влияющим на эксплуатационные характеристики, являются условия эксплуатации.

На рис. 4 представлена схема, на которой показаны основные параметры и характеристики электрохимических аккумуляторов. В табл. 2 приведены параметры аккумуляторов различных электрохимических систем.



Рис. 4. Основные параметры и характеристики электрохимических аккумуляторов

Таблица 2

Параметры аккумуляторов различных электрохимических систем

Параметр	Аккумулятор						
	Pb-H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ni-Cd	Ni-MH	Ni-H <sub>2</sub>	Li-ion	Li-pol	
Напряжение, В	2,1	1,0-1,35	1,2	1,25	3,6	3,6	
Внутреннее сопротивление, мОм	< 100	100-200	200-300	< 100	150-250	200-300	
Удельная энергия,							
							кДж/кг
Скорость саморазряда, % мес.	3-20	10	30	> 40	10	8-31	
Эффективность заряда, %	50-92	70-90	66	70-90	80-90	80-90	
Ресурс, циклы	500-800	2000	500-1000	500-1000	500-1000	300-500	

## Заключение

Исследования характеристик электрохимических аккумуляторов может проводиться как теоретически (с использованием математических моде-

лей), так и экспериментально. При исследованиях характеристик аккумуляторов учитываются условия функционирования аккумуляторов в составе систем электроснабжения, режимы работы аккумуляторов, глубина разряда, предельные значения токов заряда-

разряда, температурный диапазон работы, требуемый ресурс и др.

При теоретическом исследовании характеристик аккумуляторов рассматриваются либо оптимизационные задачи, решаемые на ранних стадиях разработки, либо энергобалансные задачи, решаемые при эскизном и техническом проектировании, иногда – при испытаниях систем энергоснабжения [1]. При экспериментальном исследовании характеристик аккумуляторов необходимо исследовать характеристики и эксплуатационные свойства аккумуляторов в различных режимах работы для оценки возможности и целесообразности их использования в составе систем энергоснабжения разрабатываемого космических аппаратов.

### Литература

1. ГОСТ 15596-82. Источники тока химические. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 15596-78; введ. 01.06.2005. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2005. – 15 с.

2. Справочник по электрохимии / Под ред. А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1981. – 488 с.

3. Варыпаев В.Н. Химические источники тока: учеб. пособие для хим.-технол. спец. вузов / В.Н. Варыпаев, М.А. Дасоян, В.А. Никольский; под ред. В.Н. Варыпаева. – М.: Высш. шк., 1990. – 240 с.

4. Прикладная электрохимия / Н.П. Федотьев, А.Ф. Алабышев, А.Л.Рогинян и др. – Л.: ГНТИ Химической литературы, 1962. – 640 с.

5. Коровин Н.В. Электрохимическая энергетика / Н.В. Коровин. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 264 с.

6. Багоцкий В.С. Новейшие достижения в области химических источников тока / В.С. Багоцкий, В.Н. Флеров. – М.-Л.: Государственное энергетическое изд-во, 1963. – 256 с.

7. Орлов, В.А. Малогабаритные источники тока / В.А. Орлов. – М., 1970. – 224 с.

8. Романов В.В. Химические источники тока / В.В. Романов, Ю.М. Хашев. – М.: Советское радио, 1978. – 263 с.

Поступила в редакцию 31.05.2100

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. каф. 202 В.Н. Доценко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

## ОСНОВНІ ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПАРАМЕТРИ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ АКУМУЛЯТОРІВ

*А.О. Давідов*

В статті розглянуті основні режими експлуатації електрохімічних акумуляторів, приведені схеми підключення акумуляторів при таких режимах та приклади їх використання. Розглянуті електричні параметри електрохімічних акумуляторів, також приведено порівняльний аналіз електричних параметрів акумуляторів різноманітних електрохімічних систем. Розглянуто експлуатаційні параметри електрохімічних акумуляторів. Показано значимість електричних та експлуатаційних параметрів при експлуатації акумуляторів в різних режимах. Приведено функціональні залежності основних характеристик та параметрів акумуляторів.

**Ключові слова:** електрохімічний акумулятор, режим роботи, ємність, ресурс, характеристика, параметр.

## THE BASIC OPERATIONAL PARAMETERS AND CLASSIFICATION OF OPERATING MODES OF ELECTROCHEMICAL ACCUMULATORS

*A.O. Davidov*

In paper the basic operating modes of electrochemical accumulators are observed, circuit designs of connection of the accumulator in these regimes and instances of their use are resulted. Electric parameters of electrochemical accumulators are observed, and also the comparative analysis of electric parameters of accumulators of various electrochemical systems is carried out. Operational parameters of electrochemical accumulators are observed. The significance of electric and operational parameters is shown at maintenance of accumulators in various regimes. Functional dependences of the basic characteristics and parameters of accumulators are resulted.

**Key words:** the electrochemical accumulator, operating mode, capacity, resource, the characteristic, parameter.

**Давидов Альберт Оганезович** – канд. техн. наук, докторант кафедри энергоустановок и двигателей космических летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.