

## РАСЧЁТ ВРЕМЕНИ РАЗРЯДА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ

*Ваниюков Андрей Юрьевич, ст. преп., КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч.Айтматова 66. Тел: + 996 (312) 542986, e-mail: vanjukov@rambler.ru, ORCID ID 0000-0003-4861-8945*

*Чепашева Татьяна Сергеевна, ст. преп., КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч.Айтматова 66. Тел: + 996 (312) 542986, e-mail: tatianas.chepasheva@list.ru, ORCID ID 0000-0002-2340-5006*

**Аннотация.** Рассмотрено назначение и применение аккумуляторных батарей в технике. Показана актуальность расчёта времени разряда для аккумулятора. Приведены сравнительные данные по разным видам аккумуляторов и рассчитана нормированная стоимость одного цикла. Даны типовые разрядные характеристики аккумуляторов, такие как зависимость ёмкости от тока разряда, температуры, числа циклов заряд/разряд. Рассмотрены причины, по которым ёмкость аккумулятора, как главная его характеристика, не является постоянной при различных условиях эксплуатации. Указаны условия, при которых аккумулятор отдаёт наибольшую энергию. Проанализирована возможность преобразования графиков или данных разряда, связанных с ёмкостью в расчётные формулы. Рассмотрены формулы и метод расчёта на основе экспоненты Пекерта. Приведена схема для измерения разрядной характеристики. Рассмотрен способ расчёта на основе линейной интерполяции при ограниченных данных. Сравняется метод расчёта на базе формул Пекерта и на основе интерполяции данных разряда. Проанализированы исходные данные для программного расчёта. Рассмотрен способ программной реализации расчёта времени разряда. Был проведён эксперимент для опытного аккумулятора, получены числовые данные его разряда, выполнена интерполяция данных и по ней проведён расчёт, который хорошо согласуется с практическими измерениями.

**Ключевые слова:** аккумулятор, ёмкость аккумулятора, разряд аккумулятора, температура, разрядная характеристика, время разряда, экспонента Пекерта, энергия, интерполяция

## DISCHARGE TIME CALCULATION OF THE ELECTROCHEMICAL ACCUMULATORS ON THE BASE OF THE DATA ANALYSIS

*Vaniukov Andrei, senior teacher, KSTU named after I.Razzakov, Kyrgyzstan, 720044, c. Bishkek, Ch. Aitmatov avenue, 66. Phone: + 996 (312) 542986, e-mail: vanjukov@rambler.ru, ORCID ID 0000-0003-4861-8945*

*Chepasheva Tatiana, senior teacher, KSTU named after I.Razzakov, Kyrgyzstan, 720044, c. Bishkek, Ch. Aitmatov avenue, 66. Phone: + 996 (312) 542986, e-mail: tatianas.chepasheva@list.ru, ORCID ID 0000-0002-2340-5006*

**Abstract.** Appointment and application of accumulator batteries in technics is observed. The actuality of the discharge time calculation for the battery is shown. Comparative data on different types of accumulators are given and the normalized cost of one cycle is calculated. Typical discharge characteristics of accumulators, such as dependence of capacity on a discharge current, temperature, numbers of cycles a charge/discharge are given. The reasons, on which accumulator capacity as its main characteristic, is not a constant under various service conditions are observed. Conditions at which the accumulator gives the greatest energy are specified. Possibility of transformation of schedules or the data of the discharge connected with capacity in design formulas is analyzed. Formulas and a calculation method on a basis Peukert constant are observed. The circuit for measurement of the discharge characteristic is resulted. The way of calculation on the basis of linear interpolation is observed at the restricted data. The method of calculation on the basis of formulas of Peukert and on the basis of interpolation of the data of the category are compared. Initial data for program calculation are analyzed. The method of software realization of the discharge time calculation is considered. An experiment was conducted for an experimental accumulator, numerical data of its discharge were obtained, interpolation of the data was carried out, and calculations were carried out on it, which is in good agreement with practical measurements.

**Keywords:** accumulator, accumulator capacity, accumulator discharge, temperature, discharge curve, discharge time, Peukert constant, energy, interpolation

### Введение

Аккумуляторы широко используются в различных системах и устройствах. Аккумулятор является устройством, преобразующим накопленную химическую энергию в электрическую. В аккумуляторах реакции на электродах обратимы, поэтому они могут быть возвращены в первоначальное состояние, путём заряда. В процессе заряда электрическая энергия преобразуется в запаасаемую химическую энергию. Разряд аккумулятора – это преобразование накопленной химической энергии в электроэнергию для потребления внешней цепи. В сравнении с гальваническими элементами аккумуляторы обеспечивают меньшую стоимость использования. По сравнению с вторичными источниками электропитания аккумуляторы обеспечивают мобильность устройств и пользователей. Можно привести ряд применений аккумуляторов в технике:

- 1) на телефонных и базовых станциях [10];
- 2) в источниках бесперебойного питания компьютеров и серверов [5];
- 3) в солнечных энергоустановках [1];
- 4) в ноутбуках, сотовых телефонах и планшетах [4];
- 5) в автомобильном транспорте;
- 6) в часах, фотокамерах и калькуляторах;
- 7) в портативных электроизмерительных приборах.

Актуальной является задача расчёта времени разряда аккумуляторов при различных условиях эксплуатации. Данный расчёт востребован, что можно, например, проследить по статистике поисковых запросов сети Интернет. В технической документации такая информация часто не приводится или даётся в неполной форме.

Расчёт времени разряда аккумуляторной батареи необходим для того, чтобы правильно подобрать аккумулятор для проектируемого устройства или определить возможности уже существующего аккумулятора. Если правильно выбран аккумулятор, то он будет работать при более благоприятных условиях разряда, что приведёт к большему сроку

службы аккумулятора. Такой расчёт потребуется для «продвинутых» устройств, где пользователям указывается оставшееся время работы от аккумулятора. Если рассчитывается время разряда, то аккумулятор будет меньше использоваться в режиме полного разряда, что в итоге увеличит срок службы аккумулятора. Следует отметить, что точный расчёт здесь невозможен по причине сложных явлений в аккумуляторе, разбросе его характеристик даже в одной партии одного производителя.

Целью настоящего исследования является разработка методики расчёта времени разряда различных видов аккумуляторов для различных условий эксплуатации.

Научно-практическая актуальность приведенного исследования является высокой, по следующим основаниям:

1) Внедрение полученных результатов в практику экономически целесообразно, так как стоимость аккумуляторов является высокой, а использование предложенного метода позволит продлить срок службы аккумулятора;

2) В результатах исследования заинтересовано много пользователей, так как аккумуляторы широко используются в технике.

### Виды и характеристики аккумуляторов

Для широкого применения нашли применение несколько типов аккумуляторов, которые получили своё название по химическому составу электродов: никель-кадмиевые (Ni-Cd), никель-металлогидридные (NiMH), свинцовые кислотные (Lead-Acid), литий-ионные (Li-Ion) и литий-полимерные (Li-Pol) [7].

Одной из основных характеристик аккумулятора является ёмкость – количество электрической энергии, которое выделяет аккумулятор при определённых условиях разряда, выраженное в ампер-часах ( $A \cdot ч$ ) или миллиампер-часах ( $mA \cdot ч$ ). Ёмкость аккумулятора  $C$  встречается чаще, чем другие параметры, так как она зависит от условий эксплуатации в меньшей степени, чем другие характеристики. Большинство аккумуляторов стандартизированы по размерам и ёмкостям. В таблице 1 приведены характеристики [9] различных видов аккумуляторов наиболее широко применяемых в технике. В таблице приведён расчёт стоимости цикла на  $1 A \cdot ч$  и  $1 B$  по средним ценам на декабрь 2017 г. в г. Бишкек. Для примера, рассчитаем данный параметр для Li-Ion аккумулятора с параметрами: ёмкость -  $2600 mA \cdot ч$ , стоимость -  $380 сом$ , число циклов заряд/разряд -  $1000$  и напряжение -  $3,7 B$ :

$$V = \frac{380}{2,6 \cdot 1000 \cdot 3,7} = 0,04 \frac{сом}{A \cdot ч \cdot B}$$

Таблица 1.

Виды и характеристики аккумуляторных батарей

Характеристики	Типы аккумуляторных батарей				
	Ni-Cd	NiMH	Lead-Acid	Li-Ion	Li-Pol
Число циклов заряд / разряд до снижения емкости на 80 %	1500	500	300	1000	500
Саморазряд за месяц при комнатной температуре, %	20	30	5	10	10
Пиковый ток относительно ёмкости $C$	$20C$	$5C$	$5C$	$2C$	$2C$
Диапазон рабочих температур, $^{\circ}C$	-40 +60	-20 +60	-20 +60	-20 +60	0 +60
Стоимость одного цикла, нормированная к ёмкости, $сом / (A \cdot ч \cdot B)$	0,08	0,2	0,08	0,04	0,16

Фактически невозможно выбрать аккумулятор, который подходит по всем параметрам, поэтому выбор здесь является компромиссом между различными характеристиками.

### Разряд аккумуляторов

Ёмкость аккумулятора зависит от разрядного тока. На значение ёмкости влияет также температура электролита, число циклов заряд/разряд и другие факторы. В качестве примера рассмотрим характеристики одного из никель-металлогидридных аккумуляторов. Характеристики даются производителем графически для заряда, разряда и хранения. Так как в дальнейшем мы будем рассчитывать время разряда аккумулятора, то остановимся на характеристиках разряда (рис. 1-3). Подобные разрядные характеристики можно снять самостоятельно и результаты использовать в расчётах. Здесь указаны типовые, характерные для большинства аккумуляторов зависимости. Характеристики аккумуляторов очень похожи, поэтому рассмотрев метод расчёта для одного аккумулятора, его можно использовать с незначительными изменениями для других моделей аккумуляторов. Максимальная ёмкость отдаётся аккумулятором при температуре, близкой к комнатной (рис. 1), при увеличении и, особенно, при уменьшении температуры ёмкость падает. Чем выше ток разряда аккумулятора, тем меньше будет ёмкость аккумулятора (рис. 2). При увеличении числа циклов заряд/разряд ёмкость уменьшается значительно (рис. 3). Рассмотренные зависимости имеют свои особенности, например, график на рис. 3 зависит от степени разряда аккумуляторной батареи.

Полную ёмкость аккумулятора (100%) практически невозможно извлечь. Производители в технической спецификации указывают допустимую глубину разряда аккумулятора. Считается, что глубина разряда 30% соответствует максимальному сроку службы аккумулятора.

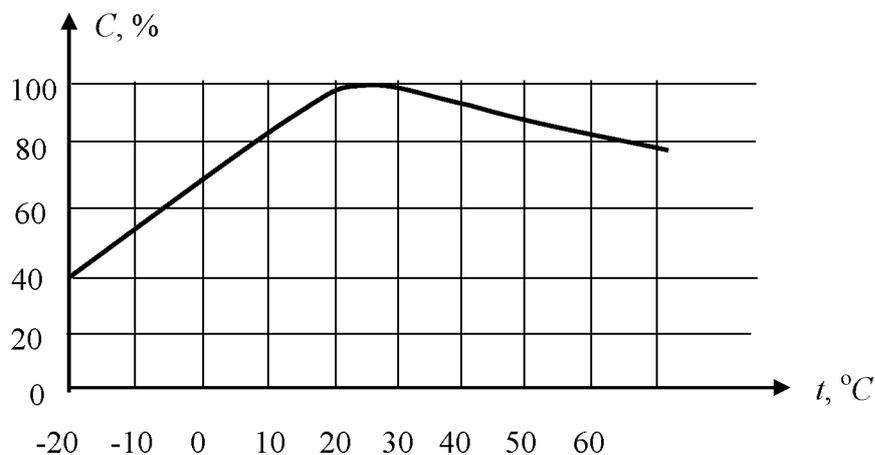


Рис. 1. Изменение ёмкости от температуры

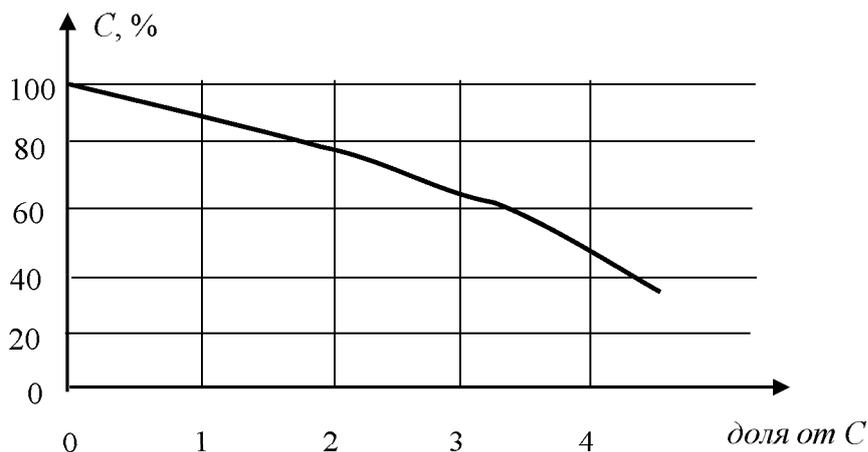


Рис. 2. Изменение ёмкости от скорости разряда

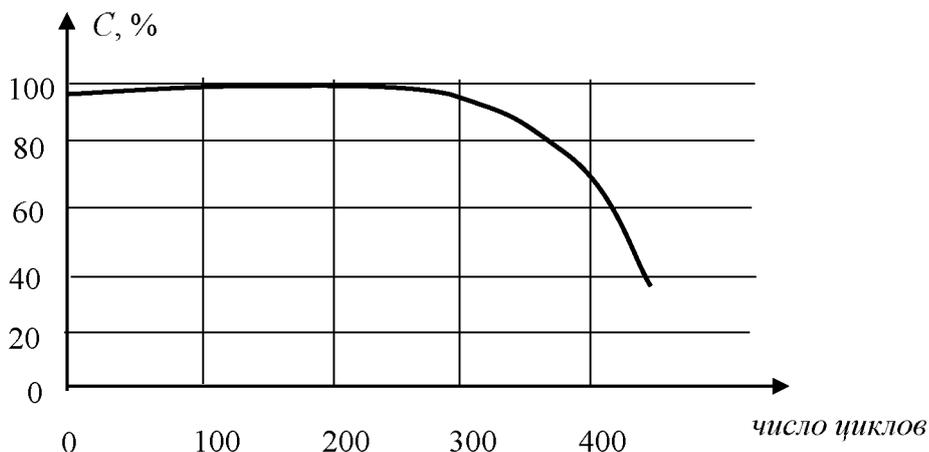


Рис. 3. Изменение ёмкости от числа циклов заряд/разряд при глубине разряда 40%

Производитель может дать данные об аккумуляторе в виде таблиц, например, как в таблице 2. Здесь дана выборка из разрядной характеристики, данные о других разрядных токах можно получить, как будет сказано позже, путём интерполяции.

Таблица 2.

Разрядная характеристика при 25 °С

Ток	Условия разряда			
	0,2 С (520 мА)	0,5 С (1300 мА)	1,0 С (2600 мА)	2,0 С (5200 мА)
Ёмкость	100 %	95 %	90 %	80 %

### Теория расчёта на основе формулы Пекерта

Формула Пекерта [8] учитывает эффект зависимости ёмкости аккумулятора от разрядного тока, время разряда аккумулятора находится как:

$$T = \frac{C_p}{I^n} \tag{1}$$

где  $n$  – экспонента Пекерта,

$C_p$  – ёмкость Пекерта (не совпадает с ёмкостью аккумулятора).

Значение экспоненты Пекерта зависит от химического состава аккумулятора и его состояния. Иногда производитель это число указывает, но это встречается редко. Чем больше экспонента Пекерта, тем меньше возможность аккумулятора отдавать полную емкость при повышенном разрядном токе. В технической документации встречаются данные по разным разрядным токам ( $I_1$  и  $I_2$ ) для разного времени полного разряда ( $T_1$  и  $T_2$ ). Так как  $C_p$  – константа, мы можем записать такое уравнение:

$$C_p = I_1^n \cdot T_1 = I_2^n \cdot T_2. \quad (2)$$

Преобразуя формулу (2), получим формулу для расчета экспоненты Пекерта:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right)}. \quad (3)$$

На аккумуляторе производители указывают номинальную ёмкость, которая измеряется в течение фиксированного интервала времени (обычно 20 часов). Если в маркировке аккумулятора указано, что его емкость равна 20 А·ч, то это означает, что он может питать нагрузку током 1 А в течение 20 часов. Из-за эффекта Пекерта рассматриваемый аккумулятор не сможет за 1 час обеспечить ток 20 ампер. Ёмкость Пекерта, необходимую для расчёта времени разряда аккумулятора по формуле (1) получают следующим образом:

$$C_p = T \left(\frac{C}{T}\right)^n, \quad (4)$$

где  $C$  и  $T$  – номинальная ёмкость аккумулятора и соответствующее время разряда.

#### Метод экспериментального исследования разряда аккумуляторов

Если нет данных по аккумуляторам или они не достаточны, можно провести эксперимент. Достаточно взять регулируемый источник тока, способный задавать ток в цепи независимо от внешних условий, миллиамперметр, вольтметр и замерять время разряда (рис.4). Источник тока можно сделать на основе биполярного транзистора [2]. Время разряда замеряем до уменьшения ёмкости на 100 %, так как при этом напряжение аккумулятора имеет характерный участок, позволяющий идентифицировать полный разряд. Эксперимент проводился по следующей методике:

1. Заряжаем аккумулятор до полной ёмкости.
2. Собираем схему (рис.4).
3. Задаём ток разряда с помощью источника тока.
4. Контролируем ток с помощью миллиамперметра.
5. Засекаем время с помощью таймера.
6. По достижении заданного напряжения отключаем аккумулятор и фиксируем время на таймере.
7. Подсчитываем ёмкость.
8. Повторяем шаги 1-7 для другого разрядного тока.

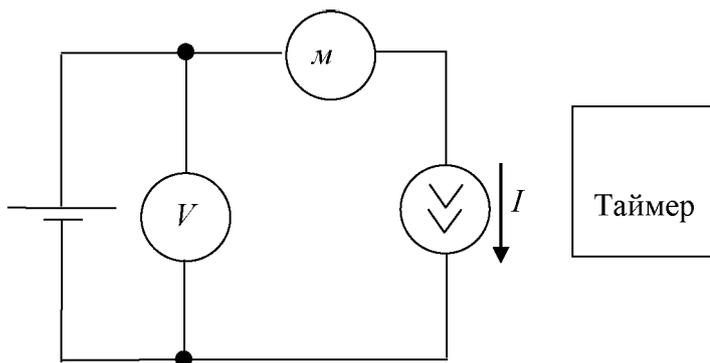


Рис. 4. Схема эксперимента

Для эксперимента выберем аккумулятор с заявленной производителем ёмкостью 2500 мА·ч, которая в результате эксперимента оказалась равной 2250 мА·ч. Проведём измерения при комнатной температуре +25 °С. Данные по разрядной характеристике сведены в таблицу 3.

Таблица 3.

Результаты эксперимента

Ток, мА	100	200	300	500	1000	1500	2000	3000	4000	5000
Ёмкость, мА·ч	2250	2191	2156	2113	2058	2017	1981	1922	1871	1833

Так как разрядные характеристики плавные, то для экспериментов нет необходимости брать много точек, как в таблице 3, достаточно, например, взять значения разрядного тока: C/20, C/10, C, 2-5C. Зависимость для других токов можно получить путём интерполяции. Существуют разные методы интерполяции [3]. В составе программного обеспечения, как правило, есть библиотека с готовым математическим пакетом для интерполяции. Выберем линейный метод интерполяции для расчёта, на том основании, что реальные кривые между точками близки к прямым функциям. Интерполяцию выполним в программе MathCAD [6]. После интерполяции фактически получается формула, которую можно использовать для расчёта. На рис. 5 показаны зависимости:

1. результаты эксперимента по таблице 3;
2. интерполяция по результатам эксперимента с ограниченными данными;
3. по формуле (1) с расчётной экспонентой Пекерта  $n = 1,042$ .

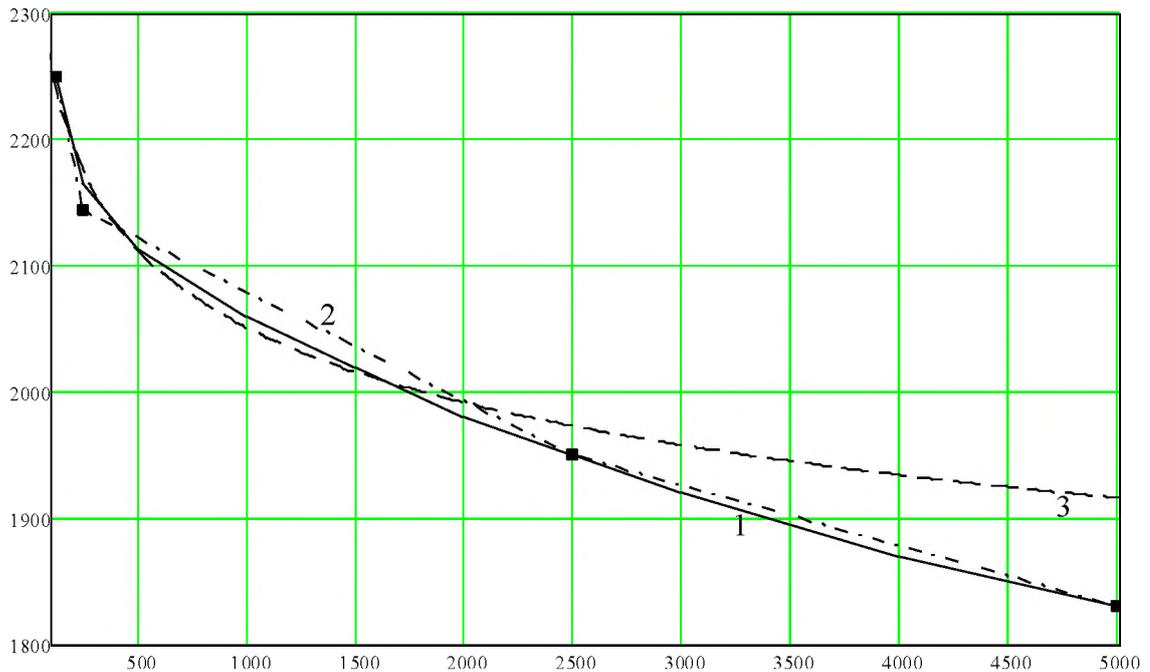


Рис. 5. Зависимость фактической ёмкости аккумулятора от разрядного тока

Зависимость (3) по формулам Пекерта не подходит для опытного аккумулятора: для режима больших токов она даёт большую погрешность, что видно из рис. 5. Зависимости (1) и (2) фактически близки друг к другу, это значит, что нет необходимости проводить измерения большого количества значений разрядного тока. Поэтому правильнее использовать предложенный метод расчёта на основе интерполяции.

Для более полной информации следует провести измерения, например, при температуре:  $+40^{\circ}\text{C}$ ,  $+25^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$  для нового аккумулятора и провести измерения для аккумулятора после 200 циклов заряд/разряд. Желательно провести измерения для разных экземпляров аккумуляторов и полученные данные усреднить. Так как проведение подобных экспериментов занимает достаточно много времени, можно автоматизировать измерения по схеме на рис. 4.

#### Программная реализация расчёта

Работа программы состоит из нескольких этапов, рассмотренных ниже.

- 1) Ввод исходных данных (рис. 6).

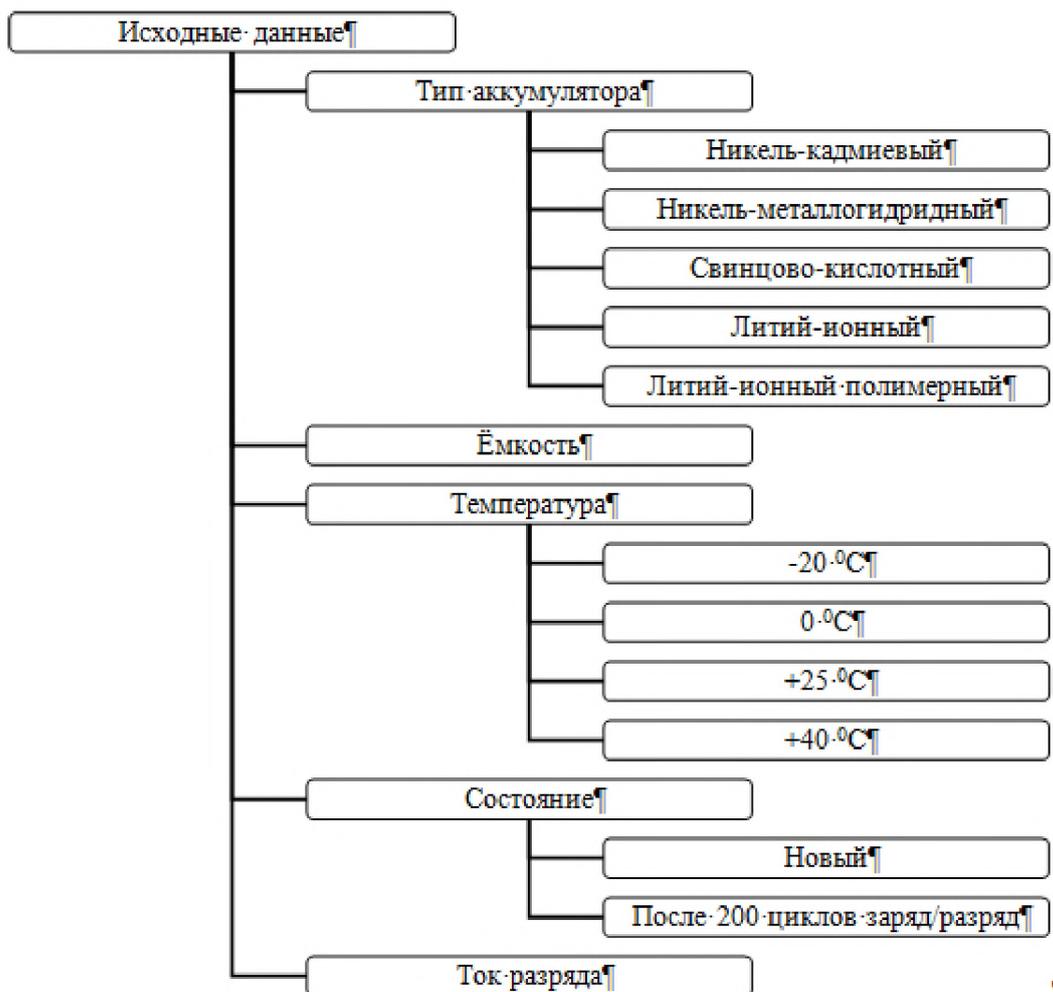


Рис. 6. Исходные данные для расчёта

2) Проверка данных. Здесь проверяется, что введены корректные данные, например ток положителен, ёмкость задана как числовое значение.

3) Выборка коэффициентов из базы данных по введённому типу аккумулятора и условиям эксплуатации. После опытов или по данным производителя составлены данные, которые размещены в базе данных.

4) Вывод примечания по расчёту. Так как охватить всё многообразие аккумуляторов невозможно, то здесь можно выводить также из базы данных примечание, о том, что имеется погрешность в расчётах и для какой модели аккумулятора взяты данные для расчёта.

5) Вычисление ёмкости. По выборке из базы данных составляем формулу на основе линейной интерполяции, в которой подставляем ток разряда  $I$ , введённый пользователем, и находим ёмкость аккумулятора.

6) Расчет времени разряда аккумулятора. Зная ёмкость  $C$  при данных условиях эксплуатации рассчитываем время разряда по формуле:

$$T = \frac{C}{I} \tag{5}$$

**Выводы**

Предложен метод расчёта разряда аккумулятора на основе ограниченного набора экспериментальных данных. Проведён эксперимент для опытного аккумулятора и расчётное время разряда хорошо согласуется с практическими измерениями. Практическая ценность проведенного исследования определяется возможным использованием данного метода для расчёта, что позволит увеличить срок службы аккумуляторов и снизить стоимость эксплуатации аккумулятора для конечного потребителя. Основные положения и рекомендации, изложенные в настоящей работе, могут быть использованы для других вычислений, где заданы данные, которые надо систематизировать и преобразовать для расчёта.

**Список литературы**

1. Германович В., Дурилин А. Альтернативные источники энергии и энергосбережение. Практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, воды, земли, биомассы. – СПб.: Наука и Техника, 2014. – 320 с.
2. Грабовски Б. Краткий справочник по электронике. Пер. с фр. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 416 с.
3. Калиткин Н.Н. Численные методы: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 592 с.
4. Кашкаров А.П. Аккумуляторы: Справочное пособие. – М.: ИП РадиоСофт, 2014. – 192 с.
5. Кучеров Д.П., Куприянов А.А. Современные источники питания ПК и периферии. Полное руководство (+CD). – СПб.: Наука и техника, 2007. – 352 с.
6. Макаров Е. Инженерные расчёты в Mathcad 15: Учебный курс. – СПб.: Питер, 2011. – 400 с.
7. Таганова А. А., Бубнов Ю. И., Орлов С. Б. Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации: Справочник. – СПб.: Химиздат, 2005. – 264 с.
8. Химические источники тока: Справочник / Под редакцией Н.В. Коровина и А.М. Скундина. – М.: Изд. МЭИ, 2003. – 740 с.
9. Хрусталева Д.А. Аккумуляторы. – М.: Изумруд, 2003. – 224 с.
10. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций: Учебное пособие для вузов / В.М. Бушуев, В.А. Деминский, Л.Ф. Захаров и др. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 384 с.