

МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЗАРЯДА ВАНАДИЕВЫХ ПРОТОЧНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ: АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ¹

Парсегов С. Э.²

(Московский физико-технический институт, Сколковский институт науки и технологий, ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Пугач М. А.³

(Сколковский институт науки и технологий, Москва)

Ерофеева В. А.⁴

*(ФГБУН Институт проблем машиноведения РАН,
Санкт-Петербург)*

Ожидается, что в будущем системы накопления энергии будут играть ключевую роль в переходе к энергосистемам с низким уровнем выбросов углекислого газа. Увеличение темпов внедрения возобновляемых источников энергии требует интеграции аккумуляторов, обеспечивающих устойчивость и безопасность энергосистемы и сглаживающих нестабильное поведение возобновляемых источников энергии. Важна также эффективная эксплуатация самих батарей: она продлевает срок их службы, снижая эксплуатационные расходы. Одной из ключевых задач, помогающих управлять аккумуляторными батареями, является мониторинг состояния заряда. В статье проводится анализ существующих явных методов расчета состояния ванадиевых проточных аккумуляторов: метода на основе напряжений холостого хода и метода кулоновского счетчика. Исследуются взаимосвязь между ними и возможность их совместного использования для достижения более надежного и точного отслеживания состояния заряда. В отличие от существующих работ мы получаем аналитическое выражение для общего состояния заряда, учитывающее оба основных компонента батареи, а именно ее стек и резервуары. Анализ их вклада позволяет выявить некоторые недостатки существующих подходов, широко используемых для расчета и мониторинга состояния заряда проточных аккумуляторов.

Ключевые слова: аккумуляторные батареи, вычисление состояния заряда, ванадиевые проточные аккумуляторы.

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00807).

² Сергей Эрнестович Парсегов, к.ф.-м.н., в.н.с. (s.e.parsegov@gmail.com).

³ Михаил Александрович Пугач, Ph.D, с.н.с. (m.pugach@skoltech.ru).

⁴ Виктория Александровна Ерофеева, к.ф.-м.н., с.н.с. (eva@ipme.ru).

1. Введение

Аккумуляторные системы накопления энергии являются одной из ключевых технологий, обеспечивающих переход к углеродно-нейтральным энергосистемам за счет повсеместной интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Как известно, наиболее распространенные ВИЭ, такие как солнечные и ветровые, характеризуются значительными колебаниями и непостоянным режимом работы, что может повлиять на устойчивость и безопасность энергосистемы в целом. В связи с этим особое внимание уделяется сервисам, которые могут предоставлять энергосистеме аккумуляторные системы хранения энергии. Значительное количество современных исследований посвящено сервисам «аккумулятор – сеть», обеспечивающим устойчивость сети и способствующим снижению пиковой нагрузки, см. например, работы [1, 16] и ссылки, приведенные в них.

Ванадиевые проточные аккумуляторы (ВПА) считаются одной из наиболее перспективных технологий для таких приложений благодаря длительному сроку службы, низким эксплуатационным рискам, возможности глубокого разряда и высокой энергоэффективности [8]. Технология ВПА была предложена М. Скиллас-Казакос и ее исследовательской группой в 1980-х годах [14]. С тех пор в ряде исследовательских работ изучались вопросы, связанные с химией, электрохимией и управлением аккумуляторами, например, [2]. Несмотря на растущий интерес к технологии ВПА, она все еще находится на стадии доработки и оптимизации. В этой связи необходимо предлагать новые подходы, направленные на совершенствование существующих решений.

Системы управления аккумуляторами позволяют эффективно эксплуатировать их путем оценки в реальном времени таких важных характеристик, как температура, расход электролита, напряжение на клеммах, состояние заряда (англ. state of charge, SoC) и состояние здоровья (англ. state of health, SoH). Уникальной особенностью ВПА является способность работать практически

без снижения емкости в течение всего периода эксплуатации. Это связано с тем, что для ребалансировки требуется обнаружение дисбаланса электролита в реальном времени, что может быть реализовано с помощью мониторинга состояния заряда (СЗ). Поэтому для ВПА-систем, рассчитанных на длительную эксплуатацию, весьма желательны методы онлайн-мониторинга СЗ, простые в использовании и обладающие высокой точностью.

Методы, пригодные для мониторинга состояния заряда ВПА, можно разделить на две основные группы: (а) оценка на базе моделей, основанных на данных; (б) вычисление в явном виде. В общем случае подход, основанный на моделировании, состоит из трех этапов. Сначала необходимо построить математическую модель, с достаточной точностью описывающую внутреннюю динамику системы ВПА. Затем параметры модели должны быть определены на основе экспериментальных данных с целью получения репрезентативной модели. И наконец, необходимо применить метод оценки состояния, обрабатывающий собранные измерения и определяющий необходимые параметры и состояния батареи.

Вопросам оценивания на базе фильтра Калмана посвящено множество работ. Например, в статье [13] рассмотрен метод оценки СЗ с расширенным фильтром Калмана (ЕКФ) улучшен с точки зрения скорости сходимости, точности и робастности. Далее, в [18] авторы описывают онлайн-идентификацию параметров эквивалентной схемы с помощью рекурсивного метода наименьших квадратов и прогнозирование СЗ на основе «unscented» фильтрации Калмана (UKF). В другом исследовании предлагается комбинация модели эквивалентной схемы с настройкой параметров на основе метода рекурсивного МНК с адаптивным коэффициентом забывания и последующей оценкой СЗ с помощью ЕКФ [5]. В [19] предложенный алгоритм объединяет две оценки СЗ, полученные с помощью различных фильтров (расширенный фильтр Калмана и адаптивный расширенный фильтр Калмана), что, по словам авторов, позволяет достичь более высокой робастности. Некоторые работы посвящены вычислительным вопросам, связанным с моделированием ВПА, например, [7] описывает ал-

горитм оценивания параметров эквивалентной схемы, который позволяет сократить время вычислений, необходимое для оценки модели.

Другое направление исследований связано с применением наблюдателей, работающих в скользящем режиме, см. например, [3, 17]. Этот тип наблюдателей минимизирует ошибку моделирования, а также влияние неопределенностей и сходится за конечное время. Следует отметить, что такие способы также увеличивают и вычислительные затраты для получения оценок. В [19] авторы описывают онлайн-мониторинг СЗ и потерь мощности на основе авторегрессионного моделирования экзогенных факторов и наблюдателя с использованием H_∞ -теории. В [4] рассматривается адаптивный нелинейный наблюдатель, учитывающий эффект кроссовера в модели.

В отличие от методов с использованием математических моделей динамики системы ВПА, кулоновский счетчик отличается простотой реализации и не требует дополнительной измерительной аппаратуры. Кроме того, этот метод не требует настройки параметров модели, которую необходимо должным образом отлаживать в режиме реального времени. Тем не менее существенной проблемой данного метода является накопление погрешностей, возникающих в результате измерений тока, а также кроссовера и нежелательных побочных реакций [10].

В связи с этим такой подход обычно не используется в качестве единственного метода для длительного мониторинга СЗ, поэтому для преодоления этого ограничения зачастую требуются дополнительные измерения. Наиболее распространенным подходом является включение измерений напряжения холостого хода (НХХ) (англ. open-circuit voltage, OCV). Однако этот метод также имеет недостатки, поскольку значения НХХ постоянно дрейфуют из-за кроссовера, что приводит к накоплению дополнительной погрешности расчета СЗ при длительной работе батареи. Кроме того, для измерения НХХ требуется специальное оборудование, которое необходимо бережно эксплуатировать, что неминуемо приводит к увеличению затрат [12].

Следует отметить, что состояние заряда ВПА напрямую зависит от концентрации ионов ванадия, участвующих в электрохимических реакциях в ячейках и содержащихся в резервуарах (баках). Многие существующие подходы к мониторингу определяют СЗ с учетом концентрации ионов исключительно в резервуарах. Поэтому при увеличении соотношения объемов бака и стека в расчет СЗ вносятся дополнительные неточности.

В работе проводится критический анализ способов прямого мониторинга СЗ ВПА, таких как НХХ-подход и метод кулоновского счетчика, а также изучается их взаимосвязь. Начиная с модели ВПА восьмого порядка, формулируется ряд предположений, что сводит исходную модель к модели второго порядка. Учитывая свойства редуцированной модели, выявляется зависимость, связывающая напряжения холостого хода и измерения тока нагрузки. Полученное соотношение может помочь в разработке более надежных средств оценивания и мониторинга СЗ, поскольку оно учитывает возможность восстановления недостающих измерений либо получение более точных оценок при зашумленных измерениях/неисправных измерительных приборах.

Остальная часть работы устроена следующим образом. В разделе 2 приводится общее описание технологии ВПА, затем формулируется задача мониторинга СЗ и приводится динамическая модель ВПА в пространстве состояний. В разделе 3 представлен анализ модели ВПА второго порядка и показана связь между различными стратегиями измерения СЗ. Раздел 4 раскрывает некоторые полезные свойства полученных теоретических результатов, дополненных имитационным моделированием. Раздел 5 завершает работу.

2. Постановка задачи

2.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ВПА

Рассмотрим структуру системы ВПА, изображенную на рис. 1. Как правило, система состоит из двух баков, заполненных по отдельности отрицательным и положительным электролитами, электрохимического стека, вырабатывающего электроэнер-

гию, и гидравлической подсистемы, обеспечивающей переток электролита между основными компонентами. На входе и/или выходе системы могут быть установлены дополнительные измерительные приборы, например, ячейки для измерения напряжений холостого хода. Электроэнергия вырабатывается в результате электрохимической реакции между ионами ванадия. В «отрицательном» резервуаре находятся ионы V^{2+} и V^{3+} , в «положительном» – ионы V^{4+} и V^{5+} в виде оксидов VO_2^+ и VO^{2+} соответственно:



Количество энергии, вырабатываемой системой, напрямую связано как с объемом электролита, хранящегося в резервуарах, так и с концентрациями ионов ванадия. Пусть V_{tk} обозначает объем каждого резервуара, а $c_i^{tk} > 0$, $i \in \{2, \dots, 5\}$ – концентрация i -го иона в резервуаре. Стек состоит из n_c ячеек, каждая из которых имеет соответствующий объем, обозначаемый через V_c . Концентрация i -го иона в стеке обозначается $c_i^{st} > 0$, $i \in \{2, \dots, 5\}$.

Таким образом, общий вектор состояния ВПА-батареи имеет вид

$$\begin{aligned} \xi &= [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_8]^T \in \mathbb{R}^8, \\ \xi_1 &= c_2^{tk}, \quad \xi_2 = c_3^{tk}, \quad \xi_3 = c_4^{tk}, \quad \xi_4 = c_5^{tk}, \\ \xi_5 &= c_2^{st}, \quad \xi_6 = c_3^{st}, \quad \xi_7 = c_4^{st}, \quad \xi_8 = c_5^{st}. \end{aligned}$$

Если система не подключена к нагрузке (источнику) или оснащена специальными измерительными ячейками холостого хода, то доступны измерения напряжений холостого хода. Выходной сигнал системы y имеет вид

$$(1) \quad y = \begin{bmatrix} y_{in} \\ y_{out} \end{bmatrix} = h(\xi).$$

Здесь функция $y = h : \mathbb{R}^8 \rightarrow \mathbb{R}^2$ является векторной формой уравнения Нернста

$$(2) \quad h(\xi) = \begin{bmatrix} k_0 + k_1 \ln \frac{\xi_1 \xi_4}{\xi_2 \xi_3} \\ k_0 + k_1 \ln \frac{\xi_5 \xi_8}{\xi_6 \xi_7} \end{bmatrix}$$

с известными константами $k_0, k_1 > 0$: k_0 представляет собой стандартный потенциал, а $k_1 = \frac{RT}{F}$, где $R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{МОЛЬ}}$ – газовая постоянная, $F = 96485,332 \frac{\text{Кл}}{\text{МОЛЬ}}$ – постоянная Фарадея, а $T = 298 \text{ К}$ – температура. Выходы y_{in} и y_{out} соответствуют напряжениям холостого хода на входе (OCV_{in}) и выходе (OCV_{out}) ячейки (стека) соответственно (см. рис. 1).

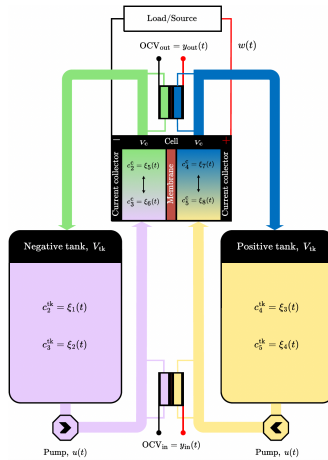


Рис. 1. Структура ВПА, оснащенного входными/выходными ячейками для измерения напряжений холостого хода

2.2. МЕТОД КУЛОНОВСКОГО СЧЕТЧИКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЗАРЯДА

Состояние заряда аккумулятора обычно выражается как

$$SoC = \frac{Q_{act}}{Q_{max}},$$

где Q_{act} – имеющееся в данный момент количество электрического заряда, Q_{max} – максимальный электрический заряд батареи.

Среди различных известных методов оценки СЗ наиболее простым и понятным является кулоновский счетчик. Он основан

на учете перенесенного заряда

$$\Delta Q = \int_{t_0}^{t_1} w(\tau) d\tau,$$

рассчитываемого как интеграл, взятый на интервале времени $[t_0; t_1]$ от измеряемого внешнего электрического тока $w(t)$, который положителен при заряде и отрицателен при разряде.

Таким образом, оценка СЗ на основе кулоновского счетчика может быть описана следующим образом:

$$(3) \quad SoC = SoC_0 + \frac{\Delta Q}{Q_{max}},$$

где SoC_0 – известное базовое значение.

Недостатком этого метода является накопление погрешности на интеграторе из-за неточного измерения тока. Например, если измерение тока имеет систематическую погрешность. В этом случае будет иметь место линейный рост ошибки. Этот недостаток метода широко известен, поэтому в таких приложениях точность амперметра является критичной. Кроме того, этот метод может давать большую погрешность при усилении побочных реакций, на которые уходит часть энтропийной энергии, но это не отражается на кулоновском счетчике, который дает только интегральное значение. В связи с этим данный метод не используется на больших временных интервалах и часто дополняется другими методами оценки состояния заряда. Обсуждение и анализ этого и других недостатков данного метода можно найти в [9].

В данной работе показано, что возможное накопление ошибок – не единственная особенность метода кулоновского счетчика при его использовании в ВПА. Учитывая специфику строения и работы проточного аккумулятора, накопление (расходование) заряда происходит в различных элементах накопителя. На основе анализа модели динамики такой системы мы показываем, как общее состояние заряда связано с зарядами в стеке и баке. Для анализа изменения состояния заряда рассмотрим сначала типовую модель с сосредоточенными параметрами, описывающую динамику концентраций в ВПА.

2.3. ДИНАМИКА ВПА

В общем случае динамика состояния аккумулятора ξ может быть описана системой дифференциальных уравнений восьмого порядка

$$(4) \quad \dot{\xi} = u\mathcal{A}\xi + \mathcal{J}\xi + \mathcal{D}w$$

с двумя алгебраическими ограничениями:

$$(5) \quad \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4 = 2c_t,$$

$$(6) \quad \xi_5 + \xi_6 + \xi_7 + \xi_8 = 2c_t,$$

где $u \in \mathbb{R}$ обозначает скорость потока электролита, $w \in \mathbb{R}$ – измеряемое возмущение (ток), а c_t – постоянная общая концентрация, которая известна. Соответствующие матрицы имеют вид

$$(7) \quad \mathcal{A} = \begin{bmatrix} -\alpha & \alpha \\ \beta & -\beta \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_4,$$

$$(8) \quad \mathcal{J} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} -J_2 & 0 & -J_4 & -2J_5 \\ 0 & -J_3 & 2J_4 & 3J_5 \\ 3J_2 & 2J_3 & -J_4 & 0 \\ -2J_2 & -J_3 & 0 & -J_5 \end{bmatrix},$$

$$(9) \quad \mathcal{D} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ d_5 \ d_6 \ d_7 \ d_8]^\top,$$

где $d_5 = d_8 = -d_6 = -d_7 = d$.

$$\text{Здесь } d = \frac{1}{FV_c}, \quad \alpha = \frac{1}{V_{tk}}, \quad \beta = \frac{1}{n_c V_c}.$$

Матрица \mathcal{J} отражает динамику кроссовера. Каждая константа J_i , $i \in \{2, \dots, 5\}$, представляет собой коэффициент диффузии i -го иона ванадия. Как правило, эти коэффициенты имеют достаточно малый порядок, например, 10^{-11} , и ими можно пренебречь на интервале от нескольких циклов до десятков циклов заряда/разряда.

3. Основной результат

3.1. МОДЕЛЬ ВТОРОГО ПОРЯДКА

При пренебрежении вторым членом (4) можно видеть, что система становится симметричной. Это означает, что концентрации положительной и отрицательной сторон аккумулятора имеют одинаковую динамику.

Алгебраические ограничения в данном случае примут вид

$$(10) \quad \begin{aligned} \xi_1 + \xi_2 = \xi_3 + \xi_4 = \xi_5 + \xi_6 = \xi_7 + \xi_8 = c_t, \\ \xi_1 = \xi_4, \quad \xi_5 = \xi_8. \end{aligned}$$

Таким образом, переписав динамику системы с учетом ее алгебраической части (10), получим:

$$(11) \quad \dot{x} = uAx + Dw,$$

где $x_1 = \xi_1, x_2 = \xi_5$,

$$A = \begin{bmatrix} -\alpha & \alpha \\ \beta & -\beta \end{bmatrix}, \quad D = [0 \quad d]^\top.$$

Отметим, что в простейшем случае, когда скорость потока u постоянна, а внешнее возмущение $w \equiv 0$, система (11) имеет обычную консенсусную (усредняющую) динамику с матрицей Лапласа $L = -uA$: асимптотически концентрации в стеке и резервуаре стремятся достичь одного значения.

Выход системы (11) примет вид

$$(12) \quad \begin{bmatrix} y_{in} \\ y_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_0 + 2k_1 \ln \frac{x_1}{c_t - x_1} \\ k_0 + 2k_1 \ln \frac{x_2}{c_t - x_2} \end{bmatrix}.$$

Очевидно, что с помощью следующих выражений можно в явном виде вычислить состояния системы:

$$(13) \quad x_1 = \frac{c_t e^{\frac{y_{in} - k_0}{2k_1}}}{1 + e^{\frac{y_{in} - k_0}{2k_1}}}, \quad x_2 = \frac{c_t e^{\frac{y_{out} - k_0}{2k_1}}}{1 + e^{\frac{y_{out} - k_0}{2k_1}}}.$$

Из (13) становится понятно, что, имея измерения обоих НХХ, можно легко найти концентрации, причем динамическую часть модели рассматривать не нужно.

Далее будет показана связь метода кулоновского счетчика с изменением концентраций.

3.2. ОБЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ЗАРЯДА ВПА

Предположим, что измерение тока доступно и точно совпадает с реальным сигналом $w(t)$. Тогда для батареи с динамикой концентрации (11) и измеряемыми выходами (12) справедливо следующее утверждение.

Утверждение 1. Пусть в начальный момент времени $t = 0$ значения концентраций ионов равны $x_1(0)$, $x_2(0)$. Тогда справедливо следующее равенство:

$$(14) \quad V_{tk}x_1 + n_c V_c x_2 = V_{tk}x_1(0) + n_c V_c x_2(0) + \frac{n_c}{F} \int_0^t w(\tau) d\tau.$$

Доказательство. Система (11) может быть переписана с учетом свойств матрицы A . Собственные значения A и соответствующие им собственные векторы имеют вид

$$(15) \quad \lambda_1 = 0, \quad \nu_1 = [1, 1]^\top,$$

$$(16) \quad \lambda_2 = -(\alpha + \beta), \quad \nu_2 = \left[1, -\frac{\beta}{\alpha}\right]^\top.$$

Введем новые переменные

$$(17) \quad \tilde{x} = S^{-1}x,$$

где S – новый базис из собственных векторов

$$(18) \quad S = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -\frac{\beta}{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -\frac{V_{tk}}{n_c V_c} \end{bmatrix}.$$

Тогда в новых координатах динамика системы примет вид

$$(19) \quad \dot{\tilde{x}} = u\Lambda\tilde{x} + \tilde{D}w,$$

где

$$(20) \quad \Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -(\alpha + \beta) \end{bmatrix},$$

$$(21) \quad \tilde{D} = [\tilde{d} \quad -\tilde{d}]^\top$$

и

$$\tilde{d} = \frac{\alpha d}{\alpha + \beta} = \frac{n_c}{F(n_c V_c + V_{tk})}.$$

Проанализируем проведенную замену координат. Подставляя (18) в (17), получим

$$(22) \quad \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{tk} + n_c V_c} \begin{bmatrix} V_{tk} & n_c V_c \\ n_c V_c & -n_c V_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}.$$

Динамика новых переменных имеет вид

$$(23) \quad \begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 \end{bmatrix} = u \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -(\frac{1}{V_{tk}} + \frac{1}{n_c V_c}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} \frac{n_c}{F(V_{tk} + n_c V_c)} \\ -\frac{n_c}{F(V_{tk} + n_c V_c)} \end{bmatrix} w.$$

Легко видеть, что полученная система содержит две независимые части.

Переменная \tilde{x}_1 описывается динамикой простого интегратора, зависящей от входного сигнала w и начального условия $\tilde{x}_1(0)$:

$$(24) \quad \tilde{x}_1 = \tilde{x}_1(0) + \frac{n_c}{F(V_{tk} + n_c V_c)} \int_0^t w(\tau) d\tau.$$

Перепишав последнее уравнение в исходных координатах, получаем (14). На этом доказательство завершено.

Следствие 1. *Полученный результат отражает следующий факт: общее СЗ аккумулятора является выпуклой комбинацией состояний заряда баков SoC_{tk} и стека SoC_{st} . При этом выполняется следующее равенство:*

$$(25) \quad \begin{aligned} SoC &= k_{tk} SoC_{tk}(t) + k_{st} SoC_{st}(t) = \\ &= k_{tk} SoC_{tk}(0) + k_{st} SoC_{st}(0) + \frac{n_c \int_0^t w(\tau) d\tau}{F_{ct}(V_{tk} + n_c V_c)}, \end{aligned}$$

где веса имеют вид

$$k_{tk} = \frac{V_{tk}}{V_{tk} + n_c V_c}, \quad k_{st} = \frac{n_c V_c}{V_{tk} + n_c V_c}$$

и удовлетворяют $k_{tk} + k_{st} = 1$.

Замечание 1. При наличии паразитной динамики, разбалансировки батареи, деградации, потерь различной природы, а также неточности измерений, рассмотренные уравнения, равенства и преобразования перестают быть верными. Тем не менее подобный анализ системы (11)–(12) проливает свет на взаимосвязь между сигналами, связанными с ее динамикой.

4. Анализ результатов и моделирование

В данном разделе излагаются выводы, сделанные на основе (25), анализируются возможные приложения к оценке состояния и приводятся некоторые результаты моделирования.

Влияние соотношения объемов стека и бака.

Сначала продемонстрируем важность соотношения объемов стека и бака. Оба состояния заряда, а именно SoC_{tk} и SoC_{st} , вносят свой вклад в общее состояние, и ни одним из них нельзя пренебрегать. Если объем стека не очень мал по сравнению с объемом резервуара, то его вклад в общий заряд может быть значительным. Например, такая ситуация характерна для лабораторных стендов. В таблице 1 приводятся параметры ВПА некоторых реальных экспериментальных накопителей. Здесь «Сколтех-1» и «Сколтех-2» обозначают батареи малого и среднего размера, установленные в институте Сколтех, Москва. Накопитель «Padova» установлен в университете Падуи, а «UNSW» – в университете Нового Южного Уэльса соответственно. Параметр $\mu = \frac{n_c V_c}{V_{tk}} \cdot 100\%$ обозначает процентное соотношение объемов стека и бака.

Таблица 1. Параметры экспериментальных установок ВПА

Установка ВПА	Параметры				Ссылки
	$V_c, \text{ м}^3$	$V_{tk}, \text{ м}^3$	n_c	$\mu, \%$	
Сколтех-1	7,50e-06	4,00e-04	10	18,75	[11]
Сколтех-2	1,84e-04	1,00e-01	40	7,36	[11]
Padova	3,42e-04	5,50e-01	40	2,49	[6]
UNSW	4,50e-04	0,2	40	9	[15]

Влияние соотношения объемов стека и бака можно проанализировать с помощью коэффициента k_{st} , определяемого как $k_{st}(\mu) = \frac{\mu}{\mu+100}$.

Изменение $k_{st}(\mu)$ в зависимости от μ показано на рис. 2.

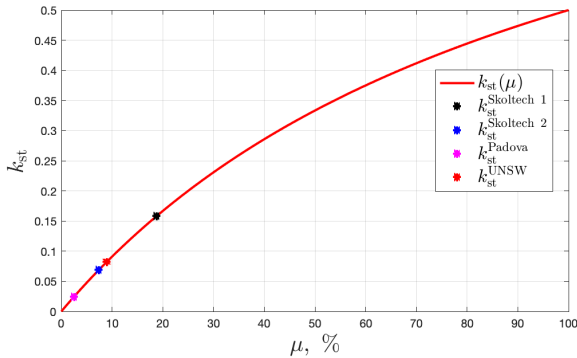


Рис. 2. Вес k_{st}^* вклада состояния заряда в стеке SoC_{st} как функция отношения объемов стека и бака μ

Звездочки на кривой соответствуют лабораторным батареям из таблицы. Как видно из рисунка, стеки трех установок дают вклад до 7–15 % в общий заряд батареи. В некоторых работах, например, см. [4], не делается различия между общим состоянием заряда SoC и состоянием заряда стека SoC_{tk} . Как будет показано в примере, такая интерпретация состояния заряда может привести к некорректной работе аккумулятора, см. рис. 4.

Отсутствующие измерения.

Состояние заряда, найденное с помощью метода кулоновского счетчика, может служить заменой отсутствующему измерению напряжения холостого хода. Очевидно, что одна концентрация (или состояние заряда) может быть выражена через другую, как следует из (14), (25). Если ток измеряется с достаточно высокой точностью, то довольно легко вычислить недостающую концентрацию (или состояние заряда). Это можно проиллюстрировать на следующем примере. В численном эксперименте аккумулятор проходит цикл заряда от 10% до 75%. Кроме того, имеется десятисекундный интервал, на котором батарея резко переходит в режим разряда. Именно на этом интервале удобно оценить разницу между различными состояниями заряда системы.

Пусть параметры системы составляют $u = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$,

$V_{tk} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, $V_c = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, $n_c = 10$, $SoC_{tk}(0) = SoC_{st}(0) = 0,1$. Измерения НХХ и тока содержат нормально распределенную случайную ошибку с нулевым средним. Тогда, согласно (25), мы имеем два способа вычисления общего состояния заряда:

$$(26) \quad SoC_1 = k_{tk}SoC_{tk}(t) + k_{st}SoC_{st}(t),$$

$$(27) \quad SoC_2 = k_{tk}SoC_{tk}(0) + k_{st}SoC_{st}(0) + \frac{n_c \int_0^t w(\tau) d\tau}{Fc_t(V_{tk} + n_c V_c)}.$$

Как видно из графиков состояний заряда, изображенных на рис. 3, они практически совпадают.

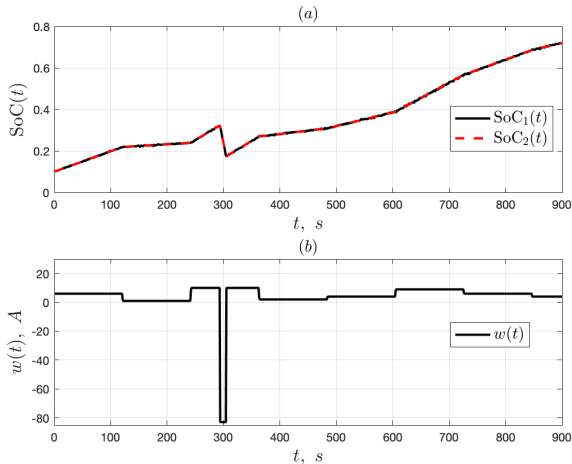


Рис. 3. Изменение состояний заряда, вычисленных при помощи (26), (27) (а), а также измеренный ток (б)

Резкий переход батареи из режима заряда в режим разряда с высокой нагрузкой свидетельствует о значительном изменении состояния заряда в стеке, батарея по сути близка к выходу из строя, см. рис.4. В то же время состояние заряда в баке выше общего, более «правильного» состояния заряда.

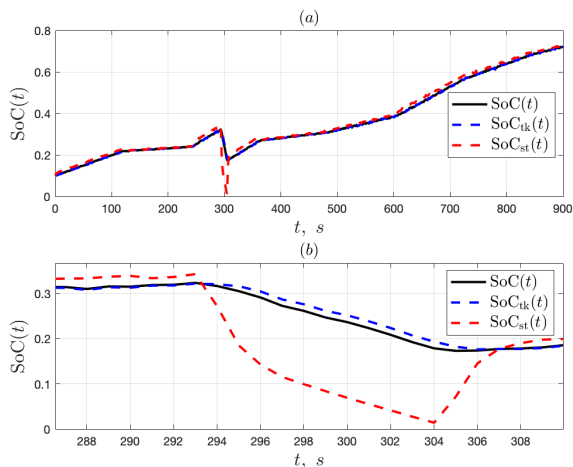


Рис. 4. Изменение состояний заряда SoC , SoC_{tk} , SoC_{st} (a); увеличенный фрагмент, соответствующий резкому скачку тока нагрузки (b)

Более робастные способы оценки состояния заряда.

Точность оценки состояния заряда может быть повышена за счет увеличения избыточности измерительной системы. Если доступны как измерения напряжений холостого хода, так и тока нагрузки, то избыточность налицо. В то же время они по-прежнему содержат шумы: избыточность измерений может быть использована для получения более точных оценок концентраций ионов при использовании статических оценивающих устройств, а также наблюдателей/фильтров Калмана. Это может повысить точность получаемых оценок.

5. Заключение

Определение состояния заряда является важной задачей для обеспечения правильной эксплуатации ванадиевых проточных аккумуляторов (ВПА), так как оно указывает на способность к накоплению энергии. Из-за технических различий между ВПА-системами и обычными батареями широко используемые методы

определения/оценки состояния заряда могут давать большие погрешности. Более того, эти погрешности могут накапливаться в процессе длительной эксплуатации и должны быть обязательно учтены.

В данной работе проведен подробный анализ существующих методов явного определения состояния заряда ВПА. В результате анализа выявлена связь между традиционным подходом, использующего технику кулоновского счетчика, и вычислением состояний заряда в стеке и резервуарах с помощью измерений напряжений холостого хода как на входе в стек, так и на его выходе. Результаты исследования показали, что:

– при отсутствии потерь и паразитной динамики общее состояние заряда представляет собой взвешенную сумму состояний заряда баков и стека. Весовыми коэффициентами в формуле являются относительные объемы. Анализ вклада стека и бака в общее состояние заряда показывает, что величиной накопленного заряда в стеке пренебрегать нельзя;

– связь концентраций (или состояний заряда) в стеке и баке с зарядом, оцененным методом кулоновского счета, позволяет: 1) выразить одни состояния в терминах других в случае отсутствия измерений; 2) увеличить избыточность и, следовательно, точность оценок при измерении как тока, так и напряжений холостого хода.

Дальнейшие планы включают в себя а) экспериментальную проверку полученных результатов, б) анализ применения метода к более сложной динамике с кроссовером и в) применение кулоновского счетчика в сочетании с измерениями напряжения к задаче синтеза наблюдателей состояния.

Литература

1. BARSALI S., GIGLIOLI R., LUTZEMBERGER G. et al. *Optimised operation of storage systems integrated with mv photovoltaic plants, considering the impact on the battery lifetime* // Journal of Energy Storage. – 2017. – Vol. 12. – P. 178–185.

2. BARELLI L., BIDINI G., CIUPAGEANU D.-A. et al. *Electrical performance analysis of an innovative vanadium redox flow battery stack for enhanced power density applications* // IEEE Madrid PowerTech. – 2021. – P. 1–6.
3. CLEMENTE A., MONTIEL M., BARRERAS F. et al. *Vanadium redox flow battery state of charge estimation using a concentration model and a sliding mode observer* // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 72368–72376.
4. CLEMENTE A., CECILIA A., COSTA-CASTELLO R. *Soc and diffusion rate estimation in redox flow batteries: An i&i- based high-gain observer approach* // European Control Conference (ECC). – 2021. – P. 1640–1644.
5. DAWEI Q., ZIXUAN L., FAN Y. et al. *State of charge estimation for the vanadium redox flow battery based on extended kalman filter using modified parameter identification* // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2022. – Vol. 44, No. 4. – P. 9747–9763.
6. GUARNIERI M., TROVÒ A., MARINI G. et al. *High current polarization tests on a 9 kw vanadium redox flow battery* // Journal of Power Sources. – 2019. – Vol. 431. – P. 239–249.
7. KHAKI B., DAS P. *Fast and simplified algorithms for soc and soh estimation of vanadium redox flow batteries* // IEEE Green Technologies Conference (GreenTech). – 2021. – P. 494–501.
8. LUCAS A., CHONDROGIANNIS S. *Smart grid energy storage controller for frequency regulation and peak shaving, using a vanadium redox flow battery* // Int. Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2016. – Vol. 80. – P. 26–36.
9. MOVASSAGH K., RAIHAN A., BALASINGAM B. et al. *A critical look at coulomb counting approach for state of charge estimation in batteries* // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 14. – P. 40–74.
10. MISYRIS G.S., TENGNER T., MARINOPOULOS A.G. et al. *Battery energy storage systems modeling for online applications* // IEEE Manchester PowerTech. – 2017. – P. 1–6.

11. PARSEGOV S., PUGACH M., POLYAKOV A. et al. *Analysis of flow factor control strategy in vanadium redox flow batteries* // IFAC-PapersOnLine. – 2022. – Vol. 55, No. 9. – P. 187–192.
12. PULESTON T., CLEMENTE A., COSTA-CASTELLO R. et al. *Modelling and estimation of vanadium redox flow batteries: A review* // Batteries. – 2022. – Vol. 8, No. 9. – P. 1–21.
13. QIU Y., LI X., CHEN W. et al. *State of charge estimation of vanadium redox battery based on improved extended kalman filter* // ISA Trans. – 2019. – Vol. 94. – P. 326–337.
14. SKYLLAS-KAZACOS M., KASHERMAN D., HONG D. et al. *Characteristics and performance of 1 kW UNSW vanadium redox battery* // Journal of Power Sources. – 1991. – Vol. 35, No. 4. – P. 399–404.
15. TANG A., BAO J., SKYLLAS-KAZACOS M. *Studies on pressure losses and flow rate optimization in vanadium redox flow battery* // Journal of power sources. – 2014. – Vol. 248. – P. 154–162.
16. UDDIN M. , ROMLIE M. F., ABDULLAH M. F. et al. *A review on peak load shaving strategies* // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 82. – P. 3323–3332.
17. XIONG B., ZHAO J. , SU Y. et al. *State of charge estimation of vanadium redox flow battery based on sliding mode observer and dynamic model including capacity fading factor* // IEEE Trans. on Sustainable Energy. – 2017. – Vol. 8, No. 4. – P. 1658–1667.
18. ZHENG C., TIAN X., NIE G. et al. *State of power and state of charge estimation of vanadium redox flow battery based on an online equivalent circuit model* // IEEE 18th Int. Conf. on Industrial Informatics (INDIN-2020). – 2020. – Vol. 1. – P. 633–638.
19. ZHAO X., KIM K., JUNG S. *State-of-charge estimation using data fusion for vanadium redox flow battery* // Journal of Energy Storage. – 2022. – Vol. 52. – P. 104852.

METHODS FOR CALCULATING THE STATE OF CHARGE OF VANADIUM REDOX FLOW BATTERIES: AN ANALYSIS OF THE RELATIONSHIPS

Sergei Parsegov, Moscow Institute of Physics and Technology, Skolkovo Institute of Science and Technology, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand.Sc., leading research scientist (s.e.parsegov@gmail.com).

Mikhail Pugach, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Ph.D, senior research scientist (m.pugach@skoltech.ru).

Victoria Erofeeva, Institute for Problems in Mechanical Engineering of RAS, Saint Petersburg, Cand.Sc., senior research scientist (eva@ipme.ru).

Abstract: In the future, energy storage systems are expected to play a key role in the transition to low-carbon energy systems. Increasing renewable energy deployment rates require the integration of batteries that ensure the stability and security of the power system and mitigate the unstable behavior of renewables. Efficient operation of the batteries themselves is also important: it extends their life, reducing operating costs. Monitoring of the state of charge is one of the key tasks to help battery operation. This paper studies the existing explicit methods for calculation of the state of charge of vanadium flow batteries: the open-circuit voltage-based method and the Coulomb counter method. The relationship between them and the possibility of using them together to achieve more reliable and accurate charge state monitoring is investigated. In contrast to existing works, we derive an analytical expression for the overall state of charge that takes into account both main components of the battery, namely its stack and tanks. Analyzing their contributions reveals some shortcomings of existing approaches widely used to calculate and monitor the state of charge of flow batteries.

Keywords: battery energy storages, state of charge calculation, vanadium redox flow batteries.

УДК 681.5

ББК 31.251

DOI: 10.25728/ubs.2024.108.5

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии П.С. Щербаковым.

Поступила в редакцию 07.12.2023.

Дата опубликования 31.03.2024.