

УДК 629.78.064.5

А. Л. АЗАРНОВ, К. В. БЕЗРУЧКО, В. И. ЛАЗНЕНКО, С. В. СИНЧЕНКО, А. А. ХАРЧЕНКО**ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРОВ
ЭНЕРГОУСТАНОВОК ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Розглянуто суть методу експрес-діагностики електрохімічних акумуляторів. Приведені результати експериментального дослідження нікель-кадмієвого акумулятора НК-125 при різних ступенях зарядженості. Представлені основні результати експериментальних досліджень нікель-кадмієвих акумуляторів, які увійшли до математичної моделі визначення стану електрохімічних акумуляторів в складі енергоустановки. Побудовано математичну модель для діагностування електрохімічного акумулятора. Проведено порівняння результатів розрахунків з експериментальними результатами.

Ключові слова: електрохімічний акумулятор, діагностування, енергоустановка, математична модель, вольт-амперна характеристика, розрядна характеристика

Рассмотрено сущность метода экспресс-диагностики электрохимических аккумуляторов. Приведены результаты экспериментального исследования никель-кадмиевого аккумулятора НК-125 при различных степенях заряженности. Представлены основные результаты экспериментальных исследований никель-кадмиевых аккумуляторов, вошедшие в математическую модель определения состояния электрохимических аккумуляторов в составе энергоустановок подвижных объектов. Построена математическая модель для диагностирования электрохимического аккумулятора. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными результатами.

Ключевые слова: электрохимический аккумулятор, диагностирование, энергоустановка, математическая модель, вольт-амперная характеристика, разрядная характеристика

Essentiality of method of express-diagnostics of electrochemical accumulators is considered. The results of experimental studies of nickel-cadmium batteries with different charge level shown. Rapid diagnosis base on the impact on the battery variables in the sign of the current pulses, allows you to define the parameters and characteristics of the battery in a short time, on a range of parameters and without interfering with the battery operation. The main experimental results of nickel-cadmium batteries are presented. These results were included in the mathematical model of determining the state of the electrochemical batteries as a part of power plants. A mathematical model for the diagnosis of an electrochemical battery is built. The comparison of the calculation results with the experimental results conducted.

Keywords: electrochemical battery, diagnostics, energy installation, mathematical model, the current-voltage characteristic, breakdown characteristic

Введение. Электрохимические накопители энергии являются одним из наиболее критичных элементов в составе современных энергоустановок подвижных объектов.

Для диагностического контроля технического состояния электрохимических аккумуляторов энергоустановок подвижных объектов применяются методы, требующие демонтажа электрохимических аккумуляторов с объекта, с последующим проведением комплекса работ на специализированных станциях. Контроль параметров электрохимических аккумуляторов в процессе эксплуатации на объекте не осуществляется, что может привести к сбоям в его работе.

Таким образом, возникает необходимость в разработке метода и средств диагностического контроля технического состояния электрохимических аккумуляторов энергоустановок подвижных объектов без прекращения работы энергоустановки и всего объекта в целом.

Постановка задачи. В настоящей работе представлены основные результаты экспериментальных исследований по созданию методики импульсной экспресс-диагностики энергоустановок подвижных объектов.

Основной целью данной работы, являлось разработка метода экспресс-диагностики энергоустановок подвижных объектов за короткое время в штатном режиме работы и без прекращения функционирования энергоустановки. Сущность разраба-

тываемого метода заключается в воздействии на аккумулятор специальной последовательностью импульсов тока, измерении и анализе отклика по напряжению и определении основных параметров аккумулятора с помощью математических моделей [1–4].

Условия проведения экспериментальных исследований и стенд для исследований. Все экспериментальные исследования проводились на никель-кадмиевых аккумуляторах НК-125 и включали в себя 2 основных этапа:

- получение характеристик нового аккумулятора;
- получение ряда характеристик аккумулятора при различных степенях заряженности аккумуляторов.

В рамках программы эксперимента предусмотрено воздействие на аккумулятор пакета знакопеременных импульсов тока, а с целью контроля полученных результатов, проведение прямого заряда и прямого разряда постоянным током.

Режимы этих воздействий характеризуются следующими параметрами:

- токи заряда и разряда - 12,5 А;
- знакопеременные пакеты импульсов тока - 0... ±120 А, с шагом 5 А.

Структура стенда для проведения исследований представлена на рис. 1, а внешний вид стенда представлен на рис. 2 [5].

Получаемых данных достаточно для построения вольт-амперной характеристики электрохими-

ческого аккумулятора. Для определения значений остальных параметров состояния аккумуляторов, используется математическая модель.



Рис. 1 – Структурная схема стенда для исследований

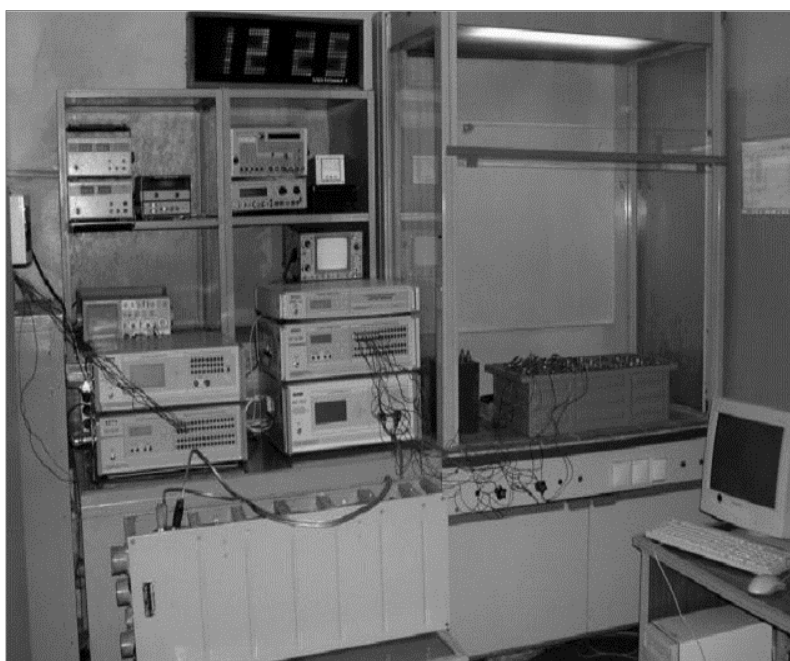


Рис. 2 – Внешний вид стенда для исследований

Экспериментальное исследование нового никель-кадмиевого аккумулятора. Для построения вольт-амперной характеристики, на аккумулятор подавались пакеты прямоугольных импульсов тока (переменных как по величине, так и по знаку) (рис. 3а) и снимались отклики по напряжению (рис. 3б). После обработки данных была построена вольт-амперная характеристика нового полностью заряженного никель-кадмиевого аккумулятора НК-125 (рис. 4).

Однако, полученных данных не достаточно для построения математической модели никель-кадмиевого аккумулятора. Необходимо проведение дополнительных исследований аккумуляторов при различных степенях заряженности, для уточнения коэффициентов входящих в математическую модель.

Экспериментальное исследование никель-кадмиевого аккумулятора при различных степенях заряженности. Далее аккумуляторы подверга-

лись воздействию одинаковых пакетов импульсов тока, каждый из которых состоял из восьми различных по величине значений тока. Воздействие одного пакета импульсов тока снижало емкость аккумулятора примерно на 7,0 А·ч.

Пример такого пакета импульсов тока представлен на рис. 5а, а отклики по напряжению представлены на рис. 5б.

Количество пакетов импульсов тока зависит от состояния аккумулятора, и равнялось такому количеству, которое приводит к полному разряду аккумулятора. Для каждого единичного пакета импульсов тока и аналогичного пакета откликов по напряжению строятся вольт-амперные характеристики.

Данные вольт-амперные характеристики в дальнейшем будут использованы для построения математической модели.

Отклики по напряжению и вольт-амперные характеристики нового никель-кадмиевого аккумулятора НК-125 представлены на рис. 6. Далее прове-

дены исследования никель-кадмиевых аккумуляторов при различных степенях заряженности. Отклики по напряжению и вольт-амперные характеристики

ки никель-кадмиевого аккумулятора при этих исследованиях представлены на рис. 7.

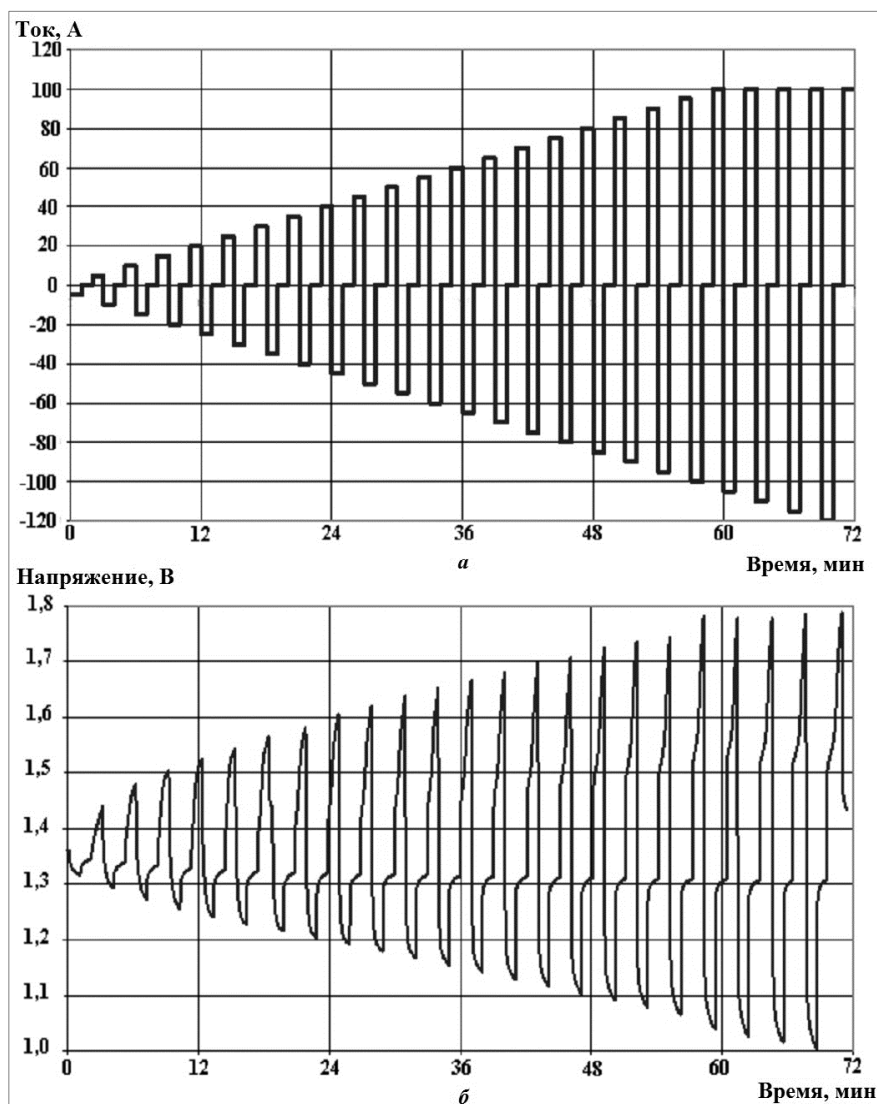


Рис. 3 – Результаты экспериментального исследования нового никель-кадмиевого аккумулятора НК-125 при нормальных условиях:

a – импульсы тока, воздействующие на аккумулятор; *б* – отклики по напряжению на пакеты импульсов тока

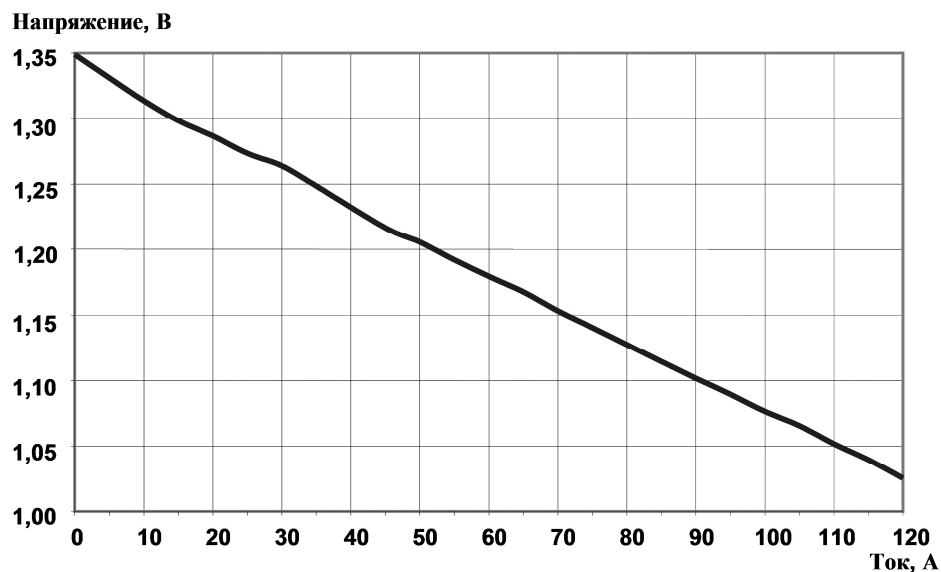


Рис. 4 – Вольт-амперная характеристика полностью заряженного никель-кадмиевого аккумулятора НК-125

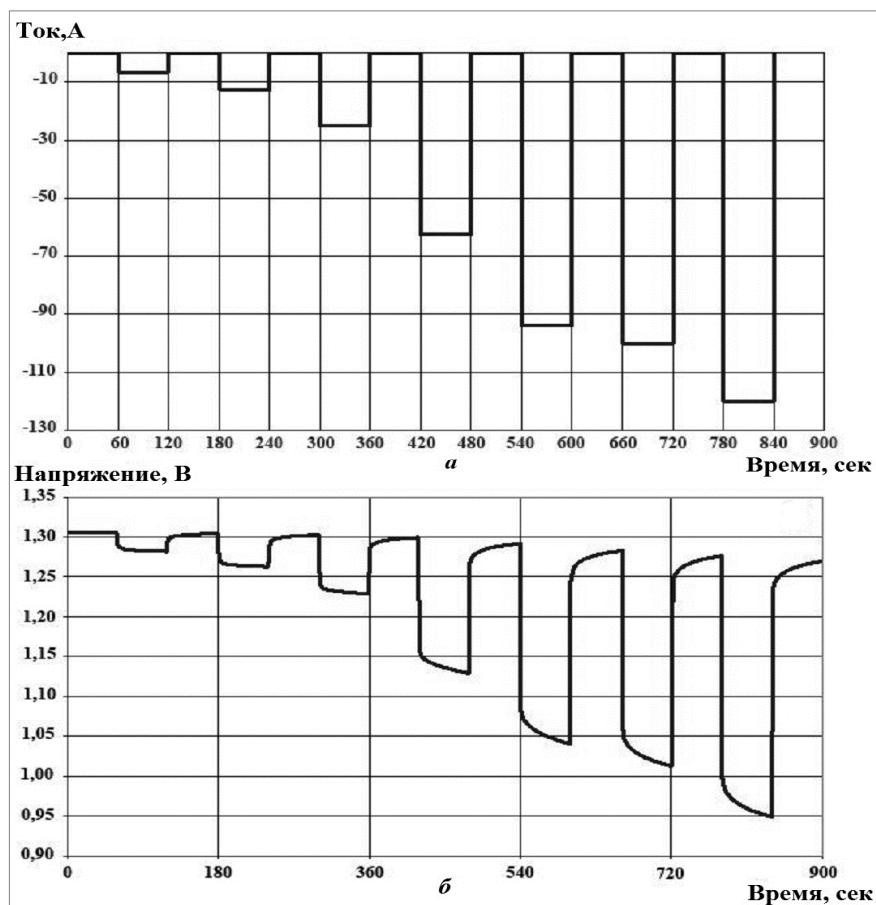


Рис. 5 – Результаты экспериментального исследования никель-кадмиевого аккумулятора НК-125 при различных степенях заряженности в нормальных условиях:

а – единственный пакет импульсов тока воздействующих на аккумулятор; *б* – единственный пакет откликов по напряжению аккумулятора

Построение диагностической математической модели электрохимического аккумулятора. Структура диагностической математической модели электрохимического аккумулятора показана на рисунке 8 [6].

Блок 1 в структуре математической модели описывает зависимости параметров состояния электрохимического аккумулятора от формы вольт-амперной характеристики, которая в виде таблиц напряжений и токов является входными параметрами блока 1 математической модели.

Полученные с помощью блока 1 параметры состояния электрохимического аккумулятора являются выходными параметрами диагностической математической модели электрохимического аккумулятора и используются в качестве специфических параметров блока 2 модели.

Блок 2 в структуре математической модели описывает разрядную характеристику электрохимического аккумулятора с учетом его состояния.

Уравнения блока 1 были получены эмпирически по результатам проведенных экспериментальных исследований.

Заряженность аккумулятора НК-125 можно определить по величине напряжения разомкнутой цепи с помощью выражения:

$$q = k_1 \cdot U_0 - k_2 \cdot e^{k_3 \cdot U_0} + k_4, \quad (1)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 — эмпирические коэффициенты;

U_0 — ЭДС электрохимического аккумулятора, В.

Зависимость разрядной емкости аккумулятора НК-125 от его внутреннего сопротивления имеет вид:

$$Q = k_5 \cdot r^{k_6} + k_7 \cdot r + k_8, \quad (2)$$

где k_5, k_6, k_7, k_8 — эмпирические коэффициенты;

r — постоянная составляющая активного внутреннего сопротивления электрохимического аккумулятора, Ом.

Таким образом, емкость полностью заряженного аккумулятора связана с заряженностью и разрядной емкостью выражением:

$$Q_0 = \frac{Q}{q}, \quad (3)$$

где Q — разрядная емкость, А·ч;

q — заряженность аккумулятора.

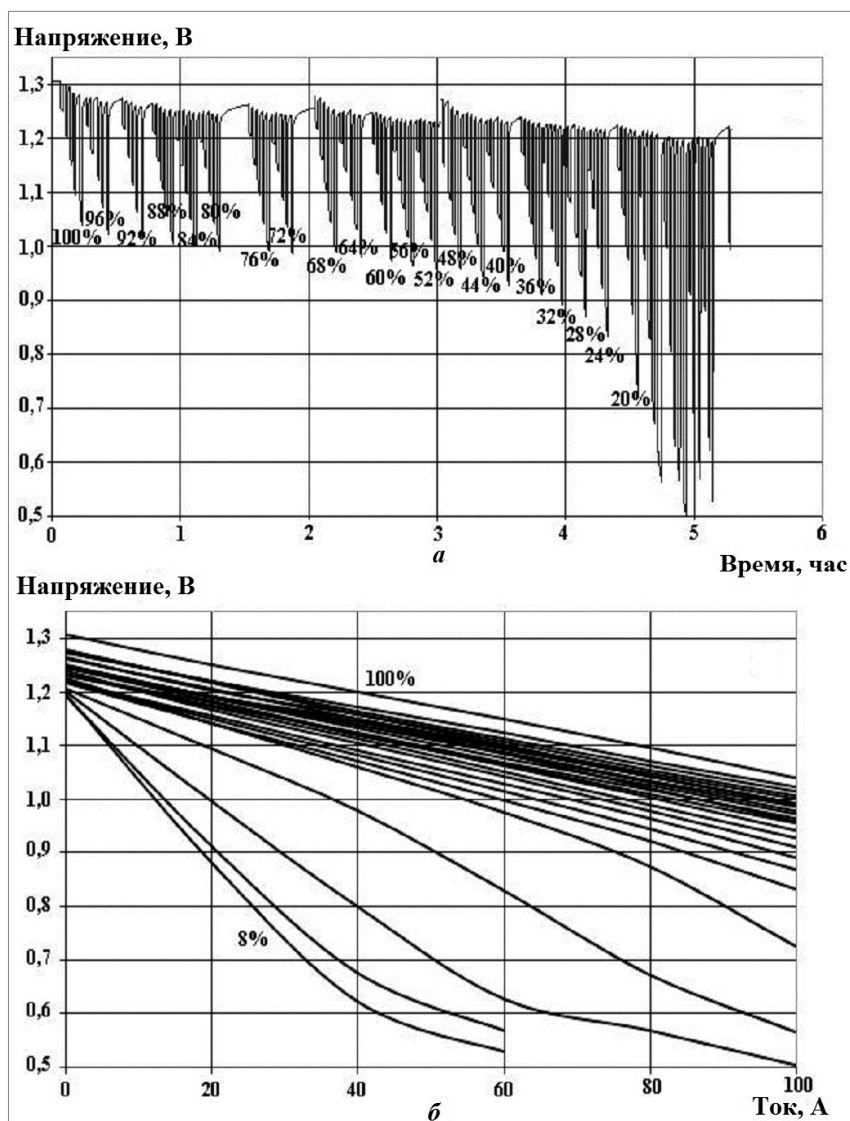


Рис. 6 – Результаты экспериментального исследования нового никель-кадмиевого аккумулятора НК-125 при различных степенях заряженности в нормальных условиях:

a — отклики по напряжению; b — вольт-амперные характеристики

И блок 1 диагностической математической модели аккумулятора НК-125 можно представить в виде:

$$\begin{cases} q(U_0) = k_1 \cdot U_0 - k_2 \cdot e^{k_3 \cdot U_0} + k_4 \\ U_0 \min \leq U_0 \leq U_0 \max \\ Q(r) = k_5 \cdot r^{k_6} + k_7 \cdot r + k_8 \\ r \min \leq r \leq r \max \\ Q_0 = \frac{Q(r)}{q(U_0)} \end{cases} \quad (4)$$

Пример расчета заряженности аккумулятора НК-125 в зависимости от напряжения разомкнутой цепи приведен на рис. 9а, а пример расчета разрядной емкости аккумулятора НК-125 от его внутреннего сопротивления на рис. 9б.

Разрядную характеристику аккумулятора (блок 2 модели) в области токов более 0,1С хорошо описывает модифицированное уравнение Шеферда:

$$U(I, t) = U_0 - r \cdot I - k_9 \cdot \left(\frac{I \cdot t}{k_{10} \cdot Q_0 - I \cdot t} \right) \times \left(I + k_{11} \cdot e^{-k_{12} \cdot \frac{I \cdot t}{k_{10} \cdot Q_0 - I \cdot t}} - 1 \right) \quad (5)$$

где Q_0 – полная емкость электрохимического аккумулятора, А·ч;

I – ток разряда электрохимического аккумулятора, А;

t – время, с;

$k_1 - k_{12}$ – эмпирические коэффициенты.

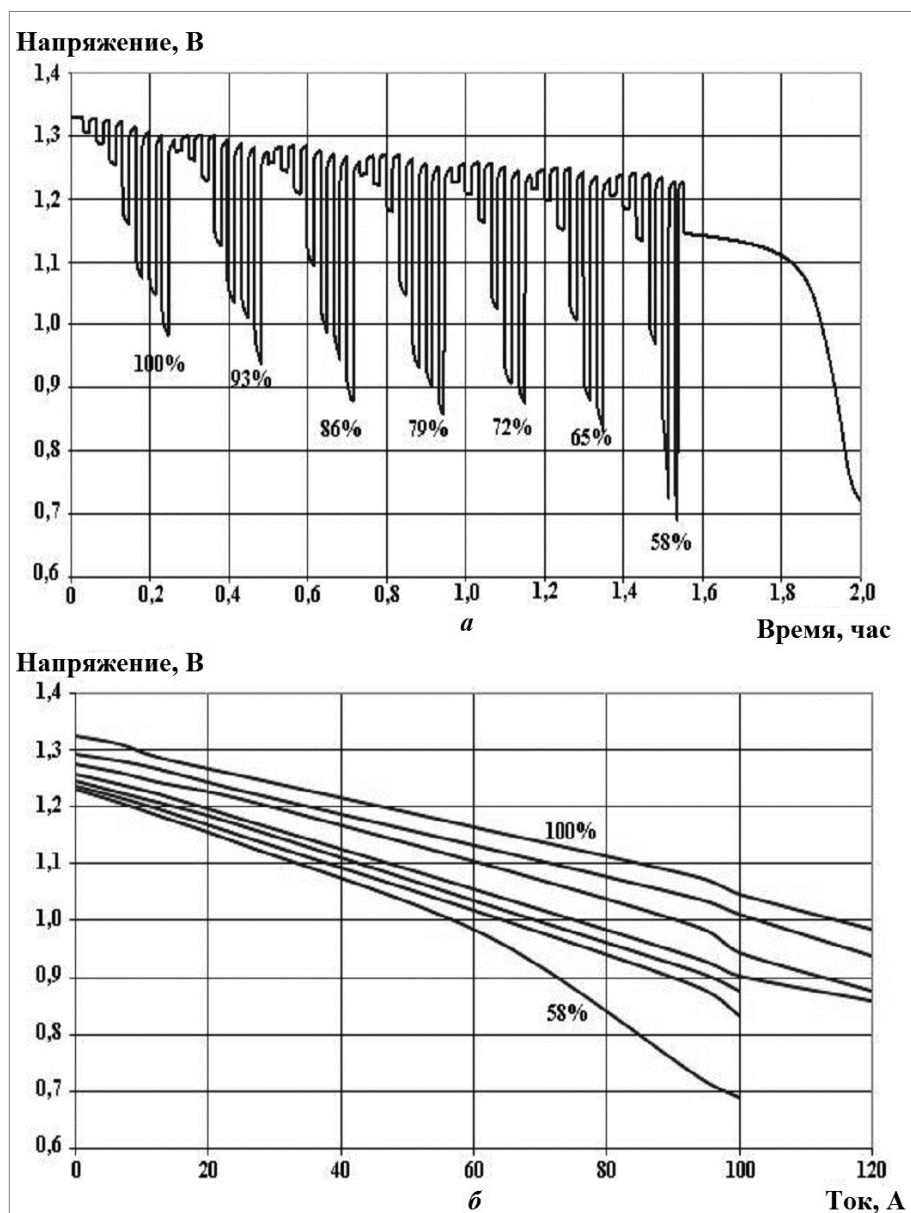


Рис. 7 – Результаты экспериментального исследования никель-кадмиевого аккумулятора НК-125, подверженного деградации, при различных степенях заряженности в нормальных условиях:

a – отклики по напряжению; b – вольт-амперные характеристики

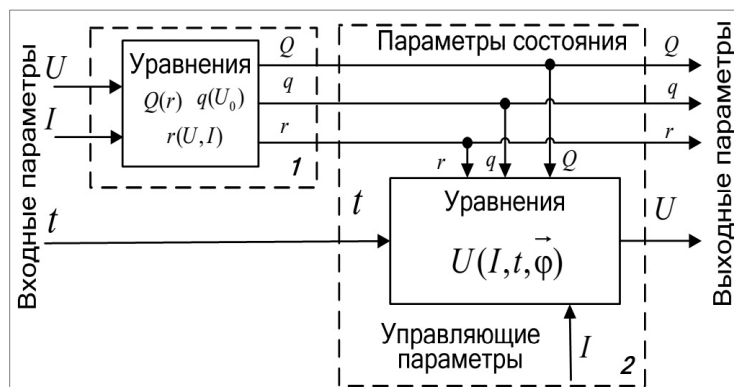


Рис. 8 – Структура математической модели электрохимического аккумулятора

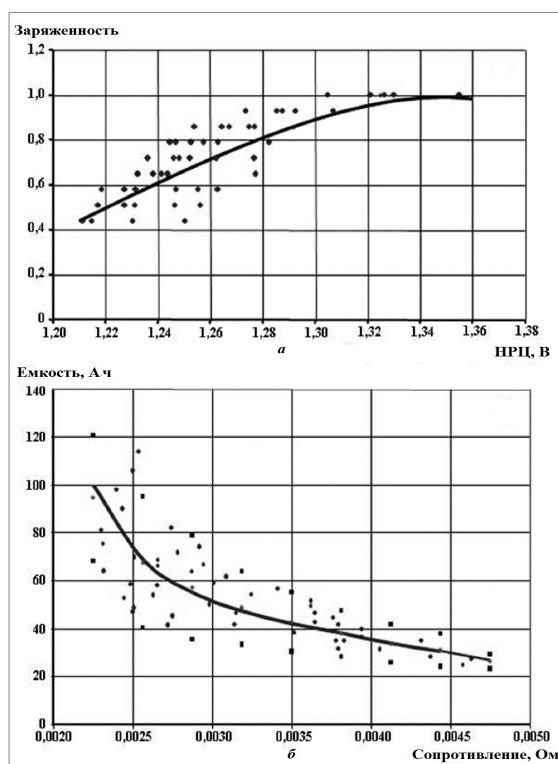


Рис. 9 – Пример расчета:

a – зависимости зарядности аккумулятора НК-125 от напряжения разомкнутой цепи; b – зависимости разрядной емкости аккумулятора НК-125 от сопротивления

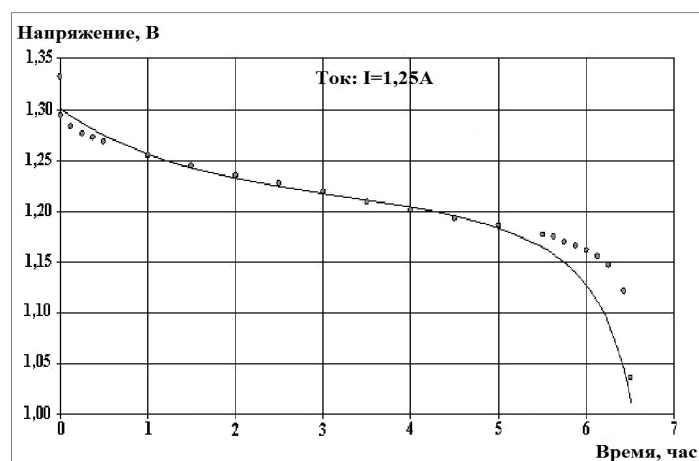


Рис. 10 – Расчетная и экспериментальная разрядные характеристики аккумулятора НК-125

Пример расчетной и экспериментальной разрядных характеристик аккумулятора НК-125 приведен на рис. 10.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований, диагностическую математическую модель аккумулятора НК-125 можно записать в виде:

$$\left\{ \begin{aligned} & q(U_0) = k_1 \cdot U_0 - k_2 \cdot e^{k_3 \cdot U_0} + k_4 \\ & U_0 \min \leq U_0 \leq U_0 \max \\ & Q(r) = k_5 \cdot r^{k_6} + k_7 \cdot r + k_8 \\ & r \min \leq r \leq r \max \\ & Q_0 = \frac{Q(r)}{q(U_0)} \\ & U(I, t) = E - r \cdot I - k_9 \cdot \left(\frac{I \cdot t}{k_{10} \cdot Q_0 - I \cdot t} \right) \cdot I + \\ & + k_{11} \cdot \left(e^{-k_{12} \cdot \frac{I \cdot t}{k_{10} \cdot Q_0}} - 1 \right) \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Заключение. В работе представлен метод позволяющий определить без проведения разряда электрохимических аккумуляторов или батарей следующие параметры и характеристики: разрядную емкость (Q_p), внутреннее сопротивление (r), напряжение начала ($U_{\text{нач}}$) и конца ($U_{\text{ркон}}$) разряда, напряжение разомкнутой цепи ($U_{\text{рц}}$) и ЭДС (U_0), вольт-амперную характеристику ($U=f(I, q)$), разрядную характеристику ($U=f(t)$).

Для определения состояния электрохимических аккумулятора или батареи достаточно промежуток времени от 12 до 14 минут.

Погрешность определения разрядной емкости аккумулятора или батареи предложенным методом не превышает 6%.

Список литературы

1. Синченко С. В. Теоретические аспекты определения состояния электрохимических аккумуляторов с помощью импульсного воздействия / С. В. Синченко // Вісник Дніпропетровського Університету. – 2008. – №4. Т.16. – С. 140–144. 2. Ширинский С. В. Применение ускоренных испытаний для оценки остаточного ресурса аккумуляторов / С. В. Ширинский, К. В. Безручко // Вісник Дніпропетровського Університету. – 2007. – №9/2. – С. 181–185. 3. Безручко К. В. Диагностика электрохимических аккумуляторов энергоустановок летательных аппаратов / К. В. Безручко, А. О. Давидов, С. В. Синченко, и др. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2009. – № 48. – С. 138–143. 4. Безруч-

ко К. В. Использование экспериментальных вольт-амперных характеристик герметичных свинцово-кислотных аккумуляторов систем электроснабжения стартовых комплексов для экспресс-диагностики этих аккумуляторов / К. В. Безручко, А. О. Давидов, В. И. Лазненко, и др. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аерокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2012. – Вып. 57. – С. 161–167. 5. Азарнов А. Л. Обзор и анализ оборудования для определения технического состояния электрохимических аккумуляторов / А. Л. Азарнов, К. В. Безручко, А. О. Давидов, и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – №4(81). – С. 44–49. 6. Безручко К. В. Сравнение методов построения математических моделей для исследования электрохимических аккумуляторов / К. В. Безручко, С. В. Синченко, А. Л. Азарнов, и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – №7/124. – С. 68–71.

References (transliterated)

1. Synchenko S. V. Teoretycheskie aspekty opredeleniya sostoyaniya elektrokhimicheskikh akkumulyatorov s pomoshch'yu impul'snoho vozdeystviya [The theoretical aspects of determining the state of the electrochemical battery with a pulsed exposure]. *Visnyk Dnipropetrovs'koho Unyversytetu*. 2008, no. 4. Vol. 16. pp. 140–144. 2. Shyrynsky S. V. Bezruchko K. V. Prymenenye uskorennykh yspytaniy dlya otsenky ostatochnoho resursa akkumulyatorov [The use of accelerated tests to assess the residual life of batteries]. *Visnyk Dnipropetrovs'koho Unyversytetu*. 2007. no. 9/2. pp. 181–185. 3. Bezruchko K. V., Davydov A. O., Synchenko S. V., Kharchenko A. A., Shyrynsky S. V., Azarnov A. L. Dyahnostyka elektrokhimicheskikh akkumulyatorov enerhoustanovok letatel'nykh apparatov [Diagnosis of electrochemical batteries power plants of aircraft]. *Vestn. Khar'k. politekhn. in-ta. Ser. Elektroenerhetyka i peretvoryval'na tekhnika*. [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute]. 2009. no. 48. pp. 138–143. 4. Bezruchko K. V., Davydov A. O., Laznenko V. Y. Synchenko S. V., Frolov V. P., Shyrynsky S. V. Ispol'zovanye eksperimental'nykh vol't-ampernykh kharakterystyk hermetichnykh svyntsovo-kyslotnykh akkumulyatorov system elektrosnabzheniya startovykh kompleksov dlya ekspress-dyahnostyky etykh akkumulyatorov [Using the experimental current-voltage characteristics of the sealed lead-acid batteries launch complexes of power supply systems for the rapid diagnosis of these batteries]. *Otkrytye informatsyonnye i komp'yuternye yntehyrovannye tekhnolohyy: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. in-ta im. N. E. Zhukovskoho «KhAY»*. – Kh., 2012. Vol. 57. pp. 161–167. 5. Azarnov A. L., Bezruchko K. V., Davydov A. O., Laznenko V. Y. Synchenko S. V., Shyrynsky S. V., Kharchenko A. A. Obzor y analiz oborudovaniya dlya opredeleniya tekhnicheskoho sostoyaniya elektrokhimicheskikh akkumulyatorov [Review and analysis equipment for determining the technical state of the electrochemical battery]. *Avyatsyonno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnolohyya*. 2011. no. 4(81). pp. 44–49. 6. Bezruchko K. V., Synchenko S. V., Azarnov A. L., Laznenko V. Y. Tymchenko A. A. Sravnenye metodov postroyeniya matematicheskikh modeley dlya yssledovaniya elektrokhimicheskikh akkumulyatorov [Comparison of methods of constructing mathematical models for the study of electrochemical battery] *Avyatsyonno-kosmicheskaya tekhnika y tekhnolohyya*. 2015. no. 7/124. pp. 68–71.

Поступила (received) 26.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Експресс-диагностика электрохимических аккумуляторов энергоустановок подвижных объектов / А. Л. Азарнов, К. В. Безручко, В. И. Лазненко, С. В. Синченко, А. А. Харченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 3 – 11. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.

Експресс-диагностика электрохимических аккумуляторов энергоустановок подвижных объектов / А. Л. Азарнов, К. В. Безручко, В. И. Лазненко, С. В. Синченко, А. А. Харченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 3 – 11. Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.

Rapid diagnosis of electrochemical batteries power plants moving objects / A. L. Azarnov, K. V. Bezruchko, V. I. Laznenko, S. V. Sinchenko, A. A. Kharchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 31 (1253). – P. 3 – 11. Bibliogr.: 5. – ISSN 2224-0349.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Азарнов Олександр Леонідович – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», старший науковий співробітник, м. Харків; тел.: (057) 788-44-28; email: azarnoff@mail.ru.

Азарнов Александр Леонидович – Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», старший научный сотрудник, г. Харьков; тел.: (057) 788-44-28; email: azarnoff@mail.ru.

Azarnov Alexander Leonidovich – National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky «Kharkiv Aviation Institute», Senior Research Fellow, Kharkiv, tel.: (057) 788-44-28; email: azarnoff@mail.ru.

Костянтин Васильович Безручко – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», головний науковий співробітник, м. Харків; тел.: (057) 788-40-65; email: kvbezruchko@mail.ru.

Константин Васильевич Безручко – доктор технических наук, профессор, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», главный научный сотрудник, г. Харьков; тел.: (057) 788-40-65; email: kvbezruchko@mail.ru.

Konstantin Bezruchko - Doctor of Technical Sciences, Professor, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky «Kharkiv Aviation Institute», Chief Researcher, Kharkiv; tel.: (057) 788-40-65; email: kvbezruchko@mail.ru.

Лазненко Віктор Іванович – Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», старший научный сотрудник, г. Харьков; тел.: (057) 788-44-28; email: laznenko.vitya@mail.ru.

Лазненко Віктор Іванович – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», старший науковий співробітник, м. Харків; тел.: (057) 788-44-28; email: laznenko.vitya@mail.ru.

Laznenko Viktor Ivanovich – National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky «Kharkiv Aviation Institute», Senior Research Fellow, Kharkiv, tel.: (057) 788-44-28; email: laznenko.vitya@mail.ru.

Сінченко Світлана Володимирівна – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», старший науковий співробітник, м. Харків; тел.: (057) 788-44-28; email: s.sinchenko@gmail.com.

Синченко Светлана Владимировна – Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», старший научный сотрудник, г. Харьков; тел.: (057) 788-44-28; email: s.sinchenko@gmail.com.

Sinchenko Svitlana Vladimirovna – National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky «Kharkiv Aviation Institute», Senior Research Fellow, Kharkiv, tel.: (057) 788-44-28; email: s.sinchenko@gmail.com.

Харченко Андрій Анатолійович – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», старший науковий співробітник, м. Харків; тел.: (057) 788-44-28; email: a_kharchenko2004@ukr.net.

Харченко Андрей Анатольевич – Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», старший научный сотрудник, г. Харьков; тел.: (057) 788-44-28; email: a_kharchenko2004@ukr.net.

Kharchenko Andrey Anatolievich – National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky «Kharkiv Aviation Institute», Senior Research Fellow, Kharkiv, tel.: (057) 788-44-28; email: a_kharchenko2004@ukr.net.