

## СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ТОКА

С.В. Ольховиков

(Харьковский университет Воздушных Сил)

*Получение эквивалентной схемы замещения химического источника тока. И получение передаточной функции аккумулятора.*

*эквивалентная схема, химический источник тока, передаточная функция аккумулятора*

**Постановка проблемы.** Техническое состояние аккумулятора может быть установлено частотными методами, с помощью которых возможно определить параметры химического источника тока и тем самым найти его остаточную емкость. В литературе [1] известны частотные методы определения параметров электрических схем. Независимо от вида схемы ее сопротивление  $Z$  в общем случае может быть представлено рациональной функцией комплексного переменного  $p$ . В самом общем случае такая функция может быть представлена в виде

$$Z(p) = (a_0 + a_1 p + \dots + a_n p^n) / (b_0 + b_1 p + \dots + b_m p^m); \quad m > n. \quad (1)$$

Положив в (1)  $p = j\omega$ , где  $j = \sqrt{-1}$  и выполнив измерения на некоторой частоте  $\omega_i$ , можно получить экспериментальное значение комплексного сопротивления  $Z_i = Z_{gi} + jZ_{mi}$ . Очевидно, что  $Z_i$ , должно равняться правой части соотношения (1). Выполнив измерения на частотах, количество которых равно  $m$ , т.е. равно числу неизвестных, можно получить систему алгебраических уравнений для расчета коэффициентов  $a$ ,  $b$ , входящих в соотношение (1). Таким образом, зная вид и порядок функции  $Z$ , возможно определить параметры химического источника тока, комбинации которых образуют значения коэффициентов  $a$  и  $b$ .

**Обзор литературы.** Известны схемы замещения аккумуляторных батарей, описанные в [2 – 9]. Так в [2] схема замещения аккумулятора представлена в виде последовательно соединенных резистора  $R$ , индуктивности  $L$  и цепи параллельно включенных резистора  $r$  и конденсатора  $C$ . Здесь же приведено и выражение для определения операторного сопротивления предложенной схемы замещения. Это выражение представлено соотношением

$$Z(p) = (p^2 C R r + p(L + CRr) + (R + r)) / (pCr + 1). \quad (2)$$

В [3] эквивалентная электрическая схема химического источника тока

представлена в виде последовательно или параллельно включенных емкостей. При этом для параллельной схемы включения приводятся следующие соотношения

$$R_p = R_s \frac{1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2}{\omega^2 C_s^2 R_s^2}; \quad C_p = \frac{C_s}{1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2}, \quad (3)$$

а для последовательной схемы включения рекомендуются такие формулы

$$C_s = C_p \frac{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2}{\omega^2 C_p^2 R_p^2}; \quad R_s = \frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2}. \quad (4)$$

Вместе с тем ни в [2], ни в [3] не приводятся сведения, с помощью которых можно было бы обосновать целесообразность использования предложенных схем замещения. Это, естественно, ограничивает возможность применения результатов, изложенных в [2, 3]. В [4] предлагается определять операционный импеданс  $Z(s)$  как отношение изображения перенапряжения  $u(s)$  к изображению тока  $i(s)$ , т.е. использовать следующее соотношение

$$Z(S) = \frac{u(S)}{i(S)}. \quad (5)$$

В [4] приведены экспериментальные результаты определения операционного импеданса и показано, что  $Z(s)$  возможно использовать для оценки степени заряда свинцово-кислотного аккумулятора. Соглашаясь с подходом, примененным авторами [4] к определению  $Z(s)$ , следует, вместе с тем, отметить, что в этой работе не раскрыт вид соотношения для  $Z(s)$ .

В [5] схема замещения представлена источником тока, в цепь которого включены последовательно внутреннее сопротивление  $r$ , и параллельная  $R_0$ ,  $C_0$  цепочка, параллельно которой включено  $R_i$ ,  $C_i$  релаксационных звеньев. В этой схеме сопротивление  $R_0$  обуславливает саморазряд, емкость  $C_0$  определяет геометрическую емкость аккумулятора, а релаксационные звенья эквивалентируются линией с распределенными параметрами и описывают поляризационные явления, происходящие в химическом источнике тока. По результатам экспериментальных исследований авторы работы [5] устанавливают зависимости напряжения от времени заряда для различных значений тока заряда, а также устанавливают взаимосвязь емкости от тока заряда и сопоставляют расчетные значения токов и напряжений, полученные в результате решения системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы в эквивалентной схеме, с экспериментальными данными. Однако полученные в [5] результаты слабо отражают связь между найденными значениями токов и напряжений и параметрами аккумулятора. В [6], основываясь на результатах экспериментальных исследований, предлагается эквивалентная схема, импеданс которой  $Z$  может быть представлен параллельным соединением емкости

двойного электрического слоя  $C_d$  и сопротивления реакции  $R_F$ . В [6] приводятся соотношения для определения действительной  $R_e(Z)$  и мнимой  $I_m(Z)$  составляющих импеданса. Эти зависимости имеют вид

$$R_e(Z) = \frac{R_F}{1 + \omega^2 C_d^2 R_F^2}; \quad I_m(Z) = \frac{\omega^2 C_d R_F^2}{1 + \omega^2 C_d^2 R_F^2}. \quad (6)$$

Предложенные в [6] соотношения позволяют определить электропроводность активной массы и контактное сопротивление границы раздела активная масса – токосъем. Однако при измерении импеданса аккумулятора результаты исследований существенно искажаются в виду очень низких значений измеряемых величин из-за влияния индуктивности подводящих проводов и токосъемов, а также из-за наличия паразитных емкостей. В [7] для устранения негативных явлений свойственных схемам, описанным в [6], а также для устранения неконтролируемой поляризации электродов последовательно с исследуемым химическим источником тока рекомендуется конденсатор, емкость которого потом учитывать при расчетах активной и реактивной составляющих импеданса. Вместе с тем, в [7], также как и в других работах, не обосновывается правомерность использования эквивалентной схемы замещения. В [8] эквивалентная схема замещения строится на основании уравнений, описывающих катодные и анодные процессы в аккумуляторе. Схема замещения позволяет учесть кинетику электродных процессов. Основным недостатком предложенного авторами [8] подхода заключается в том, уравнения, на базе которых получена схема замещения, не учитывают процессов саморазряда. Авторами [9] учтены процессы саморазряда химических источников тока. Однако здесь выполнена только качественная оценка этих процессов, с помощью которой трудно получить конкретные количественные показатели для определения степени разряда аккумулятора.

**Целью** настоящего исследования является получение схемы замещения химического источника тока, с помощью которой возможно исследовать не только кинетику электродных процессов с учетом явлений саморазряда, но и получить количественную оценку степени заряженности аккумулятора.

**Основной материал.** Для достижения поставленной цели прежде всего найдем передаточную функцию химического источника тока. Для этого используем уравнение равновесия напряжений в электрической цепи, образованной в процессе заряда (разряда) аккумулятора, и найдем связь между составляющими, входящими в это уравнение, и параметрами аккумулятора. Уравнение равновесия напряжений представим в виде:

$$U = E_p + E_n + I r_0, \quad (7)$$

где  $U$  – напряжение на зажимах аккумулятора;  $E_p$  – равновесная ЭДС;  $E_n$  – ЭДС поляризации;  $I$  – ток;  $r_0$  – внутреннее сопротивление.

Аккумулятор как элемент электрической цепи характеризуется зависимостью напряжения на его зажимах от режима работы и температурных условий. Режим работы аккумулятора зависит от величины тока и длительности его протекания. При составлении схемы замещения необходимо выяснить зависимость каждой из составляющих, входящих в уравнение (7), от величины тока и времени. Для получения искомой зависимости воспользуемся данными, приведенными в [10] по свинцово-кислотным аккумуляторам, разряженным при разных температурах и в разных режимах. Эти данные изложены в табл. 1. Емкости в этой таблице выражены в процентах к 5-часовому разряду при температуре, равной 27 °С. Все емкости выражены в табл. 1 в ампер-часах. В связи с этим, все емкости можно заменить на токи  $I = Q/T$ , что и сделано в табл. 2. Нижняя часть этой таблицы, отчеркнутая ломаной линией, относится к аномальным значениям токов. Аномальность проявляется в отклонении от общей закономерности, в соответствии с которой чем меньше время разряда  $T$ , тем большим при неизменной температуре должен быть ток  $I$ . Данные, приведенные в табл. 1 и 2, показывают, что емкость аккумулятора зависит от величины тока. Покажем, что и равновесная ЭДС аккумулятора зависит от величины тока.

В соответствии с уравнением Нернста величина равновесной ЭДС  $E_p$  определяется из соотношения

$$E_p = E_0 + \frac{RT}{F} \ln \frac{a_{H_2SO_4}}{a_{H_2O}}, \quad (8)$$

где  $E_0$  – стандартное значение ЭДС;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $F$  – число Фарадея;  $a_{H_2SO_4}$ ,  $a_{H_2O}$  – активности серной кислоты и воды.

Таблица 1

Относительная емкость свинцово-кислотных аккумуляторов при различных режимах разряда и температурах

Температура, °С	Время разряда, ч									
	10	5	3	2	1	2/3	1/2	1/3	1/6	1/12
	Конечное напряжение, В									
	1,77	1,75	1,73	1,71	1,64	1,6	1,54	1,46	1,26	0,95
27	120	100	88	78	65	58	53	46	38	30
10	95	78	68	60	49	44	40	35	29	23
0	79	65	56	50	41	37	33	29	23	18
– 10	64	52	45	40	32	28	26	22	17	13
– 20	50	40	34	30	24	21	18	15	11	6
– 30	36	28	23	20	15	13	11	8	4	–
– 40	23	17	13	10	6	4	3	1	–	–
– 50	11	5	2	0	–	–	–	–	–	–

Токи разрядов (А) свинцово-кислотных аккумуляторов, вычисленные по данным табл. 1

Тем пер., °С	Время разряда, ч									
	10	5	3	2	1	2/3	1/2	1/3	1/6	1/12
27	12	20	29,33	39	65	87	106	138	228	360
10	9,5	15,6	22,67	30	49	66	80	105	174	276
0	7,9	13	18,67	25	41	55,5	66	87	138	216
-10	6,4	10,4	15	20	32	42	52	66	102	156
-20	5	8	11,33	15	24	31,5	36	45	66	72
-30	3,6	5,6	7,67	10	15	19,5	22	24	24	-
-40	2,3	3,4	4,33	5	6	6	6	3	-	-
-50	1,1	1,0	0,67	0	-	-	-	-	-	-

Активности серной кислоты и воды зависят от концентрации раствора

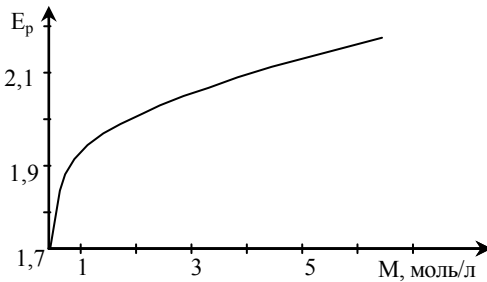


Рис. 1. Зависимость равновесной ЭДС свинцового аккумулятора от концентрации раствора электролита

электролита, которая, в свою очередь, связана с величиной тока, проходящего через аккумулятор. Зависимость равновесной ЭДС от концентрации раствора электролита приведена на рис. 1.

Известно, что при отдаче количества электричества, равного 1 Ач, происходит превращение 3,66 г серной кислоты и 0,57 г воды. В процессе заряда аккумулятора количество серной кислоты и количество воды в растворе электролита можно вычислить, используя следующие соотношения:

$$P_{\text{H}_2\text{SO}_4} = P_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\circ} + 3,66 \int_0^t idt; \quad P_{\text{H}_2\text{O}} = P_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} - 0,67 \int_0^t idt, \quad (9)$$

где  $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ ,  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  – текущее количество серной кислоты и воды в растворе;  $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\circ}$ ,  $P_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ}$  – начальное количество серной кислоты и воды в растворе электролита.

Количество молей раствора серной кислоты определяется выражением

$$M_p = \frac{1000 \cdot P_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{M_{\text{H}_2\text{SO}_4} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}}}. \quad (9)$$

Принимая  $M_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 98$  и учитывая (9), получим

$$M_p = \frac{10,2 \cdot (P_{\text{H}_2\text{SO}_4}^\circ + 37,3 \int_0^t idt)}{P_{\text{H}_2\text{O}}^\circ - 0,67 \cdot \int_0^t idt}. \quad (10)$$

В паспортных данных на аккумуляторную батарею указывается количество и плотность заливаемого электролита. По этим данным с помощью справочных таблиц плотности растворов серной кислоты можно определить величины  $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}^\circ, P_{\text{H}_2\text{O}}^\circ$ .

Таким образом, используя выражение (10), можно для аккумулятора любой емкости найти зависимость числа молей раствора электролита от количества прошедшего через аккумулятор электричества:

$$M_p = f(Q),$$

$$\text{где } Q = \int_0^t idt.$$

На основании данных, приведенных в табл. 1 и 2, и, исходя из соотношений (8) – (10), проведен расчет величины равновесной ЭДС для различных значений плотности электролита  $\rho$ . Результаты расчета представлены на рис. 2. По результатам расчета можно сделать вывод о том, что в рабочем диапазоне разрядных емкостей равновесная ЭДС линейно связана с количеством прошедшего через аккумулятор электричества:

$$E_p = E_0 + \alpha_p \int_0^t idt. \quad (11)$$

Стандартное значение ЭДС  $E_0$  определяется плотностью электролита и в диапазоне плотностей  $\rho$  от 1,2 до 1,34 г/см<sup>3</sup> эта зависимость аппроксимируется соотношением  $E_0 = 0,32 + 1,43\rho$ . Коэффициент  $\alpha_p$  в (11) определяется объемом электролита, поскольку в рабочем диапазоне плотностей зависимостью  $\alpha_p$  от  $\rho$  можно пренебречь, о чем свидетельствуют прямолинейные участки характеристик, приведенных на рис. 2. Таким образом для определения зависимости  $\alpha_p$  от объема электролита  $V$  используем соотношение

$$\alpha_p = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{V}.$$

Для установления связи между ЭДС поляризации и током, проходящим через аккумулятор, рассмотрим связь между потенциалами электродов и изменением концентрации, имеющим место при прохождении тока через аккумулятор. Сдвиг потенциала электрода в соответствии с уравнением

Нернста является следствием концентрационных изменений. Тем самым потенциал электрода определяется новым значением концентраций реагирующих веществ. Используя соотношение (5), полученное автором в [11] и введя понятие оператора дифференцирования  $\frac{d}{dt} = p$ , т.е. применяя преобразование Лапласа по переменной  $t$  к правой и левой части соотношения (5) [11], получим дифференциальное уравнение второго порядка, описывающее закономерности изменения концентрации, т.е. уравнение вида

$$D \frac{\partial^2 c(x,p)}{\partial x^2} - pC(x,p) = -C_0. \quad (12)$$

Решение (12) представим в виде

$$C(x,p) = A_1 e^{\sqrt{\frac{p}{D}}x} + A_2 e^{-\sqrt{\frac{p}{D}}x} + \frac{C_0}{p}. \quad (13)$$

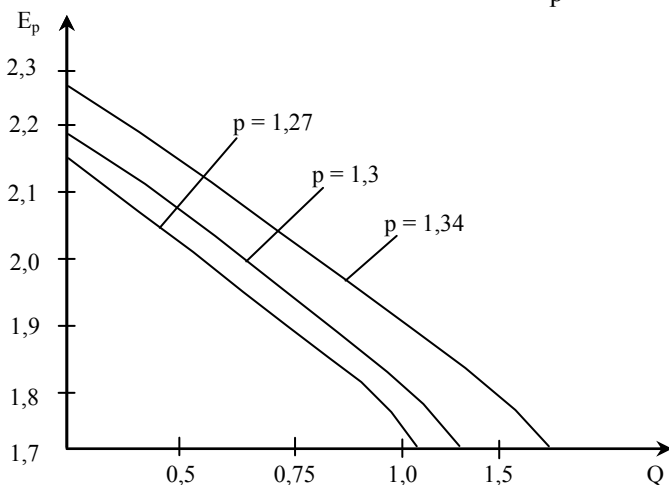


Рис. 2. Зависимость равновесной ЭДС от емкости химического источника тока при разряде

Для определения постоянных интегрирования  $A_1$  и  $A_2$  используем значения начальных условий  $C'(x,0)$  и  $C(x,0)$ . Поскольку до включения электрической цепи состояние было равновесным, постольку  $C(x,0) = C_0$ . В соответствии с (8) [11] градиент концентрации у поверхности электрода

$$\left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x=0} = \frac{\mathfrak{I}}{nFD}.$$

Полагая, что  $C(x,0) = C(\infty,p) = C_0$ , и исходя из равновесности установившегося режима, получим, что  $A_1 = 0$ .

Для определения  $A_2$  найдем  $\frac{\partial c(x, p)}{\partial x}$  из (13):

$$\frac{\partial c(x, p)}{\partial x} = -A_2 \sqrt{\frac{p}{D}} e^{-\sqrt{\frac{p}{D}} x}. \quad (14)$$

Формула (14) получена с учетом того, что ранее найдено значение  $A_1$ , равное нулю. Из (14), найдем, что

$$A_2 = -\frac{\mathfrak{Z}(p)K \sqrt{D}}{nFK \sqrt{p}} = \frac{-I(p)}{nFK \sqrt{pD}} = -\Psi(p) \frac{1}{\sqrt{p} \sqrt{D}}, \quad (15)$$

где  $\Psi(p) = -\frac{I(p)}{nFK}$ ,  $I(p) = \mathfrak{Z}(p) \cdot K$ .

Для перехода от изображений к оригиналам используем теорему Бореля и учтем, что нас интересует закономерность изменения концентрации у поверхности электрода, т.е. при  $x = 0$ . Поскольку из (13) и (15) следует, что при  $x = 0$

$$C(0, p) = \frac{C_0}{p} - \Psi(p) \frac{1}{\sqrt{D} \sqrt{p}}, \quad (16)$$

то  $F_1(p) = \Psi(p)$ , а  $F_2(p) = \frac{1}{\sqrt{p} \sqrt{D}}$ .

Следуя теореме Бореля, запишем, что

$$F_1(p) \cdot F_2(p) = \int_0^t f_1(\tau) f_2(t - \tau) d\tau. \quad (17)$$

Пользуясь таблицей изображений функций, найдем, что изображению  $\sqrt{\frac{1}{pD}}$  соответствует оригинал  $\frac{1}{\sqrt{D}} t^{-1/2} / \Gamma\left(\frac{1}{2}\right)$ , где гамма-функция  $\Gamma(1/2) = \sqrt{\pi}$ .

Таким образом, получим, что

$$C(0, t) = C_0 - \sqrt{\frac{1}{\pi D}} \int_0^t \frac{\Psi(\tau)}{\sqrt{t - \tau}} d\tau. \quad (18)$$

Установим связь между активностями серной кислоты и воды, входящими в соотношение (8), и концентрацией. Для этого перейдем к молярной шкале концентрации, в которой концентрация электролита измеряется количеством молей растворенного вещества на один литр раствора, т.е. перейдем к следующей зависимости



$$C = \frac{1000 n_2 \rho}{n_1 M_1 + n_2 M_2}, \quad (19)$$

где  $n_1, n_2$  – число молей растворителя и растворенного вещества;  $M_1, M_2$  – молекулярные веса растворителя и растворимого вещества.

Учитывая, что объем

$$V = \frac{n_1 M_1 + n_2 M_2}{1000 \rho},$$

получим следующее равенство

$$C = \frac{n_2}{V}. \quad (20)$$

С другой стороны вес растворенного вещества определяется таким образом

$$n_2 M_2 = 10 V \rho m\%, \quad (21)$$

где  $m\%$  – процентное по весу содержание вещества в растворе. Сопоставляя (20) и (21) получим, что

$$C = \frac{10 \rho m\%}{M_2}. \quad (22)$$

Для раствора серной кислоты связь между плотностью  $\rho$  и процентным содержанием серной кислоты  $m\%$  можно определить с помощью следующего эмпирического соотношения

$$\rho = 1 + \frac{0,74 m\%}{100}. \quad (23)$$

Связь между процентным содержанием растворенного вещества  $m\%$  и моляльностью  $M$  определим из равенства

$$m\% = \frac{100 M_2 M}{1000 + M_2 M}. \quad (24)$$

Проводя преобразования выражений (22) – (24) и учитывая, что  $M_2 = 0,8$ , получим зависимость концентрации от моляльности

$$C = \frac{0,17 \cdot 10^6 M^2 + 10 M}{(98 M + 1000)^2}. \quad (25)$$

Используя (25), получим для отношения активностей

$$\frac{a_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{a_{\text{H}_2\text{O}}} = 1,65 \cdot 10^{-3} \cdot e^{2c}. \quad (26)$$

Подставляя (26) в (8) и учитывая численные значения констант, входящих в (8), получим следующее выражение для ЭДС

$$E_p = 1,874 + 0,052 C. \quad (27)$$

Для ЭДС поляризации  $E_n$  получим

$$E_n = 0,052(C_0 - C). \quad (28)$$

Сопоставляя (18) и (28), найдем, что

$$E_n = 0,052 \sqrt{\frac{1}{\pi D}} \int_0^t \frac{\Psi(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau. \quad (29)$$

Задаваясь законом изменения функции  $\Psi(\tau)$ , можно найти закон изменения ЭДС поляризации  $E_n$ .

Подставляя в (1) значения  $E_p$  из (11) и  $E_n$  из (29) и учитывая только переменную составляющую напряжения  $U(t)$  на зажимах аккумулятора, получим

$$U(t) = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{V} \int_0^t I(t) dt - 0,052 \sqrt{\frac{1}{\pi D}} \int_0^t \frac{\Psi(t)}{\sqrt{t-\tau}} dt + I(t)r_0. \quad (30)$$

Применяя преобразование Лапласа к левой и правой части уравнения (30) и учитывая, что введенная функция  $\Psi(t)$  полностью определяется током  $I(t)$ , получим при нулевых начальных условиях с учетом знака, связывающего в (15)  $I(t)$  и  $\Psi(t)$

$$U(p) = \left( \frac{\alpha}{p} + \frac{B}{\sqrt{p}} + r_0 \right) I(p), \quad (31)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{V}; \quad B = 0,052 \sqrt{\frac{1}{\pi D}} \cdot \frac{1}{nFK}.$$

Из (31) передаточная функция аккумулятора  $W(p)$  имеет вид

$$W(p) = \frac{\alpha}{p} + \frac{B}{\sqrt{p}} + r_0, \quad (32)$$

т.е. схема замещения аккумулятора представляется тремя параллельно соединенными интегрирующим, полуинтегрирующим и безинтегрирующим звеном.

### Выводы.

1. Полученную передаточную функцию аккумулятора можно использовать для обоснования его эквивалентной схемы замещения.

2. Коэффициенты  $\alpha$ ,  $B$ ,  $r_0$  его передаточной функции характеризуют техническое состояние аккумулятора. Так, уменьшение активной массы, приводящее к уменьшению площади поверхности электрод-раствор электролита, ведет к увеличению коэффициентов  $B$  и  $r_0$ .

3. Эквивалентная схема замещения, полученная на основе его передаточной функции, позволяет ввести ряд понятий, использование которых дает возможность оценить остаточную емкость аккумулятора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Скугарев В.В. О частных методах определения параметров электрических эквивалентных схем // *Электрохимия*. – 2000. – Т 36, № 6. – С. 773–777.
2. Вайлов А.М., Эйгель Ф.И. Определение параметров схемы замещения аккумуляторной батареи // *Электротехническая промышленность. Серия. Химические и физические источники тока*. – 1984. – Вып. 3 (96). – С. 12–14.
3. Кузнецов О., Копіч В. Еквівалентні електричні схеми саморозряду деяких ХДС // *Проблеми корозії і протикорозійного захисту матеріалів*. – 2002. – № 1. – С. 161–166.
4. Рыбалка К.В., Бекетаева Л.А., Протасова Е.Л. Применение метода операционного импеданса для оценки степени заряда химических источников тока. Свинцовый аккумулятор // *Электрохимия*. – 1996. – Т. 32, № 6. – С. 689–693.
5. Стремещкий О.І., Мартинюк В.В., Вдовін О.А. Накопичення електричного заряду електрохімічними системами з подвійним електричним шаром // *Вісник технологічного університету Поділля*. – 2002. – Т. 1, № 3. – С. 79–82.
6. Рыбалка К.В., Бекетаева Л.А. Использование метода импеданса для исследования электрохимического поведения активной массы электродов свинцового аккумулятора // *Электрохимия*. – 1993. – Т. 29, № 2. – С. 212–218.
7. Кузнецов О.О., Копіч В.Ю., Нетеса В.В. Саморозряд ХДС за даними імпедансної спектроскопії // *Проблеми корозії і протикорозійного захисту матеріалів в 2-х т. Спецвипуск журналу "Фізико-хімічна механіка матеріалів"*. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. – 2000. – Т. 2. – С. 592–595.
8. Кузнецов А.А., Нетеса В.В. Об импедансе одной модели ХИТ с абсорбцией промежуточных частиц в катодном и анодном процессах // *Вопросы химии и химической технологии*. – 1998. – № 4. – С. 39–42.
9. Кузнецов О.О., Нетеса В.В. Модель імпедансу саморозряду ХДС // *Проблеми корозії і протикорозійного захисту матеріалів*. – 1998. – № 1. – С. 9–12.
10. Вайнея Д.В. Аккумуляторные батареи / У-е изд.: Пер. с англ. инж. П.И. Устинова. – М-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 480 с.
11. Ольховиков С.В. Обобщенные параметры математической модели химического источника тока // *Збірник наук. праць*. – Х.: ХУ ПС. – 2005. – Вып. 6 (6). – С. 81–83.

Поступила 1.09.2005

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор Б.Т. Кононов,  
Харьковский университет Воздушных Сил.