



Международный журнал информационных технологий и
энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 612.312; 681.3; 621.39.

АККУМУЛЯТОРНЫЕ СБОРКИ ДЛЯ ОДНОПЛАТНЫХ КОМПЬЮТЕРОВ

Зубарев М.А.

*ФГАОУ ВО "САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ", Санкт-Петербург, Россия (190000, город
Санкт-Петербург, Большая Морская ул., д.67 лит. а), e-mail: mishaniya1121@yandex.ru*

В статье рассматривается вопрос обеспечения энергетической безопасности для маломощных систем управления, основанных на одноплатных агт компьютерах. Актуальность данной темы обоснована ростом производительности вычислительных модулей такого формата, возможностью использовать всю распространённую периферию, а также наличие встроенного удобного инструмента для соединения с внешними устройствами – порта 40 pin GPIO. Современные одноплатные компьютеры могут легко выполнять роль управления системой электрических защит, выработки энергии, контролировать подключение резервных источников питания и собирать данные с беспроводных датчиков влажности, температуры и т.д. Для такого широкого спектра задач недопустимы сбои работы управляющих программ, потому подобные решения должны быть подключены к аккумуляторным блокам значительной ёмкости. В результате работы автором рассмотрен вопрос определения требуемого стандарта ячеек, ёмкости, коэффициент запаса, а также прогнозирование поведения полученного решения через 10 лет эксплуатации.

Ключевые слова: Аккумуляторный блок, КПД, Li-ion, BMS (Battery Management System), старение аккумуляторов.

BATTERY ASSEMBLIES FOR SINGLE-BOARD COMPUTERS

Zubarev M.A.

*ST. PETERSBURG STATE UNIVERSITY OF AEROSPACE INSTRUMENTATION, St. Petersburg,
Russia (190000, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67 lit. a), e-mail: mishaniya1121@yandex.ru*

This paper addresses the issue of ensuring energy security for low-power control systems based on single-board ARM computers. The relevance of this topic is substantiated by the increasing performance of computing modules of this format, the ability to utilize widely available peripherals, and the presence of a built-in convenient tool for connecting to external devices—the 40-pin GPIO port. Modern single-board computers can easily serve as the control system for electrical protection, energy generation, monitor the connection of backup power sources, and collect data from wireless sensors for humidity, temperature, etc. For such a wide range of tasks, failures in control programs are unacceptable; therefore, such solutions must be connected to battery packs of significant capacity. As a result of this work, the author examines the required cell standard, capacity, safety factor, and forecasts the behavior of the solution over 10 years of operation.

Keywords: Battery pack, efficiency, Li-ion, BMS (Battery Management System), battery aging.

Введение

В современных реалиях на одноплатных компьютерах реализуются различные схемы управления, где в качестве управляемых устройств могут быть как роботы, так и крупные промышленные установки или даже небольшие электростанции с управляемым вводом резерва. Для подобных систем необходимо надёжное и бесперебойное управление, рассчитанное на сценарий возможного отключения основного электропитания. В

современных реалиях всё чаще предлагаются различные аккумуляторные сборки для обеспечения бесперебойной работы управляющих плат. Рассмотрим несколько вариантов, которые позволят организовать бесперебойную работу системы.

1. Типы аккумуляторных батарей для портативной электроники.

Рассмотрим вопрос выбора аккумуляторных батарей, которые распространены и их можно применить для компактных переносных либо устанавливаемых устройств управления [1],[2].

Таблица 1 - Типы аккумуляторных батарей

Тип аккумулятора	Плотность энергии (Вт*ч/кг)	Плотность энергии (Вт*ч/л)	Пример типовых форматов
Li-ion	200-250	500-700	18650, 14500, 18350
LiPo	150-250	400-650	Плоские или цилиндрические
LiFePO4	90-120	220-300	18650 (реже AA/AAA)
NiMH	60-100	140-300	AA, AAAA

На основе Таблицы 1 видно, что оптимальным вариантом по плотности энергии как на литр, так и на кг, будет вариант Li-Ion батарей. Далее сравним варианты наиболее распространённых аккумуляторов типа Li-Ion.

Таблица 2 - Типы аккумуляторных батарей.

Характеристика	18650	14500	18350
Габариты (диаметр x длина, мм)	18 x 65	14 x 50	18 x 35
Ёмкость (мА*ч)	2200-3600 (до 4000)	600-900	700-1400
Напряжение (В)	3.7	3.7	3.7
Максимальный ток разряда (А)	10-30	5-10	10-20
Вес (г)	45-50	20	30-35
Средняя цена за ячейку (\$)	4-8	2-5	3-6

По Таблице 2 видно, что наиболее ёмкие и соответствующие требованиям по току будут батареи 18650, где одна ячейка обеспечивает значительный запас времени для работы в режиме малой нагрузки большинства простых плат с потреблением 1-2 Вт. В нашей работе рассматриваются варианты с относительно большим энергопотреблением, потому будут использоваться конфигурации из нескольких ячеек и рассмотрена методика их соединения.

2. Конфигурация подключения аккумуляторных ячеек

Для определения конфигурации ячеек аккумуляторных батарей для начала необходимо задаться показателями энергопотребления системы. В качестве вычислительного устройства будет использоваться плата Raspberry Pi 5 в конфигурации на 8 Гб оперативной памяти. Сценарий эксплуатации, влияющий на энергопотребление, следующей:

- Полная нагрузка на процессор;
- Активированы беспроводные интерфейсы Wi-Fi и Bluetooth;
- HDMI не используется (используется дистанционное управление);
- Периферийные устройства не подключены;
- Подключён Ethernet кабель.

В таком режиме полная загрузка процессора даёт порядка 5 Вт, Ethernet даёт 0.5-1 Вт, Wi-fi+Bluetooth дают порядка 0.5 Вт, и ещё 1 Вт на прочие нужды платы. В таком режиме суммарное энергопотребление составляет:

$$P_{\text{сумм}} = 5 + 1 + 0.5 + 1 = 7.5 \text{ Вт}$$

С учётом требований по резервированию мощностей, принимаем двухкратный запас по энергопотреблению, и получаем требуемые на отдачу со стороны аккумуляторной батареи 15 Вт мощности. Это значение, а также 7.5 Вт примем для расчётов.

Теперь задаёмся требованием по времени автономной работы. Ввиду того, что планируется использовать систему управления для эксплуатации на электростанциях, то время работы в автономном режиме должно быть не менее 6 часов, на время проведения ремонтных работ. Дополнительно стоит ввести коэффициент запаса, равный 1.5.

1) Энергия, необходимая для работы:

$$E_{\text{необх}} = P * t * K$$

где $E_{\text{необх}}$ – необходимая энергия (Вт*ч),

P - потребляемая мощность (Вт),

t – время автономной работы (ч),

K – коэффициент запаса.

2) Требуемая ёмкость аккумуляторного блока:

$$C_{\text{блока}} = E_{\text{необх}} / U_{\text{номин}}$$

где $C_{\text{блока}}$ – ёмкость аккумуляторного блока (А*ч),

$U_{\text{номин}}$ – номинальное напряжение аккумуляторов.

3) Количество аккумуляторов:

$$N = C_{\text{блока}} / C_{\text{акк}}$$

где $C_{\text{акк}}$ – ёмкость одной аккумуляторной батареи (А*ч);

Используя текущие значения получаем следующее:

$$E_{\text{необх1}} = 7.5 * 6 * 1.5 = 67.5 \text{ Вт}$$

$$E_{\text{необх2}} = 15 * 6 * 1.5 = 135 \text{ Вт}$$

$$C_{\text{блока1}} = 67.5 / 7.4 = 9.12 \text{ А / ч}$$

$$C_{\text{блока2}} = 135 / 7.4 = 18.24 \text{ А / ч}$$

$$N_{\text{парр1}} = 9.12 / 3.4 \approx 2.76 - > 3 \text{ шт}$$

$$N_{\text{парр2}} = 18.24 / 3.4 \approx 5.36 - > 6 \text{ шт}$$

Таким образом мы получили примерные значения количества аккумуляторных батарей для одной параллельной линии подключений. С учётом использования двух параллелей, соединённых двух с другом последовательно, следует умножить полученные значения на 2 [3],[4].

Чтобы вычислить точное итоговое время работы в каждом из режимов проверяем скорость разряда через значение разрядного тока $I_{разр}$.

$$I_{разр} = P / U$$

$$I_{разр1} = P1 / U = 7.5 / 7.4 = 1.01 A$$

$$I_{разр2} = P2 / U = 15 / 7.4 = 2.03 A$$

где $P1$ и $P2$ потребляемая мощность в первом и втором режиме соответственно; U напряжения аккумуляторного блока, где две батареи соединены последовательно.

Время можно определить по следующей формуле:

$$t = C_{блока} / I_{разр} = (N_{нагр} * C_{бат}) / I_{разр}$$

$$t1 = (3.4 * 3) / 1.01 = 10.1 \text{ ч или } 10 \text{ часов } 6 \text{ минут}$$

$$t2 = (3.4 * 6) / 2.03 = 10.05 \text{ ч или } 10 \text{ часов } 3 \text{ минуты}$$

Эти результаты учитывают коэффициент запаса, взятый на начальном этапе, обеспечивающий компенсацию деградации аккумуляторных батарей со временем, а также прочие потери, среди которых потери на этапе понижения напряжения.

3. Определение потерь на понижение напряжения.

Для понижения напряжения с 7-7.4 В до требуемых 5 В постоянного тока, необходимых для питания одноплатного компьютера, требуется импульсный понижающий DC-DC преобразователь [5]. Коэффициент полезного действия (КПД) подобных устройств находится в диапазоне от 85% до 95%.

В качестве импульсного DC-DC преобразователя выбираем вариант на базе XL4015, который обладает следующим рабочими характеристиками:

Таблица 3 - Характеристики XL4015.

Характеристика	Значение
Выходное напряжение, $U_{вых}$ В.	1.25-36
Максимальный выходной ток, I_{max} А.	5
Входное напряжение, $U_{вх}$ В.	4.5-38
КПД, η %	80-95

Ранее был рассмотрен вопрос КПД инверторов [6], где при нагрузке преобразователя в диапазоне от 25% до 75%, его КПД находится на значении близком к максимально возможному для данной схемы. В случае, где потребление составляет 15Вт, нагрузка на инвертор будет:

$$R = P_{нагр} / P_{max} = P_{нагр} / (I_{max} * U)$$

где R – степень загруженности инвертора,

U – напряжение нагрузки (5 В).

$$R1 = 7.5 / (5 * 5) = 0.3$$

$$R2 = 15 / (5 * 5) = 0.6$$

Следовательно, КПД импульсного DC-DC преобразователя можно принимать на уровне 95% и использовать в дальнейшем расчёте.

Потери на преобразование энергии рассчитаем так:

$$P_{nom} = P_{назп1} * (1 - n)$$

где $n = 95\% = 0.95$

$$P_{nom1} = 7.5 * 0.05 = 0.375 \text{ Вт}$$

$$P_{nom2} = 15 * 0.05 = 0.75 \text{ Вт}$$

4 Использование балансировочной схемы для аккумуляторов.

Использование балансировочных плат BMS (Battery Management System) позволяет защитить блок аккумуляторов от переразряда (OVP), перезаряда (UVP), защищает от короткого замыкания, от перегрева, а также позволяет уравнивать скорость разряда различных аккумуляторных ячеек в схеме [7].

В качестве основы для балансировочной платы выбираем микросхему DW01, которая при своей дешевизне обладает всем необходимым комплексом защит.

Готовые решения на базе DW01 обладают рядом потерь, но общие суммарные значения потерь на данном узле укладывается в 1%.

Потери при разряде [8].

$$P = I^2 * R_{DS(on)}$$

где P – мощность потерь (Вт),

I ток нагрузки (А) на входе DC-DC преобразователя,

$R_{DS(on)}$ – сопротивление открытого состояния транзистора типа MOSFET, которое примем 20 мОм, что является усреднённым для большинства схем использующих DW01 для 2S.

$$P_{ном.Б1} = ((P1 + P_{ном1}) / U) * R_{DS(on)} = 1.065^2 * 0.02 = 0.0227 \text{ Вт}$$

$$P_{ном.Б2} = ((P1 + P_{ном2}) / U) * R_{DS(on)} = 2.13^2 * 0.02 = 0.0907 \text{ Вт}$$

Преимуществом использования балансировочных схем вместе с одноплатными мини-ПК то, что большинство последних имеют разъём 40 pin GPIO, к которому при помощи промежуточного ЦАП (цифро-аналогового преобразователя) можно подключить компьютер, и в режиме реального времени совершать мониторинг ячеек. В данном случае можно воспользоваться MCP3008. Конечно, это не обязательно, так как плата BMS имеет исходный отлаженный алгоритм.

Оптимальным вариантом для написания программы для работы с шиной GPIO будет язык программирования типа Python или Java, так как они довольно просты, но обладают готовыми библиотеками для работы с GPIO, такими как RPI.GPIO, gpiozero или Pi4J.

1. Влияние старения аккумуляторных батарей на ёмкость.

Ранее в другой статье обсуждалась методика определения остаточной ёмкости аккумуляторов через время, так что будем обращаться к материалам оттуда.

В нашем случае будет работать 2 основных фактора [9]:

- 1) Выработка аккумуляторами своего ресурса, который можно исчислять в циклах заряда
- 2) Старение электролита, которое идёт в % и чаще всего равно 2%/год.

1. Определим выработку ресурса аккумуляторами. Предположим, что переключение системы управление на аккумуляторные батареи будет исключительным случаем, так как этот

сценарий подразумевает прекращение подачи энергии от управляемой электростанции. Такой сценарий возможен только в случае критической поломки или планового обслуживания. Таким образом возьмём что в год таких эпизодов будет не более 15 штук. Глубину разряда примем равной 50%. Добавим 5 циклов разряда в год до 30%. Посчитаем влияние износа:

$$C_{add30\%} = N_{год30\%} * L = 5 * 10 = 50 \text{ циклов}$$

$$C_{add50\%} = N_{год50\%} * L = 15 * 10 = 150 \text{ циклов}$$

Где $N_{год30\%}$ и $N_{год50\%}$ – это количество разрядов до 30 или до 50% в год соответственно,
 L – число лет, которое примем равным 10.

Так как неполный цикл разряда ведёт к меньшему износу, то следует взять средний показатель для аккумуляторов Li-Ion 18650, и исходя из него посчитать влияние количественного износа. Для большинства аккумуляторов приняты следующие значения:

- 1) Полный разряд (100%) - 300-500 полных циклов (принимаем 400 циклов);
- 2) Половинный разряд (50%) - 500-800 циклов (принимаем 650 циклов);
- 3) Малый разрядный цикл (30%) – 800-1200 циклов (принимаем 1000 циклов).

Отсюда вычисляем влияние износа:

$$D_{cycles} = 1 - D_{cycles30\%} - D_{cycles50\%} - D_{cycles100\%}$$

$$D_{cycles} = 1 - 50/1000 - 150/650 - 0/400 = 1 - 0.05 - 0.23 - 0 = 0.72$$

где D_{cycles} – потеря ресурса батареи из-за расхода заложенных циклов разряда.

$D_{cycles30\%}$, $D_{cycles50\%}$, $D_{cycles100\%}$ - значение доли выборки ресурса от заложенного максимума для каждого типа разряда.

Надо уточнить важный момент, что после уловной выборки 400 из 400 циклов для аккумуляторной батареи при полном разряде (100 %), её ёмкость снизится до 70% от номинальной.

Таким образом чтобы понять уровень износа аккумулятора, нужно $D_{cycles} * 0.3$ (30 %), которые могут потеряться при полном использовании ресурса батареи.

$$D_{cycles.эжв} = 0.72 * 0.3 = 0.216 = 21.6\%$$

2. Влияние старения и усыхания электролита.

Данная величина принята за 2% в год, как рекомендует большинство методических пособий. Таким образом за 10 лет:

$$D_{electrolit} = 2 * 10 = 20\%$$

где $D_{electrolit}$ – это величина деградации в % за 10 лет.

Тогда общая деградация батареи за 10 лет составит:

$$D_{общ} = 1 - (1 - D_{cycles.эжв}) * (1 - D_{electrolit}) = 1 - 0.784 * 0.8 = 1 - 0.6272 = 0.3728 = 37.28\%$$

Находим остаточную ёмкость аккумулятора после 10 лет эксплуатации:

$$C_{блока1} = 10.2 - 10.2 * 0.3728 = 10.2 - 3.8 = 6.4 \text{ А / ч}$$

$$C_{блока2} = 20.4 - 20.4 * 0.3728 = 20.4 - 7.6 = 12.8 \text{ А / ч}$$

Находим остаточное время работы после деградации и с учётом всех потерь:

$$t1 = 6.4 / ((7.5 + 0.375 + 0.0227) / 7.4) = 6.4 / 1.067 = 5.99 \text{ ч или 5 часов 59 минут 24}$$

секунды

$$t_2 = 12.8 / ((15 + 0.75 + 0.0907) / 7.4) = 12.8 / 2.14 = 5.98 \text{ ч или } 5 \text{ часов } 58 \text{ минут } 48 \text{ секунд}$$

Фактор внешнего нагрева в работе не рассматривается, так как предполагается что аккумуляторный блок установлен в помещении, где температура в любое время года поддерживается на уровне комнатных значений 23 С [10].

Вывод

В работе рассмотрен вопрос обеспечения одноплатных компьютеров питанием от блоков аккумуляторных батарей типа Li-Ion 18650. Результаты расчёты показали, что при сбалансированном использовании в качестве резервного источника питания значительно снижает его деградацию. Для сбалансированного сценария достаточно закладывать коэффициент запаса 1.5. Таким образом даже через 10 лет аккумуляторный блок из 12 ячеек способен работать 5 часов 58 минут 48 секунд под полной нагрузкой компьютера с учётом большинства учтённых потерь.

Потери на нагрев нет смысла учитывать в контексте работы, так как нагрев от тока разряда в 2.14 А будет достаточно равномерно распределяться по всем аккумуляторным ячейкам без заметного влияние на рабочие характеристики, тем более с учётом веса блока батарей в 540 грамм (вес 12 аккумуляторов).

Вариант для потребления в 7.5 Вт в реальных условиях использоваться не будет, так как это в большей степени второй режим работы одноплатного ПК, нежели полноценный сценарий эксплуатации. За счёт периодического снижения энергопотребления общее время автономной работы ещё увеличится.

Потери на переключения и проводники будут незначительны, и при необходимости их можно дополнительно будет учесть на уровне 1.5-3%.

Список литературы

1. Аккумуляторные батареи носимых электронных устройств. Ситников А.В., Масленникова С.И. Журнал «Радиостроение», 2017, №05, С. 52-72.
2. Литий-ионные аккумуляторы. Садовников А.В., Макачук В.В. Журнал «Молодой ученый», 2016, №23 (127), С. 84-89.
3. Последовательное, параллельное и смешанное соединение аккумуляторов. ElectricalSchool.info URL: <https://electricalschool.info/spravochnik/electroteh/2387-posledovatelnoe-parallelnoe-i-smeshannoe-soedinenie-akkumulyatorov.html>(Дата обращения 04.01.2025)
4. Параллельное, последовательное, параллельно-последовательное подключение аккумуляторов: принципы работы и основные отличия. DFI.ua URL: <https://dfi.ua/statie/parallelnoe---posledovatelnoe--parallelno-posledovatelnoe-podkljuchenie-akkumuljatorov-principi-raboti-i-osnovnie-otlichija.html>(Дата обращения 05.01.2025)
5. Разработка понижающего преобразователя без секретов. Шелл Доналд., Касторена Жорж. Силовая электроника, 2007, №4. С.106-109.
6. Зубарев М.А. Моделирование работы и анализ потерь коэффициента полезного действия гибридного инвертора для энергетического комплекса на основе микро-ГЭС. Промышленность и сельское хозяйство. Выпуск № 12, 2024. С. 12-21.
7. Intelligent Battery Management System. Alexander Popp; Heiko Fechtner; Benedikt Schmuelling; Simeon Kremzow-Tennie; Tobias Scholz; Friedbert Pautzke. 2021 IEEE 4th

- International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA) URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9639285> (Дата обращения 05.01.2025)
8. Battery Management System in Electric Vehicle. Ananthraj C R; Arnab Ghosh. 2021 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE) URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9487762> (Дата обращения 03.01.2025)
 9. Как старение и история использования влияют на ёмкость аккумулятора. Redway Power, 2024. URL: <https://www.redwaypower.com/ru/как-старение-и-история-использования-вливают-на-емкость-аккумулятора/> (Дата обращения 04.01.2025)
 10. Потапов, М. А. Влияние окружающей температуры на ёмкость литий-ионного аккумулятора / М. А. Потапов, Я. К. Тучкова, Л. Н. Терскова. Юный ученый. г. 2019. № 6 (26). С. 54-56.

References

1. Rechargeable batteries of wearable electronic devices. Sitnikov A.V., Maslennikova S.I. Radiostroenie Magazine, 2017, No. 05, pp. 52-72.
 2. Lithium-ion batteries. Sadovnikov A.V., Makarchuk V.V. Young Scientist Magazine", 2016, №23 (127), pp. 84-89.
 3. Serial, parallel and mixed battery connection. Electri-calSchool.info URL: <https://electricalschool.info/spravochnik/electroteh/2387-posledovatelnoe-parallelnoe-i-smeshannoe-soedinenie-akkumulyatorov.html>(Date of request 04.01.2025)
 4. Parallel, serial, parallel-serial connection of accumulators: principles of operation and main differences. DFI.ua URL: <https://dfi.ua/statie/parallelnoe---posledovatelnoe--parallelnoposledovatelnoe-podkljuchenie-akkumuljatorov-principi-raboti-i-osnovnie-otlichija.html>(Accessed 05.01.2025)
 5. Development of a step-down converter without secrets. Shell Donald, George Castorena. Power Electronics, 2007, No. 4. pp.106-109.
 6. Zubarev M.A. Modeling of operation and analysis of efficiency losses of a hybrid inverter for an energy complex based on micro-hydroelectric power plants. Industry and agriculture. Issue No. 12, 2024. pp. 12-21.
 7. Intelligent Battery Management System. Alexander Popp; Heiko Fechtner; Benedikt Schmuelling; Simeon Kremzow-Tennie; Tobias Scholz; Friedbert Pautzke. 2021 IEEE 4th International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA) URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9639285> (Accessed 05.01.2025)
 8. Battery Management System in Electric Vehicle. Ananthraj C R; Arnab Ghosh. 2021 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE) URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9487762> (Accessed 03.01.2025)
 9. How aging and usage history affect battery capacity. Redway Power, 2024. URL: <https://www.redwaypower.com/ru/как-старение-и-история-использования-вливают-на-емкость-аккумулятора/> (Accessed 04.01.2025)
 10. Potapov, M. A. The influence of ambient temperature on the capacity of a lithium-ion accumulator / М. А. Potapov, Ya. K. Tuchkova, L. N. Terskova. Young Scientist. 2019. № 6 (26). pp. 54-56.
-