

УДК 541.135

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МИНИАТЮРНОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Е.А.Нижниковский

*Межведомственный научный Совет по комплексным проблемам
физики, химии и биологии при Президиуме РАН, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 26.01.02 г.

Рассмотрены особенности эксплуатационных характеристик химических источников тока различных систем. Даны рекомендации по их выбору и практическому использованию в автономных блоках питания миниатюрной радиоэлектронной аппаратуры.

The operational characteristics features of chemical current sources in different systems are considered. The recommendations for their choice and practical use in batteries of small radioelectronic equipment are given.

Функционирование основных типов миниатюрной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) невозможно без высокоэффективных, энергоемких и надежных источников тока. Автономное электропитание РЭА осуществляется в большинстве случаев с помощью химических источников тока (ХИТ).

Существующее множество вариантов ХИТ отличается размерами, конструктивными особенностями и природой протекающих в них токообразующих электрохимических реакций [1–4]. В зависимости от конкретного исполнения меняются показатели и эксплуатационные параметры. Такое разнообразие вполне оправдано, так как ХИТ используются в самых разнообразных условиях, и каждая область применения имеет свои специфические особенности.

По принципу работы ХИТ делятся на группы: *первичные* ХИТ и *вторичные*, или *аккумуляторы*. Четко выраженной границы между указанными группами ХИТ нет: некоторые типы первичных элементов могут быть подзаряжены, в то же время аккумуляторы иногда разряжаются только один раз (например, в торпедах). Выбирая между аккумуляторами и первичными элементами, конструкторы аппаратуры обычно учитывают, что первые обладают большей мощностью, в то время как элементы – более высокой удельной энергией.

Особенности эксплуатации миниатюрной РЭА таковы, что ее параметры во многом определяются эксплуатационными характеристиками автономных блоков питания (АБП). Многолетний опыт разработки, выпуска и эксплуатации РЭА позволяет сформулировать в обобщенном виде основные критерии качества химических источников тока, предназначенных для электропитания миниатюрной РЭА:

удельная энергия;
сохраняемость;

диапазон рабочих температур;
ресурс (для аккумуляторов).

Всего в технических условиях и в технических заданиях на разработку нормируется около 20 характеристик ХИТ:

напряжение разомкнутой цепи;
разрядное напряжение либо напряжение, измеренное при разряде на определенную нагрузку через определенный промежуток времени;
среднее разрядное напряжение;
начальное напряжение разряда;
конечное напряжение разряда;
ток разряда либо сопротивление внешней цепи;
продолжительность работы либо емкость;
сохраняемость;
диапазон рабочих температур;
снижение продолжительности разряда в конце срока сохраняемости (саморазряд);
работоспособность после воздействия климатических факторов (повышенной относительной влажности воздуха), а также после пребывания в условиях предельных температур в течение определенного времени;
работоспособность после воздействия вибрационных, а также ударных нагрузок;
возможность доставки различными видами транспорта; для авиационного – указывается высота; количество циклов заряд-разряда (для аккумуляторов);
условия заряда (для аккумуляторов);
габаритные размеры;
размещение и монтаж;
маркировка и упаковка;
наличие шинок (токоотводов).

Определяющими характеристиками являются в основном первые четыре. От них зависит перспектива применения конкретного ХИТ в АБП конкретного изделия.

Рассмотрим перспективы использования выпускаемых и разрабатываемых образцов ХИТ для электропитания миниатюрной РЭА [5, 6].

Первичные ХИТ

Наиболее известными и распространенными первичными ХИТ являются цинк-марганцевые элементы. Около 150 лет известны элементы с соевым электролитом и батареи на их основе, которые до сих пор остаются основным типом химических источников тока. Их невысокие эксплуатационные характеристики (удельная энергия – до $100 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{дм}^3$, срок службы – до 2 лет) полностью компенсируются низкой стоимостью и простотой изготовления.

Модификация цинк-марганцевых элементов со щелочным электролитом имеет в 1.5–2 раза более высокие емкость и мощность. Современные технологии, применяемые рядом ведущих зарубежных фирм ("Energizer", "Duracell", "Sony"), позволили еще больше повысить эксплуатационные параметры цинк-марганцевых ХИТ. Основным производителем соевых и щелочных элементов в нашей стране является АО "Энергия" (Елец).

Альтернативой цинк-марганцевым элементам в течение последних 40 лет являются ртутно-цинковые источники тока. По удельной энергии ($300 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{дм}^3$) и сроку службы (до 5 лет) они превышают цинк-марганцевые аналоги, по другим параметрам – не уступают им. Но их работоспособность при отрицательных температурах низка. При разряде выделяется металлическая ртуть, крайне опасная в экологическом отношении. Кроме того, попадая на элементы монтажа РЭА, она приводит к выходу из строя аппаратуры. В последние годы производители этих элементов АО "Энергия" (Елец) и НПП "Квант" (Москва) заявляют о сокращении производства, вплоть до полного его прекращения, по причине экологической опасности и возражений со стороны общественных организаций («зеленых»).

Наличие перечисленных недостатков привело к поиску принципиально новых ХИТ, и такой поиск завершился созданием элементов с литиевым анодом, существенно превосходящих по комплексу эксплуатационных параметров все другие типы ХИТ.

Разработка литиевых источников тока началась довольно давно, однако их промышленный выпуск осуществлен лишь в 70-х годах [5]. Они сразу заняли ведущее место в электропитании целого ряда направлений техники. Причиной тому – уникальные эксплуатационные возможности этого класса ХИТ, которые обусловлены использованием высокоэнергетических электродных материалов, новых конструкционных материалов и технологий.

В зависимости от типа применяемых электродных материалов и электролитов различают:

- литиевые элементы с неорганическим электролитом (литий-тионилхлорид, литий-диоксид серы и т.д.);
- литиевые элементы с органическим электролитом (литий-полифторуглерод, литий-диоксид марганца и т.д.);
- литиевые элементы с твердым электролитом (литий-йод).

Исследования показали, что самыми высокими техническими параметрами обладают элементы системы литий-тионилхлорид. Они имеют разрядное напряжение 3.4 В, срок службы до 10 лет и выше, высокую работоспособность при отрицательных температурах, низкий саморазряд (3% в год) и высокую мощность. Элементы системы литий-тионилхлорид имеют самую высокую из известных удельную энергию – $1000 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{дм}^3$. Их применение в миниатюрной РЭА вместо ХИТ традиционных систем приводит к повышению технических возможностей изделий и улучшению их массогабаритных характеристик. Уставы армии США предполагают использование литий-тионилхлоридных источников тока в военной технике в качестве основного типа ХИТ.

В нашей стране налажен выпуск целого ряда миниатюрных литий-тионилхлоридных ХИТ емкостью от 0.17 (ТЛ-53) до 11 А·ч (ТЛ-11) (табл.1). Имеется опыт выпуска элементов емкостью до нескольких сотен ампер-часов. Особенностью элементов этой системы является то, что тионилхлорид одновременно служит и растворителем, и активным материалом катода, что приводит к заметному увеличению эффективности использования активных масс.

Наряду с безусловными положительными качествами литий-тионилхлоридных ХИТ известны и некоторые их недостатки, учет которых необходим при планировании их использования в миниатюрной РЭА. Главным из них является взрывоопасность. При нарушении правил эксплуатации и хранения элементов (короткие замыкания, перегрев, глубокий разряд, заряд, механические повреждения и т.д.) возможны взрывы, опасные разрушением аппаратуры с поражением обслуживающего персонала. Для повышения взрывобезопасности элементов в последние годы разработчики выполнили большую программу фундаментальных и прикладных исследований. В результате вскрыты причины этого явления и выработан ряд конструкторско-технологических решений [7]. Используются внутренние и внешние плавкие предохранители, клапаны давления для выпуска образующихся газов, плавкие сепарационные материалы и т.д. Кроме того, обязательно соблюдение ряда правил, приводимых в инструкциях по эксплуатации конкретных элементов.

Таблица 1

Основные эксплуатационные характеристики миниатюрных первичных ХИТ

Тип	Габариты, мм		Емкость, А·ч	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток разряда, мА	Интервал рабочих температур, °С	Сохраняемость, мес.
	диаметр	высота					
Литиевые источники тока							
ТЛ-10	33.3	60	10	3.40	200	-40 – +50	24
ТЛ-10с	34.2	61.5	10	3.50	10	-30 – +40	72
ТЛ-11	34.2	61.5	11	3.5	10	-40 – +50	120
ТЛ-4	25.5	50	4.5	3.40	100	-30 – +50	24
ТЛ-5.5	26.2	50	5.5	3.5	5	-30 – +50	120
ТЛ-1.6	14.5	50.5	1.6	3.60	5	-30 – +40	72
ТЛ-1.2	14.5	49.5	1.2	3.40	20	-30 – +50	24
ТЛ-1.7	14.5	50	1.75	3.5	5	-40 – +50	120
ТЛ-0.75	12.5	42	0.75	3.4	10	-50 – +50	36
2ТЛ-0.75	48.5×26.5×15.5		0.75	6.8	10	-50 – +50	36
ТЛ-0.6	16.6	18	0.6	3.40	10	-40 – +40	12
ТЛ-0.6С	16.6	18	0.6	3.4	10	-50 – +50	60
ТЛ-0.4	10.5	44	0.4	3.4	5	-50 – +50	36
ТЛ-85	30.1	17.6	1.5	3.30	50	-40 – +40	24
ТЛ-53	15.6	10.2	0.17	3.30	6	-40 – +40	24
2ТЛ-0.75	48.5×26.5×15.5		0.75	6.8	10	-50 – +50	36
ФЛ-2	12×24×45		2	2.40	50	-20 – +40	24
ФЛ-0.15	25.2	2.8	0.15	2.40	1.20	-20 – +40	24
ФЛ-1563	15.5	6.2	0.15	2.4	2	-20 – +50	36
ФЛ-2173	20.9	7.3	0.35	2.4	4	-20 – +50	36
ФЛ-0.05	11.6	3.6	0.05	2.40	0.1	-20 – +40	24
ФЛЗ16	14.5	50	0.96	2.4	20	-20 – +50	10
ФЛЗ43	26.2	50	3.8	2.4	100	-20 – +50	10
ФЛЗ73	34.2	60	8.6	2.4	200	-20 – +50	10
МЛГ-0.2	150×30×1.5		0.2	2.40	5	-10 – +40	18
МЛГ-0.3	150×30×3.0		0.3	2.40	20	-10 – +45	48
МЛГ-0.15	50×20×2.0		0.15	2.40	5	-30 – +50	36
Ртутно-цинковые источники тока							
РЦ-93С	30.5	60.50	14	1.25	300	0 – +50	60
РЦ-59	16.6	50.60	3	1.25	60	0 – +50	12
РЦ-963	60×30×6		3	1.25	20	-5 – +40	60
РЦ-85	30.1	14	2.60	1.22	50	0 – +50	30
РЦ-83	30.1	9.40	1.50	1.25	50	0 – +50	16
РЦ-83Х	30.1	9.4	1.5	1.25	50	-40 – +50	36
РЦ-75	25.5	13.50	1.50	1.22	30	0 – +50	30
РЦ-73	25.5	8.40	1	1.25	30	0 – +50	16
РЦ-65	21	13	1	1.22	20	0 – +50	30
РЦ-63	21	7.40	0.55	1.25	20	0 – +50	18
РЦ-71Н	25.2	2.80	0.25	1.25	5	-5 – +40	9
РЦ-57	16.5	17.8	0.85	1.25		0 – +50	18
РЦ-55С	16.6	12.30	0.5	1.25	10	0 – +50	30

Окончание табл. 1

РЦ-53	15.6	6.30	0.25	1.25	10	0 – +50	12
РЦ-53У	15.8	6.3	0.175	1.25	10	-30 – +50	52
РЦ-33	11.6	5.40	0.15	1.25	5	5 – +50	12
РЦ-31Ф	11.6	3.60	0.1	1.25	5	-5 – +40	9
РЦ-32	10.9	3.60	0.05	1.25	2	0 – +50	9
РЦ 32Х	11.0	3.5	0.05	1.25	2	-40 – +50	12
РЦ-17	5.1	24	0.1	1.25	5	-5 – +40	24
РЦ-15	6.3	6	0.04	1.25	0.3	0 – +50	6
РЦ-11	4.7	5	0.02	1.25	0.15	0 – +50	6
Воздушно-цинковые источники тока							
ВЦ-20	7	2.1	0.02	1.20	2.50	+10 – +40	12
Серебряно-цинковые источники тока							
СЦ-21Ф	7.9	3.60	0.022	1.45	2.80	+10 – +50	12

Другим недостатком является наличие начального «провала» напряжения. Он затрудняет работу ряда изделий РЭА, которые требуют полной мощности непосредственно с момента включения. Наиболее заметны «провалы» у элементов после длительного хранения или у находившихся при повышенных температурах. Показано, что предварительный небольшой подзаряд элементов способствует снятию «провалов» напряжения.

Наряду с литий-тионилхлоридными ряд зарубежных фирм выпускает элементы системы литий-диоксид серы. Они несколько уступают первым по удельной энергии ($525 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{дм}^3$) и разрядному напряжению (2.7 В), однако считаются более взрывобезопасными. «Провалы» напряжения наблюдаются и для элементов данной системы.

По конструкторским решениям различают цилиндрические, дисковые и призматические конструкции, рулонные и набивные. Рулонные источники имеют электроды большой площади, что обеспечивает их повышенную мощность. Набивные ХИТ имеют электроды малой площади, обладают низкой мощностью, но повышенной удельной энергоемкостью ввиду низкого содержания конструктивных материалов.

Для электропитания РЭА оправдано использование литиевых ХИТ с органическим электролитом, которые по основным эксплуатационным параметрам (напряжению, удельной энергии и мощности) несколько уступают образцам на основе тионилхлорида, – элементов с катодами на основе полифторуглерода (CF_x), диоксида марганца MnO_2 , триоксида молибдена MoO_3 [8], оксида меди CuO и т.д.

Литиевые элементы с твердым электролитом отличаются длительным сроком службы (10–20 лет), однако имеют весьма малую мощность. В настоящее время они используются для питания кардиостимуляторов, возможно их применение в системах сохранения памяти в компьютерах.

Производство литиевых элементов освоено в нескольких научно-производственных центрах страны: НПП «Квант», Москва; НКБХИТ, Новочеркасск; ОАО НИАИ «Источник», Санкт-Петербург; АО «Литий-элемент», Саратов; МП «Краслит», Красноярск, АО «Альтэн», Электроугли, НПП «Литий», Дубна и др.

Химические источники тока всех перечисленных систем могут использоваться для питания миниатюрных изделий РЭА. В табл.1 приведены эксплуатационные характеристики ряда перспективных первичных ХИТ, производство которых освоено отечественной промышленностью. Элементы серии МЛГ (литий-триоксид молибдена) выпускаются ОАО НИАИ «Источник», а остальные – НПП «Квант» и НПП «Литий». Маркировкой ТЛ обозначают элементы системы литий-тионилхлорид, ФЛ – литий-полифторуглерод. В оправданных случаях для питания миниатюрной РЭА применяются более дорогие литиевые ХИТ, в менее ответственных – источники других систем. Однако тенденции развития источников тока таковы, что будущее остается за литиевыми ХИТ.

Использование новых ответственных и дорогостоящих типов радиоэлектронных устройств потребовало повышенного внимания к надежности и безотказности блоков питания. В этой связи остро встает задача мониторинга состояния ХИТ в процессе хранения и разряда, а также исследования их состояния перед постановкой в аппаратуру. Известны технические решения, обеспечивающие повышение надежности и долговечности АБП путем проведения мониторинга состояния каждого элемента (аккумулятора) в батарее [9].

Поиск методов проверки качества ХИТ ведется давно. Однако надежных универсальных методик и приборов для их реализации до сих пор нет. Большой объем исследований по созданию указанных методик проведен на основе импедансометрии и

микрокалориметрии. Показана перспективность этих методов для создания методик неразрушающего контроля качества литевых ХИТ [10, 11]. Возможно создание недорогих образцов техники для регистрации параметров импеданса, которые могли бы стать основой методики определения неразрушающего определения заряженности ХИТ.

Аккумуляторы

Вторичные источники тока уступают первичным по удельной энергии. Однако возможность перезаряда, высокая мощность и надежность обеспечивают достаточно широкий и устойчивый круг потребителей аккумуляторной техники. Рассмотрим основные устройства, для электропитания которых целесообразно использование аккумуляторов.

1. Технические средства кратковременного, например, сменного использования, когда после нескольких часов использования емкость батареи может быть восполнена путем заряда.

2. Миниатюрные изделия, мощность которых не обеспечивается миниатюрными первичными ХИТ.

3. Резервное электропитание РЭА при отключении основного источника питания (сети). Пример – источники бесперебойного питания для персональных компьютеров.

4. Накопитель электроэнергии, вырабатываемой маломощным физическим источником тока, работающий с последним в буфере.

Перечисленные выше устройства требуют применения разных типов аккумуляторов. В первом и, частично, во втором случаях требуется возможность быстрого заряда, высокие мощность и ресурс циклов. В третьем и четвертом случаях основное требование – возможность длительного подзаряда малым током, малый саморазряд и высокая сохраняемость (ресурс и быстрый заряд при этом не являются определяющими). Представляет интерес также разработка аккумуляторов универсального назначения, которые могут быть применены для электропитания всех четырех указанных типов устройств. Если учитывать, что никель-кадмиевые герметичные аккумуляторы обладают невысокой удельной энергией, то одним из приоритетных направлений является разработка новых электрохимических накопителей, превосходящих традиционные именно по этому показателю [12, 13].

Рассмотрим перспективы использования вторичных источников тока для обеспечения электропитания миниатюрной РЭА, основанные на знании специфики их функционирования и эксплуатационных особенностей.

Наиболее глубокую историю имеют свинцовые аккумуляторы. Они отличаются высоким и стабильным напряжением (2.1 В), мало меняющимся с температурой и с токами нагрузки, высокими мощностью

и надежностью. Основные типы свинцовых аккумуляторов: стартерные, тяговые и стационарные. Все они широко применяются в военной технике. Однако для питания миниатюрной РЭА традиционные свинцовые аккумуляторы практически не используются. Причина – в отсутствии миниатюрных образцов и негерметичности. Вместе с тем в последние годы активно разрабатываются герметичные свинцовые аккумуляторы, в том числе образцы с емкостью 1 А·ч и менее.

Никель-кадмиевые аккумуляторы обладают более высокой удельной энергией и ресурсом (до нескольких тысяч циклов заряд-разряда), чем свинцовые. В последние годы получили распространение герметичные модификации, надежные и удобные в эксплуатации. Разрядное напряжение этих аккумуляторов составляет 1.25 В.

Герметичные никель-кадмиевые аккумуляторы средних габаритов прочно завоевали ведущее место в блоках питания миниатюрной РЭА. Они собираются, как правило, в сосудах, имеющих форму цилиндра или прямоугольной призмы. Конструкция герметичного аккумулятора должна в первую очередь обеспечить реализацию обратимого кислородного цикла, т.е. поглощение кислорода в замкнутом объеме. Этим предотвращается неконтролируемое повышение давления при заряде и обеспечивается герметичность. В связи с требованием герметичности при сборке аккумуляторов используется плотная упаковка пластин и тканевой сепарации. Для свободного транспорта кислорода через сепаратор от положительного электрода к отрицательному и создания развитой двухфазной границы раздела жидкость – газ количество электролита, вводимого в аккумулятор, строго лимитируется. Практически весь электролит в герметичном аккумуляторе находится в порах электродных пластин и сепарации.

В герметичных аккумуляторах в качестве положительных электродов в большинстве случаев применяются окисно-никелевые электроды металло-керамической конструкции.

В герметичных аккумуляторах средних габаритов могут быть использованы также электроды ламельной конструкции. Они представляют собой набор ламелей – плоских коробочек из стальной перфорированной никелированной ленты с запрессованной в них активной массой. Электроды ламельной конструкции по сравнению с металлокерамическими имеют значительно большее внутреннее сопротивление.

Отрицательные кадмиевые электроды, используемые в герметичных аккумуляторах, конструктивно могут быть оформлены аналогично положительным с использованием в качестве активного материала оксида или гидроксида кадмия с небольшой добавкой гидроксида никеля и поверхностно-активных веществ.

Сепаратор в аккумуляторе отвечает за разделение электродов противоположного знака для предотвращения проводимости первого рода. Однако в герметичном аккумуляторе к сепарационному материалу предъявляется еще ряд требований, обусловленных спецификой эксплуатации аккумулятора в герметичном виде. Необходимость обеспечения транспорта кислорода от положительного электрода к отрицательному требует применения в качестве сепаратора сравнительно крупнопористых материалов. С другой стороны, в герметичном аккумуляторе сепаратор должен выполнять еще и роль электролитосодержащей матрицы и обладать при этом высокой гидрофильностью и хорошим щелочеудержанием. Как правило, сепаратор герметичного аккумулятора изготавливается из синтетической ткани или нетканого полотна на основе щелочестойких пластмасс типа перхлорвинила, хлорвинила, полипропилена, капрона и др.

Некоторые типы аккумуляторов, в которых при определенных условиях, например при форсированных режимах заряда, может развиваться значительное давление, оснащаются клапанами одноразового или многократного действия или датчиками давления, выдающими сигнал о необходимости прекращения заряда или снижении зарядного тока. В ряде зарубежных моделей аккумуляторов («SAFT», Франция) успешно используются аварийные клапаны давления. В аккумуляторах НКГЦ-1.3-2, НКГЦ-3.5-2 и НКГЦ-6-2 впервые в отечественной практике использованы такие защитные клапаны [14]. Их применение привело к повышению надежности электрохимических накопителей.

Кроме описанных выше моделей и конструкций призматических и цилиндрических аккумуляторов разработаны и выпускаются промышленностью большое количество образцов дисковой конструкции. В ряде изделий РЭА малого объема и толщины применение призматических и цилиндрических аккумуляторов проблематично, в то же время дисковые, например Д-0.02 и Д-0.09, легко вписываются в их конструкцию. Другим аргументом в пользу применения дисковых аккумуляторов является малый ток саморазряда миниатюрных образцов с малой емкостью. Этот параметр может стать определяющим в буферных системах питания, в которых основным источником энергии является маломощный физический источник тока.

Никель-кадмиевые аккумуляторы имеют широкое распространение в гражданской и военной аппаратуре, стационарной и переносной. Аппаратура связи практически полностью укомплектована аккумуляторами этого типа. Вместе с тем они обладают рядом недостатков, ограничивающих их применение. Так, материал отрицательного электрода – кадмий – является токсичным и его использование в промышленности сокращается. Кроме того, при цик-

лировании аккумуляторов не на полную емкость наблюдается так называемый «эффект памяти», когда их разрядная емкость заметно снижается [12, 13].

Серебряно-цинковые аккумуляторы (СЦА) уступают другим по циклируемости и сроку службы, однако превосходят их по удельной энергии и мощности. Из-за высокой стоимости в последнее время использование СЦА резко сократилось. На их место приходят никель-водородные и никель-металлгидридные аккумуляторы, имеющие аналогичные энергетические характеристики, но не содержащие драгоценных или экологически вредных компонентов. Кроме того, в СЦА отсутствует «эффект памяти». Рассмотрим эту систему подробнее.

Было установлено, что проблема создания никель-металлгидридных аккумуляторов может быть решена путем использования на отрицательном электроде водород-сорбирующих сплавов типа LaNi_5 , которые обладают хорошей сорбционной способностью.

В результате проведенных фундаментальных и прикладных исследований был создан аккумулятор НВГЦ-0.9, имеющий габариты ЦНК-0.6. Конструктивно он представляет собой цилиндр, в котором размещен блок из двух положительных и трех отрицательных электродов, разделенных между собой пористым сепарационным материалом. Электроды имеют ламельную конструкцию, активная масса электродов запрессована в ламели из никелевой сетки.

Разработанный аккумулятор превосходит НКГЦ-аналоги по емкости в 1.5 раза, по мощности и взрывобезопасности – не уступает им, но обладает худшей работоспособностью при отрицательных температурах (-20°C и ниже). Таким образом, в изделиях, где удельная энергия является определяющей, применение никель-металлгидридных аккумуляторов будет вполне оправдано.

Удельная энергия аккумуляторов с водным электролитом не всегда устраивает пользователей. К тому же исследования показали, что возможно создание литиевых элементов с удельной энергией $1000 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{дм}^3$ и более [1, 2]. В этой связи с конца 70-х годов предпринимаются усилия по разработке аккумуляторов с анодами на основе щелочных металлов.

Исследовательские работы в области литиевых элементов многократного действия (литиевых аккумуляторов) ведутся уже более 20 лет во многих странах мира, в частности в США, Канаде, Японии и др. Однако до сих пор не налажен массовый выпуск аккумуляторов, в полной мере удовлетворяющих нужды потребителей. При эксплуатации литиевых аккумуляторов, выпускаемых отдельными фирмами, регулярно возникают проблемы, связанные с надежностью их работы.

Основными проблемами, возникающими при эксплуатации литиевых аккумуляторов, являются плохая циклируемость (быстрая потеря емкости при последующих разрядах) и значительная потеря емкости при хранении заряженных аккумуляторов. Кроме того, во многих случаях наблюдается преждевременный выход аккумулятора из строя из-за возникновения внутренних коротких замыканий. Многие из этих явлений связаны с особенностями работы литиевых электродов, и их решение требует подробного анализа процессов, протекающих на них при заряде и разряде.

Исследования в области литиевых аккумуляторов продолжаются. В настоящее время небольшими партиями они выпускаются в США и Японии.

Большие надежды создателями и эксплуатационниками миниатюрной РЭА возлагаются на литий-ионные аккумуляторы. В этих аккумуляторах совершенно не содержится металлического лития. Отрицательным электродом служит углеродный материал, в который при заряде внедряются (интеркалируют) ионы лития. Хотя при использовании такой углеродной матрицы несколько снижаются напряжение и удельная энергия, отказ от металлического лития повышает безопасность эксплуатации таких источников тока, а также заметно увеличивает их срок службы (количество циклов).

Выпускаемые рядом фирм литий-ионные аккумуляторы активно используются для электропитания видеоаппаратуры, портативных компьютеров, сотовых телефонов и т.д.

Литий-ионные аккумуляторы более безопасны в эксплуатации, чем литиевые. Однако их использование в блоках питания миниатюрной радиоаппаратуры требует выполнения определенных правил и использования некоторых схемно-технических решений. Более того, применение литий-ионных систем без соответствующего уровня развития электроники было бы невозможно, так как они очень чувствительны к режимам заряда и разряда [9, 13, 15].

В последнее время появились сообщения о выпуске литий-полимерных аккумуляторных батарей для мобильных телефонов. Некоторые современные модели телефонов («Ericsson T28s») снабжены такими батареями. В их конструкции полимер используется в качестве электролита и сепаратора. Твердый полимерный электролит в литиевом аккумуляторе позволяет заметно улучшить его надежность, ресурс и срок службы. Возможность использования в качестве анода чистого лития приводит к повышению удельной энергии. Однако опыт выпуска и эксплуатации таких аккумуляторов весьма невелик, и вопрос об их преимуществах перед литий-ионными образцами пока остается открытым [16].

В табл.2 приведены характеристики перспективных аккумуляторов, выпускаемых отечественной промышленностью.

Альтернативой химическим источникам тока являются миниатюрные физические источники тока, такие как полупроводниковая термоэлектрическая батарея или термоэлектрический преобразователь. Интерес к ним появился вследствие отличительных особенностей – высокой надежности, длительной работе в широком диапазоне температур, работе в любой точке вольтамперной характеристики, нечувствительности к короткому замыканию.

Для использования в РЭА разработан ряд миниатюрных термоэлектробатарей и радиоизотопных термоэлектрических генераторов (РИТЭГ) [17, 18]. Принцип действия РИТЭГ основан на преобразовании тепловой энергии, выделяющейся в процессе распада радиоактивного нуклида, например плутония-238, в электрическую энергию с использованием полупроводниковых термоэлектрических преобразователей. Накоплен опыт многолетней (до 15 лет) непрерывной их эксплуатации в различных климатических условиях.

Широко применяемые в настоящее время источники электропитания на основе химических источников тока не в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым РЭА, что ограничивает возможности использования автономных устройств. Характерной особенностью источников электропитания для таких устройств является резко выраженный циклический режим их работы. При этом электрическая мощность, отдаваемая источником электропитания в рабочем режиме, на 1–2 порядка превышает электрическую мощность, обеспечиваемую в дежурном режиме работы устройства. В то же время основная емкость АБП расходуется в дежурном режиме, который реализуется постоянно в отличие от импульсного. В таких случаях оправдано применение маломощного автономного источника электропитания, от которого осуществляется постоянный подзаряд мощного накопителя электрической энергии.

Для повышения надежности АБП целесообразно использовать в нем два или более источника питания различных систем. Схема такой системы питания приведена на рис.1. В предлагаемой системе источниками электроэнергии являются первичные, например литиевые, ХИТ, а также физические, например термоэлектродгенератор [19]. Последний включается в схему через накопитель энергии Н, например аккумуляторную батарею. Наряду с указанными в системах питания могут применяться и другие источники энергии, например резервные. Переход от одного блока к другому осуществляется компаратором по определенным показателям (времени разряда, конечному напряжению и т.д.). При необходимости система может обеспечить несколько номиналов напряжения питания, что достигается применением преобразователей напряжения. Постоянство выходного напряжения обеспечивается

Таблица 2

Основные эксплуатационные характеристики аккумуляторов, разработанных для миниатюрной РЭА

Тип	Габариты, мм		Емкость, А·ч	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток разряда, мА	Интервал рабочих температур, °С	Сохраняемость, мес.
	диаметр	высота					
Никель-кадмиевые аккумуляторы							
НКГЦ-6	33.1	94.10	6	1.25	1200	-50 – +50	60
НКГЦ-6-2	33	91.5	6	1.25	600	-40 – +50	120
НКГЦ-3.5	33.1	60.50	3.50	1.25	700	-50 – +50	60
НКГЦ-3.5-2	33	61.5	3.5	1.25	350	-40 – +50	120
НКГЦ-1.3	20.1	60.50	1.30	1.25	260	-50 – +50	60
НКГЦ-1.3-2	20	61.5	1.3	1.25	130	-40 – +50	120
НКГЦ-5	33.1	94.10	5	1.25	1000	-50 – +50	72
НКГЦ-3	33.1	60.50	3	1.25	600	-50 – +50	72
НКГЦ-1	20.1	60.50	1	1.20	200	-50 – +50	72
ЦНК-0.6	14.1	50.00	0.6	1.20	120	-30 – +50	36
ЦНК-0.8	14.1	50.00	0.8	1.20	120	-30 – +50	36
Д-0.75С	34	9.8	0.75	1.20	75	-30 – +50	36
Д-0.55С	34.6	9.60	0.55	1.20	110	-20 – +45	16
Д-0.4С	25.2	9.3	0.4	1.2	40	-15 – +35	36
Д-0.35	27.2	10.30	0.35	1.20	70	-30 – +50	36
Д-0.26	25.2	9.30	0.26	1.20	52	-20 – +45	16
Д-0.1	20.1	7.10	0.1	1.20	20	-20 – +35	15
Д-0.09	25.2	4.00	0.09	1.20	10	-30 – +50	36
Д-0.02	17	2.50	0.02	1.20	2	-30 – +50	36
Никель-металлгидридные аккумуляторы							
НВГЦ-0.9	14.1	50	0.9	1.2	180	-20 – +45	24

стабилизаторами Ст. Описанная автономная система питания является высоконадежным изделием со сроком службы 10–15 лет и удовлетворяет практически всем требованиям, предъявляемым к спецпаратуре. Дублирование источников питания позволяет избежать выходов из строя АБП по причине отказа элементов или аккумуляторов и обеспечить высокую надежность системы электропитания.

Работа по созданию автономных блоков питания на определенном этапе сталкивается с необходимостью выбора конкретного типа (типов) ХИТ, обеспечивающего выполнение поставленной задачи. С целью оптимизации труда инженеров и конструкторов была разработана комплексная модель выбора оптимальных ХИТ, которая включает следующие основные позиции.

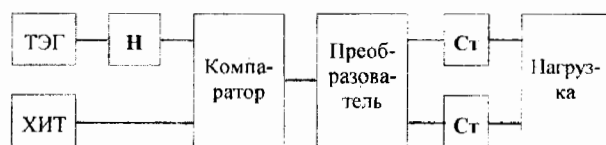


Рис. 1. Блок-схема системы автономного питания

Анализ условий эксплуатации техники. Есть ли в местах, где будет эксплуатироваться средство вооружения, электросеть. Если да, то возможно использование аккумуляторов, если нет – предпочтителен выбор первичных ХИТ.

Анализ по сохраняемости. Ограничить круг рассматриваемых ХИТ теми, которые удовлетворяют этому требованию.

Анализ по емкости. Для аккумуляторов значение емкости выбранных образцов должно быть таким, чтобы обеспечить надежную работу до следующего заряда. Если предполагается хранение заряженных батарей до боевого использования – емкость образцов должна быть больше на величину потерь из-за саморазряда (из расчета 30% в месяц для НКГЦ-А). Емкость первичных ХИТ выбирают исходя из требуемой для работы в течение срока службы энергии + потери емкости в конце срока хранения. Кроме того, в обоих случаях учитывается снижение емкости при работе АБП в условиях пониженных температур. Для определения требуемой емкости при необходимости должна учитываться циклограмма нагрузки и скважность.

Мощность. При наличии высоких требований по мощности, особенно пиковых нагрузок, целесообразен выбор аккумуляторов. В остальных случаях требуемые характеристики могут быть обеспечены первичными ХИТ. Должно быть учтено снижение мощностных показателей при пониженных температурах.

Анализ по габаритам. Если имеются габаритные ограничения, следует включить в круг рассматриваемых ХИТ те, которые удовлетворяют этому требованию.

Диапазон рабочих температур. Для разрабатываемого АБП могут быть использованы только те типы ХИТ, диапазон рабочих температур которых не уже требуемых по заданию.

Диапазон предельных температур. Аналогично предыдущему пункту для разрабатываемого АБП могут быть использованы только те типы ХИТ, диапазон предельных температур которых не уже требуемых по заданию.

Саморазряд должен быть учтен при расчете емкости АБП.

Возможность регулярного доступа и замены ХИТ. При наличии такой возможности рассматривается целесообразность использования недорогих, например марганцево-цинковых элементов. При отсутствии доступа, особенно в течение длительного времени, требуется использование литиевых элементов с сохраняемостью не меньшей, чем требуется по заданию. Емкость элементов в батарее определяется исходя из затрат энергии, необходимых для выполнения задачи.

Анализ по циклируемости. Для разрабатываемого АБП могут быть использованы только те типы аккумуляторов, ресурс которых отвечает требуемому по заданию.

Механическая прочность. Следует учитывать параметры выбираемых ХИТ по механической прочности.

Климатические требования. Выбираемые типы ХИТ должны удовлетворять требованиям по климатическим воздействиям, указанным в техническом задании.

Конструктивные требования. Объем, габариты, масса. Выбранный тип ХИТ должен позволять без особых усилий (без доработки) скомпоновать АБП нужной формы и массогабаритных характеристик. При этом кроме величины требуемой емкости следует учитывать разрядное напряжение ХИТ и ток разряда. В случае жестких ограничений по массогабаритным характеристикам задача может решаться с помощью литиевых элементов (первичных) или никель-металлгидридных (литий-ионных) аккумуляторов. Для выбора конкретного типа литиевых ХИТ следует учитывать, кроме емкости, требуемое на-

пряжение и ток разряда, наличие провала напряжения, сохраняемость, саморазряд, взрывобезопасность [20] и стоимость. Более дорогие литий-тионилхлоридные ХИТ имеет смысл использовать в наиболее важных изделиях. В других случаях оправдано использование элементов системы литий-полифторуглерод и даже более простых цинк-марганцевых элементов.

В отдельных случаях есть необходимость обеспечения специфических требований. Ряд разработанных ХИТ имеют минимальную толщину: это аккумуляторы Д-0.02 и Д-0.09 и элементы ФЛ-0.16, МЛГ-0.2, МЛГ-0.15 и МЛГ-0.3. Последние три имеют плоскую гибкую конструкцию, позволяющую удачно компоновать их в плоские блоки питания. Для миниатюрных изделий разработаны самые маленькие элементы РЦ-11М и ВЦ-20. Немагнитный корпус имеется у элемента РЦ-71Н.

На формальном уровне комплексная модель выбора источников тока при разработке АБП может быть представлена следующим образом (рис.2).

При конструировании АБП следует кроме необходимости обеспечения требуемых технических характеристик учесть надежность коммутации ХИТ в батарею, электроизоляции ХИТ друг от друга и от деталей корпуса, надежность теплоотвода (в необходимых случаях). При этом важно наличие токоотводов (шинок) у выбранных ХИТ, так как присоединить шинки собственными силами можно лишь с использованием точечной электросварки. Если предстоит эксплуатация АБП в условиях агрессивной среды, требуется организация герметичного корпуса с выводом электрических контактов через стеклогермовводы. Повышаются требования к герметичности самих ХИТ и к их чистоте, так как наличие даже следовых количеств агрессивных веществ в замкнутом контейнере приводит к контактной коррозии, а в отдельных случаях – к выходу из строя наиболее важных изделий.

При выборе конкретного типа ХИТ требуется учитывать также состояние их промышленного производства и наличие или отсутствие каких-либо ведомственных инструкций и запретов.

Создание нового поколения химических источников тока позволило в основном отказаться от применения в миниатюрной РЭА ХИТ зарубежного производства. Полнота типажных рядов позволяет создавать АБП для любых видов техники. Для массового производства в настоящее время подготовлены ФЛ-0.15, ФЛ-1563, ФЛ-2173, ФЛ-0.05, МЛГ-0.2, МЛГ-0.3, МЛГ-0.15, НКГЦ-6, НКГЦ-3.5, НКГЦ-1.3, Д-0.4С, НВГЦ-0.9. Резкое увеличение объемов выпуска указанных ХИТ приведет к значительному их удешевлению и повышению надежности.

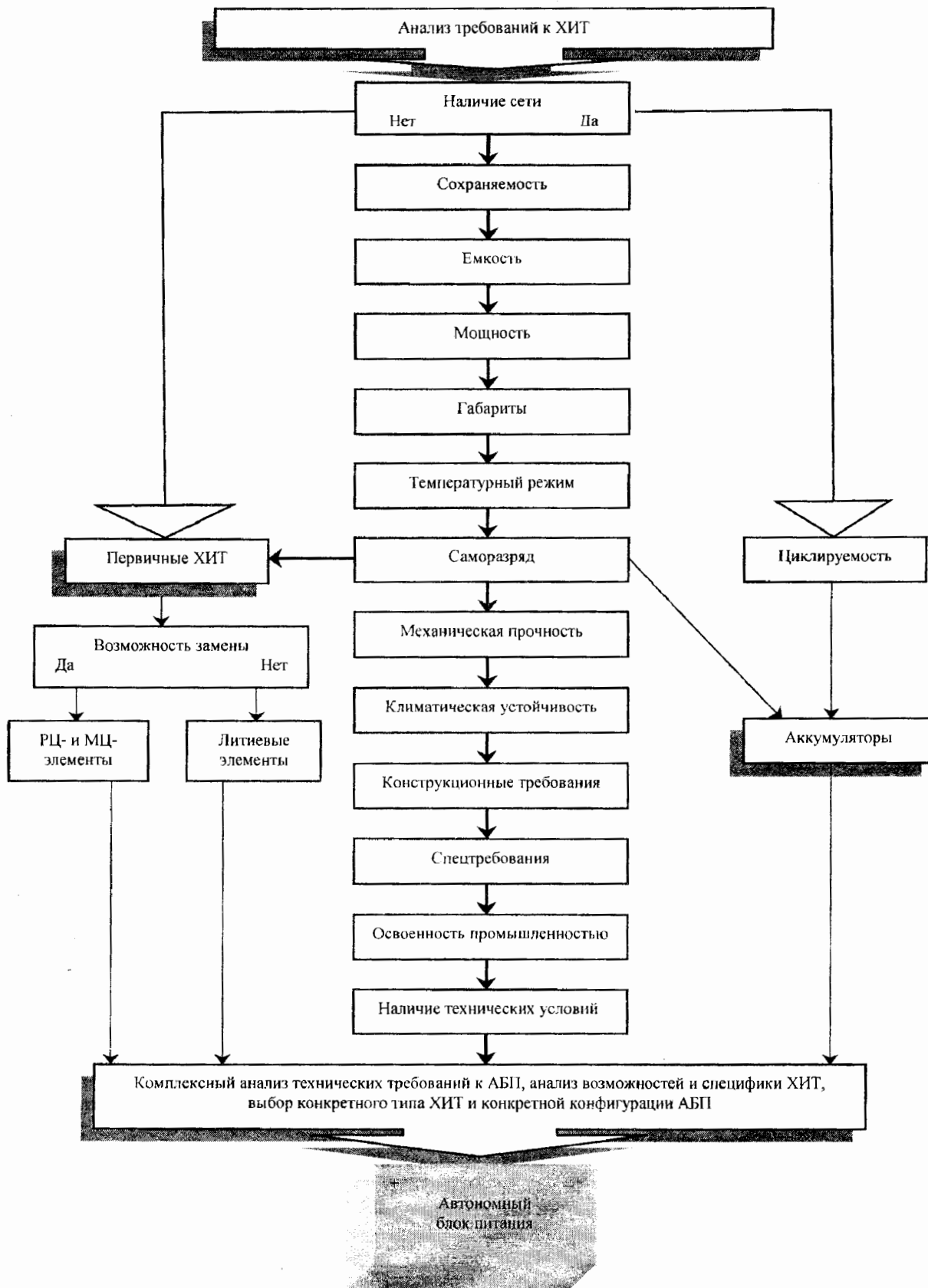


Рис. 2. Комплексная модель выбора источников тока при разработке АБП

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багоцкий В.С., Скундин А.М. Химические источники тока. М.: Энергоиздат, 1981.
2. Коровин Н.В. Новые химические источники тока. М.: Энергия, 1978.
3. Нижниковский Е.А., Сердюков П.Н. // Специальная техника. 2000. №4. С.52.
4. Романов В.В., Хашев Ю.М. Химические источники тока. М.: Советское радио, 1978.
5. Нижниковский Е.А. // IV Междунар. конф. «Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах»: Тез. докл. М., 1996. Ч.1. С.51.
6. Скундин А.М., Нижниковский Е.А. // Электронные компоненты. 2001. №4. С.34.
7. Технические условия 102.00.000ТУ, НПК «Литий», Дубна; Технические условия 563.100.005ТУ, НПК «Квант», Москва.
8. Нижниковский Е.А. // Электрохимия. 1998. Т.3, вып.7. С.722.
9. Нижниковский Е.А., Шимченко В.А., Кузовов В.В. // Электрохимическая энергетика. 2000. №1. С.68.
10. Авдалян М.Б., Каневский Л.С., Багоцкий В.С., Нижниковский Е.А. // Исследования в области электрохимической энергетики: Сб. тр. ВНИИАИ. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1989.
11. Нижниковский Е.А., Каневский Л.С., Фрольченков В.В. // Электрохимия. 1998. Т.37, вып.7. С.716.
12. Орлов С.В. // Электронные компоненты. 2000. №4. С.54.
13. Нижниковский Е.А. // Вопросы химии и химической технологии. 1999. №1. С.243.
14. Технические условия ИКШЖ.563 342.008ТУ, НИИАИ «Источник», Санкт-Петербург.
15. Фиалков А.С. и др. // Литиевые источники тока: Материалы VI Междунар. конф. Новочеркасск: Набл., 2000. С.102.
16. Бушкова О.В., Жуковский В.М., Лирова Б.И. // Фундаментальные проблемы электрохимической энергетики: Материалы IV Междунар. конф. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1999. С.8.
17. Радиоизотопные термоэлектрические генераторы / Под ред. Г.Ф.Фрадкина. М.: Атомиздат, 1978.
18. Лазаренко Ю.В., Пустовалов А.А., Шаповалов В.П. Малогабаритные ядерные источники электрической энергии. М.: Энергоатомиздат, 1992.
19. Анатыхук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. Киев: Наукова думка, 1979.
20. Нижниковский Е.А. // Электрохимическая энергетика. 2001. №3. С.39.