

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЯГОВЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

А. С. Гурский, В. М. Изоитко, К. В. Буйкус
Белорусский национальный технический университет

Аннотация. Желаемые характеристики тяговые аккумуляторные батареи (ТАБ) для электромобилей (ЭМ) включают в себя: высокую плотность энергии, удельную мощность, срок службы, безопасность и низкую стоимость. Новые химические элементы делают ТАБ меньше, легче и позволяют хранить достаточно энергии, чтобы ЭМ могли конкурировать с транспортными средствами, оснащенными ДВС. В статье дается анализ аккумуляторных технологий, отвечающих эксплуатационным требованиям транспортных средств.

Ключевые слова: тяговая аккумуляторная батарея, элементы, зарядка, электромобиль.

METHODOLOGICAL FEATURES OF THE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE USE OF TRACTION BATTERIES FOR ELECTRIC VEHICLES

A. S. Gursky, V. M. Izoitko, K. V. Buikus
Belarusian National Technical University

Abstract. Desirable characteristics of traction batteries (TB) for EV include: high energy density, power density, service life, safety and low cost. New chemistries make TB smaller, lighter and store enough energy to compete with vehicles included engine with initial combustion. The article provides an analysis of battery technologies that meet the operational requirements of vehicles.

Keywords: traction battery, elements, charging, electric vehicle.

Введение

ТАБ является единственным источником энергии ЭМ и, как таковой, критическим компонентом. Аккумулятор должен эффективно хранить максимально возможную энергию в заданном объеме и должен обеспечивать мощность, надежность, пригодность к переработке и безопасность. На самом деле аккумуляторная технология определит будущее ЭМ. Сама по себе электрохимическая система не определяет срок службы аккумулятора в ЭМ. Есть много других факторов, которые могут сильно нагрузить аккумулятор, так что он выработает свой срок службы намного раньше, чем это желательно или экономично.

1. Мощность и энергетическая емкость аккумуляторов ЭМ

В соответствии с конфигурацией трансмиссии ЭМ можно классифицировать как ЭМ с ТАБ (Battery Electric Vehicle - BEV), гибридные ЭМ (Hybrid Electric Vehicle – HEV), гибридные ЭМ с подключаемым модулем (Plug-in Hybrid Electric Vehicle – PHEV) и ЭМ на топливных элементах (Fuel Cell Electric Vehicle – FCEV). Мощность батареи и потребности в энергии для различных типов ЭМ показаны на рис. 1.

Аккумуляторы ЭМ необходимы для работы с высокой мощностью (до 100 кВт) и высокой энергией (десятки кВт·ч) в условиях ограниченного пространства и массы. В гибридном ЭМ батарея обеспечивает только часть необходимой мощности и энергии. Поскольку все потребности ЭМ в мощности и энергии удовлетворяются за счет аккумулятора, размер аккумулятора в ЭМ является самым большим среди всех ЭМ.

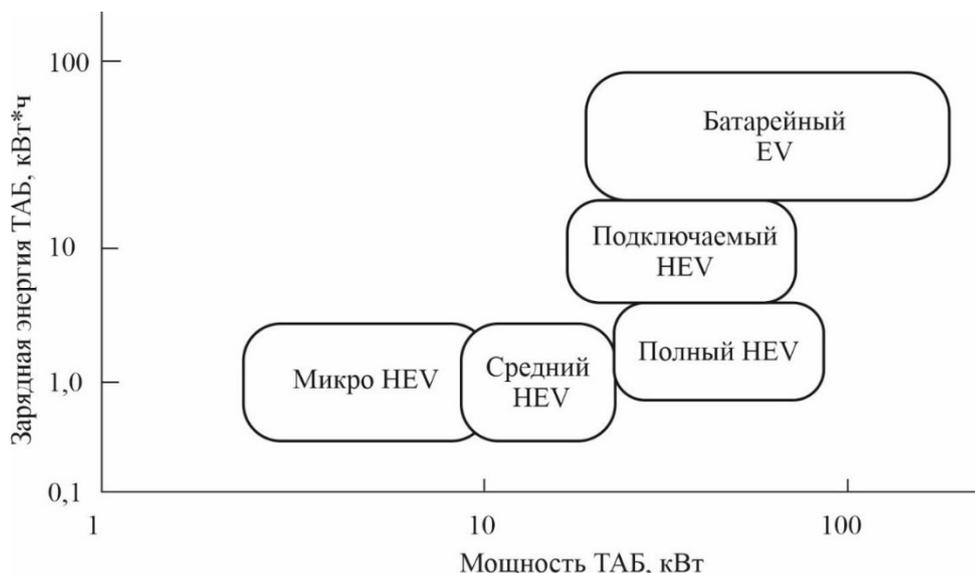


Рисунок 1 – Запас энергии аккумулятора для различных типов ЭМ

Энергопотребление ЭМ зависит от многих факторов: массы автомобиля, размера, формы кузова, дорожных условий, стиля вождения водителя; размер вспомогательных систем, таких как охлаждение, обогрев, освещение и т. д. Типичное энергопотребление ЭМ среднего размера колеблется в пределах 160–200 Вт·ч/км. Стандартный размер тяговой батареи для ЭМ может варьироваться от 20 кВт·ч до 60 кВт·ч или даже выше для большей дальности поездки. Для автобусов она находится в диапазоне от 90 кВт·ч до 150 кВт·ч и выше. После начала движения ЭМ и движения по ровной дороге мощность привода используется для ускорения автомобиля и преодоления сопротивления качению между шинами и дорожным покрытием. Однако, как только необходимая скорость достигнута, для поддержания скорости требуется меньшая мощность за счет преодоления сопротивления качению и силы аэродинамического сопротивления. Для разгона ЭМ массой около 1350 кг до скорости около 95 км/ч за 10 с требуется мощность около 61 кВт. Для того же транспортного средства пиковая мощность торможения для остановки транспортного средства, движущегося со скоростью 95 км/ч, за 5 с может достигать примерно 185 кВт.

2. Концепции аккумуляторной технологии для автомобилей

Энергия, хранящаяся в объеме, занимаемом ТАБ, определяет запас хода ЭМ: чем выше объемная плотность энергии (Вт·ч/л), тем больше запас хода. Гравиметрическая плотность энергии (Вт·ч/кг) определяет сколько энергии доступно по отношению к весу батареи. Поэтому для всех аккумуляторных систем необходимо знать, насколько аккумулятор может быть разряжен (чтобы определить запас хода), или какая часть номинальной максимальной энергии реально доступна для работы ЭМ. Значения этих величин представляет собой самый низкий предел разряда, указанный в процентах от номинальной емкости. Еще одним фактором, влияющим на запас хода, является саморазряд, который указывают в процентах в день или в связи с другой единицей времени. На практике запас хода определяется стилем вождения. Удельная мощности батареи (Вт/кг) влияет на ускорение, а также на период времени, в течение которого отдается мощность батареи. Срок службы аккумулятора в основном определяется количеством циклов зарядка/разрядка.

Надежность аккумулятора зависит от его поведения при ударах и вибрациях. Важнейшее значение имеет равномерная температура во всех элементах батареи во всех режимах работы. Кроме того, элементы должны быть защищены от переворачивания элементов, перезарядки и слишком низкого уровня разряда.

ТАБ теряет зарядную емкость как в результате календарной потери емкости (независимо от того, используется она или нет), так и в результате эксплуатационной потери емкости из-за повторяющихся циклов зарядки/разрядки. Зарядка ТАБ осуществляется как от зарядного устройства, так и в результате рекуперации энергии торможения.

Желаемые характеристики батареи с точки зрения электрической мобильности:

- высокая удельная энергия для более длительного движения;
- высокая удельная мощность для хорошего ускорения

– высокие характеристики безопасности, широкий диапазон рабочих температур, содержание малотоксичных материалов, возможность быстрой зарядки, длительный срок службы и доступная цена.

3. Основные аккумуляторные технологии для ЭМ

Сегодня существует ряд электрохимических батарей, способных питать ЭМ. К популярным химическим веществам относятся: свинцово-кислотные, Ni-Cd, Ni-MH и литий-ионные.

Свинцово-кислотные аккумуляторы являются классическим типом среди аккумуляторов для ЭМ. В течение многих лет они уже используются в повседневных транспортных средствах и легковых автомобилях. Они доступны в различных размерах и надежно работают в ЭМ. Свинцово-кислотные аккумуляторы экологически безопасны, безопасны и экономичны. Они останутся самой распространенной аккумуляторной системой на долгие годы вперед.

Как и любая другая аккумуляторная система, свинцово-кислотная батарея также имеет свои технические ограничения, но у нее есть шансы на существенное улучшение. Эта батарея эффективно работает для автобусов и грузовых автомобилей. Для полностью загруженного 7-тонного автомобиля, используемого для перевозки и раздачи грузов, можно преодолеть расстояние в 50 км. Местные автобусы можно с уверенностью запланировать на круглосуточную работу, если использовать специально разработанные мобильные зарядные станции. Особым преимуществом этой батареи является длительный срок службы 1500 разрядов и высокая экономичность. Запас хода на одном полностью заряженном аккумуляторе от 50 до 80 км и более на быстрых городских трассах можно увеличить примерно на 50 %, используя подходящий стиль вождения ЭМ.

У кальциевой ТАБ свинцовые пластины покрыты микроскопической намазкой из кальция для предотвращения электролиза воды в электролите. Алгоритм полной зарядки кальциевых ТАБ представлен на рис. 2.

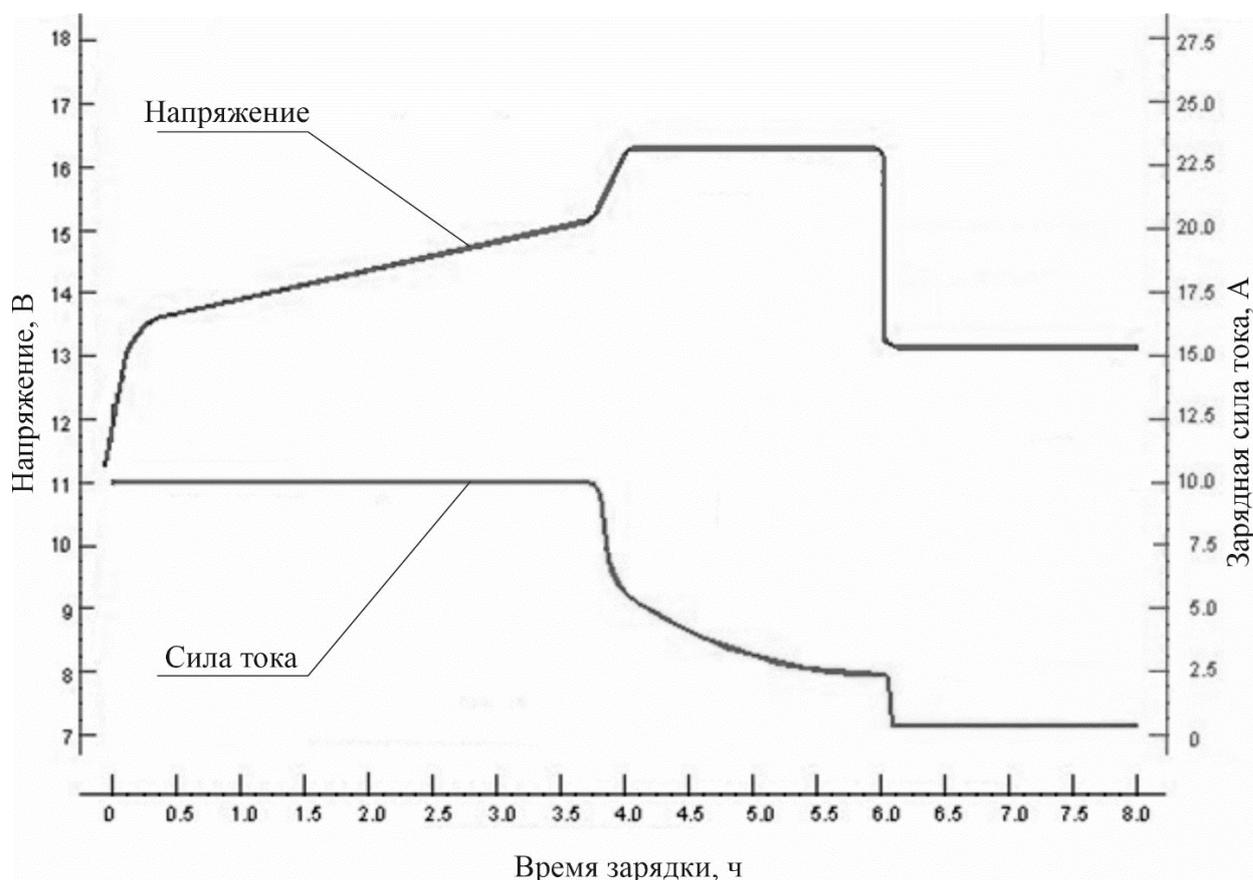


Рисунок 2 – Алгоритм полной зарядки кальциевой 50 А·ч ТАБ

Среди систем *щелочных батарей* в настоящее время для ЭМ можно использовать никель-кадмиевые (Ni-Cd) и никель-металлогидридные (Ni-MH) батареи. Основными преимуществами этих двух систем являются их надежность, возможность быстрой зарядки и высокая стабильность.

Конструкция щелочных батарей аналогична свинцово-кислотным типам в части решетчатой конструкции пластин. В Ni-Cd батареях положительная пластина содержит пероксид никеля $Ni(OH)_2$, а отрицательная пластина представляет собой губчатый кадмий или гидроксид кадмия $Cd(OH)_2$. В Ni-MH батареях отрицательная пластина становится пирофорным активным материалом, как правило, губчатым железом, $Fe(OH)_2$, а положительная пластина остается неизменной. В качестве электролита используется гидроксид калия KOH в воде (при 77 % водном растворе по объему). Плотность электролита около 1,18, которая остается постоянной при зарядке и разрядке, так как при химических превращениях не образуется вода. Вода служит проводником для переноса ионов OH^- с одной пластины на другую.

Значения удельной энергии и мощности, достигнутые с Ni-MH батареями, примерно на 20 % выше, чем у сопоставимых Ni-Cd батарей. Для объемной плотности энергии и выхода эти значения примерно на 40 % выше.

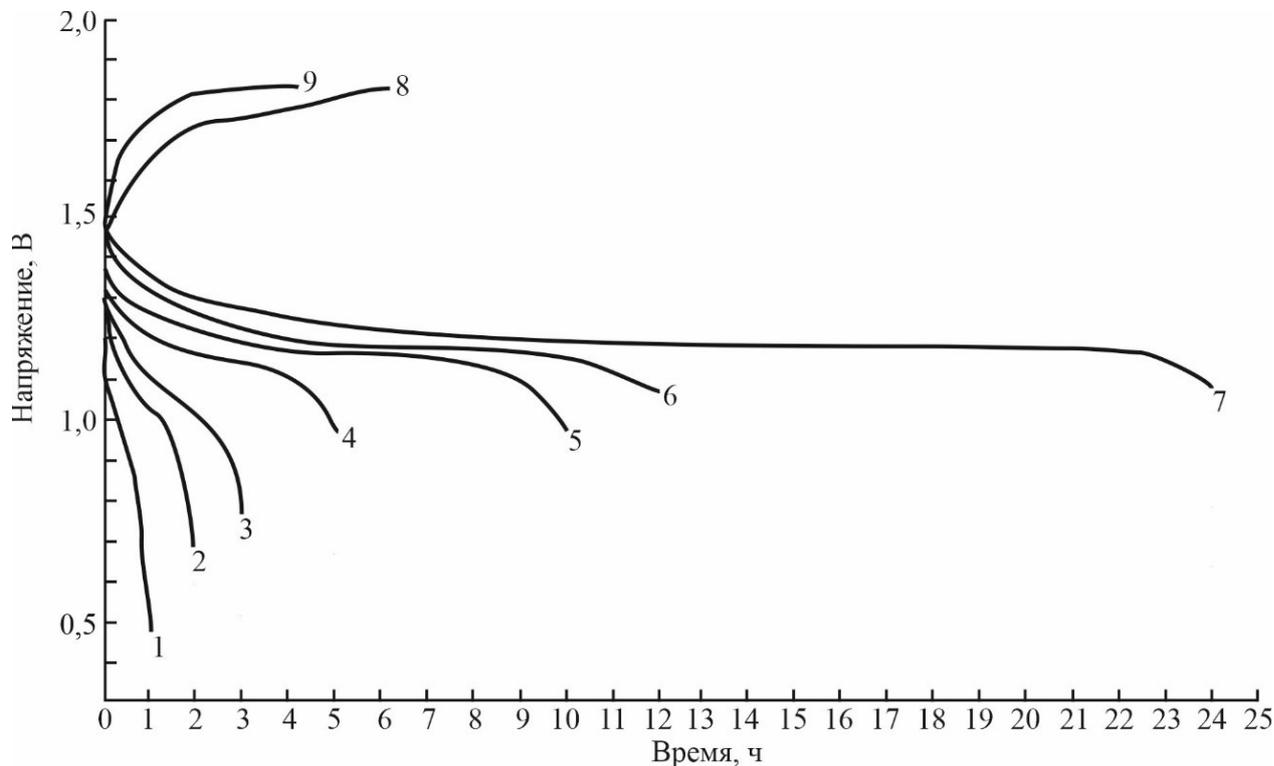
Однако высокая цена, обусловленная в первую очередь дороговизной сырья, препятствует его широкому внедрению в ЭМ (в 2–3 раза выше, чем у свинцовой батареи). Но благодаря значительно более длительному сроку службы и значительно улучшенным эксплуатационным характеристикам (зарядка до 80 % за 15 минут) легко конкурирует со свинцовыми батареями.

Зависимость напряжения на клеммах аккумуляторов от времени разряда, определяющего силу разрядного тока, приведены на рис. 3 и 4.

Алгоритм зарядки никель-кадмиевой ТАБ:

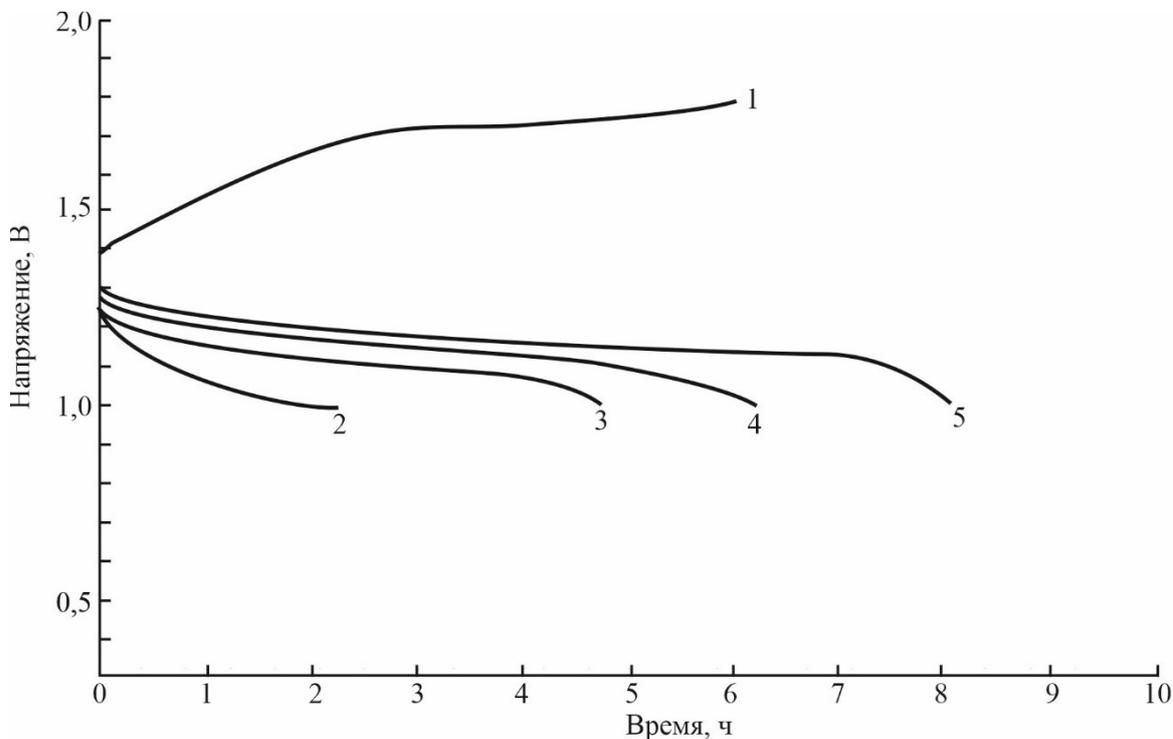
- ТАБ поддерживать максимально заряженной;
- на длительное хранение ТАБ отправляется заряженной наполовину, а перед использованием – дозаряжается;
- периодически (1 из 3–4 зарядок, не чаще раза в месяц) оставлять на зарядке еще на несколько часов после достижения полного заряда для балансировки ячеек.

У литий-ионного аккумулятора катод изготовлен из оксидов или фосфатов лития ($LiCoO_2$, $LiMn_2O_4$, $LiFePO_4$ и др.), а анод изготовлен из графита. Электролит представляет собой смесь солей лития и органического растворителя.



1 – одночасовой разряд; 2 – двухчасовой разряд; 3 – трехчасовой разряд; 4 – пятичасовой разряд; 5 – 10-часовой разряд; 6 – 12-часовой разряд; 7 – 24-часовой разряд; 8 – нормальный заряд; 9 – ускоренный заряд

Рисунок 3 – Зависимость напряжения никель-кадмиевого аккумулятора от времени разрядки при температуре 25 °C



1 – нормальный заряд при температуре 25 °С; 2 – разрядка при минус -40 °С; 3 – разрядка при -30 °С; 4 – разрядка при -20 °С; 5 – разряд при -10 °С

Рисунок 4 – Зависимость напряжения никель-кадмиевого аккумулятора от времени разрядки и температуры электролита

Главное различие между Li-ion и LiPo заключается в том, что в обычном элементе Li-ion используется жидкий электролит, тогда как в элементе LiPo используется электролит в виде сухого твердого вещества или пористого химического соединения или гелеобразной структуры. Поэтому ячейки LiPo могут быть сделаны очень тонкими. Еще одним преимуществом твердого электролита является то, что он непроницаем для дендритов литий-металла, что является основной причиной внутренних коротких замыканий в обычных литий-ионных элементах. Тем не менее, LiPo батареи обладают относительно меньшей плотностью энергии по сравнению с литий-ионным аналогичного размера.

Основными проблемами литий-ионных аккумуляторов являются: снижение емкости, ограниченный срок службы, скорость заряда/разряда, метод зарядки и гистерезис, ограниченная возможность вторичной переработки, вредное воздействие на окружающую среду при изготовлении и высокая стоимость.

Основные причины снижения зарядной емкости литий-ионных ТАБ: деградации анода, катода, электролита, сепаратора и токосъемников. Аккумулятор в ЭМ может использоваться до тех пор, пока не достигнет 80 % своей начальной емкости.

Литий-ионные аккумуляторы имеют очень узкий диапазон рабочего напряжения. и температура. Безопасный диапазон напряжения составляет от 2,3 В (минимальный разряд) до 4,2 В (максимальный заряд).

Типичный график заряда литий-ионного аккумулятора показан на рис. 5. Зарядка происходит в три этапа: заряд постоянным током (объемная заряд), заряд постоянным напряжением (заряд насыщения) и подзарядки. Литий-ионный аккумулятор считается полностью заряженным, когда его напряжение достигает номинального значения (4,2 В) и зарядный ток падает примерно до 3 % от номинального значения. Литий-ионные аккумуляторы не могут поглощать перезаряд. Даже маленькую непрерывный ток после достижения полного заряда приведет к увеличению напряжения на ячейке. Когда напряжение ячейки достигает около 4,7 В, происходит распад электролита и растворителей и образуются легковоспламеняющиеся газы, ведущие к вздутию батареи и дальнейшем к взрыву и возгоранию. Другим последствием перезарядки является литиевое покрытие. При чрезмерном токе после достижения полного заряда ионы лития не могут быстро аккомодироваться внутри слоев углерода, в результате чего ионы лития накапливаются на аноде, то есть образуется литиевое покрытие. Следствием это является потеря зарядной емкости и рост дендритов.

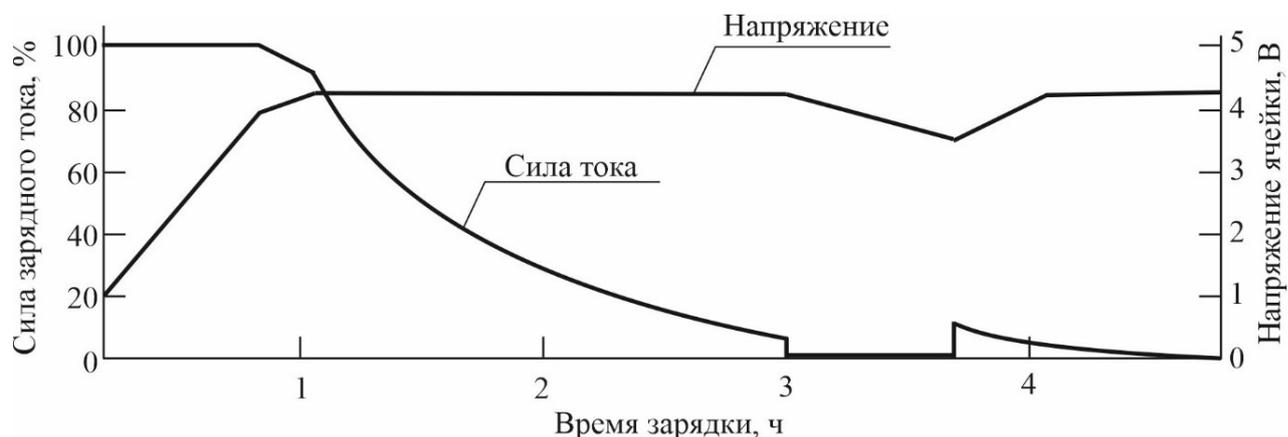


Рисунок 5 – Зарядка литий-ионного аккумулятора

Характеристики различных аккумуляторов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение основных аккумуляторных технологий

Тип аккумулятора	Номинальное напряжение, В	Гравиметрическая плотность энергии, Вт·ч/кг	Удельная мощность, Вт/кг	Объемная плотность энергии, Вт·ч/л	Срок службы, цикл разряд-заряд
Свинцово-кислотный	2,1	30-40	50-120	80-100	1500
Никель-кадмиевый	1,2	40-80	80-200	100-150	2000
Никель-металлогидридный	1,2	70-120	100-300	140-300	2000
Литий-ионный	3,6	120-190	200-400	200-500	1000
Литий-ионный полимер	3,7	130-225	260-450	200-600	1200

Литий-ионный аккумулятор хранит большое количество энергии в довольно небольшом объеме. Однако, когда энергия высвобождается быстро и бесконтрольно (например, из-за внутреннего короткого замыкания, после аварии) ТАБ может взорваться и загореться. К недостаткам добавляются грязная технология изготовления и проблемы утилизации.

Заключение

Преимущества свинцово-кислотных батарей в их низкой стоимости и высокой степени рециклинга, достигающего 99 %, безопасности, хорошей ремонтопригодности.

Список использованных источников

1. Sanjeevikumar, P. Artificial Intelligent Techniques for Electric and Hybrid Electric Vehicles / P. Sanjeevikumar, S. Himavathi. – Beverly : Wiley, 2020. – 261 p.
2. Denton, T. Electric and Hybrid Vehicles / T. Denton. – London : Routledge, 2020. – 209 p.
3. Elgowainy, A. Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles / A. Elgowainy. – New York : Springer Science+Business Media, LLC, 2021. – 299 p.