

## Силовая электроника

УДК 621.355.1:541.13

В.А. Дзензерский, д-р техн. наук, Н.Е. Житник, С.В. Плаксин, д-р физ.-мат. наук, Л.М. Погорелая, Ю.А. Ткаченко

### Метод многопараметрического контроля адаптивной зарядки вторичных химических источников тока

Предложен метод контроля процесса зарядки вторичных химических источников тока, в котором в качестве информационных параметров используются кинетические параметры электрохимического процесса, получаемые путем анализа хронопотенциограмм заряжаемого источника тока. Разработан алгоритм адаптивной зарядки химического источника тока с использованием набора информационных параметров.

The method of monitoring of the secondary chemical current sources charging, in which the kinetic parameters of electrochemical process are got from the analysis of the charging current source chronopotentiograms and used as informative parameters, is proposed. The algorithm of the adaptive charging of chemical current source with the using of the set of informative parameters is developed.

#### Введение

Технологии производства и эксплуатации химических источников тока (ХИТ), использующие постоянно-токовые методы формирования и зарядки, сопряжены с большой длительностью проведения этих операций и существенными энергозатратами. Для интенсификации этих процессов в последние годы с успехом начали применять нестационарные режимы зарядки, использующие импульсные, асимметричные, пульсирующие и другие изменяющиеся во времени токи. Установлено также положительное влияние импульсных режимов зарядки на кинетику электрохимических процессов в ХИТ различных систем, что объясняется наличием большого числа воздействующих на процесс зарядки параметров импульсов [4]. Поскольку параметры импульсов являются регулируемыми, нестационарные методы позволяют осуществлять адаптивную зарядку ХИТ при наличии цепи обратной связи между заряжаемым источником тока и системой заряда путем изменения значений параметров импульсов в соответствии с состоянием ХИТ [5]. Отсюда вытекает важность выбора инфор-

мационных параметров, характеризующих текущее состояние заряжаемого источника тока и позволяющих управлять режимом зарядки.

Цель работы – разработка метода и алгоритма управления адаптивным режимом зарядки ХИТ с использованием набора информационных параметров, характеризующих кинетику электрохимического процесса в заряжаемом химическом источнике тока.

#### 1. Метод контроля состояния химического источника тока и процесса его зарядки

Реализация адаптивной зарядки ХИТ требует знания информации о состоянии ХИТ в данный момент времени. Такая текущая информация должна достаточно полно и точно характеризовать основные параметры источника, ее получение должно быть достаточно простым и доступным для практического применения. Для прямых измерений доступны такие параметры зарядного процесса, как величина напряжения на клеммах источника, амплитуда тока зарядных импульсов, их длительность и частота, длительность пауз между импульсами. При этом непосредственно к параметрам ХИТ относятся напряжение и ток, которых явно недостаточно для полного представления о текущем состоянии ХИТ и адекватного управления процессом зарядки. Более полную информацию о состоянии химического источника тока можно получить из анализа переходных процессов, протекающих в ХИТ при воздействии на него зарядными импульсами. Эти процессы регистрируются в виде изменения напряжения на клеммах ХИТ, представляющего собой отклик источника на импульс тока [1]. Такой подход получил дальнейшее развитие при разработке методов диагностирования состояния химических источников тока [6-8], а также методов контроля и управления режимами зарядки ХИТ, примерами которых могут быть методы, описанные в работах [4, 5].

Основываясь на многофункциональности импульсного воздействия на ХИТ, автор работы [5] предложил использовать импульсный режим зарядки одновременно в качестве фактора, воз-

действующего на электрохимический процесс, и в качестве источника информации о состоянии ХИТ. При таком подходе информационные параметры, полученные при анализе переходных процессов, отображающие динамику процесса, использовались для управления режимом зарядки ХИТ в соответствии с этой динамикой. Однако отсутствие в [5] сведений, устанавливающих связь кинетических параметров электрохимического процесса с параметрами аккумулятора, существенно сужает возможности управления адаптивным режимом зарядки ХИТ вследствие ограниченного объема информации о нем.

Нами обоснована связь параметров химического источника тока с кинетическими параметрами протекающего в нем электрохимического процесса, стадии которого регистрируются в виде хронопотенциограмм [6,7]. Детальный анализ хронопотенциограмм (ХПГ) позволяет получить информацию о основных параметрах ХИТ, а отслеживание динамики кинетических параметров процесса позволяет контролировать состояние источника в данный момент времени. Исходя из результатов анализа отклика конкретного ХИТ на импульсное воздействие, получен набор параметров ХИТ, которые могут быть использованы в качестве информационных параметров для определения состояния ХИТ, контроля динамики протекания в нем электрохимического процесса и управления режимом зарядки ХИТ адекватно его состоянию. Детально указанный набор параметров описан в работе [9], здесь же для наглядности он приведен на ХПГ, общий вид которой представлен на рис. 1.

В качестве примера в данной работе проанализирована хронопотенциограмма стартерной свинцово-кислотной аккумуляторной батареи (АБ). При подаче на АБ импульса тока амплитудой  $I_3 = 0,1C_{10}A$ , где  $C_{20}$  – величина емкости заряжаемой АБ в ампер-часах при ее разряде в течение 20 часов [10], путем анализа ХПГ конкретной аккумуляторной батареи можно получить значение следующих параметров:  $U_{pc}$  – напряжение разомкнутой цепи;  $U_{a1}$  – падение напряжения на активном внутреннем сопротивлении АБ в момент подачи импульса;  $U_{a2}$  – падение напряжения на активном внутреннем сопротивлении в момент снятия импульса;  $U_{пк}$  – концентрационная составляющая напряжения поляризации;  $U_{эx}$  – электрохимическая составляющая напряжения поляризации;  $U_n = U_{эx} + U_{пк}$  – полное напряжение поляризации;  $t_{эx}$  – время протекания электрохимической стадии процесса;  $t_u$  – длительность импульса

тока;  $t_{cp}$  – длительность спада потенциала с момента снятия импульса тока;  $U_{cпк}$  – конечное значение напряжения спада при  $t_{cp} = 4\tau$ , где  $\tau$  – постоянная времени электрохимической системы.

Роль каждого из приведенных параметров в процессе контроля состояния АБ и управления его зарядкой определяется, исходя из связи кинетических параметров процесса с параметрами АБ.

Напряжение разомкнутой цепи  $U_{pc}$  зависит от плотности электролита и определяется известным соотношением  $U_{pc} = (0,84 + \rho)n$ , где  $\rho$  – плотность электролита,  $n$  – количество аккумуляторов в батарее, откуда  $\rho = \left( \frac{U_{pc}}{n} - 0,84 \right)$ , г/см<sup>3</sup>.

Падение напряжения на внутреннем активном сопротивлении  $U_{a1}$  в момент подачи зарядного импульса зависит от ряда показателей, основными из которых являются сопротивление электролита и сопротивление активных масс электродов.

Время протекания электрохимической стадии  $t_{эx}$  характеризует скорость протекания этой стадии. В свою очередь, физической величиной, характеризующей скорость протекания электрохимической реакции, является плотность электрического тока. Для придания физического смысла этой стадии процесса нами введено понятие «крутизна электрохимической стадии», которое обозначается символом  $K$  и определяется отношением величины падения напряжения на электрохимической составляющей поляризации  $U_{эx}$  к времени протекания электрохимической стадии  $t_{эx}$ :  $K = U_{эx}/t_{эx}$ .

По физическому смыслу крутизна электрохимической стадии процесса эквивалентна проводимости электрохимической составляющей поляризации.

Аналогичным образом можно представить концентрационную составляющую, а также полную поляризацию электрохимического процесса.

Величина падения напряжения на внутреннем активном сопротивлении  $U_{a2}$  в момент снятия зарядного импульса по сравнению с  $U_{a1}$  имеет меньшее значение, что вызвано повышением активности активных масс электродов под действием зарядного импульса (уменьшение величины  $U_{a2}$  соответствует увеличению химической активности).

После снятия зарядного импульса происходит спад напряжения на клеммах АБ. Кривая спада напряжения имеет вид экспоненты и аналогична кривой спада напряжения на конденса-

торе при его разряде на сопротивление, т.е. аккумуляторную батарею можно представить в виде псевдоемкости, разряжающейся на сопротивление, в качестве которого выступает поляризационное сопротивление АБ. Действительно, несмотря на то, что электрохимические и физические процессы, происходящие в АБ и конденсаторе, принципиально различны, но с электротехнической точки зрения эти системы подобны. Поэтому правомерно использование понятия постоянной времени разряда АБ в виде  $\tau = R_n C_n$ , где  $R_n$  – сопротивление поляризации,  $C_n$  – псевдоемкость аккумуляторной батареи. Величину постоянной времени  $\tau$ , а, следовательно, и псевдоемкость можно определить из времени спада  $t_{сп}$ , полученного из ХПГ аккумуляторной батареи. Теоретически процесс спада до установившегося значения происходит бесконечно долго, поэтому для практических целей время спада определяется степенью точности определения  $\tau$ . Например, для определения  $\tau$  с точностью до 3 % время спада берется равным  $3\tau$ , т.е.  $t_{сп} = 3\tau$ , с. В расчетах использовалась величина времени спада, равная  $t_{сп} = 4\tau$ , что соответствует точности определения  $\tau$  в пределах 2 %, а значение поляризационного сопротивления определяли из отношения величины падения напряжения на поляризационном сопротивлении  $U_n$  к величине зарядного тока  $I_3$ . В результате получено выражение для определения псевдоемкости  $C_n$ :

$$t_{сп} = 4\tau = 4 \frac{U_n}{I_3} \cdot C_n; \quad C_n = \frac{t_{сп} \cdot I_3}{4 \cdot U_n} \cdot \frac{A \cdot C}{B}$$

Установившееся значение напряжения на батарее принимается равным  $U_{pu}$ . Псевдоемкость  $C_n$  является «фарадеевской», т.е. обусловлена электрохимической реакцией и эквивалентна количеству запасенной аккумуляторной батареей химической энергии, которая пропорциональна емкости АБ, выраженной в ампер-часах.

Таким образом, из приведенного анализа полученных из хронопотенциограмм параметров следует, что параметры  $U_{pu}$ ,  $U_{a1}$ ,  $U_{a2}$ ,

$U_{пк}$ ,  $U_{эx}$ ,  $U_n$  могут быть использованы в качестве информационных, параметры  $t_{эx}$ ,  $t_{сп}$  и  $U_{спк}$  – в качестве информационно-управляющих, а параметр  $t_u$  – в качестве регулируемого.

Используя соотношения различных параметров, можно расширить информацию о динамике процесса. Например, величина отношения  $\frac{U_n}{U_{a1}}$  отображает характер протекания электрохимического процесса в активных массах электродов, а именно: при  $\frac{U_n}{U_{a1}} < 1$  процесс имеет преимущественно поверхностный или послойный характер, при  $\frac{U_n}{U_{a1}} \approx 1$  – смешанный характер, а при  $\frac{U_n}{U_{a1}} > 1$  – объемный [4]. Такая информация

позволяет по «предыстории» состояния ХИТ характеризовать степень сульфатации электродов, а также судить, насколько исчерпан энергетический ресурс ХИТ.

Таким образом, предлагаемый метод позволяет одновременно контролировать состояние заряжаемого ХИТ, кинетику протекающего в нем электрохимического процесса и осуществлять режим зарядки, адекватный ее динамике. В качестве примера, подтверждающего возможность получения информационных параметров и использования их для контроля процесса зарядки предлагаемым методом, приведем хронопотенциограммы (рис. 2) аккумуляторной батареи типа «ВЕСТА» (класса «премиум») 6СТ-74А(0), снятые при различной степени заряженности прибором «Velleman PCSU1000», работающим в режиме самописца. Данные представлялись в графическом и табличном виде, что позволяло производить обработку информационных параметров, используя ЭВМ. Значения параметров, по которым осуществлялся контроль процесса зарядки ХИТ по специально разработанному алгоритму, сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Информационные параметры АБ 6СТ-74А(0)

% заряда	$U_{pu}$	$U_{a1}$	$U_{a2}$	$U_{эx}$	$U_k$	$U_n$	$U_k$	$t_{эx}$	K	$t_{сп}=4\tau$
60	14,02	0,465	0,252	1,844	0,283	2,127	0,283	1,65	1,118	17,725
100	14,15	0,335	0,125	2,033	0,28	2,313	0,28	1,45	1,402	25,24

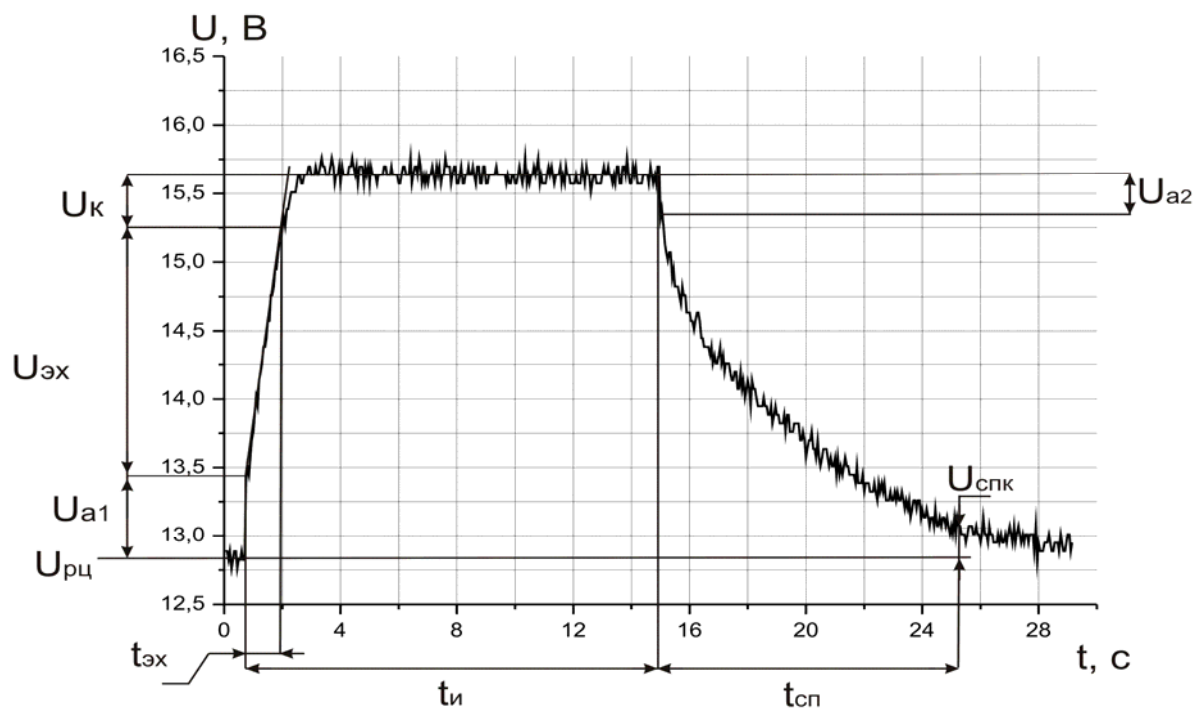
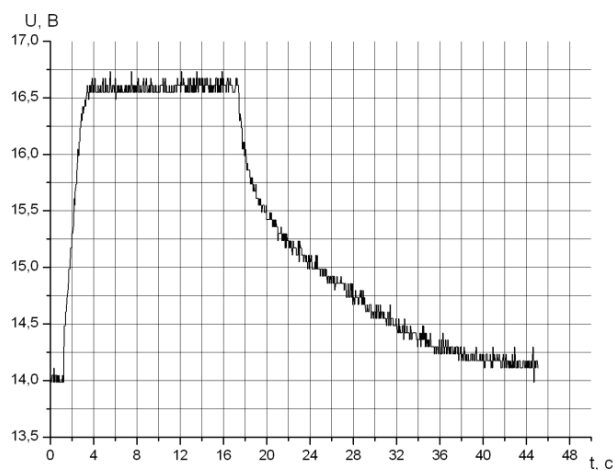
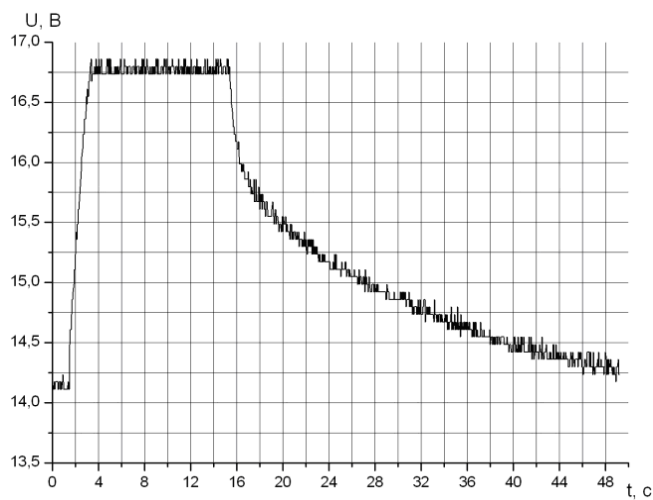


Рис. 1. Общий вид хронопотенциограммы свинцово-кислотной аккумуляторной батареи



а



б

Рис. 2. Хронопотенциограммы аккумуляторной батареи 6СТ-74А(0) при различной степени заряженности:  
а) - 60%; б) - 100%

## 2. Алгоритм управления процессом адаптивной зарядки свинцового аккумулятора

Адаптивный режим зарядки с использованием информационных параметров, полученных из ХПГ, реализуется с помощью алгоритма, блок-схема которого приведена на рис. 3.



Рис.3. Блок-схема алгоритма управления режимом заряда

### Выводы

Таким образом, использование в качестве информационных параметров кинетических параметров электрохимического процесса, получаемых путем анализа хронопотенциограмм заряжаемого источника тока, позволило разрабо-

тать эффективный метод контроля процесса зарядки вторичных химических источников тока. Разработанный алгоритм адаптивной зарядки химического источника тока, реализованный на современной вычислительной технике, позволяет осуществлять оптимальный заряд не только свинцовых аккумуляторов, но и аккумуляторов других электрохимических систем с учетом особенностей протекающих в них электрохимических процессов. В частности он был апробирован при проведении заряда буферной батареи аккумуляторов, входящей в состав автономной фотоэлектрической установки [11] и позволил формировать зарядные импульсы с использованием пассивных накопителей энергии, исходя из основных параметров АБ, определяемых из ХПГ. Практическая целесообразность применения указанного метода заряда АБ в нестационарном режиме подтверждена также при использовании ограниченного числа измеряемых параметров АБ, что позволяет отнести его к адаптивным методам зарядки вторичных химических источников тока.

### Литература

1. Романов В.В. Химические источники тока / В.В. Романов, Ю.М. Хашев. – М.: Сов. радио, 1978. – 264 с.
2. Синдеев И.М. Электроснабжение летательных аппаратов: учебное пособие / И.М. Синдеев. – М.: Транспорт, 1982. – 272 с.
3. Lam L.T. Pulse-current charging of lead/acid batteries – a possible mean of overcoming premature capacity loss? / L.T. Lam, Y. Ozgan, O.V. Lim // J. Power Sources. – 1995. – V.53. – P. 215-228.
4. Подражанський Ю.М. Використання імпульсних режимів заряду для підвищення експлуатаційних параметрів акумуляторів: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.17.03 / Подражанський Юрій Маркович; Укр. держ. хім.-тех. ун-т. – Дніпропетровськ, 2000. – 17 с.
5. Волківський В.Б. Адаптивний метод заряду акумуляторних батарей/ В.Б. Волківський // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Силовa електроніка та енергоефективність». – 2005. – ч.2. – с.40-43.
6. Пат. 78327 Україна, МПК H01M 10/48, G01R 31/36. Спосіб контролю стану свинцевого акумулятора. /Дзензерський В.О., Житник М.Я., Плаксін С.В., Погоріла Л.М. та інш.. Заявник і патентовласник Інститут транспортних систем і технологій НАН України «Трансмаг». – № а 200500242; заяв. 11.01.2005; надр. 15.03.07. Бюл. № 3. – 4 с.:іл.

7. *Дзензерский В.А.* Контроль состояния стартерных свинцовых аккумуляторов хронопотенциометрическим методом / В.А. Дзензерский, Н.Е. Житник, С.В. Плаксин, И.И. Соколовский // *Електехніка та електроенергетика*. – 2005. – №1. – С. 13-18.
8. *Сиденко С.В.* Диагностирование аккумуляторов энергоустановок летательных аппаратов импульсным током / С.В. Сиденко, К.В. Безручко, А.О. Давидов // *Вісник Дніпропетровського університету: серія «Ракетно-космічна техніка»*. – 2007. – №9/2. – С. 126-132.
9. *Житник Н.Е.* Информационные параметры для реализации адаптивной зарядки вторичных химических источников тока / Н.Е. Житник, Ю.Л. Миропольский, С.В. Плаксин, Л.М. Погорелая и др. // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2008. – № 5(77). – С. 40-42.
10. *ДСТУ ГОСТ 959:2006.* Батареї акумуляторні свинцеві стартерні для автотракторної техніки. Загальні технічні умови. – Київ.: Держспоживстандарт України, 2007. – 17 с.
11. *Дзензерский В.А.* Метод зарядки химических источников тока в составе фотоэлектрической установки / В.А. Дзензерский, С.В. Плаксин, Н.Е. Житник, Л.М. Погорелая // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2009. – № 2. – С. 73-77.