

Технико-экономическое обоснование применения литий-ионных аккумуляторных батарей в системах электропитания телекоммуникационного оборудования

ООО НТЦ «Энергетика», г. Новосибирск

1. Введение

В системах электропитания телекоммуникационного оборудования используются аккумуляторные батареи, как правило, рассчитанные на напряжение 48 В постоянного тока, и время резервирования не менее 2 часов. Емкость батарей, входящих в состав электропитающих установок (ЭПУ) базовых станций сотовой связи, как правило, составляет 100 – 200 Ач. Емкость батарей, используемых для резервирования питания оборудования крупных серверов, может составлять до 1000 Ач и более.

Основным трендом на рынке телекоммуникационного оборудования является массовый отказ мировых производителей от свинцово-кислотных аккумуляторных батарей (СКБ) в пользу литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ). Так, например, китайская компания China Tower в 2018 г. прекратила поставку СКБ в системы электропитания телекома. В том же году около 120 000 базовых станций в 31 провинции и городе стали использовать 1,5 ГВт·ч ЛИАБ вместо СКБ. Всего было заменено около 45 тыс. тонн свинцово-кислотных батарей. В 2019 г. Этот процесс продолжился. Было установлено 5 ГВт·ч ЛИАБ вместо 150 000 тыс. тонн свинцово-кислотных батарей¹.

В России данный процесс пока не приобрел массового характера. Очевидно, это связано со следующими причинами:

- Более высокая стоимость ЛИАБ по сравнению с СКБ;
- Недостаточная информированность инженерного сообщества о дополнительных преимуществах использования ЛИАБ.

Ниже представлен технико-экономическое сравнение различных типов аккумуляторных батарей.

2. Свинцово-кислотные аккумуляторные батареи.

2.1 Типы свинцово-кислотных аккумуляторных батарей

До настоящего времени в ЭПУ в основном используются герметизированные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи, изготовленные по технологии VRLA (Valve Regulated Lead Acid). Они бывают двух типов: с сепаратором в виде стекловолоконного мата (AGM – Absorbed Glass Mat) и с загущенным электролитом (GEL). Основное отличие данных аккумуляторов от обслуживаемых свинцово-кислотных аккумуляторов заключается в том, что кислород здесь может содержаться в газообразной фазе, при этом значительно увеличивается

¹ DPS in DATA center power supply systems. Презентация компании EVADA.

вероятность его рекомбинации на отрицательном электроде. Тем не менее, часть кислорода (и, соответственно, водорода) покидает объем аккумулятора через предохранительные клапаны. В связи с тем, что в данных аккумуляторах не предусмотрена возможность доливки воды, с течением времени количество электролита падает, что ограничивает срок службы герметизированного свинцово-кислотного аккумулятора. Реальные сроки эксплуатации герметизированных аккумуляторов типа Gel в режиме поддерживающего заряда (режим эксплуатации батареи в составе ЭПУ) составляют порядка 10 лет, AGM – не более 5 лет.



Рисунок 1

А – аккумулятор серии OPzV (Gel)

Б – аккумулятор серии VE (AGM)

2.2 Достоинства

- Развитость технологии, простота производства.

Свинцово-кислотные аккумуляторы широко используются начиная с конца XIX-века и на сегодня являются наиболее распространенной технологией. Существуют большое количество типов свинцово-кислотных аккумуляторов, оптимизированных для конкретных применений.

- Простота эксплуатации.

Накоплен огромный опыт использования свинцово-кислотных аккумуляторов. Сопутствующее оборудование (зарядно-выпрямительные устройства, системы распределения постоянного напряжения) оптимизированы для работы именно с ними. Производственный персонал энергообъектов привык работать именно со свинцово-кислотными аккумуляторами. Герметизированные батареи лишены главных недостатков, присущих классическим свинцово-кислотным аккумуляторам – необходимости их обслуживания (доливки электролита и т.п.) и вероятности выделения водорода в процессе их эксплуатации (в режиме быстрого и выравнивающего заряда).

- Низкая стоимость. Батареи типа AGM являются самыми дешевыми на рынке.
- Отсутствие «эффекта памяти».
- Допустимы высокие токи разряда.

2.3 Недостатки.

- Ограниченные сроки службы.

Этот недостаток герметизированных аккумуляторов есть продолжение их достоинства. Невозможность доливки электролита приводит к ограничению их срока службы, особенно это критично у батарей типа AGM, в которых электролит содержится в сепараторе.

- Снижение емкости при переходе в режим малых времен разряда (больших разрядных токов).

Эффективность их использования существенно снижается в 2 – 3 раза при переходе к временам разряда 10 – 30 минут. В этом случае начинают сказываться ограничения, вызванные конечностью скорости протекания химической реакции на границе электрод-электролит.

- Жесткие требования к температуре эксплуатации.

Свинцово-кислотные аккумуляторы крайне чувствительны к температуре эксплуатации. Оптимальной температурой их эксплуатации является $+20 \pm 2$ °C. При увеличении температуры ресурс аккумуляторов резко падает вследствие ускорения реакции коррозии пластин аккумулятора (в два раза на каждые 10 °C). При снижении температуры ресурс аккумулятора не падает, но значительно уменьшается отдаваемый заряд (емкость). Поэтому эксплуатация свинцово-кислотных аккумуляторов требует поддержания оптимального температурного диапазона с высокой точностью.

- Низкая плотность запасаемой энергии.

Свинцово-кислотные аккумуляторы имеют большие габариты и вес. При проектировании систем, рассчитанных на высокую энергоемкость (сотни кВтч), начинают сказываться ограничения, связанные с тем, что свинцово-кислотные аккумуляторы имеют большой вес и занимают большую площадь.

- Вероятность термического разгона.

При заряде аккумуляторов AGM существует вероятность терморазгона – самоподдерживающегося неконтролируемого процесса теплового разогрева аккумуляторов, который приводит к выходу аккумулятора из строя.

2.4 Стоимость.

Средняя стоимость 1 Втч запасаемой энергии для гелевых аккумуляторов составляет примерно 0,47 USD, для аккумуляторов AGM – примерно 0,13 – 0,16 USD.

3. Литий-ионные аккумуляторы

3.1 Типы литий-ионных аккумуляторов

В настоящее время наибольшее распространение получили четыре типа литий-ионных аккумуляторов. Они различаются в основном тем, какой материал используется для положительного электрода – литий-кобальтат, литий-железо-фосфат или никель-марганец-кобальтат. В качестве материала отрицательного электрода чаще всего используется наноструктурированный углерод, в литий-титанатных аккумуляторах в качестве материала отрицательного электрода используют литий-титанат.

Поскольку ионы лития имеют наивысший электрохимический потенциал относительно иона водорода (-3, 045 В), а ионы лития имеют наименьшие размеры, то литий-ионные аккумуляторы являются наиболее перспективной технологией с точки зрения получения наивысшего значения плотности запасаемой энергии.

Среди всех литий-ионных аккумуляторов наиболее безопасными являются литий-железо-фосфатные аккумуляторы. Они не горючи и не взрываются даже при длительном внешнем или внутреннем коротком замыкании. Кроме того, они являются наиболее дешевыми из всех доступных сегодня литий-ионных аккумуляторов. Вследствие этого они получили наибольшее распространение.



Рисунок 2 – Литий-железо-фосфатный аккумуляторы модели NAZ-LFP

3.2 Достоинства

- Хорошие разрядные характеристики на малых временах.

На временах 10 – 30 минут эффективная емкость литий-ионных аккумуляторов снижается незначительно и становится в 2 – 3 раза выше эффективной емкости свинцово-кислотных аккумуляторов того же номинала.

- Высокое значение номинального напряжения.

Номинальное напряжения литий-железо-фосфатных аккумуляторов равно 3,2 В, аккумуляторов NMC – 3,7 В. Это приводит к уменьшению количества используемых в батарее аккумуляторов.

- Узкий диапазон изменения напряжения в процессе эксплуатации.

Напряжение заряда литий-железо-фосфатных аккумуляторов равно 3,45 – 3,5 В, среднее напряжение аккумуляторов в батарее, при котором разряд необходимо остановить, равно примерно 3,0 В. Таким образом, изменение диапазона напряжения в процессе работы составляет 12 – 16 % относительно номинального. Это заметно меньше по сравнению со свинцово-кислотными аккумуляторами.

- Высокая плотность запасаемой энергии.

Плотность запасаемой энергии в литий-ионных аккумуляторах по сравнению со свинцово-кислотными аккумуляторами выше в 3 – 10 раз. Соответственно литий-ионные аккумуляторы имеют значительно меньшие габариты и вес.

- Нечувствительность к изменениям температур.

Литий-ионные аккумуляторы можно эксплуатировать при температурах до +40 °С без снижения их ресурса. Соответственно в диапазоне меньших температур их емкость снижается значительно меньше по сравнению со свинцово-кислотными аккумуляторами.

- Большое количество циклов заряда/разряда.

Некоторые типы литий-ионных аккумуляторов (литий-титанатные) допускают до 20 – 25 тысяч циклов заряда/разряда, что ставит их вне конкуренции по сравнению с другими типами аккумуляторов на электротранспорте и в системах накопления энергии.

3.3 Недостатки

- Они более дорогие по сравнению со свинцово-кислотными аккумуляторами.
- Для их эксплуатации требуется дополнительное оборудование – BMS (Battery management system).

3.4 Стоимость

Средняя стоимость 1 Втч запасаемой энергии для литий-железо-фосфатных аккумуляторных батарей составляет примерно 0,4 – 0,5 USD (в зависимости от типа используемой BMS и емкости аккумулятора).

4. Сравнение СКБ и ЛИАБ

4.1 Срок службы

Срок службы лучших свинцово-кислотных аккумуляторов, изготовленных по технологии Gel, составляет 10 лет, AGM – 5 лет.

Результаты ресурсных испытаний, проведенных с литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареей, эксплуатирующейся в режиме поддерживающего заряда, позволяют утверждать, что срок эксплуатации такой батареи составит не менее 15 лет.

4.2 Затраты на поддержание климат контроля.

Как было указано, свинцово-кислотные аккумуляторы требуют поддержания определенной температуры в помещении. Рекомендуемая температура их эксплуатации равна $+20 \pm 2$ °С. В отличие от них, литий-ионные батареи не предъявляют жестких требований к температуре помещения. Верхняя граница для них может быть поднята до +40 °С. Выше +40 °С границу температуры в помещении поднимать не стоит с точки зрения обеспечения устойчивости работы серверного оборудования. Нижняя граница может быть отодвинута до +0 °С. Таким образом, для указанных батарей допустимы следующие диапазоны температур эксплуатации:

Таблица 1 – Температурный диапазон эксплуатации различных типов батарей

Тип батареи	Диапазон
Свинцово-кислотная батарея	+20 ± 2 °C
Литий-ионная батарея	+20 ± 20 °C

Методика расчета затрат на поддержание климат-контроля представлен в приложении А. Из расчета следует, что на поддержание нормальных условий эксплуатации для 1 Втч запасаемой в свинцово-кислотном аккумуляторе энергии требуется затратить в течение 15 лет эксплуатации на 1,29 \$ больше по сравнению с литий-железо-фосфатным аккумулятором.

4.3 Стоимость

В таблице ниже приводится сравнительный расчет стоимости 1Втч запасаемой энергии для различных типов аккумуляторов с учетом стоимости владения, затрат на климат-контроль и стоимость аренды площадей. Графически структура цены представлена на рисунке 3.

Таблица 2 – Расчет стоимости 1 Втч запасаемой энергии с учетом стоимости владения для различных типов аккумуляторных батарей

Параметр	Gel	AGM	LFP
Срок службы в подзаряде, лет	12	5	15
	Стоимость, \$/Втч		
Номинальная емкость	0,4	0,13	0,45
Дополнительна стоимость в течение 15 лет с учетом замены батарей	0,10	0,26	0,00
Стоимость затрат на климатику, \$	1,29	1,29	0,00
Итого, стоимость владения 1 Втч, USD	1,79	1,68	0,45

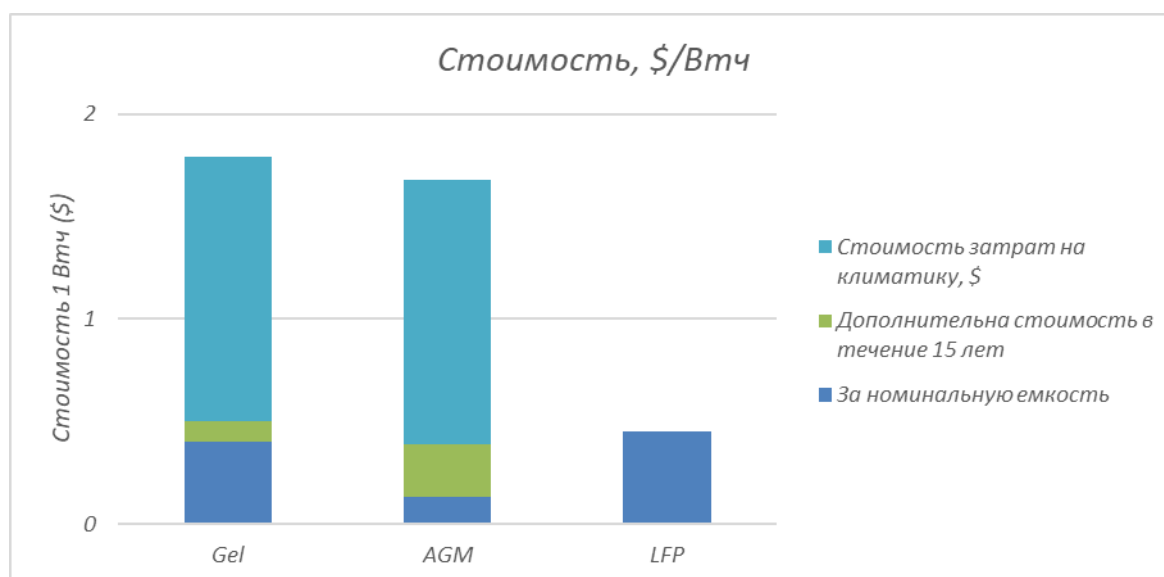


Рисунок 3

Видно, что рассчитанная стоимость 1 Втч запасаемой энергии для свинцово-кислотных аккумуляторов типа Gel выше стоимости 1 Втч запасаемой энергии аккумулятора LFP. Также

видно, что рассчитанная стоимость 1 Втч запасаемой энергии для аккумуляторов типа AGM существенно ниже по сравнению с LFP.

Если учесть срок эксплуатации батареи в подзаряде, стоимость батарей AGM и LFP становятся приблизительно равны. Стоимость батареи LFP становится заметно ниже (в несколько раз), если учитывать затраты на климат-контроль. Экономия за счет уменьшения занимаемой площади оборудованием батареи незначительна, но в ряде случаев может стать определяющим при выборе батареи.

5. Выводы

1. Предложена методика, позволяющая оцифровать качественные параметры (срок службы, затраты на климат-контроль и т.п.) и перевести их в стоимость владения Ватт-часа запасаемой энергии для различных типов аккумуляторных батарей.
2. Как правило, при подготовке проектно-сметной документации многие важные параметры не учитываются. Зачастую учитывается только непосредственно стоимость самого оборудования, что не позволяет корректно сравнивать между собой решения, использующие различные аккумуляторные батареи с точки зрения соотношения цена / качество. Стоимость затрат на обеспечение требуемых температурных условий эксплуатации свинцово-кислотных батарей зачастую превосходит стоимость этих батарей. С другой стороны, эксплуатация свинцово-кислотных батарей в неоптимальном температурном диапазоне приводит к их быстрой деградации и выходу из строя (в течение 1 – 2 лет).
3. Внимательный учет всех параметров, позволяет сделать вывод о том, что стоимость батарей для ЭПУ 48 В на основе литий-ионных аккумуляторов в ряде случаев может быть существенно ниже по сравнению со свинцово-кислотными батареями.
4. Применение литий-ионных аккумуляторных батарей становится эффективным в том случае, когда есть ограничения, связанные с занимаемой площадью и весом аккумуляторов, а также в том случае, если учитываются затраты на климат контроль.

Приложение А – Расчет затрат на поддержание климат-контроля

Основные определения

Для характеристики теплоизоляционных свойств различных материалов используют коэффициент теплопроводности k [Вт/(м·К)]. Он численно равен количеству теплоты, которое передается в единицу времени (1 секунда) через единицу поверхности (1 квадратный метр) при разнице температуры внутренней и наружной поверхности 1 К на единицу пути (1 метр) теплового потока.

Мощность теплового потока определяется по формуле:

$$Q = k \cdot \frac{S}{\delta} \cdot \Delta T \quad (1)$$

Где:

Q – мощность теплового потока;

k – коэффициент теплопроводности;

S – площадь поверхности;
 δ – толщина теплоизолятора;
 ΔT – разница внутренней и наружной температуры;

В качестве характеристики конкретного материала чаще используют термическое сопротивление теплопередаче R_w [$\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$]

$$R_w = \frac{\delta}{k} \quad (2)$$

Тогда формулу (1) можно переписать в следующем виде:

$$Q = \frac{\Delta T \cdot S}{R_w} \quad (3)$$

В случае если речь идет о поддержании температуры внутри помещения, в котором работают нагреватели (например, работают силовые преобразователи напряжения), тепловой баланс наступает в том случае, когда мощность теплового потока через стену станет равной мощности нагревателей:

$$Q = P_{\text{нагр}} \quad (4)$$

Для определения температуры внутри помещения при условии, что система климат-контроля не работает, нужно переписать уравнение (3) и (4):

$$T_{\text{in}} = T_{\text{out}} + P_{\text{нагр}} \cdot \frac{R_w}{S} \quad (5)$$

Если температура T_{in} находится ниже нужного диапазона, требуется дополнительный нагрев, если выше – кондиционирование. В качестве кондиционеров наибольшее распространение получили так называемые сплит-системы, которые состоят как из наружного, так и внутреннего блоков.

Пусть T_{max} – величина, до которой нужно охладить температуру внутри помещения. Тогда мощность охлаждения кондиционера определяется следующим образом:

$$Q_{\text{охл}} = \frac{S}{R_w} \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{max}}) \quad (6)$$

Важно отметить, что мощность охлаждения для этих систем не равна электрической мощности, потребляемой на электропитание кондиционера. Отношение мощности охлаждения к потребляемой электрической мощности кондиционера называется эффективностью охлаждения. Для промышленных сплит-систем, обычно использующихся для охлаждения помещений, типичное значение эффективности охлаждения равно 2,0 – 2,5. Эффективность охлаждения здесь выше единицы потому, что при кондиционировании горячий воздух (нагретый до температуры примерно $+65^\circ\text{C}$) выбрасывается в окружающую среду, имеющую существенно меньшую температуру.

Описание модели

Для определения затрат на климат-контроль рассмотрим помещение с серверным оборудованием площадью 20 м^2 , имеющую наружные стены общей площадью 48,6 м^2 , выполненные из кирпича в один слой (250 мм), имеющего коэффициент теплопроводности 0,54 $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})^2$.

Пусть используется система электропитания мощностью 3 кВА, рассчитанная на время резервирования 2 часа. Аккумуляторная батарея запасает энергию 4,8 кВтч (с учетом старения).

² Кирпич керамический на песчано-цементном кладочном растворе.

Пусть средняя мощность тепловыделения оборудования, расположенного в помещении, равно 2,0 кВт.

Предположим, что соседние помещения имеют температуру +20°C. Стоимость 1 кВтч электроэнергии принимается равной 4,0 рублей.

Предполагается, что система климат-контроля обеспечивает температуру внутри помещения в пределах, описанных в п. 4.2. Нагрев осуществляется собственно работающим оборудованием и электрическими нагревателями, при этом мощность затрачиваемой электроэнергии на дополнительный нагрев, равна мощности дополнительного нагрева. Для определения затрат электроэнергии на кондиционирование эффективность охлаждения принимаем равной 2,0. Определяется зависимость затраченной на поддержание климат-контроля электроэнергии от допустимого отклонения температуры внутри объема δt относительно температуры +20°C.

Результаты

График зависимости расходов на климат-контроль представлен на рисунке 4.

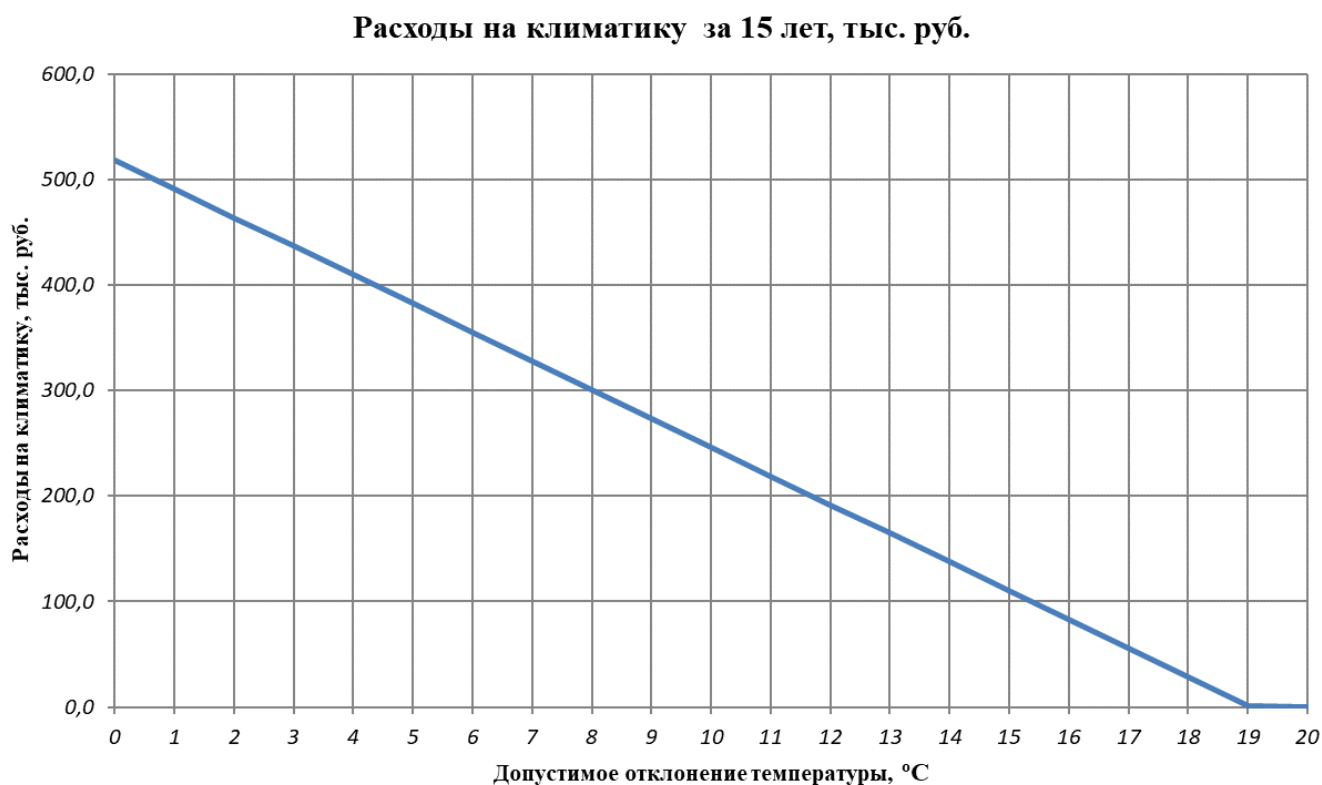


Рисунок 4 – зависимость расходов на климат-контроль в течение 15 лет от допустимого диапазона температуры.

Из представленного графика видно, что стоимость электроэнергии, затраченной на климат-контроль, при использовании свинцово-кислотной батареи равна 464 тыс. руб. за 15 лет эксплуатации (нужно поддерживать температуру с точностью до 2 °C). Дополнительная стоимость 1 Втч запасаемой энергии батареи, обусловленная затратами на климат-контроль, равна 1,29 \$.

При использовании литий-ионной батареи, стоимость электроэнергии, затраченной на климат-контроль равна нулю, то есть можно отказаться от кондиционирования.

То есть при использовании литий-ионной батареи по сравнению со свинцово-кислотной батареей расходы на климат-контроль, приведенные к 1 Втч запасаемой энергии, снижаются с 1,29 \$ до 0 за время эксплуатации 15 лет.