

УДК 621.3117.799

© С. Э. Мочалов, А. В. Антипин, В. С. Колосницын

## МНОГОКАНАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ТЕСТИРОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК

Описано 16-канальное устройство, предназначенное для измерения зарядно-разрядных характеристик вторичных химических источников тока и электрохимических ячеек в гальваностатическом и потенциостатическом режимах для двух- и трехэлектродной схем включения по независимым для каждого канала программам. В устройстве реализованы два рабочих диапазона тока:  $\pm 5$  и  $\pm 100$  мА при максимальном напряжении поляризации  $\pm 10$  В. Точность регулирования составляет 0.1 %. Предложенное программно-аппаратное решение позволяет управлять прибором и получать результаты измерений удаленно по Ethernet.

*Кл. сл.:* программно-аппаратное устройство, удаленное управление экспериментом, тестирование электрохимических ячеек

### ВВЕДЕНИЕ

Измерение зарядно-разрядных характеристик вторичных химических источников тока (ХИТ) и электрохимических ячеек в различных режимах поляризации является одним из основных экспериментальных методов их исследования. Отличительной особенностью таких экспериментов является их большая длительность. При измерениях в часовых режимах заряда и разряда для ХИТ, способных обеспечить сотни и тысячи циклов заряда-разряда, требуются времена наблюдений порядка недель и месяцев. Измерения в более мягких режимах поляризации приводят к пропорциональному увеличению времени эксперимента. Так как для получения надежных данных обычно параллельно исследуются несколько идентичных образцов, единственным способом экономии времени является проведение экспериментов с использованием многоканальных устройств, получивших название "Battery Testing Systems". Такие системы выпускаются серийно [1, 2, 3]. Однако эти устройства зачастую не устраивают разработчиков новых электрохимических систем. Так, некоторые устройства предназначены для исследования только двухэлектродных ячеек или готовых аккумуляторов. Для решения таких задач требования многодиапазонности, биполярности и возможности работы по трехэлектродной схеме излишни и не реализованы. Программное обеспечение эксперимента зачастую выполнено для работы под управлением операционной системы, вызывающей сомнения в долговременной стабильной работе устройств. В некоторых случаях невозможно изменить программу эксперимента во время ее испол-

нения без обязательной остановки. Поэтому многие исследователи используют приборы собственной разработки [4, 5, 6].

На основании опыта многолетней работы в области электрохимической энергетики мы считаем, что исследовательская установка должна обладать следующими свойствами:

- иметь широкий диапазон регулирования и регистрации поляризующего тока;
- работать в гальвано- и потенциостатическом режимах по двух- и трехэлектродной схемам;
- полярирующая цепь должна быть биполярной для обеспечения возможности исследования отдельных электродов при малой катодной и анодной поляризации;
- обеспечивать непрерывную работу в течение нескольких месяцев или даже лет;
- обеспечивать удаленный доступ для получения измеренных данных или управления экспериментом в любое удобное время и из любого места;
- обеспечивать гальваническое отключение образца при аварийной остановке;
- обладать приемлемой стоимостью.

В настоящей работе описываются конструкция и опыт эксплуатации разработанного нами прибора, удовлетворяющего перечисленным требованиям.

### УСТРОЙСТВО ПРИБОРА

Блок-схема прибора приведена на рис. 1. Основу устройства составляют 16 (по количеству рабочих каналов) плат потенциостатов-гальваностатов. Регулирующее звено потенциостата реализовано

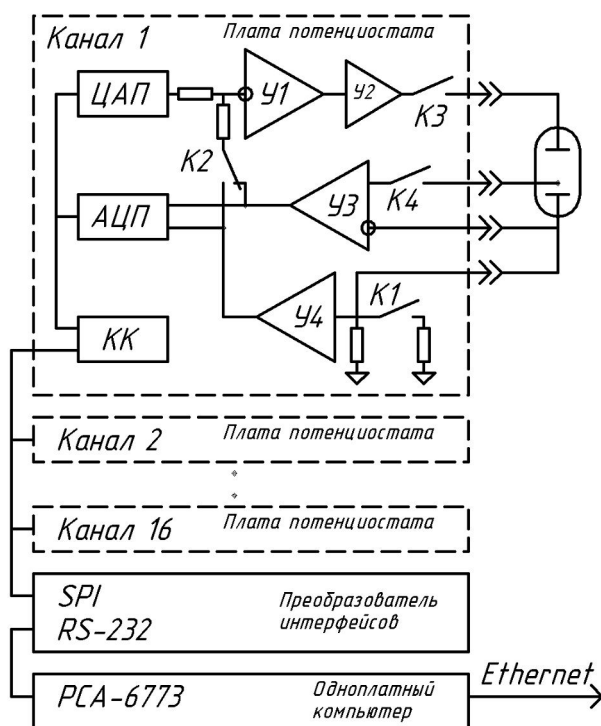


Рис. 1. Блок-схема прибора

на У1 (OP07C) с буферным повторителем У2 (BUF634T, Burr-Brown) по классической схеме с заземленным токоизмерительным резистором. Реализованы два токовых диапазона  $\pm 5$  и  $\pm 100$  мА, выбираемые ключом К1. В качестве датчика уровня поляризации использован 16-разрядный ЦАП (AD420, Analog Devices); потенциал и ток измеряются 24-разрядным АЦП (AD7714, Analog Devices). Измерения зарядно-разрядных характеристик можно проводить в потенциостатическом и гальваностатическом режимах по двух- и трехэлектродной схеме подключения. Переключение режимов осуществляется ключом К2. На инструментальном У3 (AD620) и повторителе У4 (OP07C) реализованы формирователи сигналов потенциала и тока соответственно. При аварии питающей сети объекты измерений гальванически отключаются нормально-разомкнутыми контактами ключей К3 и К4. Все ключи — миниатюрные реле с герметичными контактами (Meder). Управление ЦАП, АЦП, коммутирующими ключами, а также дешифрацию адреса платы потенциостата осуществляет контроллер канала КК (ATtiny2313, Atmel).

Платы потенциостатов измерительных каналов объединены шиной приборного интерфейса SPI. Для согласования SPI с последовательным портом управляющего компьютера используется преобразователь

интерфейсов RS-232/SPI, размещенный на отдельной плате.

Управляет экспериментом одноплатный компьютер РСА-6773 (Advantech) с процессором Intel ULV Celeron 400/650 Fanless.

Устройство смонтировано в стандартном 17-дюймовом корпусе IPC-623 (Advantech), имеющем 20 слотов для устанавливаемых плат, систему вентиляции, блок питания и систему контроля уровня питания, температуры в корпусе и исправности вентиляторов.

## УДАЛЕННЫЙ ДОСТУП

Управление приборами осуществляется удаленно с внешних (клиентских) компьютеров. Доступ к устройству для управления экспериментом и обмена данными реализован через сетевой интерфейс управляющего компьютера РСА-6773 (Ethernet) в соответствии с назначенным ему статическим IP-адресом. Использование Ethernet, кроме того, позволяет удаленно осуществлять сервисное обслуживание прибора, обновление его программного обеспечения, управление дополнительным оборудованием, например ПИД-регуляторами термостатов (CNI16D43-EI, Omega).

Прием управляющих команд от клиентского компьютера и передача текущих данных осуществляется по TCP/IP протоколу. Для обеспечения безопасности доступа каждому прибору присваиваются логин и пароль.

Файлы с результатами измерений и программы эксперимента хранятся на локальном жестком диске устройства, доступ к данным реализован по стандартному FTP-протоколу. В целях сетевой безопасности доступ по FTP также ограничивается паролем.

Учитывая доступность интерфейса Ethernet для внешнего подключения, возможны различные варианты сетевой конфигурации оборудования:

### Вариант 1

Каждому прибору присваивается *публичный* статический IP-адрес в глобальной сети. В этом случае прибор доступен для управления с любого компьютера, имеющего выход в Интернет. Т. е. любой удаленный ПК может являться клиентским по отношению ко всем приборам, имеющим публичные сетевые адреса.

### Вариант 2

Приборы и клиентские ПК находятся в одной подсети с назначенными *приватными* статическими IP-адресами (приватные адреса назначаются самим потребителем из диапазонов адресов 10.0.0.0–10.25.255.255, 172.16.0.0–172.31.255.255,

192.168.0.0–192.168.255.255). При такой конфигурации скорость обмена данными выше, однако прямой доступ к приборам извне локальной сети невозможен. В этом случае можно осуществить доступ по Интернету к клиентскому ПК с помощью программ удаленного терминального доступа, например VNC, LogMein [7, 8] или посредством VPN [9].

Описанные конфигурации не исчерпывают многообразия возможных вариантов подключения.

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕРВЕРА

Программное обеспечение управления экспериментом реализовано на основе архитектуры клиент—сервер.

Серверная часть работает на одноплатном управляющем компьютере прибора под управлением Unix-подобной операционной системы NetBSD [10], которая предоставляет достаточно надежные сетевые службы и эффективное управление памятью, имеет низкие затраты на системное взаимодействие. Unix-подобные системы устойчивы и широко представлены в списке Web-серверов с наибольшим временем непрерывной работы (согласно исследованию компании Netcraft [11]).

Целевое программное обеспечение сервера составляют две программы фонового режима (daemon) — **Spihostd** и **Scyclerd**. **Spihostd** мультиплексирует обращения к SPI-шине в поток данных для последовательного порта RS-232, обеспечивая удобство отладки и гибкость системы. Данная программа при исполнении образует единичный процесс, мультиплексирование осуществляется очередью UDP-пакетов с запросами на операцию с шиной.

Непосредственно ходом эксперимента и обменом данными управляет программа **Scyclerd**. Для работы с узлами прибора программа **Scyclerd** обменивается данными с **Spihostd** по предопределенному UDP-порту. Основной процесс программы представляет собой 17 основных потоков (threads). Один из потоков контролирует внешние соединения, остальные обслуживают непосредственно платы потенциостатов каналов. При присоединении каждого клиента порождаются два дополнительных потока процесса — первый обрабатывает полученные входящие команды, второй собирает и отправляет сообщения с "рабочих" каналов.

Взаимодействие сервера с клиентом происходит путем обмена текстовыми сообщениями. Сервер принимает от клиента для исполнения строки вида

**команда** [список аргументов],

например:

**LOAD** [номер\_канала, имя\_файла] — загрузка программы измерений из указанного файла для исполнения в указанном канале;

**FULL** [номер\_канала] — запрос на выдачу текущего состояния канала.

После выполнения команды сервер передает клиенту строки с результатами ее выполнения и служебные флаги состояния канала. Формат ответа определяется типом исполненной команды.

## КЛИЕНТСКОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

В состав клиентской части пакета программ (т. е. пакета программ, размещаемого на клиентском ПК) входят следующие приложения:

- основная управляющая программа;
- утилита для быстрого просмотра измеренных данных в графической форме;
- программа, предназначенная для численной и графической обработки экспериментальных данных и экспорта фрагментов данных во внешние приложения: MS Excel, MS Word и т. д.

Вид основного окна работающего приложения показан на рис. 2. Окно содержит таблицу для отображения текущего состояния в каждом канале и элементы управления, позволяющие начать измерения, остановить их, принудительно перейти на следующий шаг цикла. Кроме того, можно запустить утилиту просмотра результатов измерений в графическом виде (**View**) или программу численной и графической обработки результатов (**Calc**).

При нажатии кнопки **Setup** в строке соответствующего канала открывается окно программирования цикла измерений (передний план рис. 2). Цикл измерений состоит из последовательности шагов. Для каждого шага цикла измерений задаются режим и амплитуда поляризации, условия записи измерений и перехода на следующий шаг. Доступны для выбора режимы гальваностатического и потенциостатического заряда и разряда и режим "отдыха" **idle**. В этом режиме гальванически размыкается цепь поляризации образца и через ячейку протекает только ток цепи измерения потенциала, около  $10^{-9}$  А.

Для удобства программирования однотипных экспериментов предусмотрено копирование программ из одного канала в другой. Параметры программы доступны для изменения во время эксперимента.

Программа обработки данных позволяет графически обрабатывать как произвольные наборы отдельных циклов (задний план рис. 3), так и эксперимент в целом, т. е. осуществлять групповую

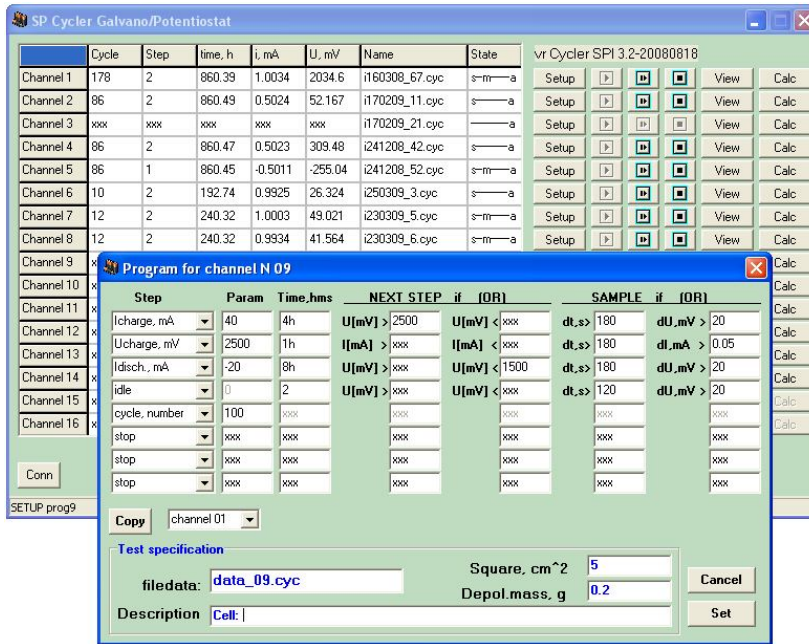


Рис. 2. Рабочее окно клиентской программы и окно программирования цикла измерений

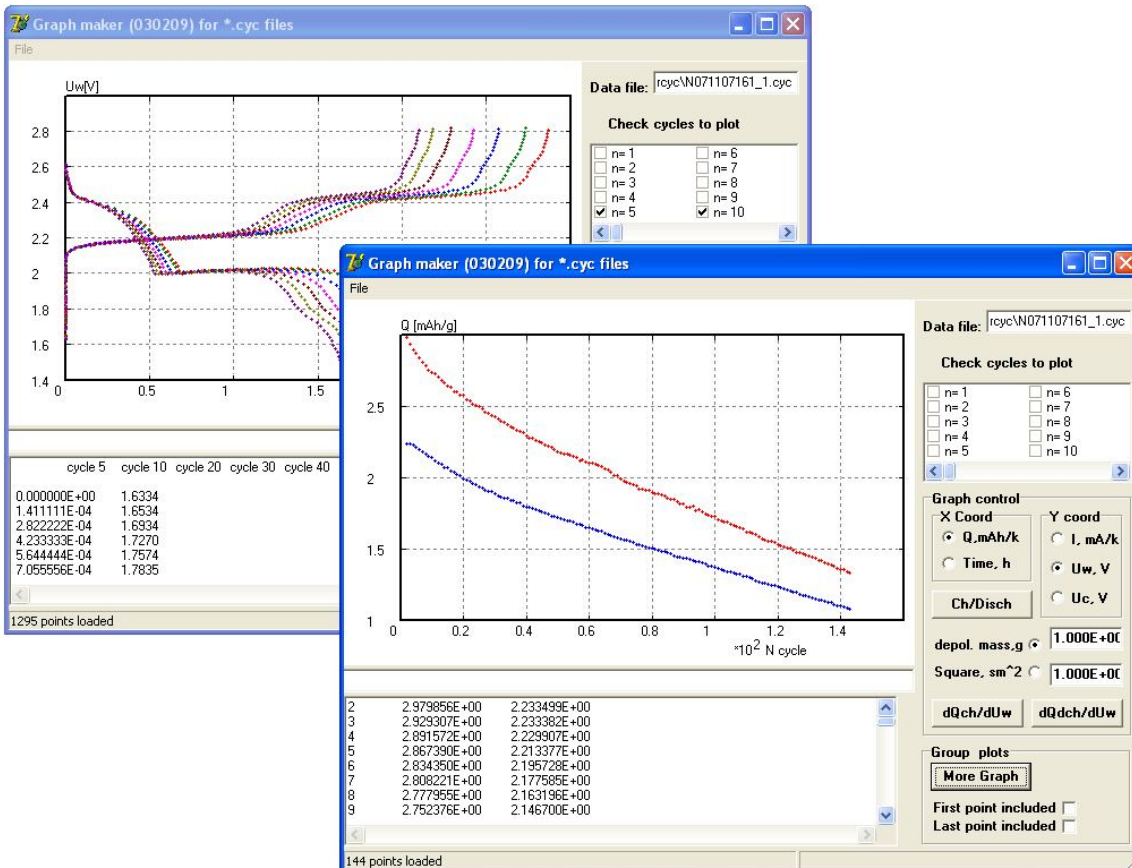


Рис. 3. Окна программы обработки данных

обработку. Например, на переднем плане рис. 3 представлены рассчитанные зависимости зарядной и разрядной емкостей литий-серной ячейки для 144 циклов заряда-разряда. Обработанные данные могут быть экспортированы во внешние приложения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в работе прибор тиражирован в количестве 6 экземпляров. Устройства показали надежную работу за двухлетний период эксплуатации в России и за рубежом, обеспечивая удобное управление и доступ к экспериментальным данным независимо от места нахождения экспериментатора.

Работа выполнена при поддержке компании "Oxis Energy Ltd", Culham Science Centre, Abingdon Oxfordshire OX 14 3DB, UK.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. URL: (<http://www.bitrode.com/products/access/battaccess.htm>).
2. URL: (<http://www.maccor.com/>).
3. URL: (<http://www.neware.com.cn/>).
4. Бубнов Ю.И., Матвеев К.А. Модульное устройство для испытаний трехэлектродных электрохимических ячеек // Сборник материалов IX Международной конференции "Фундаментальные проблемы преобразования энергии в

литиевых электрохимических системах". Уфа: Реактив, 2006. С. 314.

5. Стрилецкий Ю.И., Гасюк И.М., Угорчук В.В. Вариант разработки автоматизированной многоканальной установки циклирования электрохимических ячеек // Сборник материалов IX Международной конференции "Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах". Уфа: Реактив, 2006. С. 315.
6. Чернухин С.И., Мартынюк В.В., Третьяков Д.О., Войтюк О.П., Страшко Г.В. Многофункциональный автоматический стенд для исследования электродных материалов и образцов ХИТ // Сборник материалов IX Международной конференции "Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах". Уфа: Реактив, 2006. С. 316.
7. URL: (<http://www.realvnc.com/>).
8. URL: (<https://secure.logmein.com/>).
9. URL: (<http://lug-wiki.nnov.ru/index.php/Openvpn>).
10. URL: (<http://www.netbsd.org/>).
11. URL: (<http://uptime.netcraft.com/up/today/top.avg.html>).

*Институт органической химии Уфимского научного центра РАН, г. Уфа*

Материал поступил в редакцию 21.04.2009.

## MULTICHANNEL TEST SYSTEM FOR SECONDARY CHEMICAL CURRENT SOURCES AND ELECTROCHEMICAL CELLS

S. E. Mochalov, A. V. Antipin, V. S. Kolosnitsyn

*Institute of Organic Chemistry of Ufa Scientific Center of RAS, Ufa*

The 16-channel charge-discharge testing system for secondary chemical current sources and cells is described. Each channel works at constant current or constant voltage modes. The cell can be connected by two- or three-electrode scheme. Channels are completely independent. The system provides  $\pm 5$  mA and  $\pm 100$  mA current output ranges at  $\pm 10$  V voltage range. Current and voltage set accuracy is 0.1 %. The system is remotely controlled via Ethernet.

*Keywords:* firmware equipment, remote experiment control, battery testing systems