

УДК 621.355.29

ИЗМЕРЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СВИНЦОВО-КИСЛОТНОГО АККУМУЛЯТОРА В РЕЖИМЕ ЕГО ЗАРЯДКИ

В. М. Афанасьев ✉, А. С. Григорьев, К. А. Клецов, Д. В. Павлов, В. В. Печак

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1*

✉ E-mail: afanasev_vm@nrcki.ru

Поступила в редакцию 05.09.14 г.

Приведены метод и результаты измерения внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи при её заряде и при разряде. Установлено, что в рабочем диапазоне напряжений внутреннее сопротивление аккумулятора при его заряде и разряде практически одинаково и не зависит от силы тока.

Ключевые слова: свинцово-кислотный аккумулятор, внутреннее сопротивление, измерение, методика.

MEASUREMENT OF LEAD-ACID BATTERY INTERNAL RESISTANCE IN CHARGING MODE

V. M. Afanasyev ✉, A. S. Grigoryev, K. A. Klestov, D. V. Pavlov, V. V. Pechak

*National Research Center «Kurchatov Institute»
1, Ac. Kurchatov sqr., Moscow, 123182, Russia*

✉ E-mail: afanasev_vm@nrcki.ru

Received 30.04.14

Method and the result of measurement of the internal resistance of battery during its charge and discharge are described. It was established that the internal resistance of the battery in operating voltage range is almost equally when charging and discharging and does not depend on the current.

Key words: lead-acid battery, internal resistance, measurement, methodic.

ВВЕДЕНИЕ

Внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи (АБ) имеет, по крайней мере, две области применения. Знание величины сопротивления необходимо для оценки состояния АБ и её правильной эксплуатации в реальных условиях (наиболее часто), а также для целей математического или имитационного моделирования работы АБ.

Стандартная процедура измерения внутреннего сопротивления $R_{вн}$, описанная в ГОСТ [1, 2], подразумевает измерение только при разряде АБ. Не удалось найти публикаций с описанием методики измерения внутреннего сопротивления при заряде свинцово-кислотных АБ. Во многих публикациях (см., например, [3,4]) обсуждаются методы, приборы и результаты измерения внутреннего сопротивления, но опять-таки только при разряде аккумулятора. В публикации [5] приведён график зависимости $R_{вн}$ от степени заряда АБ как при заряде, так и при разряде, но нет информации ни о методике измерения, ни о характеристиках процесса.

В этой связи представляется важным найти работоспособный метод измерения внутреннего сопротивления в процессе заряда аккумулятора и испытать его.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В качестве испытуемого объекта использовался свинцово-кислотный аккумулятор марки Solar S12/230А фирмы Sonnenschein с номинальным напряжением 12 В и номинальной ёмкостью 230 А·ч, бывший до этого в эксплуатации в течение длительного времени. Согласно нашим измерениям его фактическая ёмкость к моменту проведения экспериментов составляла около 575 кКл, или 160 А·ч, т. е. около 70% от номинальной ёмкости.

Принципиальная схема установки для измерения внутреннего сопротивления в процессе заряда и/или разряда аккумулятора показана на рис. 1.

Сигналы с вольтметров в виде значения тока через аккумулятор и напряжения на нём автоматически записывались на компьютер с шагом одна секунда.

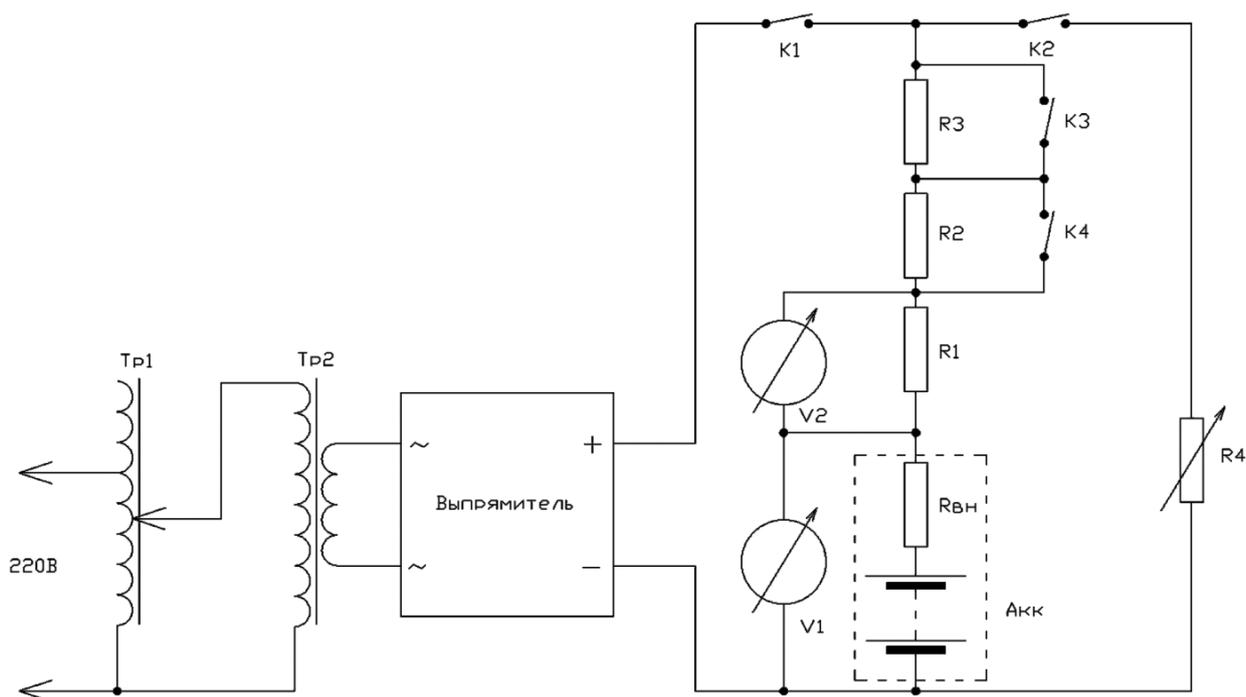


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки (может использоваться для измерения внутреннего сопротивления как при заряде, так и при разряде аккумулятора): Тр1 – трансформатор для плавного изменения зарядного напряжения; Тр2 – понижающий трансформатор; Выпрямитель; К1 – К4 – выключатели с рабочим током до 40 ампер; R1 – образцовое сопротивление P310 номиналом 0.01 Ом с погрешностью 0.1%; R4 – жидкостный реостат с рабочим током до 100 ампер (используется для измерений только в режиме разряда); V1 – V2 – вольтметры марки В7–34А; Акк. – испытываемый аккумулятор; R2, R3 – резисторы 0.01 Ом (рабочий ток до 40 ампер)

да и с привязкой ко времени. По измеренному значению тока вычислялся заряд, пришедший в аккумулятор. Так как шаг записи времени, тока и напряжения в данном опыте много меньше характерного времени любых электрохимических процессов в аккумуляторе, для вычисления заряда в аккумуляторе интегрирование тока по времени было заменено простым суммированием измеряемых каждую секунду значений тока, умноженных на 1 секунду.

Резисторы R2 и R3 выполнены из нихрома, позволяют менять их суммарное сопротивление ступенчато и имеют следующие характеристики:

Сопротивление ступеней при 20°C (Ом): 0–0.01–0.02

Температурный коэффициент сопротивления (1/К): $1.7 \cdot 10^{-4}$

Допустимый ток (А): ≤ 40

Охлаждение: воздушное принудительное (вентилятором)

При измерении внутреннего сопротивления R_{вн} начальное положение ключей есть: в режиме разряда аккумулятора ключ K1 разомкнут, K2 замкнут, в режиме заряда ключ K1 замкнут, K2 разомкнут.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Перед каждым экспериментом аккумулятор разряжался до напряжения 10.2 В, затем отключался для релаксации в течение 10–12 часов. Перед началом эксперимента зарядное напряжение подбиралось таким образом, чтобы в процессе измерения зарядный ток составлял одно из трёх значений – 10, 20 или 30 А. Затем начиналась непрерывная зарядка аккумулятора; при этом ток и напряжение менялись сравнительно мало (кроме начала заряда, когда после включения режима заряда происходил процесс установления тока и напряжения). В течение эксперимента зарядный ток подстраивался так, чтобы внутреннее сопротивление измерялось при одинаковых значениях зарядного тока. В качестве примера на рис. 2 показаны измеренные значения тока и напряжения в течение первых тридцати тысяч секунд во время одного из экспериментов (всего эксперимент длился чуть больше 10 часов).

Процедура измерения внутреннего сопротивления R_{вн}, например для режима заряда включала в себя следующие действия (см. рис. 1):

1) исходное положение ключей: K1 – замкнут, K2 – разомкнут, K3 – замкнут, K4 – разомкнут;

- 2) ключ K_4 замыкается на три секунды,
- 3) ключи K_3 и K_4 размыкаются на три секунды,
- 4) ключ K_3 замыкается.

Поведение изменения тока и напряжения при манипуляциях с ключами K_3 и K_4 показаны на рис. 3 и 4.

В некоторых экспериментах были возможны варианты: например, в действиях 3 и 4 ключи K_3 и K_4 выдерживались в замкнутом и разомкнутом состояниях не три секунды, а большее время – до десяти секунд. Это было вызвано большим временем выхода напряжения на плато из-за процессов релаксации (см. рис. 4).

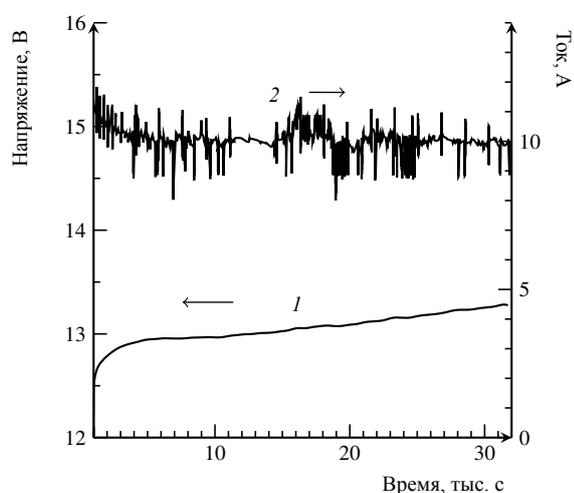


Рис. 2. Зависимость напряжения (1) и тока (2) от времени в опыте по измерению внутреннего сопротивления аккумулятора в процессе зарядки током 10 А. Парные (вверх-вниз) вертикальные линии на графике тока – поведение тока во время проведения измерения внутреннего сопротивления, остальные – подстройка тока заряда

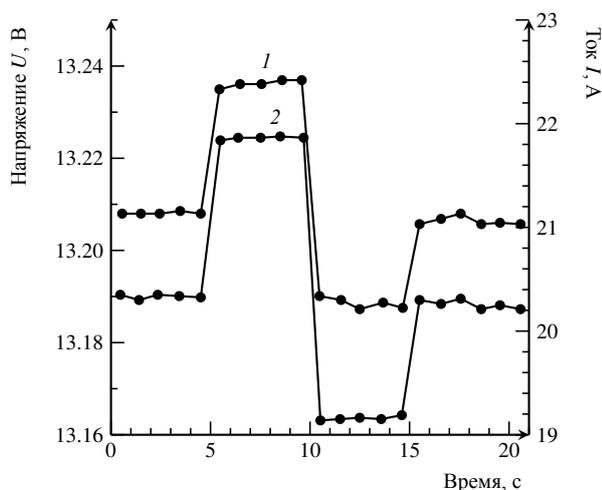


Рис. 3. Изменения напряжения (1) и тока (2) во времени в режиме зарядки током 20.3 А при подключении и отключении резисторов R_1 и R_2 ; время от начала опыта $t = 4855$ с, интеграл от тока заряда $Q = 6.33$ кКл

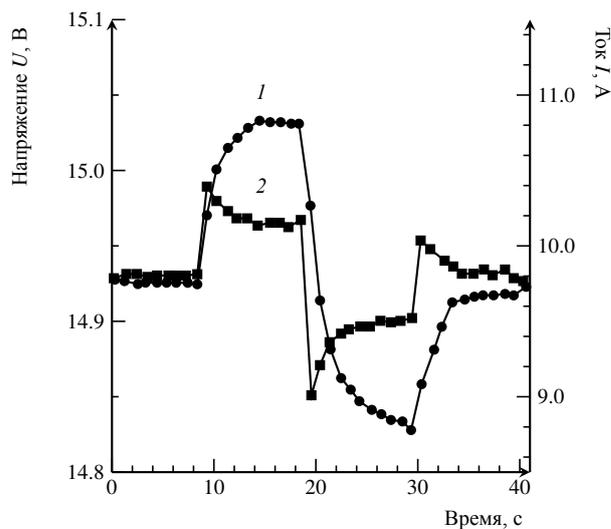


Рис. 4. Изменения напряжения (1) и тока (2) во времени в режиме разряда током 9.8 А при подключении и отключении резисторов R_1 и R_2 ; время от начала опыта $t = 61455$ с, интеграл от тока заряда $Q = 607.713$ кКл

При таких кратковременных изменениях сопротивления в цепи с $R_{вн}$ до $(R_{вн} + \Delta R)$ или до $(R_{вн} - \Delta R)$ изменения напряжения и тока составят соответственно ΔU и ΔI , а заряд на аккумуляторе не успеет существенно измениться, так что

$$R_{вн} = \Delta U / \Delta I. \quad (1)$$

Внутреннее сопротивление $R_{вн}$ рассчитывалось по формуле (1) на переднем ($t = 3-4$ с) и заднем ($t = 10-11$ с) фронтах импульсов напряжения и тока (см. рис. 3); в качестве итогового внутреннего сопротивления бралось среднее арифметическое этих значений.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Во всех экспериментах были зафиксированы качественные особенности поведения внутреннего сопротивления в процессе заряда аккумулятора, хорошо видные на графике (рис. 5) (все приведённые ниже численные значения даны только для зарядного тока 10 А).

В диапазоне напряжений 12.7...13.6 В наблюдается параболическая зависимость внутреннего сопротивления $R_{вн}$ от напряжения U ; внутреннее сопротивление меняется в пределах 14.8...25 мОм с минимумом 14.8 мОм при напряжении 13.0 В. Для усреднённого за все время эксперимента зарядного тока 9.945 А и диапазона напряжения 12.691–13.611 В связь между напряжением U и внутренним сопротивлением $R_{вн}$ (мОм) на нелинейном участке выражается эмпирической формулой:

$$R_{вн}(9.945 \text{ А}) = 27.818(U - 13.007)^2 + 14.46, \quad (2)$$

при среднеквадратичном отклонении аппроксимации от измеренных значений $\sigma = 0.65$ мОм.

При напряжениях 13.6...14.2 В имеется участок линейного роста сопротивления до значения 185 мОм; скорость роста оценивается величиной 294.2 мОм/В:

$$R_{вн}(9.945 \text{ A}) = 294.2U - 3989, \quad (3)$$

при среднеквадратичном отклонении аппроксимации от измеренных значений $\sigma = 0.59$ мОм.

При напряжении 14.2–15.0 В скорость роста сопротивления уменьшается до 75.1 мОм/В.

При дальнейшей подаче зарядного тока на аккумулятор связь напряжения и внутреннего сопротивления становится хаотической – в целом напряжение падает от 15.11 до 14.92 В, а измеренные значения внутреннего сопротивления хаотически (немонотонно) меняются в пределах от 133 до 246 мОм; очевидно, в рамках заявленных во введении целей измерять внутреннее сопротивление в этой области немонотонного изменения $R_{вн}$ бессмысленно.

На рис 5 видно, что при значениях напряжения 13.6, 14.2 и 15.0 В производная $dR_{вн}/dU$ меняется скачком. Можно предположить, что в эти моменты времени в зарядку аккумулятора включаются новые процессы, например газовыделение, или происходит смена лимитирующей стадии в цепочке электрохимических процессов.

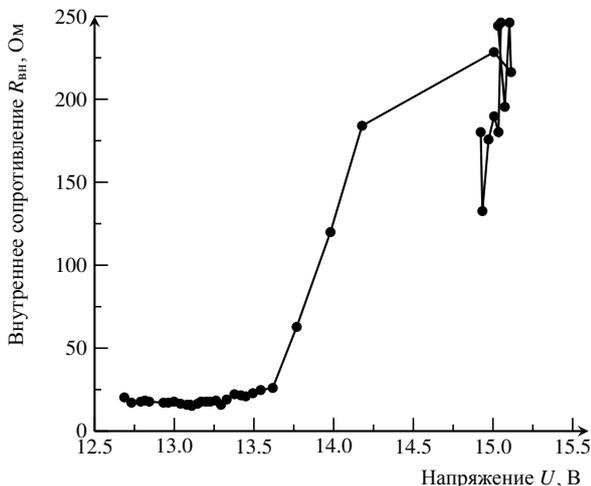


Рис. 5. Связь внутреннего сопротивления $R_{вн}$ с напряжением U на аккумуляторе при зарядном токе 10 А; линия графика связывает соседние по времени акты измерения внутреннего сопротивления

Знание связи внутреннего сопротивления $R_{вн}$ и напряжения на аккумуляторе U полезно для контроля за состоянием аккумулятора, но такая зависимость малоприменима при математическом моделировании работы аккумулятора: согласно закону Кирхгофа для цепи с аккумулятором, напряжение на кото-

ром описывается уравнением Нернста, само напряжение U зависит от зарядного тока I и внутреннего сопротивления $R_{вн}$

$$U = E^0 + R_{вн}I + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{a_{H_2SO_4}}{a_{H_2O}}\right), \quad (4)$$

где U – напряжение на клеммах аккумулятора; E^0 – стандартный электродный потенциал, измеряется в вольтах; $R_{вн}$ – внутреннее сопротивление; I – зарядный ток; $R = 8.31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; T – температура электролита; n – число молей электронов, участвующих в процессе; $F = 96485.35$ Кл/моль – постоянная Фарадея; $a_{H_2SO_4}$ и a_{H_2O} – активности (на практике – концентрации) серной кислоты и воды (компонентов электролита).

Это подтверждается рис. 6, где на одном графике показана связь внутреннего сопротивления $R_{вн}$ с напряжением на аккумуляторе U для разных токов заряда. Хорошо видно, что для большего зарядного тока график как целое сдвигается в сторону больших напряжений – сдвинуты левые и правые границы кривых, а также минимумы параболических (нижних) участков.

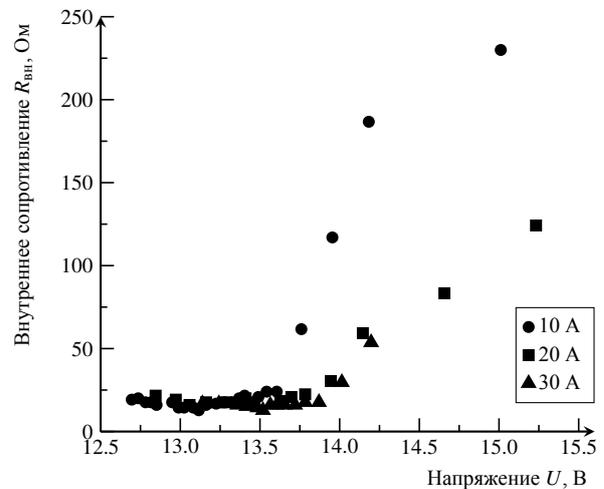


Рис. 6. Связь внутреннего сопротивления $R_{вн}$ с напряжением в процессе заряда аккумулятора для зарядных токов 10, 20 и 30 А

Для целей математического моделирования работающего аккумулятора более пригодна связь внутреннего сопротивления с зарядом в аккумуляторе (рис. 7), который вычислялся интегрированием зарядного тока от момента включения зарядного тока. Видно, что практически все точки лежат на одной кривой, связывающей заряд Q на аккумуляторе и его внутреннее сопротивление $R_{вн}$, за исключением внутреннего сопротивления при заряде больше 480 кКл (83% от фактической ёмкости) для тока 10 А.

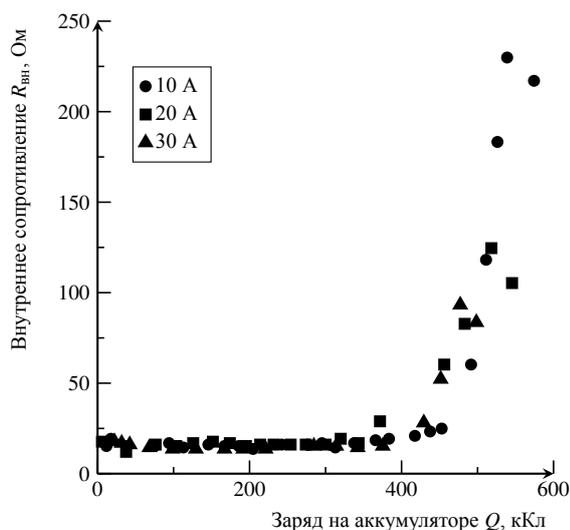


Рис. 7. Связь внутреннего сопротивления $R_{вн}$ и заряда Q на аккумуляторе для зарядных токов 10, 20 и 30 А для режима заряда аккумулятора

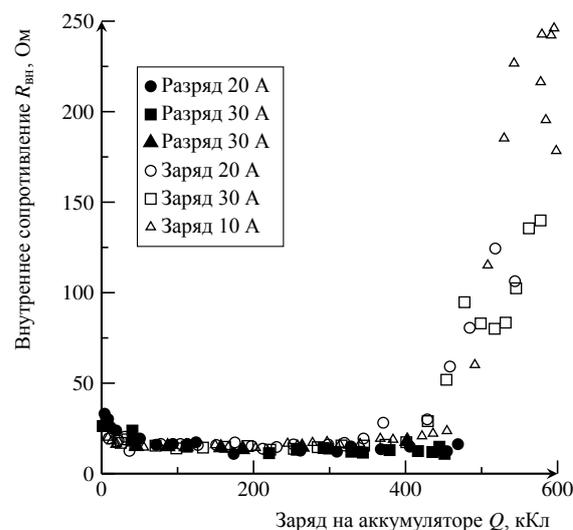


Рис. 8. Связь внутреннего сопротивления $R_{вн}$ и заряда Q на аккумуляторе для токов 10, 20 и 30 А в режимах заряда и разряда аккумулятора

Полученный результат интересно сравнить с результатами измерения внутреннего сопротивления в режиме разряда на том же аккумуляторе. На рис. 8 представлены в виде точек пары значений внутреннее сопротивление $R_{вн}$ – заряд на аккумуляторе, для разных токов заряда и разряда. Хорошо видно, что в диапазоне заряда на аккумуляторе 20–420 кКл (от 3 до 75% от фактической ёмкости) величины внутренних сопротивлений для одинаковых зарядов мало отличаются друг от друга, все отличия начинаются вне указанного диапазона заряда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для целей математического моделирования работы аккумулятора в составе установок с возобновляемыми источниками электроэнергии (солнце, ветер) необходимо знать величину внутреннего сопротивления аккумулятора. В этой связи разработан стенд для измерения внутреннего сопротивления как в режиме разряда, так и заряда аккумулятора.

Применялся стандартный метод измерения внутреннего сопротивления путём скачкообразных

кратковременных изменений сопротивления нагрузки, для чего последовательно с аккумулятором включали и отключали дополнительные резисторы известной величины.

Выполнены измерения внутреннего сопротивления свинцово-кислотного аккумулятора марки Solar S12/230A фирмы Sonnenschein с номинальным напряжением 12 В и номинальной ёмкостью 230 А·час.

Показано, что для использованного в наших экспериментах аккумулятора в диапазоне заряда на аккумуляторе 20–420 кКл (от 3 до 75% от фактической ёмкости) внутреннее сопротивление аккумулятора меняется в пределах 14,6–25 мОм и не зависит от режима работы аккумулятора на заряд или разряд. Все различия имеют место вне указанного диапазона заряда в аккумуляторе.

Авторы благодарят А. В. Иевского за помощь в проведении эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки (госконтракт № 14.516.11.0016 от 15.03.2013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аккумуляторы и батареи щелочные. Аккумуляторы никель-кадмиевые герметичные цилиндрические. ГОСТ Р МЭК 60285-2002. Введ. 01.07.2003. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. 14 с.
2. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной и другие неокислотные электролиты. Аккумуляторы никель-металл-гидридные герметичные. ГОСТ Р МЭК

- 61436-2004. Введ. 01.01.2005. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. 11 с.
3. Федоров А., Саранов С. Внутреннее сопротивление химических источников тока и его измерение // Компоненты и технологии. 2005. № 3. С. 230–232.
4. Цифровой измеритель ёмкости и внутреннего сопротивления аккумуляторов. URL: <http://www.radioradar.net/radiofan/>

measuring_technics/digital_capacitance_meter.html; (дата обращения: 05.02.2014).

5. *Sarasua A. E., Molina M. G., Mercado P. E.* Energy Storage – Technologies and Applications. Dynamic Modelling of Advanced Battery Energy Storage System for Grid-Tied AC

Microgrid Applications / ed. A. Zobaа. InTech [официальный сайт] URL: <http://www.intechopen.com/books/energy-storage-technologies-and-applications/dynamic-modelling-of-advanced-battery-energy-storage-system-for-grid-tied-ac-microgrid-applications> (дата обращения: 7.02.2014).

REFERENCES

1. Alkaline secondary cells and batteries. Sealed nickel-cadmium cylindrical single cells. ГОСТ Р МЭК 60285-2002. Введ. 01.07.2003. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. 14 с.

2. Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes. Sealed nickel-metal hydride rechargeable single cells. ГОСТ Р МЭК 61436-2004. Введ. 01.01.2005. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. 11 с.

3. *Fedorov A., Sarapov S.* Vnutrennee soprotivlenie himicheskikh istochnikov toka i ego izmerenie. *Komponenty I tehnologii*, 2005, № 3, с. 230. (The Internal Resistance of the Chemical Current (Power) Sources and its measurement, Components and Technologies, 2005, no. 3, p. 230–232) (in Russia).

4. Tsifrovoy izmeritel yomkosti i vnutrennego soprotivleniya akkumulatorov. Digital meter of battery capacitance and internal resistance. Available at: http://www.radioradar.net/radiofan/measuring_technics/digital_capacitance_meter.html; date of request to the site (accessed 05.02.2014).

5. *Sarasua A. E., Molina M. G., Mercado P. E.* Dynamic Modelling of Advanced Battery Energy Storage System for Grid-Tied AC Microgrid Applications. In Zobaа A. (Eds.), Energy Storage – Technologies and Applications, InTech Available at: <http://www.intechopen.com/books/energy-storage-technologies-and-applications/dynamic-modelling-of-advanced-battery-energy-storage-system-for-grid-tied-ac-microgrid-applications> (accessed 07.02.2014).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Афанасьев Владимир Михайлович – канд. техн. наук, главный специалист, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва. Служебный телефон: (499)-196-64-96, e-mail: afanasev_vm@nrcki.ru

Григорьев Александр Сергеевич – канд. техн. наук, заместитель начальника Управления экологии и радиационной безопасности, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва. Служебный телефон: (499)-196-96-08, e-mail: grigoriev_as@nrcki.ru

Клестов Константин Андреевич – инженер, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва. Служебный телефон: (499)-196-64-28, e-mail: klestov_ka@nrcki.ru

Павлов Дмитрий Владимирович – начальник отдела, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва. Служебный телефон: (499)-196-70-72, e-mail: pavlov_dv@nrcki.ru

Печак Виктор Владимирович – инженер, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва. Служебный телефон: (499)-196-94-38, e-mail: pechak_vv@nrcki.ru