

# Инновационные электрические накопители на базе литиевых источников тока для мобильных и стационарных применений

*Рассмотрены проблемы развития автономных систем электроснабжения, связанные с отсутствием отечественных, отвечающих современным требованиям электрических накопителей. Показана перспективность применения и дан анализ состояния и направлений разработок литиевых аккумуляторов. Обоснована концепция построения и технический облик инновационных электрических накопителей на базе литий-ионных аккумуляторов. Их неотъемлемым и ключевым элементом являются микропроцессорные системы контроля и управления. На примере разработок ОАО «АВЭКС» проанализированы системные, схемотехнические и алгоритмические решения, используемые при проектировании интеллектуальных литий-ионных электрических накопителей для авиакосмической и морской техники, мобильных и стационарных применений.*

**Ключевые слова:** электрический накопитель, аккумуляторная батарея, литий-ионный аккумулятор, система контроля и управления, система электроснабжения, комбинированная энергоустановка, источник бесперебойного электропитания.

## Введение

Энергетическая отрасль играет системообразующую роль в экономике. Сегодня в отрасли имеет место:

- моральное и технологическое устаревание парка используемого оборудования;
- низкая энергетическая эффективность существующей отечественной техники по сравнению с зарубежными аналогами;
- научно-техническая и технологическая зависимость Российской Федерации от поставок импортных технологий и оборудования.

«Энергетическая стратегия России на период до 2020 г.» важнейшими практическими задачами для развития электроэнергетики определяет поиск и освоение принципиально новых технологий автономной энергетики, в том числе создание новых первичных и вторичных химических источников тока (ХИТ) и электроэнергетических систем на их основе. Для повышения эффективности систем электроснабжения (СЭС) за счет снижения потерь при передаче, распределении и потреблении электроэнергии необходимо более широко внедрять децентрализацию систем электроснабжения, используя мощные резервные и буферные электроаккумулирующие системы на



**А. И. Груздев,**  
к. ф. -м. н., главный конструктор  
разработок аккумуляторных батарей  
ОАО «Авиационная электроника  
и коммуникационные системы»  
e-mail: a\_gruzdev@mail.ru

основе высокоэнергоемких аккумуляторов. Немаловажным фактором для внедрения таких автономных электроэнергетических систем является не только возможность повышения эффективности использования энергоресурсов, но и обеспечение бесперебойности электроснабжения потребителей.

Интенсивное развитие электрических накопителей для автономных СЭС стимулируют и потребности ракетно-космической техники. Резко повысившиеся требования к энерговооруженности космических аппаратов в связи с использованием на борту электрических ракетных двигателей и мощных целевых нагрузок, стимулирует замену традиционных никель-кадмиевых батарей на никель-водородные и литий-ионные батареи. Эти изменения в требованиях к СЭС космических аппаратов требуют разработки новых системных и конструктивных подходов и к их построению.

Аналогичная ситуация сложилась и в авиационной отрасли. Эксплуатируемые сегодня на воздушных судах стартерные аккумуляторные батареи разрабатывались 40–50 лет назад и по своим технико-эксплуатационным характеристикам, в том числе по удельной энергоемкости, параметрам надежности, диапазону рабочих температур не отвечают современным требованиям. Государственная программа РФ «Развитие авиационной промышленности» на 2013–2025 гг. в

качестве одной из приоритетных задач и направления развития авиационной промышленности определяет разработку и применения агрегатов и систем «полностью электрического самолета» (ПЭС) на текущих и перспективных моделях самолетов. В связи с этим на первый план выходит разработка и освоение производства мощных высоковольтных (270 В) авиационных аккумуляторных батарей. Без создания нового поколения высокоэнергоемких (250 и более Вт·ч/кг) электрических накопителей невозможно и развитие отечественных беспилотных летательных аппаратов.

Анализ требований к энергообеспечению в области портативной электроники показывает, что существующие на рынке источники электропитания по многим параметрам не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ним современными электронными устройствами. Реальные потребности Министерства обороны, здравоохранения и других отраслей техники выдвигают в качестве первостепенной задачи разработку и освоение производства более мощных и легких электрических накопителей и создание на их основе автономных носимых систем бесперебойного электропитания.

Решению вышеперечисленных задач сегодня препятствует значительное технологическое отставание России в области производства современных первичных и вторичных ХИТ. Распад СССР и нарушение сложившихся хозяйственных связей, резкое снижение бюджетного финансирования и объемов Гособоронзаказа в 1990-е гг., в ряде случаев привело к полному прекращению перспективных разработок в отраслевых институтах и на предприятиях – производителях источников тока.

Характерным примером служит ведущее предприятие отрасли – НПО «Квант», которое распалось на множество организаций, часть из которых оказалась за границами не только Российской Федерации, но и стран СНГ. Были полностью прекращены разработки и потеряна технологическая и испытательная база для создания мощных электрохимических (молекулярных) конденсаторов, щелочных воздушно-металлических источников тока, высокоэнергетических серно-натриевых, никель-металлогидридных и серебряно-цинковых аккумуляторов, литиевых первичных и вторичных источников тока и др.

Из-за отсутствия производства литий-ионных и литий-гельполимерных аккумуляторов (ЛИА), потребности российского рынка в этой продукции сегодня удовлетворяются за счет импортных аккумуляторов. Учитывая двойное назначение электрических накопителей экспорт современных технологий их производства в Россию невозможен. Ярким примером служит созданное в рамках инвестиционного проекта ГК «Роснано» ООО «Лиотех», организовавшее в Новосибирске по китайской технологии производство ЛИА, характеристики которых существенно уступают не только лучшим мировым аналогам, но и китайским аккумуляторам-прототипам.

Поэтому, создание в России производства отвечающих современным требованиям высокотехнологичных накопителей возможно только за счет использования собственных ресурсов и научно-технического задела,

которые, не смотря на ограниченность, еще позволяют решить задачу разработки и освоения инновационной продукции. Сегодня в ряде академических, учебных и отраслевых институтах ведутся разработки новых электропроводных материалов и электролитов для литиевых источников тока. Разрабатываются и выпускаются мелкими партиями и сами ЛИА, которые сегодня имеют параметры, соответствующие общемировому уровню, хотя и отстают от лучших мировых аналогов (см. рис. 2 и 3).

ОАО «АВЭКС» имеет многолетний опыт в области создания современных аккумуляторных батарей и СЭС на их основе для аэрокосмической и морской техники, мобильных и стационарных наземных применений. За последние 15 лет создан значительный научно-технический задел в области проектирования тяговых и буферных аккумуляторных батарей, комбинированных энергоустановок для транспортных и стационарных применений, в том числе с использованием электрохимических генераторов на топливных элементах. Предприятие стало ведущей организацией в области создания микропроцессорных систем контроля и управления (СКУ) для литий-ионных аккумуляторных батарей для необитаемых космических аппаратов, транспортных электроприводных средств, морской и медицинской техники, в том числе электрических накопителей мегаваттного класса мощностей [1–4]. В последнее время ОАО «АВЭКС» активно ведутся работы по созданию авиационных стартерных литий-ионных АБ, а также высоковольтных накопителей и комбинированных энергоустановок на их основе для аэрокосмических и наземных применений. Благодаря микропроцессорным СКУ новое поколение «интеллектуальных» электрических накопителей может реализовывать системообразующие функции при построении электроэнергетических комплексов и систем и определять не только их тактико-технические параметры, но и алгоритм их функционирования.

### Состояние разработок перспективных типов электрических накопителей

В настоящее время в качестве накопителей электрической энергии разрабатываются 3 основных вида накопителей электрической энергии: индукционные накопители, электромеханические накопители, электрохимические накопители.

Индукционные и электромеханические накопители сегодня находятся на стадии разработки и начальной стадии внедрения в системы электроснабжения сетевой и децентрализованной энергетики для снятия пиковых нагрузок, в основном, мегаваттного диапазона мощностей. Для автономных применений они не используются из-за относительно невысоких (менее 100 Вт·ч/кг) удельных энергетических характеристик.

В большинстве энергетических применений в качестве накопителей используются вторичные химические источники тока – электрохимические конденсаторы (ЭХК) и аккумуляторы. Из-за низких рабочих напряжений все они применяются только в составе батарей. Исключением являются отдельные

Основные характеристики литиевых аккумуляторов [6]

Характеристика	Li-ion	Li-S	Li-O <sub>2</sub>
НРЦ, В	3,6–4,2	2,53	3,1
Номинальное напряжение, В	3,2–3,7	2,1	2,6–2,75
Теоретическая удельная энергия, Вт·ч/кг	500–600	2600	5580 (Li <sub>2</sub> O) 3630 (Li <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )
Достигнутая практическая удельная энергия, Вт·ч/кг	180–250	250–350	400–500 (?)
Плотность энергии, Вт·ч/л	400–620	350–500	(?)
Циклируемость (100% разряд)	500–1000	30–500(?)	10–20
Внутренний механизм защиты от перезаряда	нет	да	нет

портативные применения литий-ионных аккумуляторов, например, в мобильных телефонах.

Основными достоинствами ЭХК являются большой ресурс при циклической работе, высокие мощности заряда/разряда. Они хорошо работают в условиях как пониженных, так и повышенных температур. Их основным недостатком является высокая стоимость при более низкой плотности энергии по сравнению с аккумуляторами. Поэтому ЭХК используются там, где требуется многократное циклирование, или когда нет альтернативы из-за экстремальных рабочих температур. Основной областью их применения в качестве электрических накопителей является импульсная техника и техника синусоидальных токов. В некоторых разработках батареи ЭХК используют совместно с аккумуляторными батареями (АБ) для обеспечения высоких импульсных разрядных токов.

Сегодня, благодаря низкой стоимости, более 50% рынка химических источников тока занимают свинцово-кислотные аккумуляторы. Однако они имеют относительно низкие удельные энергии и мощности, надежность (характерное свойство — «внезапный отказ») и ограниченный диапазон рабочих температур.

Наиболее перспективными для построения высокоэнергоемких электрических накопителей являются аккумуляторы с литиевым анодом, характеризующиеся высокой теоретической удельной электрической энергией и высоким разрядным напряжением (см. табл. 1). Первые работы по литиевым аккумуляторам были осуществлены Г. Н. Льюисом в 1912 г. Попытки разработать перезаряжаемые литиевые источники тока предпринимались в 1980-е гг., но были неудачными из-за невозможности обеспечения приемлемого уровня безопасности при обращении с ними [5].

Литий-кислородные аккумуляторы (Li–O<sub>2</sub>) также часто называют литий-воздушными аккумуляторами не вышли из стадии лабораторных исследований, направленных на решение вопросов не только инженерного и технологического, но и научного характера [7].

Литий-серные аккумуляторы (Li–S) более близки к серийному производству. Корпорация SION Power Corp. первой продемонстрировала в 2006 г. прототип литий-серного аккумулятора для ноутбуков, имеющий

удельную энергию порядка 350 Вт·ч/кг и допускающий 300 циклов заряда/разряда. Практически с этого момента вся техническая информация (в том числе и научного плана) о разработках в этой фирме была засекречена. В соответствии с опубликованным в январе 2012 г. пресс-релизом компания и фирма BASF подписала соглашение, по которому BASF инвестирует в Sion Power Corp. \$50 млн на создание промышленного производства литий-серных батарей [8]. Если эта программа будет реализована, то можно ожидать появление на рынке в 2014 г. литий-серных батарей. Однако удельные параметры демонстрационной батареи этой фирмы, прошедшие натурные испытания на беспилотном летательном аппарате «Zephyr» существенно ниже (260 Вт·ч/кг) чем у прототипов единичных аккумуляторов (рис. 1) и, как будет показано ниже, могут быть реализованы уже в ближайшей перспективе на базе литий-ионных аккумуляторов.

Первые литий-ионные аккумуляторы, разработанные фирмой «Sony», появились на рынке ХИТ в 1991 г. Развитие технологии ЛИА шло беспрецедентно быстрыми темпами. Например, к сегодняшнему дню их удельные массовые энергетические характеристики увеличились в 3 раза, а по удельной мощности — в 30 и более раз, что во многом определило общий прогресс и направления развития автономной энергетики [9]. В последние пять лет наибольший прогресс наблюдается в удельных мощностных характеристиках ЛИА. Мощность аккумуляторов короткого (НР) режима разряда может достигать 1,5 кВт/кг, а сверхкороткого (ХНР) режима разряда (высокомощные ЛИА) — 5 и более кВт/кг. В Японии, США, Франции, Германии, Корее ХНР аккумуляторы разрабатываются в рамках работ по созданию улучшенной батареи для электро-

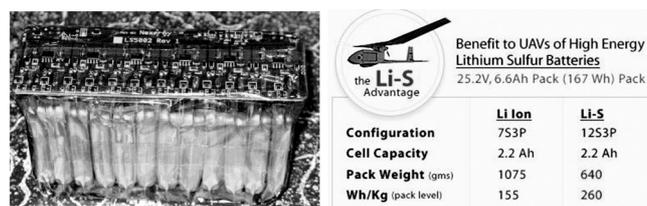


Рис. 1. Внешний вид и параметры Li-S батареи в сравнении с Li-ионной батареей (по данным фирмы «SION») [4]

*Основные характеристики серийных герметизированных аккумуляторов*

Характеристика аккумулятора	Тип аккумулятора						
	Ni-MH	Ni-Zn	Ag-Zn	Ni-H	Pb-кисл	Ni-Cd	Li-ион
Номинальное напряжение, В	1,2	1,6	1,5	1,25	2	1,2	2,5–3,7
Удельная энергия, Вт·ч/кг	40–70	50–70	90–100	50–95	20–50	20–45	80–270
Мощность разряда максимальная, Вт/кг	500	500	1500	150	400	400	2000
Ток заряда максимальный, А (С-емкость аккумулят.)	(0,3–1)С	0,3С	0,3С	0,3С	0,3С	(0,2–0,5)С	(1–6)С
Диапазон рабочих температур, °С	–30–40	–40–50	–40–50	–20–50	–40–50	–50–50	–50–60
Саморазряд, %/мес	30	20	20	30%/сут	10–20	10–15	1–5
КПД цикла заряд/разряд, %	70	70	80	60	60–70	60–70	92–98
Глубина разряда, %	80	80	80	80	80	100	100
Ресурс при 80% разряде, циклов	1000	50–300	6–50	1500	300	1000	2500

мобиля и гибридного автомобиля. Коммерческие образцы ХНР ЛИА показывают разрядные мощности, сравнимые с электрохимическими конденсаторами. При этом токи разряда в импульсном режиме достигают 20–50С.

Сегодня основная тенденция на мировом рынке ХИТ — опережающие темпы роста (15–20%) объемов производства литий-ионных аккумуляторов (ЛИА), как за счет расширения сфер применения, так и уменьшения доли ХИТ других типов [10]. Это связано с тем, что ЛИА сегодня в 3–10 раз превышающие основные характеристики лучших образцов других типов аккумуляторов (см. табл. 2).

Необходимо отметить, что литий-ионные аккумуляторы — большой класс вторичных ХИТ, принцип действия которых основан на переносе ионов  $Li^+$  между электродами через органический электролит. В качестве анода обычно используется углеродный материал, способный интеркалировать (внедрять) литий с образованием соединения типа  $LiC_6$ . В качестве катода используются литированные оксиды переходных металлов типа  $LiMO_2$  где  $M — Co; Ni; Mn$  или их различные сочетания. В настоящее время в качестве катодных материалов также начали применять фосфаты переходных металлов типа  $LiMPO_4$  где  $M — Fe, Co, Ni$ . Сепаратором служит мелкопористая полипропиленовая или полиэтиленовая пленка. В качестве электролита используется жидкий неводный электролит на основе смеси неводных апротонных растворителей и литиевых солей типа  $LiPF_6$ . Другим типом литий-ионного аккумулятора является литий-гельполимерный аккумулятор, в котором использу-

ется аналогичный электролит с добавкой полимеров (полиакрилонитрила, полиметакрилата и др.). Все эти электролиты пожароопасны. Попытки сделать эффективный пожаробезопасный электролит пока успехом не увенчались.

Литий-ионные аккумуляторы могут иметь цилиндрическую или призматическую форму. Корпус аккумулятора обычно изготавливается из нержавеющей стали, алюминия или полипропилена. В последние годы большое распространение получили аккумуляторы, в так называемой «мягкой» ламинированной упаковке (металлизированный пластик). Основные типы серийных ЛИА представлены на рис. 2, а характеристики отечественных аккумуляторов — на рис. 3.

Основные производители ЛИА — японские компании, в основном выпускают ЛИА емкостью ниже 5 А·ч, а для создания батарей большой емкости используют их параллельно-последовательное или матричное соединение. В США, Корею и Китае серийно производятся ЛИА емкостью несколько сотен А·ч. Экспериментально подтвержден высокий ресурс работы ЛИА в гибридных электромобилях — более 150000 неполных циклов. Литий-ионные аккумуляторы фирмы SAFT с 2000 г. сертифицированы для использования в авиационно-космической технике. Они допускают до 2000 глубоких циклов разряда при сроке службы до 8 лет. Для стационарных применений разработаны и предлагаются литий-ионные батареи мегаваттного класса емкостью сотни и тысячи кВт·ч.

В качестве недостатка литий-ионных аккумуляторов сегодня отмечается их относительно низкий (5–8 лет) срок службы, связанный с процессом «старения»

Анод	Катод	Тип электролита	Рыночное название аккумулятора	Напряжение, В	Удельная энергия, Вт·ч/кг	Ток заряда, С	Ток разряда, С	Ресурс, циклы	Ведущие производители в мире	Ведущие производители в России
Углерод	$LiMn_2O_4$	Жидкий Гель	Литий-ионный	3,8	140-160	0,3	1-2	300	Sony	-
	$LiCoO_2$	Жидкий Гель	Литий-ионный		140-160	0,3	1	1200	GS Yuasa	Сапури
		Гель	Литий-полимерный	3,7	140-190	1-2	3-30	1200	Kokam	Уралэлемент
	NCA	Жидкий Гель	Литий-ионный		170-270	0,3-0,5	2-3	500-1000	Panasonic	НИИЭИ
$Li_4Ti_5O_{12}$	$LiFePO_4$	Жидкий Гель	Железо-фосфатный	3,3	80-120	1-10	3-50	3000	A123 systems	НИИЭИ Ливтех
	$LiCoO_2$	Гель	Навигационный	2,2	70-80	10	10	>8000	Alhaimano	-



Рис. 2. Основные типы серийных литий-ионных аккумуляторов

Характеристика	ОАО «НИИП «Источник»	ОАО «АК «Ригель»	ООО «Ливтех»	ОАО «Сапури»	ОАО «Уралэлемент»	ОАО «НИИ электротехнологий и изделий»
Номинальная емкость, А·ч	1,5 – 25, 100, 170	0,9 – 10, 50, 150	240, 380, 770	10, 25, 50, 65, 120	10, 40, 110 (40)*	1,7, 18, 35, 60, 80 (15)*
Форма корпуса	Призма	Призма	Призма	Призма	Призма (цилиндр)	Призма
Удельная энергия, Вт·ч/кг	130	100-120	90	110-162	70 (96)*	135-175 (105)*
Максимальный ток разряда, С	2,5	2,0	3,0	2,0	4-5 (10)*	2,0 (26)*
Электролитные материалы	Импорт	Импорт	Импорт	Импорт	Импорт	Собственного производства
Базовая область применения	Связь, электромобили	Связь, подводные аппараты	Электромобили	Космические аппараты	Подводные аппараты	Эксплуатация боевой, летательные и космические аппараты
Характеристика производства	Мелко серийное	Мелко серийное	Крупно серийное	Мелко серийное	Мелко серийное	Мелко серийное

\* - характеристики силовых аккумуляторов

Рис. 3. Характеристики ЛИА российских производителей

Электрический накопитель		
Аккумуляторный блок	Система контроля и управления	Система токовой защиты и коммутации
Корпус	Система термо-кондиционирования	Зарядно-разрядное устройство

Рис. 4. Структура инновационного электрического накопителя

из-за деградации используемых в них материалов. В большей степени это относится к гелеполимерным ЛИА. Старение ЛИА ускоряется при работе или хранении при повышенных температурах, особенно в состоянии высокой степени заряженности. Снижение ресурса этого типа ЛИА имеет место и при их эксплуатации при пониженных температурах, прежде всего из-за того, что они плохо заряжаются при отрицательных температурах. На ресурс также оказывает влияние и величина тока разряда и заряда. Для большинства ЛИА зарядные токи не должны превышать величины 1С, а разрядные токи – 3С.

Разработки с использованием новых электродных материалов позволяют не только устранить многие из отмеченных выше недостатков ЛИА, но и снизить их себестоимость. К заявлениям производителей по поводу характеристик новых ЛИА нужно относиться с известной долей скептицизма, поскольку только опыт длительной эксплуатации может подтвердить заявленные параметры. Однако не вызывает сомнения существенное улучшение технических, эксплуатационных и стоимостных параметров ЛИА при переходе на новые, в том числе наноструктурированные материалы.

## Технический облик инновационных накопителей на базе литиевых аккумуляторов

Эксплуатируемые сегодня щелочные и кислотные аккумуляторные батареи (АБ) – это размещенные в корпусе электрически соединенные между собой аккумуляторы. В последние годы все более высокие требования предъявляются Потребителями не только к удельным энергетическим и мощностным параметрам АБ, но и к безопасности, простоте (полная безуходность) и удобству их эксплуатации. В связи с этим инновационные АБ нового поколения представляют собой сложное электротехническое устройство на базе ЛИА (электрический накопитель), имеющее в своем составе электронные и электротехнические блоки и системы, обеспечивающие:

1. Гарантированное накопление, хранение и получение электрической энергии требуемого потребителем качества по величине и виду напряжения и тока.
2. Защиту ЛИА от возникновения опасных режимов работы при нештатной эксплуатации, хранении и транспортировке.
3. Прогнозирование возникновения и парирование единичных отказов основных элементов и узлов устройства при эксплуатации.
4. Предоставление пользователю объективной информации об остаточном заряде, остаточном ресурсе и других текущих и прогнозируемых параметрах АБ.

В состав электрического накопителя наряду с объединенными в аккумуляторные блоки ЛИА входят: система контроля и управления, блоки силовой электроники и (или) электротехническая аппаратура токовой защиты. Кроме того, в состав накопителя может входить система воздушного или жидкостного термокондиционирования, зарядное или зарядно-разрядное устройство (см. рис. 4).

Конструктивное исполнение аккумуляторного блока определяется [11]:

- 1) типом корпуса ЛИА (цилиндр, призма, ламинированная фольга);
- 2) ее электрическими параметрами (номинальное напряжение, разрядный ток и емкость батареи);
- 3) требованиями по устойчивости к внешним воздействиям, надежности и стоимости изделия, в основном связанными с областью его применения: бытовое, транспортное, промышленное, специальная или военная техника.

Наиболее сложна компоновка батареи цилиндрических ЛИА, при этом относительно единичных аккумуляторов ее удельные объемные параметры снижаются в большей мере, чем массовые параметры (рис. 5, а).

Конструктив батарей из призматических и ламинированных ЛИА в значительной мере определяется их назначением и для относительно небольших (до 20 А·ч) емкостей, а также для бытовых и стационарных применений может быть относительно простым и незначительно влияющим на габариты и массу батареи (рис. 5, б). При наличии опасных внешних воздействий на батарею ее конструктивное исполнение усложняется, также как и в случае мощных батарей, требующих принудительного воздушного или жидкостного охлаждения (рис. 5, в).

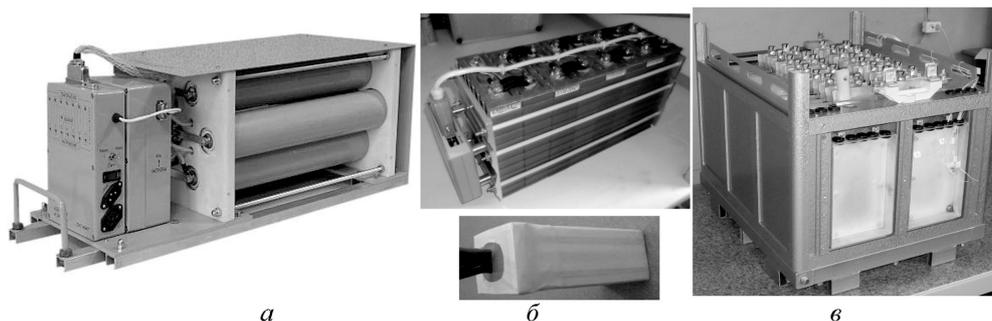


Рис. 5. Конструктивное исполнение батарейного блока на базе ЛИА в цилиндрическом (а), призматическом (б) и мягком ламинированном (в) корпусе

Для беспилотных летательных аппаратов, носимых систем электропитания и ряда других применений востребованы электрические накопители с удельной энергоемкостью 250–350 Вт·ч/кг. Очевидно, что для их создания необходимо:

1. Использовать аккумуляторы с максимально возможной удельной энергоемкостью.
2. Уменьшить массу конструктивных элементов, обеспечив при этом требуемую механическую прочность накопителя.
3. Минимизировать массу СКУ, сохранив ее функциональные возможности.

Сегодня наиболее высокими (270 Вт·ч/кг) удельными энергетическими характеристиками обладают цилиндрические малогабаритные аккумуляторы японской фирмы «Panasonic» (см. рис. 2). Используя эти аккумуляторы совместно с ООО «Фирма «Альфа-плюс» для замены первичного литиевого источника в его габаритной конфигурации разработана батарея 6ICR-58×3,4Ач емкостью 198 А·ч с удельной энергоемкостью порядка 210 Вт·ч/кг (рис. 6).

Наибольшую сложность представляет конструирование высоковольтных батарей. Повышение напряжения батареи может быть достигнуто только за счет увеличения количества аккумуляторов в батарее, что требует и увеличения количества каналов контроля и управления в ее СКУ.

При этом количество необходимых для функционирования СКУ токопроводящих связей увеличивается настолько, что моноблочный вариант батареи становится схемотехнически и конструктивно сложно реализуемым, а его массогабаритные показатели начинают резко падать. Кроме того, из-за неизбежного увеличения длины электрических жгутов ухудшаются помехозащищенность и точность измерений параметров батареи [12].

Решить перечисленные выше проблемы и обеспечить требуемый уровень безопасности и надежности функционирования батареи позволяет переход к модульному построению с многоуровневой интегрированной с аккумуляторными блоками или единичны-

ми аккумуляторными блоками СКУ. Кроме повышения технико-эксплуатационных показателей АБ модульный принцип построения позволяет [13]:

- 1) существенно сократить сроки и трудоемкость разработки новых батарей за счет унификации входящих в СКУ блоков;
- 2) обеспечить электробезопасность выполнения работ при монтаже, техническом обслуживании и ремонте;
- 3) обеспечить транспортировку и монтаж батареи с минимальным использованием подъемно-транспортных механизмов.

### Задачи и функции микропроцессорных систем контроля и управления

Система контроля и управления — неотъемлемый и ключевой элемент электрического накопителя, определяющим не только его функциональные возможности, но и его технический облик. СКУ обеспечивает повышение:

- 1) безопасности и надежности работы благодаря контролю состояния каждого аккумулятора в батарее;
- 2) ресурса работы аккумуляторов за счет исключения опасных для них режимов работы, в том числе защиты от токовых перегрузок и короткого замыкания во внешней силовой цепи;
- 3) отказоустойчивости накопителя, путем автоматического парирования последствий отказа единичных аккумуляторов и других элементов устройства;
- 4) удобства эксплуатации и ремонта устройства, предоставляя пользователю информацию о текущих и прогнозируемых параметрах АБ, о «слабых» или отказавших аккумуляторах и узлах;
- 5) фактической емкости накопителя за счет:
  - реализации наиболее эффективных методов его заряда;
  - балансировки напряжений последовательно соединенных аккумуляторов;
  - вывода из силовой цепи или токовой разгрузки потерявших емкость аккумуляторов.

Для портативных применений СКУ батарей ЛИА до последнего времени в основном строили на базе специализированных микросхем контроля и защиты. В связи с освоением серийного производства ЛИА с новыми электродными материалами, имеющими различные «коридоры безопасных напряжений», в разработках СКУ наметилась тенденция к замене специализированных микросхем на микропроцессоры, позволяющие оперативно менять не только уставки, но и вносить изменения в сам алгоритм работы СКУ, в том числе использовать адаптивные алгоритмы с нечеткой логикой [14].

Повысить эффективность использования АБ, а также и его ресурс, можно путем предсказания состояния отдельных накопителей и батареи в целом и формирования на его основе управляющих воздействий на АБ. Реализация подобных возможностей в значительной степени зависит от используемого алгоритма работы СКУ.



Рис. 6. Экспериментальная батарея 6ICR-58×3,4Ач

В общем случае СКУ должна обеспечивать:

- контроль тока, напряжений и температуры накопителей;
- защиту батареи от перегрева, подзаряда, перезаряда и от токовых перегрузок;
- полный разряд всех ЛИА в батарее, в том числе и при снижении емкости одного из них;
- сохранение работоспособности накопителя при отказах ЛИА;
- прогнозирование остаточного заряда и остаточного ресурса работы накопителя;
- предоставление пользователю информации о состоянии накопителя;
- выработку управляющих команд для системы терморегулирования батареи;
- прием и обработку внешних управляющих команд;
- самотестирование работоспособности блоков, входящих в состав СКУ.

Важной функцией СКУ является аппаратное выравнивание степени заряженности (нивелирование разбаланса напряжений) единичных аккумуляторов в АБ. Основной причиной разбаланса напряжений является различие в степени заряженности аккумуляторов, обусловленное различиями в скоростях их саморазряда. Саморазряд обусловлен как токами утечек через внешние и внутренние электрические цепи аккумуляторов, так и электрохимическими процессами, протекающими на их электродах. Так как все ЛИА соединены последовательно, время разряда батареи будет лимитироваться наиболее разряженным (с наименьшим напряжением) аккумулятором, а возможность заряда батареи — аккумулятором с наибольшим напряжением. При этом используемая емкость батареи может быть существенно ниже емкости самого худшего из аккумуляторов, входящих в батарею. Следствием разбаланса напряжений является работа батареи по «худшему» (наиболее разряженному) аккумулятору, даже если он имеет наибольшую номинальную емкость среди всех ЛИА в батарее [15].

## Аппаратная реализация систем контроля и управления

Учитывая высокую мощность и большой запас энергии, а также горючесть применяемого в ЛИА электролита, основной задачей всех СКУ является защита АБ при возникновении опасных режимов работы. К ним, прежде всего, относятся токовые перегрузки и короткое замыкание силовых цепей, перегрев АБ, перезаряд и переразряд ЛИА. Защита от возникновения опасных режимов работы осуществляется путем нивелирования разбаланса напряжений ЛИА и формирования управляющих сигналов для изменения режима работы внешних устройств или для отключения батареи от внешних силовых цепей с помощью коммутационной аппаратуры, конструктивно размещаемой как в составе АБ, так и вне ее.

Для защиты АБ от перезаряда и переразряда СКУ осуществляет измерение напряжения каждого ЛИА в батарее. При этом измерительные цепи всех аккумуляторов должны быть гальванически развязаны и рас-

считаны на работу при напряжении, соответствующем максимальному напряжению АБ. Для большинства применений точность измерения напряжения ЛИА должна быть не хуже  $\pm 20$  мВ. При формировании управляющих сигналов по уровню напряжений ЛИА необходимо учитывать падение напряжения на их внутреннем сопротивлении. Для этого в программном обеспечении СКУ предусматривается корректировка предельных уставок или измеренных значений напряжений на основе заложенной в нем математической модели используемого ЛИА.

Поэлементный контроль температуры ЛИА необходим также для защиты АБ от перегрева. В последнее время для этих целей часто применяются датчики температуры с цифровым или аналоговым выходом, относительно простые в использовании и обеспечивающие точность измерения  $\pm(1-2)^\circ\text{C}$ . Терморезисторы или термопары продолжают использоваться для ряда специальных применений, связанных с работой АБ в экстремальных условиях или с ограничениями в использовании импортной элементной базы.

Для измерения тока в АБ наряду с шунтами используются датчики тока холловского типа, широкая номенклатура которых позволяет измерять токи в диапазоне от 10 до 1000 А с точностью порядка  $\pm 2\%$ . Кроме подсчета зарядной и разрядной емкости ЛИА, величина тока необходима для расчета корректирующих поправок к измеренным значениям напряжения ЛИА. Датчики тока также могут быть использованы для защиты от токовых перегрузок силовых цепей АБ, наряду с плавкими вставками или самовосстанавливающимися предохранителями, которые защищают АБ только от токов короткого замыкания (КЗ) и не эффективны при относительно небольших (1,5–2-кратных) токовых перегрузках.

Наиболее сложно реализуемой задачей является обеспечение работоспособности АБ при отказах (КЗ или обрыв) внутри ЛИА. При параллельном соединении ЛИА дополнительно для защиты от последствий внутренних КЗ последовательно с каждым из них устанавливается плавкая вставка. Для сохранения работоспособности АБ при отказе одного из ЛИА при их последовательном соединении необходимо вывести его из силовой цепи одновременно сохранив ее целостность. Для этого используются электромеханические или электронные байпасные устройства, которые управляются СКУ. Они могут устанавливаться непосредственно на борнах ЛИА для отвода через них выделяющегося в байпасном устройстве тепла [16].

Аппаратные методы нивелирование разбаланса напряжений можно разделить на:

1. Пассивные методы, когда ЛИА с повышенным напряжением разряжается с помощью подключаемого параллельно ему резистора.
2. Активные методы, обеспечивающие выравнивание напряжений аккумуляторов путем перераспределения энергии между ними [17].
3. Системные методы, когда осуществляется индивидуальный заряд каждого ЛИА.

В разработках ОАО «АВЭКС» наиболее активно реализуются следующие методы нивелирования разбаланса напряжения литий-ионных АБ [1, 4]:

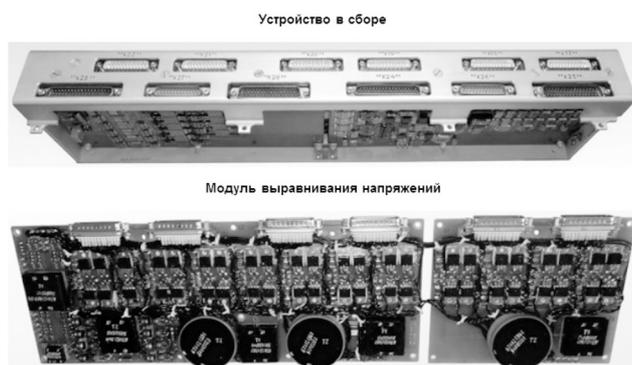


Рис. 7. Устройство контроля и выравнивания высоковольтной батареи из 23 ЛИА [1]

1. Различные варианты шунтирования ЛИА электронной схемой.
2. Выравнивание напряжений в АБ за счет перераспределения энергии между ЛИА с использованием трансформаторных схем.
3. Подзаряд ЛИА с напряжением меньше среднего значения по батарее.
4. Параллельный заряд единичных ЛИА.
5. Заряд батареи с отключением заряженных до заданного напряжения ЛИА от зарядной цепи.
6. Использование многоканального зарядного устройства.

Выбор метода и аппаратной реализации блоков нивелирования разбаланса напряжения обычно определяется как назначением и электрическими параметрами контролируемой батареи, так и условиями и режимами ее эксплуатации. Например, для СЭС необитаемых космических аппаратов, где техническое обслуживание и ремонт АБ невозможен, ОАО «АВЭКС» реализованы активные методы нивелирования с токами выравнивания 10 и более ампер, позволяющие компенсировать не только различие в скорости саморазряда, но существенную потерю емкости одним или несколькими ЛИА [13]. Внешний вид аппаратуры с трансформаторным модулем выравнивания, созданной в соответствии с требованиями Положения РК-98КТ представлен на рис. 7.

Для высоковольтных АБ, построенных по модульному принципу, обычно используются и многоуровневые модульные СКУ. Пример аппаратной реализации резервированной двухуровневой СКУ для батареи из 16-ти ЛИА, созданной для отработки алгоритмов функционирования и программного обеспечения СКУ высоковольтных батарей, приведен на рис. 8. Функции блока верхнего уровня управления выполняет персональный компьютер, реализующий прием от модулей БКУ16/1А и анализ информации о параметрах бата-

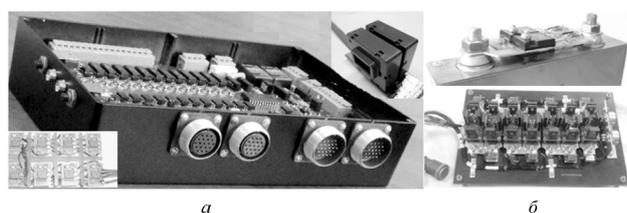


Рис. 8. Устройство контроля и управления СКУР/1 [1]

реи (напряжение, температура, состояние байпасного элемента ЛИА, ток батареи), формирование при необходимости команд на нивелирование разбаланса напряжений и вывод из силовой цепи отказавших аккумуляторов путем включения байпасных элементов, индикацию на дисплее телеметрической информации, прием и обработку команд оператора.

Для удобства эксплуатации накопителя информация о его состоянии может передаваться во внешнюю систему управления по стандартному цифровому каналу, выводиться на дисплей или отображаться с помощью светодиодов, используя интуитивно понятную «светофорную» цветовую символику, индицируя состояние одного из параметров АБ в трех градациях: «Норма», «Предупреждение», «Авария». При необходимости, используя один двухцветный светодиод в режимах постоянного и прерывистого свечения, можно отображать до 10 состояний одного из параметров АБ.

## Программное обеспечение СКУ

При разработке программного обеспечения (ПО) используются подходы, позволяющие не только повысить надежность и эффективность работы СКУ, но и упростить верификацию его компонентов:

1. Открытая блочная архитектура ПО, допускающая:
  - эффективное наращивание функционала программного комплекса;
  - гибкую компоновку системы под конкретное назначение;
  - повторное использования сертифицированных программных блоков;
  - функциональную изоляцию между независимыми компонентами ПО с целью локализации дефектов.
2. Контроль потоков данных и команд управления с обеспечением четкого планирования ресурсов, в том числе, режима исполнения в «жестком» реальном времени.
3. Мониторинг безопасности, предусматривающий прямой независимый мониторинг функций, которые могут привести к отказной ситуации.
4. Использование математической модели аккумуляторов для оптимизации режимов заряда и разряда АБ, повышения точности оценки остаточного заряда и остаточной емкости.
5. Программная защита от электромагнитных помех на основе анализа получаемой информации, а также использования программных фильтров для выделения полезного сигнала.
6. Автоматический контроль работоспособности аппаратной части и программного обеспечения СКУ, в том числе:
  - Выявление неисправности аналого-цифрового преобразователя путем считывания опорного напряжения.
  - Проверка работы оперативного запоминающего устройства последовательной записью и считыванием в ячейки памяти заранее известных чисел.

- Периодическая проверка контрольной суммы рабочей программы, хранимой в постоянном запоминающем устройстве микропроцессорных блоков.
  - Использование «сторожевого» таймера для защиты от «зависания» программы или сигнализации об отказе блока и необходимости перехода к работе с резервным блоком.
7. Предварительная верификация алгоритмов программного обеспечения без привлечения целевых аппаратных средств, как с использованием имитационного стенда программного комплексирования на базе персонального компьютера, так и тестирования ПО на стенде полунатурного моделирования с использованием макетных образцов СКУ и технологической АБ.
- Базовая программа тестирования ПО СКУ включает проверки:
1. Срабатывания защит при перезаряде, переразряде, перегреве, токовых перегрузках.
  2. Правильности реализации алгоритма нивелирования разбаланса напряжений.
  3. Реакции и устойчивости работы системы при возникновении отказов аппаратуры (нештатные ситуации):
    - отсутствие связи между блоками СКУ;
    - неисправности в цепях измерений тока, напряжений, температуры.

## Заключение

1. В настоящее время наиболее перспективными типами электрических накопителей являются батареи литий-ионных аккумуляторов, удельная энергоёмкость которых может достигать 200 и более Вт·ч/кг, а удельная мощность — 3–5 кВт/кг.
2. Несмотря на серьёзное отставание в экспериментальной и технологической базе для разработок и объёмах производства отечественных литий-ионных аккумуляторов научно-технический уровень создаваемых в России литий-ионных электрических накопителей не уступает общемировому уровню.
3. Для эффективного развития и координации отечественных разработок инновационных первичных и вторичных химических источников тока и систем электроснабжения на их основе для специальных и общепромышленных применений необходимо принятие федеральных целевых или межотраслевых программ в этом направлении.

*Список использованных источников*

1. <http://avecs.ru>.
2. В. А. Алмазов, Н. Н. Вдовин, А. И. Груздев, А. А. Кочнев и др. Изготовление и исследование литий-ионных батарей, изучение работы аккумуляторов в составе батарей//Электрохимическая энергетика, № 2, 2005.
3. Н. Н. Вдовин, А. И. Груздев, В. В. Жданов, А. В. Краснобрыжий. Принципы управления высоковольтными батареями на базе сверхвысокоёмких литий-ионных аккумуляторов//Материалы. VI междунар. конф. «Фундаментальные проблемы электрохимической энергетике», 5–9 сентября, 2005. Саратов: Изд. СГУ, 2005.
4. А. И. Груздев. Опыт создания батарей на базе литий-ионных аккумуляторов большой ёмкости//Электрохимическая энергетика, т. 11, № 3, 2011.
5. И. А. Кедринский, В. Г. Яковлев. Литий-ионные аккумуляторы. Красноярск: ИПК «Платина», 2002.
6. В. С. Колюшницын, Е. В. Карасева. Перспективы применения литий-ионных аккумуляторов в электрических транспортных средствах/Под. ред М. С. Плешакова//Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах: материалы XI междунар. конф. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2010.
7. <http://ecoconceptcars.ru/2011/06/litij-vozdushnye-akkumulyatory.html>.
8. <http://sionpower.com>.
9. А. И. Груздев. Состояние, проблемы и направления развития современных накопителей электрической энергии//Альтернативная энергетика и экология, № 7, 2008.
10. С. Б. Орлов. Аккумуляторы нового поколения для электро транспорта. Информационная система, каталог E00000681. <http://www.iElectro.ru>
11. А. И. Груздев, В. И. Трофименко. Системные подходы к построению литий-ионных аккумуляторных батарей//Физические проблемы водородной энергетики: тезисы докладов VI российской конференции. СПб., 2010.
12. М. Ф. Ганзбург, А. И. Груздев, В. И. Трофименко. Особенности построения аппаратуры контроля и защиты высоковольтных литий-ионных аккумуляторных батарей для систем электропитания космических аппаратов//Вопросы электрохимии. Труды НПП ВНИИЭМ, т. 123, № 4, 2011.
13. М. Ф. Ганзбург, А. И. Груздев, В. И. Трофименко. Проблемы построения систем контроля и управления литий-ионных аккумуляторных батарей/Под. ред М. С. Плешакова//Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах: материалы XI междунар. конф. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2010.
14. D. Andrea. Battery management systems for large lithium-ion battery packs. Artech Hous, 2010.
15. А. И. Груздев. Концепция построения систем контроля и управления высокоэнергетичными литиевыми аккумуляторными батареями//Электрохимическая энергетика, т. 5, № 2, 2005.
16. А. И. Груздев, Н. И. Куликов, А. В. Макаренко, А. Е. Сорокин. Специализированные источники питания на базе литий-ионных аккумуляторных батарей//Вестник Московского авиационного института, т. 19, № 5, 2012.
17. С. Норк. Активная балансировка последовательно соединённых элементов батарей//Электронные компоненты, т. 6, 2013.

## Innovation electricity storages powered by lithium current sources for mobile and permanent-type applications

**A. I. Gruzdev**, PhD, Chief Designer for the development of rechargeable batteries, JSC «Aircraft electronics and communication system» (JSC «AVECS»).

The issues of standalone power supply systems development associated with the unavailability of electricity storage elements of domestic origin to meet modern-day requirements have been reviewed. A promising outlook for the use of rechargeable lithium batteries was demonstrated and analysis of status and trends in the development of those provided. Structural framework and engineering concept of innovation electricity storages powered by lithium-ion rechargeable cells, were substantiated. Microprocessor-based systems of monitoring and control are integral and essential component of those. Drawing on the example of AVECS JSC, systematic, circuit design and algorithmic solutions employed in the development of smart lithium-ion electricity storage for aerospace and marine equipment, mobile and fixed terrestrial applications, were analyzed.

**Keywords:** electricity storage, rechargeable battery, lithium-ion rechargeable cell, monitoring and control system, power supply system, combination-type powerplant, uninterruptible power supply.