

# Радиостроение

Научно-практический журнал

<http://www.radiovega.su>

Ссылка на статью:

// Радиостроение. 2017. № 05. С. 52–72

DOI: 10.24108/rdeng.0517.0000113

Представлена в редакцию: 02.08.2017

© НП «НЕИКОН»

УДК 621.355

## Аккумуляторные батареи носимых электронных устройств

Ситников А. В.<sup>1,\*</sup>, Масленникова С.И.<sup>1</sup>

\* [sit\\_irina@mail.ru](mailto:sit_irina@mail.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Работоспособность современных носимых электронных устройств во многом зависит от характеристик автономных источников питания – аккумуляторов. Такие характеристики сотовых телефонов, планшетных компьютеров и ноутбуков, как срок службы, мощность, время работы в автономном режиме, габариты, вес и др. определяются характеристиками именно аккумуляторных батарей. Технологии производства автономных источников питания развиваются, однако улучшение таких характеристик, как емкость аккумулятора, безопасность его работы, приводят к снижению других, например, количество циклов заряда-разряда. К снижению срока службы аккумуляторов приводит также неверные режимы эксплуатации этих элементов. В статье даны описания принципа работы современных аккумуляторов, их характеристик, даны рекомендации по выбору режимов работы аккумуляторов того или иного типа, их сравнительные характеристики. В работе описаны перспективные типы автономных источников питания для носимых электронных устройств.

**Ключевые слова:** аккумулятор; никелевые аккумуляторы; литиевые аккумуляторы; ток разряда; электролит; электроды; альтернативные источники

---

### Введение

На сегодняшний день одним из наиболее перспективных направлений развития радиотехнической промышленности является создание носимых электронных устройств на базе микропроцессорной техники. К таким устройствам относятся сотовые телефоны, ноутбуки, планшетные компьютеры, MP3-плееры и т.д. Основной характеристикой таких устройств, наряду с быстродействием, объемом памяти, разрешением экрана, является время работы устройства в автономном режиме. Именно эта характеристика определяет, можно ли отнести устройство к классу автономных (носимых) или нет.

Для обеспечения работы носимого электронного устройства необходимо использовать источник питания, габариты которого не вызывают дискомфорт при эксплуатации устройства в автономном режиме. Нет смысла бороться за миниатюризацию, микросхемы, обеспечивающей объем хранимой и обрабатываемой информации или обеспечивающей беспроводную связь сотового телефона, если источник питания для такой микросхемы

имеет габариты, в десятки раз превышающие габариты этих микросхемы. Для примера можно привести размеры микросхемы памяти телефона Samsung Galaxy S2 (эта микросхема имеет самые большие габариты в структуре телефона, микросхема трансивера в два раза меньше):  $20 \times 15 \times 3 \text{ мм} = 900 \text{ мм}^3$ . Габариты литий ионной батареи, используемой для питания телефона этой марки –  $60 \times 55 \times 4 \text{ мм} = 13200 \text{ мм}^3$ . Следовательно, снижение габаритов микросхемы на 20% приведет к снижению габаритов всего сотового телефона на 0.2%, а снижение габаритов аккумулятора на 20% приведет к снижению габаритов сотового телефона на 3.0%. Если при этом оценить технологические затраты на миниатюризацию микрочипа и аккумулятора, то стоимость миниатюризации аккумуляторной батареи будет существенно ниже.

В носимых электронных устройствах габариты аккумуляторных батарей сравнимы только с размерами экрана, причем размеры последнего, как правило, определяют потребительские свойства сотового телефона, планшета, ноутбука. Ранее много места занимала клавиатура, но с появлением сенсорных экранов для телефонов, планшетных компьютеров клавиатура стала виртуальной (экранной), что требует еще большего экранного пространства.

Еще одним из важнейших параметров носимого электронного устройства является время его работы в автономном режиме. И по этому параметру характеристики электронной «начинки» не идут ни в какое сравнение с характеристиками источника питания. Среднее время наработки на отказ для микросхем, используемых в сотовых телефонах, имеет прядок двадцати лет. Срок жизни аккумуляторной батареи определяется количеством циклов заряда-разряда и сроком хранения при консервации. Срок хранения аккумулятора зависит от условий хранения. Но даже при соблюдении правил консервации и периодической профилактической зарядке, емкость аккумуляторной батареи со временем падает. Например, литиевые батареи «стареют» примерно на десять процентов емкости в год не зависимо от того, законсервированы эти батареи или эксплуатируются.

Для никель-кадмиевых аккумуляторов число циклов заряда-разряда составляет примерно 1500, для литиевых – 600-800. Если учесть, что на одной зарядке аккумулятора сотовый телефон может непрерывно работать в течении 12-16 часов, а ноутбук – 8 часов, то получатся, что срок работы сотового телефона определяется исключительно сроком службы аккумуляторной батареи, а это – около года непрерывной эксплуатации, естественно, с использованием периодического заряда батареи.

Если оценивать срок работы сотового телефона без подзарядки, т.е. в автономном режиме, а это при эксплуатации в среднем по интенсивности режиме – около трех суток, то этот параметр, вообще, не идет ни в какое сравнение со сроком службы микросхемы (десятки лет). Если учесть тот фактор, что от энергетических характеристик батареи зависит количество и скорость обработки информации, возможности ее визуального отображения, то можно сделать вывод о том, что, практически, все потребительские свойства носимых электронных устройств определяются свойствами именно аккумуляторной батареи. К таким свойствам можно отнести следующие:

- мощность устройства, от которой зависит дальность бесконтактной связи, яркость экрана, возможность работы в мультипрограммном режиме;
- уровень автономности, т.е. время работы устройства без подключения к промышленной сети;
- надежность;
- срок службы электронного устройства.

Получается, что такие параметры, как количество ядер процессора, быстродействие, объем памяти, размер экрана, т.е. те, параметры, на которые опираются рекламные компании фирм-производителей при продвижении товара на рынке, уходят на второй план, а определяющими являются характеристики аккумуляторной батареи, используемой в этом устройстве. Следовательно, особое внимание при эксплуатации электронного устройства следует уделять правильному обращению с аккумулятором.

Неверный уровень разряда, при котором осуществляется переход в режим заряда автономного источника питания, приводит к снижению емкости аккумулятора, а, следовательно, снижению времени автономной эксплуатации электронного устройства. Использование неоригинальных зарядных устройств, неверный выбор режима заряда также снижают время службы аккумуляторов. Интересно, что в правилах эксплуатации автономных электронных устройств не прописываются эти важные параметры. Контроль уровня заряда осуществляется с помощью программных средств, имеющих, как правило универсальный характер, т.е. без учета специфических свойств того или иного типа аккумуляторных батарей. Часто пороговый уровень заряда, при котором на экран электронного устройства выдается сообщение типа «Низкий уровень заряда. Подключите зарядное устройство!» предлагается установить самим пользователям, компетентность подавляющего большинства которых в этом вопросе, как правило, крайне низка.

Для некоторых типов аккумуляторных батарей уровень напряжения на электродах настолько критичен, что может привести не только к выходу аккумулятора из строя, но даже к возгоранию и взрыву. Например, литиевые аккумуляторы снабжаются электронным контроллером слежения за уровнем заряда. Контроль осуществляется по напряжению на электродах, причем, отключение аккумулятора от нагрузки или от зарядного устройства происходит как при превышении напряжением определенного порогового значения (4.2 В), так и при снижении напряжения (2.5 В), т.к. полный разряд литиевой батареи может привести к выходу ее из строя.

Интересно, что фирмы-разработчики автономных электронных устройств прекрасно понимают проблемы обеспечения качественными источниками энергии производимых ими телефонов, планшетных компьютеров, ноутбуков. Однако, низкое качество аккумуляторов фирмы-производители обращают себе во благо, искусственно снижая срок службы электронных устройств для возможности увеличения объемов продаж новых изделий.

Казалось бы, что может быть проще, как замена потерявшего емкость аккумулятора сотового телефона или планшетного компьютера? Эта операция должна быть не сложнее замены батареек в фонарике или SIM-карты в сотовом телефоне. Однако, выход из строя

аккумулятора приводит, в большинстве случаев, к замене всего электронного устройства. И это сознательная политика фирм-изготовителей. Более того, некоторые фирмы выпускают сотовые телефоны и планшетные компьютеры с неизвлекаемыми в домашних условиях аккумуляторами. Обращение же в сервисный центр довольно хлопотно, к тому же стоимость замены аккумулятора не многим ниже стоимости нового сотового телефона или планшета, о чем и сообщают клиенту работники центра. Как правило, клиент предпочитает замену электронного устройства на новое вместо замены аккумулятора в старом. Такую политику можно отнести к способу шантажа клиента с целью приобретения последним нового «гаджета».

Борьба фирм-изготовителей за объемы продаж своих устройств часто приводит к тому, что срок службы этих устройств искусственно снижается. И в этом главную роль, как правило, играют именно аккумуляторные батареи. Рекламируя новый тип батарей, как источников повышенной энергоемкости и надежности, фирмы-производители переходят на использование аккумуляторов с двукратно, а то и трехкратно сниженным числом циклов перезаряда, к тому же в программном обеспечении контроля заряда пороговый уровень емкости выставляется 15-20% от максимального. Таким образом, вместо, например, 1000 циклов перезаряда при использовании емкости батареи от 100 до 1%, клиентам предлагается аккумуляторы имеющие ресурс 500 циклов перезаряда при использовании емкости батареи от 100 до 15%. Это приводит к снижению срока эксплуатации электронного устройства в 2.2 раза.

Интересно также проанализировать статистику основных причин выхода из строя носимых электронных устройств (статистика сервисного центра по ремонту бытовой техники [1, 2]).

Для ноутбуков:

1. Поломка держателей откидного экрана.
2. Засорение системы охлаждения и, как следствие, выход из строя микросхем.
3. Выход из строя жесткого диска.
4. Повреждение/засорение клавиатуры.
5. Выход из строя аккумулятора.

Для планшетных компьютеров:

1. Выход из строя аккумулятора.
2. Механическое повреждение экрана, корпуса, других элементов конструкции.

Для сотовых телефонов (айфонов):

1. Механическое повреждение экрана, корпуса, других элементов конструкции.
2. Выход из строя аккумулятора.
3. Попадание внутрь корпуса влаги.

Как видно из приведенного списка, причины поломки можно разделить на две категории: возникающие по причине неправильной эксплуатации электронного устройства и возникающие из-за конструктивного несовершенства устройства. Первые возникают по вине человека, эксплуатирующего «гаджет», вторые – по вине фирмы-производителя.

Таким образом, даже эксплуатация электронного устройства с соблюдением требований, указанных в техническом паспорте не приведет к существенному увеличению срока службы устройства, т.к. ресурс его работы определяется сроком службы аккумуляторной батареи, т.е. устанавливается фирмой-производителем.

Кроме того, фирмы-производители проводят политику ускоренного «морального устаревания» электронных устройств. Для этого внесение даже несущественных улучшений в новое электронное изделие преподносится, как «прорыв в технологии», как «выход на новый уровень», как выпуск «нового поколения» устройств. Например, увеличение быстродействия при использовании двухядерного процессора по сравнению с одноядерным с той же тактовой частотой будет не в два раза, а только в 1.3, 1.2 раза. Это связано с необходимостью синхронизации работы ядер, обменом информацией с медленно работающими периферийными блоками (экраном, оперативной памятью и т.д.), необходимостью решения дополнительных задач по распределению потоков информации между ядрами и т.д. К тому же, надежность работы двухядерного процессора в несколько раз ниже, чем одноядерного, а габаритно-весовые характеристики ухудшаются существенно. Однако удвоение числа ядер процессора воспринимается большинством потребителей, как удвоение быстродействия, что совершенно не правильно. Но это не опровергается фирмами-производителями, а тщательно замалчивается, вызывая иллюзию у потребителей существенного прорыва потребительских качеств нового устройства.

Еще одним ярким примером рекламного трюка продвижения новых изделий фирмами-производителями может служить и переход к новому типу аккумуляторных батарей с целью увеличения безопасности при их эксплуатации. Однако о том, что этот переход сопряжен с более чем двукратным снижением срока службы аккумулятора (читай «электронного устройства»), опять же тщательно замалчивается.

Из всего перечисленного выше можно сделать вывод, что не стоит полагаться на рекламные заявления фирм-изготовителей о свойствах нового электронного устройства, а нужно трезво оценивать реальные потребительские свойства очередной новинки, полагаясь при этом на знания принципов работы и реальных характеристик этих устройств.

В данной статье описаны принципы действия аккумуляторных батарей, использующихся на сегодняшний день в носимых электронных устройствах, как основных элементов, определяющего срок службы и надежность этих электронных устройств. Авторы приводят сравнительные характеристики различного типа аккумуляторов, дают рекомендации по выбору режимов заряда-разряда с целью увеличения срока эксплуатации источников автономного питания. Кроме того, приводятся примеры использования альтернативных источников питания, разрабатываемых в настоящее время.

## **1. Принцип действия аккумулятора**

Аккумулятор – это прибор для накопления электрической энергии с целью ее дальнейшего использования. Строго говоря, к электрическим аккумуляторам можно отнести только конденсаторы, на пластинах которых накапливается заряд, т.е. электрическая энер-

гия. Однако к аккумуляторам электрической энергии чаще всего относят электрохимические элементы, т.е. элементы, в которых электрический заряд появляется в результате химических реакций, как правило, реакций окисления-восстановления.

Если химическая реакция, в результате которой на электродах появляется разность потенциалов, является необратимой, то такие химические источники называются невозобновляемыми. В аккумуляторах химические реакции являются обратимыми. При разряде аккумулятора, т.е. при передаче электрической энергии, появившейся в результате химической реакции, потребителю, в системе протекает электрический ток и происходит изменение химического состава реагентов. При приложении внешнего электрического напряжения к электродам химический состав реагентов восстанавливается, происходит заряд аккумулятора. С точки зрения электротехники, химические источники электрической энергии относятся к классу источников напряжения с низким внутренним сопротивлением.

### 1.1 Типы аккумуляторов

На сегодняшний день самыми распространенными являются аккумуляторы пяти видов:

- свинцово-кислотные (Sealed Lead Acid, SLA);
- никель-кадмиевые (NiCd);
- никель-металлгидридные (NiMH);
- литий-ионные (Li-Ion);
- литий-полимерные (Li-Polymer).

В носимых электронных устройствах используются либо никелевые, либо литиевые аккумуляторы. У свинцовых аккумуляторов при разряде выделяются водород и кислород, что делает их эксплуатацию небезопасной, кроме того, они требуют регулярного обслуживания, и обладают низкой, по сравнению с никелевыми и литиевыми, энергоемкостью. Свинцово-кислотные аккумуляторы на сегодняшний день находят применение в автомобильной технике.

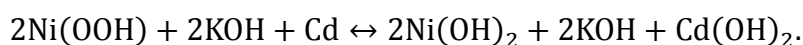
### 1.2 Никель-кадмиевые аккумуляторы

Никель-кадмиевые аккумуляторы пришли на смену свинцово-кислотным. По сравнению с последними, они почти не выделяют газа и не требуют регулярного обслуживания. Характеристики NiCd аккумуляторов мало изменяются при работе в широком диапазоне температур, такие аккумуляторы обладают низким внутренним сопротивлением, поэтому они могут обеспечить очень большие разрядные токи, что характерно для идеальных источников ЭДС. NiCd аккумуляторы выдерживают сравнительно большое число циклов заряда-разряда и могут работать под нагрузкой достаточно длительное время.

Анод в таких аккумуляторах изготавливается из гидрата окиси никеля Ni(OOH), к которому добавляют графит и окись бария. Графит увеличивает электропроводность активной массы, а окись бария – срок службы электрода. Катод выполняют из смеси порош-

ков кадмия Cd и железа Fe. В качестве электролита используют двадцатипроцентный раствор едкого калия (KOH) с примесью моногидрата лития. Эта примесь увеличивает срок службы аккумулятора.

Электрохимические реакции при разряде и заряде никель-кадмиевого аккумулятора можно записать в виде уравнения:



При разряде гидрат окиси никеля Ni(OOH) на положительном электроде, взаимодействуя с ионами электролита, переходит в гидрат закиси никеля Ni(OH)<sub>2</sub>, а кадмий отрицательного электрода превращается в гидрат окиси кадмия Cd(OH)<sub>2</sub>. Между электродами возникает разность потенциалов порядка полутора вольт.

При заряде аккумулятора под действием электрической энергии, подводимой от внешнего источника напряжения, происходит окисление активной массы анода, сопровождаемое переходом гидрата закиси никеля Ni(OH)<sub>2</sub> в гидрат окиси никеля Ni(OOH). В то же время активная масса катода восстанавливается с образованием кадмия (Cd).

Однако процесс восстановления материала анода сопровождается образованием на его поверхности кристаллов кадмия, растворение которых происходит только при полном разряде аккумулятора. Если аккумулятор разрядить не полностью, то уровень следующего заряда его будет не полным, что выражается в снижении емкости аккумулятора. Если недоразрядка аккумулятора происходит регулярно, то емкость батареи снижается до уровня, неприемлемого для использования в качестве автономного источника питания. Это снижение емкости называют «эффектом памяти» NiCd аккумуляторов. Данное свойства такого типа аккумуляторов является существенной проблемой при использовании их в качестве источников питания электронных устройств с программным контролем уровня заряда батареи. Низкий уровень напряжения источника может привести к выходу из строя некоторых типов электронных элементов, поэтому программное обеспечение для таких устройств производит отключение устройства в момент, когда напряжение источника становится слишком низким для поддержания его работы, т.е. при неполном разряде аккумулятора.

Нужно обратить внимание еще и на то, что надпись «Заряд 1%» на экране, например, планшетного компьютера, как правило, не соответствует реальной степени заряда батареи. Эта цифра устанавливается программным обеспечением условно и часто имеет отношение к уровню напряжения, при котором электронные элементы гарантированно работоспособны.

Кроме того, человек, использующий носимое электронное устройства старается не доводить разряд аккумуляторной батареи до нуля, в опасении не найти в нужный момент сети для зарядки устройства.

Есть несколько вариантов борьбы с нежелательным явлением снижения емкости NiCd аккумуляторов, возникающих из-за явления «памяти».

Первое – это добиться полного разряда NiCd аккумулятора. Сделать это можно, если при низком уровне заряда подсоединить к аккумулятору нагрузку (резистор, лампочку,

светодиод) и через некоторое время уровень заряда снизится до нуля. После этой процедуры можно заряжать аккумулятор без опасения снижения его емкости. Однако этот путь приемлем только для такой конструкции электронного устройства, когда снятие аккумулятора является простой операцией и только тогда, когда пользователь обладает определенными навыками проведения подобных операций.

Второй путь – восстановить емкость NiCd аккумулятора. Этого можно добиться, применив так называемый импульсно-реверсивный режим заряда. В таком режиме на аккумулятор подаются импульсы заряда в чередовании с кратковременным интенсивным режимом разряда, т.е., практически, замыканием накоротко клемм аккумулятора на очень короткий период времени. Интересно, что реверсивный заряд даже несколько ускоряет процесс заряда и увеличивает срок службы аккумулятора, поскольку в нем происходит более интенсивный процесс рекомбинации газов.

Такой режим заряда может быть сформирован специальными электронными, как правило, с цифровым управлением, зарядными устройствами.

Третий путь, самый простой, но не самый качественный – путь компромисса. При эксплуатации электронных устройств с NiCd аккумуляторами доводить уровень разряда батареи до максимально полного. При этом, уровень заряда доводить до 100% не обязательно.

Важной характеристикой аккумуляторных батарей, определяющей эксплуатационные характеристики автономного электронного устройства, является ток саморазряда. Даже при отсутствии нагрузки (сопротивление нагрузки равно бесконечности) происходит снижение разности потенциалов на клеммах источника, снижается уровень его заряда. Саморазряд является следствием химической реакции, протекающей в аккумуляторе даже при отсутствии нагрузки. Для NiCd аккумуляторов самый большой ток саморазрядки наблюдается в течении первых суток после полного заряда. Уровень саморазряда в этот период достигает десяти процентов емкости за сутки. В дальнейшем уровень саморазряда снижается до уровня порядка 0.5% в сутки. Следовательно, долгое хранение заряженного аккумулятора невозможно. Хранить NiCd аккумуляторы желательно в разряженном состоянии.

При окончании срока эксплуатации NiCd аккумуляторов их необходимо утилизировать по специальной технологии, т.к. кадмий является очень токсичным веществом.

### **1.3. Никель-металлгидридные аккумуляторы**

В качестве замены кадмия для материала катода были применены материалы, адсорбирующие водород – гидраты, в частности гидрат закиси никеля. Для никель-металлгидридных аккумуляторов характерны большая по сравнению с никель-кадмиевыми удельная емкость, отсутствие эффекта «памяти» и экологичность. Именно эти преимущества и позволили никель-металлгидридным аккумуляторам потеснить, но не полностью вытеснить NiCd аккумуляторы.

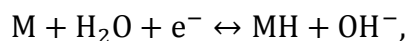


В никель-металлгидридных аккумуляторах анод выполнен из гидрата окиси никеля, как и в NiCd, а катод – из сплава никеля с редкоземельными металлами, поглощающего водород.

Формула химической реакции на аноде имеет вид:



на катоде:



где М – металл.

Электролит в основной токообразующей реакции не участвует.

К недостаткам NiMH аккумуляторов можно отнести меньший, чем у NiCd аккумуляторов ток разряда и более высокий уровень саморазряда (порядка пяти процентов в сутки). Попытки разработчиков NiMH аккумуляторов уменьшить ток саморазряда приводят, как правило, к снижению емкости батареи, т.е. к потере основного их достоинства.

Еще одним существенным недостатком NiMH аккумуляторов является снижение количества циклов заряда-разряда. Если для NiCd аккумуляторов это число достигает полторы тысячи циклов, то для NiMH аккумуляторов – это порядка восьмисот, тысячи циклов. Никель-металлгидридные аккумуляторы более чувствительны к температурным условиям эксплуатации, особенно к низким температурам. Предельной температурой, при которой NiMH аккумуляторы еще сохраняют работоспособность, является  $-10^\circ\text{C}$ .

Режим зарядки NiMH аккумуляторов сопровождается повышением температуры аккумулятора, особенно это характерно для быстрой зарядки батареи, т.е. зарядки повышенными токами. Для предотвращения выхода из строя аккумулятора зарядные устройства необходимо снабжать термодатчиками и системой контроля полной зарядки. По причине перегрева NiMH аккумуляторов при заряде их рекомендуется заряжать малыми токами, что приводит к увеличению времени заряда.

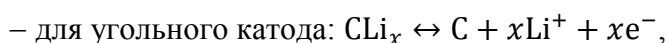
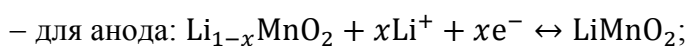
Надо отметить, что и стоимость NiMH аккумуляторов при той же емкости, что и у никель-кадмиевых, ощутимо выше.

#### 1.4 Литий-ионные аккумуляторы (Li-Ion)

Следующим за никелевыми поколением аккумуляторных батарей стали источники, изготовленные на основе лития, из которого изготавливают анод аккумулятора. Этот металл является одним из самых химически активных металлов, что делает его наиболее привлекательным в плане использования для получения электрического потенциала, но и более опасным при эксплуатации и обработке. Дело в том, что при нагревании лития выше критической температуры этот металл вступает в бурную реакцию с электролитом и батарея взрывается. Повышение температуры батареи может происходить как при заряде, так и при больших токах разряда. От взрывов литиевых аккумуляторных батарей в сотовых телефонах пострадало несколько десятков человек по всему миру.

Для получения безопасного, стабильно работающего аккумулятора разработчики заменили металлический литий анода соединением лития с такими металлами, как никель, кобальт, марганец в виде их оксидов ( $\text{NiO}_2$ ,  $\text{CoO}_2$ ,  $\text{MnO}_2$ ).

Наиболее распространенными являются аккумуляторы с использованием оксида магния, они хоть и обладают меньшей емкостью по сравнению с  $\text{Li/NiO}_2$  и  $\text{Li/CoO}_2$  аккумуляторами, но более технологичны, безопаснее при эксплуатации и не требуют сложных зарядных устройств. В качестве примера химических реакций, происходящих на аноде и катоде при разряде-заряде литиевой батареи можно записать следующие формулы:



причем,  $x = 0$  только при полном разряде. На практике не допускается снижение модульной доли лития менее 0.55. В противном случае химические реакции на положительном электроде становятся необратимыми.

Разность потенциалов на электродах литиевых батарей стандартного размера в три раза выше, чем напряжение на электродах никель-кадмиевых. Однако литиевые аккумуляторы очень чувствительны к повышенным температуре и напряжению на электродах при зарядке. Поэтому для обеспечения безопасного режима работы в состав литиевых аккумуляторов включают электронную схему, контролирующую эти параметры. Следовательно, литиевые батареи должны использоваться именно с тем электронным устройством, для которого они спроектированы. Неприемлемым также является использование зарядного устройства от другого «гаджета». Чтобы исключить использование литиевых аккумуляторов в других электронных устройствах, фирмы-производители выпускают аккумуляторы нестандартных типоразмеров.

Главной причиной вытеснения литиевыми аккумуляторами никелевых является их емкость, которая в два раза, при тех же габаритах, выше. Кроме того, литиевые аккумуляторы не боятся недоразряда, т.к. эффект «памяти» для них не характерен.

При соблюдении температурного режима, литиевые батареи могут эксплуатироваться и при больших разрядных токах, что позволяет использовать их в сотовых телефонах и планшетных компьютерах. Кроме того, для этого типа аккумуляторов характерен относительно низкий уровень саморазряда (порядка 0.2% в день).

Самыми существенными недостатками литиевых аккумуляторов, кроме взрывоопасности при неправильной эксплуатации, является относительно малое число циклов заряда-разряда. Уже после пятисот-шестисот циклов емкость батареи существенно снижается, а ток саморазряда увеличивается. Кроме того, если никель-кадмиевые батареи для исключения явления «памяти» рекомендуется разряжать полностью, то для литиевых аккумуляторов доводить разряд до полного не рекомендуется. При полном разряде, работоспособность литиевой батареи может быть утрачена. Уровень разряда литиевых батарей, при котором нужно осуществлять ее заряд имеет значение порядка десяти, пятнадцати процентов от номинальной максимальной емкости.

Нужно заметить, что и стоимость литиевых батарей выше, чем аналогичных по характеристикам никель-кадмиевых.

### 1.5. Литий-полимерные аккумуляторы

Одним из недостатков аккумуляторов с жидким электролитом является возможность утечки последнего при нарушении герметичности корпуса батареи. Разгерметизация может происходить по многим причинам. Некачественное изготовление корпуса, механические повреждения, перегрев во время эксплуатации и заряда, перепады температуры при хранении, все это может привести к разливу электролита из корпуса батареи и привести к выходу из строя всего электронного устройства, в котором этот аккумулятор установлен и даже к аварийным ситуациям. Поэтому перед разработчиками была поставлена задача заменить жидкий электролит твердым или гелеобразным. В результате научных исследований появился новый класс аккумуляторных батарей – литий-полимерные (Li-Polymer).

В настоящее время промышленно выпускаются литий-полимерные аккумуляторы следующих конструктивных особенностей:

- аккумуляторы с сухим полимерным электролитом, например на основе полиэтиленоксида с солями лития;
- с гель-полимерным электролитом. Такой электролит имеет вид пластичного, нерасстекающегося геля, получаемого путем внедрения полимерного пластификатора с солями лития;
- с электролитом в виде неводного раствора солей лития, сорбированного в микропористой полимерной матрице.

Твердый электролит наносят на пористую ионообменную полимерную пленку (сепаратор), разделяющую электроды. Гелевый электролит в таких аккумуляторах добавляется только для увеличения ионной электропроводности сепаратора. Химические реакции, протекающие на электродах литий-полимерных аккумуляторов идентичны реакциям литий-ионных.

Отсутствие жидкого электролита в конструкции аккумуляторов не только повышает безопасность эксплуатации батарей, но и позволяет изготавливать их, практически, любой формы. Для носимых электронных устройств наиболее удобной является пластинчатая форма, причем толщина их может быть всего несколько миллиметров. Кроме того, литий-полимерные аккумуляторы менее чувствительны к температурному режиму эксплуатации.

Однако такие батареи обладают и рядом существенных недостатков, к которым можно отнести меньшую емкость по сравнению с литий-ионными, меньшее число циклов заряда-разряда (порядка пятисот циклов), высокое внутреннее сопротивление и, как следствие, низкий разрядный ток, высокую стоимость.

## 2. Сравнительные характеристики аккумуляторов

Чтобы сравнить характеристики аккумуляторов, используемых в носимых электронных устройствах, необходимо записать те требования, которые предъявляются к автономным возобновляемым источникам питания. В число таких требований можно включить:

- малые габариты и вес;
- высокая энергоемкость;
- безопасность эксплуатации и утилизации;
- длительный срок службы (для аккумуляторов – это большое число циклов заряда-разряда);
- высокая скорость заряда;
- стабильность работы при изменении условий эксплуатации (широкий диапазон рабочих температур, влагостойкость, устойчивость к вибрации, ударам, возможность длительного хранения без использования);
- отсутствие предельного уровня разряда и лимитирования времени заряда в процессе эксплуатации;
- низкая стоимость;
- доступность замены при выходе из строя и возможность использования для зарядки стандартного зарядного устройства.

Сравнение аккумуляторных батарей по габаритным характеристикам будет не корректно без учета их энергоемкости. Поэтому принято характеризовать аккумуляторы их относительной энергоемкостью, т.е. емкостью при одних и тех же, стандартных габаритах. По этому параметру литиевые батареи существенно превосходят никелевые. Их емкость в три, а то и четыре раза выше. Однако обеспечение безопасной эксплуатации литиевых аккумуляторов связано с большими проблемами. Для предотвращения взрыва батареи в процессе эксплуатации в состав литиевых аккумуляторов включают специальные системы слежения за температурным режимом батареи и уровня напряжения на его клеммах. Такие меры существенно снижают надежность работы электронного устройства, в котором они используются и повышают стоимость самого аккумулятора, зарядного устройства, а, следовательно, и всей электронной системы.

По числу циклов разряда-заряда первенство можно отдать никель-кадмиевым аккумулятором. Этот параметр в полтора раза выше, чем у никель-металлгидридных и в два раза выше, чем у литиевых аккумуляторов. Однако никель-кадмиевые аккумуляторы очень чувствительны к неполному разряду из-за, присущего им, эффекта «памяти». В этом плане, характеристики литиевых батарей наименее зависимые от уровня разряда, при котором начинается заряд батареи и уровень заряда, при котором отключается внешний источник питания. Однако если длительное хранение никелевых батарей не приводит к существенному снижению их характеристик, то литиевые батареи «стареют» примерно на десять процентов емкости в год независимо от того, хранятся эти батареи или эксплуатируются.

По скорости заряда сравнение различного типа аккумуляторов провести сложно, т.к. режимы заряда могут сильно варьироваться для конкретного типа электронного устройства, его сложности, стоимости. Например, такие электронные устройства, как MP3-плееры вообще не комплектуются зарядными устройствами, а заряжаются подключением постоянного напряжения от компьютера через USB-порт. Можно только заметить, что никелевые аккумуляторы гораздо менее чувствительны к зарядному току, чем литиевые, т.к. для последних большой зарядный ток и повышенное напряжение на клеммах может привести к перегреву и, как следствие, к взрыву.

Именно по причинам обеспечения безопасности при эксплуатации литиевые батареи нельзя устанавливать в какие-либо другие электронные устройства, кроме тех, для которых они разработаны.

Нужно отметить, что требования к условиям эксплуатации и утилизации литиевых батарей очень жесткие. Они чувствительны к низким температурам, ударным нагрузкам и влажности. Кроме того, стоимость их выше, чем стоимость никелевых аккумуляторов.

### **3. Перспективные типы аккумуляторов**

Технологии изготовления аккумуляторов развиваются довольно быстрыми темпами, но, как правило, улучшение одного эксплуатационного параметра автономного источника приводит к ухудшению другого. О прорывах в области создания аккумуляторов нового поколения сообщают, в основном, рекламные релизы фирм-изготовителей сотовых телефонов, планшетных компьютеров и ноутбуков. Однако большинство из них, к сожалению, не соответствуют реальному положению дел в этой отрасли.

Над чем же работают исследовательские лаборатории, занимающиеся разработкой новых типов аккумуляторных батарей? В основном это три направления: увеличение емкости аккумуляторов, увеличение скорости заряда и увеличение срока службы (в частности, срока хранения батарей без потери емкости).

Для увеличения емкости ученые предлагают перейти от плоских электродов к объемным структурам. Для этого исследователи университета штата Иллинойс (University of Illinois at Urbana-Champaign) предложили использовать кристаллическую решетку из сульфида никеля на подложке пористого никеля в качестве анода и литий-диоксид марганца на подложке пористого никеля в качестве катода. В журнале *Energy Environ and Chemical Society Reviews* за 2013-14 год появилась серия статей [3, 4], в которых описывалась конструкция нового типа литиевых батарей. Разработчики утверждали, что новая технология позволит увеличить мощность литий-ионных батарей примерно на порядок.

Увеличение скорости заряда аккумуляторов ограничено объективными причинами. Например, чтобы зарядить аккумулятор удельной емкостью 2500 мАч нужно с помощью внешнего источника обеспечить ток заряда 2.5 А в течении часа. Чтобы увеличить скорость заряда, например, в два раза, надо увеличить зарядный ток до пяти ампер. Но увеличение зарядного тока приведет к дополнительному нагреву аккумулятора, а это может

привести к выходу его из строя. Кроме того, повышение тока неизбежно приводит к существенному увеличению габаритов электронной начинки зарядного устройства.

Снизить зарядный ток можно, увеличивая напряжение внешнего источника питания для аккумулятора, но и это, как правило, бывает неприемлемо. Например, литиевые аккумуляторы очень чувствительны к превышению напряжения на их зажимах порогового значения.

В научных обзорах, правда, появились сообщения, что в некоторых лабораториях ведется разработка нового типа аккумуляторных батарей на основе алюминия (алюминий-ионные аккумуляторы), скорость зарядки которых будет существенно выше всех известных на сегодняшний день аккумуляторов. Приводятся данные о том, что время заряда батареи до ста процентов, не превышает одной минуты. Однако верить таким пресс-релизам, вероятнее всего, не стоит.

Выход из строя аккумуляторных батарей происходит из-за процессов разрушения материалов анода и катода. Со временем в электродах возникают микротрещины, которые приводят к разрушению структуры материалов. Чтобы повысить срок службы литий-ионных аккумуляторных батарей учеными Стэнфордского университета (Stanford University) предложен способ покрытия электродов полимерным материалом с добавлением наночастиц графита. Это позволит защитить электроды от разрушения и тем самым продлить жизнь аккумуляторным батареям.

В экспериментальных батареях, команда Стэнфордского университета помещала алюминиевый анод и графитовый катод в ионный жидкий электролит в гибком полимерном пакете с [5]. Как утверждают разработчики, алюминиевые батареи безопаснее, чем обычные литий-ионные, не теряют работоспособности даже при повреждении пластичного корпуса и обладают способностью заряжаться за очень короткое время (несколько минут). Кроме того, как утверждают разработчики, алюминиевые аккумуляторы долговечнее других типов батарей. Число циклов заряда-разряда у них достигает значения порядка семи тысяч.

#### **4. Альтернативные источники питания**

В гальванических элементах электрическая энергия на электродах возникает, как результат протекания химических реакций. Можно сказать, что в аккумуляторах происходит накопление химической энергии при заряде (электрическая энергия преобразуется в химическую), а при разряде накопленная химическая энергия переходит в электрическую. Накопление заряда напрямую, т.е. без этапа преобразования в другие виды энергии возможно, например, на обкладках конденсатора, но долгосрочное хранение электрической энергии невозможно из-за процесса перераспределения зарядов под действием электрических полей.

В электрическую можно преобразовывать не только химическую, но и, практически, все другие виды энергии. Например, механическую энергию в электрическую можно преобразовать с помощью электрофорной машины, изобретенной еще в восьмидесятих годах

девятнадцатого века, или пьезоэффекта. Световую энергию можно перевести в электрическую с помощью кремниевых солнечных батарей. Можно получить электричество с помощью термопар, т.е. из тепловой и т.д. Однако найти способы накопления механической, световой, тепловой и др. энергий не просто.

Механическая энергия может быть накоплена, например, раскручиванием тяжелого маховика или с использованием биологической энергии (мышечная сила живых организмов) или гравитации (подъем груза и использование его, как противовеса). Механическую энергию можно запасти, закрутив спиральную или сжав цилиндрическую пружины.

Световая энергия накоплению на сегодняшний день не поддается. Не существует «световых ловушек» и «фотонных аккумуляторов», описанием которых уделено немало места в произведениях фантастов. Тепловую энергию накопить можно, нагрев тело с высокой теплоемкостью. Но преобразователи световой, механической и тепловой энергии в электрическую имеют неприемлемо низкий КПД.

Накопить можно магнитную энергию. Магнитные материалы с широкой петлей гистерезиса, т.е. с высокой коэрцитивной силой, могут являться источниками магнитного поля достаточно длительное время. При этом, магнитная энергия легко преобразуется в электрическую. Проблемой является только то, что появление ЭДС в катушке индуктивности вызывает только переменное магнитное поле, получить которое можно используя механическое перемещение постоянных магнитов. Следовательно, опять возникает задача накопления механической энергии.

Естественно, для носимых электронных устройств в качестве альтернативы традиционным химическим источникам питания предложить аккумуляторы механической энергии с использованием воды (гидроэлектростанции) или тепловой энергии (теплоэлектростанции) можно только в качестве шутки. А вот портативные атомные электростанции перестают быть плодом фантазии. Нагрев радиоактивных материалов при радиораспаде можно использовать для получения электроэнергии. Но только при условии решения проблем безопасности и низкого КПД. А пока такие источники используются только в тех устройствах, где нет присутствия человека, например, на автоматических космических станциях. Но исследования в этом направлении продолжаются [6].

Гораздо более перспективным видится использование источники питания носимых электронных устройств, с преобразованием света в электричество. Для того, чтобы создать конкуренцию (или в дополнение к) химическим аккумуляторам нужно решить несколько существенных проблем. Во-первых, для получения необходимой электрической мощности нужно использовать солнечные батареи большой площади, высокой интенсивности света и имея при этом постоянный источник света. Интересное решение преобразования световой энергии в электрическую предложили исследователи Мичиганского университета (University of Michigan). Они предлагают встроить прозрачные для видимого спектра светового излучения солнечные панели в экран планшетного компьютера. Панели поглощают инфракрасное и ультрафиолетовое излучение, преобразуя его в электрический ток. Видимый свет также используется для получения электрической энергии. Отражен-

ный гранями экранного стекла свет отправляется на солнечные батареи, расположенные по периметру экрана. Мощности такого светочувствительного источника не хватает на работу «гаджета», но позволяет подзарядить традиционные химические аккумуляторы.

В качестве аксессуаров для сотовых телефонов уже сегодня можно приобрести блок подзарядки химических аккумуляторов от солнечных батарей.

Это направление видится очень перспективным. Такие фирмы, как американская Sunpower Systems, немецкая Fraunhofer ISE и другие ведут работы по совершенствованию солнечных батарей, в основном это касается повышения КПД, снижения стоимости, улучшения технологичности фоточувствительных пластин [7, 8]. Кроме того, существует множество разработок корпусов сотовых телефонов и планшетных компьютеров, выполненных из пластин солнечных батарей, однако, дальше макетных проектов дело не идет из-за высокой стоимости, неустойчивости к механическим нагрузкам, большого веса таких корпусов.

Интересным представляется предложения использовать механические электрогенераторы для подзарядки (замены) химических аккумуляторов. На сегодняшний день производятся два вида генераторов: с использованием механических сил, возникающих при естественном движении человека и с использованием специальных механизмов, приводимых в движение с помощью мускульной силы.

Конструкция первых представляет собой цилиндр, внутри которого расположена катушка, внутри которой, в свою очередь, помещается постоянный магнит в виде шарика. При ходьбе и других движениях человека, шарик внутри катушки перемещается, вызывая появление ЭДС в катушке. Имея с собой такой источник питания, человек может, например, не бояться остаться без сотовой связи в дальнем туристическом походе.

Выпускаются мини электрогенераторы, с приводимым во вращение вручную ротором [9], использующие механический завод спиральной (как в механических часах) пружины (компания Freerlay Energy Europe) и с использованием пьезоэффекта.

Генераторы электрической энергии на пьезоэлементах рассматриваются разработчиками, для совместного использования с химическими аккумуляторами или даже как их замена. Пьезоэлементы предлагается вмонтировать, чаще всего, в обувь, реже – в одежду [10]. Также ведутся разработки по созданию синтетической ткани для пошива одежды, которая будет иметь пьезоэлектрические свойства или свойства солнечных батарей.

## **Заключение**

Проводя сравнительный анализ характеристик аккумуляторов, используемых в качестве источников напряжения для носимых электронных устройств, авторы не ставили своей целью выявить лидера среди источников по каким-либо параметрам. Каждый тип аккумуляторов обладает как достоинствами, так и существенными недостатками. Поэтому каждый тип аккумуляторов имеет свою нишу на потребительском рынке. В сотовые телефоны, например, и планшетные компьютеры устанавливают литий-ионные и литий-



полимерные аккумуляторы из-за их большой удельной емкости. В бытовые инструменты и ноутбуки – никелевые, учитывая их способность работать при высоких разрядных токах.

Интересно, что переход к более емким аккумуляторам часто не приводит к ожидаемому эффекту увеличения времени работы, например, сотового телефона в режиме без подзарядки. Увеличение количества служебных программ, выполняемых процессором в телефонах «нового поколения» приводит к тому, что разряжается аккумулятор быстрее, чем даже в устаревших моделях со старым типом аккумулятора.

Целью данной статьи было дать в руки потребителей современных «гаджетов» некий информационный инструмент, позволяющий при выборе очередного сотового телефона или планшетного компьютера отсеять популистские заявления рекламных менеджеров о качестве товара, а обращать внимание на реальные параметры того или иного электронного устройства, иметь возможность анализировать как преимущества, так и недостатки очередных новинок рынка электронных «гаджетов», использовать такие режимы их эксплуатации, которые продлят срок их безотказной работы.

### Список литературы

1. TLKGroup. Сервисный центр. Режим доступа: <http://tlkgroup.ru/remont-komputerov> (дата обращения: 03.09.2017).
2. Электроника Сервис. Режим доступа: <http://electronika-spb.ru/index.php/interesno/> (дата обращения: 03.09.2017).
3. Xu Wu, Jiulin Wang, Fei Ding, Xilin Chen, Nasybulin E., Yaohui Zhang, Ji-Guang Zhang. Lithium metal anodes for rechargeable batteries // Energy & Environmental Science. 2014. Vol. 7. No. 2. Pp. 513-537. DOI: [10.1039/c3ee40795k](https://doi.org/10.1039/c3ee40795k)
4. Venkatamaran Thangadurai, Sumaletha Narayanan, Dana Pinzaru. Garnet-type solid-state fast Li ion conductors for Li batteries: critical review // Chemical Society Reviews. 2014. Vol. 43. No. 13. Pp. 4714-4727. DOI: [10.1039/c4cs00020j](https://doi.org/10.1039/c4cs00020j)
5. Harry K. J., Hallinan D.T., Parkinson D.Y., McDowell A.A., Balsara N.P. Detection of sub-surface structures underneath dendrites formed on cycled lithium metal electrodes // Nature Materials. 2014. Vol. 13. No. 1. Pp. 69-73. DOI: [10.1038/nmat3793](https://doi.org/10.1038/nmat3793)
6. Таганова А.А., Бубнов Ю.И., Орлов С.Б. Герметичные химические источники тока: Справочник. СПб.: Химиздат, 2005. 262 с.
7. SunPower Oasis Power Block - Key Components. Режим доступа: <https://www.sunpowercorp.co.uk/sunpower-oasis-power-block-key-components/> (дата обращения 03.09.2017).
8. Fraunhofer ISE. Режим доступа: <https://www.ise.fraunhofer.de/> (дата обращения 03.09.2017).
9. HandEnergy - ручной генератор энергии для гаджетов. Режим доступа: <http://24gadget.ru/1161063951-handenergy-ruchnoy-generator-energii-dlya-gadzhetov-foto-video.html> (дата обращения: 03.09.2017.)

10. Альтернативные источники питания для зарядки телефона. Режим доступа: <http://megapoisik.com/10-neobychnyh-sposobov-zarjadki-telefona> (дата обращения: 03.09.2017).
11. Кедринский И.А., Дмитренко В.Е., Грудянов И.И. Литиевые источники тока. М.: Энергоиздат, 2012. 247 с.
12. Львов А.Л. Литиевые химические источники тока // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7. № 3. С. 45-51.
13. Нижниковский Е.А. Химические источники автономного электропитания радиоэлектронной аппаратуры. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 225 с.
14. Скундин А.М. Литий-ионные аккумуляторы: современное состояние, проблемы и перспективы // Электрохимическая энергетика. 2001. № 1-2. С. 5-15.
15. Andrea D. Battery management systems for large lithium-ion battery packs. Boston: Artech House, 2010. 290 p.

## Rechargeable Batteries of Portable Electronic Devices

A.V. Sitnikov<sup>1,\*</sup>, S.I. Maslennikova<sup>1</sup>

\* [sit\\_irina@mail.ru](mailto:sit_irina@mail.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** accumulators; Ni batteries; Li batteries; discharge current; electrolyte; electrodes; alternative power supplies

---

The main requirements for power supply of portable electronic devices are as follows: small dimension and weight, high power, long operating time without connection to the industrial network, operational safety and environmental friendliness. If we take an objective assessment of the listed parameters of modern rechargeable batteries used in cell phones, tablet computers, laptops we can draw a disappointing conclusion that just accumulators are the bottleneck in the design of electronic devices.

Dimensions of rechargeable batteries are comparable with the size of all the other components of the electronic device together, including the screen and the keyboard. The operating time of the electronic device in an autonomous mode, which the modern battery is capable to provide, is by several orders less than the possible operating time of the device itself. Even with observance of the operating rules, life of rechargeable battery is only a few years. Thus, the battery performance of cell phones, tablet computers, laptops is determined just by the battery characteristics rather than by the parameters of the "electronic stuffing" (components).

At present, nickel-based (nickel-cadmium, nickel-metal hydride) and lithium-based (lithium-ion and lithium-polymer) batteries are used to feed portable electronic devices. For nickel batteries, the number of charge-discharge cycles is about one and a half thousand. In addition, owing to low internal resistance they can provide rather high discharge current. However, an inherent "memory" phenomenon of the nickel batteries reduces their capacity when the battery is incompletely discharged.

Lithium batteries, which have about two-three times higher capacity than those of nickel, can withstand less than a thousand of charge-discharge cycles, after which their capacity is significantly reduced. In addition, lithium batteries are very sensitive to high temperatures, and in case this parameter is beyond the acceptable limits there can be a fire and even explosion of the battery. Therefore, lithium batteries are equipped with an electronic device to monitor the temperature and voltage at the electrodes, which leads to a significantly increasing size and cost of such power sources.

Lithium batteries and nickel ones too have a critical discharge level, but unlike the latter, lithium batteries must not be completely discharged, otherwise they lose their ability to be charged.

Thus, in order to increase the service life of the battery, it is necessary to choose the optimum mode of operation, which depends on the type of battery.

Nowadays, developers of portable electronic devices devote much attention to the quest for new autonomous power sources, both chemical ones and those based on conversion of light and mechanical energies into electrical one. However, so far such devices are only add-ons to traditional chemical batteries and are not able to replace them completely.

## References

1. *TLKGroup. Servisnyj tsentr* [TLKGroup. Service centre]. Available at: <http://tlkgroup.ru/remont-komputerov>, accessed 03.09.2017 (in Russian).
2. *Elektronika Servis* [Electronical service centre]. Available at: <http://elektronika-spb.ru/index.php/interesno/>, accessed 03.09.2017 (in Russian).
3. Xu Wu, Jiulin Wang, Fei Ding, Xilin Chen, Nasybulin E., Yaohui Zhang, Ji-Guang Zhang. Lithium metal anodes for rechargeable batteries. *Energy & Environmental Science*, 2014, vol. 7, no. 2, pp. 513-537. DOI: [10.1039/c3ee40795k](https://doi.org/10.1039/c3ee40795k)
4. Venkatamaran Thangadurai, Sumaletha Narayanan, Dana Pinzaru. Garnet-type solid-state fast Li ion conductors for Li batteries: critical review. *Chemical Society Reviews*, 2014, vol. 43, no. 13, pp. 4714-4727. DOI: [10.1039/c4cs00020j](https://doi.org/10.1039/c4cs00020j)
5. Harry K. J., Hallinan D.T., Parkinson D.Y., McDowell A.A., Balsara N.P. Detection of sub-surface structures underneath dendrites formed on cycled lithium metal electrodes. *Nature Materials*, 2014, vol. 13, no. 1, pp. 69-73. DOI: [10.1038/nmat3793](https://doi.org/10.1038/nmat3793)
6. Taganova A.A., Bubnov Yu.I., Orlov S.B. *Germetichnye khimicheskie istochniki toka* [Sealed chemical current sources]: a handbook. S.-Petersburg: Khimizdat Publ., 2005. 262 p. (in Russian).
7. SunPower Oasis Power Block - Key Components. Available at: <https://www.sunpowercorp.co.uk/sunpower-oasis-power-block-key-components/>, accessed 03.09.2017.
8. Fraunhofer ISE. Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/>, accessed 03.09.2017.
9. *HandEnergy – ruchnoj generator energii dlia gadzhetov* [HandEnergy - manual power generator for gadgets]. Available at: <http://24gadget.ru/1161063951-handenergy-ruchnoj-generator-energii-dlya-gadzhetov-foto-video.html>, accessed 03.09.2017 (in Russian).
10. *Al'ternativnye istochniki pitaniia dlia zariadki telefona* [Alternative sources of power to charge your phone]. Available at: <http://megapoisk.com/10-neobychnyh-sposobov-zarjadki-telefona>, accessed 03.09.2017 (in Russian).
11. Kedrinskij I.A., Dmitrenko V.E., Grudianov I.I. *Litievye istochniki toka* [Lithium current sources]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2012. 247 p. (in Russian).

12. L'vov A.L. Lithium chemical current sources. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal* [Soros Educational J.], 2001, vol. 7, no. 3, pp. 45-51 (in Russian).
13. Nizhnikovskij E.A. *Khimicheskie istochniki avtonomnogo elektropitaniia radioelektronnoj apparatury* [Chemical sources of the autonomous power supply of electronic equipment]. Moscow: MEI Publ., 2004. 225 p. (in Russian).
14. Skundin A.M. Lithium-ion batteries: current status, problems and prospects. *Elektrokhimicheskaya energetika* [Electrochemical Energetics], 2001, no. 1-2, pp. 5-15 (in Russian).
15. Andrea D. Battery management systems for large lithium-ion battery packs. Boston: Artech House, 2010. 290 p.