УДК 004: 621.317

МЕТОД РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ НИКЕЛЬ-КАДМИЕВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ

¹Горбатенко Н.И., ¹Онышко Д.А., ^{1,2}Седов А.В., ¹Гречихин В.В.

¹ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», Новочеркасск, e-mail: keil23@yandex.com, vgrech@mail.ru;

²ФГБУН «Южный научный центр» Российской академии наук, Ростов-на-Дону, e-mail: Sedov07@list.ru

При эксплуатации сложных технических систем, содержащих энергонезависимые объекты, важнейшими вопросами являются надежное обеспечение электрической энергией при соблюдении требований электробезопасности. Выполнение этих требований тесно связано с контролем состояния параметров аккумуляторов в составе энергосистем. Разработан метод решения обратной задачи диагностики параметров никель-кадмиевых аккумуляторов с использованием активного импульсно-релаксационного принципа. Метод основан на проведении натурно-модельного эксперимента, в ходе которого определяются внутреннее сопротивление испытуемого аккумулятора и его активационная емкость. Для его реализации построена адаптивная модель редукции измерений. Результаты экспериментальных исследований показали требуемую со стороны систем оперативного контроля точность определения параметров аккумуляторов, работающих в стартерном режиме при обеспечении больших токов в нагрузке. Перспективным направлением использования разработанного метода является его использование при комплектовании батарей.

Ключевые слова: системы контроля и управления, обратная задача, никель-кадмиевые аккумуляторы, натурно-модельный эксперимент, интеллектуальная обработка данных, редукция измерений, адаптивные математические модели

METHOD FOR SOLVING THE INVERSE PROBLEM DIAGNOSTIC PARAMETERS OF NICKEL-CADMIUM BATTERIES FOR OPERATIONAL CONTROL SYSTEMS

¹Gorbatenko N.I., ¹Onyshko D.A., ^{1,2}Sedov A.V., ¹Grechikhin V.V.

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov», Novocherkassk, e-mail: keil23@yandex.com, vgrech@mail.ru;

²Federal State Budgetary Institution of Science Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, e-mail: sedov07@list.ru

During operation of complex technical systems containing volatile items, the most important issues are the reliable supply of electric energy in compliance with electrical requirements. These requirements are closely connected with the control of the state of the battery parameters in the composition of energy systems. A method for solving the inverse problem of diagnostic parameters of nickel-cadmium batteries with the active principle of pulse-relaxation. The method is based on the full-scale-model experiment, in which the determined internal resistance of the battery under test and activation capacity. To implement adaptive model based measurement reduction. The experimental results showed the required by the operational control systems, the accuracy of determining the parameters of the battery, operating in starter mode, while ensuring high currents in the load. A promising area of use of this method is its use in the acquisition of batteries.

Keywords: monitoring and control systems, the inverse problem, nickel-cadmium batteries, natural-model experiment, intelligent data processing, reduction of measurement, adaptive mathematical models

Надежность работы сложных технических систем с модулями автономного питания в значительной степени зависит от текущего состояния и согласованности работы отдельных элементов батарей химических источников тока (ХИТ), обеспечивающих их бесперебойное функционирование. Благодаря эксплуатационным параметрам, таким как ресурс, нагрузочная способность, температурный диапазон и др., во многих подобных системах в качестве ХИТ используются батареи никель-кадмиевых аккумуляторов. Существующие способы использования аккумуляторных батарей требуют для повышения

надежности и срока службы осуществлять постоянный контроль основных электрических параметров аккумуляторов (АК).

При эксплуатации АК, наряду с остаточной емкостью $Q_{ост}$, большое значение имеют его сопротивление по переменному току, сопротивление по постоянному току и активационная емкость. Сопротивление по переменному току R определяет максимальный ток АК при подключении нагрузки. Сопротивление по постоянному току состоит из последовательно включенных сопротивлений по переменному току и активационного R_a и определяет максимальный

ток АК в установившемся режиме. Активационная емкость C_a определяет длительность переходного процесса в АК в динамических режимах работы. Указанные параметры со временем изменяются (ухудшаются) быстрее, чем номинальная емкость АК $Q_{\text{ном}}$. Зачастую именно они делают невозможным эксплуатацию АК при больших токах нагрузки.

Как правило, эти параметры нельзя определить выполнением прямых измерений. Для решения задачи целесообразно проведение натурно-модельного эксперимента, в результате которого выполняется анализ сигнала отклика АК на электрическое воздействие определенной формы. Определение параметров аккумуляторов по полученному сигналу отклика относится к классу обратных задач электротехники [1]. Разработан метод решения обратной задачи диагностики параметров никель-кадмиевых аккумуляторов (НКА) для систем оперативного контроля, включающий проведение натурно-модельного эксперимента с использованием потенциостатических испытаний, основанных на активном им-

пульсно-релаксационном принципе [3–5, 9]. Этот принцип заключается в исследовании реакции системы на потенциостатические воздействия. Как было показано в [3, 5] потенциостатическое воздействие является наиболее информативным по сравнению с другими существующими воздействиями, так как оно обеспечивает существенные изменения протекающего через аккумулятор анализируемого тока при незначительном изменении напряжения на зажимах АК. На рис. 1, а и б показаны графики напряжения и тока при потенциостатическом воздействии соответственно.

Для реализации метода решения обратной задачи диагностики указанных параметров предложена комплексная адаптивная модель редукции измерений (рис. 2), содержащая следующие части:

- модель понижения размерности графика тока отклика $I_{\text{акк}}$ для уменьшения пространства измеренных параметров путем исключения шумовых и неинформативных составляющих;
- регрессионную модель пониженной размерности для определения остаточной емкости АК $Q_{\text{ост}}$ по образам зависимостей откликов;

Рис. 1. Зависимости потенциостатического напряжения U_3 (а) и тока $I_{\text{акк}}$ (б):
 U_1 – буферное напряжение АК; U_2 – напряжение АК при первом потенциостатическом воздействии; t_1 – время начала первого потенциостатического воздействия;
 t_2 – время начала второго потенциостатического воздействия;
 $I_j^{\text{тек}}(t) = [I_{11}, I_{12}, \dots, I_{54}]$ – измеренные значения токов отклика $I_{\text{акк}}$

Рис. 2. Комплексная адаптивная модель редукции измерений и оценки параметров АК:
 $\{I_i(t), Q_j^*\}$ – обучающая выборка значений токов отклика $I_{акк}$ и известных значений остаточной емкости $Q_{ост}$; $Y_j^{тек}$ – образ графика зависимости тока отклика от времени;
 Y_i – образы графиков зависимостей токов откликов обучающей выборки;
 Q_j^* – расчетные значения остаточной емкости $Q_{ост}$

– модель контроля активационных параметров для нахождения взаимосвязи измеренных и внутренних (модельных) активационных параметров АК;

– модуль идентификации регрессионной модели, для параметрической идентификации выбранной регрессионной модели определения остаточной емкости $Q_{ост}$;

– модуль идентификации активационных параметров для параметрической идентификации модели активационных параметров;

– обучающая выборка или конечное множество сигналов эталонных токовых откликов $I_{акк}$ с известными параметрами АК (в частности, текущая емкость и активационные параметры).

Последние три части модели реализуются стандартными средствами регрессионного и компонентного анализов [7].

Модель понижения размерности графика отклика используется для уменьшения размерности пространства измеренных параметров путем исключения шумовых и неинформативных составляющих на основе декомпозиционных подходов [5, 7, 8].

Декомпозиция используется при моделировании сложных технических систем путем замены исходного объекта более простыми объектами, его составляющими, с заданной точностью. Эффективность декомпозиции ярко выражена в тех случаях, когда применение традиционных подходов к решению задачи представляет большую сложность [6, 7].

НКА является сложной динамической системой, которая обладает достаточно

большой размерностью входных измеренных и выходных контролируемых параметров. Качественно НКА представляется нелинейной системой, которая имеет неопределенности в описании математической модели. Поэтому при решении обратной задачи диагностики НКА возникает необходимость в преобразовании исходных измеренных данных и упрощении как исходной математической модели, так и первоначальной постановки задачи, используя декомпозиционный метод моделирования [5, 7] для выявления скрытых зависимостей.

С целью получения исходной выборки строится матрица разброса графиков, и определяются ее собственные векторы. Такое преобразование позволяет трансформировать графики с большим числом отсчетов в малоразмерный образ с минимальной потерей информативности. Модель понижения размерности, построенная на данном принципе, обеспечивает существенное уменьшение пространства моделирования, а следовательно, повышает вычислительную устойчивость регрессионной модели и процесса идентификации.

При построении регрессионной модели пониженной размерности в устройстве контроля используются полученные образы графиков откликов.

Для разработки модели контроля активационных параметров выполнялись исследования существующих моделей АК. Выделены два типа моделей: моделирующие «быстрые» переходные процессы в АК

(с учетом активационных параметров) и моделирующие «медленные» процессы, связанные с основной токообразующей цепью. Следовательно, для эффективной оценки параметров АК необходимо построить комбинированную модель, учитывающую особенности моделей.

В качестве модели «быстрых» переходных процессов использовалась уточненная для потенциостатических испытаний модель проф. К.В. Безручко [2], обобщенно представляемая схемой замещения АК (рис. 3).

Рис. 3. Схема замещения аккумулятора:
 E – идеальный источник постоянной ЭДС; R – сопротивление электролита в межэлектродном пространстве;
 R_a , C_a – элементы активационного блока;
 C_1 – главный конденсатор, соответствующий основной токообразующей электрохимической реакции

Параметры АК в процессе заряда и разряда изменяются, однако при каждом потенциостатическом воздействии U_n их можно считать неизменными. Напряжение на основной токообразующей емкости изменяется гораздо медленнее, чем на активационной емкости, поэтому можно записать

$$I = \frac{U_n - U_{C_a}}{R}.$$

Дифференциальное уравнение для нахождения U_{C_a} имеет вид

$$\frac{dU_{C_a}}{dt} = -aU_{C_a} + b, \quad (1)$$

где

$$a = \frac{R + R_a}{C_a R R_a}; \quad b = \frac{U_n}{R C_a}.$$

Разрешая уравнение (1) относительно $U_{C_a}(t)$ при выполнении условия $U_{C_a}(0) = d$, получим

$$U_{C_a}(t) = \frac{e^{-at}(b(e^{at} - 1) + ad)}{a}. \quad (2)$$

Потенциостатические включения вызывают переходные процессы, обусловленные активационными явлениями в аккумуляторе. По истечении некоторого времени влия-

ние переходного активационного процесса ослабевает, и основным процессом становится обусловленный разрядом емкости C_1 процесс, зависящий от остаточной емкости аккумулятора.

Используя выражение (2), по экспериментальным измерениям тока отклика определяются значения параметров элементов R , R_a и C_a схемы замещения. Для этого достаточно реализации только одного включения. Чтобы учесть нелинейный характер, измерение осуществляется для каждой из ступеней потенциостатического воздействия. Ток в цепи АК при первом потенциостатическом включении после несложных преобразований (2) вычисляется по формуле

$$I = \frac{U_n}{R} \left(\frac{R}{R + R_a} + \frac{R_a}{R + R_a} \exp \left(-\frac{R + R_a}{C_a R R_a} t \right) \right).$$

Сопротивление по переменному току определяется при $t = 0$, а активационные параметры находятся из системы нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} I_{1k}(R_{ak}, C_{ak}, t_{1k}) = I(t_{1k}) \\ I_{2k}(R_{ak}, C_{ak}, t_{2k}) = I(t_{2k}) \end{cases}, \quad k = \overline{1, N}.$$

В правой части подставляются значения тока, полученные предложенным методом диагностики. В системе уравнений N – число потенциостатических воздействий.

Разработанный метод решения обратной задачи диагностики НКА экспериментально проверялся при испытаниях АК различных типов и номиналов (KR-600-AAJ, GP-600, KR-1000-AAJ, GP-1000, KR-2000-SC, KR-3000-C, KR-5000-D).

Испытания АК проводились при следующих условиях: $U_n = 0,01$ В; значения токов измерялись через 0, 3, 6 и 10 с. после потенциостатического включения. Искомые значения параметров АК определялись для остаточных емкостей АК, равных 100, 95, 90, 85, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 15, 10 и 5 процентов от полной емкости. Результаты определения C_a и R_a для АК KR-1000-AAJ приведены на рис. 4 и 5.

Анализ полученных результатов показал, что постоянная времени $R_a C_a$ практически не зависит ни от типа АК и его номинала, ни от остаточной емкости и находится в пределах от 4 до 8 с. Параметры АК изменяются в зависимости от его остаточной емкости. Наилучшие (наименьшие) значения R и R_a имеют место в средней части рабочего диапазона остаточной емкости. В этом же диапазоне обеспечиваются наилучшие (наибольшие) значения C_a .

Рис. 4. Результаты определения активационной емкости C_a

Рис. 5. Результаты определения активационного сопротивления R_a

Выводы

Анализ методов измерения параметров НКА показал, что определение сопротивления по переменному току, сопротивления по постоянному току и активационной емкости в результате прямых измерений невозможно. Разработан метод решения обратной задачи диагностики параметров никель-кадмиевых аккумуляторов, позволяющий решить эту проблему. Метод основан на проведении натурно-модельного эксперимента. Для его реализации построена адаптивная модель редукции измерений. Исследования показали, что зависимости активационных параметров от емкости АК имеют неустойчивый и изменяющийся характер. Предложенная модель дает более точную оценку этих параметров. Погрешность оценки в большей степени зависит от точности измерения потенциостатического тока, и, как показал анализ чувствительности для оценки R_a и C_a с относительной погрешностью не более 7%, ток должен измеряться с погрешностью менее 2%. Применение метода решения обратной задачи диагностики параметров НКА для систем оперативного контроля позволяет эффективно определять активационные параметры НКА, имеющие важное значение для исследования переходных режимов, а также для использования при комплектовании батарей.

Результаты работы получены при поддержке проекта № 1.2690.2014/К «Методы решения обратных задач диагностики сложных систем (в технике и медицине) на основе натурно-модельного эксперимента», выполняемого в рамках проектной

части государственного задания и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 15-08-08352).

Список литературы

- Бахвалов Ю.А. Обратные задачи электротехники / Ю.А. Бахвалов, Н.И. Горбатенко, В.В. Гречихин. – Новочеркасск: Изд. жур. «Известия вузов. Электромеханика», 2014. – 211 с.
- Безручко К.В. Использование схем замещения для математического моделирования разрядных характеристик никель-кадмиевых аккумуляторов / К.В. Безручко, А.О. Давидов, С.В. Синченко, С.В. Ширинский и др. // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2012. – № 23. – С. 17–28.
- Дворядкин В.В. Потенциостатический способ диагностики никель-кадмиевых аккумуляторов / В.В. Дворядкин, М.С. Липкин, В.И. Надтока и др. // Изв. вузов. Электромеханика. – 2013. – № 1. – С. 148–150.
- Пат. 2461014 Российская Федерация, МПК G01R 31/36. Потенциостатический способ выявления аккумуляторов с пониженной емкостью в батарее никель-кадмиевых аккумуляторов / В.И. Надтока, И.И. Надтока, В.П. Бреславец и др.; заявитель и патентообладатель ООО НПП «ВНИКО». – № 2011119085/28; заявл. 12.05.11; опубл. 10.09.12, Бюл. № 25. – 4 с.
- Седов А.В. Физико-математические принципы построения средств интеллектуального контроля автономных аккумуляторных источников питания / А.В. Седов, Д.А. Онышко, М.С. Липкин // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12–6. – С. 1134–1138.
- 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.
- Седов А.В. Моделирование объектов с дискретно-распределенными параметрами. Декомпозиционный подход. – М.: Наука, 2010. – 438 с.
- Седов А.В., Липкин М.С., Липкин С.М., Онышко Д.А. Комбинированные нейросетевые модели диагностики состава низколегированных молибденсодержащих сплавов энергооборудования // Изв. вузов. Электромеханика. – 2012. – № 2. – С. 95–96.
- 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_abstractsid?sid=164b6120-d520-4a8e-8965-3fb4edf2f759.