

**Б.И. ТУМАНОВ**, заслуженный конструктор РФ, генеральный директор

**В.М. АЛАШКИН**, к.т.н., с.н.с., зам генерального директора по НИОКР

**А.С. ДРАПОВ**, магистр, ведущий инженер

АО «Научно-производственный комплекс «Альтернативная Энергетика» (г. Электроугли)

## **ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

Разработка химических источников тока (ХИТ) нового поколения, является приоритетной задачей развития науки и техники России в соответствии с принятыми Федеральными целевыми программами и концепцией опережающего развития государства.

Более высокие удельные характеристики литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) по сравнению с аккумуляторами других электрохимических систем, а также успешный опыт эксплуатации литий ионных аккумуляторных батарей в автомобилестроении, судостроении и космонавтике позволяют рассматривать применение аккумуляторов данного типа для перспективных источников автономного электроснабжения авиационной техники, включая БЛА [1-3].

Современные бортовые авиационные аккумуляторные батареи предназначены для автономного запуска авиадвигателей и питания потребителей первой категории в полёте при выходе из строя основных источников энергии. Кроме того, будучи постоянно подключены к шинам, они способствуют сглаживанию пиковых нагрузок при включении мощных потребителей. Традиционно в авиации используются батареи трех электрохимических систем: свинцово-кислотные (СК), никель-кадмиевые (НК) и серебряно-цинковые (СЦ).

Свинцово-кислотные батареи имеют низкую удельную мощность, высокий саморазряд и выделение водорода при хранении и постепенно вытесняются никель-кадмиевыми.

Преимуществом НК батарей перед СК батареями является более длительный срок службы, лучшие служебные характеристики при пониженных температурах. К недостаткам относятся наличие «эффекта памяти», снижающего реальную емкость при эксплуатации, низкая удельная энергия и высокая стоимость.

Серебряно-цинковые батареи характеризуются удельной энергией, в два-три раза превышающей этот показатель для свинцово-кислотных и никель-кадмиевых батарей, однако имеют ограниченный срок службы (12-18 месяцев) и ограниченную работоспособность при пониженных температурах. К недостаткам СЦ-батарей также следует отнести высокую стоимость и трудоемкость обслуживания.

Перечисленные типы аккумуляторов негерметичны, выделяют водород при эксплуатации и хранении в заряженном состоянии, что снижает их безопасность. Для обеспечения эксплуатации всех указанных типов батарей требуется обязательное наличие аккумуляторных зарядных станций, оборудованных специальными категорийными помещениями.

Отмеченных выше недостатков лишены литий-ионные батареи, которые по сравнению с НК-батареями имеют в 3-4 раза более высокие удельные энергетические характеристики, а также длительный срок службы, высокую надежность, широкий температурный диапазон применения, не имеют «эффекта памяти». Для обслуживания таких батарей не требуются категорийные помещения, что особенно актуально для широкого применения БЛА, не требующих специально оборудованной аэродромной инфраструктуры.

В настоящее время ряд зарубежных фирм приступили к серийному производству литий-ионных бортовых авиационных батарей.

Для создания стартерных батарей используются высокомо мощные литий-ионные аккумуляторы. Мощность современных литий-ионных аккумуляторов зарубежных производителей для короткого (НР) режима разряда достигает  $1500 \div 2000$  Вт/кг, сверхкороткого (UNP) -  $3000 \div 5000$  Вт/кг.

Применение литий-ионных аккумуляторов позволяет повысить энергоемкость и мощность батарей при меньшей массе, повысить рабочее напряжение батареи и снизить потери от саморазряда при хранении на борту в заряженном состоянии. Литий-ионные аккумуляторы герметичны, имеют большой показатель цикличности и срок службы. Большим преимуществом литий-ионных аккумуляторов перед аналогами является возможность параллельно-последовательного соединения аккумуляторов в батарее. Это позволяет на базе аккумулятора одного типоразмера и унифицированной системы контроля осуществлять изготовление широкого спектра батарей с различным рабочим напряжением и электрической емкостью. Литий-ионные батареи допускают форсированный заряд и разряд[3].

В настоящее время авиационные стартерные литий-ионные аккумуляторные батареи (ЛИАБ) серийно производятся рядом зарубежных компаний.

По данным проспектов фирмы [4] литий-ионная технология фирмы SAFT обеспечивает Lockheed Martin самой первой в мире батареей высокой мощности и высокого напряжения для авиационной техники. Литий-ионные батареи SAFT с напряжением 270 В и 28 В предназначены для запуска двигателя, питания систем управления полетом и вспомогательного оборудования. Батареи разработки и производства фирмы SAFT применяются также на гражданских самолетах. Например, на Airbus A350 XWB использованы 4 батареи типа 450VH1 напряжением 28 В и емкостью 45 А ч [5]. Системы SAFT базируются на литий-ионных аккумуляторах, спроектированных с оптимизированным уровнем мощности или энергии.

Аккумуляторы затем соединяются параллельно и (или) последовательно, формируя модули, которые в свою очередь, соединяются, формируя батарейные системы с электроникой и программным обеспечением для безопасной работы и контроля.

Американская компания «Quallion» разработала и изготавливает ЛИАБ для применения в самолетах и вертолетах в рамках программы «More Electric Aircraft». Компания «Concorde» разработала ряд литий-ионных батарей для применения в авиации. Компания Boeing применяет литий-ионные батареи в коммерческих самолетах Boeing 787, а также в военных самолетах F-18 и F-16. Переход на литий-ионные батареи позволил существенно уменьшить массу и объем батарей, либо при увеличении запаса энергии при той же массе или объеме.

В России в настоящее время работы по созданию литий-ионных аккумуляторов ведут такие предприятия как АО «НПК «АЛЪТЭН», АО «ЭНЕРГИЯ», АО «Верхнеуфалейский завод «Уралэлемент», АО «Сатурн», АО «НИАИ», ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН [3]. Наиболее активно развивается производство отечественных ЛИА на заводе «Уралэлемент». К сожалению, в настоящее время большая часть используемых отечественными предприятиями в производстве материалов является импортными, а характеристики аккумуляторов по уровню отстают от зарубежных.

АО «НПК»АЛЪТЭН» ведет систематические целенаправленные исследования в области ЛИАБ. При участии ЦНИИ ВВС (НИЦ ЭРАТ) в 2011-2013 гг. выполнена НИР по контракту с Минпромторгом в которой разработана концепция построения литий-ионной батареи с интеллектуальной системой контроля и управления (СУ ЛИАБ) при взаимодействии с системой электропитания летательных аппаратов[6]. В силу высоких плотностей энергии ЛИА и их чувствительности к отклонениям режимов работы от номинальных СУ ЛИАБ должна контролировать критичные параметры ЛИА и обеспечивать защиту от опасных аварийных режимов. В рамках концепции разработана методика анализа надежности авиационных литий-ионной батарей, проработана логика функционирования СУ ЛИАБ на различных стадиях эксплуатации, исследованы схмотехнические решения с проведением макетирования выбранных вариантов, предложен четырехуровневый метод обеспечения безопасности литий-ионной батареи.

В завершение НИР разработан и изготовлен макетный образец стартерной литий-ионной батареи с встроенной СУ ЛИАБ емкостью 45 А ч в габаритах никель-кадмиевой батареи 20KSX-25, применяемой на большинстве российских летательных аппаратов. К настоящему времени предприятием за счет собственных средств разработан экспериментальный образец авиационной ЛИАБ 7Lion-60, обладающий существенно более высокими характеристиками.

Внешний вид и устройство батареи представлены на рисунке 1.

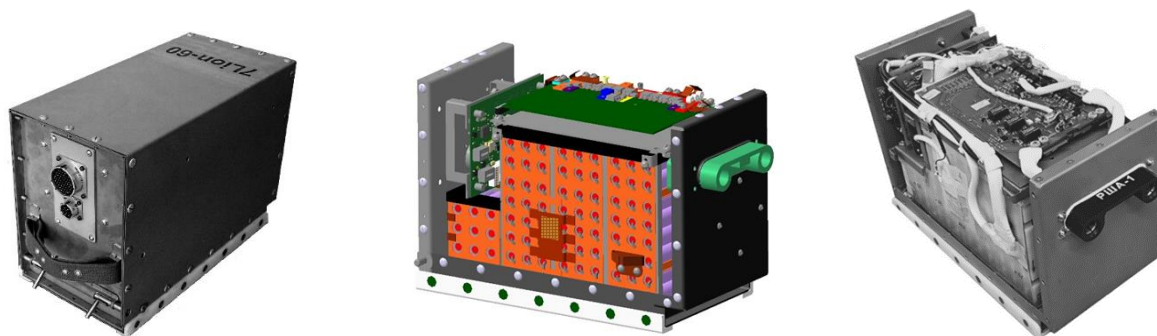


Рисунок 1. Внешний вид и устройство ЛИАБ 7Lion-60

ЛИАБ 7Lion-60 состоит из семи последовательно соединенных аккумуляторных модулей (АМ), состоящих из 24 параллельно соединенных аккумуляторов номинальной емкостью 2.5 Ач каждый, и СУ ЛИАБ.

Конструктивно батарея выполнена в корпусе с силовым разъемом типа РША-1, аналогичным применяемому в авиационной батарее 20KSX-25 и установленным на передней стенке корпуса. На задней стенке размещены технологические разъемы, предназначенные для проверки технического состояния батареи и соединения с бортовой информационной системой объекта.

СУЛИАБ работает в следующих режимах.

#### **Режим заряда батареи от бортовой сети летательного аппарата**

В этом режиме при превышении напряжения бортовой сети над напряжением батареи происходит управляемый заряд путём периодического подключения сети к батарее через ШИМ преобразователь. При этом в зависимости от тока заряда изменяется скважность импульсов коммутации ключа инвертора. Для обеспечения безопасности СУЛИАБ непрерывно контролирует напряжение на аккумуляторах и их температуру. В случае выхода этих параметров за пределы допустимых значений происходит отключение батареи от бортовой сети с полным прекращением заряда [8].

#### **Режим буферизации.**

При снижении тока заряда ниже заданных величин при минимальной скважности сигнала ШИМ преобразователя, что имеет место при близких значениях напряжений сети и батареи, СУЛИАБ обеспечивает прямое подключение батареи к сети. При этом реализуется режим использования батареи как буфера, сглаживающего пульсации напряжения сети при коммутации нагрузок.

#### **Режим разряда батареи.**

При просадке напряжения сети ниже напряжения батареи, вне зависимости от состояния инвертора, происходит быстрое подключение батареи к сети для компенсации провала напряжения и обеспечения бесперебойного обеспечения потребителей электроэнергией[5].

#### **Режим балансировки.**

При значительном расхождении напряжений АМ между собой, ПЛИС формирует сигнал на включение схемы балансировки. При этом происходит перераспределение заряда от более заряженных аккумуляторов к менее заряженным, до тех пор, пока их напряжения не совпадут между собой. Этот режим не зависит от остальных и может функционировать как в процессе заряда батареи, так и при разряде или хранении.

В таблице 1 приведены характеристики экспериментального образца ЛИАБ 7Lion-60 в сравнении с характеристиками серийной никель-кадмиевой батареи 20KSX 25 P-A-TCC.

Таблица 1- Сравнительные характеристики серийной и экспериментальной батарей

Наименование параметра	20KSX 25 P-A-TCC	7Lion-60	Преимущества ЛИАБ
Емкость номинальная, А·ч	25	60	+35
Номинальное напряжение, В	24	25,9	+1,9
Ток разряда, А:			
- номинальный	100	100	=
- максимальный	400	450	+50
- импульсный, 2 с	650	900	+250
Мощность в импульсе, Вт	15600	23310	+7710
Запас энергии при номинальной емкости, Вт·ч	600	1554	+954
Габаритные размеры, не более, мм	196×226×383	196×226×383	=
Масса, кг	25	15,5 (включая интеллектуальную информационно-управляющую систему)	-9,5
Объем, дм <sup>3</sup>	17	17	=
Удельная мощность, Вт/кг			
- номинальная	96	167	+71
- максимальная	384	751	+367
- импульсная	624	1503	+879
Удельная энергия (по массе), Вт·ч/кг	24	100	+76
Удельная энергия (по объему), Вт·ч/дм <sup>3</sup>	35,3	91	+55,7
Уровень отработки	Серийный образец	Экспериментальный образец	

По результатам сравнения, при тех же габаритных и установочных размерах, что и у серийной батареи 20KSX 25 P-A-TCC, масса батареи 7Lion-60 в 1,6 раз меньше массы батареи 20KSX 25 P-A-TCC. При этом батарея 7Lion-60 превосходит батарею 20KSX 25 P-A-TCC по всем электрическим параметрам, в том числе по емкости в 2,4 раза. На рисунке 2 приведены результаты сравнительных испытаний экспериментального образца батареи

7Lion-60 и серийной батареи 20KSX-25 P-A-TCC в режиме моделирования запуска дизельного авиадвигателя самолета Як-152 при температуре минус 20 °С. Преимущества литий-ионной батареи очевидны.

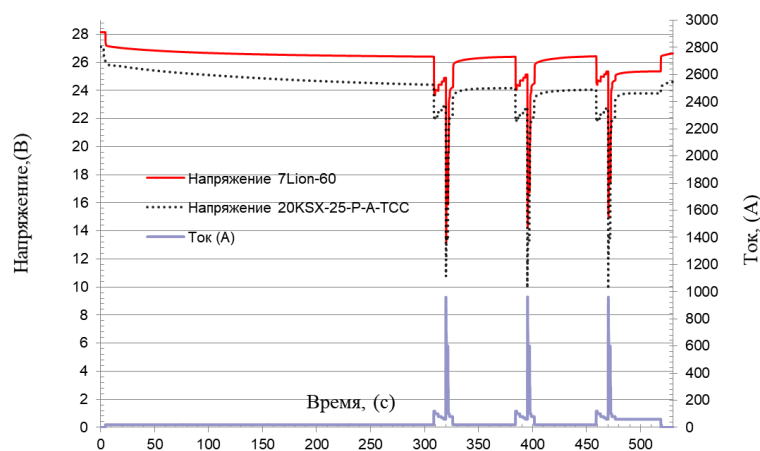


Рисунок 2. Результаты сравнительных испытаний АКБ

Если вопрос о применении ЛИАБ на самолетах в РФ все еще находится в стадии согласования решений разного уровня, то для беспилотных летательных аппаратов (БЛА) имеются реальные результаты. АО «НПК «АЛЪТЭН» по заданию АО «Кронштадт» разработана батарея 7Lion-35, рисунок 3, с интеллектуальной системой управления, предназначенная для замены НК-батареи 20KSX-22Р.



Рисунок 3. ЛИАБ 7Lion-35, на переднем плане СУ ЛИАБ

СУ ЛИАБ по требованию заказчика, выполнена в виде отдельного блока. ЛИАБ посредством СУ ЛИАБ обеспечивает запуск двигателя БЛА и работу бортовой сети при отказе основного источника питания, контроль технического состояния блоков аккумуляторов батареи, управление режимами заряда и разряда АКБ, передачу информации о состоянии АКБ в бортовую систему контроля. Масса батареи вместе с системой управления составляет 7 кг, емкость 35 А ч, тогда как батарея 20KSX-22Р весит 22 кг при гарантированной емкости 22 А ч.

В развитие данной концепции разработаны экспериментальные образцы ЛИАБ емкостью 30 и 50 А ч, содержащие СУ ЛИАБ, встроенную в корпус батареи. При этом сохранен принцип блочного конструирования, позволяющий не только оптимизировать затраты при производстве АБ, но и обеспечить высокую ремонтпригодность при эксплуатации. Полный габаритный аналог батареи 20KSX-22P батарея 7Lion-50 имеет номинальную емкость 50 А ч и массу 11,5 кг. Сравнительные характеристики этих батарей приведены в таблице 2.

Таблица 2 – сравнительные характеристики никель-кадмиевой и литий-ионных батарей.

Наименование	20KSX22P-A	7Lion-30	7Lion-35	7Lion-50
Емкость номинальная, А·ч	22	30	35	50
Номинальное напряжение, В	24	25,9	25,9	25,9
Ток разряда, А:				
- номинальный	100	40	50	100
- максимальный	200	120	150	300
- импульсный, 2 с	650	360	450	900
Мощность импульсная, Вт	14300	9300	11600	21600
Запас энергии при номинальной емкости, Вт·ч	528	777	906,5	1295
Габаритные размеры, не более, мм	179x118x426	179x118x426	160x130x350 150x150x50(СУ ЛИАБ)	179x118x426
Масса, кг	22	6,5 (включая СУ ЛИАБ)	7 (включая СУ ЛИАБ)	11,5 (включая СУ ЛИАБ)
Удельная мощность, Вт/кг				
- номинальная	100	160	185	235
- максимальная	200	478	555	654
- импульсная	650	1435	1665	1960
Удельная энергия, Вт·ч/кг	24	119,5	129,5	112,6
Рабочая температура среды, °С	От -30 до +50	От -40 до +50	От -40 до +50	От -40 до +50

Батарея 7Lion-35 прошла полный цикл испытаний на стойкость к климатическим и механическим воздействиям, а также на пожаро-взрывобезопасность. В процессе совместных испытаний отработан алгоритм взаимодействия СУЛИАБ с бортовой аппаратурой БЛА.

В процессе сравнительных испытаний с батареей 20KSX-22P для условий применения на борту БЛА батарея 7Lion-35 показала полное превосходство, включая работу при пониженной температуре. Результаты испытаний при минус 40°С приведены на рисунке 3.

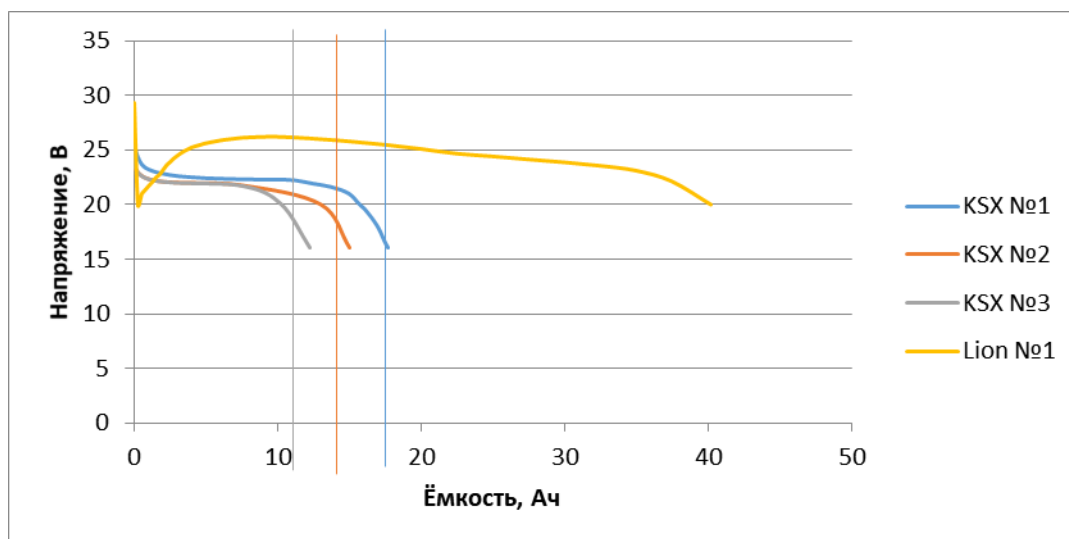


Рисунок 3. Разрядные характеристики батарей 20KSX-22 и 7Lion-35 при температуре минус  $40^{\circ}\text{C}$  и нагрузке  $15\text{ A}$

Применение ЛИАБ имеет свои особенности, обусловленные их характеристиками. Эксплуатация без учета этих особенностей в существующих СЭС не позволит раскрыть весь потенциал и достоинства новой технологии. Для получения максимального эффекта от применения литий-ионной технологии требуются совместные усилия разработчиков ЛИАБ и разработчиков СЭС. Например, ЛИА требует ограничения тока заряда на уровне не более  $3C$ , (где  $C$ -численное значение емкости аккумулятора в А ч), что в ряде случаев меньше максимального тока генератора. При эксплуатации БЛА с относительно маломощным генератором возникает обратная картина, когда после запуска двигателя возникает бросок зарядного тока АБ, способный повредить генератор. Отсюда возникает необходимость применения сложной силовой электроники, в составе ЛИАБ, коммутирующей и ограничивающей токи, что снижает общую надежность СЭС. Адекватным решением этой проблемы стало бы создание генератора с характеристиками, совместно заданными разработчиками СЭС и ЛИАБ.

Дополнительным преимуществом от создания СЭС с ЛИАБ и модернизированным генератором станет большая перегрузочная способность системы электроснабжения, когда к максимальной мощности генератора добавится мощность батареи. При этом повысится надежность генератора, который при жестких КЗ, благодаря новой нагрузочной характеристике, ограничит свою мощность на максимальной.

Таким образом, применение ЛИАБ на борту летательных аппаратов не только повысит энергомассовые характеристики при традиционном способе использования бортовых батарей, но и позволит достигнуть качественно новые характеристики систем электроснабжения.



#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н.В. Коровин Химические источники тока. Справочник. М: МЭИ, 2003. 740 с.
2. Промышленное применение аккумуляторных батарей//Под редакцией М. Бруссели, Дж. Пистойя. М.: Техносфера, 2011. 782 с.
3. В.М. Алашкин, В.В. Жданов, Б.И. Туманов. «Перспективы применения бортовых авиационных батарей на основе литий-ионных аккумуляторов». Труды научно-технической конференции «Электрификация летательных аппаратов»/Сборник докладов. М. : ИД Академии Жуковского, 2016, с.79-84.
4. [http://www.saftbatteries.ru/sites/default/files/Defense\\_Systems\\_Brochure.pdf](http://www.saftbatteries.ru/sites/default/files/Defense_Systems_Brochure.pdf)
5. Saft lance sa première formation aviation Li-ion pour les techniciens de maintenance qui travailleront sur son nouveau système batterie, Salon du Bourget, Paris 2015.
6. Б.И. Туманов, В.М. Алашкин, Ю.А. Батраков, В.Г. Удальцов и др., Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка технологии создания и организации серийного производства перспективных авиационных аккумуляторных батарей ионно-литиевой системы», АО «НПК «АЛБТЭН», 2013 г.
7. В.М. Алашкин, Ю.А. Батраков, А.Н. Кукушкин, Б.И. Туманов, В.Г. Удальцов, патент №125394, полезная модель, «Батарея литий-ионных аккумуляторов», 2012.
8. В.М. Алашкин, В.И. Сотников, патент №142215, полезная модель, «Устройство управления зарядом и разрядом литий-ионной аккумуляторной батареи», 2013.