



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

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



УДК 621.31161, 620.98

## АНАЛИЗ И ОБОБЩЁННАЯ МЕТОДИКА ПОДБОРА АККУМУЛЯТОРНЫХ ЯЧЕЕК ДЛЯ РЕЗЕРВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ, РАССЧИТАННЫХ НА КРУГЛОГОДИЧНУЮ ЭКСПЛУАТАЦИЮ

**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](mailto:mishaniya1121@yandex.ru)*

Повсеместное внедрение возобновляемой энергетики идет параллельно с массовым распространением источников хранения энергии. На сегодня порядка 50% солнечных электростанций в США и Европе используют аккумуляторные блоки, среди ветряных электростанций этот показатель в диапазоне 20–30% [1], [2]. Использование аккумуляторных блоков в составе микро-ГЭС встречается реже, исключением являются полностью автономные системы с необходимостью в резервном электропитании. В работе будет представлен краткий анализ преимуществ использования, получивших большую популярность сегодня аккумуляторов типа GEL, сравнение с конкурентами, и методика обобщенного расчета необходимой емкости аккумуляторных блоков для долгосрочной эксплуатации накопительного элемента.

Ключевые слова: Аккумуляторные ячейки.

## ANALYSIS AND GENERALIZED METHOD OF SELECTION OF BATTERY CELLS FOR BACKUP POWER SUPPLIES DESIGNED FOR YEAR-ROUND OPERATION

**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](mailto:mishaniya1121@yandex.ru)*

The widespread introduction of renewable energy goes hand in hand with the massive proliferation of energy storage sources. Today, about 50% of solar power plants in the United States and Europe use battery packs, among wind farms this figure is in the range 20-30% [1], [2]. The use of battery packs as part of micro-hydroelectric power plants is less common, with the exception of fully autonomous systems with the need for backup power supply. The paper will present a brief analysis of the advantages of using GEL-type batteries that have become very popular today, a comparison with competitors, and a method for generalized calculation of the required capacity of battery packs for long-term operation of the storage element.

Keywords: Battery cells.

### Введение

Сегодня в сегменте аккумуляторов для резервных источников питания широко распространены аккумуляторы типа AGM (Absorbed Glass Mat) и GEL. Главными преимуществами данного типа батарей являются высокие разрядные токи и относительно низкая стоимость. Батареи типа AGM можно встретить в большом числе ИБП (источников бесперебойного питания). На их долю приходится до 70% от общего объема АКБ (аккумуляторных батарей). Классические свинцово-кислотные батареи занимают долю от 10

до 15%, доля Li-ion находится на уровне 15%. Доля Никель-Кадмиевых (Ni-Cd) АКБ менее 5% [3], [4].

Этот расклад является относительно устоявшимся, и перемены преимущественно касаются доли Li-ion аккумуляторных элементов на рынке, так как данная технология последнее время достаточно активно совершенствуется, а стоимость конечного снизилась в разы за 10 лет. (Рисунок 1)

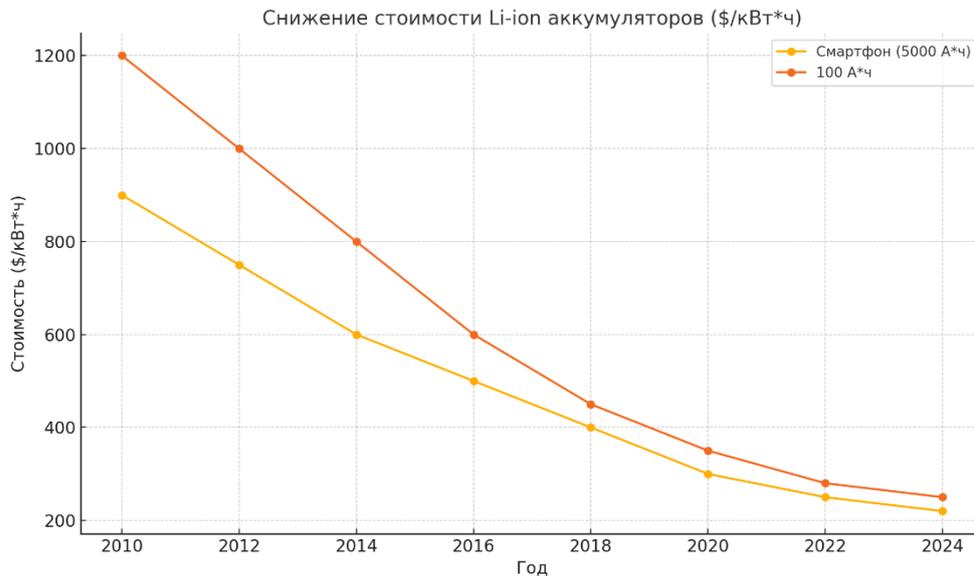


Рисунок 1. Изменение стоимости в \$/кВт\*ч для аккумуляторов типа Li-ion.

Наиболее распространенным вариантом для ИБП, срок эксплуатации которого должен составлять порядка 10 лет, является батарея типа GEL. Причиной тому являются высокие параметры ресурса, способность работы в широком диапазоне температур и медленная потеря емкости при глубоком разряде, сочетающаяся с относительно низкой ценой. Порядка 20–25 тысяч рублей за батарею на 100 А\*ч [5]. Такой ценник позволяет собрать конфигурацию до 500–600 А\*ч вместе с трехфазным инвертором, уложившись в цену до 200 тысяч рублей на проект.

Для ИБП не столь принципиален вес и габариты, так как данные устройства преимущественно устанавливаются стационарно в зданиях или специальных отсеках, не подвергаются транспортировке и в течение всего срока службы только периодически проверяются специалистами.

### 1. Особенности аккумуляторных элементов GEL. Сравнение с AGM.

Батареи типа GEL являются продолжением развития идей свинцово-кислотных аккумуляторных элементов, обладая всеми наследственными преимуществами, среди которых высокие пусковые токи, устойчивость к холодам и общая неприхотливость при круглогодичном цикле эксплуатации, в сравнении с аккумуляторными элементами Li-ion. [

Кратко перечислим основные типовые параметры аккумуляторов данного вида.

#### 1) Ресурс:

- для 30% разрядов около 1500–1800 циклов
- для 50% разрядов около 1000–1200 циклов.

- для 100% разрядов около 500 циклов.

2) Рабочий диапазон температур:

Оптимальный температурный диапазон составляет от +10°C до +30°C, при том полный рабочий диапазон температур находится в диапазоне от -20°C до +50°C.

3) Отдача мощности. Для нагрузок до 15 минут (что является коротким временным интервалом) батарея емкостью 100 А\*ч при напряжении в 12 В способна отдавать до 1.2 кВт, если учитывать разрешенные производителем разрядные токи.

Принципиальным отличием от AGM является отсутствие стремительной деградации ячейки при росте температуры окружающей среды, так, если для AGM срок службы сокращается на 50% при выходе температуры из рабочего диапазона (т.е. выше +25°C) на каждые 10 °C, то для GEL этот показатель находится в диапазоне 20-30%.

Вторым минусом в сравнение двух типов батарей является меньший ресурс AGM аккумуляторов. Эта проблема не столь популярна, так как для ИБП 5 лет работы является достаточно большим сроком, но с точки зрения загрязнения окружающей среды аккумуляторными изделиями, предпочтительней выбирать GEL. Сравнение ресурсов можно наблюдать на Рисунке 2.. [6]

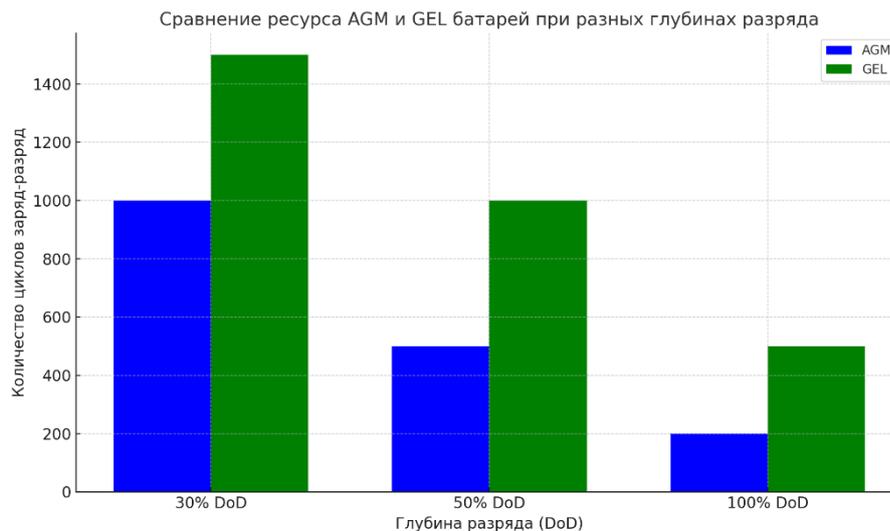


Рисунок 2. - Сравнение ресурса AGM и GEL батарей при разных глубинах разряда.

Если сравнивать цены аккумуляторных батарей типа GEL и AGM, то можно проследить тенденцию удешевления ячеек больших объёмов, сохранение стоимости ячеек малых объёмов, удешевление производства которых компенсировано инфляцией. В целом график показывает достаточно малые ценовые различия, которые указывают в пользу выбора аккумуляторов типа GEL для большинства сценариев эксплуатации (Рисунок 3). По этой причине в статье будут рассматриваться расчёты именно с учётом специфики GEL батарей. [7], [8]

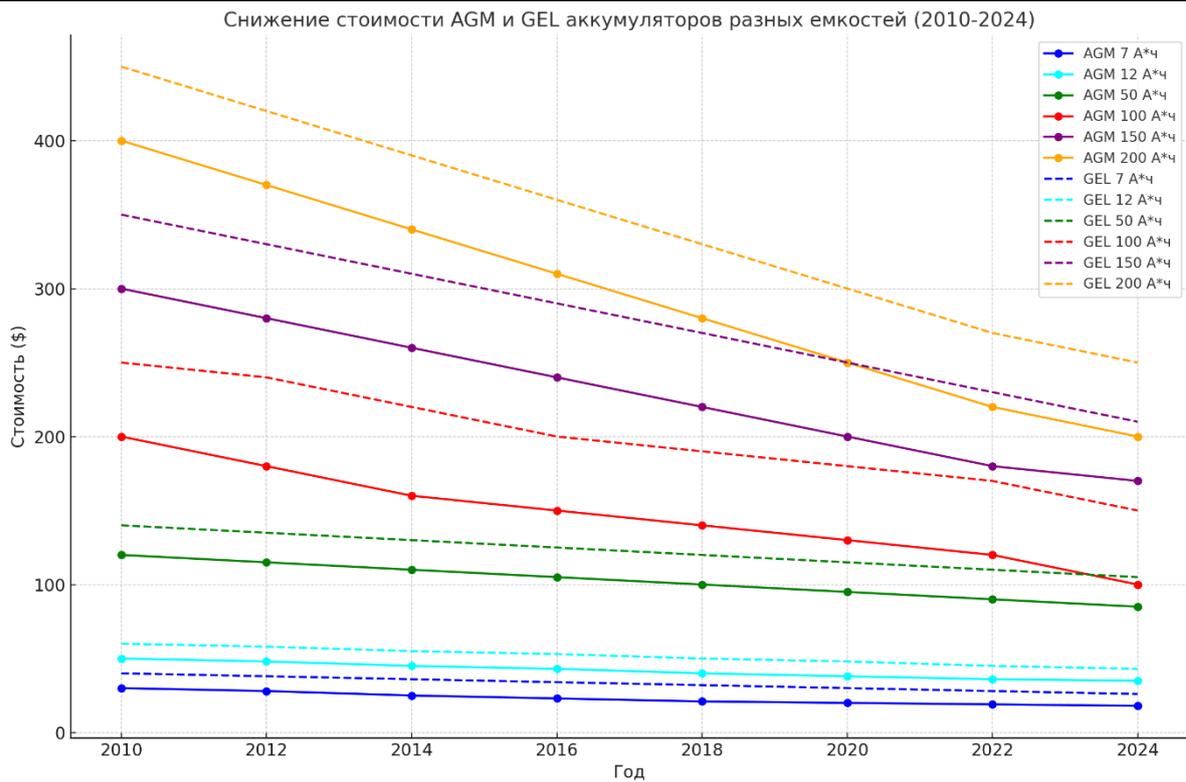


Рисунок 3. - Сравнение стоимости в \$ аккумуляторов GEL и AGM различных емкостей для рынка США и ЕС.

## 2. Методика выбора и оценки рабочих характеристик для GEL батарей.

Первым вопросом, с которого стоит начать при выборе аккумуляторов, это определиться с приблизительной емкостью и задать условный сценарий старения ячейки, на основании которого получить ее состояние по истечении 10 лет. Для этого задаёмся формулой для определения старения аккумуляторов.

$$C(t) = C_0 \times (1 - \alpha \times t)^\beta \times \left(1 - \gamma \times \frac{t}{12}\right)$$

Это эмпирическая модель деградации аккумулятора, где  $C(t)$  – остаточная ёмкость батареи через  $t$  лет эксплуатации.  $\alpha$  – коэффициент снижения рабочих характеристик за год, при учёте сценария использования батареи.  $\beta$  – коэффициент линейности процесса деградации, задаётся на основании экспериментальных таблиц от производителя.  $\gamma$  – коэффициент снижения рабочих характеристик на основании естественных химических процессов, возникающих со временем. В рамках GEL батарей можно задать следующие рамки для выбора коэффициентов. Коэффициент  $\gamma$  задаём в диапазоне от 2 до 5 %. Коэффициент  $\beta$  принято выбирать в диапазоне от 0.8 до 1.2, но в целом он стремится к 1 для GEL батарей в рамках гарантированного срока службы. Коэффициент  $\alpha$  является расчётным, вычисляется по формуле:

$$\alpha = \frac{\text{DoD} \times N_{\text{cycles}}}{L_{\text{cycles}}}$$

Где DoD – это средняя глубина разряда в %,  $N_c$  – количество циклов заряда-разряда за год,  $L_c$  – общий ресурс батареи в полных циклах заряда-разряда, или иной глубине разряда,

которая прописана производителем. С учётом, что обычно производитель прописывает 3 набора глубин разряда и соответствующее им количество циклом (для 30% разряда, 50% и 100%), то необходимо вычислить доли для каждого из вариантов, после чего выполнить суммирование значений, тем самым вычислив снижение ресурса батарей  $\alpha$  в течении одного года.

В большинстве случаев, при работе в режиме резервного источника питания, при относительно стабильной работе основного источника электрогенерации, или в случае оперативного ввода резервного источника энергии, по типу дизель-генератора, за 10 лет остаточный ресурс батарей будет составлять порядка 40% от максимальной ёмкости ячеек.

После этого, вычисляем требуемую ёмкость, умножаем ее на коэффициент запаса (обычно 1.1-1.3), и учитываем компенсацию потери ёмкости за 10 лет. Для расчёта требуемой ёмкости можно воспользоваться следующей формулой:

$$C_{\text{потр}} = \frac{P_{\text{наг}} \cdot T_{\text{работы}}}{V_{\text{ном}} \cdot \eta}$$

Где  $C_{\text{потр}}$  – требуемая ёмкость аккумулятора в А\*ч;  $P_{\text{наг}}$  – мощность нагрузки в кВт;  $T_{\text{работы}}$  – требуемый срок поддержания системы в состоянии работоспособности от батареи (рекомендуется задавать в 1.5-2 раза больше, чем минимально необходимое значение, для учёта повторных нештатных ситуаций или холодов);  $V_{\text{ном}}$  – это номинальное напряжение связки аккумуляторов и инвертора, в большинстве своём для GEL батарей это 12 В, в случае необходимости повышения используется последовательный метод соединения ячеек, и тогда можно добиться значения в 48 В, которое часто используется в высокомоощных инверторах.  $\eta$  – это КПД инвертора. Рекомендуется принимать в диапазоне 0.85-0.9. [9]

После выполнения данного этапа расчёта обязательно нужно определить количество аккумуляторных элементов и их нагрев, так как предельный ток для аккумуляторной батареи может быть ниже вычисленного значения, или батарея при планируемом времени непрерывной нагрузки может уйти в перегрев. Для упрощённого расчёта можно использовать следующие формулы;

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

Где  $Q$  это количество теплоты, выделенное за время нагрузки  $t$ .  $R$  – это внутреннее сопротивление батареи,  $I$  - значение тока, отдаваемого батареей в нагрузку. Ток можно вычислить через значение мощности нагрузки и напряжение аккумуляторного блока, учитывая количество ячеек.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T, \text{ откуда } \Delta T = \frac{Q}{m \cdot c}$$

Где  $m$  – это масса аккумуляторной батареи,  $c$  – удельная теплоёмкость материала батареи, которая для всех вариаций свинцово-кислотных АКБ находится на уровне 150 Дж/кг·°С.  $\Delta T$  – это изменение температуры ячейки, если ранее было учтено количество аккумуляторных элементов, или всего блока, если расчёт ведётся без разделения на отдельные аккумуляторные элементы.

Для уточнения данного расчёта можно ввести габариты аккумуляторного элемента:

$$A=2 \cdot (L \cdot W + L \cdot H + W \cdot H)$$

Где  $L, W, H$  — длина, ширина и высота батареи, соответственно;  $A$  – это общая площадь поверхности в  $m^2$ .

Это необходимо для определения величины конвективного теплообмена с окружающей средой. Далее уточняется величина аккумулируемого в ячейке тепла:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = \rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta T$$

Где  $\rho$  — плотность материала батареи,  $kg/m^3$ ;  $V$  — объём аккумуляторного блока,  $m^3$ .

Получил данные о площади теплоотдачи, можно посчитать количество тепло, отдаваемого батареями:

$$Q_{от} = h \cdot A \cdot (T_{батареи} - T_{окружающей\ среды}) \cdot t$$

Где  $h$  – это коэффициент теплоотдачей,  $t$  – время, за которое мы рассчитываем количество отданного тепла.

Далее учитываем конвекцию или радиацию (излучение в окружающую среду). Если величина радиации достаточно существенна по отношению к всему тепло-отделению, то она учитывается через закон Стефана-Больцмана.

Последним, что нужно учесть, говоря про подбор аккумуляторных элементов для круглогодичного использования, является снижение объёма хранимой энергии в аккумуляторные батареи в зимний период времени. График, демонстрирующий это, изображён на Рисунке 4.

Изменение ёмкости аккумулятора в зависимости от температуры и разрядного тока

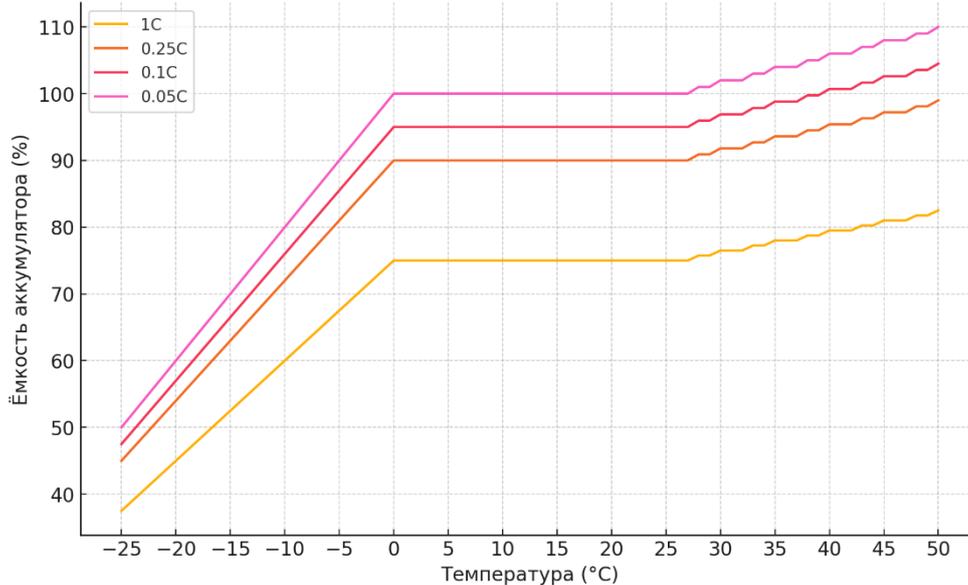


Рисунок 4. - График изменения ёмкости аккумулятора в зависимости от температуры и разрядного тока.

С учётом снижения ёмкости при различной силе разрядного тока и отличных параметрах для различных температур имеет смысл выполнить проверку достаточности объёма аккумуляторного блока. Это можно сделать по следующей формуле:

$$T_{Cx^{\circ}C} = ((C_{нотр} * j * \eta_1 * \eta_2 * V_{ном}) / P_{наг})$$

Где  $X^{\circ}C$  – это значение температуры, для которого рассматриваются все остальные величины;  $j$  - емкость аккумулятора в сотых долях (переводим из процентов в дробные доли). Ответ получается в дробных долях, которые переводим в часы и минуты.

### **Заключение**

Целью работы было показать экономическую целесообразность применения аккумуляторных батарей типа GEL в составе систем резервного питания, ознакомиться с их основными преимуществами в сравнение с конкурирующими вариантами. На сегодня данный тип аккумуляторов является достаточно бюджетным, чтобы иметь массовое распространение, при том достаточно надёжным, чтобы не наносить большого вреда окружающей среде, и всё это сочетается с отличными рабочими показателями и высокой масштабируемостью.

Как и все прочие варианты свинцово-кислотных аккумуляторов, АКБ типа GEL не могут приблизиться к уровню Li-ion по объёму запасаемой энергии на 1 кг веса, но они при том остаются в разы более безопасными и устойчивыми к переменным условиям окружающей среды.

В работе показаны формулы и описана последовательность действий, следуя которой можно подобрать оптимальный блок аккумуляторных элементов для любой задачи, будь то компактный ИБП для домашней электроники, либо же мощный блок батарей на 1000 А\*ч и более, который сможет обеспечивать весь дом электричеством, пока происходит плавный пуск резервного электрогенератора. Альтернативным сценарием для блоков батарей является режим компенсации просадки мощности, с чем вполне может справиться бюджетная сборка из GEL аккумуляторов. Этот сценарий применим для загородного дома с однофазной сетью, где часто встречаются ограничения в 5 кВт. Это достаточно мало и ограничивает в параллельном использовании привычной нам бытовой техники (домашний уют может иметь мощность до 3 кВт). Для снижения нагрузки на сеть устанавливается система компенсации, которая при дефиците мощности через инвертор передаёт часть электроэнергии в сет от блока батарей, тем самым балансируя краткосрочные скачки потребления без ощутимых последствий.

### **Список литературы**

1. CleanTechnica. "Быстрый рост использования аккумуляторов в качестве источника электроэнергии в энергосистеме США". Доступно по адресу: [cleantechnica.com](https://cleantechnica.com) (дата публикации 07.08.2024).
2. Управление энергетической информации США (EIA). "В ближайшие три года в США планируется увеличить количество аккумуляторных батарей в сочетании с солнечными батареями". Доступно по адресу: [eia.gov](https://eia.gov) (дата публикации 08.08.2024).
3. Маркетинговое исследование будущего. "Отчет по исследованию мирового рынка аккумуляторов для ИБП - прогноз до 2027 года". Доступно по адресу: [marketresearchfuture.com](https://marketresearchfuture.com) (дата обращения 17.08.2024).
4. Исследования и рынки сбыта. "Рынок аккумуляторов для ИБП в разбивке по типам батарей (свинцово-кислотные, литий-ионные и другие), областям применения (жилые, коммерческие, промышленные) - глобальный прогноз до 2025 года". Доступно по адресу: [researchandmarkets.com](https://researchandmarkets.com) (дата обращения 17.08.2024).

5. Разрешений. Аккумуляторная батарея Vektor Energy GL 12-100 (12В 100Ач) для ИБП. <https://realsolar.ru/akb/vektor-energy/gl/gl-12-100/> (дата обращения 17.08.2024)
6. Аветисян, Г. С., & Павлов, В. С. (2020). Перспективы применения гелевых аккумуляторов в системах бесперебойного питания. Вестник энергетики, 1(74), 32-38.
7. Косырев, И. В., & Шилин, А. А. (2018). Повышение надежности систем бесперебойного электропитания на основе использования свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. Электротехнические комплексы и системы, 3(32), 44-50.
8. Гупта С., Сингх П. Б. и Кумар А. (2018). Всесторонний обзор характеристик свинцово-кислотных аккумуляторов с вентильным регулированием (VRLA) в автономных системах электроснабжения.\* Журнал хранения энергии, 17, 15-25.
9. Методическое пособие по курсу «Персональная электроника» Источники бесперебойного питания. Таганрог: Изд-во ТР-та, 2003, 32с.
10. Клименко Г.К., Ляпин А.А., Марахтанов М.К. Исследование теплового состояния аккумулятора в рабочем цикле. Международный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1030.html>

## References

1. CleanTechnica. "The Rapid Growth of Batteries as Electricity Source on US Grid." Available at: [cleantechnica.com](http://cleantechnica.com) (дата обращения 07.08.2024).
  2. U.S. Energy Information Administration (EIA). "Most planned U.S. battery storage additions in next three years to be paired with solar." Available at: [eia.gov](http://eia.gov) (дата обращения 08.08.2024).
  3. Market Research Future. "Global UPS Battery Market Research Report - Forecast till 2027". Available at: [marketresearchfuture.com](http://marketresearchfuture.com) (дата обращения 17.08.2024).
  4. Research and Markets. "UPS Battery Market by Battery Type (Lead-Acid, Lithium-Ion, Others), Application (Residential, Commercial, Industrial) - Global Forecast to 2025". Available at: [researchandmarkets.com](http://researchandmarkets.com) (дата обращения 17.08.2024).
  5. ReSolar. Аккумуляторная батарея Vektor Energy GL 12-100 (12В 100Ач) для ИБП. <https://realsolar.ru/akb/vektor-energy/gl/gl-12-100/> (дата обращения 17.08.2024)
  6. Аветисян, Г. С., & Павлов, В. С. (2020). Перспективы применения гелевых аккумуляторов в системах бесперебойного питания. Вестник энергетики, 1(74), 32-38.
  7. Косырев, И. В., & Шилин, А. А. (2018). Повышение надежности систем бесперебойного электропитания на основе использования свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. Электротехнические комплексы и системы, 3(32), 44-50.
  8. Gupta, S., Singh, P. B., & Kumar, A. (2018). A Comprehensive Review on Performance of Valve Regulated Lead-Acid (VRLA) Batteries in Stand-Alone Power Systems.\* Journal of Energy Storage, 17, 15-25.
  9. Методическое пособие по курсу «Персональная электроника» Источники бесперебойного питания. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003, 32с.
  10. Клименко Г.К., Ляпин А.А., Марахтанов М.К. Исследование теплового состояния аккумулятора в рабочем цикле. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1030.html>
-