

УДК 541.136.

В. А. Дзензерский, д-р техн. наук,
С. В. Плаксин, д-р физ.-мат. наук,
Н. Е. Житник, О. И. Ширман

КОНТРОЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ТОКА ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

***Аннотация.** Предложен метод контроля энергетического состояния химического источника тока по параметрам сигнала отклика на импульсное воздействие, основанный на анализе формы сигнала отклика во временной области. В качестве информационного параметра используется постоянная времени процесса. Метод позволяет контролировать распределение зарядного процесса в объеме пористого электрода и по его характеру оценивать коэффициент использования активных веществ как обобщенный параметр энергетического состояния химического источника тока.*

***Ключевые слова:** химический источник тока, сигнал отклика, пористый электрод, коэффициент использования, активные вещества, постоянная времени процесс*

V. A. Dzenzerskiy, ScD., **S. V. Plaksin**, ScD.,
N. E. Zhitnik, O. I. Shirman

CONTROL OF THE ENERGY STATE OF CHEMICAL CURRENT SOURCE BY IMPULSE METHOD

***Abstract.** The method of monitoring the energy state of the chemical power source by the parameters of the response signal on impulse action, based on the analysis of the response signal form in the time domain was proposed. The time constant of the process is used as an information parameter. The method allows controlling the distribution of charging process in the porous volume of electrode and by its nature to evaluate the factor of active materials as a generic parameter of chemical power source energy state.*

***Keywords:** chemical power source, response signal, porous electrode, coefficient of use of active materials, the time constant of the process*

В. О. Дзензерський, д-р техн. наук,
С. В. Плаксін, д-р фіз.-мат. наук,
М. Я. Житник, О. І. Ширман

КОНТРОЛЬ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СТАНУ ХІМІЧНОГО ДЖЕРЕЛА СТРУМУ ІМПУЛЬСНИМ МЕТОДОМ

***Анотація.** Запропоновано метод контролю енергетичного стану хімічного джерела струму за параметрами сигналу відгуку на імпульсний вплив, заснований на аналізі форми сигналу відгуку в часовому вимірі. В якості інформаційного параметра використовується стала часу процесу. Метод дозволяє контролювати розподіл зарядного процесу в об'ємі пористого електрода і за його характером оцінювати коефіцієнт використання активних речовин як узагальнений параметр енергетичного стану хімічного джерела струму.*

***Ключові слова:** хімічне джерело струму, сигнал відгуку, пористий електрод, коефіцієнт використання, активні речовини, стала часу процесу*

Постановка проблемы. Использование химических источников тока (ХИТ) в качестве резервных источников электроэнергии в составе автономных систем электроснабжения локальных потребителей и телекоммуникационных систем предусматривает контроль их текущего технического состояния [1], который сводится к оценке основных энергетических показателей. В общепринятой практике основным показателем принимается фактическая емкость, которая харак-

теризует энергетическое состояние химического источника тока. Определение этого показателя традиционными методами требует больших временных затрат и специального оборудования с обязательным отключением химического источника тока от сети потребителя. Последнее не всегда возможно, особенно если он используется в качестве резервного источника электроэнергии. Кроме того, с точки зрения полноты информации об энергетическом состоянии ХИТ определение величины его фактической емкости является недостаточным, поскольку на значение этого параметра влияет множество

© Дзензерський В.А., Плаксин С.В.,
Житник Н.Е., Ширман О.И., 2014

неконтролируемых факторов как внешней, так и внутренней природы [2].

Поэтому контроль энергетического состояния химического источника тока за короткий промежуток времени с использованием сравнительно простого метода без нарушения штатного режима работы потребителя является актуальной задачей и требует новых подходов к ее решению.

Анализ исследований и публикаций.

Контроль состояния химических источников тока известными методами осуществляется путем непосредственных измерений ограниченного числа параметров. Например, предложенная авторами [1] система дистанционного контроля батарей предусматривает измерение величины напряжения на каждом аккумуляторе, температуру окружающей среды и передачу данных в операционный центр. Прогноз ресурса батарей определяется из его функциональной зависимости от температуры окружающей среды.

Авторы [3] считают оптимальным диагностическим параметром внутреннее сопротивление химического источника тока, по изменению которого оценивают работоспособность ХИТ. Величина внутреннего сопротивления определяется путем разряда батареи током 500 А, что требует подключения батареи к калиброванной нагрузке с отключением ее от сети потребителя. Очевидно, что такого объема информации недостаточно для объективной оценки энергетического состояния химического источника тока. Основываясь на том, что емкость ХИТ в Ампер-часах представляет меру протекающих в нем электрохимических реакций в соответствии с законом Фарадея и характеризуется удельным расходом активных материалов, более полно энергетическое состояние можно охарактеризовать обобщенным показателем эффективности работы ХИТ – коэффициентом использования активных масс. В общем виде коэффициент использования активных масс определяется из известного выражения [2]:

$$\theta = (C_p / C_0) 100\% = \frac{C_p}{k \cdot t} 100\%,$$

где C_p – емкость ХИТ при разряде; C_0 – теоретическая емкость, рассчитанная по

электрохимическим эквивалентам, k – электрохимический эквивалент разрядных процессов, m – активная масса, участвующая в процессе образования заряда.

Таким образом, задача определения энергетического состояния химического источника тока тесно связана с особенностями протекания электрохимического процесса в объемном поровом пространстве активных масс электродов, поскольку именно он в конечном итоге определяет электрические параметры ХИТ и его энергетическую эффективность.

В результате теоретических исследований особенностей распространения электрохимического процесса в объеме пористого электрода установлено [4], что наибольшие токи сосредоточены на поверхности электрода, следовательно, там идут и наиболее интенсивные электрохимические процессы, а по мере движения в глубину электрода величина тока падает. Авторы указанной работы объясняют закономерное уменьшение глубины проникновения процесса по объему пористого электрода с ростом поляризующего внешнего тока нелинейными свойствами электрохимической системы. Неравномерное участие активных веществ в электрохимическом процессе по объему порового пространства электрода, обусловленное нелинейностью системы, непосредственно влияет на коэффициент их использования. Из этого следует, что определение энергетических показателей ХИТ осложняется особенностями распространения электрохимического процесса в объеме порового пространства электродов, контроль которого представляет сложную техническую задачу.

Весьма информативным методом контроля электрохимического процесса является широко используемый в электрохимии импульсный гальваностатический метод.

Суть метода заключается в подаче на ХИТ импульса тока заданной величины с последующей регистрацией сигнала отклика, представляющего собой функциональную зависимость напряжения на клеммах ХИТ от времени.

Классическое выражение, описывающее функциональную зависимость $U = f(t)$

при поляризации пористого электрода гальваностатическим импульсом, имеет вид [5]:

$$U = b \frac{I}{I_0} \left(cth \left(\frac{h}{X_E} \right) - \frac{X_E}{h} \cdot \exp \left(-\frac{t}{\tau} \right) - \right. \\ \left. - 2 \frac{h}{X_E} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\Omega_n} \exp \left(-\frac{t}{\tau} \cdot \Omega_n \right) \right) \quad (1) \\ \Omega_n = 1 + \left(\frac{\pi \cdot n \cdot X_E}{h} \right)^2,$$

где t – время, $\tau = bC_{\Delta C}/2i_0$ – характерный временной масштаб переходного процесса,

$$b = \frac{2RT}{n} = const, \quad X_E = \sqrt{\frac{RT}{n \cdot F \cdot i_0 \cdot s \cdot \rho_Э}}$$

– характерный критерий неоднородности распределения электрохимического процесса по глубине пористого электрода, I_0 – эффективный ток обмена электрода полуограниченной толщины ($h \rightarrow \infty$), $I = i_0 \cdot U/b$ – габаритный ток пористого электрода, h – толщина электрода, c – емкость двойного электрического слоя, i_0 – плотность тока обмена, $\rho_Э$ – эффективное удельное сопротивление электролита, s – удельная поверхность пористого электрода, n – количество электронов, участвующих в единичном акте реакции, R – универсальная газовая постоянная, F – число Фарадея, T – температура.

Решение уравнения (1) позволяет установить связь между формой функциональной зависимости $U(t)$ и характером распространения процесса в объеме пористого электрода.

Однако практическое использование этого выражения в методах автоматизированного контроля состояния ХИТ затруднительно ввиду сложности определения входящих в него величин.

Цель исследования – разработка метода контроля энергетического состояния химического источника тока с использованием параметров сигнала отклика на импульсное воздействие без нарушения штатного режима работы потребителя.

Изложение основного материала исследований.

Возможность применения импульсного гальваностатического метода для контроля

состояния химического источника тока обоснована в [6]. Для реализации метода на ХИТ подавался импульс тока прямоугольной формы, амплитуда которого соответствовала зарядному току величиной $0,1 C_{10}$, а длительность должна быть соизмерима со временем протекания переходных процессов в электрохимической системе, вызванных ее нелинейными свойствами. При воздействии серией импульсов паузы между ними не должны быть короче времени разряда псевдоемкости системы после снятия импульса.

Реакция электрохимической системы на импульсное воздействие регистрировалась в виде сигнала отклика, представляющего собой функциональную зависимость величины напряжения на клеммах ХИТ от времени $U(t)$. Форма сигнала отклика несет информацию о переходных процессах в нелинейной системе и отражает особенности распространения электрохимического процесса в объеме порового пространства электродов. Это дает возможность контролировать процесс через параметры сигнала отклика в условиях работы химического источника тока, близких к реальным условиям эксплуатации, и повышает достоверность результатов исследований.

В данной работе предлагается метод анализа формы сигнала отклика во временной области, который позволяет по его параметрам, адекватно отражающим протекание электрохимического процесса в ХИТ, оценивать энергетическое состояние источника тока.

Метод основан на аналогии процессов, протекающих в электрическом конденсаторе и псевдоемкости, образованной объемным поровым пространством активных масс с учетом общих закономерностей протекания стадий электрохимического процесса. Для наглядности последовательность протекания стадий зарядного процесса представлена в виде структурной модели. Структурная модель используется при исследовании различных электрохимических процессов и представляет собой некоторую электротехническую схему, состоящую из элементов, которые по своему физическому смыслу соответствуют моделируемым процессам и электрохимическим элементам [7].

Связь параметров сигнала отклика ХИТ на импульсное воздействие, отражающего стадии электрохимического процесса, с элементами структурной модели, соответствующим этим стадиям, наглядно представлена на рис. 1.

Типичная форма сигнала отклика ХИТ, на которой обозначены стадии процесса, приведена на рис. 1, а [6]: I – падение напряжения U_{a1} , на активном сопротивлении в момент подачи импульса тока, II – стадия поляризации, напряжение которой ΔU_n вызвано протеканием электрохимических реакций, III – падение напряжения U_{a2} на активном сопротивлении в момент снятия импульса тока, IV – напряжение спада $\Delta U_{сп}$, или деполяризации после снятия импульса тока.

На структурной модели рис.1, б обозначены следующие элементы, описывающие ход зарядного процесса: E_0 – ЭДС источника в равновесном состоянии, значение которой определяется величиной напряжения разомкнутой цепи $U_{р.ц.}$, $C_{дс}$ – емкость двойного электрического слоя, R_0 – активное сопротивление электрохимической системы, C_a и R_a – активационные емкость и сопротивление соответственно, R_n – сопротивление транспорту ионов в электролите в объеме порового пространства активных масс, C_n – распределенная псевдоемкость объема порового пространства.

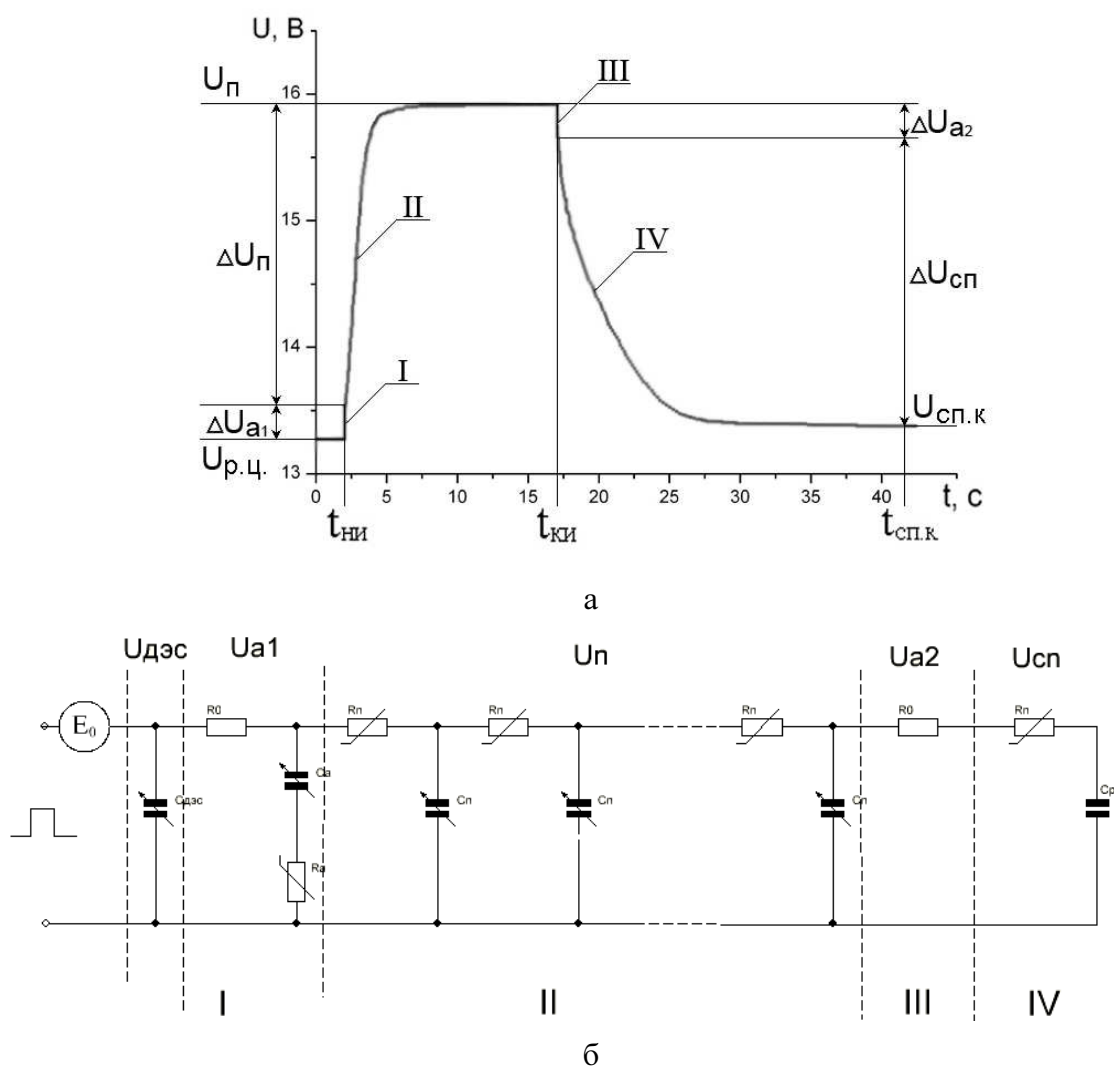


Рис. 1. Сигнал отклика ХИТ на импульс тока (а), структурная модель зарядного процесса при подаче импульса тока (б)

Для решения поставленной задачи практический интерес представляет стадия поляризации, поскольку характер электрохимического процесса в основном определяется поляризационными параметрами R_n и C_n , характеризующими свойства активных веществ химического источника тока.

С использованием метода математической обработки сигналов, подробно описанном в [8], выделены участки сигнала отклика, отображающие стадии поляризации и деполяризации для их дальнейшего анализа. Как видно из рис. 1, а, участки II и IV сигнала отклика, отражающие эти стадии, имеют экспоненциальную зависимость от времени, вызванную неравномерным распределением концентрации электролита в порах активных масс, которая описывается уравнением нестационарной диффузии

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где C – текущее значение концентрации электролита в при электродном слое при наличии тока во внешней цепи, x – расстояние от поверхности электрода, D – коэффициент диффузии.

Распределение концентрации электролита соответствует распределению заряда и потенциала по объему порового пространства, при этом скорость распределения заряда и потенциала определяется главным образом эффективной удельной емкостью порового пространства и эффективным удельным сопротивлением электролита в порах. С определенными допущениями процесс распределения заряда и потенциала по объему активной массы, вызванный концентрационной поляризацией, можно рассматривать как зарядку объемно-пористого конденсатора через сопротивление электролита в порах. Этот процесс описывается уравнением макрокинетики в пористых средах при работе пористого электрода в активационно-омическом режиме [4]

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \rho S C \frac{\partial U}{\partial t}, \quad (5)$$

где U – текущее напряжение поляризации; ρ – эффективное удельное сопротивление электролита в порах; S – удельная поверхность единицы объема порового простран-

ства; C – эффективная емкость активной массы на единицу объема.

Концентрационная поляризация пористого электрода по его объему моделируется посредством длинной RC-линии, процессы в которой описываются уравнением

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = RC \frac{\partial U}{\partial t}, \quad (6)$$

где U – напряжение на соответствующем RC – участке линии, R и C – сопротивление и емкость участков линии соответственно, $\tau = RC$ – постоянная времени линии.

Из уравнений (4) – (6) следует, что распределение напряжения вдоль длинной RC – линии соответствует распределению концентрации электролита в объеме порового пространства электрода при воздействии на них импульсом тока. При этом по характеру электрохимического поведения активных веществ поляризационные параметры R_n и C_n являются переменными во времени.

Переходные процессы в системах с емкостными составляющими можно описать во временной области, используя в качестве информационного параметра постоянную времени процесса τ , которая в общем виде представлена как $\tau = R_n C_n$, а для случая зарядки объемно-пористого конденсатора из выражения (5) получаем

$$\tau = C_{\text{эф}} \rho_{\text{эф}} S. \quad (7)$$

Из уравнения (5) видно, что распространение зарядного процесса в объемно-пористом электроде определяется скоростью выравнивания заряда и потенциала по объему пористого электрода и зависит от площади активной поверхности порового пространства и электрических свойств активной массы, которые находят свое отражение в значениях величины псевдоемкости C_n и поляризационного сопротивления R_n . Таким образом, по значению постоянной времени процесса можно оценить площадь поверхности объемного порового пространства, которая участвует в зарядном процессе, и электрические свойства активной массы, в совокупности определяющие коэффициент использования активных веществ.

Использование функциональной зависимости $\tau(t)$ позволяет определять динамику указанных параметров и таким образом контролировать текущее энергетическое состояние химического источника тока.

Значение постоянной времени как информационного параметра, а также ее функциональную зависимость от времени можно определить путем анализа формы сигнала отклика, используя выше указанную аналогию. Для этого экспоненциальные участки сигнала отклика, отображающие стадии поляризации и деполяризации, описываются соответствующими уравнениями переднего и заднего фронтов воздействующего на конденсатор импульса. В результате после соответствующих преобразований и подстановки значений параметров сигнала отклика система уравнений, описывающая зарядный процесс в химическом источнике тока при подаче на него гальваностатического импульса, примет следующий вид:

$$U(t) = \begin{cases} U_{p.u.}, t_{nu} < t \\ U_{p.u.} + \Delta U_{a1} + \Delta U_{II} \times \\ \times \left(1 - e^{-t_1/\tau_n} \right), t_{nu} \leq t \leq t_{ku} \\ U_{cn.k.} + \Delta U_{cn} \cdot \left(e^{-t_2/\tau_{cn}} \right), \\ t_{ku} < t \leq t_{cn.k} \end{cases} \quad (8)$$

где $t_1 = t - t_{nu}$, $t_2 = t - t_{ku}$, τ_n – постоянная времени на стадии поляризации, τ_{cn} – постоянная времени на стадии спада (деполяризации).

Значения постоянной времени на соответствующих участках сигнала отклика определяются из второго и третьего уравнений системы и имеют следующий вид:

$$\tau_n(t) = - \frac{t}{\ln \left(1 - \frac{\Delta U_n}{\Delta U_n(t)} \right)} \quad (9)$$

$$\tau_{cn}(t) = - \frac{t}{\ln \left(\frac{\Delta U_{cn}}{\Delta U_{cn}(t)} \right)} \quad (10)$$

Уравнения (9) – (10) описывают распределение процесса в объеме активных масс пористых электродов во временной области.

Проверка распределения зарядного процесса проводилась путем анализа сигналов отклика аккумуляторных батарей, имеющих различный срок эксплуатации. По характеру распределения процесса можно оценить эффективность использования активных веществ в ХИТ. Основными факторами, влияющими на эффективность их использования, являются площадь реагирующей поверхности порового пространства активных масс, количество активных масс, участвующих в реакции, концентрация, или плотность электролита. В процессе эксплуатации происходит уменьшение реагирующей площади поверхности порового пространства в результате необратимых процессов сульфатации. При этом пленка сульфата свинца $PbSO_4$ экранирует часть активных масс электродов и закрывает устья пор по объему порового пространства, а часть кислоты расходуется на образование сульфатов, что отражается на распределении зарядов и потенциала по объему порового пространства активных масс. Эти изменения находят отражение в значениях поляризационного сопротивления и псевдоемкости, величины которых соответственно уменьшаются. В результате окисления токоотводов в процессе эксплуатации ХИТ на границе раздела токоотвод – активная масса образуется оксидная пленка, которая приводит к деградации активных масс и ухудшает электрический контакт с токоотводом, что в свою очередь также приводит к сокращению активной поверхности порового пространства.

Анализ сигнала отклика во временной области позволяет оценивать влияние указанных выше факторов на эффективность использования активных веществ и таким образом контролировать энергетическое состояние химического источника тока. Апробация предложенного метода проводилась на экспериментальном стенде для автоматизированного контроля технического состояния химических источников тока [9]. Схематическое решение и программное обеспечение стенда позволяют выполнять операции по формированию тестового импульса, реги-

страции сигнала отклика, его компьютерную обработку для выделения стадий электрохимического процесса и анализ формы сигнала отклика математическими методами.

В качестве примера для сравнения приведены результаты анализа сигналов отклика двух полностью заряженных аккумуляторных батарей (АБ) – новой батареи 6СТ-60А3 (1) и батареи 6СТ-60А3(2) со сроком эксплуатации три года. Общий вид измеренных сигналов отклика приведен на (рис. 2, а и рис. 2, б). На этом же рисунке представлены распределения зарядного процесса в активных массах электродов соответствующих батарей при подаче импульса тока (рис. 2, в и рис. 2, г), выраженные через постоянные времени τ_n .

Интерес представляет характер поведения зависимости $\tau(t)$ для батареи 6СТ-60А3(1), по которой можно судить о распределении процесса в объеме активных масс пористых электродов. При подаче импульса тока наблюдается резкое снижение величины τ , вызванное увеличением проводимости электролита в порах активных масс за счет повышения его плотности, т.е. концентрации кислоты, а также за счет преобразования рыхлой поверхности пленки сульфата свинца $PbSO_4$ в двуокись свинца PbO_2 и губчатый свинец Pb , обладающих высокой электропроводностью. Затем происходит рост величины τ , вызванный увеличением площади порового пространства активных масс по мере освобождения его от сульфатов, что, в свою очередь, сопровождается ростом псевдоемкости порового пространства.

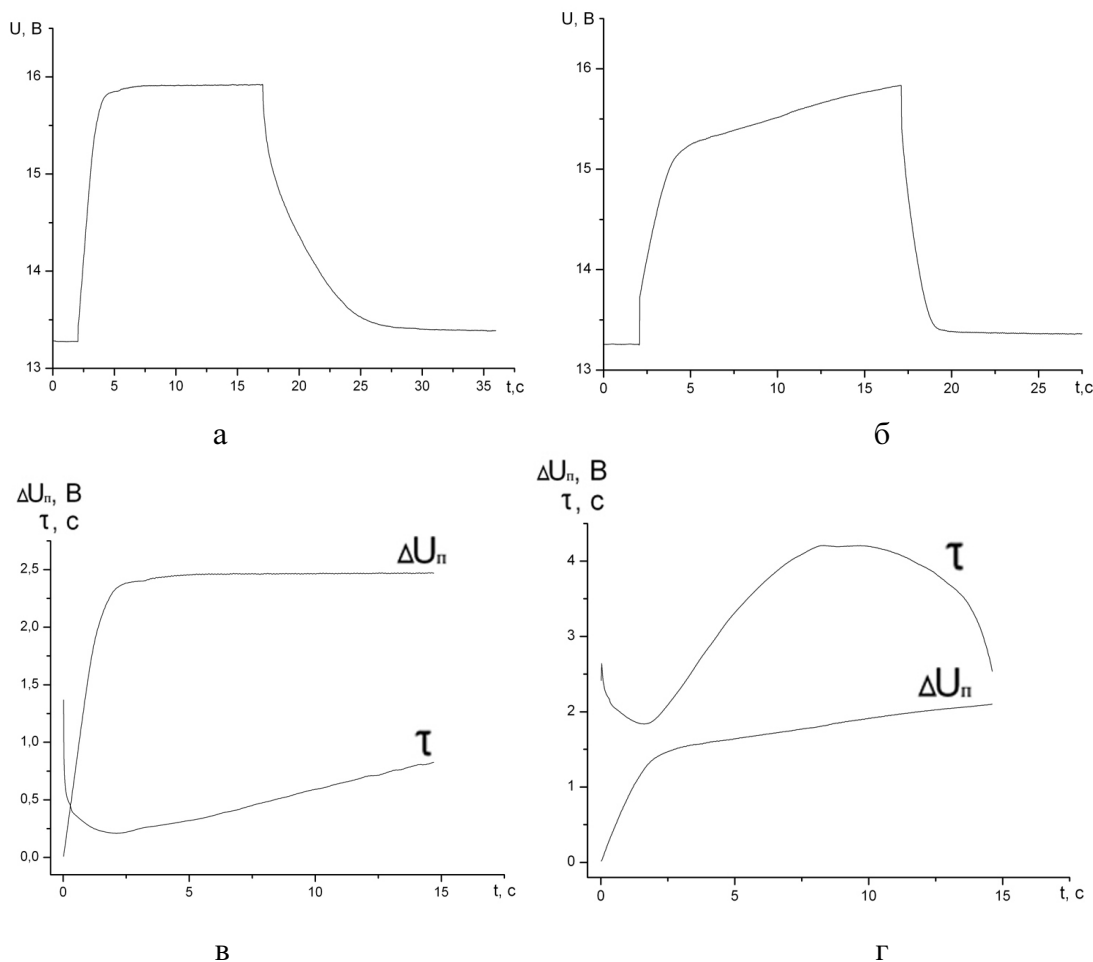


Рис. 2. Представление распределения зарядного процесса в активных массах пористых электродов во временной области:
(а) сигнал отклика АБ 6СТ-60А3(1); (б) сигнал отклика АБ 6 СТ-60(2); (в) участок поляризации АБ 6СТ-60А3(1); (г) участок поляризации АБ 6СТ-60А3(2)

В результате анализа формы сигнала отклика можно сделать вывод, что в аккумуляторной батарее 6СТ-60А3(1) распределение зарядного процесса в активных массах электродов имеет «объемный» характер, следовательно, активные массы в данном случае участвуют в электрохимических реакциях в полном объеме.

Иной характер распределения зарядного процесса в активных массах электродов наблюдается в аккумуляторной батарее 6СТ-60А3(2). В этом случае процесс распространяется до определенной глубины пор в ограниченной части объема активных масс, после чего наблюдается резкое уменьшение величины τ , вызванное существенным снижением значения псевдоемкости C_n в связи с сокращением активной площади порового пространства, вызванного расходом активных веществ и истощением их ресурса в процессе эксплуатации ХИТ и экранированием их поверхности пленкой сульфата свинца, а также снижением величины поляризационного сопротивления R_n поверхностного слоя активных масс.

По результатам анализа можно сделать вывод, что в этой аккумуляторной батарее имеет место распределение зарядного процесса в объеме активных масс электродов, близкое к «послойному», и активные массы используются не в полном объеме.

Выводы. Таким образом, предложенный метод анализа формы сигнала отклика ХИТ на импульсное воздействие во временной области позволяет, используя характер и параметры сигнала отклика, контролировать распространение электрохимического процесса в объеме активных масс пористых электродов и таким образом оценивать коэффициент их использования как обобщенный энергетический параметр химического источника тока. Следует отметить, что при разработке соответствующего программного обеспечения метод может быть реализован в системах автоматизированного контроля состояния ХИТ без нарушения штатного режима работы потребителя.

Список использованной литературы

1. T. Tsujikawa, T. Matsushima Remote Monitoring of VRLA Batteries for Telecommunications Systems, (2007), *Journal of Power Sources*, pp. 99 – 104, doi:10.1016/j.jpowsour.2006.12.062.

2. Дасоян М. А. Стартерные аккумуляторные батареи: Устройство, эксплуатация и ремонт. [Текст] / М. А. Дасоян, Н. И. Курзиков, О. С. Тютрюмов, В. М. Ягнятинский. – Москва : Транспорт, 1991. – 255 с.

3. Okoshi T., Yamada K., and T.Hirasawa, A Emori Battery Condition Monitoring (BCM) Technologies About lead-acid Batteries, (2006), *Journal of Power Sources*, pp. 874 – 878, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.11.008.

4. Галушкин Н. Е. Исследование глубины проникновения электрохимического процесса в пористых электродах [Текст] /Н. Е. Галушкин, Ю. Д. Кудрявцев // *Электрохимия*. М. : – 1994. – Т. 30. – № 3. – С.382 – 387.

5. Ксенжек О. С. Электрохимические процессы в системах с пористыми матрицами [Текст] / О. С. Ксенжек, Е. М. Шембель, В. А. Шустов. – К. : Вища школа, 1983. – 220 с.

6. Дзензерский В. А. Контроль состояния стартерных свинцовых аккумуляторов хронопотенциометрическим методом [Текст] / В. А. Дзензерский, Н. Е. Житник, С. В. Плаксин, И. И. Соколовский // *Электротехника та електроенергетика*. Запорожье : – 2005. – №1. – С.13 – 18.

7. Стойнов З. Б. Электрохимический импеданс. [Текст] / З. Б. Стойнов, Б. М. Графов, Б.Савова–Стойнова, В. В. Елкин. – М. : Наука, 1991. – 336 с.

8. Дзензерський В. А. Автоматизированная диагностика химических источников тока [Текст] / В. А. Дзензерский, М. А. Беда, Н. Е. Житник, С. В. Плаксин // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. Одесса : – 2011. – № 1 – 2. – С.6 – 9.

9. Плаксин С. В. Экспериментальный стенд для автоматизированного контроля состояния химических источников тока импульсным методом [Текст] / С. В. Плаксин, Н. Е. Житник, О. И. Ширман // *Гірничя електромеханіка та автоматика*. Днепропетровск : – 2012. – Вып. 89. – С. 58 – 63.

Получено 24.02.2014

References

1. T. Tsujikawa, T. Matsushima Remote Monitoring of VRLA Batteries for Telecommunications Systems, (2007), *Journal of Power Sources*, pp. 99 – 104, doi:10.1016/j.jpowsour.2006.12.062 (In English).

2. Dasoyan M. A., Kurzukov N.I., Tyutryumov O.S., and Yagnyatinskiy V.M. Starternye akkumulyatornye batarei: Ustroystvo, ekspluatatsiya i remont [Starter Batteries: Structure, Exploitation and Repair], (1991), Moscow, Russian Federation, *Transport*, 255 p. (In Russian).

3. Okoshi T., Yamada K., Hirasawa T., and Emori A. Battery Condition Monitoring (BCM) Technologies About Leadacid Batteries, (2006), *Journal of Power Sources*, pp. 874 – 878, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.11.008. (In English)

4. Galushkin N.E., and Kudryavcev Yu.D. Issledovanie elektrohimicheskogo processa v poristyh elektrodah [Investigation of the Penetration Depth of the Electrochemical Process in Porous Pelectrodes], (1994), Moscow, Russian Federation, *Electrochemistry*, Vol.30, No. 3, pp. 382 – 387 (In Russian).

5. Ksenzhek O.S., Stembel E.M., and Shustov V.A. Elektrohimicheskie processy v sistemah s poristymi matricami [Electrochemical Processes in Systems with Porous Matrix], (1983), Kiev, Ukraine, *Vyscha Shkola*, 220 p. (In Russian).

6. Dzenzerskiy V.A., Zhitnik N.E., Plaksin S.V., and Sokolovskiy I.I. Kontrol sostoyaniya starternih svincovyh akkumulyatorov hronopotenciometricheskim metodom [Monitoring of the State of the Leadacid Batteries by Chronopotentiometric Method], (2005), Zaporozhye, Ukraine, *Electrotechnics and Electric Power Industry*, No. 1, pp. 13 – 18 (In Russian).

7. Stoynov Z.B., Grafov B.M., Savova-Stoynova B., and Elkin V.V. Elektrohimicheskij impedans [Electrochemical Impedance], (1991), Moscow, Russian Federation, *Science*, 336 p. (In Russian).

8. Dzenzerskiy V.A., Beda M.A., Zhitnik N.E., and Plaksin S.V. Avtomatizirovannaya diagnostika himicheskikh istochnikov toka [Automatic Diagnosis of Chemical Power Sources],

(2011), Odessa, Ukraine, *Technology and Design in Electronic Equipment*, No. 1 – 2, pp. 6 – 9 (In Russian).

9. Plaksin S.V., Zhitnik N.E., and Shirman O.I. Eksperimentalnyj stend dlya avtomatizirovannogo kontrolya sostoyaniya himicheskikh istochnikov toka impulsnym metodom [Experimental Stand for the Automated Control of the State of Chemical Sources of Current by Impulse Method], (2012), Dnepropetrovsk, Ukraine, *Mining Electromechanics and Automation*, Vol. 89, pp. 58 – 63. (In Russian).



Дзензерский Виктор Александрович, д-р техн. наук директор института транспортных систем и технологий НАНУ «Трансмаг», Днепропетровск, ул. Писаржевского, 5.



Плаксин Сергей Викторович, д-р физ-мат. наук, зав. отделом института транспортных систем и технологий НАНУ «Трансмаг», Днепропетровск, ул. Писаржевского, 5. Тел. (056) – 3702182



Житник Николай Евтифиевич, научный сотрудник института транспортных систем и технологий НАНУ «Трансмаг», Днепропетровск, ул. Писаржевского, 5. Тел. (0562) – 323054



Ширман Оксана Игоревна, инженер 2 кат. института транспортных систем и технологий НАНУ «Трансмаг», Днепропетровск, ул. Писаржевского, 5. Тел.(0562)-323054 E-mail: shirman@westa-inter.com