Пример использования ANS20-EIS experimental Features 1

Некоторые практические особенности измерения электрохимического импеданса, версия 1

2026

www.smartstat.ru

Уважаемый Коллега! Этот пример использования является дополнением к основному руководству по эксплуатации потенциостатов SmartStat.

- Он написан по материалам пленарного доклада, который был сделан компанией SmartStat на XIX международной конференции «Актуальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах». Конференция проходила в г. Петергоф, Санкт-Петербург, Россия, с 14 по 19 сентября 2026 года.
- Включены также дополнительные материалы с приглашенного доклада на «18-й Конференции с международным участием: Фундаментальные и прикладные проблемы ионики твердого тела (ФПИТТ-2026, Черноголовка, Россия)».
- А также с пленарного доклада на XVIII Плесской Международной научной конференции «Современные проблемы теоретической и прикладной электрохимии» (7-11 сентября 2026, Плес, Россия).

Настоящий пример использования рассматривает некоторые особенности измерения электрохимического импеданса литий и металл-ионных аккумуляторов. Многие рассмотренные особенности могут быть распространены на другие электрохимические системы.

Из не включенных особенностей, в очередной раз хотелось бы обратить пристальное внимание на необходимость в экранировании электрохимических ячеек с электродами сравнения для улучшения качества (точнее, приведения их в нормальное состояние без наводок) регистрируемых спектров импеданса и ВА-кривых. Этот вопрос поднимался на всех трех конференциях после доклада. Подробности приведены в примере использования SmartStat ANS12-Hardware Setup and Shielding, а также в ANS11-Noise and Interferences.

Этот и другие примеры использования можно скачать на сайте www.smartstat.ru в разделе загрузок вместе с другими примерами использования и документацией SmartStat.

Содержание

1. **Циклер или потенциостат?** **2**
2. **Основы метода ЭХ импеданса** **4**
3. **Шестиэлектродные потенциостаты** **7**
4. **Электроды сравнения** **10**
5. **Индуктивные особенности на высоких частотах** **14**
6. **Валидация эксперимента** **17**
7. **Метод малосигнальной ЦВА для измерения спектров импеданса** **18**
8. **Дополнение: работа циклера с трехэлектродными ячейками** **20**

1. Циклер или потенциостат?

Часто циклерами (это не совсем официальное, но установившееся название) называют многоканальные потенциостаты просто из-за их предполагаемого назначения - постояннотоковый циклический заряд-разряд аккумулятора. На самом деле между двумя этими классами приборов есть довольно большая разница. Циклер это узкоспециализированный прибор, работающий только в одной полярности напряжений или потенциалов. Он не может решать классические электрохимические задачи в отличие от потенциостата. Также он обладает в принципе более грубыми токовыми характеристиками вследствие более высоких рабочих токов. У них уже частотный диапазон измерения ЭХ импеданса. Индустриальная серия SmartStat состоит в основном из продвинутых циклеров (с возможностью измерения ЭХ импеданса), а также в ней есть и две модели потенциостатов.

Рис. 1. Потенциостат CS-12-8 и циклер CS-40-8 индустриальной серии SmartStat.

Таблица 1. Различия между потенциостатами и циклерами.

Потенциостат	Циклер
Работа в обеих полярностях напряжений ±5В, ±6В, ±12В или другие	Работа только в положительной полярности от +1 до +4.5В (нет нуля при максимальном токе)
Поляризующее напряжение ±11В, ±15В	Поляризующее напряжение от 0 до 5В
Широкий интервал рабочих токов от долей нА до ампер, так как много диапазонов тока (6-10) для решения разных задач	Узкий интервал рабочих токов от 20мкА до сотен ампер, так как мало диапазонов тока (1-3)
Можно работать с полуячейками, подключая на рабочий электрод катод или анод	Можно работать с электродом сравнения, но только в режиме аккумулятора
Любые ЭХ задачи: циклирование, любые ХИТ, коррозия, аналитика, биоэлектрохимия, электрокатализ, электроосаждение…	Только тестирование аккумуляторов (суперконденсаторов, первичных элементов)

2. Основы метода ЭХ импеданса

В методе ЭХ импеданса прибор прикладывает к исследуемому объекту переменную разность потенциалов или тока на фоне некоторой постоянной составляющей или без нее. Он регистрирует переменнотоковые отклики тока и потенциала и рассчитывает значения мнимой и действительной частей импеданса на текущей частоте, а затем переходит к следующей. В результате получается спектр, который потом тем или иным способом анализируется для излечения целевой информации об исследуемом объекте.

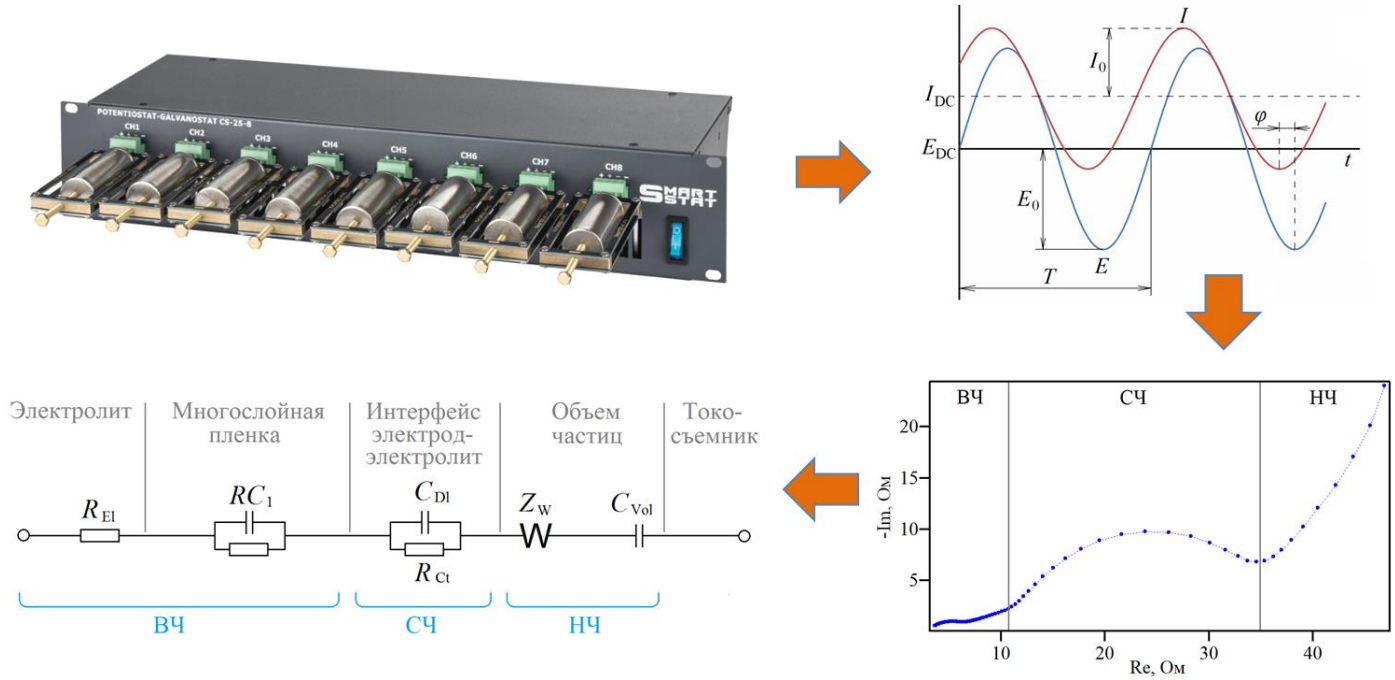


Рис. 2. Упрощенная схема эксперимента в методе ЭХ импеданса: измерение; регистрация откликов и их анализ; моделирование спектра импеданса с извлечением целевых параметров на примере метода эквивалентных схем.

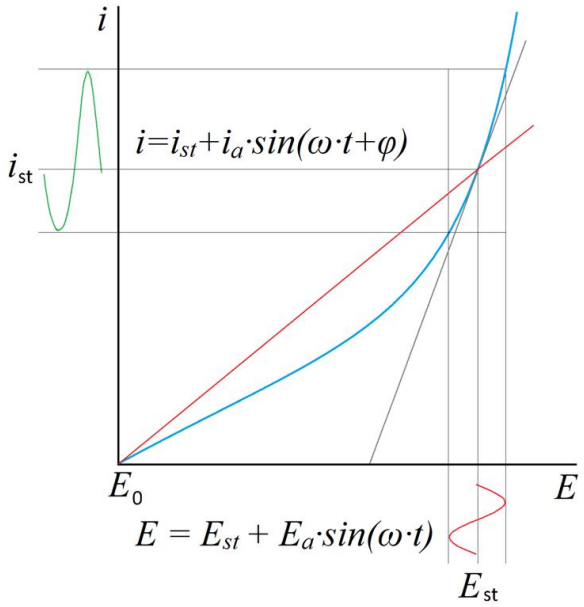


Рис. 3. Вольтамперная характеристика ЭХ процесса с приложенным переменнотоковым потенциалом и откликом по току.

Уравнение Тафеля:

$\eta = a + b \cdot \log|i|$, где $\eta = E_{st} - E_0$ (1)

При нулевом η и малом отклонении:

$R_{Ct} = R \cdot T / n \cdot F \cdot i_0$, где $i_0 = i_{пр.} = i_{обр.}$ ($E_{st} = E_0$) (2)

Важнейшей особенностью ЭХ систем является то, что кинетика стадии переноса заряда в них подчиняется уравнению Тафеля и рост тока фарадеевского процесса с приращением перенапряжения имеет экспоненциальный характер. То есть, электрохимические системы фундаментально нелинейны. Из этого следует, например, что измерять ЭХ импеданс можно только при весьма низких амплитудах возбуждающего сигнала. Минимальная рабочая амплитуда является одним из важнейших параметров и напрямую характеризует степень прецизионности измерительного оборудования.

Из нелинейности имеется еще несколько следствий, связанных с тем, что в качестве сопротивления переноса заряда (фарадеевского сопротивления) измеряется так называемое дифференциальное сопротивление (*то есть тангенс угла наклона вольтамперной или поляризационной кривой, в выбранной рабочей точке на ВАХ изучаемого ЭХ процесса. Этот угол не совпадает с углом наклона вектора, идущего из начала координат в выбранную рабочую точку, в отличие от обычных линейных, например омических, сопротивлений*):

1. Измерение возможно только при малой амплитуде (несколько мВ);
2. Измерение «при протекании тока» ≠ «при нулевом токе»;
3. Нельзя использовать полученные из импеданса значения R_{Ct} для расчета падений потенциала на них, например: $\Delta E = R_{DC} \cdot i$.

Вторая важная особенность ЭХ систем состоит в том, что для них очень сильно выражены диффузионные процессы массопереноса, характеризующиеся большими протяженностями во времени. То есть необходимо определенное время для того, чтобы аккумулятор достиг стационарное или равновесное состояние после предыдущего постояннотокового заряда или разряда. В противном случае он будет приходить в него в процессе развертки частоты, что вызовет целый рад проблем:

1. Состояние ЭХ системы меняется;
2. Не работает корректно математика метода (термодинамика);
3. Не работает корректно математика измерения (прибора).

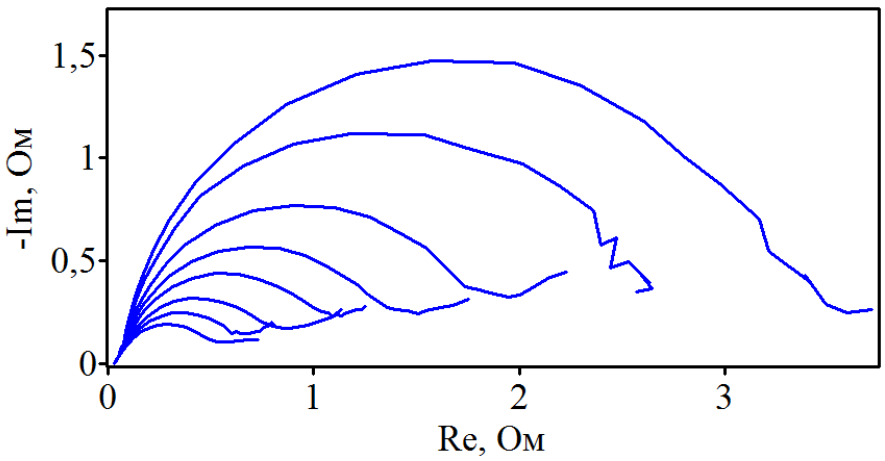


Рис. 4. Зашумленные спектры импеданса при недостаточной стационарности измерения.

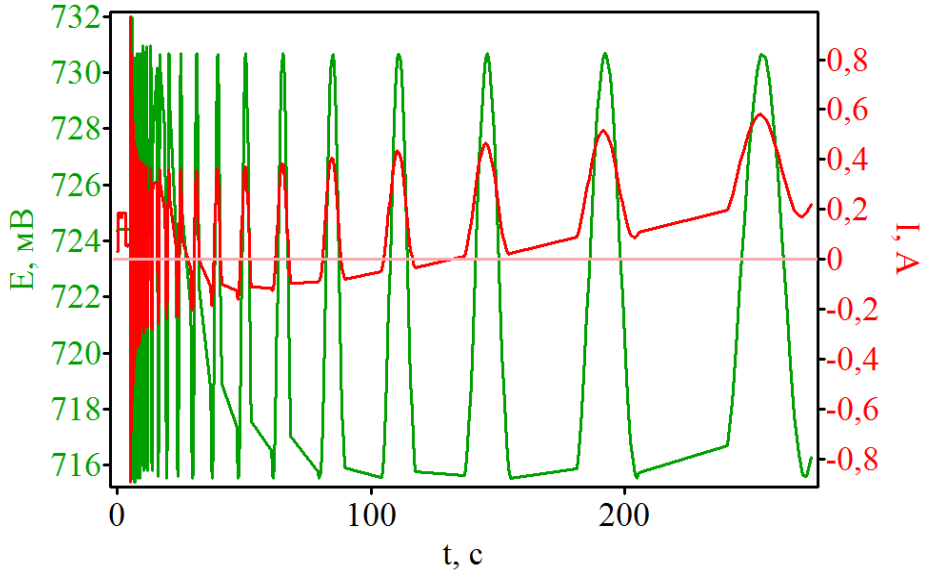


Рис. 5. Внешний вид сигналов тока и потенциала при нестационарном измерении ЭХ импеданса (имеется уход от асимметрии).

Визуально при этом на спектре импеданса появится низкочастотный разброс данных. Именно недостаточная релаксация ЭХ систем перед разверткой частоты это самая частая причина плохого вида спектров импеданса. Наличие нестационарности удобнее всего отслеживать по постояннотоковым диаграммам. Рекомендуемая длительность релаксации должна быть в несколько раз продолжительнее периода самой низкой частоты измерения.

ЭХ система должна находиться в стационарном состоянии, то есть должны выполняться следующие условия:

$$E_{DC} = E_{st} = const \quad (4)$$

$$i_{DC} = i_{st} = const \quad (5)$$

3. Шестиэлектродные потенциостаты

Рассмотрим такой подход в моделировании спектров импеданса, как метод эквивалентных схем. В эквивалентной схеме каждому явлению, объекту, или процессу в ЭХ системе ставится в соответствие определенный электрический или иной элемент, который математически описывает поведение импеданса этого явления или процесса.

1. В любой ЭХ ячейке есть твердый или жидкий электролит, обладающий объемным сопротивлением R_{EL}.
2. На границе электрод - электролит имеется емкость двойного слоя C_{DL}.
3. В зависимости от материалов электрода и электролита, на его поверхности при тех или иных потенциалах могут проткать ЭХ процессы, в общем случае состоящие из стадии подвода реагентов к электроактивной поверхности (обычно контролируется диффузионно - W), вслед за которой происходит стадия разряда ионизации (здесь ей соответствует фарадеевское сопротивление R_F).

Часть схемы (пункты 2+3) всей ячейки называется электродным импедансом и носит название схемы Эршлера-Рендлса. Она справедлива для большинства электрохимических систем. В химических источниках тока, или других сложных ЭХ системах, в нее входят еще дополнительные *R-C* компоненты, как например импеданс пленок в литий-ионных аккумуляторах (или распределенный импеданс границы в топливных элементах).

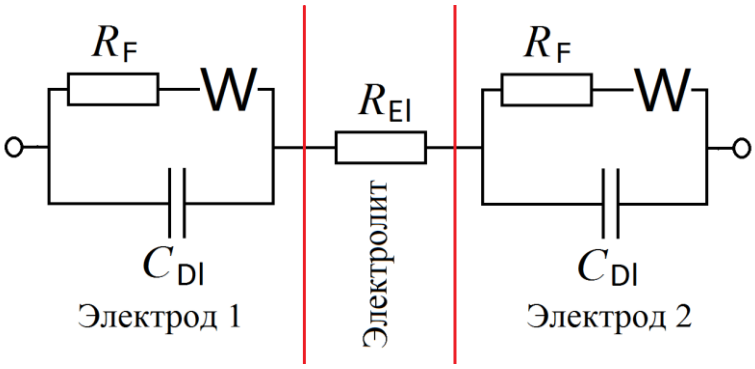


Рис. 6. Эквивалентная схема ЭХ системы в общем случае.

Современный измерительный прибор, будь то потенциостат или циклер, имеет 4 точки подключения исследуемого объекта. 2 токовых выхода, через которые он пропускает и измеряет ток, а также 2 потенциальных входа, с помощью которых он измеряет разность потенциалов.

В зависимости от того, как подключить прибор к исследуемому объекту, и наличия в нем специально введенных, так называемых электродов сравнения, или просто потенциальных электродов, можно измерить падение потенциала, как постоянного, так и переменного, на той или иной части исследуемого объекта - на нем всем, на каком-то одном

из электродов, или только на объеме электролита. А раз измерено падение переменного потенциала на определенном участке, то имея отклик по переменному току, одинаковому для всех составляющих (последовательно соединенные электроды и объем электролита), можно рассчитать и импеданс для этого участка. Существенный недостаток такого подхода состоит в том, что например, импеданс катода и анода аккумулятора мы вынуждены измерять последовательно в двух экспериментах, так еще и с ручным переключением кабелей прибора, что невозможно осуществить в ходе циклирования аккумулятора.

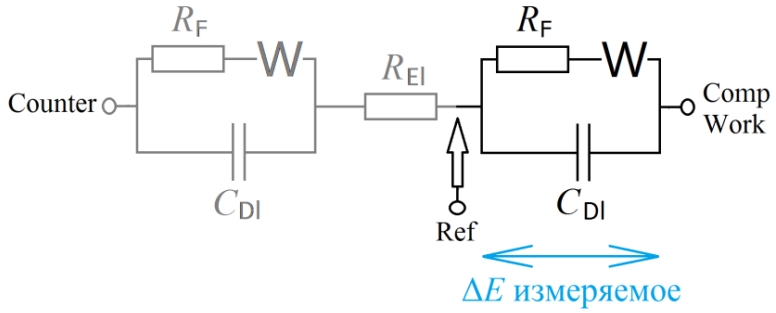


Рис. 7. Трехэлектродная схема подключения ЭХ ячейки с электродом сравнения Ref.

Решением является применение так называемого шестиэлектродного потенциостата. У него не один, как у четырехэлектродного, а три синхронных канала регистрации разности потенциалов, то есть по одному на каждую составляющую ЭХ системы в общем случае - два электрода + объем электролита.

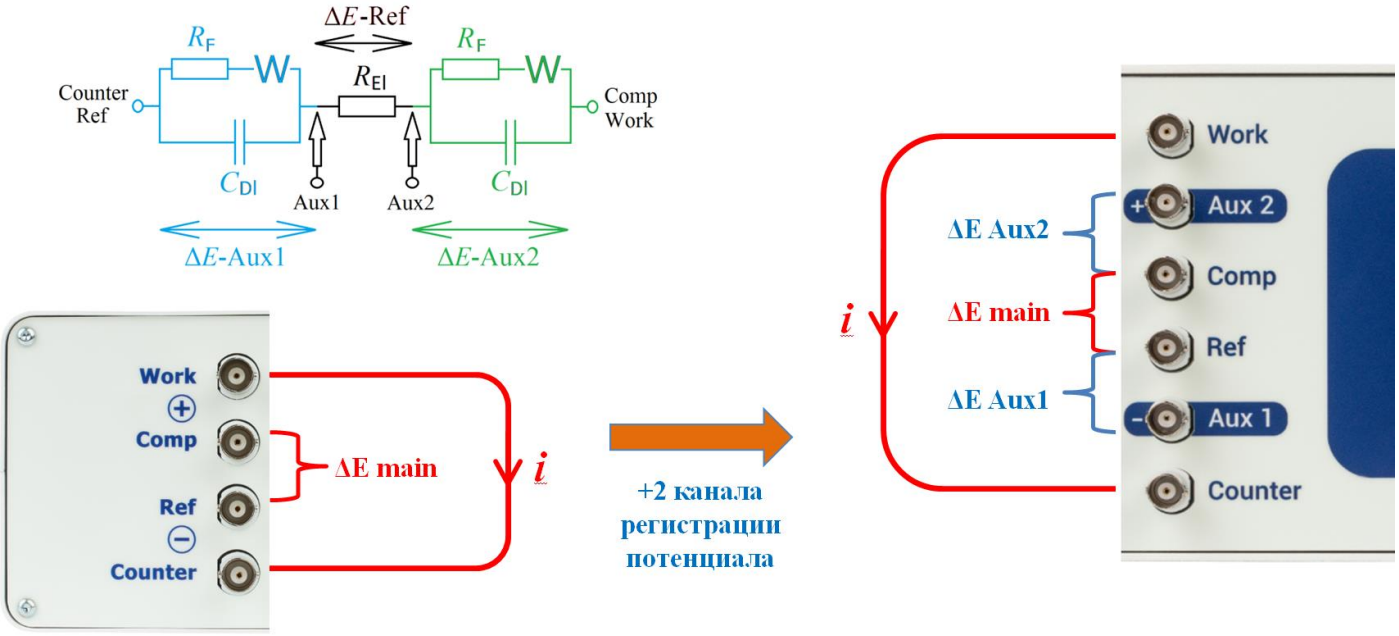


Рис. 8. Переход от четырехпроводного (4-электродного) потенциостата к 6-тиэлектродному.

Существуют более простые варианты подключения таких приборов. Например, имеется макет аккумулятора с одним электродом сравнения. В этом случае объемное

сопротивление электролита не представляет интереса или его легко элиминировать. В этом случае прибор обеспечивает поляризацию постоянным током (циклический заряд-разряд), и регистрирует спектр импеданса всей ячейки как обычной 2-хэлектродной. А с помощью дополнительных каналов регистрации, подключенных относительно электрода сравнения, он получает одновременно раздельные годографы импеданса для катода и анода. Ни одним математическим подходом, при любой плотности данных, то есть количестве частот на декаду, невозможно выделить из подобного черного общего спектра отдельно спектры импедансов катода и анода. В данном же подходе это делается с приборной погрешностью, то есть принципиально минимально возможной.

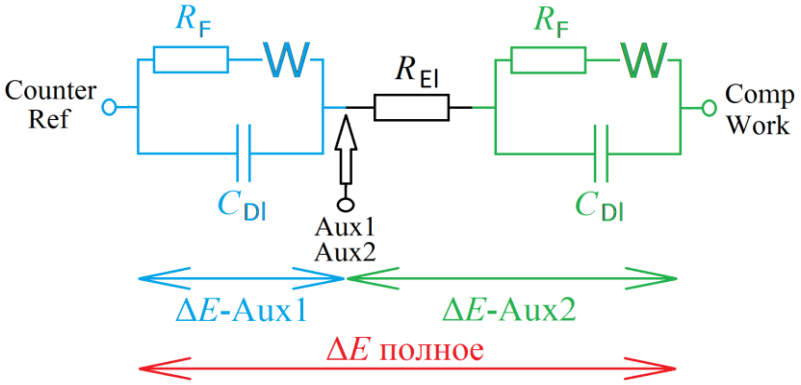


Рис. 9. Схема подключения 6-тиэлектродного потенциостата PS-50 к макету литий-ионного аккумулятора с электродом сравнения.

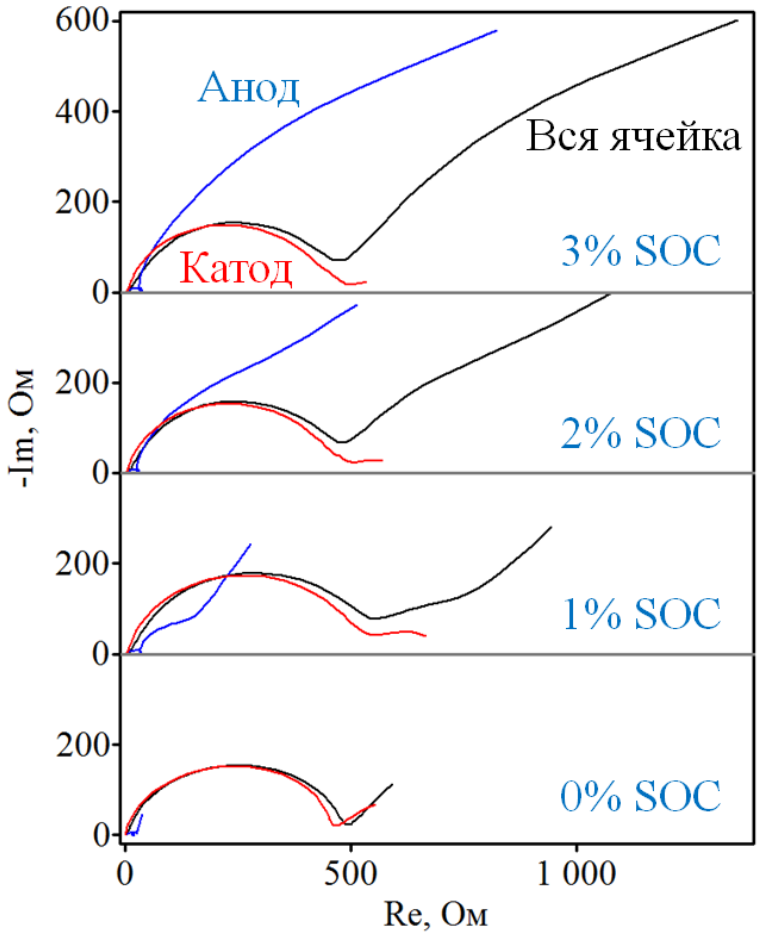


Рис. 10. Семейство годографов импеданса для разных степеней заряженности аккумулятора с разделением общего спектра (черного цвета) на спектры катода и анода (красные и синие годографы).

4. Электроды сравнения

Определенной сложностью таких экспериментов является то, что необходим электрод сравнения. Периодически можно видеть работы, в которых сравниваются различные их конструкции для металл-ионых аккумуляторов - сетки, пластины, проволоки, точечные. Также существуют разные материалы для изготовления электродов сравнения:

1. Металлический литий (один из худших вариантов из-за специфики формирования пленки SEI и фактического экранирования лития из-за отсутствия протекания тока на электроде сравнения. Очень высокий ЭХ шум в некоторых ситуациях);
2. Электроосажденный литий - лучше, так как имеется контроль над морфологией по количеству осажденного лития и скорости его осаждения (и возможность «освежить» его).
3. Катодный материал, например LFP, разряженный до средних (50-80%) величин SOC. Лучший вариант с минимальным импедансом и максимальным контролем.

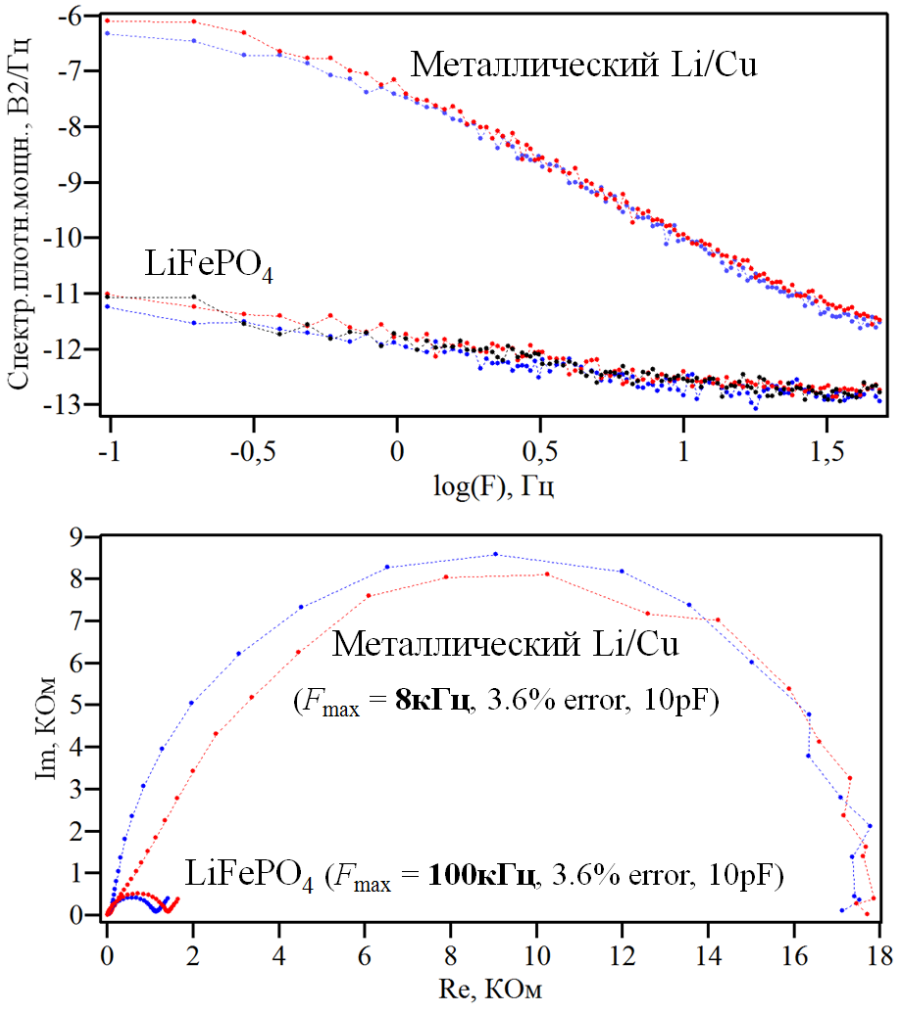


Рис. 11. Вверху - спектры ЭХ шумов электродов сравнения из металлического лития и из катодного материала LFP (последний совпадает с шумами прибора черного цвета и фактически был неизмерим). Ниже - спектры собственного импеданса этих электродов сравнения, измеренные относительно катода и анода (макет LFP Li-ion аккумулятора).

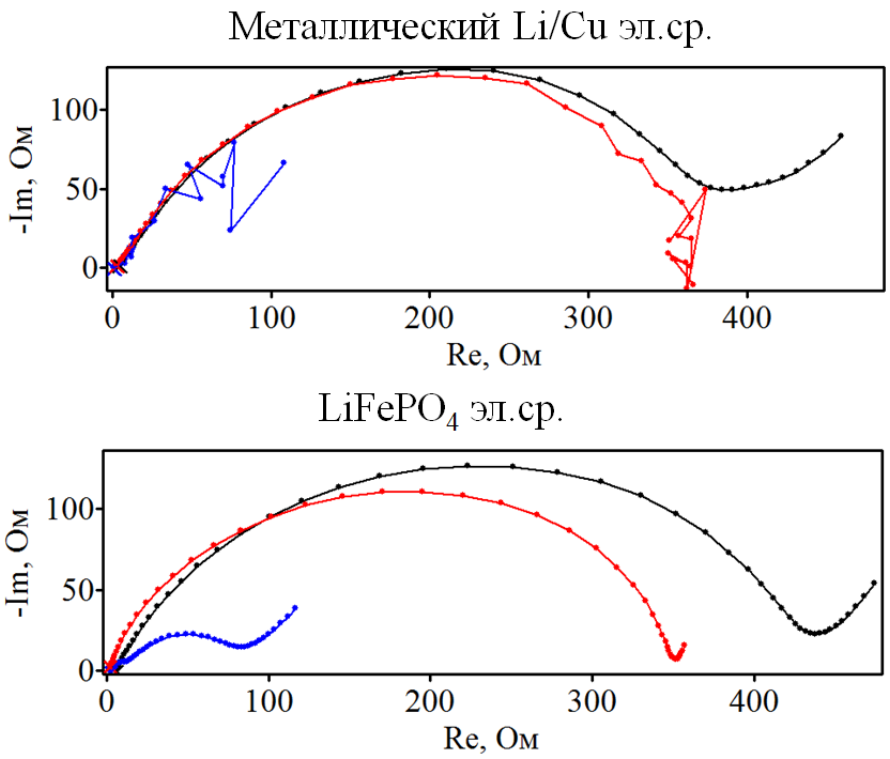
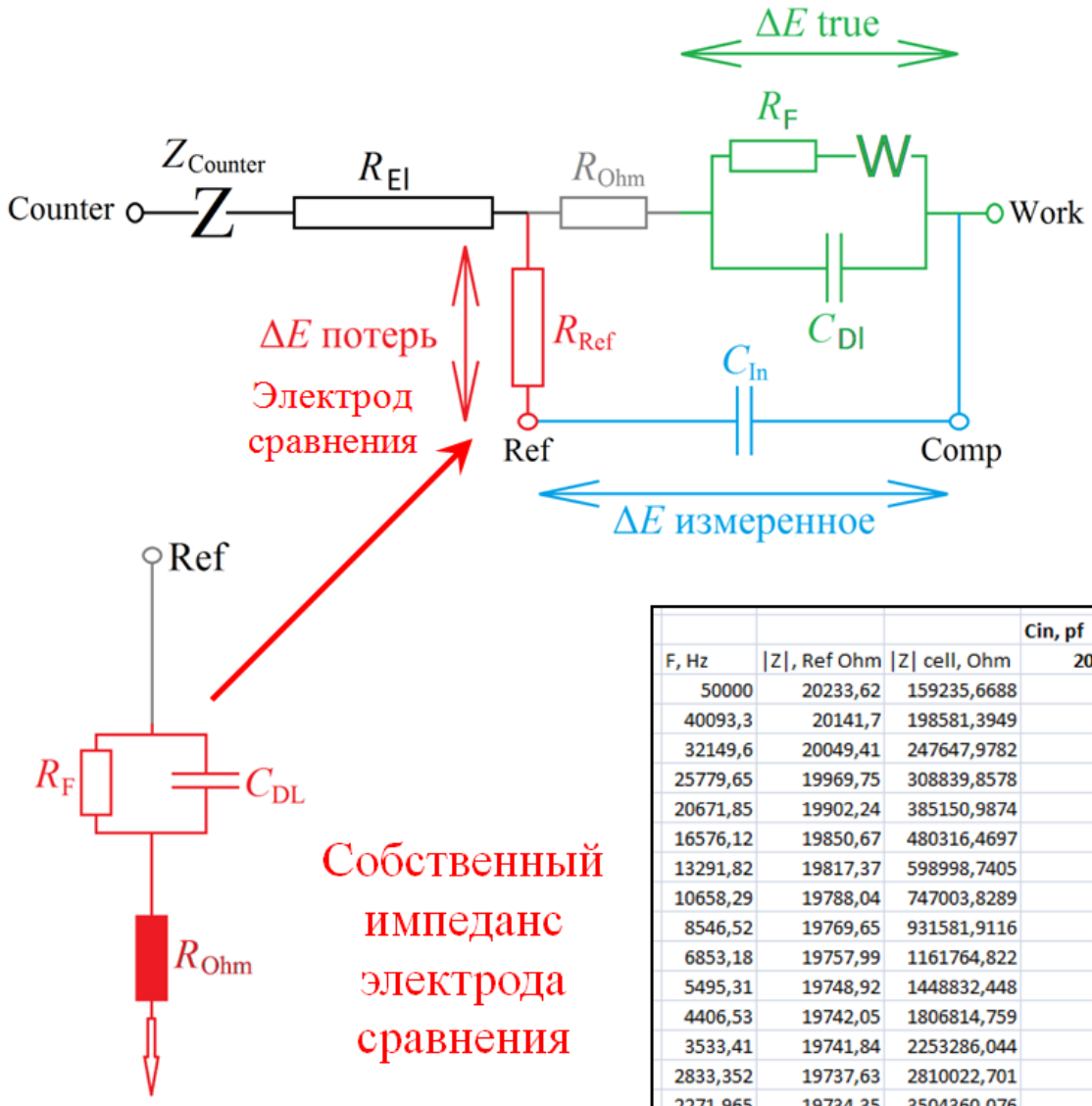


Рис. 12. Спектры импеданса (суммарный, катод, анод), измеренные относительно литиевого (вверху) и LFP (внизу) электродов сравнения для макета LFP Li-ion аккумулятора в условиях обеднения электролита.

Наличие широкополосных шумов, а также низкочастотный дрейф потенциала приводят к искажениям опорного потенциала литиевого электрода сравнения. Преимущество шестиэлектродного потенциостата состоит в том, что сразу в одном эксперименте видно, что сигнал приложенный потенциостатом и соответственно спектр всей ячейки имеют качественный вид, то есть с точки зрения постановки эксперимента все выполнено корректно, но отклики по потенциалу отдельно для катода и анода, взятые с электрода сравнения имеют сильно искаженный вид. Как следствие спектры импеданса тоже оказываются сильно зашумлены и искажены. Электрод сравнения на основе катодного материала LFP (в тех же условиях по концентрации электролита) демонстрирует качественные виды откликов и спектров. При работе с трехэлектродной ячейкой ситуация была бы еще хуже, там бы искажен был и отклик тока, так как потенциостат брал бы с шумящего литиевого электрода сравнения сигнал обратной связи и усиливал его, и был бы получен исключительно искаженный результат.

Любой электрод сравнения имеет собственный импеданс. Проблема заключается в том, что он образует с входной емкостью потенциостата (10-20 пФ) фильтр низких частот, меняя передаточную характеристику измерительной установки (потенциостат+электрод сравнения). Это не только может привести к потере устойчивости потенциостата (подробнее

в примере использования ANS17-Interaction of Potentiostat with 3-electrodes Electrochemical Cell), но и внести заметные искажения на высоких частотах.



			Cin, pf	
F, Hz	|Z|, Ref Ohm	|Z| cell, Ohm	20	Err %
50000	20233,62	159235,6688		11,27414
40093,3	20141,7	198581,3949		9,208767
32149,6	20049,41	247647,9782		7,48958
25779,65	19969,75	308839,8578		6,073347
20671,85	19902,24	385150,9874		4,913488
16576,12	19850,67	480316,4697		3,968807
13291,82	19817,37	598998,7405		3,202465
10658,29	19788,04	747003,8289		2,580627
8546,52	19769,65	931581,9116		2,078059
6853,18	19757,99	1161764,822		1,672248
5495,31	19748,92	1448832,448		1,344762
4406,53	19742,05	1806814,759		1,080834
3533,41	19741,84	2253286,044		0,868526
2833,352	19737,63	2810022,701		0,697502
2271,965	19734,35	3504360,076		0,559984

Рис. 13. Собственный импеданс электрода сравнения на эквивалентной схеме трехэлектродной ячейки. Пример расчета спектра искажений по формуле делителя напряжения (например, если импеданс электрода сравнения на частоте 100 кГц составит 1 кОм, а импеданс входной емкости потенциостата на этой же частоте 9 кОм, то величина искажений будет 10%, а если они окажутся равны, то искажения окажутся 50%).

В примере, приведенном далее, спектр импеданса всей ячейки измерен без искажений, а вот импедансы катода и анода, измеренные относительно электрода сравнения с высоким сопротивлением, оказались сильно искажены. Собственный импеданс электрода сравнения легко можно измерить относительно любого из токовых электродов по 2-х электродной схеме, а дальше можно рассчитать искажения для каждой частоты задавшись оценочной величиной входной емкости прибора.

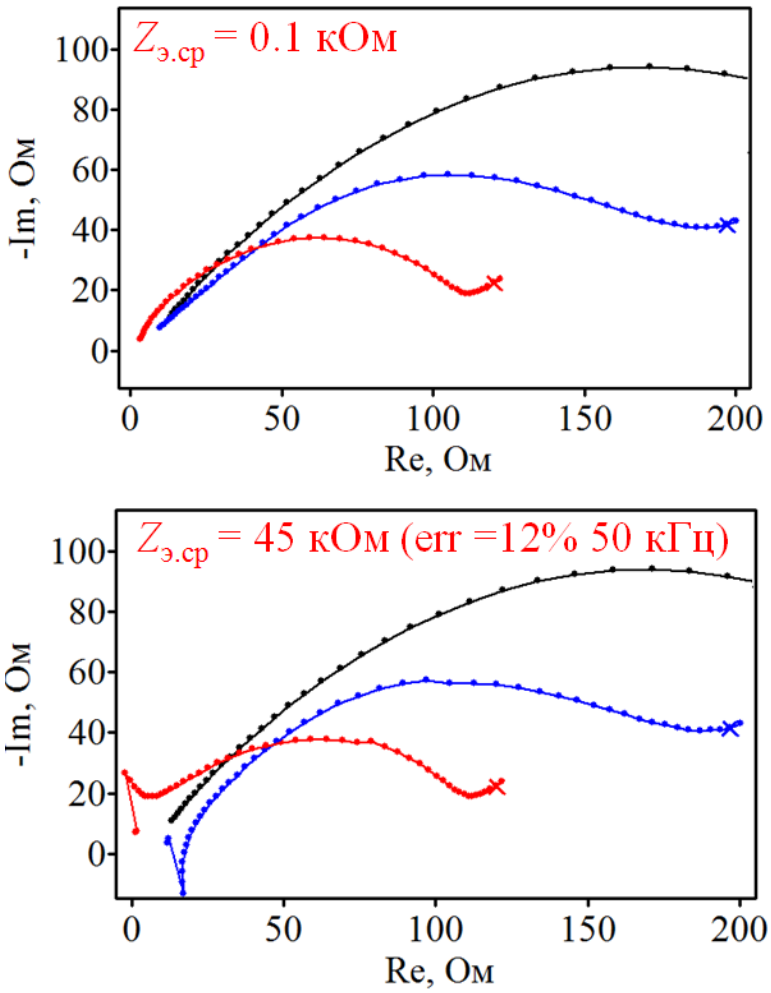


Рис. 14. Примеры спектров импеданса для трехэлектродных макетов аккумуляторов с низкоомным и высокоомным электродами сравнения. (искажения годографов, измеренных относительно высокоомного электрода сравнения могут уходить в 2 и 3й квадранты комплексной плоскости без какого-либо физического смысла).

5. Индуктивные особенности на высоких частотах

Еще одна особенность, связанная с работой на высоких частотах, это проявление индуктивных эффектов у низкоимпедансных ячеек. Периодически в публикациях можно видеть индуктивноподобные эффекты, выходящие с понижением частоты не снизу из 4-го квадранта (что характерно для индуктивности), а наоборот, спускающиеся сверху в первом квадранте. Это связано с перекомпенсацией входной индуктивности прибора в его калибровках, либо с сильным нарушением правил трассировки измерительных кабелей.

Программное обеспечение современных измерительных приборов обычно позволяет выполнять программную компенсацию индуктивности. Но для этого конфигурацию измерительных кабелей нельзя менять даже в самой малой степени, так как иначе изменится значение компенсирующей индуктивности.

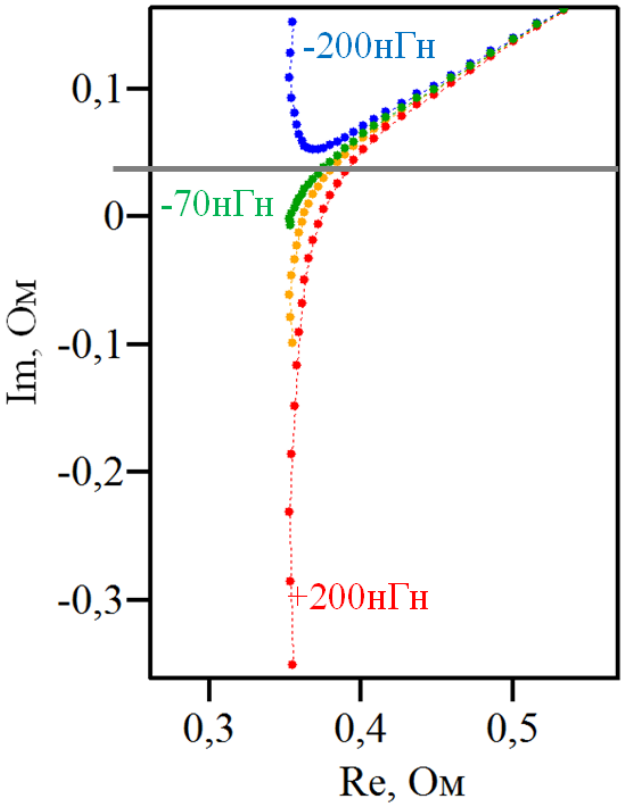


Рис. 15. Годографы импеданса с индуктивноподобными ВЧ особенностями с перекомпенсацией (синий спектр), нормальной компенсацией (зеленый), недокомпенсацией (красный).

Для минимизации индуктивности, а также для обеспечения ее максимально воспроизводимой величины, SmartStat рекомендует использовать специализированные твердотельные держатели аккумуляторов без проводов для всех циклеров (индустриальная и технологическая серии SmartStat). У исследовательских приборов (профессинальная и

лабораторная серии SmartStat), рассчитанных на большие рабочие токи, используются разделенные токовые и потенциальные провода.

Дело в том, что основной физической причиной возникновения индуктивных высокочастотных эффектов на годографах импеданса является не индуктивность как таковая, а взаимная индуктивность токовых и потенциальных проводов. То есть, токовые провода наводят переменные сигналы в потенциальных по мере увеличения амплитуды переменного тока, то есть снижения измеряемого импеданса и по мере их сближения. Подавить это явление можно применением витых пар для минимизации излучения токовыми проводами и восприимчивости к нему потенциальными, применив витые пары в обоих случаях.

Рис. 16. Примеры многоканальной испытательной установки с твердотельными держателями аккумуляторов, и исследовательского потенциостата (PS-60 с усилителем тока) с разделенными проводами SmartTwist в виде витой пары.

К сожалению, воспользоваться данными рекомендациями удается не всегда. Рассмотрим обсуждаемую особенность на так называемой диаграмме точности. Для конкретной модели прибора она показывает, на каких частотах какие значения импеданса можно измерять. Минимальная калибруемая и воспроизводимая индуктивность ограничивает низкие значения импеданса, а входная емкость прибора - высокие, сужая диаграмму точности на высоких частотах (последняя калибруется производителем прибора, но с конечной точностью). В результате любой прибор (потенциостат или RLC-метр) способен развить максимальную рабочую частоту лишь в очень ограниченном интервале измеряемых импедансов.

Различия в верхней и нижней областях заключается в том, что в низкоомной области, индуктивные эффекты не устраняются экранированием, а целиком определяются геометрическими расположением кабелей. Тогда как при высоких импедансах экранирование в достаточной степени решает проблемы взаимных наводок, а точнее емкостных связей, не только токовых и потенциальных проводов, но и различных каналов друг на друга. Поэтому, если например, требуется выполнить измерения в климатической камере, запустив в нее кабели с нескольких каналов, то лучше по возможности заложить для этого образцы с большими импедансами, чем с низкими. Если это невозможно, то постараться использовать климатическую камеру с двумя входами - один для всех токовых, а другой для всех потенциальных проводов, в том числе и с нескольких каналов.

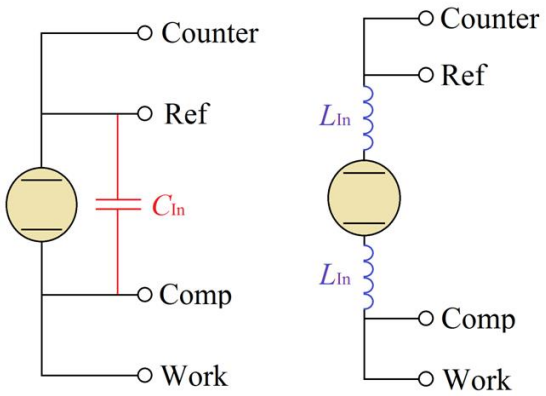


Рис. 15. Входная емкость и индуктивность потенциостата.

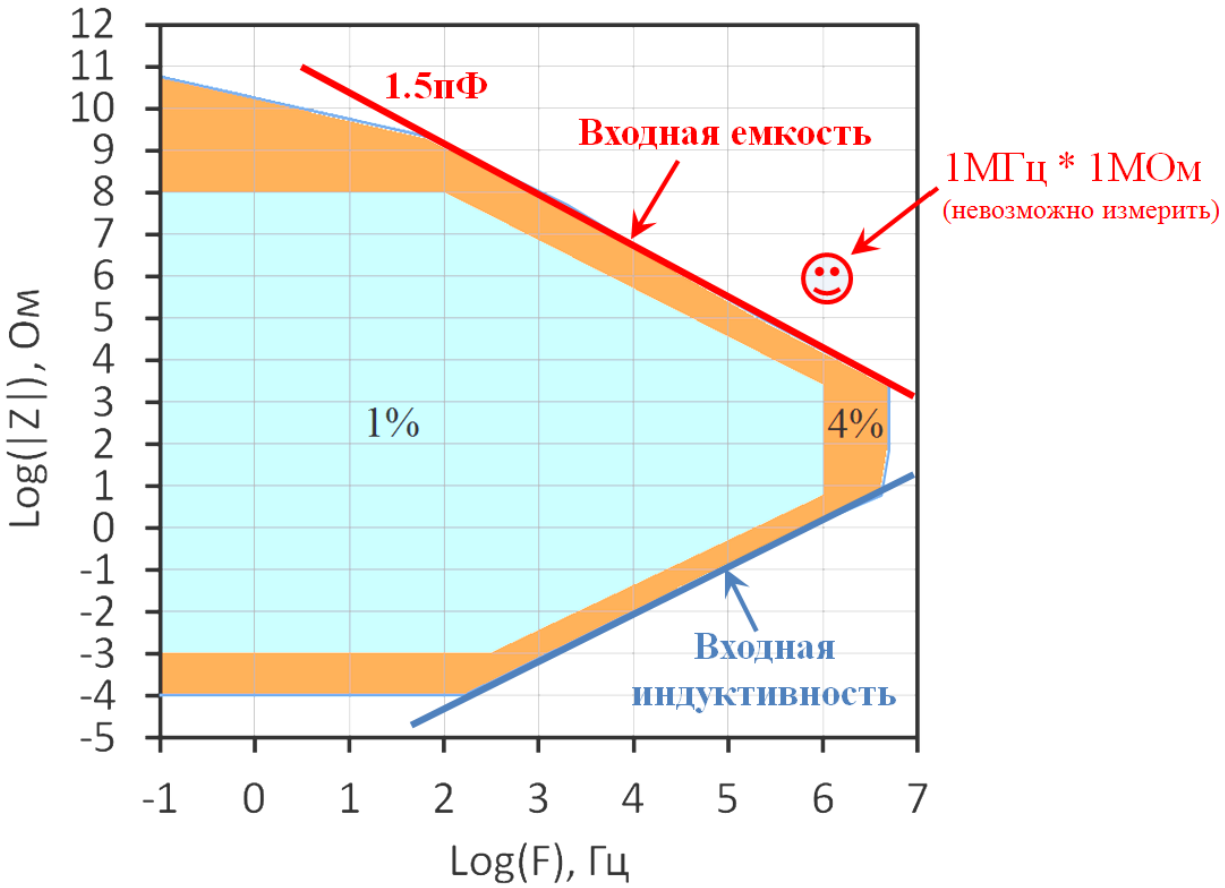


Рис. 17. Диаграмма точности потенциостата.

6. Валидация эксперимента

Еще одним важным аспектом является валидация эксперимента. В методе электрохимического импеданса для подтверждения корректности выполненного эксперимента удобным подходом является анализ гармоник (для этого также можно применять соотношения Крамерса Кронига, но в чистом виде с ними имеется слишком много особенностей). В корректно выполненном эксперименте их уровень будет весьма низким, а в случае нарушения стационарности, завышенной амплитуды переменного сигнала и при некоторых других проблемах их амплитуда заметно вырастет. У всех приборов SmartStat, укомплектованных техникой измерения ЭХ импеданса, есть возможность автоматически рассчитывать относительную амплитуду гармоник вплоть до 7й и выводить ее численно и графически вместе со спектрами. Их можно использовать в подобных диагностических целях, а также для проведения специальных исследований, например, нелинейности.

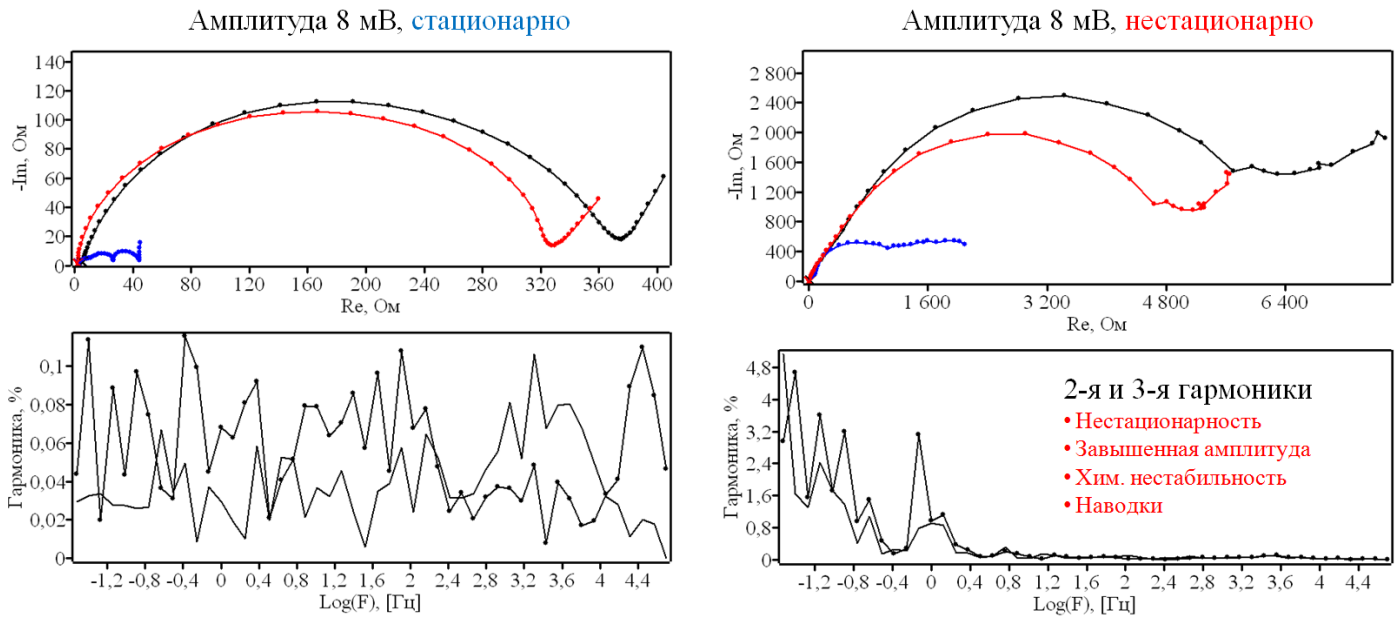


Рис. 18. Применение метода анализа амплитуд гармоник для валидации эксперимента.

7. Метод малосигнальной ЦВА для измерения спектров импеданса

При всех достоинствах метода ЭХ импеданса у него есть один недостаток - он а заметно увеличивает стоимость оборудования. Помимо возбуждения исследуемого объекта синусоидальным сигналом, существуют другие способы, импульсно, набором гармоник. Но импульсное возбуждение дает не всегда правильные и приемлемые результаты. А сложные по форме сигналы требуют создания специальных генераторов, то есть опять же удорожают оборудование. Компанией SmartStat был разработан новый подход, использующий метод малосигнальной циклической вольтамперометрии для приборов, не укомплектованных техникой измерения ЭХ импеданса. В нем исследуемый объект возбуждается пилообразным сигналом, который технически осуществляется методом ЦВА. Чем выше скорость развертки, тем выше получается частота возбуждения.

Главное достоинство этого подхода состоит в том, что все наши потенциостаты, даже без метода ЭХ импеданса могут выполнять Циклическую вольтамперометрию. Причем, используя функцию множителей SmartStat, можно с помощью программатора легко создавать набор таких ЦВА с разными скоростями, то есть частот для регистрации всего спектра в одном запуске измерения. Программное обеспечение SmartSoft имеет встроенную функцию расчета спектров импеданса из таких ЦВА, а также из импульсных измерений, использующих возбуждение Δ-импульсом. Научные основы предлагаемого подхода подробно изложены в специальной публикации для цитирования и обоснования правомочности его практического использования.

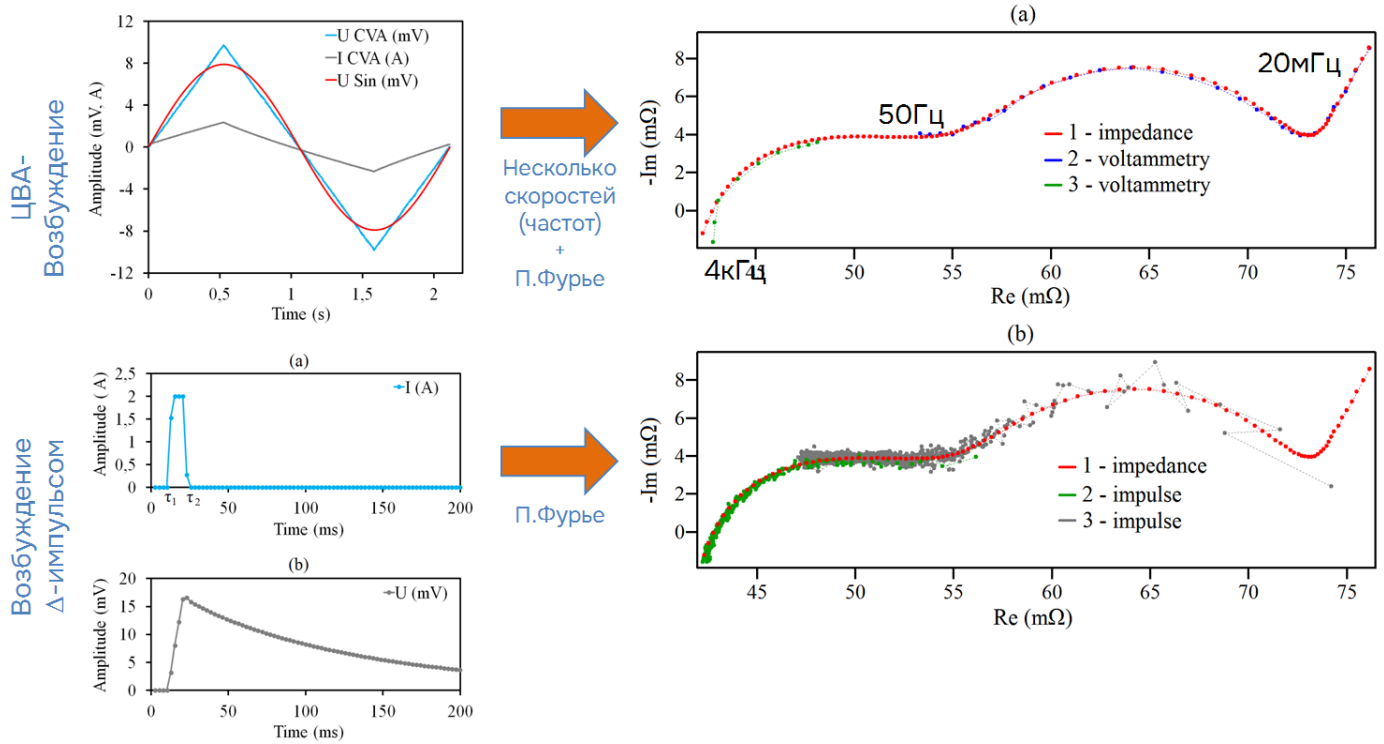


Рис. 19. Иллюстрация к применению метода малосигнальной ЦВА для измерения спектров импеданса.

Метод малосигнальной ЦВА рекомендуется применять с приборами SmartStat, не укомплектованными техникой измерения импеданса, для измерения, например диффузионных особенностей на низких частотах. С приборами, укомплектованными техникой измерения ЭХ импеданса целесообразнее пользоваться ею в классическом виде с синусоидальным возбуждением.

Методические указания по применению метода малосигнальной ЦВА можно найти в примере использования: ANS19-Small signall CVA-EIS.

Научные основы для цитирования и обоснования приведены в публикации: E. Astafev, The measurement of electrochemical impedance of batteries with the use of cyclic voltammetry technique, Measurement, 2026, vol 289, p. 122685, DOI : 10.1016/j.measurement.2026.122685.

В методе ЭХ импеданса гораздо больше практических особенностей, чем можно рассказать в одном докладе или примере использования. Многие из них описаны в нашей книге по методу электрохимического импеданса. За ней вы можете обратиться в отдел продаж SmartStat: Практическое руководство по методу электрохимического импеданса, издание 2 – переработанное и дополненное, Астафьев Е.А., Черноголовка ФИЦ ПХФ И МХ РАН, 2024, ISBN 978-5-91845-110-6, ББК 24.57 А91, тираж 716 экз., 288 с., подписано в печать 01.07.24, формат 60x90/16, объем 18 п.л.

8. Дополнение: работа циклера с трехэлектродными ячейками

Исследования макетов аккумуляторов с электродами сравнения на потенциостатах и на циклерах немного различаются в плане подключения. В случае потенциостата исследуемый токовый электрод всегда считается рабочим и независимо от того, является ли он катодом или анодом, он подключается к токовому выводу потенциостата Work. В трехэлектродной схеме к нему также подключается потенциальный вход Comp:

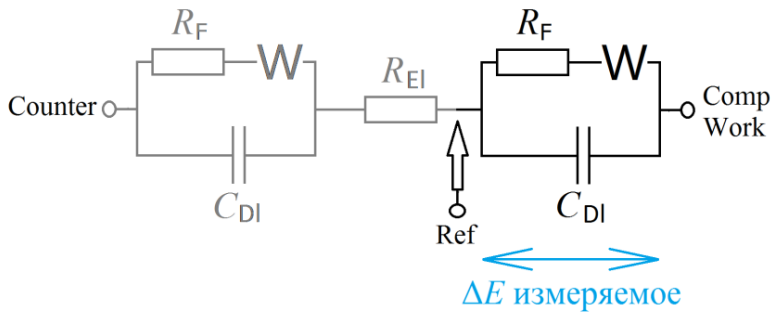
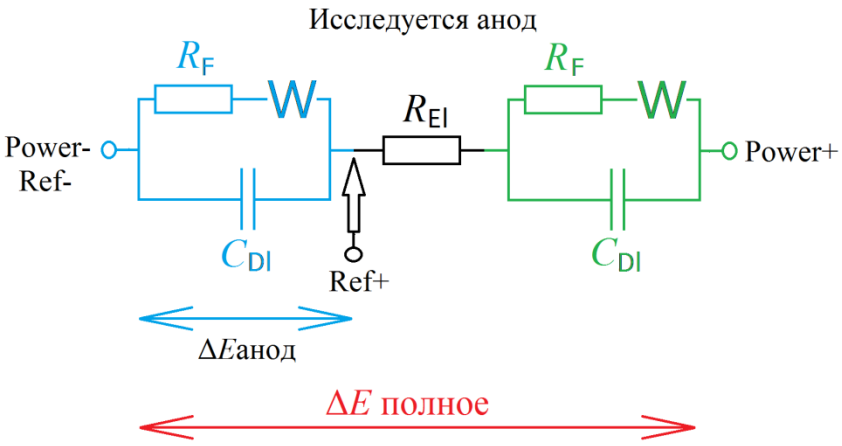


Рис. 20. Трехэлектродная схема подключения макета аккумулятора к потенциостату независимо от того, что исследуется - катод или анод.

У циклеров обычно иные названия входов - выходов, а также есть другие варианты подключения. Если имеется макет аккумулятора, у которого есть электрод сравнения, то можно изучать импеданс (или ВА-характеристики) катода или анода. При этом отрицательный токовый выход тестируемого аккумулятора (анод) всегда подключается к токовому выходу циклера Power-, а положительный вывод (катод) к выходу циклера Power+. С потенциальными проводами подключение зависит от того, что изучается - катод или анод.



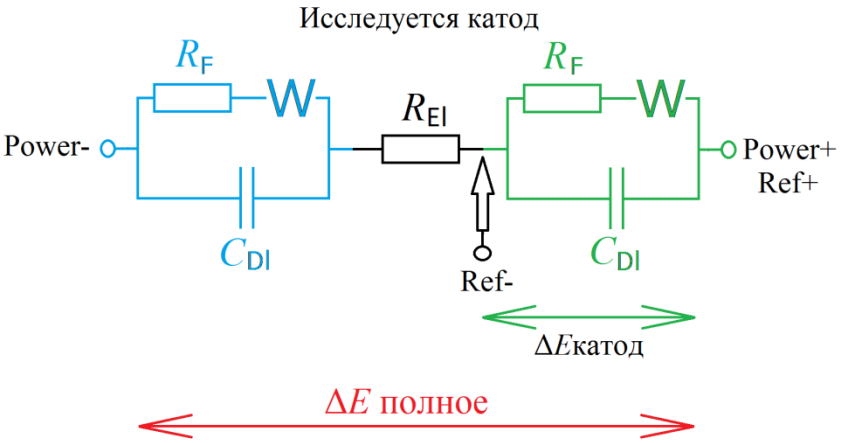


Рис. 21. Схемы подключения макета литий-ионного аккумулятора к циклеру для изучения характеристик анода или катода.

В обоих случаях важно, чтобы падение напряжения (потенциала) на всей ячейке $\Delta E_{полное}$ на превысило величины максимального поляризующего напряжения циклера. У потенциостатов это тоже необходимое условие, но у них обычно более высокие поляризующие напряжения до 11-12 В (SmartStat CS-12-8, CS-20-8 или другие у исследовательских серий - до 15 В и 35 В), поэтому это условие легко обеспечивается. У циклеров же поляризующее напряжение не такое высоко - до 4.5-5.5В (SmartStat CS-40-8, CS-25-8) и до 4.5-5 В (SmartStat CS-1-8).

Если макет аккумулятора похож на фактический аккумулятор в плане малой величины сопротивления электролита и малого падения потенциала на нем (в пределах 100-300 мВ), то этим требованиям достаточно легко удовлетворить. Падение потенциала на втором электроде (например, на катоде, при изучении анода) также должно быть не более, чем в стандартном аккумуляторе. В случае потенциостата это не столь критично (так как есть запас поляризации в несколько вольт), а в случае циклера такого запаса почти нет. Но измерение потенциально осуществимо.

В случае потенциостата возможна поляризация в короткое замыкание и переполюсовка, а в случае циклера нет. Ниже приведена типично-характерная ВАХ циклера по нагрузке исследуемого источника тока (для CS-1-8, взята из его руководства по эксплуатации):

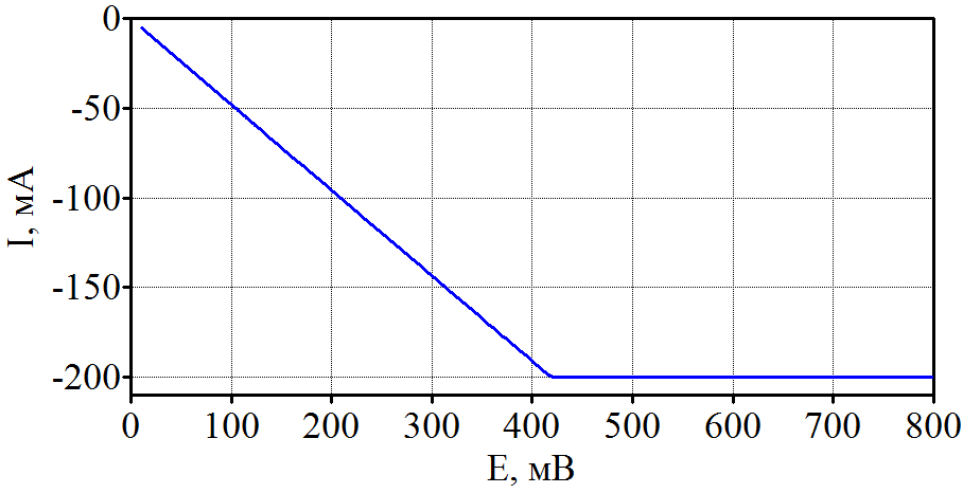


Рис. 22. Зависимость выходного тока от напряжения для одного канала CS-1-8 в режиме разряда (напряжения на терминалах прибора). Область высоких напряжений не показана.

Эта диаграмма означает, что на циклере работать при низких напряжениях (ниже 400 мВ) можно, но не при полном рабочем токе прибора (например, при 200 мВ возможен ток до 100 мА на старшем диапазоне тока). Если для планируемых исследований важна работа при малых токах (менее 50-100 мкА) и требуется переполюсовка или короткое замыкание, то лучше выбрать потенциостат, а не циклер.

Также, если необходимо выполнить эксперимент в полуячейке, в которой, например анод исследуется относительно другого стандартного анодного материала, то необходимо использовать потенциостат, а не циклер, так как возможна и скорее всего будет необходима поляризация в обе полярности. В этом случае рабочие потенциалы могут быть небольшими в пределах 1-2 В, при исследовании например графитовых анодов относительно литиевого электрода сравнения и вспомогательного электрода (тоже металлический литий).

Система знаков тока при работе на циклере в случае полноценного маета аккумулятора с электродом сравнения весьма проста - считаем исследуемый объект обычным аккумулятором, то есть положительный ток это заряд, а отрицательный ток это разряд, как для катода, так и для анода и всего аккумулятора (с соответствующими обоим электродам процессам внедрения-экстракции ионов лития или иных ионов).

В случае потенциостата:

- Для заряда анодного материала используется отрицательный ток (интеркалляция лития), а для его разряда - положительный ток (деинтеркалляция лития).
- В случае изучения катодного материала, процессу заряда аккумулятора соответствует деинтеркалляция (экстракция) лития с катода, то есть положительный ток, а процессу разряда соответствует интеркалляция (внедрение) лития в катод, то есть отрицательный ток.

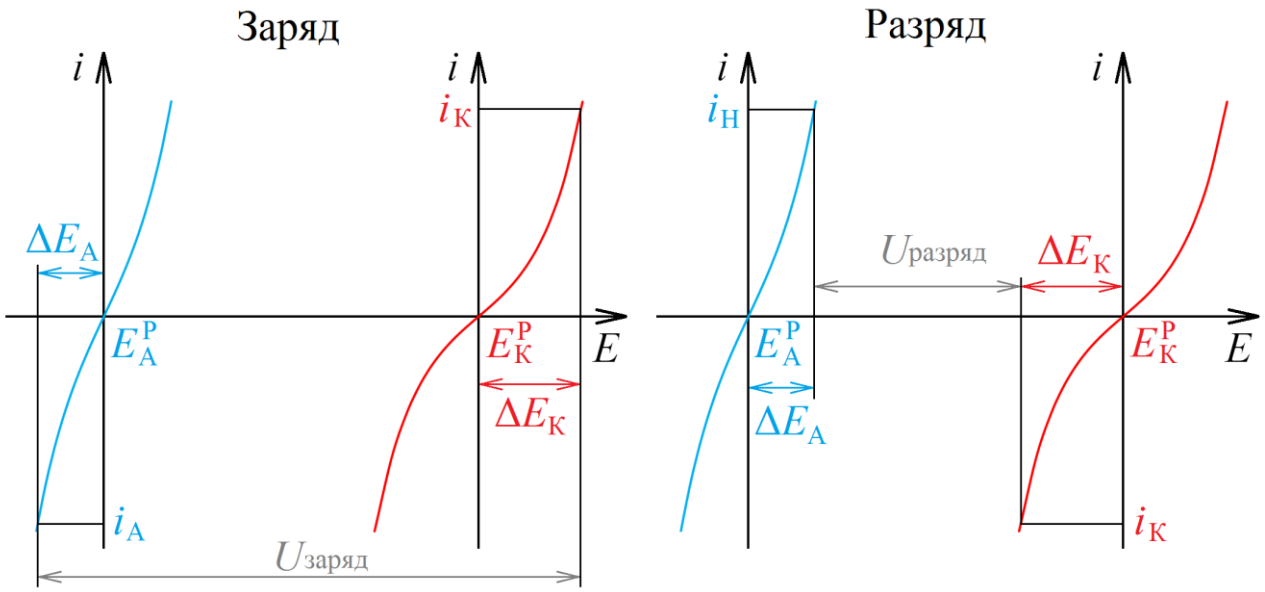


Рис. 23. Распределение поляризаций электродов аккумулятора в процессах заряда и разряда:

- $U_{заряд}$ - полное напряжение на аккумуляторе в двухэлектродной схеме в процессе заряда.
- $U_{разряд}$ - полное напряжение на аккумуляторе в двухэлектродной схеме в процессе разряда.
- ΔE_X - поляризации электродов относительно некоторого условно равновесного значения E_X^P.

Высокоточное оборудование для электрохимических исследований

SmartStat®

Изготовитель: SmartStat

Россия, Московская область, г. Черноголовка

Телефон: 8(495)720-31-57

Адрес тех. поддержки: potentiostat@mail.ru
www.smartstat.ru