

Д. ф.-м. н. С. В. ПЛАКСИН, Н. Е. ЖИТНИК, Р. Ю. ЛЕВЧЕНКО, С. Я. ОСТАПОВСКАЯ

Украина, г. Днепр, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины  
E-mail: levchenko.ruslana@westa-inter.com

## МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ: КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Выполнена систематизация и классификация электрохимических накопителей энергии по их контролируемым параметрам. Показано, что при работе накопителя в динамических режимах необходимо контролировать активационное сопротивление и активационную емкость, которые характеризуют нагрузочные способности накопителя. Обоснована необходимость применения импульсных методов контроля накопителя при его работе в динамических режимах и экспериментально показаны преимущества разработанного авторами одноимпульсного гальваностатического метода.

Ключевые слова: электрохимический накопитель энергии, импульсные методы контроля.

Важнейшим аспектом эксплуатации систем бесперебойного гарантированного энергоснабжения является контроль параметров накопителя энергии. Независимо от типа электрохимической системы, на основе которой создан накопитель, в процессе эксплуатации внешние воздействия существенно изменяют его основные параметры: доступная емкость снижается, внутреннее сопротивление растет, ЭДС может снижаться и выходить за рамки рабочего диапазона, а саморазряд увеличиваться [1]. Нарушение работы накопителя, обусловленное ухудшением его эксплуатационных качеств, негативно влияет на эффективность работы всей энергоустановки вплоть до полного ее выхода из строя. Одним из путей решения задачи повышения эффективности использования накопителей энергии наряду с повышением качества является рациональный выбор методов контроля их текущего состояния в соответствии с условиями эксплуатации.

Настоящая работа направлена на повышение эффективности эксплуатации электрохимических накопителей энергии путем рационального выбора метода контроля их текущего состояния.

### Выбор информативных характеристик электрохимических накопителей энергии

Для изучения степени влияния метода контроля на повышение эффективности использования накопителя необходимо определиться с параметрами, по которым можно судить о его текущем состоянии. Автор работы [2] выделил совокупность параметров и характеристик накопителя, которая в наглядном виде приведена на рис. 1.

Безусловно, на практике нет необходимости использовать для контроля все приведенные параметры и характеристики. Выбор необходимых контролируемых параметров определяется в каждом конкретном случае, исходя из назначения и условий эксплуатации накопителя. В [2] описаны особенности работы накопителя в различных режимах и приведены перечни основных контролируемых параметров в зависимости от режима эксплуатации, которые представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, практически при всех указанных режимах работы накопителей методы контроля основаны на прямом измерении приборными сред-

Таблица 1

Режимы эксплуатации электрохимических накопителей энергии и соответствующие им контролируемые параметры

Режим эксплуатации	Буферный	Циклический	Дежурный	Стартерный	Основного источника	Хранения
Контролируемые параметры	$I_3$ — ток заряда; $I_p$ — ток разряда; $\gamma$ — глубина разряда; $Q$ — емкость; $U$ — напряжение	$I_3$ — ток заряда; $I_p$ — ток разряда; $Q_p$ — разрядная емкость; $Q_3$ — зарядная емкость	$I_{подз}$ — ток подзаряда; $U_{рц}$ — напряжение разомкнутой цепи; $Q$ — емкость; $C$ — заряженность	$U_p$ — напряжение разряда; $I_p$ — ток разряда; $Q_p$ — разрядная емкость; вольт-амперная характеристика	$I_p$ — ток разряда; $Q_p$ — разрядная емкость; $U_p$ — напряжение разряда	$U_{рц}$ — напряжение разомкнутой цепи; $Q$ — емкость; $C$ — заряженность



Рис. 1. Совокупность параметров и характеристик электрохимических накопителей

ствами таких электрических параметров, как напряжение, ток и остаточная емкость, которые пригодны для контроля накопителя при его работе в статическом режиме. В то же время, при эксплуатации накопителя в силовых приложениях, характерных для буферного, стартерного и режима основного источника при подключении к нему нагрузки, важными параметрами, кроме остаточной емкости, являются те, что отражают работу накопителя в динамических режимах [3, с. 63]. Поведение накопителя в таких режимах во многом зависит от его активационного сопротивления и активационной емкости, которые определяют длительность переходного процесса, в течение которого может быть реализован кратковременный силовой режим, и длительность восстановления стационарного режима после его завершения. При этом сопротивление по переменному току определяет максимальный ток накопителя при подключении нагрузки.

Сопротивление по постоянному току состоит из последовательно включенных сопротивлений по переменному току и активационного сопротивления и определяет максимальный ток накопителя в установившемся режиме. Активационная емкость определяет длительность переходного процесса в динамических режимах работы. Указанные параметры зачастую со временем изменяются (ухудшаются) быстрее, чем номинальная емкость накопителя, и в результате именно они делают невозможным эксплуатацию накопителя при больших токах нагрузки и

снижают эффективность их использования в динамических режимах работы.

### Классификация методов оперативного контроля параметров накопителей энергии

Выполнение требований по повышению эффективности использования накопителей тесно связано с выбором рационального метода контроля их параметров. По аналогии с классификацией, предложенной автором [3, с. 41], нами разработан расширенный и дополненный вариант классификации существующих методов оперативного контроля параметров электрохимических накопителей, представленный на рис. 2.

Из приведенной классификации можно сделать вывод, что значения активационных параметров невозможно получить прямыми измерениями, следовательно, поставленную задачу нужно решать принципиально новыми методами интеллектуальной диагностики, основанными на физических принципах косвенных измерений и идентификации параметров накопителей. К числу таких методов относятся импульсные методы, использующие кратковременные внешние электрические воздействия импульсами тока или напряжения с последующей идентификацией параметров накопителя, полученных косвенно в результате анализа информационных параметров сигналов отклика на воздействующий тестовый импульс. Значения параметров можно измерить достаточно быстро без использования приборных средств

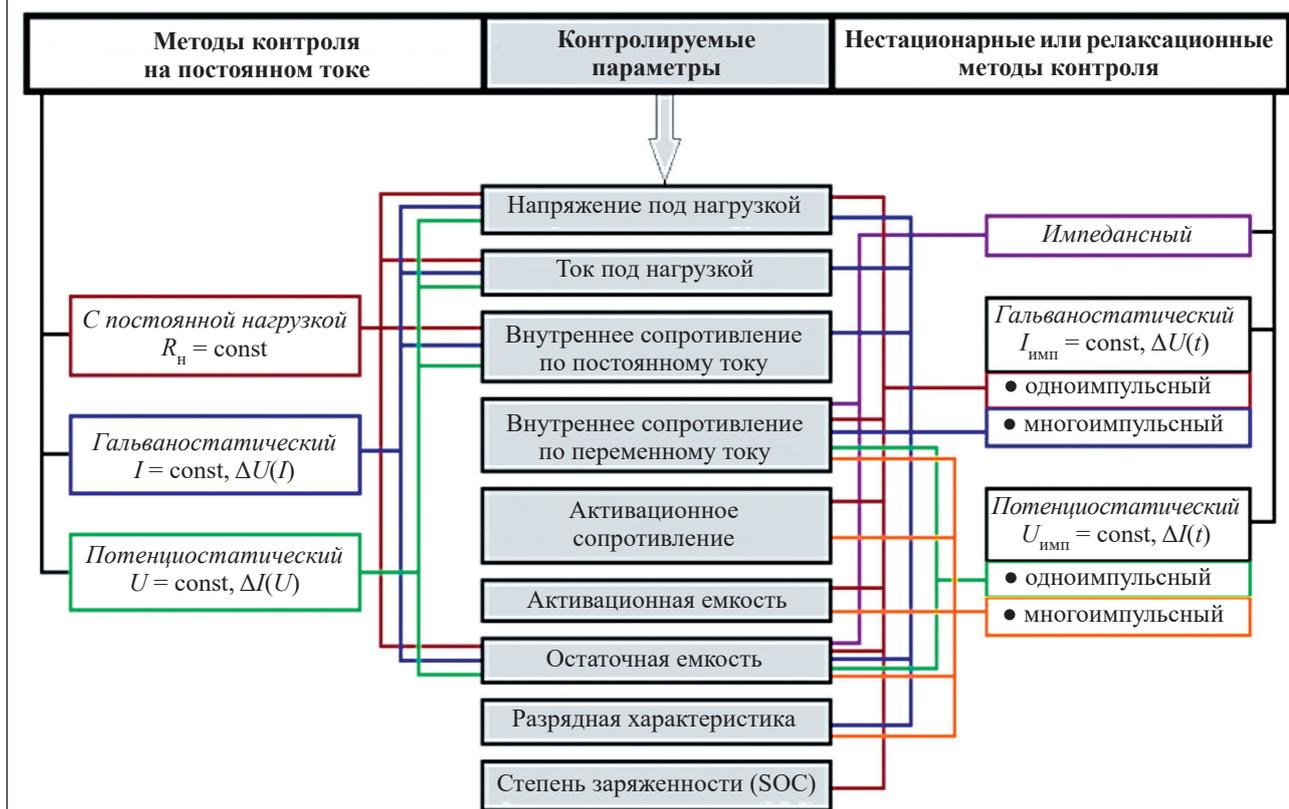


Рис. 2. Классификация методов контроля параметров накопителей энергии

измерений, а также без отключения накопителя от сети потребителей в процессе его работы, что облегчает автоматизацию процесса контроля.

С точки зрения практического использования, в системах оперативного контроля накопителей интерес представляют гальваностатический [4—7] и потенциостатический [3, 8] методы, в которых сигналы отклика представлены временной зависимостью напряжения  $U(t)$  или тока  $I(t)$  для гальваностатического и потенциостатического методов соответственно. Последовательность операций по определению значений параметров накопителя из значений парамет-

тров сигнала отклика подробно отражена в [6, 7] и в общем виде представлена на **рис. 3**.

Обработка значений параметров сигнала отклика для определения по ним значений контролируемых параметров накопителя производится методами математической обработки сигналов по специально разработанным алгоритмам. Примером могут служить подробно описанные в [9, 10] алгоритмы автоматизированного контроля текущего состояния электрохимических накопителей энергии различного назначения.

Исходя из доступной информации, вкратце опишем возможности определения динамических параметров накопителя при использовании различных импульсных методов контроля.

#### Гальваностатический метод

Гальваностатический метод контроля параметров накопителя серией зарядно-разрядных тестовых импульсов тока [5], типичные формы тестовых импульсов и сигнала отклика которых приведены на **рис. 4**, позволяет определять параметры накопителя с использованием модели, приведенной в **табл. 2**. В математической модели используется ряд коэффициентов, значения которых получены экспериментальным путем для конкретного аккумулятора и приведены в **табл. 3** ( $U_{\text{гр}}$  — граничное напряжение разряда).

Наряду с такими достоинствами гальваностатического метода, как относительная простота его реали-



Рис. 3. Последовательность выполнения операций по определению значений параметров накопителя по параметрам сигнала отклика

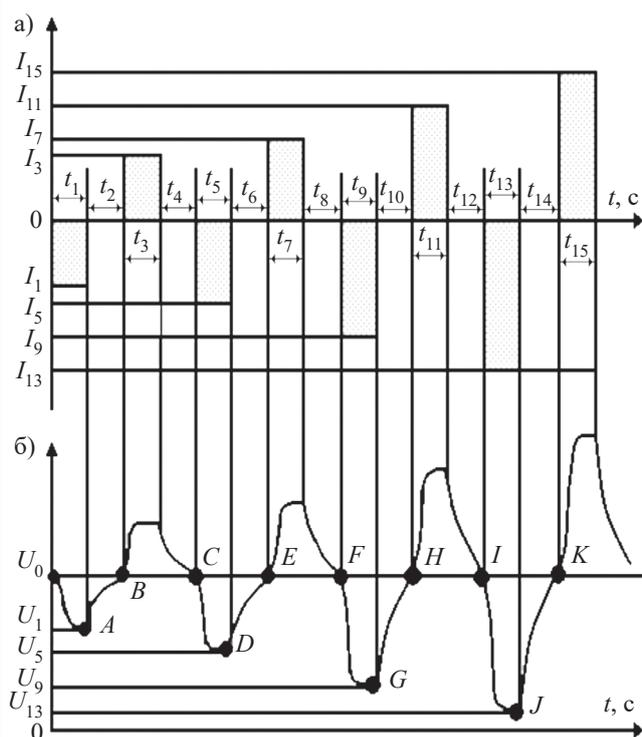


Рис. 4. Типичные формы тестовых импульсов (а) и сигнала отклика (б) при гальваностатическом методе контроля

зации и сравнительно небольшое время оценки параметров накопителя, к его недостаткам следует отнести сильную зависимость результатов мониторинга от текущего эксплуатационного состояния аккумулятора, что требует множества эмпирических коэффициентов для каждого типа аккумуляторов. Также сложно использовать этот метод для батарей большой емкости и большого напряжения — необходимость применения при тестировании больших разрядных токов может сказаться на состоянии аккумулятора при его дальнейшей эксплуатации. Метод не позволяет четко определить активационные параметры накопителя при его работе в динамическом режиме, а разрядную емкость можно определить стандартным методом, как это следует из параметров математической модели. При работе накопителя в сети потребителей воздействие на него серией зарядно-разрядных импульсов с возрастающей амплитудой с целью диагностики не может не сказаться на режиме энергообеспечения, поэтому его необходимо отсоединять от сети. Такая возможность, однако, имеется не всегда, например, это неприемлемо для автономных энергосистем, а также для устройств резервного электрообеспечения, которые используются для предотвращения перебоев с электропитанием.

Таблица 2

Математическая модель электрохимического аккумулятора

Заряженность аккумулятора	$q = 1 + \frac{\ln \left( U_{13} - E + \frac{U_1 - U_5}{I_1 - I_5} I_{13} + \beta \right) - \ln \beta}{\gamma}$
Активное внутреннее сопротивление аккумулятора с учетом поляризации	$R = - \frac{U_1 - U_5}{I_1 - I_5}$
Постоянная составляющая активного внутреннего сопротивления аккумулятора	$r = R - \alpha \cdot \frac{1 - q}{q}$
Разрядная характеристика аккумулятора	$U(I, t) = E - rI - \alpha \cdot \frac{It}{Q_0 - It} \cdot I + \beta \left( \exp \left( -\gamma \frac{It}{Q_0} \right) - 1 \right)$
Разрядная емкость аккумулятора	$Q_p = It_p \text{ при } U = U_{тр}$

Таблица 3

Значения коэффициентов, входящих в математическую модель для различных типов накопителей

Тип аккумулятора/ батареи	Номинальная емкость, А·ч	ЭДС, В	Коэффициенты		
			α, Ом	β, В	γ
НКП-90	90	1,25	0,003518	0,117814	13,6125
НК-28	28	1,3779	0,595	0,3897	18,05
НКГ-160	160	1,3994	0,002171	0,129426	4,93
НКГ-45	45	1,402	0,2489	0,5237	4,6
27НКП-90	90	36,72	0,14	3,89	9,49
6СТ-55	55	12,87	0,03	0,1959	14,45
6СТ-44А	44	12,837	0,031928	0,412415	5,55

*Многоступенчатый потенциостатический метод*

В основе многоступенчатого потенциостатического метода контроля [3, 8] лежит принцип, позволяющий незначительным изменениям величины напряжения  $U_{ак}$  подаваемых на аккумулятор импульсов вызывать существенные изменения проходящего через него тока  $I_{ак}$ , что позволяет облегчить процедуру исследования параметров аккумулятора.

Как видно из рис. 5, небольшое изменение напряжения  $U_{ак}$  приводит к существенному изменению тока  $I_{ак}$ , протекающего через накопитель. Значение тока при этом может быть измерено с достаточной точностью, и его информативность, с точки зрения идентификации параметров модели, велика. Пиковое значение на зависимости  $I_{ак}(t)$  характеризует величину внутреннего омического сопротивления постоянному току. Плавное изменение тока (переходный процесс) свидетельствует об инерционности процесса,

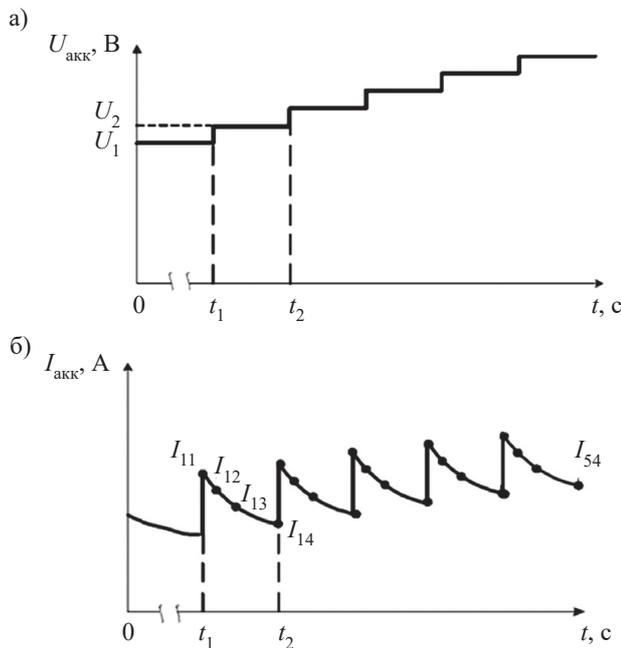


Рис. 5. Типичные формы тестовых импульсов (а) и сигнала отклика (б) при потенциостатическом методе контроля

напрямую связанного с остаточной емкостью накопителя и активационными параметрами, которые определяют поведение накопителя в переходных режимах при включении большой нагрузки. Широкий диапазон изменения тока существенно облегчает получение достоверной информации о состоянии накопителя при небольших энергетических затратах.

*Импульсно-релаксационный метод*

Однократное импульсное воздействие не позволяет получить устойчивые и достоверные значения электрических параметров накопителя, и поэтому предлагается применять многоступенчатый активный импульсно-релаксационный метод контроля, принципы которого заключаются в следующем [9].

1. Формируется последовательность воздействий импульсов напряжения на накопитель в форме, представленной на рис. 5, при этом каждое воздействие определяется величиной  $i \cdot \Delta U$ , где  $i$  — номер воздействия в последовательности, что позволяет более полно кумулятивно, с учетом нестационарности и нелинейности процесса, оценить контролируемые параметры для рабочего диапазона  $[U_0, U_{max}]$  напряжений.

2. Величина  $i \cdot \Delta U$  для каждого воздействия определяется тем, насколько существенным и достаточным по амплитуде будет изменение возникающего при этом отклика накопителя  $I_a$ , определяющего разрешающую способность устройства.

3. Число воздействий  $N$ , а также их очередность определяются требуемой погрешностью измерения конкретных контролируемых параметров.

В [9, с. 1137] также приведена адаптивная математическая модель, настраиваемая в зависимости от типа контролируемого аккумулятора по обучающей выборке и представленная в форме алгоритма реализации активного импульсно-релаксационного принципа контроля. В общем виде алгоритм включает в себя выполнение следующих операций:

- расчет общих характеристик оперативного контроля и измерения параметров накопителя (смещения напряжения воздействия  $U_{см}$ , количество воздействий (ступеней)  $N$ , шаг дискретизации измерений  $\Delta U$ , количество  $n$  точек измерения тока отклика);
- измерение начального уровня напряжения  $U_0$  на накопителе, относительно которого формируется потенциостатическое воздействие  $i \cdot \Delta U$ ;

- реализация потенциостатического воздействия и измерение токовой реакции  $I_a(t)$  с заранее заданными параметрами;

- редукция полученных результатов измерений путем преобразования полученной выборки  $\{I_a^j(t)\}_{j=1, \overline{M}}$  токовых реакций в образы адаптивного ортогонального признакового пространства на основе ковариационной матрицы измерений;

- построение модели нелинейной регрессии пониженной размерности связи редуцированных образов  $D_j$  с контролируемыми параметрами и определение коэффициентов (в частности, для остаточной емкости);

- преобразование текущих токовых реакций в редуцированные значения параметров накопителя в соответствии с моделью.

Предложенный авторами [3, 8] активный импульсно-релаксационный метод контроля позволяет определять динамические параметры накопителя, такие как остаточная емкость, активационное сопротивление и активационная емкость. К достоинствам метода следует отнести незначительные энергетические затраты при его реализации и сравнительно высокую точность определения значений параметров, которая

достигается использованием многоступенчатого воздействия. В то же время, для обработки сигнала отклика на многоступенчатое воздействие и идентификации параметров накопителя используется сложный математический аппарат, что может служить причиной сдерживания его практической реализации.

*Гальваностатический метод контроля единичным импульсом*

Гальваностатический метод контроля единичным тестовым прямоугольным импульсом тока и алгоритм его реализации подробно описаны в [6, 10]. Суть метода заключается в подаче на контролируемый аккумулятор тестового импульса тока, величина которого в амперах равна  $0,1C_{ак}$ , где  $C_{ак}$  — емкость аккумулятора в ампер-часах, а длительность соизмерима со временем протекания в накопителе переходного процесса. Типичная форма сигнала отклика с обозначениями параметров протекающего в накопителе электрохимического процесса приведена на **рис. 6**. Значения параметров накопителя получены путем обработки формы сигнала отклика математическими методами [4].

Одной из основных задач при математической обработке формы сигнала отклика с целью определения динамических параметров накопителя является определение участков, обозначающих стадии протекающего в нем электрохимического процесса, а именно стадии поляризации при подаче тестового импульса и стадии деполяризации после его снятия. Стадии поляризации и деполяризации отражают время протекания переходного процесса в накопителе, которое определяет значения активационного сопротивления и активационной емкости. Путем идентификации значений параметров сигнала отклика определены следующие параметры накопителя [6]:

- значение активного омического сопротивления:

$$R_{ом} = \Delta U_{ал} / I, \tag{1}$$

где  $\Delta U_{ал}$  — падение напряжения на активном сопротивлении;

$I$  — величина тока тестового импульса;

- значение активационного сопротивления, вызванного напряжением поляризации:

$$R_{п} = \Delta U_{п} / I, \tag{2}$$

где  $\Delta U_{п}$  — напряжение поляризации;

- значение активационной емкости:

$$C_{а} = \tau I / \Delta U_{п}, \tag{3}$$

где  $\tau$  — постоянная времени переходного процесса,  $\tau = t_{сп} / k$ ;

$t_{сп}$  — время спада напряжения после снятия тестового импульса тока;

$k$  — коэффициент, учитывающий скорость изменения функции  $\Delta U_{п}(t_{сп})$ ,  $k = 4$  для случаев, когда значение функции изменяется от нулевого значения до  $0,982U_{сп}$ ;

- скорость протекания электрохимической реакции, которая характеризуется параметром

$$k_{з} = U_{з} / t_{з}, \tag{4}$$

где  $U_{з}$  — напряжение электрохимической поляризации;

- скорость протекания процесса саморазряда активных масс на электролит в неработающем состоянии накопителя или скорость разрядного процесса при работе накопителя на нагрузку, которые характеризуются параметром

$$k_{дп} = U_{дп} / t_{дп}, \tag{5}$$

где  $U_{дп}$  — величина напряжения деполяризации.

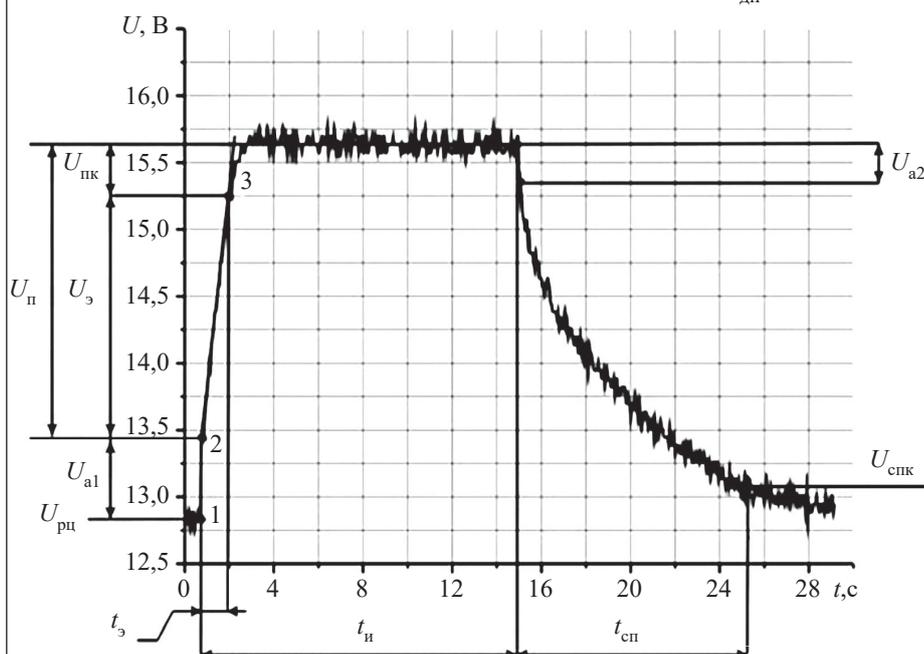


Рис. 6. Типичная форма сигнала отклика накопителя на единичный тестовый импульс тока

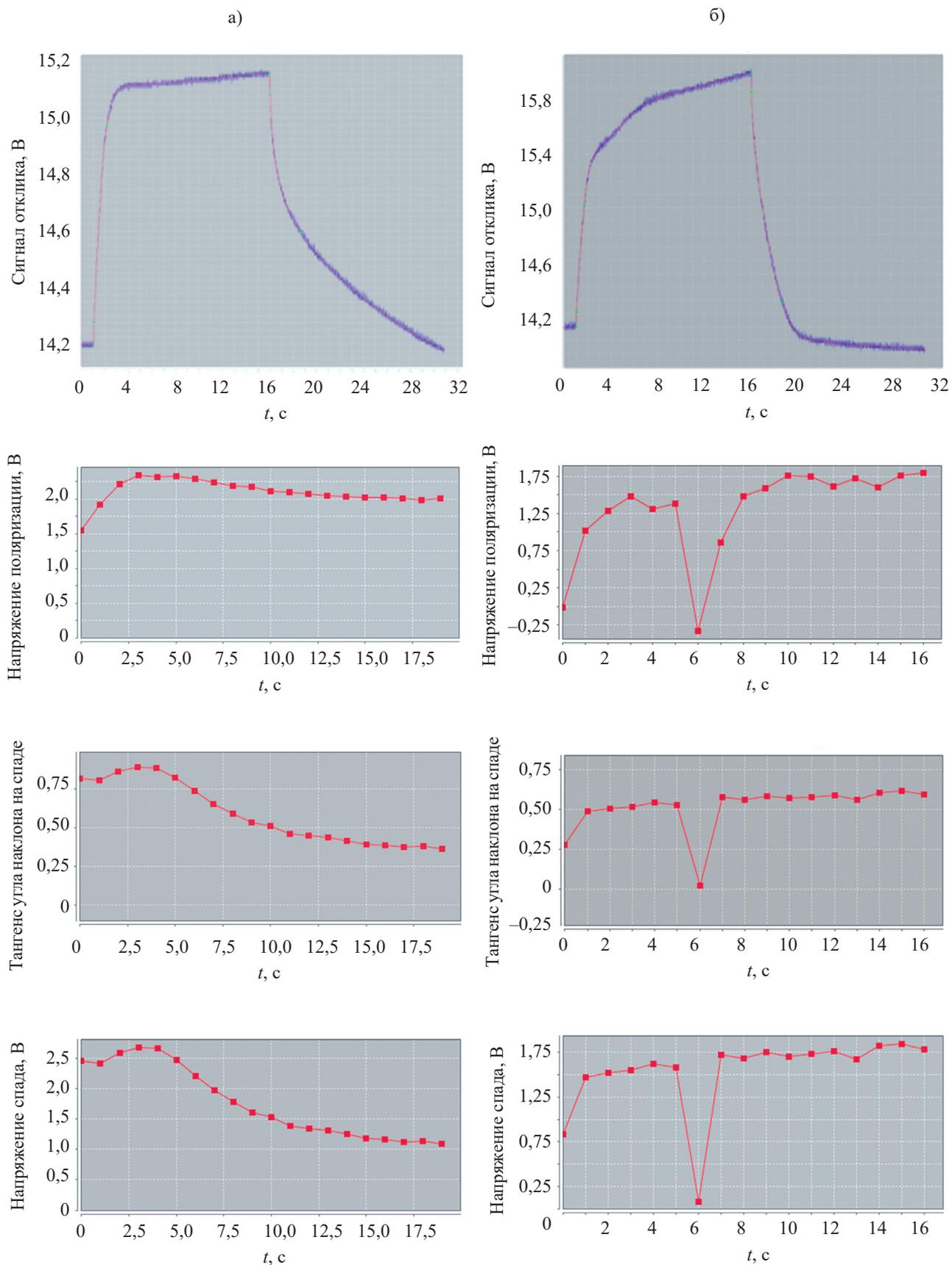


Рис. 7. Сигнал отклика и его параметры для накопителя с высокими (а) и с низкими (б) энергетическими показателями при подключении к ним одинаковой по величине нагрузки

Параметр  $k_3$  отображается на сигнале отклика углом наклона линии электрохимической поляризации к оси ординат и характеризует степень использования зарядного тока в режиме зарядки накопителя. Следовательно, чем меньше величина  $k_3$ , тем выше скорость реакции и, соответственно, выше коэффициент использования зарядного тока. Параметр  $k_{дп}$  на сигнале отклика отображается углом наклона линии спада напряжения к оси ординат после снятия тестового импульса на стадии деполяризации. По величине коэффициента  $k_{дп}$  производится оценка степени саморазряда (разряда) накопителя — чем меньше величина  $k_{дп}$ , тем выше скорость его саморазряда (разряда).

В соответствии с законом Фарадея, емкость химического источника тока в ампер-часах определяется удельным расходом активных материалов, который используется в качестве обобщенного энергетического показателя — коэффициента использования активных масс. Величина этого коэффициента находится в прямой зависимости от площади реагирующей поверхности порового пространства активных масс и, соответственно, от величины активационной емкости. Таким образом, с определенными допущениями можно утверждать, что величина активационной емкости  $C_a$  пропорциональна площади реагирующей поверхности активных масс и коррелирует с величиной площади фигуры под линией спада напряжения на сигнале отклика после снятия тестового импульса.

Приведенный перечень параметров накопителя, полученных путем их согласования с параметрами сигнала отклика, подтверждает возможность осуществления автоматизированного контроля текущего состояния накопителя в динамическом режиме его работы импульсным гальваностатическим методом. В качестве примера на **рис. 7** приведены исходные сигналы отклика и фрагменты процесса контроля активационных параметров двух однотипных накопителей энергии, выполненных на базе полностью заряженных стартерных свинцово-кислотных аккумуляторов 6СТ75А3 с различными энергетическими показателями, работающих в буферном режиме. Приведенные графики отражают динамику поведения каждого накопителя при подключении к ним одинаковой по величине нагрузки. Значения параметров накопителей измерялись в автоматическом режиме с интервалом 15 минут, на графиках они обозначены точками.

Сравнительный анализ приведенных на **рис. 7** результатов эксперимента показывает существенные различия в поведении накопителей. При подключении нагрузки к накопителю с высокими энергетиче-

скими показателями (**рис. 7, а**) значения таких его параметров, как угол наклона на спаде и напряжение спада, снижаются сравнительно медленно, что соответствует медленной отдаче энергии накопителя нагрузке. При этом величина поляризации после медленного спада сохраняет стабильное значение на протяжении всего времени разряда, что подтверждает достаточную нагрузочную способность накопителя. Иной характер поведения при подключении нагрузки наблюдается у накопителя с низкими энергетическими показателями (**рис. 7, б**). Здесь четко виден момент резкого падения значений всех активационных параметров, в результате чего произошло срабатывание системы защиты, отключение нагрузки от накопителя и самовосстановление накопителя с одновременным его подзарядом от внешнего источника.

Приведенный пример подтверждает значимость контроля активационных параметров накопителя при его работе в динамических режимах. При этом значения таких параметров сигнала отклика, как величина поляризации  $\Delta U_{п}$ , напряжение спада  $\Delta U_{сп}$  и угол наклона на спаде (коэффициент  $k_{дп}$ ), могут быть использованы в качестве дополнительного критерия прогнозирования работоспособности накопителя.

### Выводы

Проведенные исследования показали необходимость выбора метода контроля текущего состояния накопителя, соответствующего режиму его работы. Было экспериментально подтверждено, что для повышения эффективности использования электрохимических накопителей энергии, особенно при работе в таких динамических режимах, как буферный, стартерный и режим основного источника, необходимо использовать методы контроля, предусматривающие контроль активационных параметров. Для практических приложений к таким методам можно отнести импульсные методы различной модификации, преимущественно импульсные гальваностатические и потенциостатические методы, которые сравнительно просты в реализации, достаточно информативны и позволяют осуществлять оперативный контроль накопителей без отключения от сети потребителей.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Возмилов А. Г., Калмаков В. А., Андреев А. А. Влияние условий работы накопителя энергии на основе химических источников тока в составе автономных энергосистем на его срок службы. *Наука ЮУрГУ: Материалы 67-й научной конференции. Секция технических наук*. Россия, Челябинск, 2015, с. 52–58.

2. Давидов А. О. Основные эксплуатационные параметры и классификация режимов работы электрохимических аккумуляторов. *Авиационно-космическая техника и технология*, 2011, № 7(84), с. 120–125.

3. Онышко Д. А. *Методы и устройства экспресс-контроля никель-кадмиевых аккумуляторов для систем управления их производством и эксплуатацией. Дис. ... канд. техн. наук.* Новочеркасск, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова, 2016, 188 с.

4. Дзензерский В. А., Беда М. А., Житник Н. Е. и др. Автоматизированная диагностика химических источников тока. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2011, № 1–2, с. 6–9.

5. Безручко К. В., Давидов А. О. Метод экспресс-диагностики электрохимических накопителей энергии энергоустановок ракетно-космических объектов. *Космическая техника. Ракетное вооружение*, 2012, вып. 1, с. 140–148.

6. Дзензерский В. А., Житник Н. Е., Плаксин С. В., Лисунова В. В. Импульсный метод автоматизированного контроля электрохимических накопителей энергии. *Гірнична електромеханіка та автоматика*, 2016, вып. 96, с. 31–36.

7. Давидов А. О. Жмуров Б. В. Метод диагностики авиационных электрохимических аккумуляторных батарей. *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. Россия, Пенза, 2016, т. 2, с. 78–80.

8. Седов А. В., Онышко Д. А., Липкин С. М., Липкин М. С. Активный импульсно-релаксационный принцип диагностики для оперативного контроля параметров аккумуляторов в технических системах. *Материалы VII Международной конференции «Наука в современном информационном обществе»*, USA, North Charleston, 2015, Т. 2, с. 161–165.

9. Седов А. В., Онышко Д. А., Липкин М. С. Физико-математические принципы построения средств интеллектуального контроля автономных аккумуляторных источников питания. *Фундаментальные исследования*, 2015, № 12-6, с. 1134–1138.

10. Дзензерский В. А., Житник Н. Е., Плаксин С. В., Лисунова В. В. Разработка алгоритма автоматизированного контроля электрохимических накопителей энергии. *Электротехника и электроэнергетика*, 2017, № 1, с. 39–47.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 01.11 2020 г.

DOI: 10.15222/ТКЕА2021.1-2.39

УДК 621.311.25: 621.311.29

С. В. ПЛАКСИН, М. Я. ЖИТНИК,  
Р. Ю. ЛЕВЧЕНКО, С. Я. ОСТАПОВСЬКА

Україна, м. Дніпро, Інститут транспортних систем  
та технологій НАН України  
E-mail: levchenko.ruslana@westa-inter.com

## МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ: КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ

*В процесі експлуатації електрохімічного накопичувача енергії у складі енергосистем вплив зовнішніх чинників суттєво змінює його основні параметри: доступна ємність знижується, внутрішній опір зростає, а саморозряд збільшується, що призводить до скорочення терміну експлуатації накопичувача та порушення штатного режиму функціонування енергосистеми в цілому. Підвищення ефективності використання накопичувачів є актуальною задачею, і одним зі способів її вирішення є оперативний контроль стану накопичувача. Дана робота спрямована на підвищення ефективності експлуатації електрохімічних накопичувачів енергії шляхом раціонального вибору методу контролю їхнього поточного стану.*

*За результатами проведеного аналітичного огляду існуючих методів контролю електрохімічних накопичувачів енергії виконано їхню систематизацію та класифікацію за контрольованими параметрами. Показано, що при роботі накопичувача в динамічних режимах, таких як, наприклад, буферний, стартерний та режим основного джерела енергії, при підключенні потужного опору необхідно враховувати такі параметри, як активаційний опір та активаційну ємність, які характеризують опорні можливості накопичувача та мають важливу інформаційну цінність при вирішенні питання вибору методу контролю накопичувача. Показано, що в динамічних режимах роботи накопичувача необхідно застосовувати імпульсні методи контролю, які дозволяють забезпечити оперативний контроль з урахуванням активаційних параметрів. Запропоновано практичні рекомендації щодо вибору методу контролю накопичувача залежно від режиму його роботи. В найбільшій мірі таким вимогам відповідають імпульсний багатоступеневий потенціостатичний та одноімпульсний гальваностатичний методи оперативного контролю накопичувачів при їхній роботі в динамічних режимах. При цьому перевага надається розробленому авторами одноімпульсному гальваностатичному методу через його відносно просту реалізацію та достатню для практичних цілей інформативність, що полегшує автоматизацію процесу контролю. Експериментальні результати контролю електрохімічного накопичувача енергії при роботі в динамічних режимах, отримані при застосуванні розробленого авторами метода, підтверджують його ефективність.*

*Ключові слова:* електрохімічний накопичувач енергії, імпульсні методи контролю.

Ukraine, Dnipro, Institute of Transport Systems and Technologies of NAS of Ukraine  
E-mail: levchenko.ruslana@westa-inter.comMETHODS OF ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE CONTROL:  
CLASSIFICATION AND ASPECTS OF IMPLEMENTING

*When an electrochemical energy storage is used as part of an energy system, the influence of external factors significantly changes its basic parameters: its available capacity decreases, while its internal resistance and self-discharge increase, which reduces the lifespan of the storage and disrupts the normal functioning of the energy system as a whole. Improving the performance of the energy storage is an urgent challenge, and one way to address it is to efficiently monitor the storage's status. The purpose of this study was to increase the efficiency of using electrochemical energy storages by choosing a proper control method according to operating conditions of the storage.*

*The conducted analytical overview of the existing methods of monitoring electrochemical energy storages allowed systematizing and classifying them by the controlled parameters. It is shown that if the storage operates in dynamic modes, such as buffer, starter or main energy source mode, when connecting high-power resistors, it is necessary to take into account such parameters as activation resistance and activation capacitance characterizing storage's resistance capabilities and presenting valuable information for choosing the method of storage control. The paper demonstrates that in dynamic operation modes it is necessary to use impulse methods of storage control, which allow for efficient monitoring taking into account activation parameters. The authors offer practical recommendations on choosing a method of storage control depending on its operation mode. Pulse multistage potentiostatic and single-pulse galvanostatic control methods meet such requirements the most when the storage is operating in dynamic modes.*

*The preference is given to the single-pulse galvanostatic method developed by the authors, it being relatively simple to implement and sufficiently informative for practical purposes, which facilitates the automation of the control process. Experimental results on controlling the electrochemical energy storage operating in dynamic modes obtained using the method developed by the authors confirm its efficiency.*

*Keywords: electrochemical energy storage, pulse control methods.*

## REFERENCES

1. Vozmilov A. G., Kalmakov V. A., Andreyev A. A. [Influence of the operating conditions of an energy storage device based on chemical current sources as part of autonomous power systems on its service life]. *Science of SUSU: Proceedings of the 67<sup>th</sup> Scientific Conference. Section of technical sciences*. Russia, Chelyabinsk, 2015, pp. 52–58. (Rus)
2. Davidov A. O. [The basic operational parameters and classification of operating modes of electrochemical accumulators]. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 2011, no 7(84), pp. 120–125. (Rus)
3. Onyshko D. A. *Metody i ustroystva ekspress-kontrolya nikel'-kadmijevykh akkumulyatorov dlya sistem upravleniya ikh proizvodstvom i ekspluatatsiyey* [Methods and devices for express control of nickel-cadmium batteries for control systems of their production and operation]. PhD diss., Novocherkassk, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 2016, 188 p. (Rus)
4. Dzenzerskiy V. A., Beda M. A., Zhitnik N. E. et al. [Automated diagnostics of chemical current sources]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2011, no. 1–2, pp. 6–9. (Rus)
5. Bezruchko K. V., Davidov A. O. [Method of express diagnostics of electrochemical energy storage devices of power plants of rocket and space objects]. *Kosmicheskaja tehnika. Raketnoe vooruzhenie*, 2012, iss. 1, pp.140–148. (Rus)
6. Dzenzerskiy V. A., Zhitnik N. E., Plaksin S. V., Lisunova V. V. [Pulse method of automated control of electrochemical energy storage devices]. *Girnycha elektromehaniika ta avtomatyka*, 2016, iss. 96, pp. 31–36. (Rus)
7. Davidov A. O. Zhmurov B. V. [Method for diagnostics of aircraft electrochemical batteries]. *Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*. Russia, Penza, 2016, vol. 2, pp. 78–80. (Rus)
8. Sedov A. V., Onyshko D. A., Lipkin S. M., Lipkin M. S. [Active pulse-relaxation principle of diagnostics for on-line monitoring of battery parameters in technical systems]. *Science in the modern information society VII: Proceedings of the Conference, USA, North Charleston*, 2015, vol. 2, pp. 161–165. (Rus)
9. Sedov A. V., Onyshko D. A., Lipkin M. S. [Physical and mathematical principles of construction of devices for intelligent control of autonomous rechargeable power source]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2015, no 12-6, pp. 1134–1138. (Rus)
10. Dzenzerskiy V. A., Zhitnik N. E., Plaksin S. V., Lisunova V. V. [Development of the algorithm of automated control of electrochemical energy storage devices]. *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 2017, no 1, pp. 39–47. (Rus) .

## Описание статьи для цитирования:

Плаксин С. В., Житник Н. Е., Левченко Р. Ю., Остаповская С. Я. Методы контроля электрохимических накопителей энергии: классификация и особенности применения. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2021, № 1–2, с. 39–48. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2021.1-2.39>

## Cite the article as:

Plaksin S. V., Zhytnyk M. Ya., Levchenko R. Yu., Ostapovska S. Ya. Methods of electrochemical energy storage control: classification and aspects of implementing. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2021, no. 1–2, pp. 39–48. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2021.1-2.39>