

УДК 621.355.1

## К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА (ХИТ)

В. И. Косюк, И. Б. Широков

Севастополь, Украина

Поступила в редакцию 28.11.08 г.

Проведен анализ существующих способов измерения внутреннего сопротивления химических источников тока (ХИТ). Отмечены их недостатки. Рассмотрен способ измерения полного внутреннего сопротивления ХИТ, основанный на анализе переходных характеристик заряда от него конденсатора известной емкости.

The analysis of existing methods of measurement of internal resistance of chemical current sources (CCS) was carried out. Their shortcomings were noted. The method of measurement of full internal resistance the CCS based on the analysis of transient characteristics of a charge from it of the condenser of known capacity is considered.

Внутреннее сопротивление химического источника тока (ХИТ) является одной из важных его характеристик. Величина этого сопротивления определяет такие параметры источника, как максимальный ток нагрузки, тепловые потери, емкость и т. п.

Перед вводом ХИТ в эксплуатацию необходимо определить его внутреннее сопротивление. Знание этой величины позволит пользователю спроектировать оптимальную энергопотребляющую систему, которая позволит реализовать максимальный срок службы ХИТ, с одной стороны, и обеспечить требуемые качественные характеристики самой системы, с другой.

Проблеме установления зависимости между емкостью ХИТ и его внутренним сопротивлением посвящено много работ [1–5]. Причем, как утверждают авторы [1], зависимость емкости ХИТ и его внутреннего сопротивления достаточно точно описывается эмпирическим уравнением

$$C_{\text{раз}}R_{\text{ом}} = \text{const}, \quad (1)$$

где  $R_{\text{ом}}$  — омическое сопротивление ХИТ;  $C_{\text{раз}}$  — остаточная емкость ХИТ.

Авторы предполагают, что, измерив омическое сопротивление  $R_{\text{ом}}$  исследуемого источника тока в начале эксплуатации и при периодических последующих его исследованиях, можно с достаточной точностью предсказывать реальную емкость ХИТ.

С другой стороны, величина внутреннего сопротивления ХИТ, которая дается в каталогах зарубежных производителей, оценивается путем измерений на переменном токе частотой  $1000 \pm 100$  Гц в течение 1–5 с. При этом величина внутреннего сопротивления ХИТ вычисляется по формуле [1]

$$R_{1000 \text{ Гц}} = U_{\sim}/I_{\sim}, \quad (2)$$

где  $I_{\sim}$  — переменный ток, пропускаемый через ХИТ;  $U_{\sim}$  — переменное напряжение на ХИТ, являющееся откликом на пропускаемый ток.

Переменный ток выбирается таким образом, чтобы пиковое значение переменного напряжения не превышало 20 мВ. Для широкого спектра источников тока величина  $R_{1000 \text{ Гц}}$  соответствует их омическому внутреннему сопротивлению  $R_{\text{ом}}$ .

Как утверждают авторы [1], характеристика внутреннего сопротивления ХИТ измеряется подачей импульса постоянного тока. При этом оценивается величина сопротивления по следующей формуле:

$$R = (U_1 - U_2)/(I_2 - I_1), \quad (3)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  — напряжения, которые регистрируются после пропускания токов  $I_1$  и  $I_2$  соответственно в течение регламентированных интервалов времени  $t_1$  и  $t_2$ .

Проведение измерений внутреннего сопротивления по приведенной выше методике предполагает включение, помимо  $R_{\text{ом}}$ , еще и поляризационного сопротивления. Величина этого поляризационного сопротивления заметно больше, чем  $R_{1000 \text{ Гц}}$ . А поскольку ток к моменту времени  $t_2$  может и не достигать своего стационарного состояния, измеренная величина не всегда характеризует полное внутреннее сопротивление источника тока. Таким образом, получается полная неопределенность в определении сопротивления ХИТ.

В то же время в работе [2] описан другой способ определения внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи (АКБ), по которому измеряют ЭДС и напряжение на АКБ при отсутствии тока и фиксированной величине переменного тока со скважностью, равной двум. Этот ток формируется за счет наложения на постоянный разрядный ток батареи униполярных прямоугольных импульсов зарядного тока. При этом по полученным данным

вычисляется сопротивление  $r_0$  по следующей формуле:

$$r_0 = \sqrt{[K_\Phi \cdot (E - U)/I]^2 - (2\pi f L)^2}, \quad (4)$$

где  $K_\Phi$  — коэффициент формы переменного импульсного тока батареи;  $E$  — ЭДС АКБ;  $U$  — напряжение на АКБ при разряде;  $L$  — индуктивность батареи при частоте переменного тока  $f$ , равной 10 кГц.

Ток  $I$  определяется следующей формулой:

$$I = K_\Phi I_H, \quad (5)$$

где  $I_H$  — расчетный ток нагрузки батареи.

Описанный способ обладает рядом существенных недостатков. Во-первых, при таком подходе требуются большие энергетические затраты, так как для получения малой погрешности измерения емкости АКБ её необходимо нагружать на очень малое нагруженное сопротивление (для получения существенной разницы между ЭДС и напряжением при нагрузке  $E - U$ ), что является нежелательным. Во-вторых, нагруженное сопротивление нужно включать на очень малое время, так как иначе произойдет разряд АКБ и возможен выход из строя нагруженного сопротивления из-за его перегрева. В-третьих, согласно формулам (3) и (4), для расчета  $r_0$  необходимо знать значение индуктивности  $L$  АКБ, что требует проведения дополнительных измерений. Наконец, внутреннее сопротивление АКБ имеет сложный характер и включает в себя непосредственно внутреннее сопротивление АКБ  $r_0$  и поляризационное сопротивление  $r_\Pi$ , которые проявляются при различных токах заряда или разряда [3, 4], а описанный способ позволяет определить только  $r_0$ , т. е. является функционально ограниченным.

В работе [5] описан способ измерения сопротивления короткого замыкания ХИТ. По данному способу предполагается осуществление разряда измеряемого источника тока на конденсаторную нагрузку. При этом фиксируют изменение напряжения на конденсаторе ( $U_C$ ) и строят кривую зависимости этого напряжения от времени и, далее, выбирая на кривой любую точку до значения напряжения, равного 0.8  $E_{\text{ХИТ}}$ , по координатам этой точки вычисляют сопротивление КЗ. Однако по описанному способу можно определить только  $r_0$ , т. е. данный способ также является функционально ограниченным и довольно трудоемким и долговременным, несмотря на то, что максимальное время процесса заряда конденсатора составляет доли секунды. Кроме этого описанный способ определения  $r_0$  имеет ограничения по выбору рабочей точки на

кривой ( $U_C/E < 0.8$ ). Такой подход нельзя считать оптимальным.

Как известно [3, 4], сопротивление поляризации  $r_\Pi$  при увеличении тока уменьшается. При больших зарядных или разрядных токах внутреннее сопротивление ХИТ будет стремиться к постоянной величине, численно равной омическому сопротивлению  $r_0$  ХИТ. Если к ХИТ подсоединить конденсатор, то ток в цепи конденсатора будет изменяться от максимального до нуля и соответственно внутреннее сопротивление ХИТ будет изменяться от  $r_0$  до  $(r_0 + r_\Pi)$ . При этом кривая заряда конденсатора от ХИТ будет представлять собой сумму двух экспоненциальных зависимостей [6]. Первая зарядная характеристика (быстрая), обусловленная большим начальным током заряда конденсатора, будет характеризоваться постоянной времени  $\tau_1$ :

$$\tau_1 = r_0 C, \quad (6)$$

где  $C$  — емкость заряжаемого конденсатора.

Напряжение на конденсаторе будет меняться согласно следующему уравнению [7]:

$$U_{\text{зар}} = E_0 \left(1 - e^{-t/\tau_1}\right), \quad (7)$$

где  $t$  изменяется от 0 до  $t_1$ ,  $E_0$  — напряжение на ХИТ.

Вторая зарядная характеристика (медленная) будет характеризоваться постоянной времени  $\tau_2$ :

$$\tau_2 = (r_0 + r_\Pi) C. \quad (8)$$

И напряжение на конденсаторе будет меняться согласно следующему уравнению [7]:

$$U_{\text{зар}} = E_0 \left(1 - e^{-t/\tau_2}\right), \quad (9)$$

где  $t$  изменяется от  $t_1$  до  $t_2$ .

Тогда, по формуле

$$n_1 \tau_1 = n_1 r_0 C = t_1, \quad (10)$$

где  $n_1$  — количество постоянных времени  $\tau_1$ , соответствующих моменту времени  $t_1$ , можно определить значение  $r_0$ :

$$r_0 = t_1/n_1 C. \quad (11)$$

На рис. 1 показана структурная схема для измерения сопротивления ХИТ. На рис. 2 представлены составляющие зарядной характеристики конденсатора. На рис. 3 представлена суммарная зарядная характеристика конденсатора от измеряемого ХИТ. На рис. 4 представлена осциллограмма реальной характеристики заряда конденсатора от стартерного свинцового аккумулятора с номинальной емкостью  $Q = 60 \text{ А}\cdot\text{ч}$ , а на рис. 5 — та же самая осциллограмма с растянутым начальным участком.

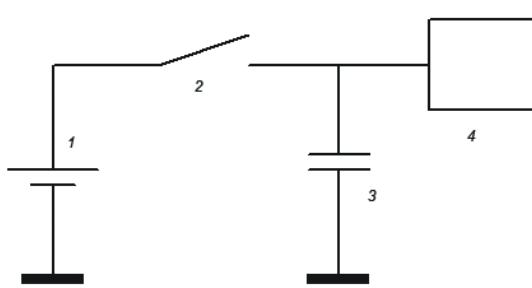


Рис. 1. Схема измерений внутреннего сопротивления ХИТ: 1 — измеряемый ХИТ; 2 — близиэнерционный ключ на замыкание цепи с малым переходным сопротивлением; 3 — конденсатор известной емкости, заряжаемый от измеряемого ХИТ; 4 — запоминающий осциллограф

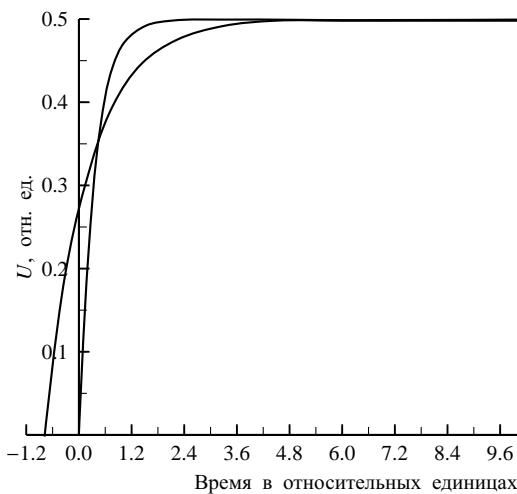


Рис. 2. Составляющие характеристики заряда конденсатора от химического источника тока

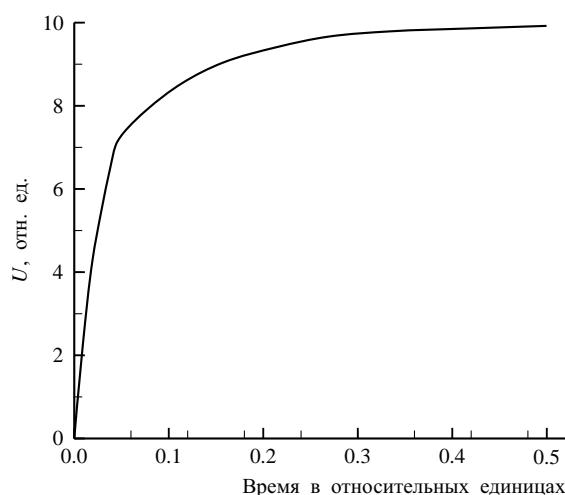


Рис. 3. Суммарная характеристика заряда конденсатора от химического источника тока

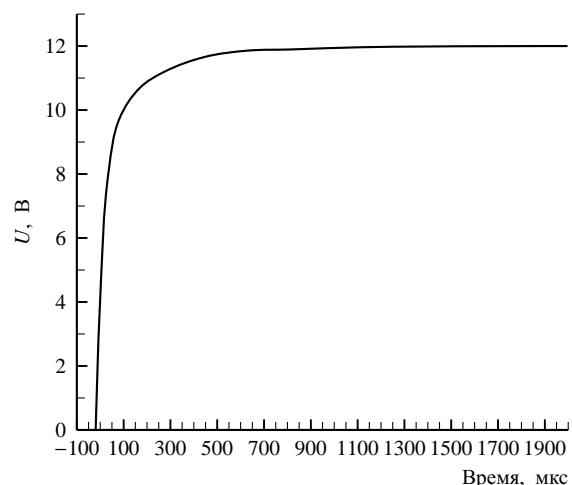


Рис. 4. Осциллограмма характеристики заряда конденсатора от стартерного свинцового аккумулятора

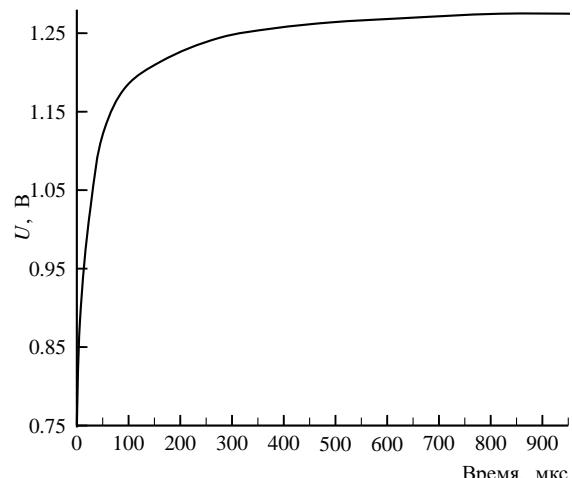


Рис. 5. Осциллограмма характеристики заряда конденсатора от стартерного свинцового аккумулятора с растянутым начальным участком

При достижении уровня заряда конденсатора, примерно до величины  $0.7 E_{ХИТ}$ , начинает включаться поляризационное сопротивление  $r_{П}$  и ток заряда значительно уменьшается. Анализируя кривые, приведенные на рис. 3 и рис. 4, можно утверждать, что при уровне заряда конденсатора, равном  $0.9 E_{ХИТ}$ , поляризационное сопротивление полностью включено. Исходя из этого, составляем следующую систему уравнений для принятых значений уровня заряда конденсатора:

$$\begin{cases} t_2 + \Delta t = n_2 RC, \\ t_3 + \Delta t = n_3 RC, \end{cases} \quad (12)$$

где

$$R = r_0 + r_{П}. \quad (13)$$

Решение системы уравнений (11) относительно  $R$  дает следующее значение:

$$R = (t_3 - t_2)/(n_3 - n_2) C. \quad (14)$$

Исходя из формулы (12), однозначно определяем  $r_{\Pi}$ .

Значения уровня заряда конденсатора заряжаемого от измеряемого ХИТ в зависимости от  $n$  определяются следующей формулой [7]:

$$U = E_0 (1 - e^{-n}), \quad (15)$$

где  $n = t/\tau$ ,  $t$  — время заряда конденсатора до заданного уровня,  $\tau$  — постоянная времени заряда конденсатора.

Подставим значения  $n$  для некоторых значений  $U$ :

$U$	0.22	0.30	0.39	0.50	0.63	0.70	0.77	0.80	0.86	0.90	0.92	0.95	0.96
$n$	0.25	0.37	0.50	0.70	1.00	1.20	1.50	1.60	2.00	2.30	2.50	3.00	3.20

Если выбрать время заряда конденсатора, соответствующее значениям  $U$ , равным 0.39; 0.90 и 0.95, что достигается при следующих значениях  $n$ :  $n_1 = 0.50$ ;  $n_2 = 2.30$  и  $n_3 = 3.00$ , то выражения (5) и (13) можно записать в следующем виде:

$$r_0 = 2t_1/C, \quad (16)$$

$$R = (t_3 - t_2)/0,7C. \quad (17)$$

Таким образом, измерив время заряда конденсатора известной емкости от измеряемого ХИТ в трех точках, заданных по уровню напряжения заряда, можно вычислить внутреннее сопротивление ХИТ  $r_0$ , поляризационное сопротивление  $r_{\Pi}$  и сумму этих сопротивлений  $R = (r_0 + r_{\Pi})$ . Такой подход к проблеме определения внутреннего сопротивления ХИТ представляется более полным. Он позволит учесть наличие поляризационного сопротивления  $r_{\Pi}$ , что особенно важно при эксплуатации ХИТ с переменными токами нагрузки.

На рис. 6, 7 представлены осциллограммы реальной характеристики заряда конденсатора от щелочного элемента типа R6, на рис. 8, 9 — осциллограммы реальной характеристики заряда конденсатора от литиевого элемента. Как видно из осциллограмм, приведенных на рис. 6–9, поляризационное сопротивление  $r_{\Pi}$  для этих типов ХИТ начинает включаться при уровнях заряда конденсатора меньших  $0,7E_{\text{ХИТ}}$ .

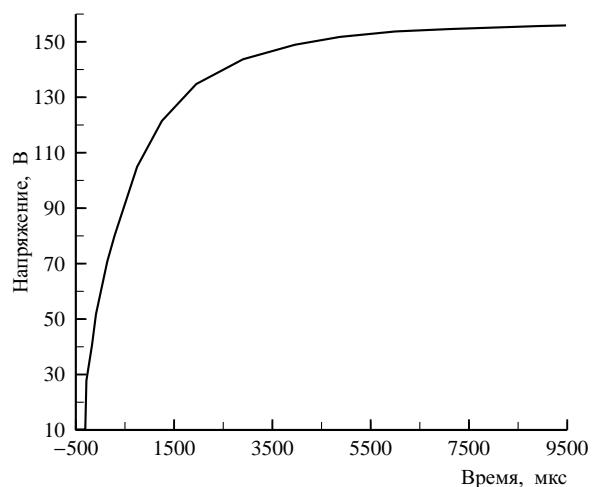


Рис. 6. Осциллограмма характеристики заряда конденсатора от щелочного элемента типа R6

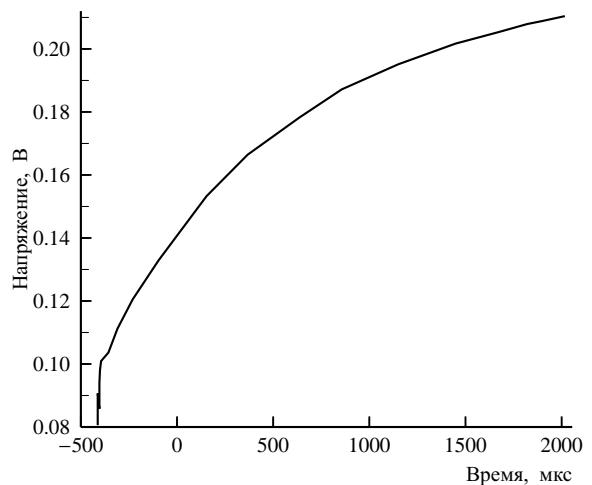


Рис. 7. Осциллограмма характеристики заряда конденсатора от щелочного элемента типа R6 с растянутым начальным участком

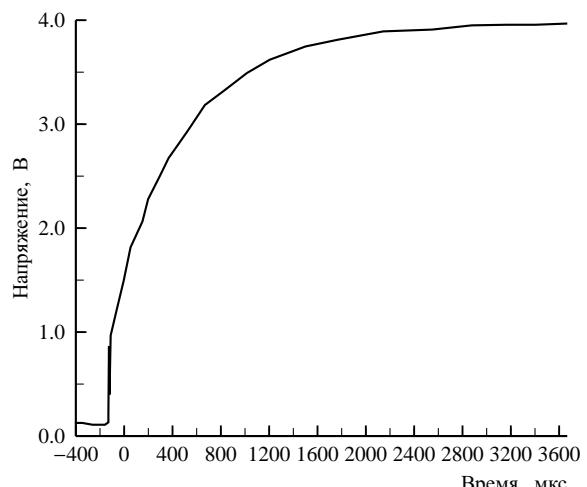


Рис. 8. Осциллограмма характеристики заряда конденсатора от литиевого элемента

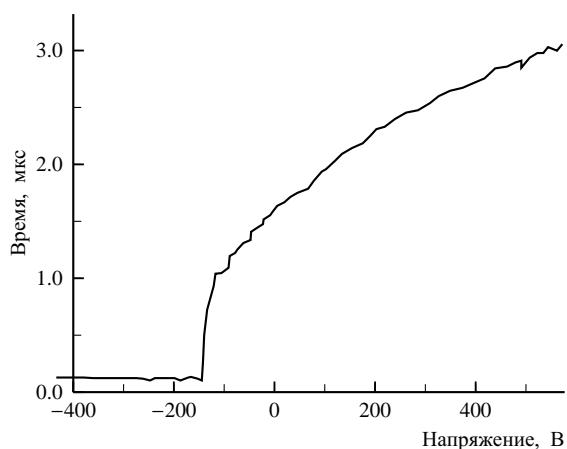


Рис. 9. Оциллограмма характеристики заряда конденсатора от литиевого элемента с растянутым начальным участком

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. А.с. 1742908 СССР? G03015/00. Способ определения внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи.
3. Романов В. В., Хашев Ю. М. Химические источники тока. М.: Советское радио, 1978. 264 с.
4. Вайлов А. М., Эйгель Ф. И. Автоматизация контроля и обслуживания аккумуляторных батарей. М.: Связь, 1975. 87 с.
5. А. с. 547878 СССР, G03015/00. Способ измерения сопротивления короткого замыкания химического источника тока.
6. Пат. 2328012 Россия, G03015/00. Способ измерения сопротивления химических источников тока.
7. Зельдович Я. Б., Яглом И. М. Высшая математика для начинающих физиков и техников. М.: Наука, 1982.