УДК 681.3:543.087.9:621.317

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СРЕДСТВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ АВТОНОМНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

¹Седов А.В., ²Онышко Д.А., ²Липкин М.С.¹ФГБУН «Южный научный центр» Российской академии наук,
Ростов-на-Дону, e-mail: Sedov07@list.ru;²ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова», Новочеркасск, e-mail: Sedov07@list.ru

Статья посвящена выбору физического принципа измерения и идентификации внутренних параметров аккумуляторов для интеллектуальных систем контроля и управления. Цель использования системы – выявление естественной неоднородной деградации аккумуляторов в батарее. Области применения системы – контроль аккумуляторов в батарее при длительном сроке эксплуатации или нахождении аккумуляторов в длительном режиме буферного подзаряда в системах аварийного электроснабжения в добывающей промышленности, на транспорте, в энергетике и других областях. Реализуется усовершенствованная математическая модель, учитывающая остаточную емкость аккумулятора, внутреннее сопротивление аккумулятора переменному току, сопротивление постоянному току и активационные параметры. Учет активационных параметров важен в системах со стартерным режимом работы, например в системах с инверторами напряжения, двигателями и силовыми агрегатами. Предложен новый принцип реализации адаптивной математической модели диагностики в системе контроля и управления в форме нелинейной регрессии пониженной размерности. Интеллектуальная обработка включает этап редукции измерений. Модель настраивается в зависимости от типа контролируемого аккумулятора по обучающей выборке или путем выбора адекватного типа модели из некоего множества. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность предложенных принципов, достаточную точность и вычислительную устойчивость при реализации в системе.

Ключевые слова: системы контроля и управления, системы аварийного электроснабжения, никель-кадмиевые аккумуляторы, интеллектуальная обработка данных, редукция измерений, адаптивные математические модели

PHYSICAL AND MATHEMATICAL PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF DEVICES FOR INTELLIGENT CONTROL OF AUTONOMOUS RECHARGEABLE POWER SOURCE

¹Sedov A.V., ²Onyshko D.A., ²Lipkin M.S.¹Federal State Budgetary Institution of Science Southern Scientific Center
of Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, e-mail: Sedov07@list.ru;²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «South-Russian
State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov», Novocherkassk, e-mail: Sedov07@list.ru

The article is devoted to the selection of the physical principle of measurement and identification of internal battery parameters for intelligent monitoring and control systems. Purpose of the identification of the natural non-uniform degradation of the battery cells in the battery. Applications of the system – it is the control elements in the battery during long term of operation, or when the batteries in the continuous operation of the buffer charging emergency power supply systems in the mining industry, transport, energy and other fields. It implemented an improved mathematical model, which takes into account the residual capacity of the battery, the internal resistance of the battery AC, DC resistance and activation parameters. The account activation parameters important in systems with starter operating mode, for example, in systems with a voltage inverter, engines and power units. A new implementation of the principle of adaptive mathematical model of diagnosis system for monitoring and control in the form of low-dimensional non-linear regression. Intelligent processing includes the step of reduction of measurements. The model is adjusted depending on the type of battery controlled by the training set, or by choosing an adequate model of the type of certain sets. Experimental studies have confirmed the effectiveness of the proposed principles sufficient accuracy and computational stability of the implementation of the system.

Keywords: monitoring and control systems, emergency power systems, nickel-cadmium batteries, intelligent processing, reduction of measurement, adaptive mathematical models

Интеллектуальный оперативный контроль автономных источников питания предполагает реализацию в системах управления и диагностики адаптивной математической модели, настраиваемой в зависимости от типа контролируемого аккумулятора по обучающей выборке или путем выбора адекватного типа модели из неко-

его множества. Помимо математической модели большое значение при этом имеет выбор физического принципа измерения и идентификации внутренних параметров аккумуляторов. Одновременный выбор типа математической модели и физического принципа измерения внутренних параметров и составляют *физико-математические*

принципы построения интеллектуальных средств контроля автономных аккумуляторных источников питания. Слово «интеллектуальный» подчеркивает использование принципов обучения и методов обработки данных и моделирования, присущих интеллектуальным информационным системам.

При длительном сроке эксплуатации или нахождении аккумуляторов в буферном режиме подзаряда в системах аварийного электроснабжения происходит их естественная неоднородная деградация в батарее, приводящая к ограничению и снижению емкости как отдельных аккумуляторов, так и всей аккумуляторной батареи в целом. Для оценки уровня деградации необходимо периодически измерять основные эксплуатационные параметры отдельных аккумуляторов: остаточную емкость аккумулятора, внутреннее сопротивление аккумулятора переменному току, сопротивление постоянному току и активационные параметры. Активационные параметры важны в системах со стартерным режимом работы (например, инверторы напряжения, двигатели и др.), к ним относятся активационные сопротивление и емкость. Эти параметры определяют длительность переходного режима, в течение которого может быть реализован стартерный режим, а также время восстановления стационарного режима после завершения стартерного режима. Анализ доступных источников информации свидетельствует о недостаточной проработке вопросов определения активационных параметров.

В батареях никель-кадмиевых аккумуляторов (НКА) в качестве физических принципов измерения внутренних электрических параметров при эксплуатации зачастую используют методы кратковременных внешних электрических воздействий, при этом к зажимам НКА подключают схемы с дополнительными источниками тока, напряжения или цепи дополнительной нагрузки [1–3]. Для получения сигнала отклика, обладающего высокой информативностью с точки зрения контроля, зачастую используют не статические воздействия, а изменяющиеся во времени по определенным законам. Однако недостатки известных подобных подходов следующие [1–3]:

1. Неточность определения параметров либо из-за упрощения моделей контроля, либо из-за чрезмерной сложности алгоритмов идентификации, в конечном итоге приводящей к вычислительной неустойчивости контроля.

2. Необходимость либо достаточно мощных внешних источников реализации воздействий, приводящая к увеличению габаритов устройства, либо реализация не вполне корректных действий, которые могут при-

водить к возникновению неисправностей (например, прямая коммутация к полюсам батареи электрического конденсатора и тому подобные действия) или снижающее электро- и пожаробезопасность контроля.

3. Невозможность оперативной оценки из-за длительности во времени процедур контроля и измерения.

4. Зачастую требование демонтажа аккумулятора из батареи для оценки параметров.

Для решения задачи совершенствования физического принципа измерения внутренних параметров НКА были проанализированы известные способы электрического воздействия на аккумулятор [1, 2]: гальваностатические, при фиксированном токе, и потенциостатические, при фиксированном напряжении. Гальваностатические воздействия при допустимой мощности приводят к несущественным изменениям напряжения на зажимах аккумулятора, обладающим невысокой информативностью. Более информативными являются потенциостатические воздействия, при которых незначительное изменение напряжения на зажимах аккумулятора приводит к значимым изменениям тока, протекающего через аккумулятор. Существующие же принципы и методы измерения параметров НКА, основанные на потенциостатических испытаниях [1, 2] несовершенны из-за недостаточной точности, т.к. используются простые модели контроля; невозможности контроля активационных параметров; реализации, как правило, качественной или сравнительной оценки параметров типа «больше-меньше», а не количественного значения параметра.

На рис. 1 показан экспериментальный график тока $I_{\text{акк}}(t)$ через аккумулятор при зарядном потенциостатическом включении. Как видно из рисунка, потенциостатическое подключение ΔU приводит к существенному изменению тока $I_{\text{акк}}(t)$ через аккумулятор. Значение тока при этом может быть измерено с достаточной точностью, и информативность его с точки зрения идентификации параметров модели велика. Пиковое значение величины тока $I_{\text{акк}}(t)$ характеризует величину внутреннего омического сопротивления $R_{\text{п}}$ постоянному току. Плавное изменение тока $I_{\text{акк}}(t)$ (переходный процесс) свидетельствует об инерционности процесса, напрямую связанного с остаточной емкостью НКА и активационными параметрами, которые определяют поведение аккумулятора в переходных режимах включения большой нагрузки, например при стартерных пусках. Большой диапазон изменения тока существенно облегчает получение достоверной информации о состоянии аккумулятора при небольших энергетических затратах.

Рис. 1. Форма тока при зарядном потенциостатическом испытании $\Delta U = 10$ мВ

Анализ влияния изменения напряжения ΔU (потенциостатической ступени) [3, 5, 6] на потенциостатический ток показал, что достаточной величиной этого напряжения является значение порядка 0,05–0,1 В. Это изменение не требует мощных устройств для формирования воздействий, а следовательно, не приводит к увеличению габаритных размеров и веса устройства. Эта величина напряжения обеспечивает изменение тока в допустимых пределах в соответствии с величиной емкости аккумулятора. При меньших значениях напряжения потенциостатической ступени величина потенциостатического тока может оказаться недостаточной для проведения анализа. При больших значениях напряжения ΔU потенциостатический ток может выйти из диапазона допустимых значений.

Предлагается усовершенствованный физический принцип измерения внутренних параметров, основанный на потенциостатических испытаниях с использованием многоступенчатой последовательной во времени серии изменений ΔU воздействующего напряжения (рис. 2). Подача

на НКА серии нарастающих на величину ΔU воздействий напряжений из диапазона $[U_0, U_{\max}]$, где U_0 – зарядное буферное напряжение аккумулятора, и регистрация обобщенного изменяющегося во времени графика отклика тока $I_{\text{акк}}(t)$ для всех воздействий, позволяет более точно провести оценку параметров, т.к. используются не отдельные статические измерения, а динамически взаимосвязанный график, состоящий из целого ряда информативных точек [3, 5, 6].

При этом в каждом интервале наблюдения $[t_i, t_{i+1}]$, $i = 1, N-1$ формируется своя потенциостатическая ступень напряжения величиной $i \cdot \Delta U$. Для каждой ступени измеряется ряд значений потенциостатического тока $I_{\text{акк}}(t)$.

Проведенные эксперименты и анализ для ряда НКА показал, что с увеличением числа ступеней N общая достоверность и точность контроля параметров аккумулятора возрастает. Однако при числе ступеней $N > 5$ максимальная относительная погрешность определения основных параметров НКА составляет менее 1,2% и меняется слабо (рис. 3).

Рис. 2. Многоступенчатое потенциостатическое изменение напряжения $U_{\text{акк}}(t)$

Рис. 3. Зависимость относительной погрешности метода от числа ступеней N

На основе вышесказанного был сформулирован новый физический принцип измерения внутренних параметров НКА в автономных аккумуляторных источниках питания, условно названный как активный импульсно-релаксационный принцип. Основные положения данного принципа следующие:

1. Формируется активное действие на АК в форме последовательности во времени элементарных воздействий (ступеней), при этом каждое воздействие отличается величиной $i \cdot \Delta U$, что позволяет более полно кумулятивно охарактеризовать контролируемые параметры для рабочего диапазона $[U_0, U_{\max}]$.

2. Величина каждого воздействия $i \cdot \Delta U$ определяется информативностью, существенностью и достаточностью по амплитуде изменения возникающего при этом сигнала тока $I_{\text{акк}}$ отклика АК, определяющего разрешающую способность устройства.

3. Число элементарных воздействий N , а также их очередность во времени определяется требуемой погрешностью измерения конкретных контролируемых параметров.

Указанная реализация принципа позволяет уменьшить мощность устройств для формирования воздействий, габаритные размеры и вес устройства и на основе получения динамического графика изменения отклика получить кумулятивные значения контролируемого параметра для целого диапазона рабочих состояний.

Адаптивная математическая модель, настраиваемая в зависимости от типа контролируемого аккумулятора по обучающей выборке и реализующая активный импульсно-релаксационный принцип измерения в форме алгоритма работы, может быть представлена так:

1. Расчет общих характеристик оперативного контроля и измерения параметров НКА, а именно: смещения напряжения воздействия $U_{\text{см}}$, количество ступеней воздействия N , шаг дискретизации измерений ΔU , количество точек измерения n тока отклика.

2. Измерение начального уровня напряжения U_0 на НКА, относительно которого формируется потенциостатическое воздействие $i \cdot \Delta U$.

3. Реализация потенциостатического воздействия и измерение токовой реакции $I_{\text{акк}}(t)$ с заранее заданными параметрами.

4. Осуществление редукции полученных измерений [3, 4] путем преобразования полученной выборки $\{I_{\text{акк}}^j(\ell)\}_{j=1, M, \ell=1, n}$ токовых

реакций в образы адаптивного ортогонального признакового пространства на основе ковариационной матрицы K измерений:

$$K = \{k_{ij}\}_{i,j=1,n} = \left\{ \frac{1}{M-1} \left[\sum_{l=1}^M (I_{il} - \bar{I}_i)(I_{jl} - \bar{I}_j) \right] \right\}_{i,j=1,n} = \text{cov}(I_{i1}, \dots, I_{iM}; I_{j1}, \dots, I_{jM}),$$

где $\bar{I}$ – средний график реакций тока:

$$\bar{I} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_j = [\bar{I}_1, \bar{I}_2, \dots, \bar{I}_n]^T; \quad I_{\text{акк}}^j(l) = I_{jl}.$$

Редуцированные образы измерений D_j пониженной размерности $m < n$ в пространстве определяются выражениями $D_j = V^T \cdot I_j$, где V^T – матрица преобразований пространств.

5. Построение модели нелинейной регрессии пониженной размерности связи редуцированных образов D_j с контролируемыми параметрами и определение коэффициентов (в частности, для остаточной емкости) НКА вида [4, 5, 6]:

$$Q_{\text{пр}} = f(D) = \sum_{i=1}^m p_i D_i + \sum_{i=1}^m p'_i D_i^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j>i}^m p_{ij} D_i D_j + p_0,$$

где p_i, p'_i, p_{ij}, p_0 – коэффициенты математической модели.

Рис. 4. Зависимость средней относительной погрешности оценки остаточной емкости АК от порядка модели m

6. Преобразование в соответствии с моделью текущих токовых реакций в редуцированные значения параметров НКА.

Были оценены для каждого из параметров НКА относительные погрешности (рис. 4) и определен порядок модели m связи образов с контролируемыми параметрами. Порядок определяется размерностью редуцированного пространства образов D_j в используемой модели.

Так, для порядка модели $m = 3$ средняя относительная погрешность не превышала значения 2,05 %, что является весьма успешным результатом. Анализ относительных погрешностей для каждого отдельного измерения тестовой выборки показал, что основная масса измерений имеет погрешность менее 3 %.

Применение рассмотренных физико-математических принципов для построения интеллектуальных средств контроля автономных аккумуляторных источников питания на основе НКА позволило сократить объем исходных данных потенциостатических испытаний практически в 7 раз (вместо 20 координат в модели используется только 3). Уменьшение порядка используемой модели упростило идентификацию и повысило вычислительную устойчивость и обусловленность задачи идентификации. Редукция, сжатие данных хроноамперограмм в образы, позволила принципиально реализовать контроль и количественную оценку указанных параметров НКА. При моделировании в устройстве применялись множественные линейная и полиномиальная регрессии на основании обработки трех координатных образов хроноамперограмм. Наибольшая точность оценки параметров получена при применении полиномиальной регрессии (средняя относительная погрешность для тестовой выборки не превысила 2,05 %). Линейная регрессия обеспечивает погрешность менее 3,77 %. Использование вместо

регрессий нейро-сетевых моделей [4, 5] упростило идентификацию с сохранением достигнутой точности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 15-08-08352).

Список литературы

1. Липкин М.С. Потенциостатический способ диагностики никель-кадмиевых аккумуляторов / В.И. Надтока, И.И. Надтока, В.П. Бреславец и др. // Изв. вузов. Электромеханика. – 2013. – № 1. – С. 148–150.
2. Патент РФ № 2011119085/28, 12.05.2011.
3. Седов А.В. Адаптивное моделирование при определении минимальной остаточной емкости аккумуляторов резервных источников тока / А.В. Седов, М.С. Липкин, С.М. Липкин, Д.А. Онышко // Изв. вузов. Электромеханика. – 2014. – № 3. – С. 60–62.
4. Седов А.В. Моделирование объектов с дискретно-распределенными параметрами. Декомпозиционный подход. – М.: Наука, 2010. – 438 с.
5. Седов А.В. Комбинированные нейросетевые модели диагностики состава низкотемпературных молибденосодержащих сплавов энергооборудования / Седов А.В., Липкин М.С., Липкин С.М., Онышко Д.А. // Изв. вузов. Электромеханика. – 2012. – № 2. – С. 95–96.
6. Lipkin M.S. Step-Voltage Testing of Ni-Cd Batteries [Электронный ресурс] / M.S. Lipkin, S.M. Lipkin, A.V. Sedov, D.A. Onyshko // ECS Meeting Abstracts – Cancun, Mexico, 2014. – A1 Poster Session. – Режим доступа: <http://ma.ecsdl.org/content/MA2014-02/1/45.abstract?sid=164b6120-d520-4a8e-8965-3fb4edf2f759>.

References

1. Lipkin M.S., Nadтока V.I., Nadтока I.I., Breslavets V.P. Izv. Vuzov. Elektromekhanika, 2013, no.1, pp. 148–150.
2. Patent RF, no. 2011119085/28, 2011.
3. Sedov A.V., Lipkin M.S., Lipkin S.M., Onyshko D.A. Izv. Vuzov. Elektromekhanika, 2014, no. 3, pp. 60–62.
4. Sedov A.V. Modelirovanie obktov s diskretno-rasprede-lennymi parametrami. Dekompozitsionnyy podkhod [Simulation of objects with discretely distributed parameters. The decomposition approach]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 438 p.
5. Sedov A.V., Lipkin M.S., Lipkin S.M., Onyshko D.A. Izv. Vuzov. Elektromekhanika, 2012, no. 2, pp. 95–96.
6. Lipkin M.S., Lipkin S.M., Sedov A.V., Onyshko D.A. ECS Meeting Abstracts. Cancun, Mexico, 2014, A1 Poster Session, available at: <http://ma.ecsdl.org/content/MA2014-02/1/45.abstract?sid=164b6120-d520-4a8e-8965-3fb4edf2f759>.