

# Внутреннее сопротивление химических источников тока и его измерение

**Внутреннее сопротивление химических источников тока (ХИТ) — параметр, на который многие пользователи не обращают внимания. Однако его величина существенно влияет на работоспособность устройств с автономным питанием.**

**Александр Федоров,  
Станислав Сарапов**

office@megaron.su

**М**ногие радиостанции получали питание от батарей, состоящих из никель-кадмиевых аккумуляторов емкостью 700 мА·ч (типоразмер АА).

При замене деградировавшей батареи пользователь часто выбирает современные никель-металлгидридные аккумуляторы того же типоразмера, емкость которых достигает 2000–2200 мА·ч. Однако может оказаться, что продолжительность работы новых батарей (особенно при низкой температуре) значительно меньше ожидаемой. И объясняется это более высоким внутренним сопротивлением новых аккумуляторов, из-за чего при большом энергопотреблении в режиме передачи радиостанция отключается, хотя ее емкость еще не исчерпана.

Напряжение химического источника тока при разряде может быть записано в виде уравнения

$$U = \text{НРЦ} - IR = \text{НРЦ} - I(R_{\Omega} + R_{\text{пол}}),$$

где  $I$  — разрядный ток,  $R$  — полное сопротивление ХИТ,  $R_{\Omega}$  — чисто омическое сопротивление, определяемое сопротивлением токоподводящих деталей электродов, их активных масс и сопротивлением электролита,  $R_{\text{пол}}$  — поляризационное сопротивление, отражающее скорость электрохимических реакций. Сопротивление  $R_{\text{пол}}$  представляется сложной эквивалентной схемой, содержащей емкость двойного электрического тока, активное сопротивление переноса заряда и RC-цепочки, отражающие диффузионное сопротивление, адсорбционные процессы и другие особенности электрохимического процесса. Оно зависит от тока разряда.

Для оценки сопротивления ХИТ может использоваться регистрация его отклика на подачу импульса постоянного тока и на воздействие переменного тока в некотором диапазоне частот.

В первом случае при анализе отклика ХИТ на импульс постоянного тока можно оценить составляющие его полного сопротивления: на  $R_{\Omega}$  происходит мгновенное изменение напряжения,  $R_{\text{пол}}$  обеспечивает экспоненциальное изменение напряжения ХИТ до его нового стационарного состояния. Аппарату-

ра для таких измерений достаточно проста, проблема состоит только в способе и скорости регистрации отклика, а также в задании продолжительности периода регистрации.

Регистрация отклика на переменный синусоидальный сигнал дает более детальное представление о поляризационном сопротивлении и позволяет оценить все его составляющие. Отклик обычно представляется в виде годографа импеданса (на плоскости в координатах действительной и реактивной составляющих полного комплексного сопротивления).

Измерения производятся при последовательном тестировании на разных частотах из диапазона от десятков килогерц до сотых долей герца. Тестовый сигнал должен быть очень малым, что приводит к очень сложной аппаратурной реализации метода и делает его исключительно лабораторным.

## Оценка внутреннего сопротивления ХИТ как одной из его электрических характеристик

В настоящее время характеристика внутреннего сопротивления (импеданса) ХИТ должна обязательно включаться в список его технических характеристик. Стандарт МЭК и отечественный ГОСТ разрешают использовать оба описанных ранее метода измерения. Но они приводят к разным величинам параметра и необходимо понять, можно ли сравнивать характеристики сопротивления аналогичной продукции отечественных и зарубежных производителей.

Величина импеданса ХИТ, которая дается в каталогах зарубежных производителей, оценивается при измерениях на переменном токе частотой  $1000 \pm 100$  Гц (в течение 1–5 с). Сопротивление вычисляется по формуле

$$R_{1000 \text{ Гц}} = U_{\sim} / I_{\sim},$$

где  $I_{\sim}$  и  $U_{\sim}$  — переменный ток и напряжение с откликом на него источника тока. Переменный ток выбирается так, чтобы пиковое значение напряжения

не превышало 20 мВ. Для широкого спектра источников тока величина  $R_{1000 \text{ Гц}}$  соответствует их омическому сопротивлению  $R_{\Omega}$ .

В России характеристика внутреннего сопротивления ХИТ обычно измеряется при подаче импульса постоянного тока. Оценивается величина сопротивления

$$R = (U_1 - U_2) / (I_2 - I_1) \quad (1)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  — напряжения, которое регистрируется после пропуска тока  $I_1$  и  $I_2$  соответственно в течение регламентированных интервалов времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . В таблице указаны эти параметры для источников тока разных электрохимических систем.

Таблица

Источники тока	$I_1$	$I_2$	$\tau_1, \text{с}$	$\tau_2, \text{с}$
Щелочные				
Длительного разряда	0,2 $C_5$	2 $C_5$	10	3
Среднего и короткого разряда	0,5 $C_5$	5 $C_5$	10	3
Сверхкороткого разряда	1,0 $C_5$	10 $C_5$	10	3
Свинцово-кислотные	4,0 $C_{10}$	20 $C_{10}$	20	5
Литиевые	0,2 $C_5$	1 $C_5$	10	1

При такой методике измеренная величина включает кроме  $R_{\Omega}$  еще и поляризационное сопротивление. Она заметно больше величины  $R_{1000 \text{ Гц}}$ . А так как стационарное состояние источника тока к моменту  $\tau_2$  может и не достигаться, эта величина не всегда характеризует и полное сопротивление источника тока.

### Использование параметра внутреннего сопротивления при отработке технологии изготовления источников тока и диагностике их состояния

Измерения внутреннего сопротивления ХИТ могут быть использованы разработчиками при отработке технологии их изготовления. В этом случае наиболее полезной является информация о сопротивлении  $R_{\Omega}$ , так как она дает возможность лучше выявить все зависимости между конструктивными и технологическими параметрами и конечными характеристиками изделия. Такая информация помогает быстрее выбрать лучший сепарационный материал, определить допуски при дозировке электролита, оценить плотность сборки.

Для диагностики технического состояния ХИТ (степени разряженности, степени деградации, состояния после длительного хранения) в зависимости от природы источников тока разных электрохимических систем полезной может быть информация и об омическом сопротивлении, и о поляризационном.

У герметичных источников тока с водным электролитом (щелочных и свинцово-кислотных) осушение сепаратора в результате разбухания электродов и некоторых потерь воды, изменение плотности сборки электродов и деформация аккумуляторов в результате повышенного давления приводят к увеличению омического сопротивления. У литиевых источников тока этот эффект выражен меньше, а изменение поверхностной анодной пленки сказывается на поляризационном сопротивлении.

К сожалению, изменения параметров внутреннего сопротивления ХИТ в литерату-

ре обычно описывают только качественно. Из-за большого спектра используемых в разных приложениях источников тока, разнообразия их конструкций и технологий изготовления диагностика состояния ХИТ по величине их внутреннего сопротивления может стать возможной лишь при накоплении данных относительно конкретных источников тока [1], так как:

- разброс  $R_{\Omega}$  свежизготовленных ХИТ конкретного типа может быть соизмерим с изменением  $R_{\Omega}$  этого источника тока в процессе разряда; это в наибольшей степени касается отечественных аккумуляторов; разброс внутреннего сопротивления аккумуляторов ведущих зарубежных компаний, таких как SAFT, SANYO, PANASONIC, обычно не превышает 20%;
- изменения  $R_{\Omega}$  при изменении степени разряженности зависят от типа источника тока и его емкости;
- изменения  $R_{\Omega}$  при изменении степени разряженности и степени деградации различны у разных производителей;
- диагностика литиевых источников тока по их внутреннему сопротивлению затруднена из-за быстрой пассивации анода, а разброс сопротивления пассивной пленки значительно увеличивается со временем хранения.

Возможности диагностирования состояния литий-ионных аккумуляторов изучены плохо, но известно, что их омическое сопротивление в процессе разряда увеличивается мало, а пассивация их анодов разного состава соизмерима с пассивацией металлического литиевого анода в литиевых элементах.

Из сказанного следует, что определение состояния источника тока с неизвестной пред историей эксплуатации весьма проблематично. Однако при периодическом измерении  $R_{\Omega}$  ХИТ в процессе эксплуатации (при одинаковой высокой степени заряженности и температуре) можно прогнозировать его работоспособность. Обычно источники тока считаются работоспособными до тех пор, пока их фактическая разрядная емкость  $C_{\text{раз}}$  не станет менее 60–50% от номинальной емкости ( $C_{\text{н}}$ ). Зависимость  $C_{\text{раз}}$  и омического сопротивления в пределах этого периода эксплуатации достаточно точно описывается эмпирическим уравнением

$$C_{\text{раз}} R_{\Omega} = \text{const}$$

Поэтому, измерив омическое сопротивление  $R_{\Omega}$  используемого источника тока в начале эксплуатации, при периодических последующих его измерениях можно с достаточной точностью предсказывать реальную емкость ХИТ. И эта процедура занимает всего несколько секунд. Измерения сопротивления возможны и на работающих в буферном режиме батареях.

Выявление момента ускорения деградации источников тока позволяет своевременно принять меры по восстановлению их работоспособности или замене.

По скорости изменения сопротивления в течение срока службы можно судить и о правильности условий эксплуатации.

Сравнение величин  $R_{\Omega}$  аккумуляторов в составе батареи можно использовать для быстрого выявления «слабых». Деформация аккумуляторов или высыхание сепаратора приводит к значительному увеличению сопротивления относительно среднего его значения для всех аккумуляторов батареи.

### Аппаратура для измерений внутреннего сопротивления источников тока

В России до настоящего времени стандартизированной аппаратуры для измерений внутреннего сопротивления ХИТ на постоянном токе нет. А аппаратура для импедансных исследований очень дорога и используется только в исследовательских центрах.

Измерения сопротивления источников тока, которые реализованы в зарубежной диагностической аппаратуре для ХИТ небольшой емкости, привязаны к методике измерений на постоянном токе, но обычно не к стандарту, и потому разрешают вопрос только сравнительных испытаний однотипных источников тока.

В настоящее время, когда стала обязательной оценка характеристики внутреннего сопротивления выпускаемых источников тока, и вопросы диагностирования технического состояния массовой продукции требуют решения, необходима аппаратура, достаточно простая и универсальная, доступная как компаниям, производящим источники тока, так и сервисным службам.

В ООО «Мегарон» разработан тестер-анализатор внутреннего сопротивления химических источников тока, который осуществляет измерения сопротивления как постоянно току, так и переменному частотой 1 кГц.

Технические характеристики:

1.	Питание: элемент GF22 («Крона») или внешний источник	8–10 В 20 мА
2.	Напряжение тестируемого ХИТ, В	1–25
3.	Точность индикации напряжения, В	±0,01
4.	Диапазон измерения сопротивлений омической, поляризационной и полной составляющих, мОм	1–9999
5.	Диапазон измерения импеданса на 1000 Гц, мОм	1–999
6.	Точность измерений, % не хуже	2 (но не менее ± 1 младшего разряда)
7.	Тестовый сигнал постоянного тока	$I_1=62 \text{ мА}$ $\tau_1=10 \text{ с}$ $I_2=312 \text{ мА}$ $\tau_2=3 \text{ с}$
8.	Тестовый сигнал переменного тока, мА	35
9.	Время измерения всех параметров, сек	15
10.	Разряд ХИТ за одно измерение, мА/ч	0,43
11.	Измеритель защищен от неправильной полярности подключения ХИТ	
12.	Габаритные размеры, мм	125×67×25
13.	Вес, г	120

Внешний вид тестера показан на рисунке.

Временная диаграмма соответствует ГОСТу на щелочные аккумуляторы.

Омическое сопротивление, а также импеданс на частоте 1000 Гц измеряются в гальваностатическом режиме при токе разряда  $I_1$  в течение первых десяти секунд. За это время производится несколько измерений с усреднением

результатов. Полное сопротивление вычисляется в соответствии с формулой (1). Поляризационное сопротивление вычисляется как разница полного и омического сопротивлений.

Тестер обеспечивает точные измерения омического сопротивления и сопротивления на частоте 1000Гц, а полное и поляризационное сопротивление вычисляются при токах меньше регламентированных, однако и эти параметры могут использоваться для сравнительных оценок однотипных источников тока.

Результаты измерений (НРЦ, величины омического сопротивления, поляризационного и полного, импеданса при 1000 Гц) считываются поочередно с 4-разрядного дисплея.

Разработан измеритель позволяющий работать автономно и совместно с компьютером.

При подключении к компьютеру имеются дополнительные возможности:

- Автоматическая регистрация и сохранение параметров ХИТ.
- Ведение базы обслуживавшихся ХИТ
- Отбраковка ХИТ. Параметры по которым ведется отбраковка и их величины могут задаваться во всем рабочем диапазоне.
- При подключении внешнего зарядно-разрядного устройства снятие зависимостей измеряемых параметров от степени заряженности ХИТ.

Разрабатывается модификация тестера для измерения сопротивления герметизированных свинцово-кислотных батарей, которая дает возможность также и измерения тока короткого замыкания.

Разрабатываются модификации тестера:

- с подключением к компьютеру через COM-порт для мониторинга всех параметров сопротивления в процессе заряда-разряда;
- Пригодные для измерения сопротивления герметизированных свинцово-кислотных



Рисунок. Тестер для измерения внутреннего сопротивления источников тока

батарей, которые дают возможность также и измерения тока короткого замыкания.

Расширение диапазона обследуемых в соответствии со стандартом МЭК источников тока возможно при создании универсального стационарного прибора, где тестовый ток для измерений внутреннего сопротивления на постоянном токе будет задаваться в широком диапазоне, а временная его диаграмма будет соответствовать стандарту на любые источники тока. Изготовление такого прибора планируется в самое ближайшее время.

Авторы выражают благодарность А. А. Тагановой за помощь в подготовке материала.

#### Литература

1. Таганова А. А., Бубнов Ю. И., Орлов С. Б. Герметичные химические источники тока: элементы и аккумуляторы, оборудование для испытаний и эксплуатации. СПб: Химиздат. 2005.
2. Таганова А. А., Пак И. А. Герметичные химические источники тока для портативной аппаратуры: Справочник. СПб: Химиздат. 2003.
3. Таганова А. А., Бубнов Ю. И. Герметичные химические источники тока: элементы и аккумуляторы, способы и устройства заряда. СПб: Химиздат. 2002.