

# ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МВИТ В ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМАХ

***В.Л. Туманов\*, С.Л. Кулаков\*\*, К.С. Кулаков\*\*, М.Е. Компан\*\*\****

\*НИК «Новые Энергетические Проекты»

\*\*Санкт-Петербургский Государственный политехнический университет

\*\*\*ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 С.-Петербург, Политехническая, 26

В работе представлены результаты анализа энергозапаса и потребляемой мощности большинства типов современной носимой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Показано, что в типичном случае для зарядки аккумуляторов РЭА, а также непосредственной работы РЭА от первичного ХИТ, вырабатываемая ХИТ мощность должна составлять 15-25 Вт. Предложена методика определения динамических характеристик ХИТ, позволяющая оптимизировать характеристики источника первичного электропитания (ИПЭ) состоящего из ХИТ и преобразователя напряжения, выполненного по схеме индуктивного накопителя энергии (ИНЭ). Представлен вариант оптимизированной конструкции ИПЭ, включающей в себя одноэлементный металловоздушный ХИТ и обратноходовой *DC/DC* преобразователь.

## OPTIMIZATION OF THE PULSE OPERATION MODE OF THE METAL-OXIDE FUEL CELL

***V.L. Tumanov\*, S.L. Kulakov\*\*, K.S. Kulakov\*\*, M.E. Kompan\*\*\****

\*National innovation company «New energetic projects»

Prechistenka, 18, Moscow, 119034, Russia

\*\*SPb SPU, 195252 Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya, 29

\*\*\*Ioffe Physical Technical Institute. 194021 Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya, 26

The analysis of energy and power demands of the most popular modern electronic gadgets is submitted. It is shown, that typically for the most types of gadgets, almost irrespectively to the types of the current source, consumed power is about 15-25 W. The technique of measurements of dynamic characteristics the pulse current source and the operation of the voltage converter with the inductive energy store are described. The optimized design of a hybrid primary power source, consisting from the single-element metal-oxygen fuel cell and boost *DC/DC* converter is presented.

В современном мире резко возросла потребность в первичных источниках электропитания, непосредственно преобразующих химическую энергию в электрическую. Интерес к первичным химическим источникам питания (ХИТ) тесно связан с ростом потребления электроэнергии отдельным человеком, находящимся вне зоны сетевого электроснабжения. Действительно, в число автономной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), используемой в полевых условиях, сегодня входят, как минимум, фонарь, радиотелефон и далее по нарастающей – устройства GPS, гидролокации, аудио- и видеоаппаратура, ноутбуки и т.д.

Естественно, что вся автономная носимая РЭА снабжена вторичными химическими источниками тока, т.е. аккумуляторами. Однако аккумуляторы имеют конечный энергозапас. Например, полностью заряженный телефон в режиме активного использования – 3-4 часа, система GPS – 4-5 часов, аудио- и видеоаппаратура – 2-4 часа, ноутбук – 2,5-4 часа. После выработки энергозапаса аккумуляторов устройства необходима их зарядка.

Для зарядки аккумуляторов, освещения или непосредственного питания автономной РЭА в отсутствие электропроводной электросети (полевые условия, аварийная ситуация в электроснабжении и т.д.) и при отсутствии возможности использования достаточно тяжелых и габаритных мотор-генераторов возникает потребность в использовании компактных первичных ХИТ.

Типичные характеристики различных типов носимой РЭА представлены в табл. 1. Анализ представленных данных показывает, что для питания большинства типов РЭА достаточно мощности 15-25 Вт. С точки зрения зарядки аккумуляторов, данной мощности вполне хватает для полной зарядки аккумулятора емкостью 2 А·ч на напряжение 12 В за 1 час.

При выборе электрохимической системы первичного ХИТ [1, 2] особенно перспективными являются разработки, связанные с использованием металловоздушных источников тока (МВИТ), что определяется большой удельной энергоемкостью гальванической пары металл-кислород (табл. 2).

Таблица 1

Характеристики источников тока для различных типов носимой РЭА

Table 1

The characteristics of the power sources for some electronic gadgets





Применение	Аккумулятор	Эл/хим схема	Емкость, А·ч	U эл-та, В	Эн. емк	
					Вт·ч	кДж
Мобильные телефоны		Li-lon	0,6	3,7	2,2	8,0
		Li-lon	0,75	3,7	2,8	10,0
		Li-lon	1,2	3,7	4,4	16,0
		Li-lon	2,1	3,7	7,8	28,0
Фотокамеры		Li-lon	0,65	3,7	2,4	8,7
		Li-lon	1,2	3,7	4,4	16,0
		Li-lon	1,8	3,7	6,7	24,0
		Li-lon	2,2	3,7	8,1	29,3
		Li-lon	3,5	3,7	13,0	46,6
		Li-lon	3,8	3,7	14,1	50,6
Видеокамеры		Li-lon	0,68	7,4	5,0	18,1
		Ni-MH	2	9,6	19,2	69,1
		Li-lon	2,2	7,2	15,8	57,0
		Ni-MH	2,5	3,6	9,0	32,4
		Li-lon	3,5	3,5	12,3	44,1
		Li-lon	4,5	7,4	33,3	119,9
Радиостанции		Ni-MH	1,25	7,2	9,0	32,4
		Ni-MH	1,5	7,2	10,8	38,9
КПК		Li-lon	1,2	3,7	4,4	16,0
		Li-lon	1,3	3,7	4,8	17,3
		Li-lon	2	3,7	7,4	26,6
		Li-Poly	3	3,7	11,1	40,0
Ноутбуки		Li-lon	2,8	9,6	26,9	96,8
		Li-lon	3,8	12	45,6	164,2
		Li-lon	4	10,8	43,2	155,5
		Li-lon	4,5	12	54,0	194,4

Таблица 2  
Удельная энергоемкость различных видов топлива  
Table 2  
The specific energies of the various types of the fuels

Вид топлива	Удельная энергия $W$ , Вт·ч/г	Удельная энергия $W$ , Вт·ч/см <sup>3</sup>	КПД преобразования в электроэнергию
Бензин высшего качества	12,3	8,8	20-35%
Дизельное топливо	11,9	8,3	25-40%
Природный газ	10	$7 \cdot 10^{-3}$	15-30%
Дрова (сухие)	5,3	2,5	5-10%
<b>ХИТ с анодом из Mg</b>	<b>6,8</b>	<b>12,2</b>	<b>10-15%</b>

Принципиальная конструкция металловоздушного элемента представлена на рис. 1. В качестве расходных материалов (топлива) в данной системе используются металл и кислород воздуха. Энергоемкость пары металл-кислород для различных металлов представлена в табл. 3.

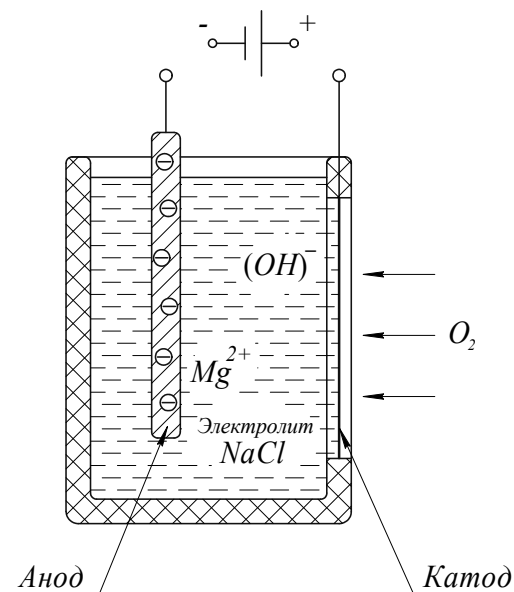


Рис. 1. Принципиальная схема металловоздушного гальванического элемента с Mg анодом  
Fig. 1. The basic circuitry of metal-oxygen galvanic cell with the Mg anode

Таблица 3

Энергоемкость пары металл – кислород

Table 3

The specific energies of the various metals – oxygen pairs

Электрохимическая система	Емкость, А·ч/г	Напряжение ХХ, В	Плотность энергии, Вт·ч/г	Электролит
Al/O <sub>2</sub>	3	1,2	8	солевой
Mg/O <sub>2</sub>	2,2	1,6	6,8	солевой
Zn/O <sub>2</sub>	0,82	1,3	1,3	щелочь
Свинцово-кислотный аккумулятор	0,04	1,95-2,15	0,05	кислота
Li-ионный аккумулятор	0,02	3, 8-4,1	0,2-0,25	

Таким образом, металловоздушные ХИТ обладают достаточно высокой плотностью запасенной энергии. Однако плотность мощности этих устройств невелика и ограничивается возможностями газодиффузионного катода.

В настоящее время наибольшее распространение получили выпускаемые серийно герметичные ХИТ на основе электрохимической системы Zn/O<sub>2</sub>, обладающие достаточно большим энергозапасом и одновременно позволяющие получать относительно большие плотности мощности (70 Вт/л). Типичные конструкции ХИТ этой системы представлены на рис. 2.

К недостаткам данных источников следует отнести принципиальную необходимость использовать в качестве электролита щелочь, что не позволяет осуществлять перезарядку источника в полевых условиях. Разработчики этих систем идут по пути создания заменяемых картриджей. Однако для ХИТ это эквивалентно его дублированию.

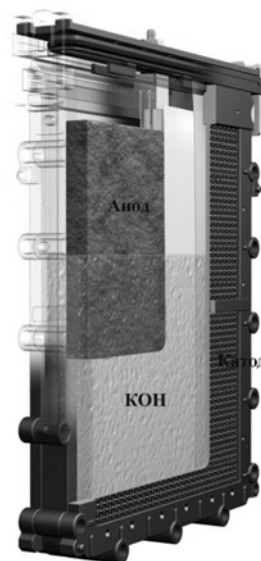


Рис. 2. Конструкции ХИТ на основе электрохимической системы Zn/O<sub>2</sub>

Fig. 2. The chemical current source on the basis of electrochemical system Zn/O<sub>2</sub>

С этой точки зрения представляется перспективным использование электрохимической системы  $Mg/O_2$ , в которой используется раствор поваренной соли ( $NaCl$ ) и обычная техническая либо морская вода [3, 4].

Кроме того, развитие нанотехнологий позволило в настоящее время создать газодиффузионные катоды без использования дорогостоящих катализаторов, таких как химически чистая платина. Эти катоды работают при длительных токовых нагрузках в  $0,1 \text{ Вт/см}^2$ , а в форсированных режимах – до  $0,15 \text{ Вт/см}^2$ , что позволяет конструировать изделия с удельной мощностью на уровне 20-30 Вт/л, вполне сопоставимой с характеристиками щелочных батарей.

Наиболее простая и удобная в эксплуатации конструкция первичного ХИТ реализуется при использовании одного гальванического элемента, состоящего из катода и анода, погруженных в электролит.

Однако одиночный гальванический элемент генерирует напряжение на уровне одного вольта, а для работы автономной РЭА обычно требуется напряжение 5-12 В. Эту проблему решают, создавая конструкции источника первичного электропитания, состоящие из нескольких последовательно включенных элементов и преобразователя напряжения. В этом случае основная задача, решаемая при реализации конструкции ХИТ, состоит в том, что в конструкции нельзя допустить гальванической связи по электролиту между элементами, т.е. каждый элемент должен быть герметизирован.

В качестве преобразователя напряжения обычно выбирается серийно выпускаемый DC/DC преобразователь, обеспечивающий заданное нагрузкой напряжение при соответствующей мощности. Современные преобразователи обеспечивают трансформирование входного напряжения с уровня 2-3 В до значений 5-30 В при выходной мощности от единиц ватт до нескольких сотен ватт.

Таким образом, количество элементов в последовательной сборке ХИТ определяется минимальным уровнем входного напряжения, при котором работает преобразователь.

С другой стороны, за последние 3-4 года появились ключевые элементы (полевые транзисторы, выполненные по технологии MOSFET), позволяющие создавать конструкции преобразователей напряжения, работающих при входных напряжениях менее одного вольта. Эта элементная база позволяет подойти к проектированию источника как к единому устройству, состоящему из одноэлементного ХИТ и полностью согласованного с ним преобразователя; последний, в свою очередь, оказывает влияние на протекание электрохимической реакции в ХИТ, оптимизируя ее с точки зрения повышения КПД использования металла и получения максимальной мощности. Однако в любом случае – по-

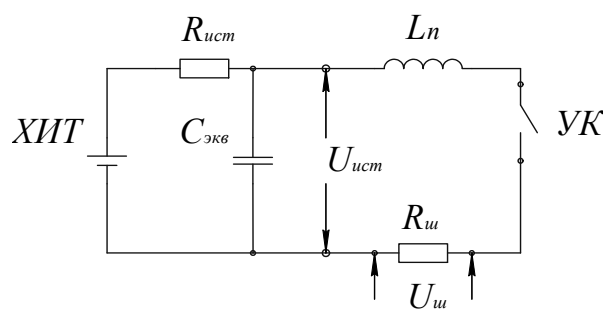
следовательная сборка или одиночный элемент, современный первичный источник электропитания должен комплектоваться преобразователем напряжения, работающим в импульсно-периодическом режиме.

Эффективность использования ХИТ в этих устройствах зависит от выбора режимов работы преобразователя (предельной скорости нарастания тока, амплитуды токового импульса, частоты повторения и скважности), определяемых динамическими характеристиками внутреннего сопротивления элемента. Кроме того, важнейшей характеристикой ХИТ является величина «мгновенно» восстанавливающегося напряжения на элементе в зависимости от количества электричества, отобранного от элемента за один импульс. Однако ни одна из перечисленных характеристик не приводится изготовителями в паспортах ХИТ (!).

Отсутствие динамических характеристик ХИТ ставит перед разработчиками устройств первичного электропитания дополнительные задачи по определению пределов работоспособности ХИТ в режиме импульсных нагрузок.

В данной работе приводится метод определения динамических характеристик ХИТ, позволяющий создавать оптимизированные варианты конструкций.

Основой метода является экспериментальный факт совпадения формы импульса напряжения для элементов различных электрохимических систем (Li-ионные, никель-металлгидридные, щелочные, металловоздушные, кислород-водородные ТЭ и др.) при их нагружении токовыми импульсами согласно представленной на рис. 3 схеме.

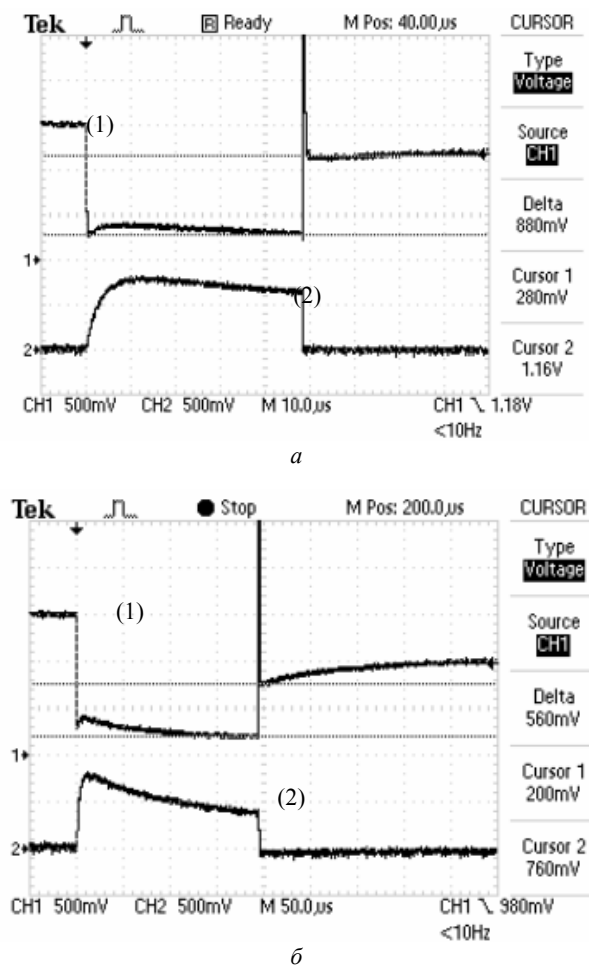


**Рис. 3.** Принципиальная схема экспериментов:

$UK$  – управляемый ключ,  $R_{ист}$ ,  $R_{ш}$  – соответственно, внутреннее сопротивление источника и измерительного шунта.  $L_n$  – индуктивность схемы,  $C_{экв}$  – эквивалентная геометрическая емкость, характерные параметры схемы:  $R_{ист} \gg R_{ш}$ , величина  $-L_n/(R_{ист} + R_{ш})$  много меньше времени переключения  $UK$

**Fig. 3.** The basic circuitry of experiments:  $UK$  – a controlled switch;  $R_{ист}$ ,  $R_{ш}$  – accordingly, internal resistance of a source and the measuring shunt.  $L_n$  – inductance of the circuit,  $C_{экв}$  – equivalent geometrical capacity, characteristic parameters of the circuit:  $R_{ист} \gg R_{ш}$ , the value  $-L_n/(R_{ист} + R_{ш})$  is much less than switching time of  $UK$

Типичный вид осциллограмм  $U_{ист}(t)$  и  $I_{ист}(t)$  для различных длительностей импульсов тока представлен на рис. 4.



**Рис. 4.** Осциллограммы импульса напряжения МВИТ. На осциллограммах: (1) – импульс напряжения; (2) – импульс тока; а – длительность импульса тока  $t_u = 50$  мкс, заряд в импульсе  $Q = 2,6$  мК; б –  $t_u = 200$  мкс,  $Q = 8,0$  мК

**Fig. 4.** Oscillograms of a voltage pulse MOFC.

On oscillograms: (1) – the voltage pulse of; (2) – the current pulse; а – duration of a current pulse  $t_u = 50$  мкс, the total charge in a current pulse  $Q = 2,6$  mC; б –  $t_u = 200$  μs,  $Q = 8,0$  mC

По результатам обработки осциллограмм тока и напряжения, выполненным по формуле (1), определяется зависимость величины внутреннего сопротивления источника от длительности импульса тока или от величины заряда, отданного ХИТ.

$$R_{ист}(t) = \frac{U_{сх} - U_{ист}(t)}{I(t)}, R_{ист}(Q) = \int_0^{t_u} I(t)dt = R_{ист}(t_1) \quad (1)$$

Отметим, что для всех исследовавшихся элементов различных электрохимических систем зависимость  $R(Q)$  имела достаточно ярко выраженный минимум. Определяемое таким образом минимальное значение  $R_{мин}(Q)$  оказалось меньше величины  $R_{пост}$ , измеряемой при нагружении элемента постоянным

током, в 2-3 раза. По мере увеличения длительности импульса (увеличение величины  $Q$ ) наблюдалось увеличение величины  $R(Q)$  с последующим выполнением равенства  $R(Q) = R_{пост}$ . Кроме того, величина  $R_{мин}(Q)$  оставалась постоянной для различных амплитуд импульсов тока нагружения.

Ясно, что оптимальным режимом совместной работы ХИТ и преобразователя является область изменения величины  $Q$ , в которой значение внутреннего сопротивления источника составляет  $R_{мин}(Q)$ .

Не менее важной величиной, определяющей максимальную мощность, вырабатываемую ХИТ, является величина «мгновенно» восстанавливаемого источником напряжения ( $U_e$ ) после его нагружения одиночным импульсом тока с зарядом  $Q$  (рис. 4), т.е. зависимость  $U_e(Q)$ . Данная зависимость определяет максимальную величину напряжения на источнике в импульсно-периодическом режиме.

Определение зависимостей  $R_{мин}(Q)$  и  $U_e(Q)$  позволяет осуществить математическое моделирование работы источника в импульсно-периодическом режиме и, соответственно, провести оптимизацию режима работы источника первичного электропитания.

При использовании в устройстве преобразователя «бустерной» схемы (boost converter, step-up converter, индуктивный накопитель энергии ИНЭ) величина максимальной мощности в нагрузке ( $L$ ) достигается при выполнении соотношения  $at = (R/L)t_u = 1,26$ , где  $R$  – суммарное омическое сопротивление ХИТ и преобразователя,  $L$  – накопительная индуктивность,  $t_u$  – длительность импульса. В случае, когда омическое сопротивление преобразователя много меньше внутреннего сопротивления ХИТ (оптимальный случай), величина  $R$  соответствует  $R \approx R_{мин}(Q)$ . Оптимальное значение амплитуды тока в этом случае

$$I_0 \approx 0,72 \frac{U_0}{R} = 0,72 I_m, \text{ где } U_0 - \text{величина амплитуды}$$

импульса напряжения на источнике в импульсно-периодическом режиме, соответствующая оптимальной величине  $Q$ ,  $I_m$  – максимально возможная амплитуда токового импульса.

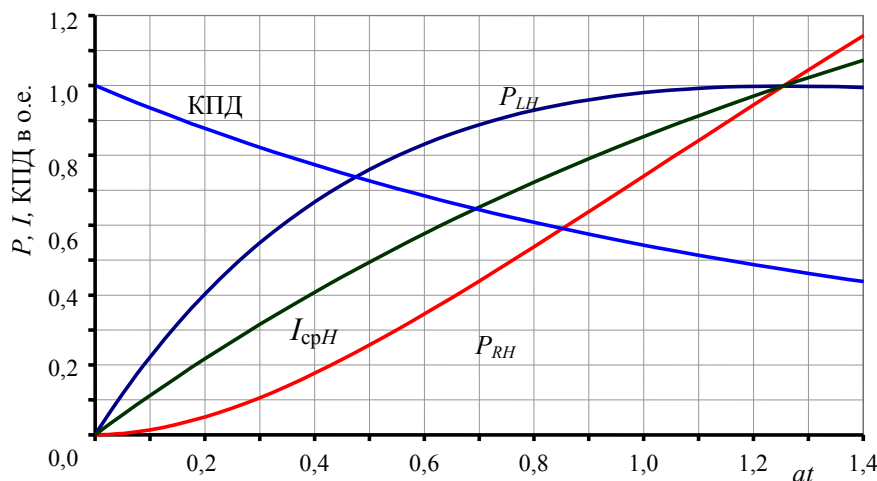
Дальнейший выбор режима работы источника первичного электропитания может быть осуществлен исходя из анализа данных, представленных на рис. 5, где представлены зависимости нормированных значений величин средней мощности в нагрузке (ИНЭ) –  $P_{LH}$ , среднего тока –  $I_{срH}$ , средней мощности потерь в активных сопротивлениях –  $P_{RH}$  и полный КПД преобразования мощности, вырабатываемой ХИТ, в зависимости от безразмерного параметра

$$\alpha t = \frac{R}{L} t. \text{ Нормировка средних значений производи}$$

лась на величины, соответствующие случаю  $\alpha t = 1,26$  (максимальная средняя мощность), т.е.

$$P_{Lm} = 0,2 \frac{U_0^2}{R}, I_{срm} = 0,43 \frac{U_0}{R} - \text{среднее значение то}$$

$$\text{ка, } I_{dm} = 0,47 \frac{U_0}{R} - \text{действующее значение тока.}$$



**Рис. 5.** Зависимости нормированных значений величин средней мощности ИНЭ –  $P_{LH}$ , среднего тока –  $I_{cpH}$ , средней мощности потерь в активных сопротивлениях –  $P_{RH}$  и полного КПД преобразования в зависимости от безразмерного параметра  $\alpha t = (R/L)t$

**Fig. 5.** The dependencies of the normalized values of an average power IES –  $P_{LH}$ , an average current –  $I_{cpH}$ , an average power of losses in active resistors –  $P_{RH}$  and total efficiency factor of transformation energy on the of dimensionless parameter  $\alpha t = (R/L)t$

Анализ данных, представленных на рис. 5, показывает, что для источника питания, состоящего из МВИТ и «бустерной» схемы преобразователя, возможны два режима работы: режим отбора максимальной мощности и оптимальный режим работы, связанный с уменьшением величины среднего тока (расход металла пропорционален протекающему через ХИТ заряду) при полном КПД первичного источника 75 %.

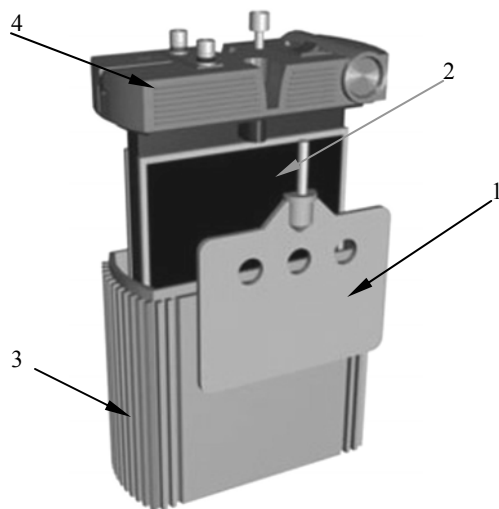
Идея использования взаимовлияния преобразователя и ХИТ была реализована в конструкции первичного источника электропитания, представленного на рис. 6.

Технические характеристики источника: выходное напряжение – 12 В; мощность в оптимальном режиме – 18 Вт, в форсированном – 25 Вт; энергозапас без перезарядки – 120 Вт·ч; вес электролита – 450 г. Удельные характеристики: удельный энергозапас – 120 Вт·ч/л при удельной мощности – 20 Вт/л.

К достоинствам данного устройства следует отнести высокие удельные энергетические показатели, экологическую чистоту получаемых в ходе электрохимических реакций  $MgOH$ ,  $H_2O$  и  $H_2$ , простоту эксплуатации и транспортировки, простоту замены расходных материалов (анодов и электролита), дешевизну расходных материалов, длительный срок хранения, повышенный КПД использования расходных материалов.

### Список литературы

1. Скорчелетти В.В. Теоретическая электрохимия. М.: Изд-во «Химия», 1970. С. 608.
2. Химические источники тока / под ред. Коровина Н.В., Скундина А.М. М.: Изд-во МЭИ, 2003. С. 695.
3. Даниелян М.И., Кулаков К.С., Кулаков С.Л., Туманов В.Л., Компан М.Е. Повышение эффективности металловоздушного источника тока при работе в импульсно-периодическом режиме // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, Вып. 14. С. 26.
4. Даниелян М.И., Кулаков К.С., Кулаков С.Л., Туманов В.Л., Компан М.Е. Повышение эффективности сема мощности с металловоздушного источника тока за счет импульсного режима // ISJAEE (Альтернативная Энергетика и Экология). 2007. № 2. С. 51.



**Рис. 6.** Конструкция одноэлементного металловоздушного источника первичного электропитания: 1 – анод (Mg), 2 – газодиффузионный катод, 3 – бак с 14% раствором поваренной соли в воде (электролит), 4 – DC/DC преобразователь напряжения (смонтирован в крышке)

**Fig. 6.** The design of a single-element metal-oxygen primary current source (fuel cell): 1 – anode (Mg); 2 – gas diffusion cathode; 3 – tank with 14 % a table salt (NaCl) solution in water (electrolyte); 4 – DC/DC boost converter (mounted in a cover)

