

Исследование энергетических характеристик аккумуляторов специального назначения

© Г.К. Клименко, М.И. Сорокин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 105005, Россия

С помощью программного комплекса LabVIEW разработана установка для автоматизированного изучения различных типов энергетических и электрических параметров аккумуляторов. Цель разработки — прогнозирование изменения емкости аккумуляторов при работе на различных токах нагрузки и с разными параметрами цикла. Построен алгоритм исследования, тестирования и дальнейшего анализа полученной информации. Объектом исследования стали аккумуляторы трех типов: никель-кадмиевые (Ni-Cd), никель-металл-гидридные (Ni-MH), литий-ионные (Li-Ion). Данные типы аккумуляторов являются наиболее распространенными и позволяют показать отличия исследуемых объектов по ряду параметров. Получены результаты, отображающие различные характеристики и параметры исследуемых объектов, дающие возможность систематизировать и упростить выбор типа аккумулятора по исходным данным и условиям эксплуатации в зависимости от нужд потребителя. Алгоритм исследования применим для широкого спектра аккумуляторов, с большим диапазоном емкостей.

Ключевые слова: аккумуляторы, КПД, автоматизация, заряд, разряд, электрическая мощность.

В настоящее время существует проблема накопления электрической энергии, и ее решение является актуальным. Несмотря на то, что уже создано большое количество батарей разных типов, многие энергетические характеристики существующих батарей не удовлетворяют потребителей. Довольно часто применение аккумуляторов предъявляет особые, специальные требования.

Аккумулятор — энергетическая машина, от которой также требуется эффективность преобразования энергии. При использовании аккумулятора происходят два разных процесса: заряд батареи от внешнего источника электрической энергии и разряд — передача накопленной электрической энергии потребителю. Каждый из этих процессов сопровождается потерями энергии и имеет соответствующий КПД. Пользователю необходимо знать эти характеристики, поскольку упомянутые процессы сопровождаются выделением тепла, что представляет проблему для больших батарей.

Процессы заряда и разряда химических аккумуляторов обычно длительные, до десятков часов, в течение которых электрические и энергетические характеристики аккумулятора изменяются, поэтому

контроль над процессами целесообразно автоматизировать, для чего создана специальная установка. В процессе исследования применяли только новые, не используемые ранее батареи, в том числе Li-Ion аккумулятор большой емкости специального назначения (производство компании «Ригель») [1].

Со временем при эксплуатации характеристики батарей ухудшаются. Реальное состояние больших аккумуляторных батарей специального назначения является их важнейшей характеристикой. Основные характеристики батареи могут быть получены в результате исследования и отображены на основе аналогичного мониторинга одного рабочего цикла с использованием современных измерительных и вычислительных средств.

Данная работа является продолжением исследования [2] и проведена на основе данных из [3] и [4]. Цель работы — определение энергетических характеристик аккумуляторов различных типов и создание универсальных средств для проведения таких испытаний.

При заряде аккумулятора затрачивается энергия

$$A_3 = U_3 I_3 t_3 = U_3 Q_3,$$

где U_3 , I_3 , t_3 , Q_3 — напряжение, ток, время и величина заряда соответственно. При этом потенциальная энергия аккумулятора $A_{\text{п}}$ и соответствующая ей ЭДС E возрастает согласно формуле

$$A_3 = E_3 I_3 t_3.$$

Энергетический КПД процесса заряда аккумулятора может быть представлен для каждого момента процесса следующим образом:

$$\eta_3 = \frac{A_3}{A_{\text{п}}} = \frac{U_3}{E_3},$$

и, как будет показано далее, в течение процесса он изменяется.

При разряде накопленная в аккумуляторе энергия для питания током внешней нагрузки частично теряется на внутреннем сопротивлении аккумулятора. Аналогично процессу заряда можно представить расход энергии при разряде как

$$A_{\text{р}} = U_{\text{р}} I_{\text{р}} t_{\text{р}},$$

полную энергию аккумулятора в виде

$$A_{\text{п}} = E_{\text{р}} I_{\text{р}} t_{\text{р}},$$

КПД процесса разряда как

$$\eta_p = \frac{A_{\text{п}}}{A_p} = \frac{E_p}{U_p},$$

где соответствующие величины процесса разряда имеют индексы «р».

Энергетический КПД рабочего цикла аккумулятора η при одинаковых значениях величины заряда и токах аккумулятора вычисляют по формуле

$$\eta_{\text{э}} = \eta_p \eta_{\text{з}} = \frac{U_p}{E_p} \frac{E_{\text{з}}}{U_{\text{з}}} = \frac{U_p}{U_{\text{з}}}. \quad (1)$$

Электрический заряд аккумулятора $Q_{\text{з}}$ определяют значением тока и продолжительностью заряда:

$$Q_{\text{з}} = I_{\text{з}} t_{\text{з}},$$

а отдаваемого аккумулятором заряда — аналогично:

$$Q_p = I_p t_p.$$

Не весь электрический заряд, поступивший в аккумулятор, может быть извлечен из него при разряде, поэтому соотношение этих величин определяется зарядовым, или кулоновским, КПД $\eta_{\text{к}}$, который характеризует электрическую эффективность рабочего цикла аккумулятора

$$\eta_{\text{кл}} = \frac{Q_p}{Q_{\text{з}}} \quad (2)$$

при одинаковых электрических характеристиках состояния аккумулятора, т. е. при $E_{\text{з}} = E_p$.

Конечный КПД рабочего цикла аккумулятора вычисляется как произведение трех составляющих: энергетического, кулоновского и термодинамического КПД (здесь и там, где специально не оговорено обратное, принимаем его равным 0,9–0,95 в зависимости от значения тока [5]).

Формула для вычисления КПД аккумулятора имеет вид

$$\eta = \eta_{\text{кл}} \eta_{\text{энерг}} \eta_{\text{терм}}.$$

Таким образом, для определения энергетических характеристик аккумулятора необходимо измерить значения напряжений и ЭДС в процессах заряда и разряда при фиксированных значениях тока процесса.

Для определения истинных характеристик аккумуляторов необходимо проведение их испытаний в рабочем цикле, т. е. в процессах заряда и разряда. В качестве характерного принят десятичасовой ре-

жим заряда и разряда, что требует значительного времени на проведение испытаний. При этом необходимо обеспечить постоянное значение тока и непрерывно контролировать напряжение и ЭДС аккумулятора. Поскольку исследование является не только длительным по времени, но и трудоемким, точность определения характеристик является непростой задачей. Она может быть решена путем автоматизации процесса испытаний с использованием современных средств управления и цифровой техники.

Для испытаний аккумулятора необходимо обеспечить:

- постоянство значения электрического тока в цепи аккумулятора;
- измерение тока и его запись;
- измерение напряжения на клеммах аккумулятора при заряде и разряде и его запись;
- измерение напряжения аккумулятора при разрыве цепи (напряжение разомкнутой цепи (НРЦ) или ЭДС аккумулятора) и его запись;
- измерение времени процесса и запись всех его параметров.

Для реализации перечисленных функций в автоматическом режиме, без участия человека, создана система, включающая следующие элементы:

- блок питания постоянным и стабилизированным по величине током для заряда аккумулятора;
- электрическую нагрузку — резистор;
- регулятор тока нагрузки;
- контактор для разрыва электрической цепи;
- датчики тока и напряжения;
- контроллер для сбора информации;
- цифровую вычислительную машину;
- дублирующие приборы визуального контроля электрических характеристик;
- программное обеспечение;
- аккумулятор — объект исследования;

Блок-схема системы представлена на рис. 1.

Опишем более подробно каждый элемент системы.

1. Для заряда аккумуляторов использовалось интеллектуальное зарядное устройство La-crosse BC700 (TechnoLine), способное производить заряд аккумуляторов постоянным током 100 и 200 мА, а в случае с Li-Ion аккумулятором — источник питания с выпрямителем и магазином сопротивлений.

2. Для измерения тока в цепи аккумулятора предусмотрен резистор R1 модели SQP. Сопротивление данного элемента 0,1 Ом, мощность 20 Вт с возможной погрешностью 5 %. Данный резистор практически не меняет свое сопротивление при изменении температур в диапазоне до 200 °С и позволяет, не ухудшая точности эксперимента,

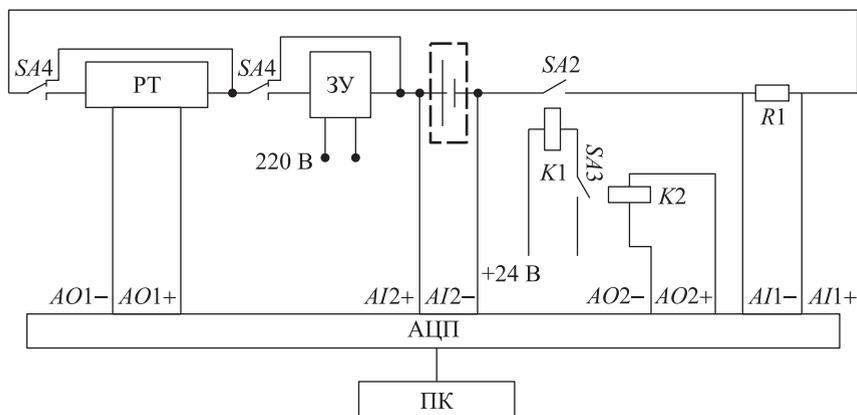


Рис. 1. Принципиальная схема измерений характеристик аккумуляторов малой емкости:

РТ — регулятор тока; ЗУ — зарядное устройство; ПК — портативный компьютер; АЦП — аналогово-цифровой преобразователь; $AI1$, $AI2$ — аналоговые входы АЦП; $AO1$, $AO2$ — аналоговые выходы АЦП; $SA2$, $SA3$, $SA4$ — переключатели двухпозиционные; $R1$ — резистор; $K1$ — контактор; $K2$ — твердотельное реле

измерять напряжения на нем и преобразовывать его в ток через резистор.

3. Для регулирования тока разряда использован полевой транзистор $Vt1$ модели $AUirf540Z$ Mosfet, допускающий ток до 10 А, а при улучшенной системе охлаждения — до 35 А. При изменении управляющего напряжения от 3...5 В сопротивление меняется от 0,1 до 189 Ом. Это позволяет использовать возможности аналогового выхода платы для регулировки тока цепи путем изменения тока, протекающего через резистор R , и сопротивления полевого транзистора до установления выбранного пользователем в программе тока. Этот способ позволяет автоматически регулировать ток до 10 А с погрешностью до 0,5 мА.

4. Для разрыва цепи под нагрузкой использован электромагнитный контактор $K1$ модели $KM-100$ с током питания до 2 А. Для управления этим контактором от платы ЦАП/АЦП разработана схема усиления, включающая в себя стабилизированный источник питания и твердотельное $K2$ в цепи питания катушки контактора.

Реле твердотельное $K2$ модели $M-ODC5$ питается током 2...5 мА при напряжении 3...5 В непосредственно с аналогового выхода АЦП (рис. 2, [6]).

5. Для измерения тока и напряжения использовали дифференциальные аналоговые каналы АЦП с соответствующим программным обеспечением и электрическими схемами.

6. Контроллером для сбора информации послужила плата сбора данных National Instruments 6008-USB, частота сбора данных которой достигает до 5 кГц на канал.

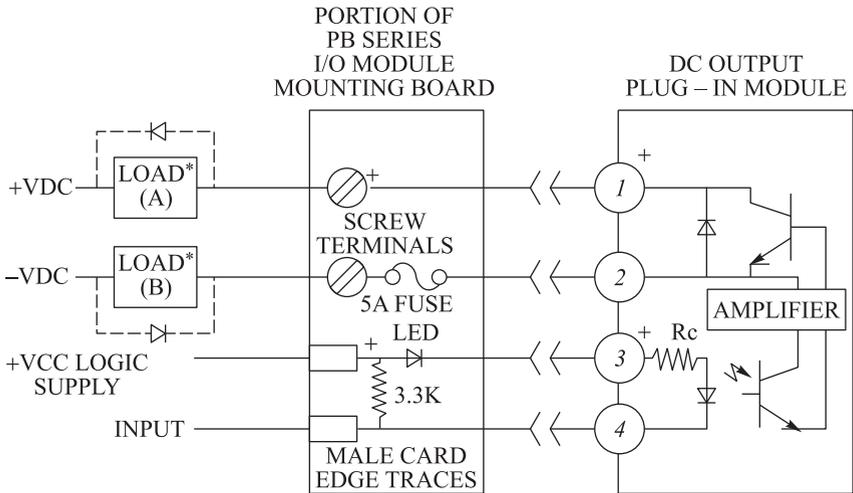


Рис. 2. Электрическая схема твердотельного реле

7. В качестве вычислительной машины применяли ПК с установленным программным обеспечением LabVIEW.

8. Дублирующие приборы представляют собой аналоговые вольтметры и амперметры.

9. Программа разработана в программном пакете LabVIEW — Virtual Instrument, что позволяет в реальном времени отображать в виде таблиц, графиков, индикаторов прямые и косвенные показатели эксперимента и параллельно записывать данные с метками времени в таблицы Excel, где в дальнейшем их удобно читать, преобразовывать, а также выполнять необходимые математические операции. Лицевая панель программы приведена на рис. 3, где в реальном времени отображаются:

- графически — напряжение, ток, ЭДС;

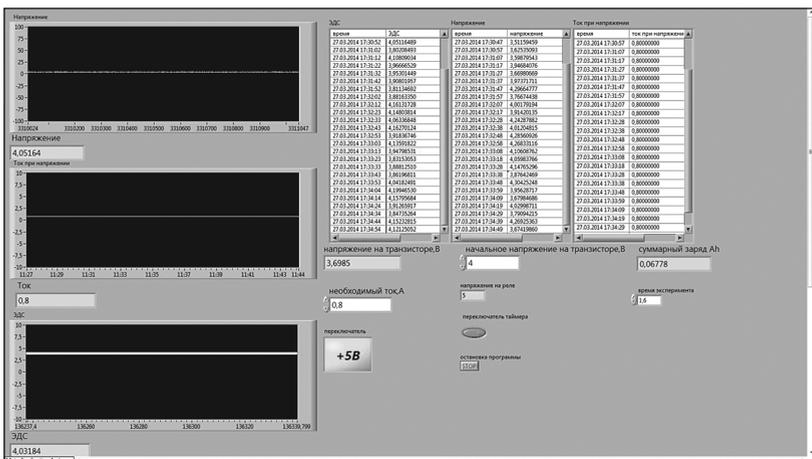


Рис. 3. Внешний вид панели контроля характеристик процесса

- в виде индикаторов — напряжение, ток, ЭДС, суммарный заряд, текущее напряжение на транзисторе, время эксперимента;
- в виде таблицы данных — ЭДС, напряжение, ток;
- в виде светодиодного индикатора — напряжение на реле.

10. В качестве объектов исследования использовали следующие аккумуляторы:

- Ni-Cd, емкость — 600 мА·ч;
- Ni-MH, емкость — 1900 мА·ч;
- Li-Ion, емкость — 150 А·ч.

Схема, показанная на рис. 1, не позволяет испытывать аккумуляторы большой емкости (типа Li-Ion) с рабочими токами более 10 А. Поэтому использована схема, представленная на рис. 4.

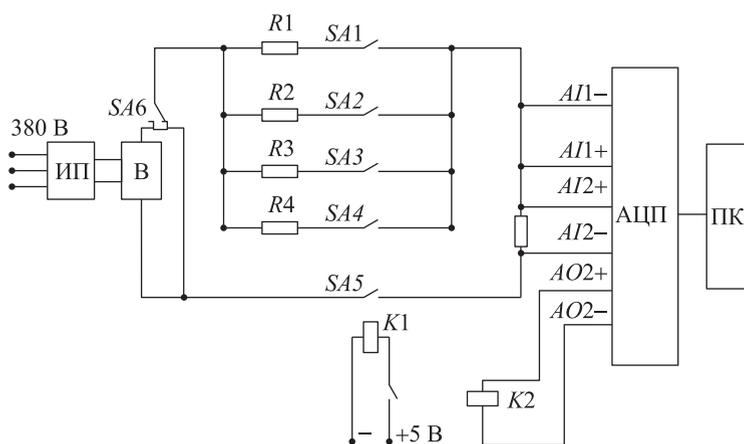


Рис. 4. Электрическая схема для испытаний Li-Ion аккумулятора:

ИП — источник питания; В — выпрямитель; АЦП — аналогово-цифровой преобразователь; ПК — портативный компьютер; AI1, AI2 — аналоговые входы; AO2 — аналоговый выход АЦП; R1–R5 — резисторы; K1 — контактор; K2 — твердотельное реле; SA1–SA6 — переключатели двухпозиционные

В данной схеме для регулирования тока использовались балластные реостаты РБ-300, а для заряда — выпрямитель ВУ-12/600. Остальные параметры такие же, как на схеме рис. 1.

В процессе эксперимента в режиме реального времени записываются значения напряжения заряда или разряда, а также значения НРЦ, являющегося динамической ЭДС E батареи, зависящей от процесса — заряда или разряда. Динамическая ЭДС заряда

$$E_z = E_0 - E_n,$$

где E_0 — ЭДС покоя — величина ЭДС в равновесном состоянии через 2...3 ч после прекращения процессов заряда или разряда; E_n — ЭДС поляризации при разряде. Для разряда динамическая ЭДС

$$E_p = E_0 + E_n.$$

В процессах эксперимента электрическая цепь разрывалась на несколько секунд, и при этом измерялась величина динамической ЭДС. Для определения ЭДС покоя проведен специальный эксперимент по изменению ЭДС в течение 3 ч после выключения тока в процессах заряда и разряда. Это позволяет вычислять истинное значение ЭДС батареи в любой момент процесса по измеренной величине динамической ЭДС (НРЦ).

Изменение ЭДС до наступления НРЦ изображено на рис. 5, которое (с достоверностью аппроксимации 0,99) можно описать логарифмическим уравнением вида

$$Y = A \ln(t) + B,$$

где A — коэффициент, зависящий от типа аккумулятора и степени его заряженности; Y — значение ЭДС.

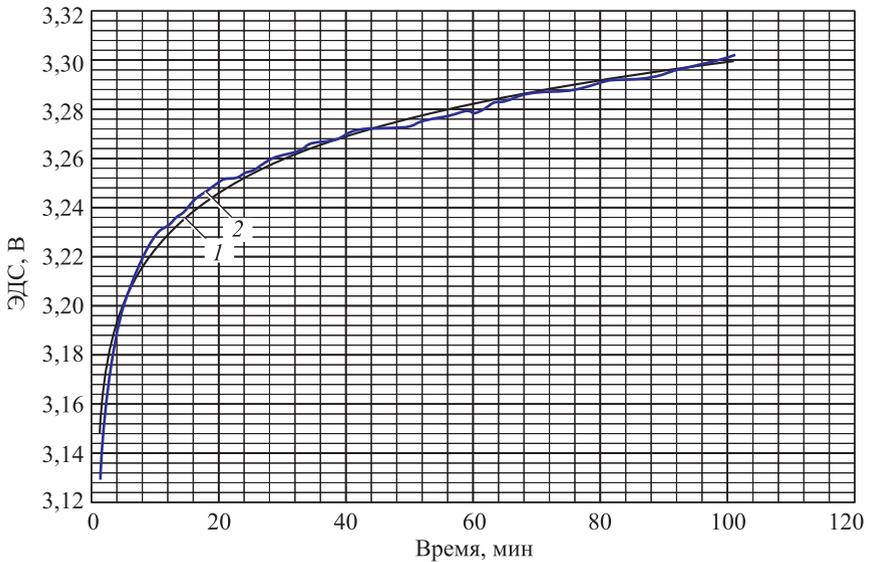


Рис. 5. Изменение ЭДС по времени после выключения тока:
1 — логарифмическая кривая (ЭДС); 2 — ЭДС

На рис. 6 приведены графики изменения параметров в процессе разряда Li-Ion аккумулятора.

Аналогичный график, но для режима заряда Li-Ion аккумулятора, изображен на рис. 7.

Зависимость значений энергетического КПД цикла от времени, вычисляемая по формуле (1), для трех типов исследованных аккумуляторов показана на рис. 8.

Полученные данные позволяют построить графики (рис. 9), отражающие зависимость емкости аккумулятора от разрядного тока в процентных отношениях.

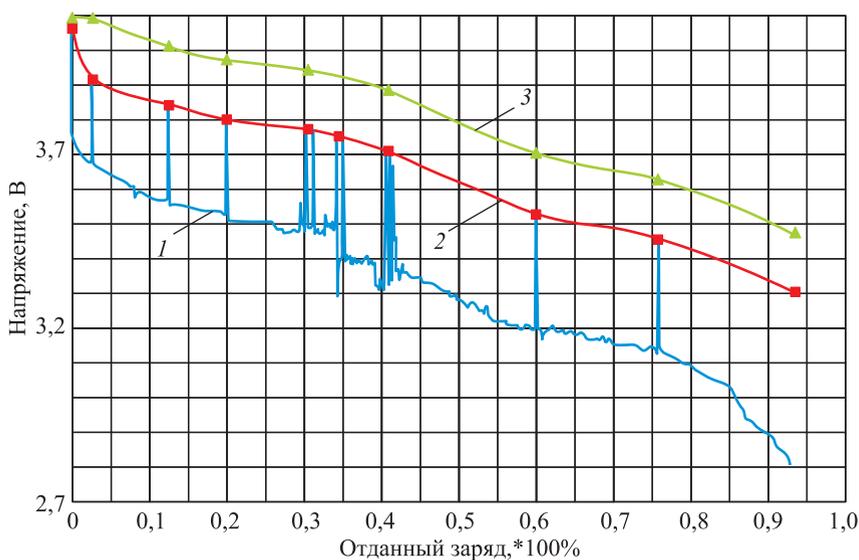


Рис. 6. Характеристики разряда Li-Ion аккумулятора при токе разряда 0,2 с:
 1 — напряжение разряда; 2 — ЭДС; 3 — НРЦ

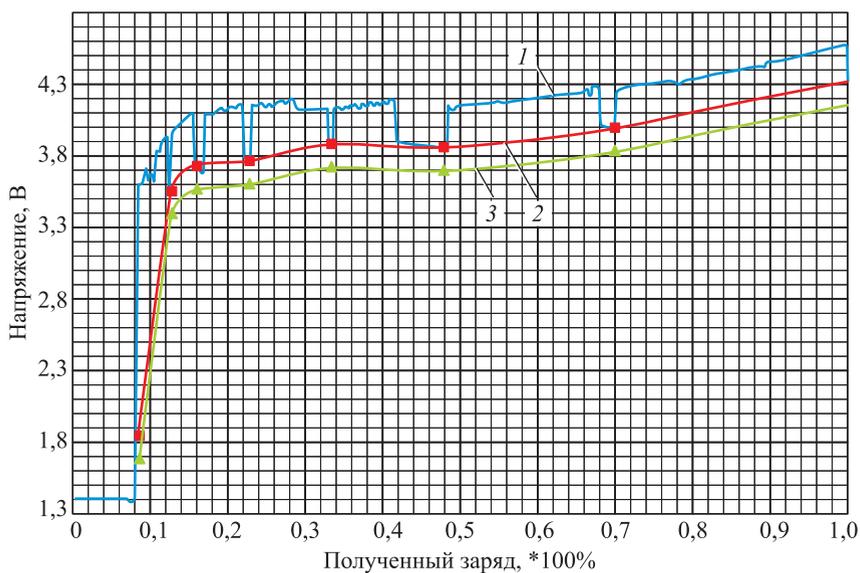


Рис. 7. Характеристики заряда Li-Ion аккумулятора при токе заряда 0,2 с:
 1 — напряжение заряда; 2 — ЭДС; 3 — НРЦ

Графики на рис. 9 показывают возможность систематизации полученных экспериментальных данных. Например, поставлена задача: узнать действительную емкость заданного аккумулятора по известной номинальной емкости и требуемому току разряда. Разделив требуемый ток разряда на номинальную емкость и проведя вертикальную прямую до пересечения с графиком требуемого типа аккумуля-

тора, можно узнать действительную емкость, которую имеет аккумулятор, в процентах от номинальной емкости. Также данные графики могут быть использованы как определитель кулоновского КПД аккумулятора при различных токах разряда, вычисляемого по формуле (2).

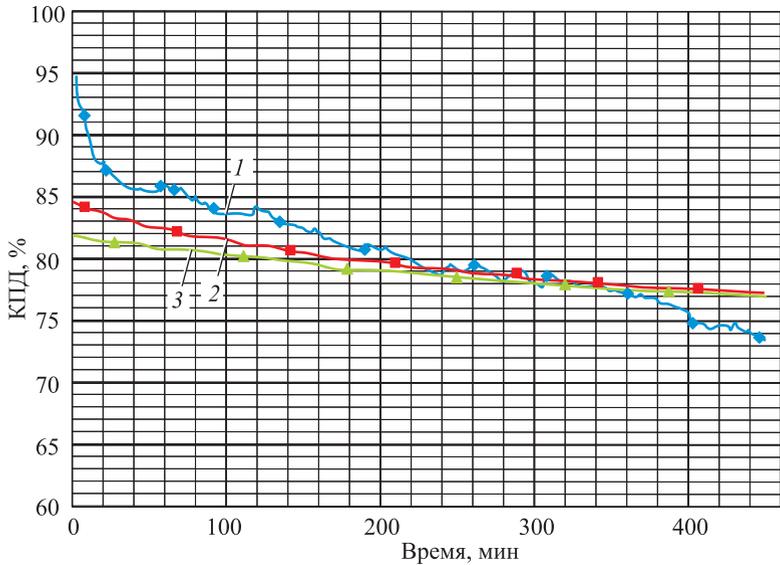


Рис. 8. Изменение КПД цикла для разных типов исследованных аккумуляторов:

1 — Li-Ion; 2 — Ni-MH; 3 — Ni-Cd

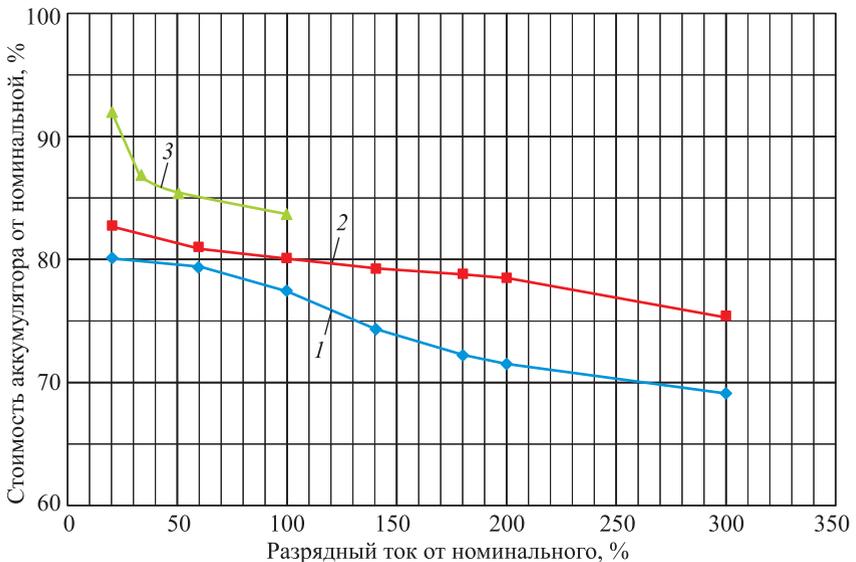


Рис. 9. Зависимость емкости аккумулятора от разрядного тока:

1 — Ni-Cd; 2 — Ni-MH; 3 — Li-Ion

В результате проведенной работы была разработана установка для автоматического исследования различных типов аккумуляторов. На примере трех изучаемых типов аккумуляторов представлен алгоритм исследования. Получены графические зависимости, позволяющие определить различные параметры аккумуляторных батарей в любой момент их рабочего цикла при различных нагрузках.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Аккумуляторы и аккумуляторные батареи*. Санкт-Петербург, ОАО «Аккумуляторная компания “Ригель”», 2011. URL: www.rigel.ru
- [2] Клименко Г.К., Ляпин А.А., Марахтанов М.К. Исследование теплового состояния аккумулятора в рабочем цикле. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10.
URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1030.html> (дата обращения 12 мая 2014)
- [3] Теньков В.В., Центр Б.И. *Основы теории и эксплуатации герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов*. Москва, Энергоатомиздат, 1985, с. 136.
- [4] Лаврус В.И. *Батарейки и аккумуляторы*. Москва, Наука и техника, 1995, с. 79.
- [5] Хрусталева Д.А. *Аккумуляторы*. Москва, Изумруд, 2003, с. 224.
- [6] *M Series output modules*.
URL: http://www.crydom.com/cn/Products/Catalog/m_output_modules.pdf

Статья поступила в редакцию 28.05.2014

Ссылку на статью просим оформлять следующим образом:

Сорокин М.И., Клименко Г.К. Исследование энергетических характеристик аккумуляторов специального назначения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 2. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/energy/1204.html>

Сорокин Михаил Игоревич — студент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: mi_sorokin@mail.ru

Клименко Георгий Константинович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: gkk@land.ru

Investigation of the energy characteristics of special purpose batteries

© G.K. Klimenko, M.I. Sorokin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Using LabVIEW software package we designed an installation for automated investigation of the energy and electrical parameters of different types of batteries. The purpose of this research is to predict changes in their capacity when operating at various load currents with different cycle parameters. We developed the algorithm for research, testing and further analysis of the information received. The objects of the study were three types of batteries: Ni–Cd, Ni–MH, Li–Ion. These types of batteries are the most common and allow us to show the differences of the objects under study on a number of parameters. We obtained the results, showing different characteristics and parameters of the objects, allowing to organize and simplify the selection of the type of battery according to the original data and operating conditions, depending on the needs of the consumer. The algorithm of this study is applicable for a wide variety of batteries with a large range of capacitances.

Keywords: batteries, efficiency, automation, charge, discharge, electricity power.

REFERENCES

- [1] *Akkumulyatory i akkumulyatornye batarei* [Accumulators and accumulator batteries]. Sankt-Petersburg, Publ. corp. «Akkumulyatornaya kompaniya “Rigel”», 2011. Available at: www.rigel.ru
- [2] Klimenko G.K., Liapin A.A., Marakhtanov M.K. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 10. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1030.html> (accessed 12 May 2014).
- [3] Ten'kov V.V., Tsenter B.I. *Osnovy teorii i ekspluatatsii germetichnykh nikel'-kadmievyykh akkumulyatorov* [Fundamentals of the theory and operation of sealed nickel-cadmium batteries]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985, 136 p.
- [4] Lavrus V.I. *Batareyki i akkumulyatory*. Moscow, Naukha I Tekhnika, 1995, pp. 79
- [5] Khrustalev D.A. *Akkumulyatory* [Batteries]. Moscow, Izumrud Publ., 2003, 224 p.
- [6] *M Series output modules*.
URL: http://www.crydom.com/cn/Products/Catalog/m_output_modules.pdf

Sorokin M.I., a student of the Department «Plasma and Laser Systems for High Energy, Ecology Clean Technologies and Medicine» at Bauman Moscow State Technical University. e-mail: mi_sorokin@mail.ru

Klimenko G.K., Ph.D., Assoc. Professor of the Department «Plasma and Laser Systems for High Energy, Ecology Clean Technologies and Medicine» at Bauman Moscow State Technical University. e-mail: gkk@land.ru