ЭЛЕКТРОНИКА
И РАДИОТЕХНИКА

УДК 54.084

ВЫСОКОТОЧНЫЙ МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИОСТАТ-ГАЛЬВАНОСТАТ С ШЕСТИЭЛЕКТРОДНОЙ СХЕМОЙ ПОДКЛЮЧЕНИЯ

©2027 г. Е. А. Астафьев[a],*, Е. Ю. Евщик[a]

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук

Россия, 142432, Черноголовка Московской обл., просп. Академика Семенова, 1

Поступила в редакцию 15.09.2026

После доработки 01.10.2026

Принята к публикации 06.10.2026

**E-mail: tdsipch@list.ru*

Разработан, изготовлен и испытан первый российский многоканальный потенциостат-гальваностат RS-25-4 с шестиэлектродной схемой подключения для синхронного раздельного исследования катода, анода и всего аккумулятора в одном эксперименте. Прибор имеет четыре независимых канала, в каждом из которых расположен 24-разрядный аналого-цифрового преобразователя, обеспечивающий измерение импеданса до 50 кГц в шестиэлектродном режиме при амплитуде от 0.25 мВ, и 20-разрядный цифро-аналогового преобразователя с дискретностью 10 мкВ. Для четырехэлектродного режима предусмотрен модуль частотного анализатора до 1.5 МГц. Имеется цифро-аналоговый интерфейс для внешних датчиков. Апробация на литий-ионном аккумуляторе емкостью 90 мА·ч подтвердила высокое качество раздельных годографов импеданса для каждого электрода на всех стадиях формировочного цикла.

Ключевые слова: потенциостат-гальваностат, шестиэлектродная схема, электрохимический импеданс, литий-ионные аккумуляторы

Одним из важнейших направлений в электрохимической энергетике сегодня является развитие портативных источников энергии. Наибольшее распространение получили литий-ионные аккумуляторы. Научные исследования, проводимые в лабораториях при разработке материалов электродов и электролита для них, требуют применения довольно специфических техник и экспериментальных подходов. Например, при изучении процессов интеркаляции и деинтеркаляции ионов лития работы ведутся с использованием электрохимических ячеек с

электродами сравнения, чтобы можно было детально исследовать процессы, идущие только на одном из электродов – катоде или аноде (с исключением влияния второго электрода). Для решения этой задачи используют традиционные потенциостаты с четырехпроводной схемой подключения [1]. Существенным неудобством является то, что для одновременного изучения процессов на катоде и аноде необходимо выполнить два раздельных последовательных эксперимента с ручным переключением кабелей прибора. Но сделать это весьма затруднительно, так как подобные измерения проводятся в режиме циклического заряда-разряда и могут занимать несколько недель и более [2]. Поэтому они выполняются только в автоматическом режиме, при котором исследователь запускает работу в начале циклирования и останавливает ее в конце для обработки полученных данных. Если же проводить измерения сразу на всем аккумуляторе без электрода сравнения, то потом оказывается невозможным разделить данные катода и анода.

Решением является применение более современного оборудования – потенциостата с шестиэлектродной схемой подключения. Традиционный потенциостат имеет два канала обработки данных – один для тока, а второй для потенциала. Это позволяет регистрировать только одну разность потенциалов в электрохимической ячейке, т.е. либо на всем аккумуляторе (и регистрируется суперпозиция данных для катода и анода), либо между электродом сравнения и одним из электродов аккумулятора (для регистрации данных только на этом электроде). Потенциостат с шестиэлектродной схемой подключения имеет еще два канала для измерения разности потенциалов. Его можно подключить к исследуемому макету аккумулятора как обычный потенциостат, чтобы задавать его рабочие режимы, а два дополнительных канала измерения потенциалов подключить между электродом сравнения и каждым из электродов аккумулятора. Таким образом прибор будет регистрировать синхронно в одном эксперименте данные по каждому из электродов и всему аккумулятору. Три таких набора результатов будут строго разделены с базовой точностью прибора на этапе эксперимента.

Нами был спроектирован, собран и испытан первый российский многоканальный потенциостат-гальваностат с шестиэлектродной схемой подключения RS-25-4. Этот прибор имеет четыре независимых идентичных канала для одновременной работы с несколькими образцами, что существенно ускоряет исследования. Максимальный рабочий ток каждого канала составляет 2 А, что позволяет проводить измерения с макетами аккумуляторов дискового и пакетного типов. Прибор имеет 10 диапазонов тока на канал, что обеспечивает минимальный рабочий ток 50 пА в нижнем диапазоне тока с пределом 2 нА. Максимальное поляризующее напряжение составляет 15 В. В каждом канале имеются по два диапазона

потенциала с пределами ±5 В и ±12 В. Нижний диапазон (с пределом ±5 В) служит для работы с единичными ячейками, а верхний (с пределом ±12 В) – для измерений параметров батарей или для испытаний окна электрохимической стабильности электролитов в широком диапазоне потенциалов.

В основе каждого канала прибора лежит индивидуальная современная быстродействующая система сбора данных на двух микроконтроллерах. Основной микроконтроллер управляет работой четырехканального прецизионного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) разрядностью 24 бит. Его быстродействие составляет 250 кГц, что позволяет уверенно измерять электрохимический импеданс на частотах до 50 кГц в шестиэлектродном режиме. При соблюдении условий стационарности точность системы сбора данных позволяет измерять спектры электрохимического импеданса на амплитудах от 0.25 мВ. Второй микроконтроллер управляет работой прецизионного цифро-аналогово преобразователя (ЦАП) разрядностью 20 бит, используемого в качестве источника постоянного или импульсного потенциала или тока. Этот ЦАП обеспечивает дискретность потенциала 10 мкВ в диапазоне потенциала с пределом ±5 В. Это необходимо для обеспечения ультралинейной развертки потенциала при использовании метода циклической вольтамперометрии. По сравнению с альтернативным аналоговым генератором прецизионный цифровой синтезатор позволяет работать не только при высоких, но и при низких (менее 10 мВ/с) скоростях развертки потенциала при использовании этого метода [3].

Для расширения частотного диапазона в стандартном четырехэлектродном режиме работы предусмотрен модуль частотного анализатора, позволяющий выполнять измерения электрохимического импеданса на частотах до 1.5 МГц. В шестиэлектродном режиме работы можно проводить измерения на постоянном токе, например, для осуществления циклического заряда-разряда аккумулятора. Также можно использовать методы с линейной разверткой потенциала для снятия раздельных поляризационных кривых катода и анода. Помимо этого, можно проводить измерения по методу электрохимического импеданса, регистрируя раздельные спектры для катода, анода и всего аккумулятора. Это позволит выполнить точный анализ спектров и выделить из них целевые характеристики электродных материалов, например коэффициенты диффузии, кинетические параметры, а также изучить строение твердоэлектролитных интерфейсных пленок раздельно для катода и анода в одном полностью автоматизированном эксперименте.

Прибор имеет в каждом канале цифро-аналоговый интерфейс для подключения дополнительного внешнего оборудования. Например, можно использовать гальванически развязанный датчик температуры на термопаре. Также можно подключить ЦАП для

автоматизации управления внешними приборами или для создания в электрохимической ячейке дополнительной разности потенциалов. Помимо этого, сигналы АЦП, используемые для дополнительных двух входов шестиэлектродной схемы, можно переключить на этот интерфейс для оцифровки внешних сигналов синхронно с током и потенциалом.

На рис. 1 приведены примеры годографов импеданса для трехэлектродного макета литий-ионного аккумулятора. Измерения выполнены для разных степеней заряженности в ходе проведения первого формировочного цикла аккумулятора. Видно, что для всех четырех стадий заряда получились годографы высокого качества. При этом ни для одного из наборов (анод, катод, суммарный) невозможно было бы выделить вклад в суммарный спектр каждого из электродов, если бы не было проведено измерение с использованием возможностей шистиэлектродного потенциостата.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ФИЦ ПХФ и МХ РАН (номер государственной регистрации 124013000692-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Астафьев Е.А.* ПТЭ. 2018. № 2. С. 156. https://doi.org/10.7868/S0032816218020118
2. *Astafev E.* Measurement. 2020. V. 154. P. 107492. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107492
3. *Astafev E.* Measurement. 2026. V. 289. P. 122685. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2026.122685

ПОДПИСЬ К РИСУНКУ

Рис. 1. Годографы импеданса для макета Li-Fe-литий-ионного аккумулятора емкостью 90 мА·ч, диапазон частот 50 кГц–0.03 Гц, амплитуда 5 мВ. Показаны разные степени заряженности на формировочном цикле: **а** – 9%, **б** – 6%, **в** – 3%, **г** – 0%. Годографы приведены для всего аккумулятора (*1*), катода (*2*) и анода (*3*)

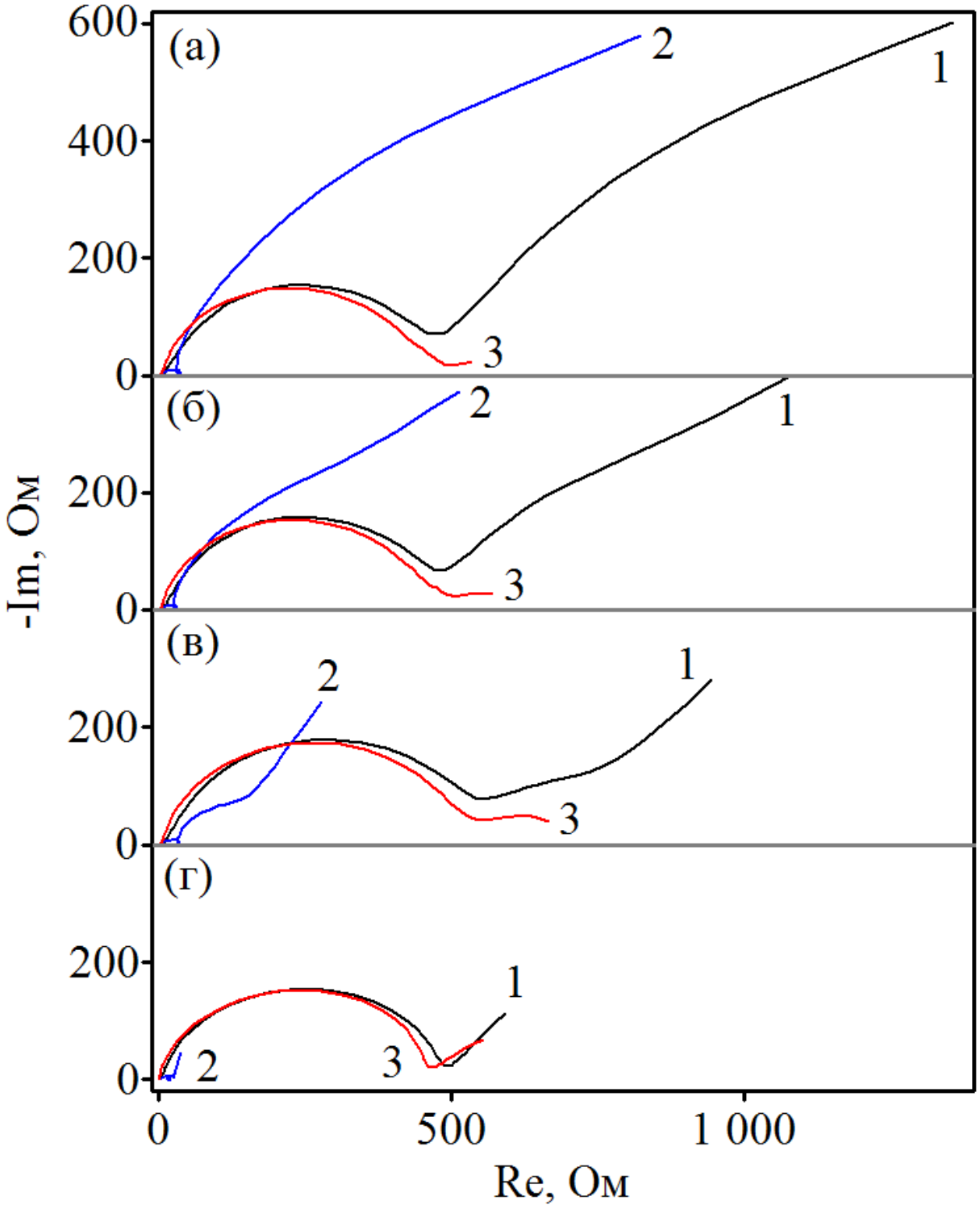


Рис. 1.