электронный научно-технический журнал
ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51036. ISSN 2307-0595

Автономные источники питания на просроченных Li-Ion аккумуляторах и средства их обслуживания

 # 02, февраль 2015

Карлащук В. И.[1,*]

УДК: 621.316.13

[1]Россия, Российский университет дружбы народов
[*]wkarl@yandex.ru

1. Введение

Аккумуляторные батареи (АКБ) современных ноутбуков настолько насыщены умной электроникой и скрытой (программной) связью с электроникой самого ноутбука, что при обрыве этой связи они потихоньку умирают в своем корпусе-гробике из-за малого, но непрерывного энергопотребления в режиме длительного хранения, а также саморазряда. Причем для подзарядки таких АКБ в автономном режиме требуется специальный программно-аппаратный комплекс, поскольку в составе ноутбука АКБ находится в режиме непрерывной связи с ним по двухпроводному интерфейсу I^2C. Если в первых ноутбуках проблема подключения АКБ с подходящим выходным напряжением не вызывало особых затруднений, то в настоящее время это стало просто невозможно. Наряду с проблемами долговременного хранения АКБ, являющимися головной болью производителей и торгующих организаций, причиной отказов АКБ в составе нет- или ноутбуков является отказ ее умной электроники, известной под названием контроллеров, в памяти которых фиксируются емкость используемых Li-Ion элементов, количество циклов заряд-разряд, дата изготовления АКБ, идентификационная микропрограмма, предотвращающая использование батарей сторонних производителей, и другие параметры. Микропроцессором контроллера отслеживается уровень напряжения на каждом элементе с возможностью их выравнивания (балансировки) и управления их включением/отключением в зависимости от допустимых уровней заряда-разряда и температуры элементов.

При отказах контроллеров АКБ чаще всего утилизируется, поскольку она относится к расходным материалам. Если такое отношение к погибающей АКБ характерно для сравнительно больших предприятий, то для индивидуальных пользователей отказ дорогостоящей АКБ представляется неприятным сюрпризом. В таких случаях встает вопрос о возможностях использования АКБ в автономном режиме (без контроллеров) или ее от-

дельных Li-Ion элементов. Кроме того, в некоторых случаях удается приобрести просроченные АКБ по сниженным ценам.

2. Демонтаж ноутбучных АКБ и предварительные результаты их испытания

При испытаниях были использованы четыре аккумуляторных батарей (АКБ) с данными в табл. 1, где $C_Н$, $C_Д$ — номинальное и действительное значение емкости АКБ; $U_Н$ — начальное напряжение АКБ (в скобках — для одного элемента); ΔU — саморазряд АКБ за 4 месяца при температуре около 20 °С при практически неизменной разбалансировке их элементов; SDI — предположительно Samsung Document Identifier — идентификатор даты изготовления Li-Ion элементов ICR18650-22E_2200mAh компании Samsung, входящих в состав исследованных АКБ.

Срок изготовления АКБ №1 был принят по дате покупки ноутбука, а АКБ №2 и 3 — по дате изготовления контроллеров, указанных в производственных ярлыках, приклеенных к их печатным платам. Дата изготовления АКБ №4 была установлена по ярлыку на ее корпусе (см. рис. 7). Если сравнить эти данные с идентификатором SDI, то можно заметить, что первая цифра SDI совпадает с годом изготовления. Согласно данным сайта http://www.zapas-m.ru новая кодировка SDI таких аккумуляторов содержит 4 символа: 1 — номер подразделения Samsung; 2 — год изготовления: Y-2005 год, L-2006, P-2007, Q-2008, S-2009, Z-2010, B-2011, C-2012, D-2013, F-2014, G-2015, H-2016, J-2017, K-2018, M-2019, N-2020; 3 — месяц: 1…9 (январь…сентябрь), A- октябрь, B - ноябрь, C - декабрь; 4 — номер недели. Если принять во внимание эти данные, то можно утверждать, что, например, элементы АКБ №1 изготовлены на второй неделе сентября 2008 г.

Указанные в табл. 1 начальные напряжения $U_Н$ измерены после их демонтажа; действительная емкость $C_Д$ — после их зарядки до напряжения 12,6 В рассматриваемым ниже способом и при их разрядке до напряжения 3 В на один элемент и среднем токе разряда 0,6 А для АКБ №1 и 0,9 А для остальных трех. Из табл. 1 видно, что потери энергоемкости АКБ №1 за 5 лет при сравнительно низкой интенсивности эксплуатации составили около 21%, тогда как для остальных АКБ после 7-8-летнего хранения они составили 3-7%.

Таблица 1. Данные испытанных АКБ

Тип АКБ	$C_Н$, мА·час	Дата изготовления	$U_Н$, В	SDI	$C_Д$, мА·час	ΔU, В
1. A32-F5	4400	09.2008	9 (3)	892	3300	—
2. A32-F5	4400	05.09.2007	5,7 (1,9)	774	4100	0,06
3. A33-Z94	6600	22.10.2006	5,1 (1,7)	693	6300	0,02
4. Dell MN151	6600	10.07.2007	6,3 (2,1)	761	6400	0,04

АКБ №1 эксплуатировалась в составе ноутбука Asus PRO50series с 2008 г. по 2013 г., когда начались периодические сбои в работе ПК в виде самопроизвольного выключения. В начале 2014 г. был обнаружен отказ АКБ, после чего она была разобрана на одиночные элементы, которые попарно заряжались на промышленном зарядном устройстве HXY-18650-2A (напряжение в конце зарядки для 4-х аккумуляторов составило на один элемент 4,18 В, для остальных двух — 4,14). В дальнейшем эти одиночные АКБ в различных комбинациях использовались в различных устройствах, в частности, в батарейном моде LAMBO 4.0 с обслуживаемым баком VIVI Tank V2LR (устройство из области электронных сигарет) с потребляемым током до 2 А, а также для питания светодиодных светильников в дачных условиях при аварийном отключении сети 220 В.

Тот факт, что напряжения заряженных аккумуляторов попарно одинаковы, говорит о том, что при производстве Li-Ion батарей осуществляется тщательный предварительный отбор ее элементов из условия идентичности их эксплуатационных характеристик, что особенно важно при их параллельном включении [6].

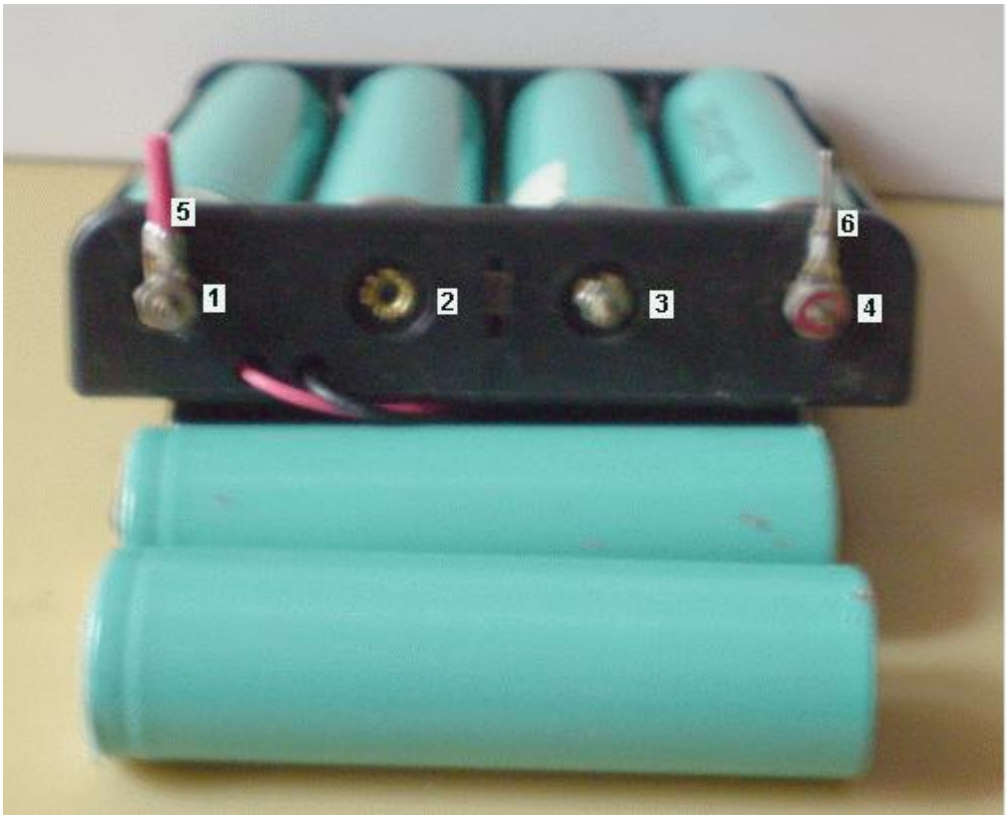


Рис. 1. Элементы АКБ №1 с батарейным отсеком 4×18650

Для расширения возможностей применения Li-Ion элементов АКБ №1 использовался батарейный отсек 4×18650 (рис. 1; 18650 — типоразмер элемента) (http://zapas-m.ru/shop/CID_Battery_Accessories.html), который был модернизирован путем установки дополнительных контактов с помощью болтов М2 с потайной головкой, вставляемых в полые латунные заклепки (позиция 2 на рис. 1), которые в исходном изделии служили контактами для вставляемых Li-Ion элементов. Таких болтов было установлено 5 штук — 3 на

лицевой грани (позиции 1, 3 и 4 на рис. 1) и 2 — на противоположной грани, что позволяет с помощью перемещаемой контактной пары от старых разъемов 5 (гнездо) и 6 (вилка диаметром 1 мм), припаянных к клеммам под болт, подключать к зарядному устройству (ЗУ) или нагрузке 4 элемента в любой комбинации. При подключении к ЗУ гнездо 5 прикручивается к отрицательному зажиму аккумулятора, а вилка 6 — к положительному; при подключении к нагрузке — наоборот, что позволяет всегда иметь у ЗУ или аккумуляторного источника питания зажим «+» в виде полностью изолированного гнезда (см. например, кабель К2 на рис. 4), а в случае нагрузки — то же изолированное гнездо в качестве зажима «–», что в конечном итоге позволяет избежать случайной закоротки источника питания или выхода ЗУ, поскольку соединение гнездо-вилка всегда оказываются жестко разнесенными в пространстве (как на рис. 1) и изолированными от других соединений.

АКБ компании Asus, как и большинства других компаний, отличаются неразборной (склеенной) конструкцией. Причем блок аккумуляторов АКБ №1 помещается в отдельный вспомогательный корпус (поддон), по наружным граням которого располагаются под углом 90° две печатные платы контроллера (позиция 2 на рис. 3), соединенные между собой 6-ю проводниками. Вся эта конструкция помещается в основной корпус из двух склеенных между собой половинок.



Рис. 2. Уцелевший поддон от корпуса АКБ №1

При достаточно «варварской» разборке АКБ №1 уцелел только поддон вспомогательного корпуса (рис. 2), который оказался удобной транспортировочной тарой для ее элементов. На длинной грани этого поддона видны прорези 1…7 для прокладки проводников от двух термодатчиков NTC (позиция 4 на рис. 3), «+» и «–» АКБ, а также от каждой пары параллельно соединенных элементов типоразмера 18650. Контроллер для этой АКБ (плата 2 на рис. 3) выполнен на микросхемах BQ29330 и BQ20Z90 (поз. 5) компании Texas Instruments и 4-х МОП ключах 4626A (поз. 6), между которыми располагается трехзажимный предохранитель D6X780 (поз. 7).

Контроллер для АКБ №3 (плата 1 на рис. 3) содержит плавкий предохранитель 8, 4 30-вольтовых МОП транзисторов TPC8107 (поз. 9) компании Toshiba с током переключения от 13 до 52 А в импульсе и сопротивлением открытого канала 5,5 мОм, микросхемы S8254A (поз. 10)

от Seiko Instruments Inc. и BQ2060A от Texas Instruments (находится с противоположной стороны платы 1). В этом контроллере используется только один термодатчик 4; девятиконтактные разъемы 3 в обоих контроллерах одинаковы.

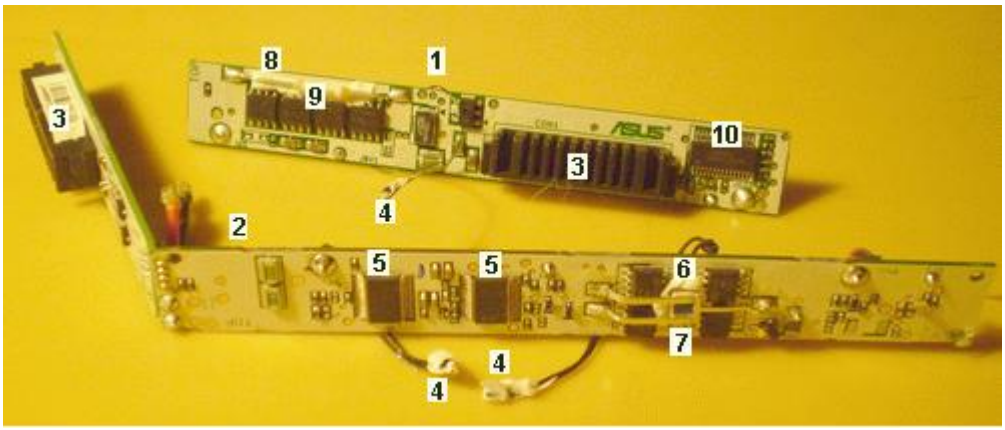


Рис. 3. Платы контроллеров АКБ №1, 2 и 3

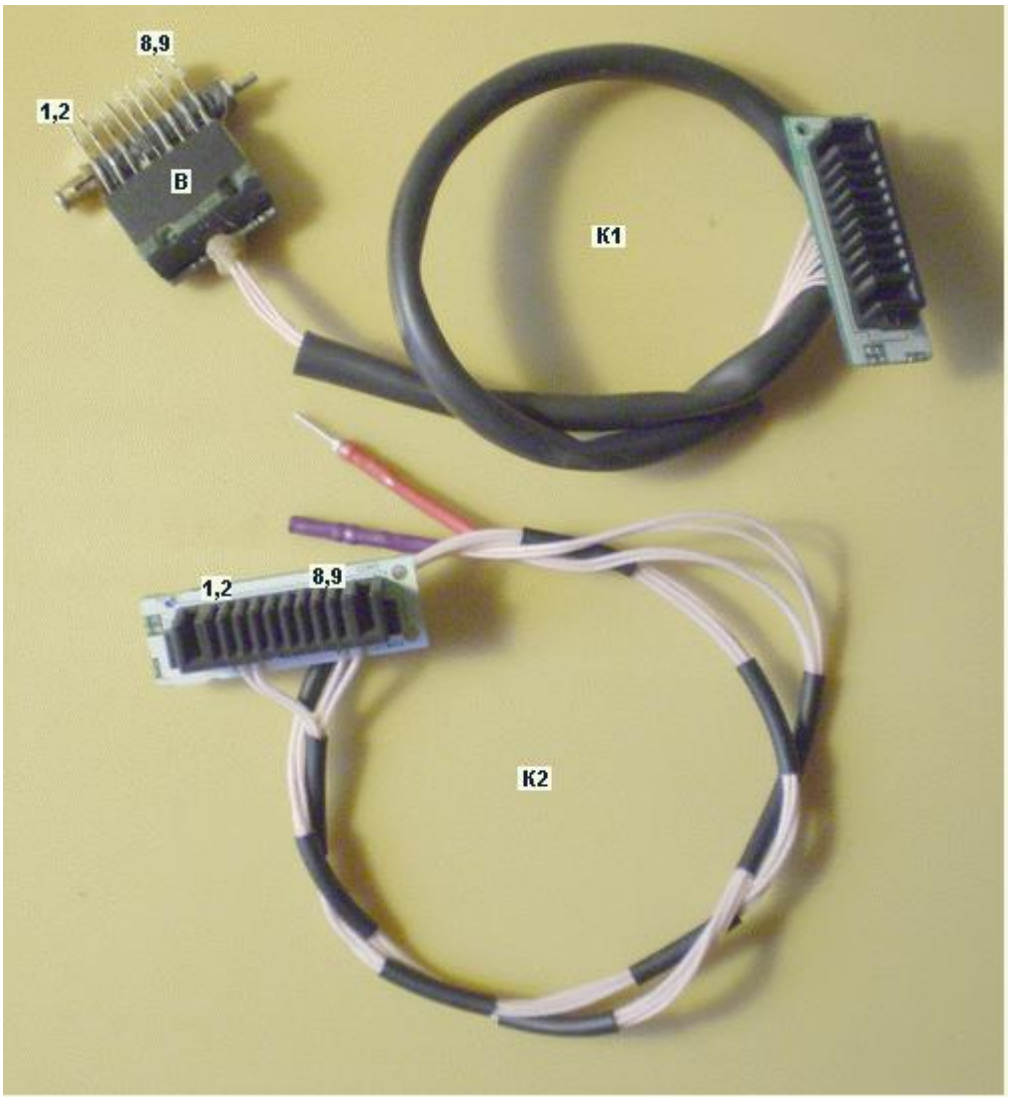


Рис. 4. Кабели для пробных испытаний АКБ

Для испытания АКБ №2 и 3 были изготовлены кабели (рис. 4) К1 для подключения АКБ к ноутбуку и К2 для подключения к нему АКБ без контроллера. В обоих кабелях использовались отрезанные от контроллеров разъемы, а вилка В в кабеле К1 была изготовлена из контактов реле. Было установлено, что в рабочем состоянии (при подключенной АКБ) на контактах 4 и 5 вилки индицируется напряжение +3,5 В (относительно «земляных» контактов 1, 2), на остальных контактах наблюдается нулевой потенциал. Попытка в автономном режиме (без ноутбука) открыть АКБ, т. е. получить на контактах 1, 2 (–) и 8, 9 (+) напряжение батареи путем подачи на контакты 4, 5 напряжения +3,5 В не увенчались успехом. Аналогичный результат был получен и при подключении АКБ без контроллера: селектор (переключатель АКБ/сетевой адаптер) ноутбука не желал признавать АКБ в качестве альтернативного батарейного источника питания.

Разборка АКБ №2 велась более тщательно с использованием резака из обрезка обычного ножовочного полотна и малогабаритной ножовки по металлу с тонким полотном длиной 155 мм. При этом поддон был сохранен со всеми гранями, включая грани 1, 2, на которых располагался контроллер, а на грани 10, которая отделена от элементов 18650 внутренней перегородкой со щелью в 3 мм, были установлены выводы 4 (+12 В), 5 (+8 В), 6 (+4 В) и 7 (0 В или минус АКБ) от каждой группы элементов 18650 с помощью болтов М2,5 и перемещаемой (как на рис. 1) контактной пары 8 и 9. Поддон закрывался полностью сохранившейся крышкой 3. Последовательно включенные три группы элементов содержат каждая по два параллельно включенных элемента 11 и 12, 13 и 14, 15 и 16 (в последней группе положительные зажимы соединены между собой проводом 17).

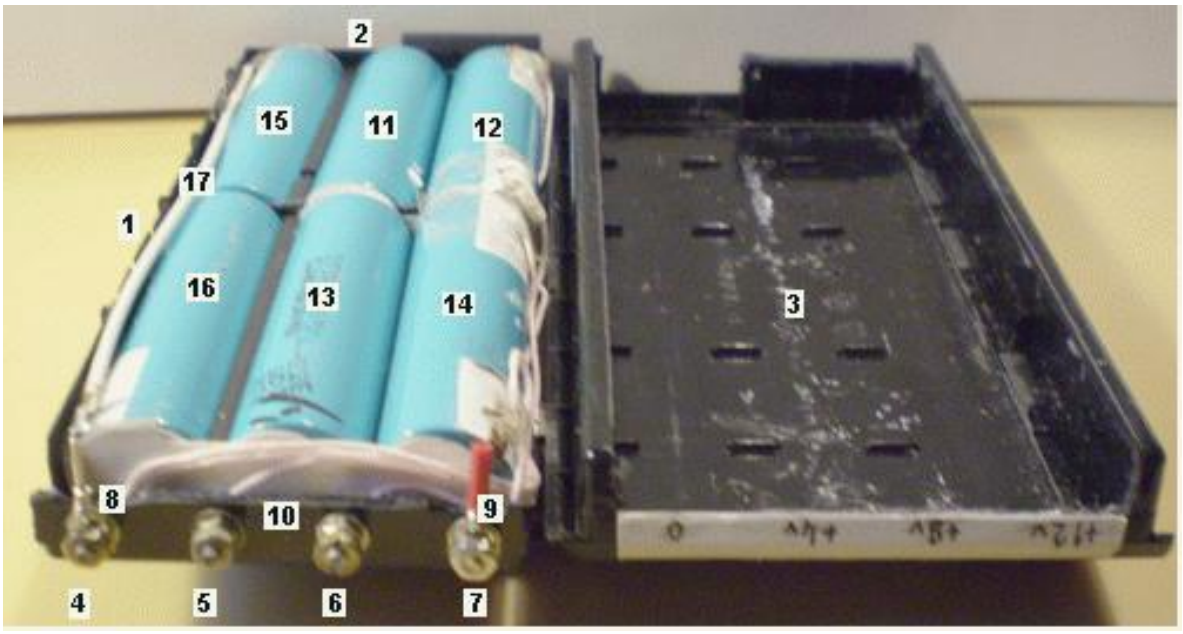


Рис. 5. АКБ №2 после модернизации

Для разборки АКБ №3 достаточно было в основном корпусе 1 (см. рис. 6) резаком и частично скальпелем вырезать крышку 3 и после временной выемки блока аккумуляторов и перегородки в области прилива 2 удалить находящийся за ней контроллер с разъемом (отверстие под

разъем заклеено этикеткой со штрих-кодом), а затем с помощью болтов М2,5 установить выводы для каждой группы элементов 18650 и перемещаемой (как на рис. 5) контактной пары.

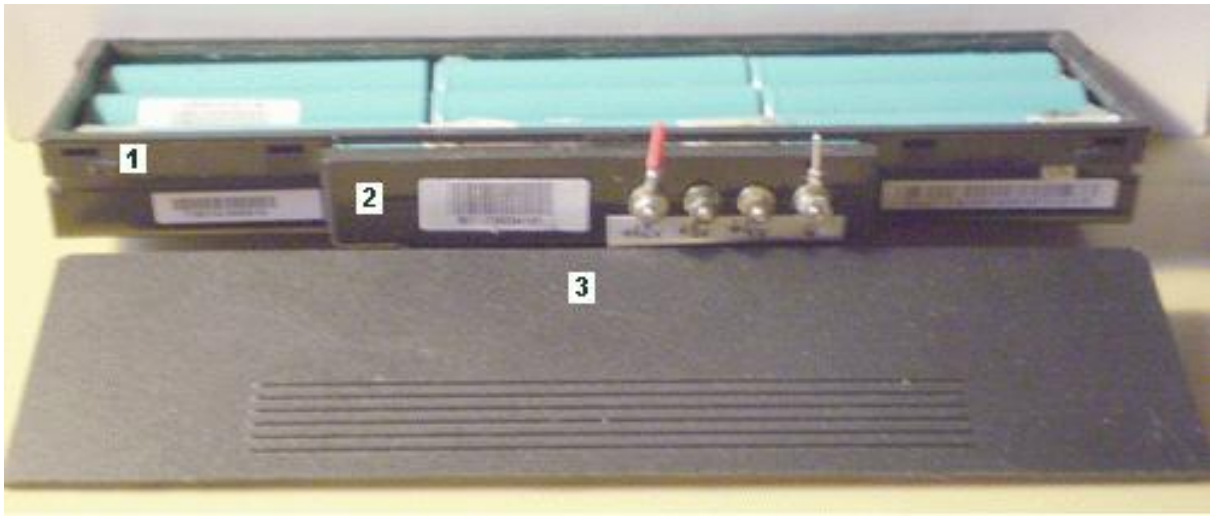


Рис. 6. АКБ №3 после разборки и модернизации

Разборка АКБ №4 (рис. 7) проводилась аналогичным АКБ №3 образом — с помощью резака и малогабаритной ножовки. Аналогична также конструкция аккумуляторного блока — три последовательно включенные сборки из трех параллельно включенных аккумуляторов 12, 13, 14 общей емкостью С = 3×2200 мА·ч той же Samsung, но с корпусами другого цвета. Выводы от каждой сборки 1 (0 или –12 В), 2 (+4 В), 3 (+8 В) и 4 (+12 В) также выполнены болтами М2,5 и перемещаемой контактной пары. Если верить наклейке 5 с надписью 070710 (возможно это 2007.07.10) на крышке корпуса 5, то АКБ №4, предположительно, является наиболее свежей. В пользу этого утверждения говорит тот факт, что отданная этой АКБ энергия составила 6400 мА·час против 6300 мА·час у АКБ №3.

Контроллер АКБ выполнен на микросхемах BQ2085 и BQ29311 (поз. 6) от Texas Instruments, упоминавшихся ранее МОП транзисторах TPC8107 (поз. 9), обволоченных теплоотводящей пастой, одного термодатчика, SMD кнопки 10 предположительно для контроля уровня заряда АКБ в автономном режиме с помощью 5-ти SMD светодиодов 11 (находятся снизу поддона и показаны отдельной вставкой в правом нижнем углу рис. 7). Соединение контроллера с зажимами «–» и «+» батареи производится изолированными ленточными проводниками 7, 8 с припаянными обычными круглыми проводниками, которые уже прокладываются в желобки между соседними аккумуляторами, что в какой-то степени способствует более компактной форме корпуса АКБ №4.

Если у всех рассмотренных АКБ разъемы одинаковы, то, например, в нетбуке Samsung N102 с АКБ емкостью 2200 мА·час этот разъем несколько другой конструкции.

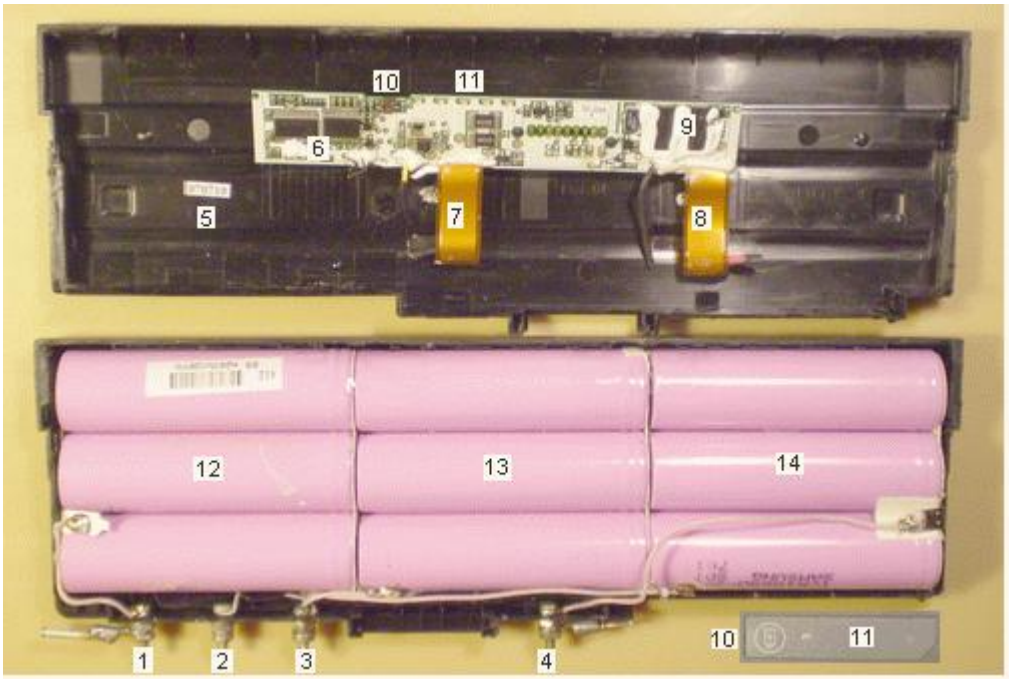


Рис. 7. АКБ №4 после разборки

Из приведенных в табл. 1 результатов испытаний можно сделать заключение, что после сравнительно длительного периода хранения, когда напряжение на Li-Ion элементах достигает недопустимо низкого значения (< 2 В), ноутбучные АКБ сохраняют возможность значительного восстановления их емкости, однако использовать их в «незнакомом» ноутбуке не представляется возможным как по электромеханическим характеристикам (различия в конструкции разъемов и элементов крепления АКБ в корпусе ноутбука), так и по программно-аппаратным средствам из-за многообразия схем контроллеров АКБ и программируемых параметров, во многих случаях запрещающих использование «чужих» АКБ. Поэтому наиболее целесообразным направлением использования просроченных АКБ является исключение из них контроллеров и применение в качестве автономного или резервного источника питания ноутбука в сочетании с повышающим DC-DC преобразователем. Причем, для успешной эксплуатации таких АКБ потребуется использование специализированных зарядных устройств (ЗУ), а также средств балансировки и контроля предельного разряда АКБ.

3. Средства обслуживания Li-Ion АКБ

3.1. Зарядные устройства

Алгоритм заряда Li-Ion АКБ состоит из нескольких этапов [1, 2]. Если напряжение батареи ниже 2,8 В, то на первом этапе используется предварительный заряд током около 0,1С. Когда напряжение на АКБ достигает 3 вольт, переходят ко второму этапу, при котором ЗУ переводится в режим источника постоянного тока с максимальным зарядным током 1·С, где С (А·час) — номинальное значение емкости аккумулятора. При этом напряжение аккумулятора постепенно растет до тех пор, пока не достигнет предельного значения (около 4,2 В). После завершения второго этапа аккумулятор заряжается примерно до

70% своей емкости. Для 100%-ного заряда производится переход к третьему этапу, при котором ЗУ переводится в режим стабилизации напряжения. На этом этапе к батарее прикладывается постоянное напряжение (около 4,2 В при предельном значении 4,3 В), а протекающий через батарею ток в процессе заряда автоматически уменьшается от максимума до минимального значения (0,03…0,1)·C, при котором заряд батареи считается законченным. Заметим, что для увеличения срока службы Li-Ion АКБ пороговое напряжение конца заряда рекомендуется выбирать равным 3,90 В на элемент.

Рассмотренный алгоритм зарядки Li-Ion АКБ нетрудно реализовать вручную с помощью промышленного блока питания Б5-44 с режимом стабилизации как по напряжению (0…30 В) с шагом установки 0,1 В, так и по току (0…999 мА) с шагом 1 мА. В качестве испытуемых были использованы три последовательно включенных элемента АКБ №1 с использованием батарейного отсека на рис. 1.

Фрагмент процесса заряда, показанный в табл. 2, производился следующим образом. На Б5-44 устанавливается конечное напряжение заряда 12,6 В. После подключения испытуемой АКБ с начальным напряжением 11,1 В на первом шаге (Тз = 0) переключателем тока стабилизации устанавливается значение тока заряда Iз = 0,6 А, при котором Б5-44 автоматически переходил в режим стабилизации тока. Когда Б5-44 автоматически переходил в режим стабилизации напряжения, измерялось его значение Ua = 12,49 В, после чего устанавливался Iз = 0,5 А и включался секундомер. Б5-44 автоматически переходил в режим стабилизации тока и после перехода в режим стабилизации напряжения измерялось его значение Ua = 12,51 В и фиксировался первый промежуток времени заряда Тз = 20 мин. Аналогичным образом получены значения Ua и Тз при Iз = 0,4…0,01 А. Увеличение Ua при Iз = 0,05 и 0,01 А объясняется погрешностью установки Ua, которая согласно паспортным данным Б5-44 равна ±(0,05Uy + 0,001Umax) = ±(0,005·12,6 + 0,001·29,9) = ±0,093 В.

Таблица 2. Процесс заряда трехэлементной АКБ емкостью 2200 мА·ч

Iз, А	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,01
Ua, В	12,49	12,51	12,53	12,56	12,58	12,6	12,62	~12,63
Тз, мин	0	20	50	70	100	180	220	260

Из полученных данных видно, что ток заряда Li-Ion АКБ автоматически (без участия зарядного устройства (ЗУ)) уменьшается по мере увеличения его напряжения. Это важно подчеркнуть, потому что при знакомстве с описанием некоторых ЗУ создается впечатление, что эту функцию выполняет ЗУ. Кроме того, следует отметить, что используемый практически во всех ЗУ метод заряда CC-CV (постоянный ток – постоянное напряжение) практически полностью безопасен в отношении возможности перезаряда Li-Ion АКБ, поскольку в конце 100-процентного заряда зарядный ток уменьшается самой АКБ до пренебрежимо малых значений (в нашем случае до 10 мА или 0,45% от емкости АКБ).

Для реализации автономного ЗУ использована популярная ИМС LM317 (или аналог LM117), руководство к которым (http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm117.pdf) содержит большое ко-

личество примеров ее использования, на основании которых была разработана схема зарядного устройства на рис. 8. При разомкнутых ключах П1 на этой схеме выходное напряжение

$$Uo4 = 1{,}25[1 + (R1 + R2 + R3 + R4 + R5)/R8] + I2\cdot(R1 + R2 + R3 + R4 + R5).$$

При нормируемом токе управляющего электрода 2 $I2 = 5\cdot10^{-5}$ А получаем $Uo4 = 16{,}9$ В (для зарядки, например, Li-Ion АКБ с номинальным напряжением 14,8 В серий BTC, W3JL721 и G71/F70/M70/X71 компании Asus).

При замыкании ключа П1.1

$$Uo1 = 1{,}25[1 + (R1 + R2)/R8] + I2\cdot(R1 + R2) = 4{,}24 \text{ В},$$

что соответствует зарядке одиночных Li-Ion элементов.

При замыкании ключа П1.2

$$Uo2 = 1{,}25[1 + (R1 + R2+ R3)/R8] + I2\cdot(R1 + R2 + R3) = 8{,}46 \text{ В},$$

что соответствует зарядке АКБ с номинальным напряжением 7,4 В типа VGP-BPS23 и VGP-BPS6 компании Sony.

При замыкании ключа П1.2

$$Uo2 = 1{,}25[1 + (R1 + R2+ R3 + R4)/R8] + I2\cdot(R1 + R2 + R3 + R4) = 12{,}68 \text{ В},$$

что соответствует зарядке большинства современных ноутбучных АКБ с номинальным напряжением 11,1 В.

Поскольку переключатель П1 (типа ВДМ1-4) рассчитан на 4 направления, то П1.4 совместно с П1.1…П1.3 и подстроечным резистором R7 был использован для формирования стабилизированных напряжений Min / Max, перечисленных в таблице на рис. 8. В таком режиме стабилизованные напряжения указанных значений могут быть использованы в других целях, например, для питания макетов.

Режим стабилизации тока осуществляется включением переключателем П2 между зажимами «–» входного Ui и выходного Uo напряжения измерительных резисторов R1i (ток стабилизации 0,1 А) и R2i (ток стабилизации около 1 А). Когда падение напряжения на одном из этих резисторов достигает напряжения около 0,6 В (ток стабилизации 0,6/R1i = 0,1 А или 0,6/R2i = 1 А), транзистор Т1 начинает открываться, что приводит к уменьшению Uo на заряжаемой АКБ, а затем закрываться по мере повышения ее напряжения. Когда это напряжение достигает значения ~4,2 В на один элемент АКБ, стабилизатор переводится в режим стабилизации напряжения с небольшим рысканием около среднего состояния транзистора Т1 (открыт/закрыт).

Для индикации перехода в режим стабилизации напряжения используется миниатюрный светодиод Д5 с потребляемым током около 0,5 мА, который управляется каскадом на Т2 под действием падения напряжения на R1i или R2i.

Для формирования сигнала аудио оповещения после завершения процесса дозаряда АКБ используется мультивибратор на ИМС К561ЛА7 (элементы 2.3, 2.4 и пъезо излучатель Q) и ключ на транзисторе Т2, который в режиме заряда открыт. При этом на выходе 3 элемента 2.1 формируется сигнал логической 1, под действием которого через диод Д7 производится заряд конденсатора С4. При переходе в режим дозаряда, когда ток заряда при постоянном напряжении на аккумуляторе уменьшается более чем на порядок (см. выше) и падение напряжение на R1i или R2i становится меньше 0,6 В, Т2 закрывается, в результате на выходе 3 элемента 2.1 формируется сигнал логического 0 и начинается разряд конденсатора С4 через высокоомный резистор R12 типа КИМ. Когда напряжение на С4 упадет до значения ≈0,4·U2i, срабатывает элемент 2.2 и под действием сигнала логической 1 на его выходе 4 деблокируется работа мультивибратора с генерацией аудио сигнала оповещения.

Если принять, что C4 заряжается до напряжения 0,8·U2i, то время его разряда до 0,4·U2i можно определить из условия $0{,}4 \cdot U2i = 0{,}8 \cdot U2i \cdot e^{-t/\tau}$, откуда $t = 0{,}7\tau = 0{,}7 \cdot R12 \cdot C4 = 7000$ с = 1,94 ч. При Ui = 16 В, U2i = 13,5 В и Uo = 8,4 В было получено время дозаряда t = 1,7 ч, т. е. меньше расчетного значения, что объясняется сопротивлением утечки диодов Д6 и Д7, сравнимым с сопротивлением резистора R12.

Необходимое время дозаряда можно определить по известной емкости C аккумулятора, степени его заряда к моменту дозаряда 0,7C и току дозаряда ~0,07C, т. е. расчетное время дозаряда составляет около 0,3/0,07 = 4,3 ч. И это при времени основного цикла заряда 2,5…3 ч при зарядном токе 1C или 5…6 ч при токе 0,5C. Кроме того, компания Samsung (производитель Li-Ion элементов большинства АКБ) для своих нет- и ноутбуков рекомендует поддерживать 80-процентный заряд АКБ с целью повышения ее долговечности, т. е. время дозаряда в соответствии с этими рекомендациями может быть уменьшено до 0,1/0,07 = 1,43 ч.

Диод Д6 предназначен для разряда конденсатора C4 при выключении питания; в рабочем режиме он закрыт, поскольку напряжение на C4 всегда меньше U2i. Цепочка из диодов Д1…Д3 предназначена для уменьшения U2i при Ui > 15 В, что вызвано допустимым напряжением питания ИМС К561ЛА7, хотя в некоторых руководствах предельно допустимым для этой ИМС считается напряжение 18 В. Вместо диодов Д1…Д3 можно применить маломощный вариант LM317 — LM78L05, однако это не спасает от усложнения схемы и необходимости использования повышенного Ui и неоправданного при этом повышения рассеиваемой мощности на LM317. Например, при заряде одиночного Li-Ion элемента (Uo = 4,2 В) для нормального функционирования схем оповещения потребуется увеличение Ui до 10-11 В вместо 8 В, для двухэлементной спайки (Uo = 8,4 В) — 13-14 В вместо 12 В и только для трех- и четырехэлементных АКБ (Uo = 12,6 В и 16,8 В) можно ограничиться выбором Ui = Uo + 3 + 0,6, где 3 В — падение напряжения на LM317, 0,6 В — падение напряжения на R1i или R2i.

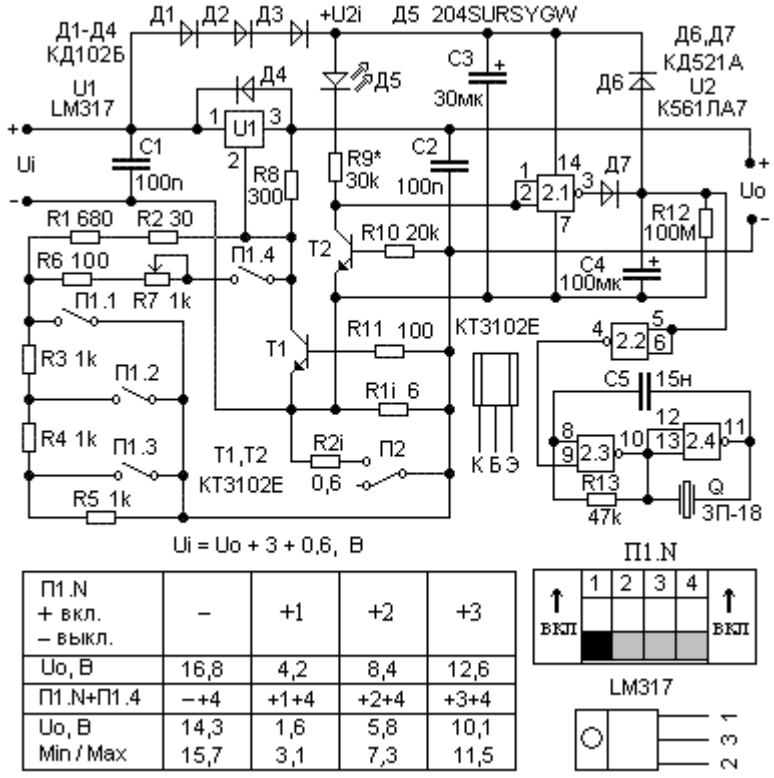


Рис. 8. Зарядное устройство на LM317

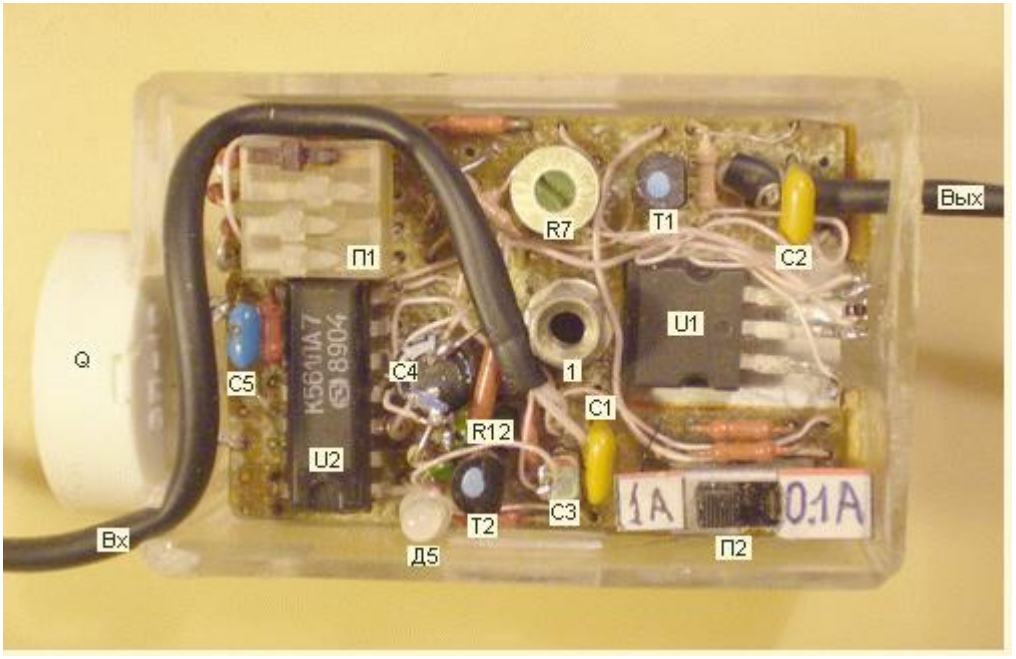


Рис. 9. Макет зарядного устройства

Макет ЗУ (рис. 9) выполнен на прямоугольном отрезке макетной платы, которая вместе с LM317 крепится к ребристому радиатору 30×50×20 мм [Ш × Г × В] с помощью стойки-болта 1 с резьбой М3 с обеих сторон, что позволяет использовать ее одновременно и для крепления верхней крышки ЗУ. Основные компоненты схемы: конденсатор С4 — малогабаритный электролитический конденсатор 100 мкФ на 16 В компании YEC (выпаян с материнской платы ПК); С3 — танталовый бескорпусной; переключатели П1 — типа ВДМ1-4, П2 — типа ПД9-1; резистор R12 типа КИМ-0,125 (во времена СССР выпускались ташкентским заводом «Миконд»; возможный поставщик — http://www.quartz1.com) (можно обойтись и без R12, использовав диоды Д6 и Д7 с большим током утечки, например, КД521Б, КД522, КД102 и др. или уменьшив емкость С4). Сопротивление резистора R9 выбирается таким, чтобы в открытом состоянии Т2 напряжение на его коллекторе было минимальным (1-2 В).

3.2. Устройства сигнализации предельного напряжения разряда АКБ

Первая из разработанных схем для фиксации предельного напряжения разряда АКБ показана на рис. 10, где в качестве датчика изменения напряжения АКБ используется транзистор КТ3102Е в режиме микротоков. В положении 1 переключателя П (типа ПД9-1) производится слежение за минимально допустимым уровнем напряжения разряда Li-Ion АКБ (принято равным 9,3 В), в положении 2 — кислотного АКБ (принято равным 10,9 В). В исходном состоянии, когда АКБ заряжена, транзистор Т открыт, на выходе 10 ИМС U1 формируется сигнал логической 1, а на выходе 11 — сигнал логического нуля, в результате чего по входу 2 ИМС блокируется работа мультивибратора на элементах 1.3 и 1.4 ИМС. Когда напряжение АКБ достигает заданного уровня, транзистор Т закрывается, в результате чего на вы-

ходе 11 ИМС формируется сигнал логической 1, под действием которого разрешается работа мультивибратора и формирование аудио сигнала оповещения частотой около 1 кГц.

Как видно из схемы на рис. 10, настройку целесообразно начинать с режима для кислотного аккумулятора. Для этого в качестве R4 используется переменный резистор, а в качестве имитатора АКБ — регулируемый источник напряжения (в нашем случае это промышленный блок питания Б5-44 с шагом установки выходного напряжения 0,1 В). После установки напряжения условной АКБ 10,9 В переменным резистором добиваемся включения мультивибратора, после чего небольшим увеличением напряжения АКБ (в нашем случае — на 0,1 В) добиваемся прекращения его работы. При этом оказалось, что R4 = 15 кОм. В случае Li-Ion АКБ на выходе имитирующего источника устанавливается напряжение 9,3 В и дальнейшая настройка производится аналогично рассмотренной. В нашем случае оказалось, что при этом сопротивление R4 составляет 17,36 кОм, т. е. для Li-Ion АКБ целесообразно было построить схему из условия R3 + R4 = 17,36 кОм, что и показано на рис. 10.

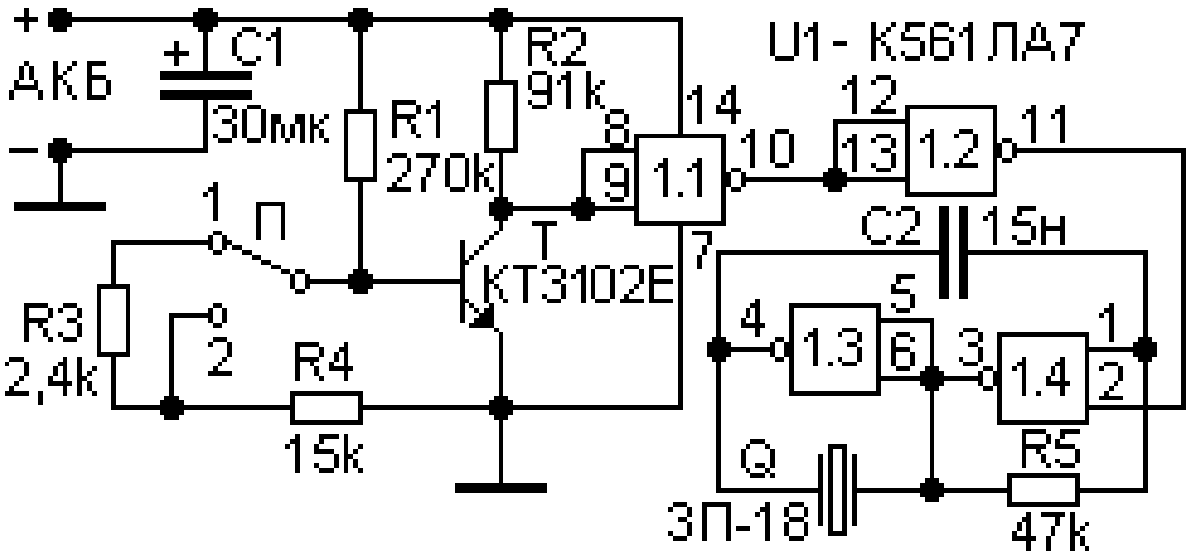


Рис. 10. Схема аудио сигнализатора предельного разряда АКБ

Конструктивно сигнализатор выполнен на отрезке макетной платы и размещен в корпусе модернизированного DC-DC-преобразователя NPA-DC1DC (см. http://wkarl.narod.ru/13.htm) (рис. 11), который под нагрузкой (ноут- или нетбук), кстати, самовыключается при напряжении на АКБ около 9,3 В. Напряжение питания на сигнализатор подается через две крепежные стойки (болты 1 и 2 на рис. 11).

Результаты испытания конструкции на рис. 11: время работы ноутбука Gigabyte (собственная АКБ емкостью 2200 мА·час) — 2 часа 14 мин от АКБ №2 (4400 мА·час) с одновременной дозарядкой собственной АКБ на 10% (от 90 до 100%), а нетбука Samsung N102 (собственная АКБ емкостью 2200 мА·час) — около 4 часов при напряжении самовыключения около 9,3 В в обоих случаях.

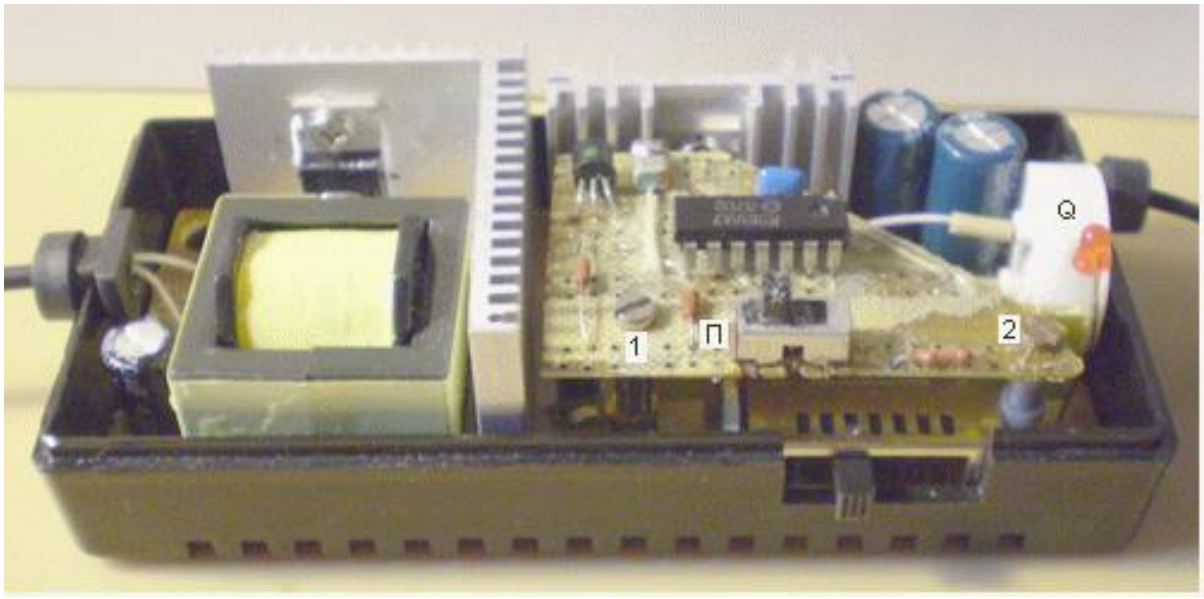


Рис. 11. Макет сигнализатора в составе DC-DC-преобразователя NPA-DC1 со снятой крышкой.

Опыт использования рассмотренного сигнализатора показал, что при автономных применениях АКБ его целесообразно сделать также автономным. Схема такого сигнализатора показана на рис. 12. Он выполнен на программируемом стабилитроне Д1, работающем в режиме компаратора, уровни срабатывания которого задаются делителем на резисторах R1 и R3-R8.

Настройка сигнализатора проводилась с помощью блока питания Б5-44. При настройке сигнализатора под кислотный аккумулятор замыкается перемычка П1 и на вход АКБ подается напряжение 10,7 В. Регулировкой резистора R4 добиваемся срабатывания сигнализатора, когда напряжение на катоде Д1 достигает значения 7-9 В, которое после формирователя на инверторах 1.4 и 1.3 преобразуется в потенциальный сигнал +10 В, под действием которого закрывается диод Д2, в результате чего деблокируется мультивибратор на инверторах 1.1 и 1.2 и при импульсе +10 В на выходе 4 свечение светодиода Д4 с зеленного меняется на красный и закрывается диод Д3, что вызывает деблокировку мультивибратора на инверторах 1.5 и 1.6 и формирование аудио сигнала оповещения пъезоизлучаетелем Q.

В паузе, когда на выходе 4 инвертора 1.2 формируется сигнал логического нуля, свечение светодиода Д4 с красного меняется на зеленый и открывается диод Д3, что вызывает блокировку мультивибратора на инверторах 1.5 и 1.6 и прекращение формирования аудио сигнала оповещения.

Таким образом, при достижении предельного напряжения разряда кислотной АКБ формируется прерывистый аудио и визуальный сигнал оповещения, напоминающий крякалку полицейской машины. При этом с помощью регулятора тока стабилизации источника Б5-44 устанавливается потребляемый ток (~23 мА) и мультиметром измеряется напряжение на управляющем электроде 1 Д1 (~2,49 В) и напряжение на его катоде 3 (~8 В).

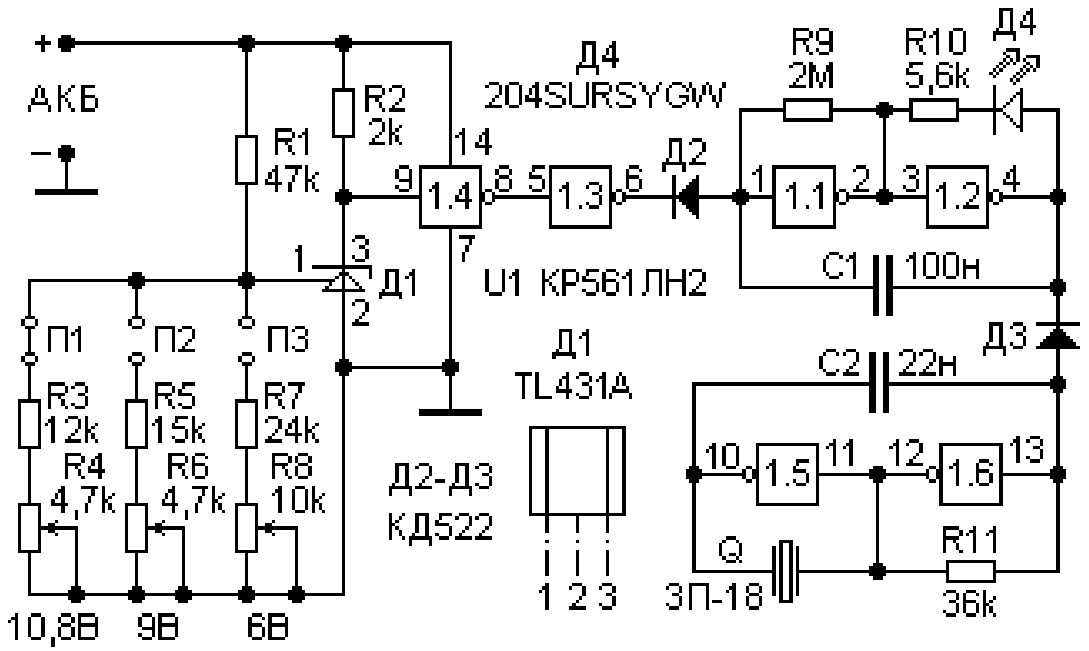


Рис. 12. Схема сигнализатора предельного разряда АКБ на TL431

При увеличении выходного напряжения Б5-44 (имитатора АКБ) на 0,1 В (до 10,9 В) на катоде 3 Д1 устанавливается напряжение около +2 В, в результате чего на выводе 6 инвертора 1.3 и 4 инвертора 1.2 устанавливается сигнал логического нуля и прекращается формирование сигналов оповещения за исключением постоянного зеленого свечения светодиода Д4, являющегося признаком режима ожидания. В этом режиме производится проверка работы сигнализатора при изменении напряжения АКБ (Б5-44) вплоть до его максимального значения (14,4 для кислотной АКБ). Установлено, что при этом потребляемый ток изменяется от 9 до 12 мА, напряжение на электроде 1 Д1 меняется в пределах 2,5…2,53 В, а на его катоде 3 — в пределах 1,94…1,82 В.

Настройка сигнализатора под Li-Ion АКБ производится аналогично. Для трехэлементной АКБ замыкается перемычка П2 и выбирается напряжение предельного разряда равным 9 В (или 9,3), а для двухэлементной — перемычка П3 и 6 В (или 6,2). При этом потребление сигнализатора для трехэлементной АКБ составило 8-9 мА в ждущем режиме (при изменении напряжения АКБ от 9,1 до 12,6 В) и 17 мА в режиме формирования сигналов оповещения (при напряжении АКБ 9 В), а для двухэлементной АКБ — 5-7 мА в ждущем режиме (при напряжениях 6,1…8,4 В) и 10 мА в режиме формирования сигналов оповещения (при напряжении 6 В). Напряжения на управляющем входе и катоде стабилитрона Д1 в ждущем режиме имеют аналогичные с кислотной АКБ значения, а на его катоде в режиме оповещения 7-8 В и ~5 В для 3- и 2-элементной АКБ соответственно.

Макет сигнализатора показан на рис. 13 (другие элементы макета описаны ниже). Как уже отмечалось, светодиод Д4 используется в двухцветном режиме: красный в прямом включении и зеленый — в обратном; диаметр баллона 3 мм, диаметр бровки — 4 мм. Напряжение срабатывания Д4 — около 2 В. При токе 0,5 мА он обладает достаточно заметной яркостью свечения как в прямом, так и в обратном включении. Подключение контролируемой АКБ производится проводниками +АКБ и –АКБ с контактными наконечниками как на рис. 1.

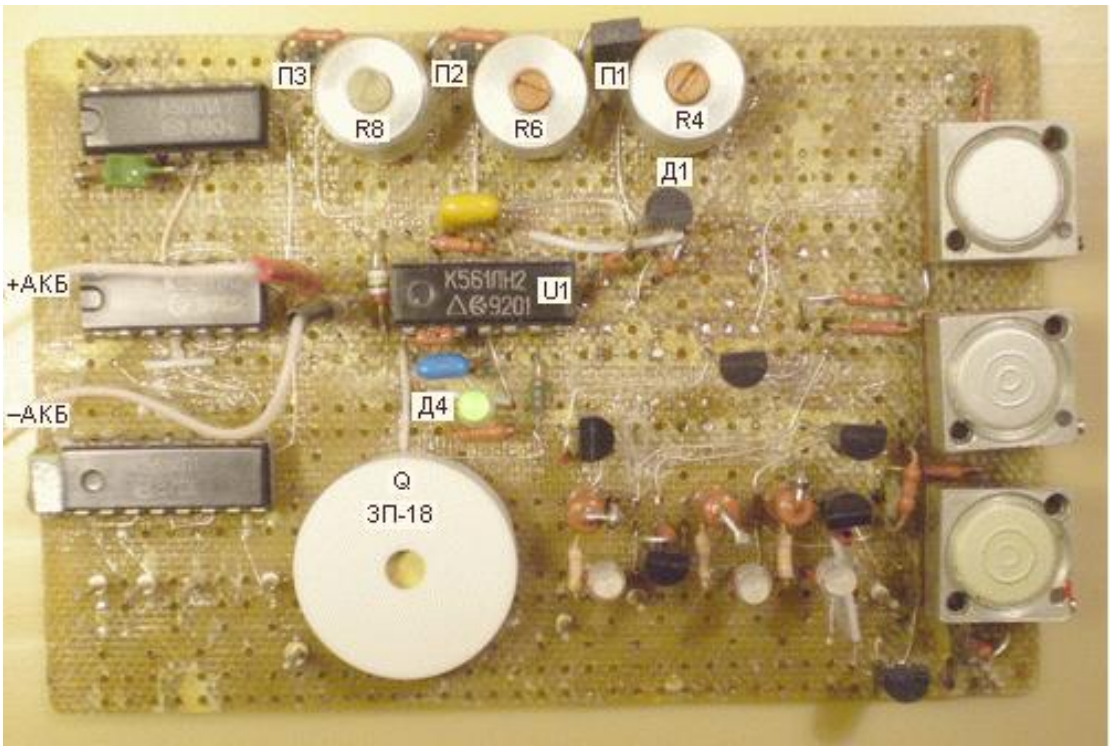


Рис. 13. Макет сигнализатора предельного разряда АКБ на TL431

3.3. Выравниватели (балансиры) заряда АКБ

Как уже отмечалось (по поводу АКБ №1) производители АКБ стараются подбирать их элементы с максимально близкими параметрами, но со временем они начинают терять свою идентичность, что известно как разбалансировка АКБ. Различия характеристик ячеек АКБ приводит к тому, что ёмкость составной батареи будет ниже, чем составляющих её ячеек и, во-вторых, ресурс такого аккумулятора также будет ниже, так как он будет определяться самым «слабым» элементом, который к тому же будет «изнашиваться» быстрее других. Для исключения этого недостатка используются балансиры, основанные на выравнивании напряжения на ячейках или выравнивании заряда на них, что достигается активным или пассивным способом [3]

При активном способе для передачи энергии от более заряженного элемента АКБ к менее заряженному используются реактивные накопители — катушки индуктивности или конденсаторы, потери энергии в которых незначительны. В частности, в случае конденсаторных накопителей используются микросхемы-преобразователя на коммутируемых конденсаторах таких компаний как Maxim, National Semiconductor, Microchip, а также ИМС серии КР561 [4]. Схема последнего варианта показана на рис. 14, на которой элементы АКБ подключаются последовательно между зажимами S0 («–» АКБ и минус первого элемента) и S1 («+» первого элемента), S1 («–» второго элемента) и S2 («+» второго элемента) и т. д., т. е. к такому балансиру может быть подключено до четырех элементов

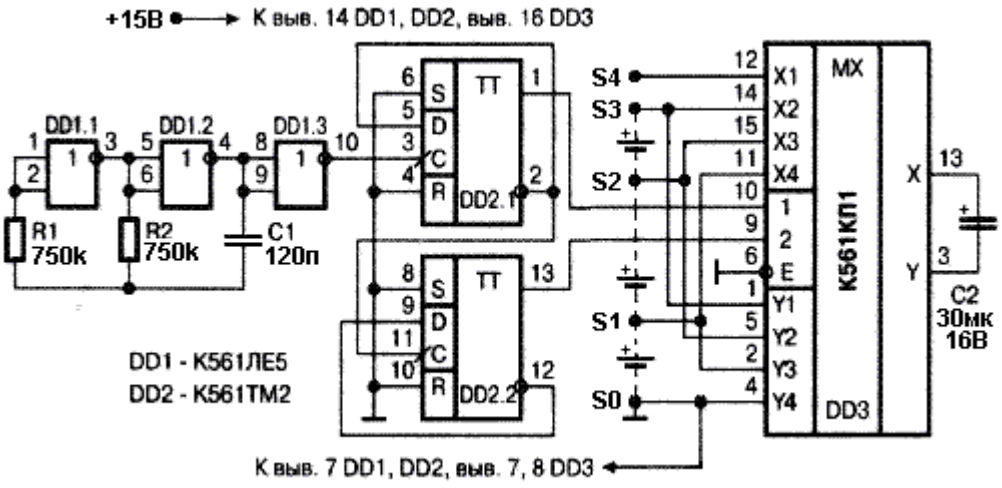


Рис. 14. Конденсаторный балансир

Конденсатор C2 с помощью коммутатора на сдвоенном мультиплексоре D3 поочередно подключается к этим элементам, обеспечивая взаимную перекачку их энергии и выравнивание тем самым напряжения на них. Управление мультиплексором производится от импульсного генератора на DD1 и двухразрядного счетчика на DD2.

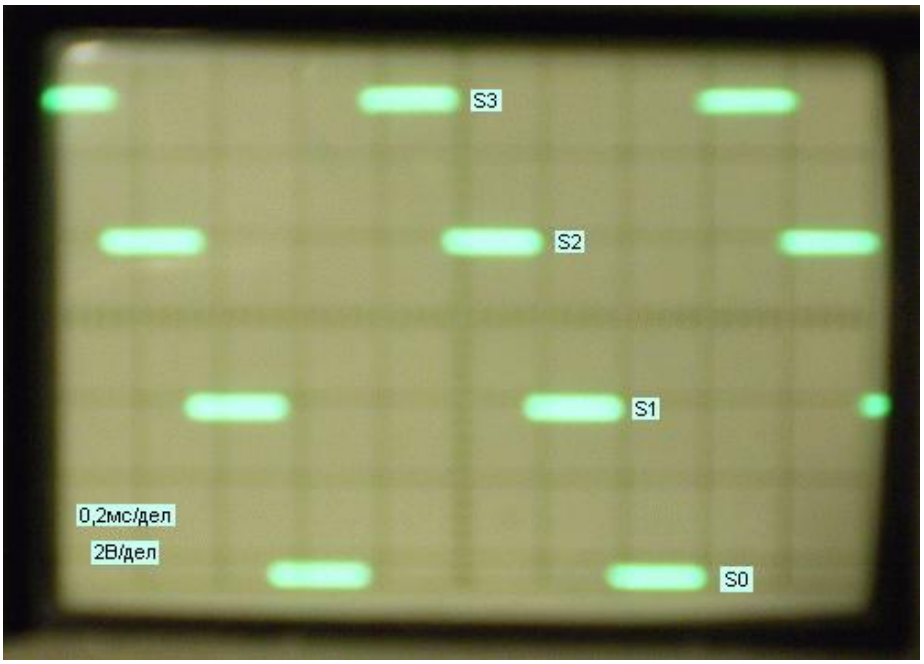


Рис. 15. Осциллограммы сигналов на конденсаторе C2

Осциллограммы сигналов на выравнивающем конденсаторе C2 (относительно общей шины S0) показаны на рис. 15, а макет — на рис. 16, где в качестве C2 используется бескорпусной танталовый конденсатор типа К53-16. Из осциллограмм видно, что за один такт работы балансира время выравнивания на один элемент $\Delta t \approx 2 \cdot 10^{-4}$ с. Если принять, что в исходном состоянии разбаланс элементов $\Delta U = 0{,}2$ В, то выравнивающий ток за один такт составит $\Delta I = \Delta U \cdot C2 \cdot \Delta t = 2 \cdot 10^{-}$

$^{1}\cdot 30\cdot 10^{-6}\cdot 2\cdot 10^{-4} = 1{,}2\cdot 10^{-9}$ А, а в конце балансировки, когда ΔU = 0, 01…0,005 В, этот ничтожно малый ток уменьшится ещё в 20…40 раз. Поэтому неудивительно, что экспериментальные исследования балансира на ИМС ICL7660 (MAX1044 или отечественный аналог КР1168ЕП1) для двуэлементной никель-металлгидридной (Ni-MH) АКБ емкостью 1700 мА·ч показали [4], что время ее балансировки от ΔU = 0, 08 В до ΔU ≈ 0,005 В составило 50 часов.

Что же касается схемы на рис. 14, то необходимо учитывать, что напряжение питания КР561 должно быть больше напряжения на управляющих входах и, кроме того, сопротивление открытого канала коммутатора также зависит от напряжение питания: если при пяти вольтах оно равно 0,5…2 кОм, то при 15-ти оно уменьшается до 0,13…0,28 кОм [5], что непременно скажется на временных параметрах процесса балансировки. Отмеченные обстоятельства говорят о том, что в схеме на рис. 14 потребуется как источник питания ИМС, так и источник зарядного напряжения, подключаемый между зажимами S0 и S3 (S4) в схеме на рис. 14.

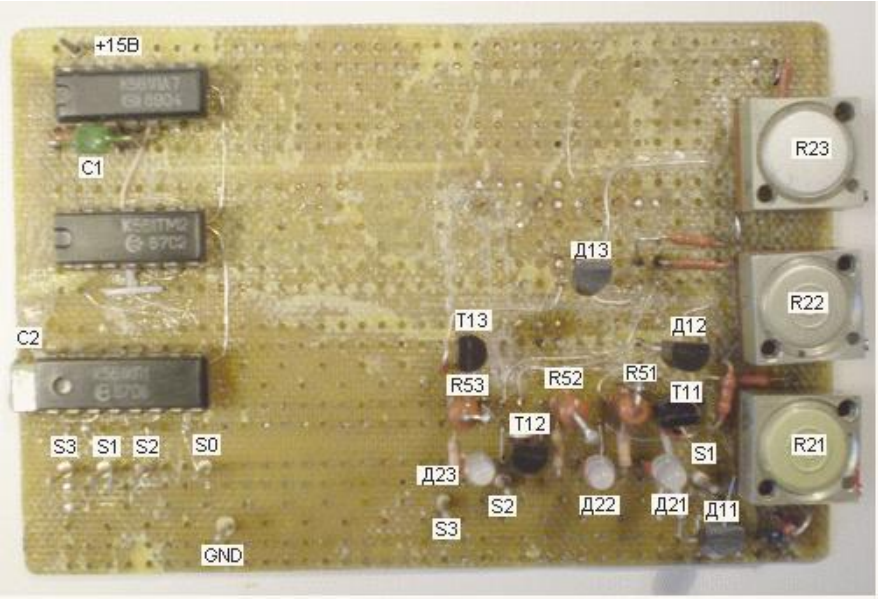


Рис. 16. Макеты балансиров

Если балансировку АКБ с помощью схемы на рис. 14 можно проводить в автономном режиме (без ЗУ), то при пассивном методе ее целесообразно проводить в режиме заряда, при котором элемент с более высоким напряжением заряда шунтируется байпасной резистивной цепочкой до тех пор, пока напряжения на остальных элементах не достигнут заданного значения. Наиболее простой и популярной схемой балансира пассивного типа (далее — байпасный балансир) является ключевая транзисторная схема с управляющим элементом на ИМС TL431, представляющей собой прецизионный стабилитрон с программируемым (регулируемым) напряжением стабилизации в диапазоне 2,5…36 вольт.

Установка напряжения стабилизации в схеме на рис. 17 производится проволочным многооборотным резистором R2n типа СП5-2, где n = 1, 2, 3 — номер секции балансира. Согласно руководству на TL431 (http://pdf.eicom.ru/datasheets/microsemi-ipg_pdf/tl431a/tl431a.pdf) при заданном напряжении стабилизации Us ориентировочные значения сопротивления резисторов делителя R1n-R2n-R3n определяется из выражения Us = 2,5[1 + (R1n + 0,5R2n)/(R3n +

0,5R2n)] + Ir·(R1n + 0,5R2n). Поскольку входной ток управляющего электрода TL431 Ir весьма мал (он равен ~2 мкА), то обычно вторым слагаемым пренебрегают. Когда напряжение на секции, например Us1(относительно S0), достигает заданного значения, Д11 открывается, что приводит к открытию Т11 и шунтированию первого элемента АКБ, подключенного между клеммами S0 и S1, байпасным резистором R51, в результате чего уменьшается зарядный ток этого элемента, что индицируется светодиодом Д21. Если напряжение заряда одного элемента АКБ выбрано 4,2 В, то для надежной индикации окончания его заряда целесообразно выбрать Usn = 4,1 В. При этом методика настройки балансира выглядит следующим образом:

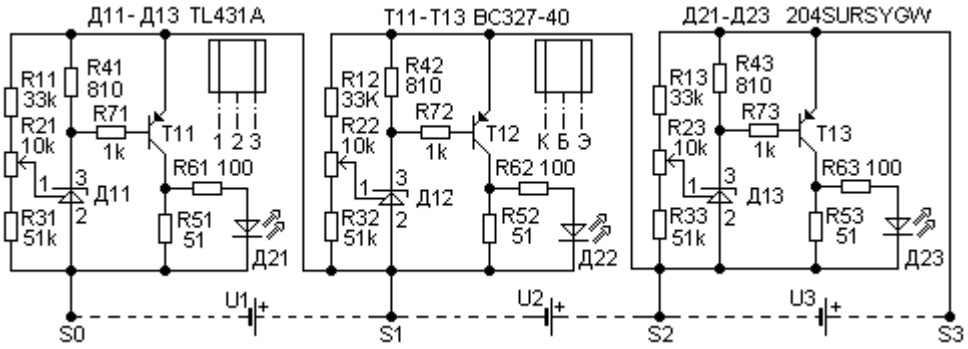


Рис. 17. Байпасный балансир

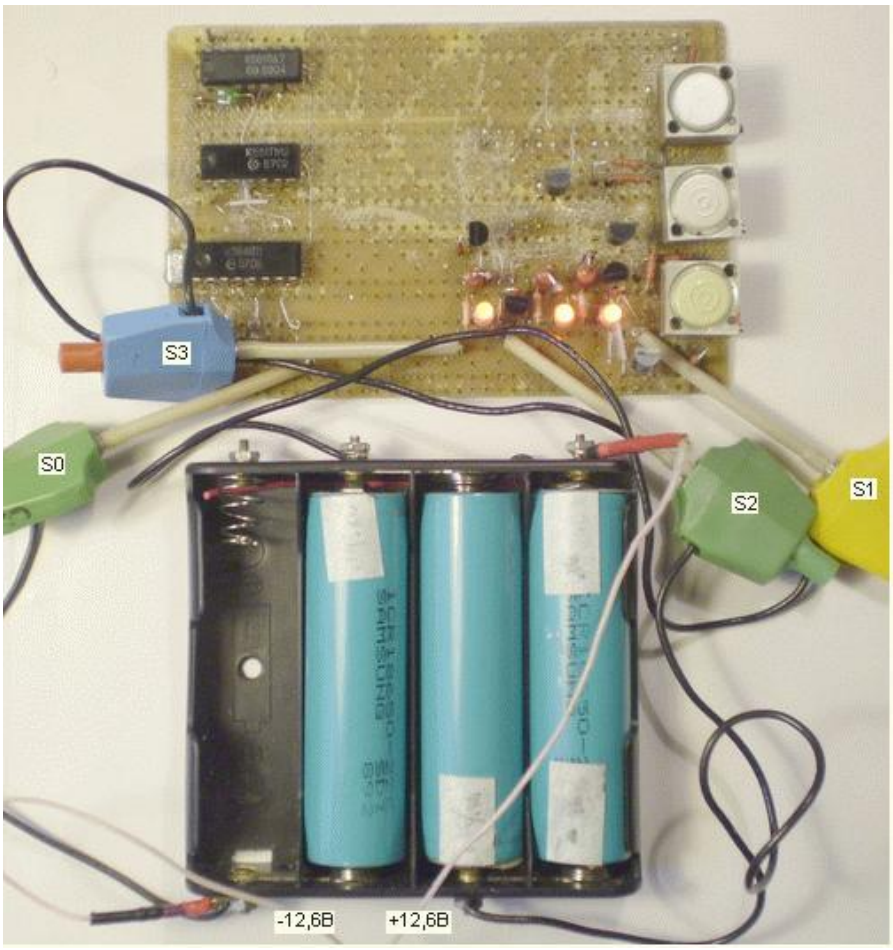


Рис. 18. Макет байпасного балансира в работе

1. Последовательно, начиная с первой секции, к каждой из них подключаем источник напряжением Usn = 4,1 В (использовался блок питания Б5-47).

2. Регулировкой сопротивления резистора R2n добиваемся слабого свечения светодиода Д2n.

3. Подключаем АКБ к зарядному устройству, а входы балансира — к ее соответствующим элементам и по состоянию светодиодных индикаторов наблюдаем за процессом балансировки.

При начальной зарядке в 70-80% 12-вольтовой АКБ емкостью около 1800 мА·ч (см. макет на рис. 18) время балансировки не превышает 1 часа. Признаком конца балансировки является равномерное свечение всех трех светодиодов. При этом ток балансировки составляет около 70 мА. Для увеличения этого тока в случае более мощных АКБ необходимо использовать меньшие значения R5n и более мощные T1n. Используемый в нашем случае транзистор BC327-40 обладает достаточно высокими эксплуатационными характеристиками (усиление тока 250-600, ток коллектора — 0,5 А, рассеиваемая мощность — до 625 мВт при тепловом контакте с латунной площадкой на печатной плате) и практически не греется, поскольку рассеиваемая мощность составляет 0,65·0,07 = 45 мВт. При этом выделяемая на R5n мощность составляет $51\cdot(0{,}07)^2$ = 0,25 Вт (половина от номинальной для R5n), что вызывает его незначительный разогрев.

В процессе отладки установлено, что сопротивления резисторов делителя R1n-R2n-R3n целесообразно пропорционально уменьшить в 2-3 раза, поскольку имеют место наводки от рук наладчика при касании отверткой к настроечному винту резисторов R2n, особенно R21. При этом одновременно уменьшится и влияние слагаемого Ir·(R1n + 0,5R2n), хотя и несколько увеличится энергопотребление делителя R1n-R2n-R3n.

Рассмотрим результаты испытаний сравнительно дешевого (430 руб. в октябре 2014 г.) промышленного ЗУ с балансировкой типа IMAXRC B3 Pro (позиция 1 на рис. 19), предназначенного для зарядки литиево-полимерных (Li-Pol) аккумуляторов 2 с номинальным напряжением 7,4 В (2S — два последовательно соединенные элемента Li-Pol) или 11,1В (3S — три последовательно соединенные элемента) через балансировочный разъем JST-XH 3 или 4 соответственно при токе заряда до 0,8 А. Размеры основного блока: 90×55×35мм; длина сетевого кабеля — около 60 см. Одновременный заряд двух АКБ на 7,4 В и 11,1 В не допускается. Питание ЗУ осуществляется от встроенного импульсного блока питания от сети 100-240 вольт. Процесс заряда индицируется двухцветными светодиодами 6-8: при красном — зарядка, при зеленом — ее окончание (или при отключенной АКБ).



Рис. 19. IMAXRC B3 Pro с Li-Pol аккумулятором

В комплект B3 Pro не входят соединительные кабели, поскольку это ЗУ имеет несколько специализированный характер и предназначено в основном для зарядки Li-Pol аккумуляторов, применяемых в радиоуправляемых моделях самолетов, вертолетов, автомобилей, танков, в спортивном страйкбольном оружии и т. п. Такие АКБ снабжены как зарядно-балансировочным кабелем с разъемом JST-XH, так и силовым с сильноточным разъемом 5 (см. рис. 19) для подключения к электроприводу соответствующего устройства.



Рис. 20. Схема подключения АКБ к разъемам B3 Pro



Рис. 21. Зарядно-балансировочные кабели

Различие между Li-Ion и Li-Pol аккумуляторами заключается в типе используемого электролита: если в первом он является жидким, то во втором — в виде полимерной пленки. Параметры заряда и разряда в них практически одинаковы за исключением минимального напряжения разряда у Li-Pol, равного 3-3,2 В. Это обстоятельство позволяет использовать B3 Pro и для заряда и Li-Ion АКБ. Установлено, что схема подключения АКБ к разъемам этого ЗУ имеет вид на рис. 20.

Расстояние между контактами разъемов JST-XH составляет 2,54 мм, что позволяет использовать для их изготовления отечественные 2-3-рядные разъемы или однорядные разъемы питания 3,5-дюймовых флоппи-дисководов от старых IBM PC. При этом необходимо иметь в виду, что расстояние от контактов до нижней грани разъемов на рис. 20 на 1,5-2 мм больше, чем от верхней, что предотвращает возможность неправильного подключения АКБ. Конструкция изготовленных

зарядно-балансировочных кабелей с «крокодильчиками» для подключения к АКБ показаны на рис. 21 с разъемом 2S (позиция 1) и 3S (позиция 2).

Испытания B3 Pro проводились с использованием Li-Ion элементов АКБ № 1 (как на рис. 18, но с тем отличием, что +АКБ — это «крокодильчик» S2 или S3). Первый опыт заключался в заряде трехэлементной АКБ при одном заряженном до 4,2 В элементе и разряженных до 3,6 В двух других. Во втором опыте использовались два заряженных до 4,2 В элемента и один разряженный до 3,6 В. В обоих случаях разброс напряжений на элементах АКБ в конце заряда составил около ±0,05 В, что близко к заявленному продавцом (rc-today.ru; теперь он продает B3 Pro по 850 руб.). Следует заметить, что для такого класса ЗУ точность балансировки не нормируется. Для более дорогих, например, iCharger 206B 350W 8s Balance/Charger (http://www.gsm-remont.ru/catalog/32734.htm) он нормируется на уровне 10 мВ. Цена такого ЗУ — 5900 руб. Поскольку в данный момент (2015 г.) его нет в наличии, то указанная цена скорее всего 2014 г. Кроме того, для этого ЗУ потребуется дополнительно еще и регулируемый источник напряжения 4,5-32 В.

В заключение приведем фотографии «внутренностей» B3 Pro (рис. 22 и 23) с форума http://forum.rchobby.ru/index.php?showtopic=15585 (авторский экземпляр пока находится под голографической пломбой годовой гарантии).

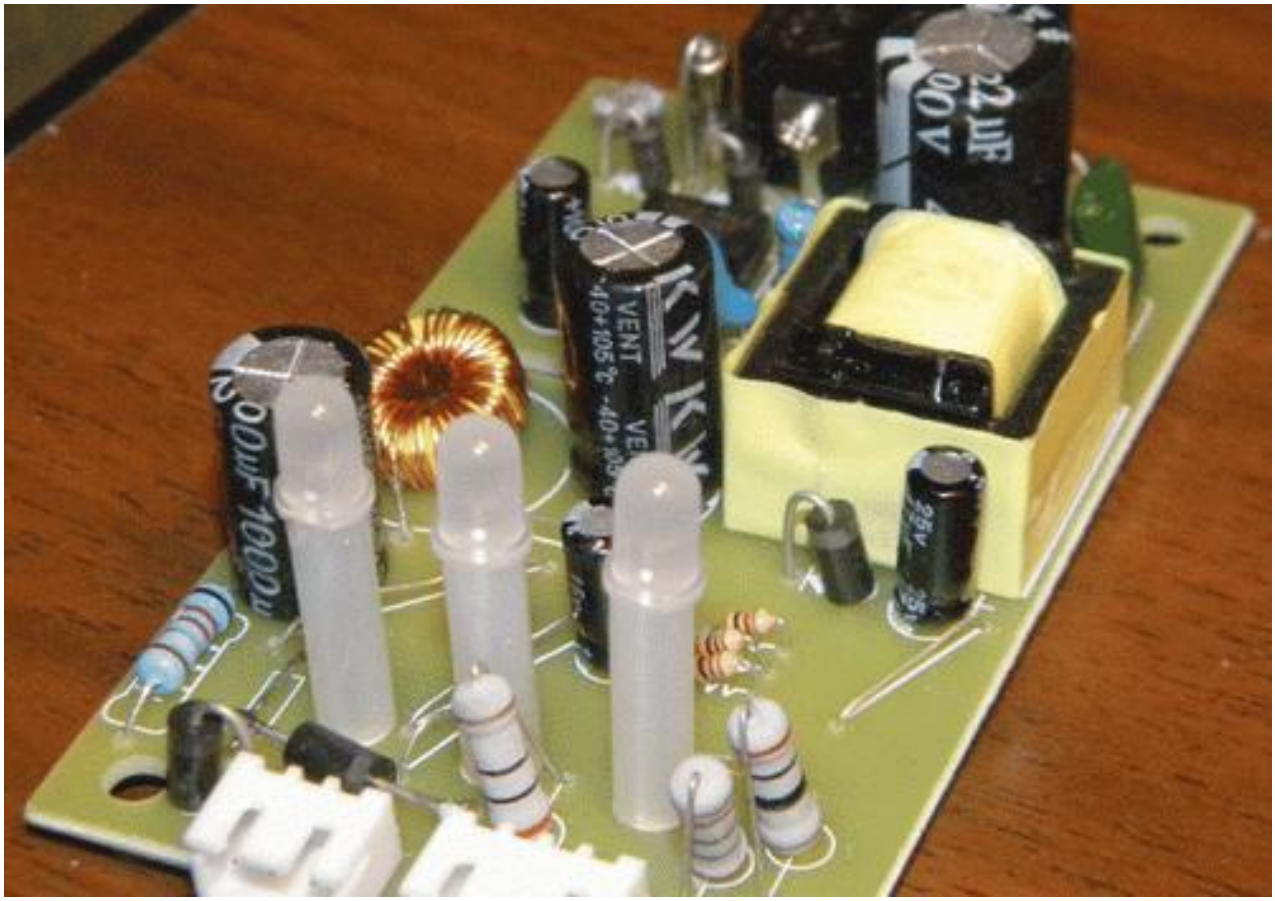


Рис. 22. Общий вид «раздетого» IMAXRC B3 Pro

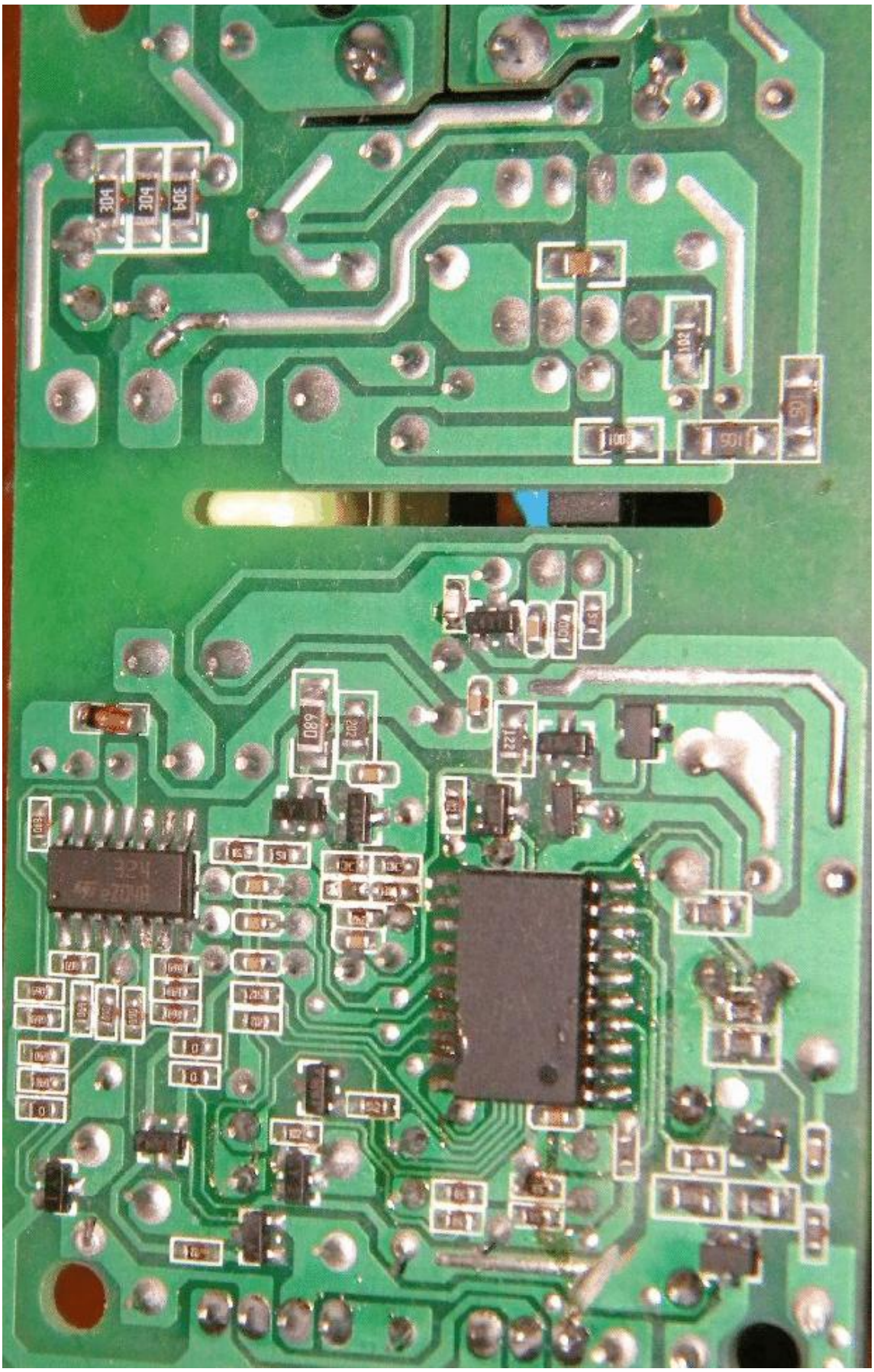


Рис. 23. Печатная плата IMAXRC B3 Pro

Заключение

1. Разработана методика демонтажа ноутбучных АКБ из условия минимальных повреждений их корпусов.

2. Рассмотрены конструкции АКБ и состав их контроллеров.

3. Установлено, что за 5 лет работы АКБ в составе ноутбука при сравнительно низкой интенсивности эксплуатации потери энергоемкости составили около 21%, тогда как для АКБ при 7-8-летнем хранении они составили 3-7%.

4. Разработана конструкция автономных источников питания на базе ноутбучных АКБ с возможностью контроля и балансировки ее Li-Ion элементов.

5. Разработаны и апробированы устройства обслуживания автономных Li-Ion АКБ:

5.1. Зарядное устройство с использованием алгоритма CC-CV (постоянный ток – постоянное напряжение) на базе ИМС LM317 с визуальной и аудио сигнализацией.

5.2. Устройства сигнализации предельного напряжения разряда АКБ.

5.3. Устройства балансировки элементов АКБ с визуальной сигнализацией.

5.4. Установлена схема подключения двух- и трехэлементных АКБ к промышленному зарядному устройству IMAXRC B3 Pro эконом класса и разработана конструкция зарядно-балансировочных кабелей.

5.5. Проведены испытания B3 Pro. Установлено, что точность балансировки элементов Li-Ion АКБ составляет ±0,05 В.

Список литературы

1. Хрусталев Д.А. Аккумуляторы. — М.: Изумруд, 2003, 224 с.
2. Андрей Никитин (г. Минск). Все для литиевых аккумуляторов: микросхемы STM для зарядных устройств и мониторинга батарей // «Новости электроники», 2013, №2. Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.compeljournal.ru/enews/2013/2/4 (дата обращения 01.12.2014).
3. Выравнивание заряда батарей обеспечивает долгое время работы и продлевает срок службы // Сихуа Уэн (Sihua Wen), инженер по применению аккумуляторных батарей, Texas Instruments. Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=59991 (дата обращения 01.12.2014).
4. Д. Онышко, А. Журченко. Выравнивающие устройства для аккумуляторных батарей. Электронный ресурс. Режим доступа: http://qrx.narod.ru/bp/bat_v.htm (дата обращения 01.12.2014).
5. Шило В.Л. Популярные цифровые микросхемы: Справочник. 2-е изд. испр.— Челябинск: Металлургия, 1989, 352 с.
6. Карлащук В. И. Анализ и моделирование параллельного включения химических источников тока. — Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования», 2014, №3, с. 16-21