

ИЗМЕРЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА МЕТОДОМ ПРЕРЫВАНИЯ ТОКА НА ЗАДАННОЕ ВРЕМЯ

Я.А. Меньшиков

yarst@mail.ru

ООО «Яростанмаш», Москва, Российская Федерация

ОИВТ РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Предложено измерение эквивалентного последовательного сопротивления различных химических источников тока методом периодического прерывания тока заряда или тока разряда на заданное время. Частота и длительность прерывания тока могут быть выбраны из широкого диапазона значений. Изменяя длительность прерывания тока, можно существенно варьировать условия измерения эквивалентного последовательного сопротивления. Так, при прерывании тока на 0,5 мс предлагаемый метод приближается к измерению сопротивления методом переменного тока с частотой 1000 Гц. При длительностях прерывания тока 0,5 с и более рассматриваемый метод становится эквивалентным методу постоянного тока. Предложенный метод позволяет выполнять измерение сопротивления как однократно, так и периодически с заданным периодом повторения. По полученным результатам могут быть построены зависимости эквивалентного последовательного сопротивления от уровня заряда химического источника тока, его остаточного ресурса, температуры и других параметров. Метод обладает несколькими преимуществами, прост в реализации, лишен погрешностей, присущих другим методам измерения сопротивления, и позволяет измерять эквивалентное последовательное сопротивление непосредственно в процессе заряда и разряда тестируемого химического источника тока

Ключевые слова

Химический источник тока, эквивалентное последовательное сопротивление, аккумулятор, внутреннее сопротивление

Поступила 19.03.2022

Принята 05.04.2022

© Автор(ы), 2022

Введение. Одним из важных параметров любого химического источника тока (ХИТ) является его эквивалентное последовательное сопротивление (ЭПС) [1, 2], которое зависит от электрохимической природы и емкости

ХИТ, его температуры, уровня заряда (State of Charge, SoC), остаточного ресурса (State of Health, SoH) и других параметров. Знание значения и закономерности изменения ЭПС помогает определить возвращаемую конкретным ХИТ энергию в заданных условиях эксплуатации, позволяет определить потери энергии в ХИТ, выбрать подходящую емкость ХИТ для конкретных применений, а также спроектировать систему охлаждения источника или накопителя энергии для работы с требуемой нагрузкой. Описан разработанный автором метод измерения ЭПС ХИТ, используемый в диагностическом оборудовании для испытания ХИТ [3]. Метод позволяет измерять ЭПС любых типов ХИТ непосредственно в процессе заряда и разряда, получать зависимости ЭПС от остаточного заряда, температуры и числа пройденных циклов заряда-разряда (остаточного ресурса ХИТ).

Эквивалентное последовательное сопротивление — паразитный параметр, который присущ всем ХИТ независимо от их природы: гальваническим элементам (первичным источникам тока), аккумуляторам, суперконденсаторам (ионисторам) и др. Эквивалентное последовательное сопротивление приводит к потерям энергии внутри ХИТ и снижает их эффективность. В упрощенном виде эквивалентная схема любого ХИТ может быть представлена как последовательное соединение идеального ХИТ и ЭПС [4–8] (рис. 1).

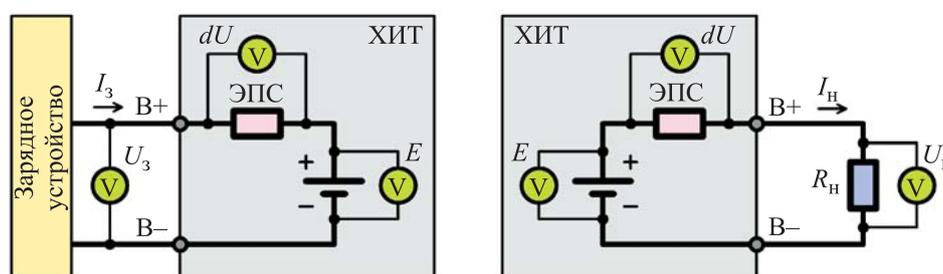


Рис. 1. Упрощенная эквивалентная схема ХИТ:

E — ЭДС ХИТ (разность потенциалов между клеммами В+ и В– при нулевом токе через ХИТ, когда отсутствует ток заряда и разряда)

При заряде ХИТ ток I_3 от зарядного устройства вызывает падение напряжения dU на ЭПС. При этом зарядному устройству приходится поддерживать напряжение заряда U_3 большее, чем текущее значение ЭДС ХИТ E на значение падения напряжения dU на ЭПС. При разряде ХИТ на нагрузку R_n ток нагрузки I_n вызывает падение напряжения на ЭПС dU . До нагрузки доходит напряжение U_n меньшее, чем текущее значение ЭДС ХИТ E на значение падения напряжения dU на ЭПС. ЭДС ХИТ:

$E = f(T, SoC, SoH, \dots)$, где T — температура ХИТ; SoC — уровень заряда ХИТ; SoH — остаточный ресурс ХИТ.

Эквивалентное последовательное сопротивление ХИТ — комплексный параметр, включающий в себя сопротивление выводов ХИТ, сопротивление подложки электродов, сопротивление перехода подложка — активный материал, сопротивление активного материала, переходное сопротивление активный материал — электролит, сопротивление электролита и др. [9–11]. Составляющие ЭПС в большей или меньшей степени зависят от температуры ХИТ, уровня заряда, остаточного ресурса, частоты F тока, подаваемого или отводимого от ХИТ (имеет смысл для импульсных нагрузок), и других параметров [12–14]: $\text{ЭПС} = f(T, SoC, SoH, F, \dots)$.

На ЭПС выделяется электрическая мощность, которая приводит к разогреву ХИТ: $P_{\text{ЭПС}} = I^2 \text{ЭПС}$. Конструкция источника или накопителя энергии должна предусматривать возможность отвода выделяемой теплоты с достаточной эффективностью. Для корректного определения потерь энергии в ХИТ и проектирования подходящей системы охлаждения необходимо знать значение ЭПС с достаточной точностью.

Эквивалентное последовательное сопротивление может быть определено различными методами [15], основанными на измерении переменного и постоянного токов. При измерении ЭПС методом переменного тока к ХИТ прикладывается тестовый переменный ток I_{AC} с заданной частотой (1000 Гц). Ток вызывает появление переменного напряжения на выводах ХИТ U_{AC} той же частоты. Подача тестового переменного тока и измерение ответного переменного напряжения осуществляется через разделительные конденсаторы C , которые отсекают постоянную составляющую напряжения на клеммах ХИТ (рис. 2).

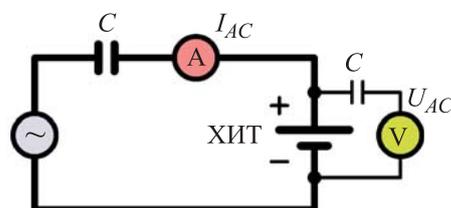


Рис. 2. Измерение ЭПС на переменном токе

Для заданной частоты тестового тока ЭПС_{AC} может быть определено по формуле $\text{ЭПС}_{AC} = U_{AC} / I_{AC}$, где U_{AC} — действующее значение переменной составляющей напряжения на клеммах ХИТ; I_{AC} — действующее значение тестового переменного тока.

Преимущество измерения ЭПС методом переменного тока состоит в том, что он не изменяет уровень заряда ХИТ. В некоторых случаях измерение ЭПС может быть выполнено без отключения тестируемого ХИТ

от целевой системы, что важно для контроля состояния ХИТ в системах гарантированного электроснабжения. Однако измерение ЭПС методом переменного тока (обычно с частотой 1000 Гц) имеет существенный недостаток. Результат измерения ЭПС будет всегда занижен относительно истинного значения ЭПС, т. е. того значения ЭПС, которое приводит к потере энергии при реальной работе ХИТ (при разряде на нагрузку или во время заряда). Часто разность погрешностей измерения ЭПС и ЭПС_{АС} составляет 30 % и более. Таким образом, значение ЭПС_{АС} не позволяет с достаточной точностью сделать вывод об эффективности накопителя и действительных тепловых потерях в ХИТ, а система охлаждения, спроектированная с учетом значения ЭПС_{АС}, будет иметь недостаточную производительность.

Метод постоянного тока имеет множество модификаций. Суть указанного метода заключается в скачкообразном изменении тестового тока через ХИТ, который может быть током заряда или током разряда. В результате скачкообразного изменения тока на клеммах ХИТ происходит изменение напряжения. Метод основан на измерении разности напряжений на клеммах ХИТ ($U_1 - U_2$ или $U_4 - U_3$) до и через заданное время после изменения значения или направления тока через ХИТ (рис. 3).

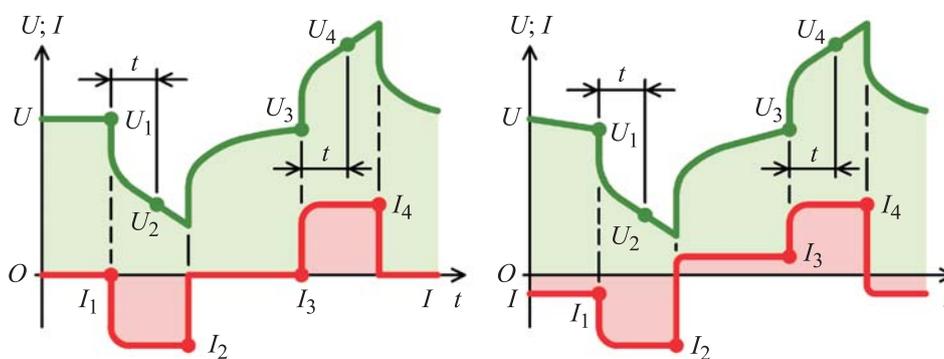


Рис. 3. Результаты измерения ЭПС методом, основанным на постоянном токе

Эквивалентное последовательное сопротивление ХИТ при протекании тока заряда может быть определено по формуле

$$\text{ЭПС}_{DC3} = |U_4 - U_3| / |I_4 - I_3|,$$

где $|U_4 - U_3|$ — разность напряжений на клеммах ХИТ до и после изменения тока заряда; $|I_4 - I_3|$ — абсолютная величина изменения тока заряда.

Эквивалентное последовательное сопротивление ХИТ при протекании тока разряда:

$$\text{ЭПС}_{DC\ p} = |U_1 - U_2| / |I_1 - I_2|.$$

Здесь $|U_1 - U_2|$ — разность напряжений на клеммах ХИТ до и после подачи тока разряда; $|I_1 - I_2|$ — абсолютная величина изменения тока разряда.

Время t (см. рис. 3) необходимо для нарастания и стабилизации тестового тока заряда или разряда. Время нарастания тока зависит от типа и схемотехнической реализации используемого тестового оборудования, а также от заданного тока заряда или разряда. Типовое время нарастания тока для большинства низковольтного тестового оборудования находится в диапазоне 1...10 мс. Однако существуют образцы оборудования, в том числе от известных производителей, у которых время нарастания заданного тока достигает единиц секунд.

На практике при измерении ЭПС методом постоянного тока используют значения времени от 10 мс и более, в ряде случаев до 18 с [15]. Методы постоянного тока зачастую дают завышенные результаты ЭПС, поскольку за время t изменение напряжения на клеммах ХИТ происходит не только за счет изменения падения напряжения на ЭПС, но и за счет постепенного изменения ЭДС ХИТ (см. рис. 1). Другими словами, за время t исследуемый образец ХИТ успевает частично разрядиться или зарядиться, что также вызывает изменение напряжения на клеммах ХИТ и приводит к погрешности определения ЭПС. Особенно выражена эта погрешность при измерении ЭПС суперконденсаторов, емкость которых достаточно мала по отношению к значению допустимых токов заряда и разряда, а изменение их ЭДС происходит достаточно быстро.

Цель работы — разработка универсального метода измерения ЭПС, который относительно просто реализуется в тестовом оборудовании. Метод должен быть лишен недостатка занижения результатов измерения ЭПС, характерного для метода переменного тока с частотой 1000 Гц, а также недостатка завышения результатов измерения ЭПС, характерного для методов постоянного тока.

Экспериментальная часть. Описание предлагаемого метода. Предлагаемый метод измерения ЭПС относится к методам прерывания тока [15]. Метод разработан и реализован автором в анализаторах ХИТ серии АСК (ООО «Яростанмаш») и лишен перечисленных выше недостатков, являясь максимально универсальным. В зависимости от значения D_{ESR} (рис. 4)

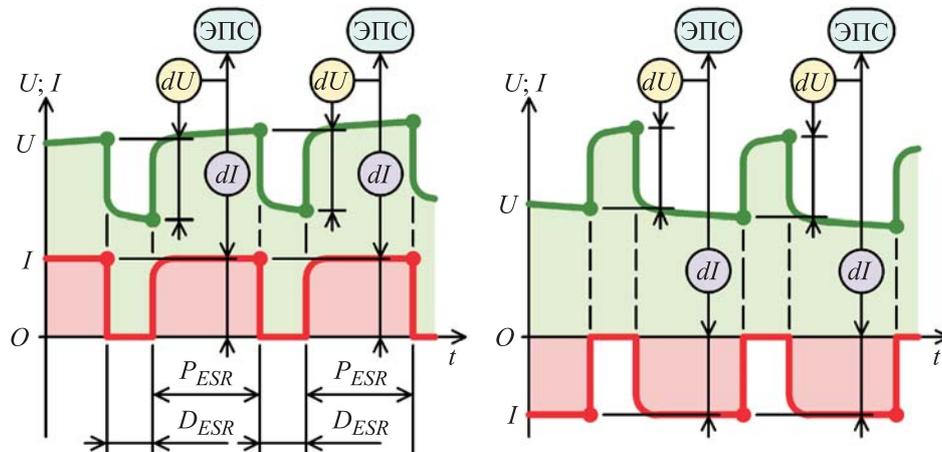


Рис. 4. Схема измерения ЭПС методом периодического прерывания тока

метод, с одной стороны, близок к методу постоянного тока, с другой, может быть эквивалентным методу переменного тока с частотой до 1000 Гц и более.

Суть метода заключается в следующем. При тестировании ХИТ в режимах заряда или разряда ток заряда или разряда прерывается на время D_{ESR} (см. рис. 4). Ток прерывается до нуля путем полного закрытия силовых транзисторов испытательного оборудования. Поскольку закрытие транзисторов осуществляется практически мгновенно, спад тока через тестируемый ХИТ происходит всего за несколько микросекунд (не более 0,01 мс), в отличие от сравнительно длительного переходного процесса (1...50 мс), характерного для работы регулятора тока вначале подачи тока или при изменении его значения. После прерывания тока напряжение на клеммах ХИТ скачкообразно изменяется в результате вычитания падения напряжения на резистивной составляющей ЭПС, затем следует дальнейшее плавное изменение напряжения за счет перераспределения зарядов внутри ХИТ.

Напряжение на клеммах ХИТ измеряется в двух точках во времени: 1) непосредственно перед прерыванием тока; 2) через заданное время D_{ESR} после прерывания тока (в конце паузы в токе). Аналогично измеряется и фиксируется значение тока, проходящего через ХИТ непосредственно перед его прерыванием.

Эквивалентное последовательное сопротивление ХИТ вычисляется по формуле

$$\text{ЭПС} = |dU / dI|,$$

где dU — разность напряжений на клеммах ХИТ непосредственно перед и через время D_{ESR} после прерывания тока; I — прерываемый ток через ХИТ.

Изменяя длительность паузы в токе D_{ESR} (время между измерениями напряжения), можно создать условия измерения ЭПС, эквивалентные измерению ЭПС методом постоянного тока (при $D_{ESR} = 10$ мс и более) или методом переменного тока заданной частоты.

Для любого значения D_{ESR} может быть вычислена эквивалентная частота тока $F_{ACэ}$, соответствующая измерению ЭПС методом переменного тока на заданной частоте: $F_{ACэ} = 0,5 / D_{ESR}$. Так, при $D_{ESR} = 0,5$ мс условия измерения ЭПС становятся эквивалентны измерению ЭПС методом переменного тока на частоте 1000 Гц (рис. 5).

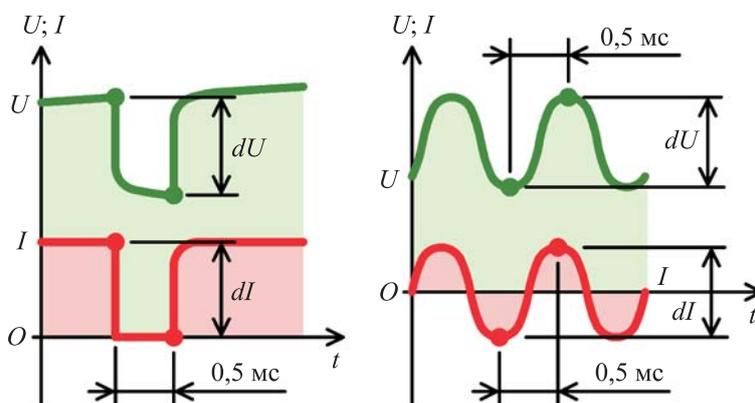


Рис. 5. Схема измерения ЭПС с эквивалентной частотой переменного тока 1000 Гц

Результаты и обсуждения. Для экспериментального подтверждения корректности результатов измерений, получаемых с использованием предлагаемого метода, проведены измерения ЭПС нескольких образцов аккумуляторов типоразмера 18650 анализатором ХИТ АСК75.10.20.2 (ЭПС измерено при прерывании тока разряда 5 А), а также с помощью специализированного прибора YR1035+, измеряющего ЭПС методом переменного тока с частотой 1000 Гц [16]. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Сравнивая результаты измерения ЭПС, полученные предлагаемым методом, и результаты измерений ЭПС, определенные на специализированном приборе YR1035+, можно сделать вывод, что относительная погрешность не превышает 4 %. При увеличении длительности паузы D_{ESR} в токе предлагаемый метод дает результаты, приближенные к результа-

там измерения ЭПС, которые получены методом постоянного тока. Однако в отличие от метода постоянного тока предлагаемый метод лишен недостатка изменения ЭДС ХИТ за время измерения (во время паузы тестируемый ХИТ не заряжается и не разряжается, его ЭДС не изменяется), вследствие чего возвращаемые результаты измерения ЭПС наиболее адекватны и достоверны.

Таблица 1

Результаты измерения ЭПС аккумуляторов различными методами

Аккумулятор	Результат измерения ЭПС, мОм		Относительная погрешность, %
	прибором YR1035+ (АС, 1000 Гц)	предлагаемым методом при $D_{ESR} = 0,5$ мс (1000 Гц)	
NCR18650B	30,9	32,1	3,7
LiDBHG21865	23,4	23,8	1,7
Lii-35S	34,6	35,4	2,3
INR18650 33E	33,4	34,7	3,7
US18650VTC5A	16,9	17,5	3,4

Результаты измерения ЭПС нескольких образцов аккумуляторов типоразмера 18650 при различных значениях D_{ESR} ($F_{AC\varepsilon} = 1 \dots 1000$ Гц) приведены в табл. 2. Измерения выполнены на анализаторе ХИТ АСК75.10.20.2, ЭПС измерено при прерывании тока разряда 5 А. Для наглядности результаты представлены на рис. 6 в графической форме. С увеличением длительности паузы D_{ESR} в токе результаты измерения ЭПС возрастают, стремясь к истинному значению ЭПС для метода постоянного тока.

Таблица 2

Результаты измерения ЭПС, Гц, аккумуляторов при различных значения D_{ESR}

Аккумулятор	D_{ESR} , мс ($F_{AC\varepsilon}$, Гц)									
	0,5 (1000)	1 (500)	2 (250)	5 (100)	10 (50)	20 (25)	50 (10)	100 (5)	200 (2,5)	500 (1)
NCR18650B	32,1	34,0	35,5	37,1	38,3	39,2	39,9	40,2	40,5	41,0
LiDBHG21865	23,8	24,8	25,7	26,8	27,7	28,8	30,1	30,8	31,2	31,8
Lii-35S	35,4	36,5	37,4	38,5	39,7	41,2	43,4	44,8	45,7	46,6
INR18650 33E	34,7	36,1	37,0	37,8	38,2	38,5	39,0	39,4	39,7	40,2
US18650VTC5A	17,5	18,8	19,6	20,1	20,4	20,6	20,8	21,0	21,2	21,5

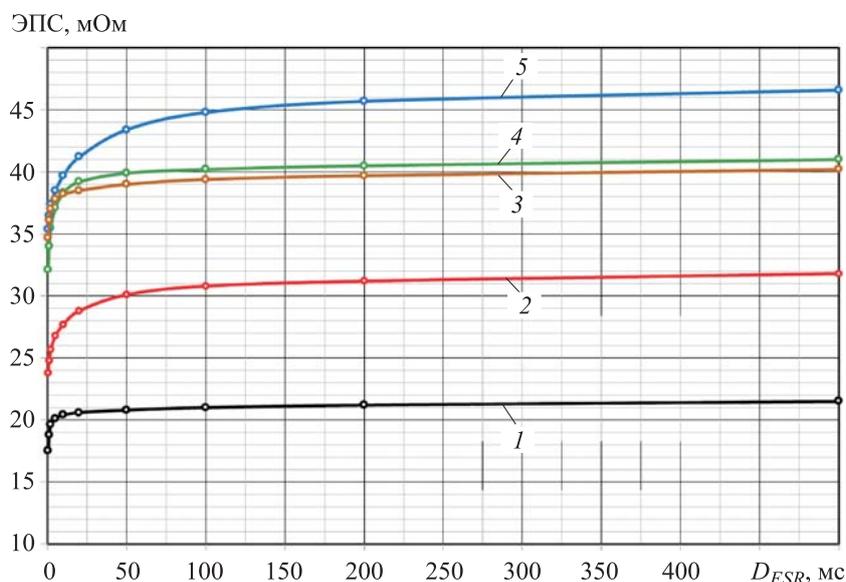


Рис. 6. Зависимость ЭПС аккумуляторов US18650VTC5A (1), LiDBHG21865 (2), INR18650 33E (3), NCR18650B (4) и Lii-35S (5) от значений D_{ESR}

Для практического применения, начиная с $D_{ESR} = 0,5$ с и более, предложенный метод позволяет получать значения ЭПС, максимально приближенные к истинным значениям ЭПС тестируемых ХИТ. Именно эти значения вызывают потери энергии в ХИТ при протекании через них постоянного тока заряда и разряда и могут быть использованы для определения тепловыделения и расчета необходимой системы охлаждения источника или накопителя энергии на базе исследуемых ХИТ.

Прерывания тока заряда или тока разряда можно выполнять с заданной периодичностью P_{ESR} (см. рис. 4). Это позволяет получить множество результатов измерения ЭПС в процессе заряда и разряда ХИТ и построить зависимость ЭПС от SoC (рис. 7).

Усредняя полученные результаты измерения ЭПС за полный цикл заряда–разряда и повторяя циклирование ХИТ многократно, появляется возможность определять и строить зависимость ЭПС ХИТ от числа пройденных циклов заряда–разряда (рис. 8).

Описанный метод прост в технической реализации и в большинстве случаев не требует изменений в аппаратной части тестового зарядно-разрядного оборудования. Метод универсален и имеет существенные преимущества. Однако он не лишен и недостатка, вытекающего из принципа его работы: для измерения ЭПС необходимо прерывать ток через тестируемый ХИТ. Это удобно и возможно только при тестировании ХИТ на спе-

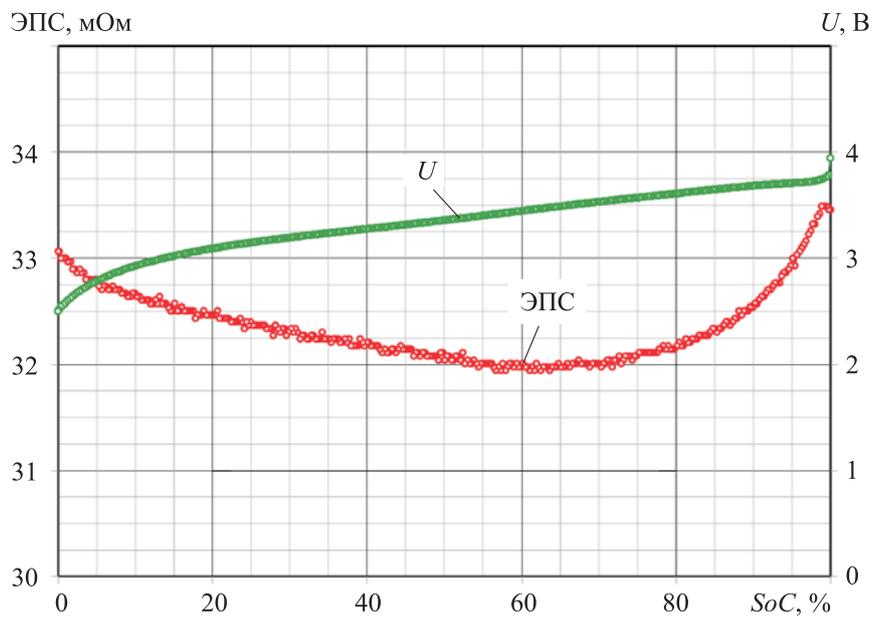


Рис. 7. Зависимости ЭПС и напряжения аккумулятора NCR18650B от SoC в процессе разряда

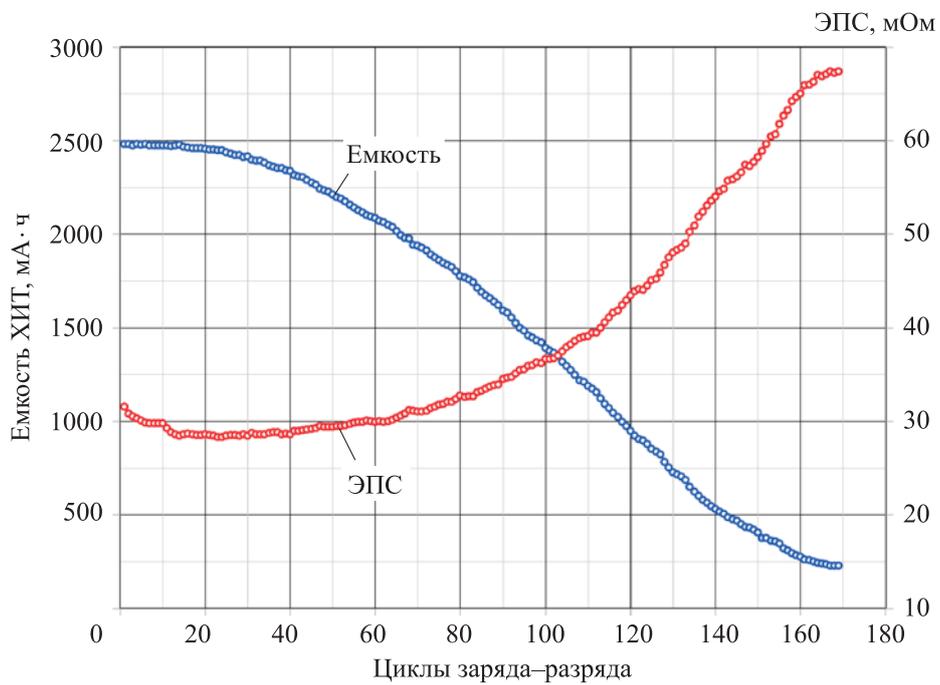


Рис. 8. Зависимости емкости и ЭПС аккумулятора EA1EP ICR18650-26F M от числа пройденных полных циклов заряда-разряда

специализированном тестовом зарядно-разрядном оборудовании, поэтому для измерения ЭПС тестируемый ХИТ должен быть отсоединен от целевой системы на время испытаний.

Выводы. Разработан универсальный метод измерения ЭПС любых ХИТ методом прерывания тока заряда или тока разряда на заданное время.

В зависимости от длительности прерывания тока метод близок к методу постоянного тока, но может быть эквивалентным и методу переменного тока с частотой вплоть до 1000 Гц и более.

Сравнение результатов измерений ЭПС, полученных предложенным методом при $D_{ESR} = 0,5$ мс, с результатами измерений ЭПС методом переменного тока с частотой 1000 Гц показывает хорошее совпадение (погрешность менее 4 %).

При значениях $D_{ESR} = 0,5$ с и более разработанный метод позволяет получить значения ЭПС, максимально приближенные к истинным значениям ЭПС тестируемых ХИТ, без занижения результатов измерения ЭПС, характерного для измерения ЭПС методом переменного тока с частотой 1000 Гц.

Вследствие нулевого тока через ХИТ во время измерения ЭПС не происходит изменения ЭДС ХИТ. Поэтому предложенный метод лишен недостатка завышения результатов измерений ЭПС, характерного для измерения ЭПС методом постоянного тока.

Метод дает возможность получить множество значений ЭПС ХИТ в процессе заряда и разряда. По полученным данным можно построить зависимости ЭПС от уровня заряда ХИТ, его остаточного ресурса, а при испытаниях в камере тепла-холода — от температуры ХИТ.

Метод используется для серийно выпускаемых приборов при тестировании различных ХИТ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Романов В.В., Хашев Ю.М. Химические источники тока. М., Сов. радио, 1978.
- [2] Таганова А.А., Бубнов Ю.И., Орлов С.Б. Герметичные химические источники тока. СПб., Химиздат, 2005.
- [3] Оборудование для тестирования ХИТ: *веб-сайт*. URL: <https://www.yarst.org> (дата обращения: 08.03.2022).
- [4] Tremblay O., Dessaint L.-A., Dekkiche A.-I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf.*, 2007, pp. 284–289. DOI: <https://doi.org/10.1109/VPPC.2007.4544139>

- [5] He H., Xiong R., Guo H., et al. Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles. *Energy Convers. Manag.*, 2012, vol. 64, pp. 113–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.04.014>
- [6] Tremblay O., Dessaint L.-A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. *World Electr. Veh. J.*, 2009, vol. 3, iss. 2, pp. 289–298. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj3020289>
- [7] Ramadesigan V., Northrop P.W.C., De S., et al. Modeling and simulation of lithium ion batteries from a systems engineering perspective. *J. Electrochem. Soc.*, 2012, vol. 159, no. 3, pp. 31–45. DOI: <https://doi.org/10.1149/2.018203jes>
- [8] He H., Xiong R., Fan J. Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *Energies*, 2011, vol. 4, iss. 4, pp. 582–598. DOI: <https://doi.org/10.3390/en4040582>
- [9] Стойнов З.Б., Графов Б.М., Савова-Стойнова Б. и др. Электрохимический импеданс. М., Наука, 1991.
- [10] Li S.E., Wang B., Peng H., et al. An electrochemistry-based impedance model for lithium-ion batteries. *J. Power Sources*, 2014, vol. 258, pp. 9–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.02.045>
- [11] Macdonald D.D. Reflections on the history of electrochemical impedance spectroscopy. *Electrochim. Acta*, 2006, vol. 51, iss. 8-9, pp. 1376–1388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.02.107>
- [12] Lukovtsev V.P., Rotenberg Z.A., Dribinskii A.V., et al. Estimating depth of discharge of lithium-thionyl-chloride batteries from their impedance characteristics. *Russ. J. Electrochem.*, 2005, vol. 41, no. 10, pp. 1097–1100. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11175-005-0187-8>
- [13] Петренко Е.М., Дрибинский А.В., Луковцев В.П. и др. Оценка состояния литиевых химических источников тока методом импедансной спектроскопии. *Электрохимическая энергетика*, 2010, т. 10, № 3, с. 128–132.
- [14] Сибатов Р.Т., Морозова Е.В., Костишко Б.М. и др. Модель аномальной диффузии для описания импеданса литий-ионного аккумулятора. *Известия высших учебных заведений. Электроника*, 2019, т. 24, № 4, с. 331–341. DOI: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2019-24-4-331-341>
- [15] Schweiger H.-G., Obeidi O., Komesker O., et al. Comparison of several methods for determining the internal resistance of lithium ion cells. *Sensors*, 2010, vol. 10, iss. 6, pp. 5604–5625. DOI: <https://doi.org/10.3390/s100605604>
- [16] Измеритель внутреннего сопротивления аккумуляторов. Модель: Yaorea YR1035+. Руководство по эксплуатации. URL: https://supereyes.ru/img/instructions/YAOREA_YR1035_plus_manual.pdf (дата обращения: 08.03.2022).

Меньшиков Ярослав Андреевич — технический директор ООО «Яростанмаш» (Российская Федерация, 119435, Москва, Малый Саввинский переулок, д. 9); старший инженер ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Меньшиков Я.А. Измерение эквивалентного последовательного сопротивления химических источников тока методом прерывания тока на заданное время. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2022, № 5 (104), с. 105–119. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-5-105-119>

**MEASURING THE EQUIVALENT SERIES RESISTANCE
OF CHEMICAL CURRENT SOURCES
BY THE CURRENT INTERRUPTION METHOD FOR A GIVEN TIME**

Ya.A. Menshikov

yarst@mail.ru

**Yarostanmash LLC, Moscow, Russian Federation
Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation**

Abstract

It is proposed to measure the equivalent series resistance of various chemical current sources by the method of periodic interruption of the charge current or of the discharge current for a given time period. The current interruption frequency and duration could be selected from a wide range of values. By changing the current interruption duration, it becomes possible to significantly vary conditions in measuring the equivalent series resistance. Thus, when the current is interrupted for 0.5 ms, the proposed method approaches the resistance measurement by the alternating current method with a frequency of 1000 Hz. With current interruption durations of 0.5 s or more, the method under consideration becomes equivalent to the direct current method. The proposed method allows measuring the resistance both once and periodically with a given repetition period. Based on the results obtained, dependences of the equivalent series resistance on the charge level of the chemical current source, its residual resource, temperature, and other parameters were plotted. The method obtains several

Keywords

Chemical current source, equivalent series resistance, battery, internal resistance

advantages, is easy to implement, misses errors inherent in other methods of measuring resistance and makes it possible to measure the equivalent series resistance directly in the process of charging and discharging the chemical current source under testing

Received 19.03.2022

Accepted 05.04.2022

© Author(s), 2022

REFERENCES

- [1] Romanov V.V., Khashev Yu.M. *Khimicheskie istochniki toka* [Chemical current sources]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1978.
- [2] Taganova A.A., Bubnov Yu.I., Orlov S.B. *Germetichnye khimicheskie istochniki toka* [Sealed chemical current sources]. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2005.
- [3] *Oborudovanie dlya testirovaniya KhIT* [Battery testing equipment for chemical current source]: *website* (in Russ.). Available at: <https://www.yarst.org> (accessed: 08.03.2022).
- [4] Tremblay O., Dessaint L.-A., Dekkiche A.-I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf.*, 2007, pp. 284–289. DOI: <https://doi.org/10.1109/VPPC.2007.4544139>
- [5] He H., Xiong R., Guo H., et al. Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles. *Energy Convers. Manag.*, 2012, vol. 64, pp. 113–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.04.014>
- [6] Tremblay O., Dessaint L.-A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. *World Electr. Veh. J.*, 2009, vol. 3, iss. 2, pp. 289–298. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj3020289>
- [7] Ramadesigan V., Northrop P.W.C., De S., et al. Modeling and simulation of lithium ion batteries from a systems engineering perspective. *J. Electrochem. Soc.*, 2012, vol. 159, no. 3, pp. 31–45. DOI: <https://doi.org/10.1149/2.018203jes>
- [8] He H., Xiong R., Fan J. Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *Energies*, 2011, vol. 4, iss. 4, pp. 582–598. DOI: <https://doi.org/10.3390/en4040582>
- [9] Stoynov Z.B., Grafov B.M., Savova-Stoynova B., et al. *Elektrokhimicheskiy impedans* [Electrochemical impedance]. Moscow, Nauka Publ., 1991.
- [10] Li S.E., Wang B., Peng H., et al. An electrochemistry-based impedance model for lithium-ion batteries. *J. Power Sources*, 2014, vol. 258, pp. 9–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.02.045>
- [11] Macdonald D.D. Reflections on the history of electrochemical impedance spectroscopy. *Electrochim. Acta*, 2006, vol. 51, iss. 8-9, pp. 1376–1388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.02.107>
- [12] Lukovtsev V.P., Rotenberg Z.A., Dribinskii A.V., et al. Estimating depth of discharge of lithium-thionyl-chloride batteries from their impedance characteristics. *Russ. J. Electrochem.*, 2005, vol. 41, no. 10, pp. 1097–1100. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11175-005-0187-8>

[13] Petrenko E.M., Dribinskiy A.V., Lukovtsev V.P., et al. Methodical maintenance impedance spectroscopy for lithium chemical power sources. *Elektrokhimicheskaya energetika* [Electrochemical Energetics], 2010, vol. 10, no. 3, pp. 128–132 (in Russ.).

[14] Sibatov R.T., Morozova E.V., Kostishko B.M., et al. Anomalous diffusion model for description of lithium-ion cell impedance. *Proceedings of Universities. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 4, pp. 331–341 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2019-24-4-331-341>

[15] Schweiger H.-G., Obeidi O., Komesker O., et al. Comparison of several methods for determining the internal resistance of lithium ion cells. *Sensors*, 2010, vol. 10, no. 6, pp. 5604–5625. DOI: <https://doi.org/10.3390/s100605604>

[16] Izmeritel' vnutrennego soprotivleniya akkumulyatorov. Model: Yaorea YR1035+. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Battery internal resistance meter. Model: Yaorea YR1035+. User manual] (in Russ.). Available at: https://supereyes.ru/img/instructions/YAOREA_YR1035_plus_manual.pdf (accessed: 08.03.2022).

Menshikov Ya.A. — Technical Director, Yarostanmash LLC (Malyi Savvinskiy pereulok 9, Moscow, 119435 Russian Federation); Senior Engineer, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Menshikov Ya.A. Measuring the equivalent series resistance of chemical current sources by the current interruption method for a given time. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2022, no. 5 (104), pp. 105–119 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-5-105-119>