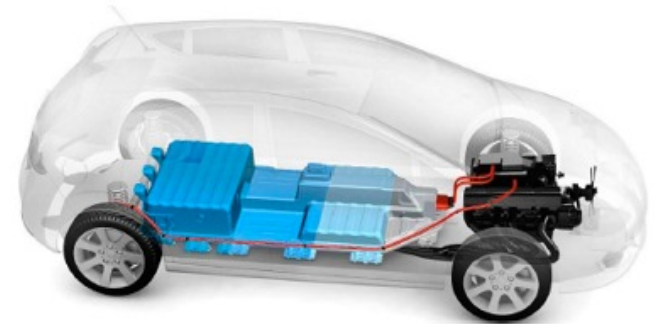


О.Н. ДИДМАНИДЗЕ, Е.П. ПАРЛЮК

УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ  
РЕЖИМОМ АККУМУЛЯТОРОВ  
ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ



УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Москва, 2024

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.Э. БАУМАНА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

# **Управление температурным режимом аккумуляторов электромобилей**

Учебное пособие

Москва - 2024

УДК 621.355.9

ББК 31.251

Рецензент:

Хакимов Рамиль Тагирович

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автомобилей, тракторов и технического сервиса ФГБОУ ВО Санкт-Петербургского государственного аграрного университета.

**Парлюк Е.П., Дидманидзе О.Н. Управление температурным режимом аккумуляторов электромобилей. Учебное пособие / Е.П. Парлюк, О.Н. Дидманидзе – М. : ООО «Сам Полиграфист», 2024. – 128 с.**

ISBN 978-5-00227-340-9

В учебном пособии рассмотрено общее представление о системах терморегулирования аккумуляторных батарей для электромобилей. Рассмотрено влияние температуры на производительность и безопасность литий-ионных аккумуляторов. Проанализировано изменение тока разряда в зависимости от температуры, а также остаточной емкости батареи от пробега электромобиля. Определены причины уменьшения ресурса аккумуляторной батареи в зависимости от температурного диапазона.

Представлена численная оценка терморегулирования снижения емкости аккумуляторов в электромобилях. Изложены методы управления температурным режимом аккумуляторов электромобилей, а также влияние температуры на скорость старения литий-ионного аккумулятора.

Проанализировано влияние емкости и напряжения аккумулятора на производительность электромобиля. Рассмотрены принципы зарядки силовой батареи электромобиля, режимы работы зарядного устройства, вопросы зарядной инфраструктуры, а также влияние быстрой зарядки на срок службы аккумулятора электромобиля.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия» и аспирантов, обучающихся по научной специальности 4.3.1. «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса», а также инженеров и технологов, занятых в производстве и эксплуатации энергетических средств на электроприводе и возобновляемых источниках энергии.

ISBN 978-5-00227-340-9

УДК 621.355.9

ББК 31.251

© Парлюк Е.П.

Дидманидзе О.Н., 2024

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ.....	7
1.1. Аккумуляторные системы электромобилей и их развитие .....	7
1.2. Введение в аккумуляторные системы электромобилей.....	14
1.3. Зарядка аккумулятора электромобиля.....	21
1.4. Принцип зарядки силовой батареи электромобиля.....	27
1.5. Контроль температуры аккумуляторных батарей.....	31
1.6. Заряд аккумуляторов в режимах CC/CV .....	34
1.7. Состояния заряда аккумуляторных батарей .....	38
1.8. Влияние глубины разряда на ресурс .....	41
1.9. Резервная (запасная) емкость литий-ионных аккумуляторов.....	44
ГЛАВА 2. ОЦЕНКА ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ СНИЖЕНИЯ ЕМКОСТИ АККУМУЛЯТОРОВ В ЭЛЕКТРОМОБИЛЯХ .....	47
2.1. Влияние температуры на производительность и безопасность литий-ионных аккумуляторов.....	47
2.2. Причины уменьшения ресурса аккумуляторной батареи в.....	56
зависимости от температурного диапазона.....	56
2.3. Методы управления температурным режимом аккумуляторов электромобилей.....	62
2.4. Численная оценка терморегулирования снижения емкости аккумуляторов в электромобилях .....	65
2.5. Влияние температуры на скорость старения литий-ионного аккумулятора .....	71
2.6. Модель тепловыделения для литий-ионной батареи, используемой в электромобилях .....	76
2.7. Определение температурных режимов тяговой аккумуляторной батареи электробуса .....	80
2.8. Модель жизненного цикла аккумуляторных батарей .....	86
ГЛАВА 3. ПОВТОРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И УТИЛИЗАЦИЯ АККУМУЛЯТОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ.....	90
3.1. Старение литий-ионных аккумуляторов электромобилей .....	90

3.2. Моделирование старения и прогнозирования срока службы аккумуляторной батареи .....	97
3.3. Как продлить срок службы литий-ионных аккумуляторов.....	99
3.4. Утилизация аккумуляторов электромобилей.....	107
Выводы .....	118
Список использованных источников .....	123

## ВВЕДЕНИЕ

Сегодня электромобили встречаются на дорогах все чаще, а для многих людей транспорт на электротяге – это уже не какой-то эксперимент, а вполне «нормальная машина», которую можно купить и ежедневно использовать в личных или коммерческих целях.

Электричество и автомобиль появились одновременно в конце XIX века. Оба изобретения, несомненно, оказали наибольшее влияние на наши индустриальные общества.

Электромобиль (электрический автомобиль) – это транспортное средство, которое приводится в движение одним или несколькими электрическими двигателями. Питание электродвигателя может происходить как от аккумуляторной или солнечной батареи, так и от топливных элементов. В настоящее время большинство используемых электромобилей имеют конструкцию с питанием от аккумуляторной батареи.

Статья 42 Конституции РФ гласит: «Каждый человек имеет право на благоприятную окружающую среду, достоверную информацию о ее состоянии и на возмещение ущерба, причиненного его здоровью или имуществу экологическим правонарушением». В связи с возросшими требованиями к экологическим проблемам, связанным с эксплуатацией автомобилей, потреблением ими химических жидкостей, а также выбросом большого количества газов в атмосферу, появилась необходимость решать вопросы выпуска экологически чистых автомобилей, которые не должны нарушать экологического равновесия в природе.

Существует два направления по созданию электромобилей: первое – разработка новых моделей, второе – адаптация серийно выпускаемых автомобилей. Второе направление получило большее распространение по причине того, что является менее затратным.

В России на государственном уровне речь о развитии экологически чистого транспорта идет уже давно. Круглые столы, форумы и конференции проводятся ежегодно, а на практике работы над созданием масштабной единой

сети электрических заправок нет, и не предвидится – практически все немногочисленные зарядные станции устанавливаются за счет средств частных инвесторов. При этом на некоторое время, с 2014 по 2017 год, на импорт электрозаправочных станций и другого оборудования были установлены нулевые таможенные пошлины, но потом и их отменили, так что сейчас зарядное оборудование импортируется на общих основаниях. Похожая ситуация – с импортом самих электромобилей.

Управление температурным режимом продолжает оставаться ключевой темой при проектировании электромобилей. Ранние тенденции на рынке в основном вращались вокруг внедрения активного охлаждения аккумуляторных блоков, теперь это отраслевой стандарт. Тем не менее, батареи, двигатели и силовая электроника в электромобилях продолжают развиваться: разработки аккумуляторных конструкций, двигателей с непосредственным масляным охлаждением и силовой электроники из карбида кремния – это лишь некоторые из ключевых тенденций, которые повлияют на стратегии управления температурным режимом во всем мире.

# ГЛАВА 1. СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

## 1.1. Аккумуляторные системы электромобилей и их развитие

На мировом автомобильном рынке меняется тенденция развития автомобилей с двигателем внутреннего сгорания на электромобили из-за растущих проблем загрязнения окружающей среды, связанных с выхлопными газами, ужесточения международных санкций, перспективами истощения запасов нефти и сохраняющимися высокими ценами на нефть. Экологически чистые электромобили становятся мощной альтернативой для устойчивого развития окружающей среды, поскольку они считаются эффективным средством сокращения глобальных выбросов парниковых газов. Более того, из-за давления роста стоимости топлива потребители предпочитают автомобили с меньшими затратами на горючее, поэтому показатели продаж электромобилей и гибридных автомобилей в развитых странах увеличиваются.

Поэтому емкость и эффективность аккумуляторной батареи, который является ключевым компонентом для работы электромобиля, становятся самым важным фактором для электромобиля, а пробег в соответствии с характеристиками становится большой проблемой. В связи с этим растет интерес производителей автомобилей и потребителей автомобилей к решению данной проблемы.

Состояние заряда измеряет оставшийся уровень заряда относительно максимально доступной емкости.

Конкуренция в сфере электротранспорта рождает новые технологии, предприятия, бизнес-модели — и в конечном счете формирует новые рынки. В ближайшие два-три года открывается «окно возможностей» для «опережающего старта» и достижения лидерских позиций на формирующемся рынке электромобилей. Фактически сейчас завершается стадия становления глобального рынка, по всему миру быстро растет общий объем инвестиций в



производство электротранспорта и создание инфраструктуры для него. Последовательность решений, которые будут приняты в этот период, лягут в основу будущей архитектуры глобального рынка – от образовательных и производственных стандартов, организации городской инфраструктуры до новых бизнес-моделей и условий регулирования рынка. В выигрыше окажутся компании, сумевшие к 2024 г. наладить производство, начать продажи и закрепиться на рынке, так как после прохождения «точки перелома» в 2025–2026 гг. структура мирового рынка стабилизируется и новым игрокам придется догонять лидеров и инвестировать значительные суммы, чтобы получить свою долю рынка (рисунок 1.1).

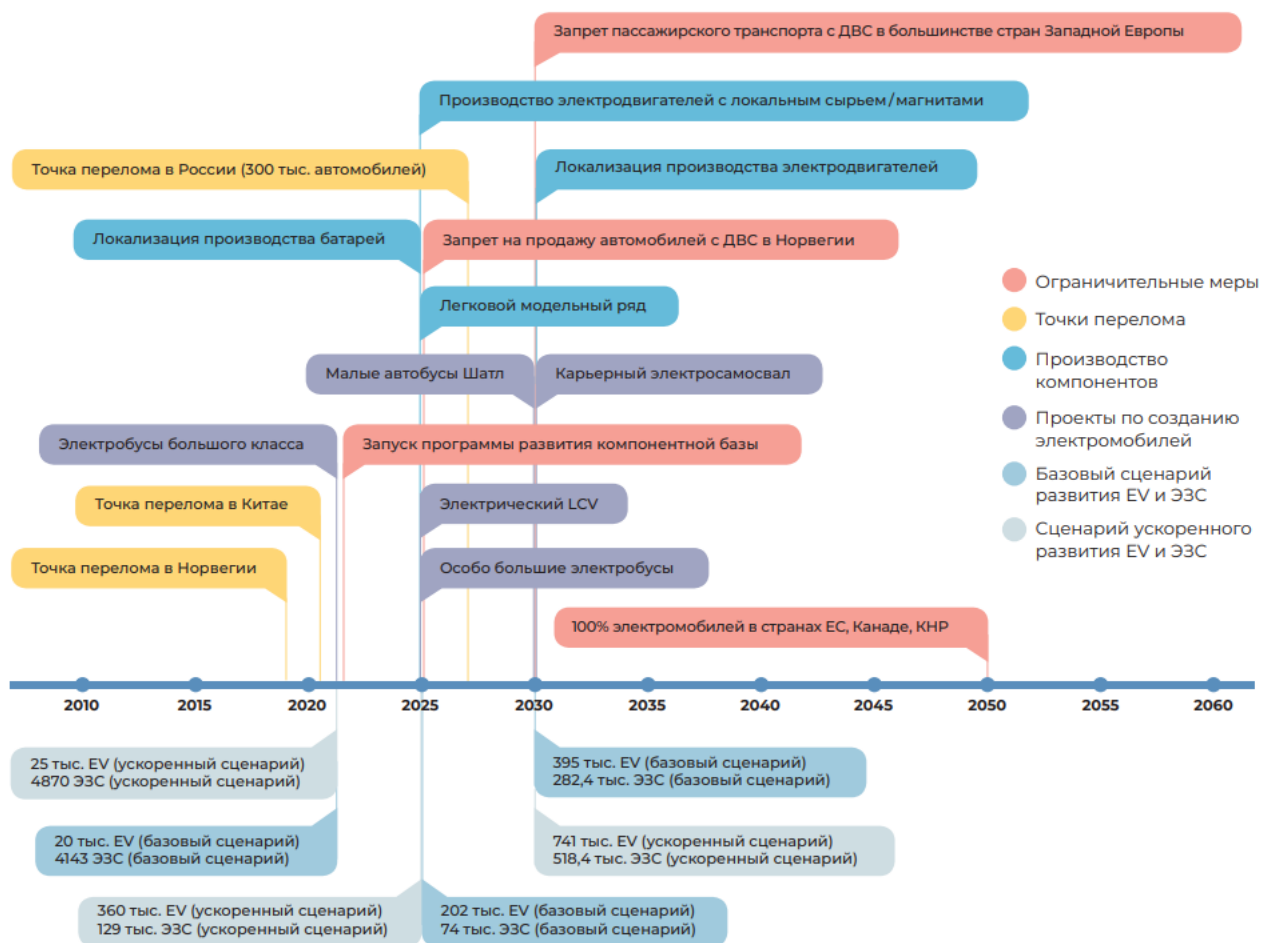


Рисунок 1.1 – Сценарий развития электротранспорта в России

В экспертно-аналитическом докладе «Перспективы развития рынка электротранспорта и зарядной инфраструктуры в России» представлен

сценарий и комплексная политика развития рынка электромобилей в России, которая направлена на подтверждение высокого научно-технологического уровня России на международной арене, значительное улучшение экологии российских городов и стимулирование развития широкого спектра российских «умных» цифровых технологий и производств на рынке.

Мировой рынок электромобилей даже во время пандемии в 2020 г. показал рост 5 % на фоне 18-процентного падения продаж автотранспорта. Автоконцерны еженедельно анонсируют новые модели электромобилей и декларируют отказ от ДВС. Процесс напоминает «волну», которая более 10 лет набирала силу, а теперь захлестывает весь мир и постепенно приходит в Россию.

При этом, развитие электромобилей в любом из сценариев может привести к дефициту электроэнергии и потребует менять планы развития генерирующих мощностей в Российской Федерации [13].

В 2018 году в российском парке числилось всего лишь 3,6 тыс. электрокаров, а в 2019 году он увеличился до 6,3 тыс. единиц, что соответствовало росту в 75%. Этап активного роста парка начался в 2021 году, когда объем продаж новых электрокаров превысил результат 2020 года сразу в 3,1 раза. Соответственно, эти продажи обеспечили рост парка более чем на 75%, что привело к увеличению его численности до 16,5 тыс. штук.

Таким образом, в 2022 году численность российского парка электромобилей составила 21,7 тыс. машин (рисунок 1.2).

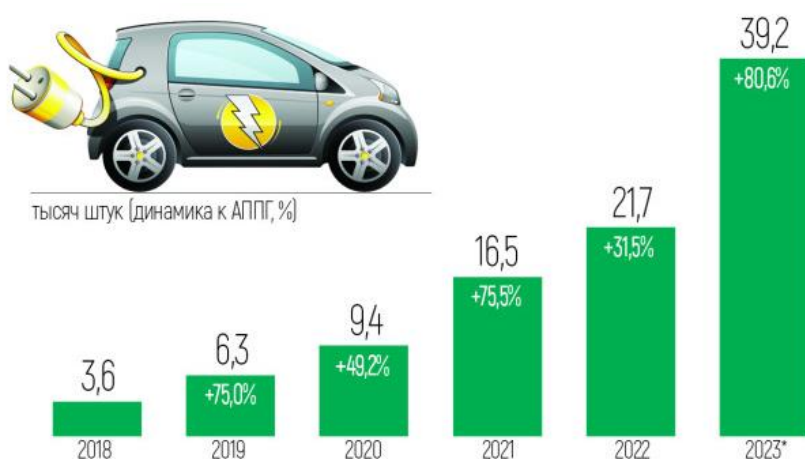


Рисунок 1.2 – Динамика парка электромобилей в России

За последние 5 лет мировой парк электрических транспортных средств увеличился в 9,5 раза (рисунок 1.3). Если по итогам 2018 года во всем мире, по данным IEA, насчитывалось 1,9 млн электромобилей, то к концу 2022-го их стало 18 млн единиц. При этом 10-миллионную отметку «электропарк» преодолел в 2021 году.



Рисунок 1.3 – Динамика мирового парка электромобилей

В нашей стране числится 32,7 тыс. электромобилей и подключаемых гибридов (на 1 июля 2023 года). Такие данные содержатся в обновленном отчете «Электрокары и гибриды в России» [14], подготовленном экспертами агентства «АВТОСТАТ» (рисунок 1.4).

На 1 июля 2023 года в России зарегистрировано  
**32,7 тыс.** электромобилей и подключаемых гибридов.

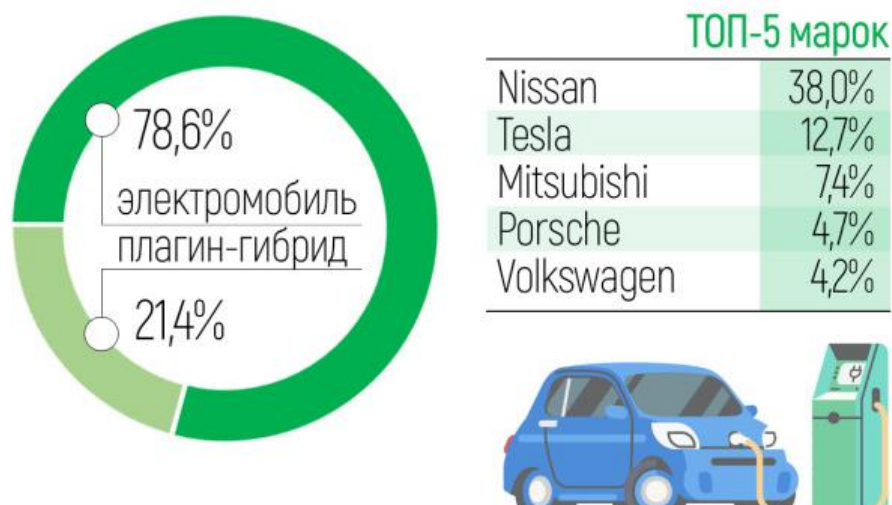


Рисунок 1.4 – Парк электрокаров и гибридов в России

Рост парка электромобилей в России по годам:

2015 год – 41

2016 год – 127

2017 год – 418, из них легковых 125

2018 год – 1535, из них легковых 1252

2019 год – 3157, из них легковых 2864, грузовых 29

2020 год – 8223, из них легковых 7541, грузовых 32

2021 год – 14679, из них легковых 14020, грузовых 42

2022 год – 23726, из них легковых 22533, грузовых 49, прочих 1144

2023 год – ожидаемый рост парка электромобилей должен был  
увеличить его от 30 000 до 32 000

2023 год – число легковых электромобилей (по ноябрь включительно) –  
уже 35 333 шт.

По данным агентства «Автостат», в 2023 году россияне приобретали электромобили более 170 разных моделей, чему способствовал активный ввоз таких машин, в том числе за счет параллельного импорта (рисунок 1.5). Примерно половина всех электрокаров в стране — Ниссаны Лифы, причем почти все машины этой модели праворульные [14].

Важно отметить, что в рейтингах самых популярных моделей есть и премиальные модели — например, Tesla Model Y, Porsche Taycan, Audi e-tron Sportback.

В 2023 году в массовую продажу поступил электромобиль Москвич 3e — лицензионная копия китайского кроссовера JAC e-JS4, которую собирают на бывшем заводе «Рено». К маю 2023 года заводу удалось продать 522 Москвича 3e, бренд тогда даже вошел в десятку лидеров рынка. А в Липецке на мощностях завода «Моторинвест» выпускают китайские модели Dongfeng Aeolus E70 под брендом Evolute.













Новые автомобили	С пробегом
 Zeekr 001	 Nissan Leaf
 Evolute i-PRO	 Tesla Model 3
 Volkswagen iD.4	 Tesla Model S
 Tesla Model Y	 Tesla Model Y
 Volkswagen iD.6	 Tesla Model X
 Evolute i-JOY	
 Москвич 3e	

Рисунок 1.5 – Популярные электромобили в России в 2023 году

В начале 2023 года лидером по количеству электромобилей была Москва, где на учете стояло 3400 электрокаров (рисунок 1.6).

На втором месте – Приморский край: 1700 машин. Сказывается близость к Японии, откуда импортируют праворульные Ниссаны Лифы. Отметим, что еще три года назад столица уступала Приморью по этому показателю.

На третьем месте Иркутская область, которая по числу электрокаров догоняет Приморский край. Также в топ-5 входят Краснодарский край и Московская область.

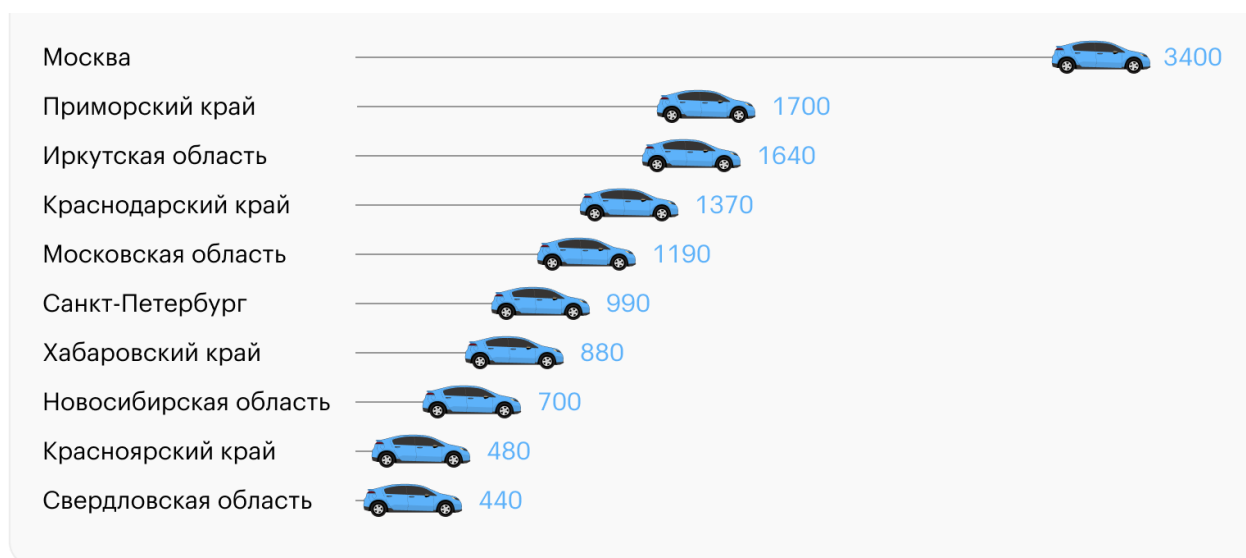


Рисунок 1.6 – Регионы с самым большим количеством электромобилей в 2023 году

Вместе с парком электромобилей растёт и число специализированных станций зарядки. По данным Росстата, в 2015 году в стране их насчитывалось всего 6, а в 2022 году — уже 574 [14].

А вот по данным компании 2Chargers, на которые ссылаются «Ведомости», в России насчитывается около 4500 точек для подзарядки электрокаров, из которых 779 — точки быстрой зарядки. По информации Минэкономразвития, в России в 2022 году установили 439 быстрых и 783 медленные зарядки. В 2023 году суммарно должны были поставить 2822 станции, в 2024 году — до 3 тысяч. Смогли ли власти выполнить прошлогодний план, пока неизвестно.

Государство поддерживает развитие электродвижения в России: например, бизнес, который устанавливает зарядные станции, получает из бюджета до 60% их стоимости, до 1,86 млн рублей. Также власти субсидируют стоимость зарядки — вернуть могут до 30% затрат, до 900 тысяч рублей. Власти считают, что люди начнут чаще покупать электрокары, если поймут, что им есть где заряжать свои автомобили.

## 1.2. Введение в аккумуляторные системы электромобилей

Электромобиль – это безрельсовое транспортное средство с автономным химическим источником тока (напряжения) используемым в качестве источника энергии для движения.

Силовой агрегат электромобиля служит намного дольше, чем двигатель внутреннего сгорания, сам электромобиль также значительно долговечнее, чем автомобиль с ДВС. Аккумуляторная батарея – вот единственный проблемный элемент электромобиля, так как нуждается в интенсивном обслуживании и замене каждые 4-5 лет.

Аккумуляторная батарея является самой важной и дорогостоящей частью электромобиля.

Сегодня на электромобилях чаще всего устанавливаются [10,23]:

- свинцово-кислотные аккумуляторы (СК);
- никель-кадмиевые аккумуляторы (Ni-Cd);
- железоникелевые аккумуляторы (Ni-Fe);
- никель-металлгидридные аккумуляторы (Ni-MH);
- натриево-серные аккумуляторы (Na-S);
- никель-хлоридные аккумуляторы (Ni-Cl).

Перспективные источники энергии для электромобилей:

- литий-ионные сульфидные аккумуляторы;
- литий-полимерные аккумуляторы;
- жидкостные топливные элементы;
- инерционные маховики;
- конденсаторы сверхбольшой емкости.

По сравнению со свинцово-кислотными батареями и никель-металлгидридными аккумуляторами литий-ионные аккумуляторы обладают более высокой энергией и удельной мощностью, а также большей долговечностью и, следовательно, широко применяются на электромобилях. Как сложный электрохимический источник питания, производительность

литий-ионной батареи в значительной степени зависит от ее рабочей температуры.

В таблице 1.1 приведены основные параметры аккумуляторов, используемых в электромобилях.

Таблица 1.1 – Параметры тяговых батарей электромобиля

Тип	Плотность энергии, Втч/кг	Количество циклов заряда/разряда	Ток заряда/разряда С	Рабочая температура, °С	Номинальное напряжение, В
Свинцово-кислотный аккумулятор	35 – 50	300 – 500	0,1/2	–20 ....+40	2,1
Никель-кадмиевый аккумулятор Ni-Cd	50-80	500	1/15	–20 ....+50	1.2
Никель-металлгидридный аккумулятор Ni-MH	50 – 100	800	1/5	–20 ....+50	1.2
Литий-фосфатный аккумулятор LiFePO <sub>4</sub>	90 – 120	3000	5/30	–20 ....+60	3.7
Литий-полимерный аккумулятор Li-PO	130 – 220	500	2/25	–20 ....+50	3.7
Литий-ионный аккумулятор Li-ion	160 – 200	1000	5/30	–20 ....+50	3,6
Литий-титанатный аккумулятор (LTo)	70 – 80	20000	5/20	–20 ....+55	2.4
Графеновый аккумулятор	1000	8000	100/100	–20 ....+60	2,3

В настоящее время существует достаточно большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей, посвященных выбору и оценке



аккумуляторных батарей. Вместе с тем выбор оптимального источника энергии тягового привода электромобиля не обоснован.

Наибольшее количество своей энергии аккумулятор отдает на линейном участке разрядной кривой [8].

Средняя энергия, отдаваемая аккумулятором на линейном участке разрядной кривой  $E_{cp}$  рассчитывается по формуле:

$$E_{cp} = U_{cp} I_{cp} t \quad (1.1)$$

где  $U_{cp}$  – среднее разрядное напряжение;  $I_{cp}$  – разрядный ток;  $t$  – время.

Размеры средней отдачи энергии  $E_{cp}$  для различных типов аккумуляторных батарей представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Средняя отдаваемая энергия ТАБ

Тип аккумуляторной батареи	$E_{cp}$ , Вт·ч
Свинцово-кислотная	1,17
Никель-кадмиевая	0,89
Никель-металлогидридная	0,93
Литий-ионная	2,74

Расчетная энергия аккумуляторной батареи электромобиля (пробег 150 км) для движения в черте города составляет в пределах 10 – 15 кВт·ч.

Чтобы представлять примерный порядок массовогабаритных параметров различных ТАБ, рассмотрим, какую массу и объем занимают ТАБ при расчетной энергии 15 кВт·ч (что соответствует примерно 150 км пробега в черте города). Массовогабаритные показатели различных типов ТАБ представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Масса и объем аккумуляторных батарей

Тип аккумуляторной батареи	m, кг	v, л
Свинцово-кислотная	375	150
Никель-кадмиевая	250	100
Никель-металлогидридная	188	78,9
Литий-ионная	84	37,5

Качественная оценка массового показателя накопителя электроэнергии показывает, что для обеспечения, например, количества энергии в 15 кВт·ч масса свинцово-кислотной батареи составляет 375 кг, никель-кадмиевой-250 кг, никель-металлогидридной – 188 кг и литий-ионной – 84 кг [6,37].

Большинство литий-ионных аккумуляторов имеют КПД 95% или более, а это означает, что 95% или более энергии, хранящейся в литий-ионном аккумуляторе, фактически могут быть использованы. И наоборот, эффективность свинцово-кислотных аккумуляторов составляет от 80 до 85 процентов (таблица 1.4)

Таблица 1.4 – КПД аккумуляторных батарей

Тип аккумуляторной батареи	$\eta$ , %
Свинцово-кислотная	0,83
Никель-кадмиевая	0,625
Никель-металлогидридная	0,87
Литий-ионная	0,97

Для указания номинальной емкости производители используют расчет выдаваемого аккумулятором тока в течении стандартного времени (если не указано значение этого времени в спецификациях, то оно обычно равно 20 часам для больших аккумуляторов). То есть, если в маркировке аккумулятора указано, что его емкость равна 100А\*ч, то это означает, что он может питать нагрузку током 5А в течение 20 часов.

Все бы было хорошо, но имеется одна не очень приятная закономерность: чем больше нагрузка на аккумулятор, тем меньше процент отдаваемой емкости (аккумулятор 100А\*ч может выдавать ток 100А в течении менее 1 часа), т.е. реальная мощность аккумулятора уменьшается с увеличением тока нагрузки. Но при движении электромобиля с остановками происходит частичное восстановление емкости.

Причина этого явления связана с тем, что внутри аккумулятора ток течет благодаря ионной проводимости. Если ионная проводимость электролита достаточно высока и не несет особого значения, то процесс переноса ионов внутри пластин аккумулятора и преодоление ими фазового раздела поверхность электрода электролит происходит достаточно медленно. То есть при быстром разряде какая-то часть ионов не успевает выйти из электрода в электролит (или войти из электролита в электрод) за время разряда, что ограничивает выдаваемую аккумулятором емкость [2].

Емкость аккумулятора электромобиля измеряется в киловатт-часах или кВт·ч – той же единице, которую записывает ваш домашний электросчетчик для определения ежемесячного счета за электроэнергию.

В мире электромобилей киловатт-часы относятся к батареям так же, как галлоны к бензобакам. Но полную батарею нельзя полностью приравнять к полному топливному баку. Все аккумуляторы электромобилей имеют полезную емкость, которая немного меньше полной емкости, поскольку это помогает продлить срок службы аккумуляторной батареи. Этот буфер предотвращает его полную зарядку. Например, аккумуляторная батарея Audi Q8 e-tron имеет общую емкость 114 кВт·ч, но ее полезная емкость составляет 106 кВт·ч. Большинство автопроизводителей рекламируют полную мощность.

Большинству электромобилей не нужна выдающаяся динамика – машине, которая должна ездить каждый день, куда важнее иметь максимальный запас хода, который определяется емкостью батареи. И если первые серийные электромобили с трудом проезжали 100 км от розетки до

розетки, то средний пробег современных электрокаров на одной зарядке составляет уже 300–400 км. Это делает эксплуатацию электрических машин – с дневными пробегами в 50–70 км – действительно удобной. Уже есть модели, способные проехать по 600–800 километров, а с развитием технологий инженеры обещают запас хода для обычного электрокара в 800–1000 км, что сопоставимо с автомобилями с традиционным ДВС [10].

Как и размеры топливных баков, емкость аккумуляторной батареи электромобиля варьируется в зависимости от автомобиля. Небольшие электромобили, такие как Chevrolet Bolt EV, обычно имеют меньшую мощность — от 60 до 75 кВт·ч. Однако есть некоторые исключения из электромобилей ближнего радиуса действия, мощность которых составляет от 30 до 40 кВт·ч. Большие электрические внедорожники, такие как Tesla Model X и Mercedes-Benz EQS SUV, имеют аккумуляторы большего размера, емкость которых варьируется от 100 до 120 кВт·ч. Но некоторые аккумуляторные блоки еще больше. Емкость большого аккумуляторного блока в Rivian R1T и R1S составляет 135 кВт·ч, а аккумуляторного блока очень большого и очень мощного грузовика GMC Hummer EV — более 200 кВт·ч.

Для энергетически оптимизированного использования отдельных потребителей электроэнергии необходима интеллектуальная концепция контроля температуры. Для этого в автомобиле реализовано несколько контуров регулирования температуры, обеспечивающих разные уровни температуры.

Энергия передается через теплообменники и тепловые насосы, которые затем используются, например, для обогрева салона. Энергоэффективные насосы регулируют объемный расход средства регулирования температуры таким образом, что вместе с регулируемой разницей температур можно очень точно контролировать количество передаваемого тепла. Поскольку в настоящее время батареи составляют до 40 процентов стоимости электромобиля, их работа с оптимизированной температурой особенно важна.

Производительность электромобиля сильно зависит от производительности его высоковольтного аккумуляторного блока, на который влияет температура. Температура аккумуляторных систем для транспортных средств с электрическим приводом напрямую влияет на динамические характеристики автомобиля, долговечность и стоимость аккумуляторных систем.

Аккумуляторные батареи электромобилей максимально эффективно работают только в определенном диапазоне температур. Регулирование и контроль нагрева, вызванного зарядкой и разрядкой батареи, является важнейшим условием для обеспечения безопасности и долгого срока службы аккумуляторной батареи. Добиться этого непросто, но при правильном подходе можно получить огромные преимущества с точки зрения массы, стоимости и углеродного следа [16].

Температура батареи меняется не только в зависимости от изменения температуры окружающей среды, но и из-за внутреннего тепловыделения во время зарядки и разряда. Следовательно, тепловыделение литий-ионной батареи в процессе зарядки/разрядки должно быть детально проанализировано, чтобы гарантировать точность прогнозирования температуры батареи.

С точки зрения эффективности заряда важным показателем является отношение:

$$\Delta = \frac{C_{\text{раз}}100}{C_{\text{зар}}} \quad (1.2)$$

где  $C_{\text{раз}}100$  – полная разрядная емкость аккумулятора;  $C_{\text{зар}}$  – емкость, переданная аккумулятору при заряде для обеспечения 100% зарядной мощности.

Глубина разряда означает процент емкости, разряженной аккумулятором, по отношению к общей доступной емкости.

Емкость аккумулятора сильно влияет на производительность электромобиля, а емкость аккумулятора зависит от температуры его ядра.

Скорость зарядки и разрядки аккумулятора зависит от температуры аккумулятора. Таким образом, это делает температурный контроль аккумуляторной батареи электромобиля чрезвычайно важным. Контроль температурных факторов в электромобилях – ключевой компонент повышения общей эффективности транспортного средства [19].

Напряжение, ток и температура аккумулятора изменяются в зависимости от температуры окружающей среды в условиях эксплуатации электромобиля.

### **1.3. Зарядка аккумулятора электромобилей**

Время зарядки аккумулятора электромобиля зависит от его размера, скорости используемого зарядного устройства и уровня заряда аккумулятора, когда автомобиль подключен к сети. Большинство владельцев заряжают свои электромобили дома, потому что это наиболее удобно и Самый доступный способ зарядки. Большинство электромобилей поставляются с шнуром для зарядки, но если его нет, владельцы могут купить его у производителя. Также доступны шнуры вторичного рынка.

Зарядные шнуры можно подключать к стандартной бытовой розетке на 120 В, того же типа, которая питает и заряжает повседневную электронику. Это называется зарядкой уровня 1. Это самый простой способ зарядки, но и самый медленный. Если аккумулятор почти разряжен после долгой поездки, его полная зарядка может занять более двух дней.

Большинство владельцев электромобилей устанавливают домашнее зарядное устройство на 240 В, называемое уровнем 2, которое заряжает электромобили значительно быстрее. Но домашнее зарядное устройство стоит дороже, и вам, возможно, придется установить розетку на 240 В [17].

Например, для полной зарядки аккумулятора Bolt EV требуется семь часов с помощью 240-вольтового зарядного устройства. Но поскольку большинство владельцев заряжают аккумулятор ежедневно, чтобы поддерживать заряд своего электромобиля, зарядка аккумулятора до

желаемого процента после обычного дня вождения займет всего около часа. Зарядные устройства уровня 2 также доступны на общественных зарядных станциях.

В настоящее время методы зарядки электромобилей включают медленную зарядку, быструю зарядку, замену аккумулятора, беспроводную зарядку и мобильную зарядку, но большинство электромобилей на рынке поддерживают только медленную и быструю зарядку и оснащены интерфейсами медленной и быстрой зарядки [3].

1. Медленная зарядка (обычная зарядка, автомобильная зарядка) подходит для автомобильных зарядных устройств и домашних настенных зарядных устройств. Ток и мощность относительно невелики, а общее время зарядки занимает 6-8 часов.

2. Быстрая зарядка (наземная зарядка, аварийная зарядка) включает в себя две формы зарядных станций и мобильные зарядные устройства. В основном он заряжает аккумулятор напрямую большим током через внешнее зарядное устройство, поэтому аккумулятор можно зарядить примерно до 80% за короткое время. , Как правило, его можно полностью зарядить за 1 час.

3. При замене аккумулятора автомобильный аккумулятор заряжается путем замены силового аккумулятора. Когда аккумулятор разряжен, замените аккумулятор малой мощности на полностью заряженный аккумулятор и отправьте замененный аккумулятор на станцию замены для медленной зарядки.

4. Беспроводная зарядка предназначена для автоматического подключения к сети для зарядки и разрядки через плату источника беспроводной зарядки, встроенную в дорогу и парковочное место, без использования проводов и кабелей. Этот способ зарядки удобен и безопасен в использовании, но в массовом производстве он пока не применяется.

5. Мобильная зарядка (МАС) является расширением беспроводной зарядки. Владельцам автомобилей не нужно искать зарядные станции и тратить время на зарядку. Они могут заряжаться во время движения по дороге.

Мобильная зарядная система будет зарыта под участком дорожного покрытия, чтобы обозначить участок зарядки, не требуя дополнительного места.

Самый быстрый способ зарядки — использовать станцию быстрой зарядки постоянного тока или зарядное устройство уровня 3. Но зарядные устройства уровня 3 доступны только на общественных станциях и представляют собой самый дорогой способ зарядки [33].

Hyundai Ioniq 5 – один из самых быстро заряжающихся электромобилей. При подключении к достаточно мощной станции быстрой зарядки он может зарядить аккумулятор с 10% до 80% всего за 18 минут.

В 2022 году в рамках пилотного проекта по развитию зарядной инфраструктуры было установлено 439 быстрых зарядных станций в 12 регионах. Они называются «быстрыми», так как могут заряжать электромобили при помощи постоянного тока мощностью от 150 кВт, — именно на установку таких станций выделяются государственные субсидии. На данных «зарядках» автомобиль может зарядиться за 20-30 минут. Также станция должна быть оснащена двумя коннекторами. Один из них – китайский разъём GB/T, а другой может быть европейским CCS2 или японским CHAdeMO [41].

Данный проект был начат в 2022 году с целью увеличения количества зарядных станций для электромобилей в России (рисунок 1.7). В 2023 году к нему присоединились 28 регионов, а их общее количество достигло 40. К 2024 году количество быстрых зарядных станций должно вырасти до 3 тысяч.

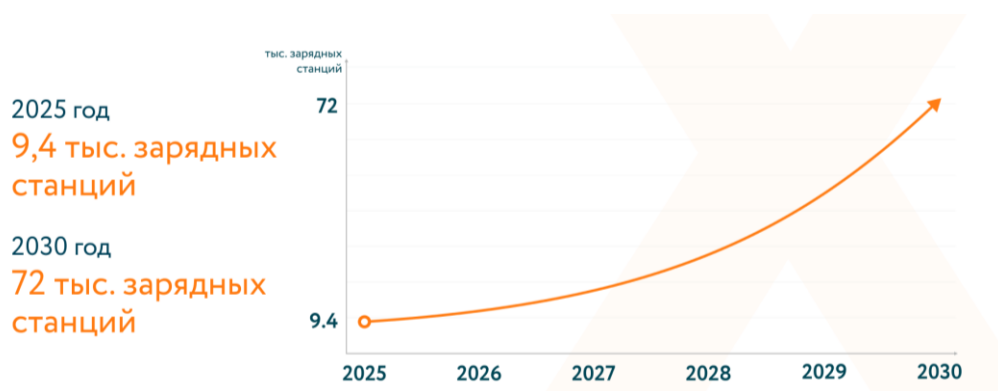


Рисунок 1.7 – Целевые показатели развития зарядной инфраструктуры в России



Количество зарядных станций в регионах слабо коррелирует с количеством электромобилей. По информации сервиса 2Chargers за 2022 год, быстрых точек, которые позволяют зарядить автомобиль на 70—80% за полчаса, больше всего в Татарстане и Подмосковье.

По числу медленных станций, заряжающих машину за несколько часов, лидеры – Москва и Подмосковье, где более 300 точек. В первой пятёрке рейтинга также Краснодарский край, Санкт-Петербург и Приморский край. А вот Иркутская область и Хабаровский край, где распространены электромобили, в первые строчки этого списка не попали [13,14].

Но надо отметить, что электромобиль можно зарядить и от обычной бытовой розетки с напряжением 220 В, хотя процесс занимает в несколько раз больше времени. Если на среднестатистической станции в России на полную зарядку уходит четыре часа, то зарядка от розетки займет больше суток.

Электромобили (EV) с каждым годом приобретают все большую популярность, но все же еще многие водители по-прежнему не решаются использовать их, опасаясь ненадежного запаса хода или опасений по поводу долговечности аккумулятора.

Одно из распространенных опасений связано с влиянием быстрой зарядки на деградацию аккумулятора. Это вполне понятно, учитывая, что производители электромобилей, такие как Kia и даже Tesla, рекомендуют экономно использовать быструю зарядку в подробном описании характеристик некоторых своих моделей.

Частая быстрая зарядка (постоянным током) может несколько ухудшить состояние аккумулятора быстрее, чем зарядка переменным током, влияние на состояние аккумулятора очень незначительное. Фактически, зарядка постоянным током увеличивает износ батареи в среднем лишь примерно на 0,1%. Правильное обращение с аккумулятором в большей степени связано с контролем температуры, поскольку литий-ионные (Li-ion) аккумуляторы электромобилей чувствительны к высоким температурам. К счастью,

большинство современных электромобилей имеют встроенные системы управления температурой для защиты аккумулятора даже во время быстрой зарядки.

Быстрая зарядка, также известная как зарядка уровня 3 или зарядка постоянным током, относится к самым быстрым доступным зарядным станциям, которые могут зарядить ваш электромобиль за считанные минуты, а не часы [18].

Выходная мощность варьируется в зависимости от зарядной станции, но устройства быстрой зарядки постоянного тока могут обеспечивать от 7 до 50 раз больше мощности, чем обычная зарядная станция переменного тока. Хотя такая высокая мощность отлично подходит для быстрой дозаправки электромобиля, она также выделяет значительное количество тепла и может подвергнуть аккумулятор нагрузке.

Статистически установлено, что за два года быстрая зарядка более трех раз в месяц увеличила деградацию батареи на 0,1 % по сравнению с водителями, которые никогда не использовали быструю зарядку.

При тестировании двух одинаковых автомобилей Nissan Leaf, заряжавшиеся два раза в день в течение года: один автомобиль использовал только обычную зарядку переменного тока, а второй исключительно быструю зарядку постоянным током.

После почти 85 000 километров пути авто, который заряжался исключительно с помощью быстрых зарядных устройств, потерял 27% своей первоначальной емкости, а авто, который использовал зарядку переменным током, потерял 23% своей первоначальной емкости аккумулятора.

Таким образом, регулярная быстрая зарядка действительно ухудшает состояние батареи больше, чем зарядка переменным током [20].

Зарядка уровня 3 — удобное решение для быстрой зарядки в пути, но на практике вы, вероятно, обнаружите, что обычная зарядка переменным током адекватно отвечает вашим повседневным потребностям.

Фактически, даже при самой медленной зарядке уровня 2 электромобиль среднего размера все равно будет полностью заряжен менее чем за 8 часов , поэтому использование быстрой зарядки вряд ли станет ежедневным опытом для большинства людей.

Поскольку быстрые зарядные устройства постоянного тока намного громоздки, дороги в установке и требуют гораздо более высокого напряжения для работы, их можно найти только в определенных местах, и их использование, как правило, значительно дороже, чем общественные зарядные станции переменного тока.

Нельзя отрицать, что быстрая зарядка остается неотъемлемой частью ландшафта электрической мобильности и важнейшим инструментом для практических путешествий на дальние расстояния на электромобилях. И, как мы видели выше, периодическая быстрая зарядка не нанесет вреда вашей батарее и не уменьшит ее емкость каким-либо существенным образом.

Тем не менее, есть несколько рекомендаций, которые следует учитывать при быстрой зарядке, чтобы ее влияние на аккумулятор было минимальным. Во-первых, следует стараться избегать быстрой зарядки в очень жаркие дни или, если вы это делаете, старайтесь делать это в тени, чтобы предотвратить перегрев аккумулятора [34].

Хотя можно заряжать аккумулятор в холодную погоду, не причиняя вреда аккумулятору, но следует ожидать более медленной скорости зарядки и более длительного времени зарядки, поскольку система управления аккумулятором автомобиля (BMS) снижает мощность для оптимизации зарядки и защиты аккумулятора.

Рекомендуется поддерживать уровень заряда любого литий-ионного аккумулятора на уровне от 20 до 80%, поскольку чрезвычайно низкий или высокий уровень заряда может со временем повредить аккумулятор. Для повседневного использования стоит заряжать свой электромобиль до 80 процентов, а полную зарядку использовать только в дальних поездках, когда это необходимо.

Аккумуляторы электромобилей со временем стареют и при этом теряют часть своей емкости. Тем не менее, потеря мощности незначительна, всего около 2,3% в год, и вряд ли повлияет на ежедневное использование вашего электромобиля или даже будет заметной [23].

Хотя быстрая зарядка может увеличить скорость потери емкости аккумулятора, ее фактический эффект составляет лишь примерно на 0,1% больше потери емкости, чем без использования быстрой зарядки.

#### **1.4. Принцип зарядки силовой батареи электромобиля**

Силовая батарея электромобиля может получать только напряжение постоянного тока, в то время как электросеть/бытовые розетки обеспечивают переменный ток, который не может напрямую заряжать аккумулятор транспортного средства. Требуется преобразование переменного тока в постоянный, а преобразованный постоянный ток может заряжать аккумулятор. Все зарядные батареи переменного тока представляют собой только линии электропитания зарядного оборудования, хотя они могут быть очень интеллектуальными линиями электропитания; Модуль питания интегрирован в блок постоянного тока, в блоке осуществляется преобразование переменного тока в постоянный, а постоянный ток выводится для зарядки аккумулятора.

Блок переменного тока подает питание на бортовое зарядное устройство, а встроенное зарядное устройство выполняет преобразование выпрямления переменного тока в постоянный для зарядки аккумуляторной батареи, в то время как батарея постоянного тока напрямую заряжает аккумулятор [21].

Зарядки для электромобилей априори разные, к сожалению единого стандарта, по примеру mini-USB в производстве электрокаров пока нет (на данный момент ведется работа по внедрению в Европе потенциально единого стандарта с разъемом коннектора CCS Combo 2). Существует 4 типа зарядных

станций, о которых должен быть осведомлен каждый водитель или будущий владелец электромобиля, и несколько видов коннекторов, которыми комплектуются станции и модели электромобилей [24].

### **Типы зарядных станций:**

Уровень 1: Наименее мощный тип зарядки, осуществляемый преимущественно от бытовой сети. Переменный ток – до 16 А, напряжение – 220–240 В, мощность – 2–4 кВт·ч. Интервал подзарядки электромобиля с помощью такого метода, составляет приблизительно 12 часов. Процесс происходит без специального оборудования, при помощи стандартной розетки и специального адаптера переменного тока. На сегодня данный тип практически не применяется для зарядки серийных автомобилей из-за низкой безопасности подключений.

Уровень 2: Стандартный тип зарядной станции переменного тока, использовать которую можно в быту или пользоваться на автозаправочных комплексах. Переменный ток – до 32 А, напряжение – 220–240 В, мощность – до 7–8 кВт·ч. Применяется для зарядки электромобилей всех типов с традиционными разъемами подключаемого коннектора с системой защиты внутри кабеля. Длительность процесса составляет порядка 6–8 часов при емкости аккумуляторных батарей 20–24 кВт·ч.

Уровень 3: Самый мощный режим, используемый на станциях с переменным током. К нему применимы разъемы Type 1 – для однофазной и Type 2 – для трехфазной сети. Постоянный ток – до 63 А, напряжение – 220–230 В, мощность – до 43 кВт·ч.

Уровень 4: Тип зарядных станций в которых применяется не переменный, а постоянный ток. Мощность подобных комплексов для некоторых электромобилей бывает слишком высока. Постоянный ток – до 400 А, напряжение – до 600 В, мощность – до 250 кВт·ч. У тех же, что поддерживают подобный стандарт, аккумуляторы заряжаются до 80% в течении 30 минут. Подобные зарядные комплексы можно встретить на городских парковках и шоссе, хотя они довольно редки в Украине, поскольку

обустройство такого комплекса требует отдельной линии электроснабжения большой мощности. Кроме того, цена данной зарядной станции довольно высокая.

Отдельно стоит отметить тип зарядных станций Tesla Supercharger, которые отличаются от указанных выше обособленностью использования. Это даже не зарядные станции, а нагнетатели энергии, которые в течение 20 минут заряжают батареи до 50% объема, за 40 минут до 80% и за 75 минут до 100%. Tesla Supercharger обеспечивают высокую зарядную мощность 135 кВт постоянного тока (DC). Коннекторы станции в зависимости от региона использования разнятся по форме коннектора, в США они имеют три разъема, в Европе пять, что существенно усложняет эксплуатацию импортированных из Америки в европейские страны электромобилей компании [27].

Зарядные станции также можно классифицировать по принципу использования (таблица 1.5):

- станции, предназначенные для стационарной установки;
- для портативного использования в одном или нескольких местах;
- станции для портативного и стационарного использования.

Таблица 1.5 – Зарядные станции

Зарядные станции			
Скоростные	Ускоренные		
	Стационарные		Портативные
	Персональные	Коммерческие	

Время зарядки может не полностью соответствовать заявленным показателям, поскольку расчеты основаны на зарядке разряженной батареи до полной мощности SoC. Некоторые производители электромобилей считают аккумулятор заряженным, когда он достигает 80 процентов. Время зарядки также сокращается по мере того, как батарея разряжается, поскольку ее

остается меньше. В Таблице 1.6 приведены уровни и время зарядки для уровней 1, 2 и 3.

Таблица 1.6 – Примерное время зарядки оборудования для обслуживания электромобилей.

Уровни заряда	Комплект кабелей уровня 1 1,5 кВт, 120 В переменного тока, 15 А	Уровень 2 Настенный монтаж 6,6 кВт* ч* 240 В переменного тока, 30 А**	Быстрая зарядка постоянного тока уровня 3 20–120 кВт, 400–600 В постоянного тока, до 300 А
Вождение диапазон	8 км за 1 час зарядки	36 км за 1 час зарядки	110, 270 км за 30 минут зарядки
Тойота Приус 4,4 кВт·ч	4 часа	1 час	Н/Д
16 кВт·ч Шеви Вольт	12 часов	3 часа	Н/Д
22 кВт·ч БМВ i3	15 часов	4 часа	24кВт: До 80% за 30 мин.
Nissan Лиф 32 кВт·ч	16 часов	5 часов	50кВт: До 80% за 20 мин.
Шеви Болт 60 кВт·ч	40 часов	10 часов	50кВт: до 80% за 60мин.
Тесла S 85 90 кВт·ч	60 часов	15 часов	120кВт: До 80% за 40 мин.

Электромобили имеют встроенную схему зарядки, и наиболее распространенной является система мощностью 6,6 кВт, у Tesla есть зарядное устройство на 10 кВт.

Электромобили Tesla поставляются с зарядными устройствами мощностью 10 и 20 кВт; Renault использует трехфазные бортовые зарядные устройства мощностью 3–43 кВт.

Для электромобилей на 30 А требуется автоматический выключатель на 40 А. Некоторые электромобили поставляются с более мощными бортовыми зарядными устройствами [35].

## 1.5. Контроль температуры аккумуляторных батарей

Устройство и сам принцип работы аккумуляторных батарей делает их зависимыми от температуры окружающей среды. На юге России даже зимой условия для электромобилей остаются относительно комфортными. Но чем севернее заезжает «электричка», тем больше внимания она к себе требует.

Соблюдение оптимальных температурных условий при эксплуатации Li-ion элементов питания напрямую влияет на их производительность и безопасность использования. Контроль температуры – одно из важнейших условий для корректного применения литий-ионных АКБ и недопущения нештатных ситуаций.

Чтобы увеличить срок службы батареи и решить проблему большей безопасности, все литий-ионные аккумуляторы оснащены системой управления батареями (BMS), которая регулирует и контролирует все аспекты работы батарей, включая зарядку, разрядку, выравнивание и мониторинг элементов питания, а также контроль общей температуры системы.

В переводе с английского, BMS (Battery Management System) – система управления батареями. Понятие слишком широкое, поэтому оно описывает почти все устройства, так или иначе обеспечивающие корректную работу аккумуляторов в данном устройстве, начиная с простых плат защиты или балансировки, заканчивая сложными микроконтроллерными устройствами, подсчитывающими ток разряда и количество циклов заряда (например, как в батареях ноутбуков). Мы не будем рассматривать сложные устройства – как правило, они специфичны и не предназначены для рядового радиолюбителя, а выпускаются только под заказ для крупных производителей устройств [39].

Одна из функций BMS платы – балансировка аккумуляторов в сборке – выравнивание напряжений на последовательно соединенных элементах сборки. Из-за незначительных отличий в емкости элементы в сборке заряжаются неравномерно: когда одни ячейки максимально заряжены, другие остаются с неполным зарядом.



Платы защиты выполняют такие функции:

- оберегают элементы питания и АКБ от повреждений, контролируя их исправность, напряжение, температуру, уровня заряда, токи заряда и разряда;
- увеличивают срок службы аккумуляторных сборок;
- поддерживают эффективную работу АКБ;
- хранят в памяти информацию по числу рабочих циклов, граничным значениям напряжения элементов, зарядного и разрядного тока;
- проводят оценку рабочих параметров в соответствии с допустимыми значениями;
- передают информацию о работе АКБ на внешние управляющие устройства – по проводам или беспроводной связи;
- обеспечивают безопасную работу АКБ, не допускают ее перегрузки по току, избыточного напряжения в процессе зарядки, критического снижения напряжения в процессе разряда;
- при выходе любой из рабочих характеристик за пределы допустимого диапазона – отключают АКБ от нагрузки или ЗУ;
- осуществляют балансировку – выравнивают заряд между всеми аккумуляторными сборками, продлевая их ресурс.

Именно эти электронные контроллеры следят, чтобы напряжение, температура, отдаваемые токи и другие параметры не выходили за установленные границы. В опасных ситуациях они просто отключают АКБ от нагрузки или зарядного устройства, не допуская повышения возникших рисков (перегрева, перезаряда, токовых перегрузок и т.д.).

Эффекты при перегреве гораздо сложнее и опаснее, чем при переохлаждении. Поэтому в большинстве БМС плат реализована защита от перегрева, а об утеплении и подогреве АКБ для зимнего использования нужно позаботиться дополнительно. Датчик температуры позволяет контролировать состояние батареи, включать подогрев при снижении значения ниже установленного минимума и отключать при достаточном нагреве.

Чтобы минимизировать низко- и высокотемпературные эффекты при эксплуатации Li-ion аккумуляторов, нужно поддерживать комфортные температуры при их работе, хранении и зарядке:

в идеале – использовать примерно при +20 °С;

заряжать при +5 ... +20 °С;

хранить при 0 ... +10 °С.

Отклонения от идеальных значений допустимы, но только в пределах установленного рабочего диапазона и без критического приближения к граничным температурам. Иначе снижается производительность и безопасность использования аккумуляторов, происходят необратимые структурные изменения и ухудшаются рабочие характеристики. При правильном выборе и корректном использовании АКБ их тепловыделение невысоко, поэтому естественный отвод тепла становится достаточной защитой от перегрева. Дополнительный контроль рабочих параметров и многофункциональную защиту аккумуляторной батареи обеспечивает BMS плата [15].

При низких температурах замедляется протекание электрохимических реакций и диффузия ионов лития в электродах, снижается ионная проводимость электролитов, повышается их вязкость, увеличивается импеданс направленной миграции ионов лития, растет внутреннее сопротивление, и аккумуляторы временно становятся менее производительными. В плане безопасности минусовые температуры опасны, только если поставить АКБ заряжаться на морозе. Исключение – модели со встроенным предварительным подогревом. Их можно заряжать и при отрицательных температурах окружающей среды.

В электромобилях BMS может выполнять регистрацию данных, отчитываться перед вышестоящим органом Модуль управления (SCM) и улучшают производительность аккумулятора и оптимизируют эксплуатацию транспортного средства, включая следующие аспекты:

- защита от угроз безопасности, таких как пожар и удары током;

- поддержание оптимальных условий эксплуатации (30-40 °С), состояния заряда (SOC), глубины разряда (DOD), SOH, мощность заряда/разряда и балансировка элементов аккумуляторной батареи для увеличения срока службы батареи и эффективности;
- точное прогнозирование оставшегося расстояния движения, которое может выдержать батарея.

Температурный диапазон для каждой батареи варьируется в зависимости от химического состава, используемого для этой конкретной батареи.

Эксплуатация батарей вне их идеального температурного диапазона может отрицательно сказаться на максимальной емкости заряда и сократить общее количество циклов, которые может обеспечить батарея.

Чтобы уменьшить резкие перепады температур, возникающие во время зарядки и разрядки, в большинстве электромобилей используется одна или несколько систем терморегулирования. Эти системы могут включать как пассивные, так и активные системы охлаждения, а также могут включать один или несколько источников нагрева для обогрева батарей в более холодном климате [20]. Эти системы предназначены для поддержания температуры всей аккумуляторной системы, но могут распространяться на мониторинг температуры групп элементов или даже отдельных элементов для предотвращения снижения производительности, учитывая, что выход из строя одного элемента может значительно ухудшить производительность всей батареи. BMS усложняет работу и повышает требования к питанию от батарей, которые они обслуживают, но преимущество намного перевешивает дополнительный вес и затраты на электроэнергию.

## **1.6. Заряд аккумуляторов в режимах CC/CV**

Общепринятым, рекомендуемым всеми производителями литий-ионных аккумуляторов, является алгоритм CC-CV. Это означает, что начинается заряд

стабилизированным током, а при достижении определенного напряжения далее оно стабилизируется на этом уровне. Этот метод близок к методу заряда свинцовых аккумуляторов, отличаясь от него лишь режимом.

Для литий-ионных аккумуляторов настоятельно рекомендуется использовать зарядное устройство CC – CV.

Метод CC – CV начинается с постоянной зарядки при повышении напряжения аккумуляторной батареи.

Когда аккумулятор достигает напряжения отключения при полной зарядке, вступает в силу режим постоянного напряжения и зарядный ток падает (рисунок 1.8).

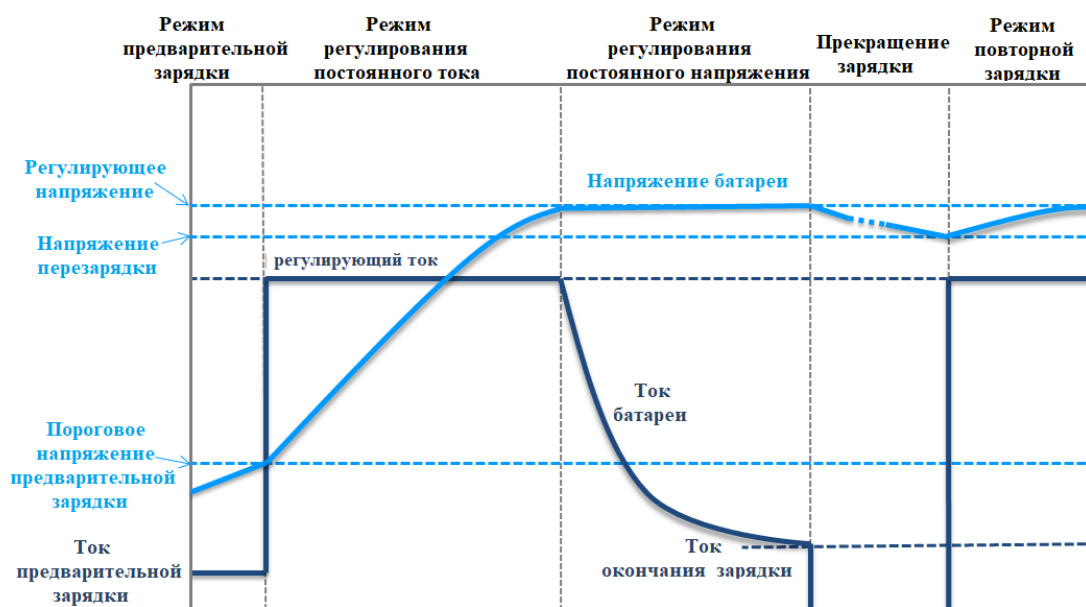


Рисунок 1.8 – Режим работы зарядного устройства

Аккумулятор достигает напряжения полного заряда через некоторое время после запуска системы CV (как только один из элементов достигает напряжение полного заряда). На этом этапе оценка SOS (состояния заряда) на основе напряжения батареи будет означать, что батарея полностью заряжена.

Достижение напряжения полного заряда аккумулятора на этом этапе не означает, что он заряжен на 100%. Сразу после этого этапа срабатывает режим

капельной зарядки, при котором уменьшающийся зарядный ток заряжает оставшуюся емкость аккумулятора, одновременно балансируя элементы.

Когда каждая ячейка сбалансирована и достигла напряжения полного заряда, аккумулятор действительно заряжен на 100%. Один из способов узнать об этом – когда зарядный ток приблизился к 0,05С.

Эта концепция объясняет, почему производители электромобилей не обещают 100% зарядку на станции быстрой зарядки постоянного тока [25].

Для большинства стандартных литий-ионных аккумуляторов напряжение перехода от стадии  $CC$  к стадии  $CV$  при комнатной температуре – 4,20 В. Некоторые старые аккумуляторы с анодом на основе каменноугольного кокса следует заряжать лишь до 4,10 В, тогда как в последнее время все чаще встречаются «высоковольтные» аккумуляторы, которые допускают заряд до 4,35 и даже 4,45 В. Небольшое превышение этого напряжения вызывает резкое сокращение срока службы, а более значительное превышение приводит к возгораниям и взрывам. Требуемая точность установки порогового напряжения для стандартных аккумуляторов составляет  $\pm 50$  мВ, а у «высоковольтных» тем выше, чем выше напряжение, вплоть до  $\pm 5$  мВ при пороговом напряжении 4,45 В. Разумеется, пониженное напряжение приводит лишь к снижению доступной емкости, а вот повышение напряжения недопустимо ни при каких случаях. На рисунке 1.9 показана динамика изменения заряда литий-ионного элемента по методу  $CC - CV$ .

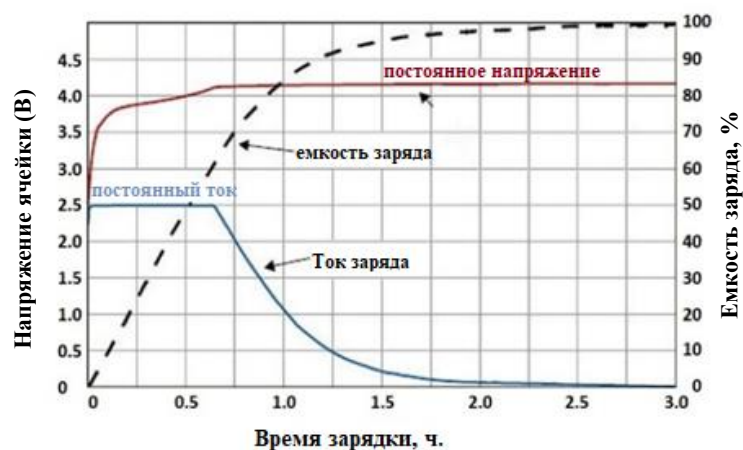


Рисунок 1.9 – Кривая заряда литий-ионного элемента по методу  $CC - CV$

Стандартным током заряда считается  $0,5C$  и большинство аккумуляторов без ущерба позволяют заряжать их током до  $1C$ , а некоторые допускают и более высокие токи при условии недопущения перегрева, где  $C$  – ток в амперах, численно равный емкости в ампер-часах. Но таким током нельзя заряжать глубоко разряженные аккумуляторы, напряжение на клеммах которых снизилось ниже  $2,9-3,0$  В. В этом случае необходима стадия предварительной зарядки (precharge) – аккумулятор заряжается током  $0,05-0,1C$ , пока напряжение не достигнет трех вольт.

А вот слишком глубоко разряженные аккумуляторы заряжать нельзя вообще. Зарядное устройство должно не допускать зарядки аккумулятора, если напряжение на его клеммах снизилось ниже  $2,5$  В. При таком глубоком разряде аккумулятор обычно сильно теряет в емкости, но это еще полбеды: его заряд сопряжен с опасностью металлизации лития и возгорания. Кстати, «высоковольтные» аккумуляторы более чувствительны к глубокому разряду, и не следует допускать их разряда ниже  $2,75$  В.

На стадии  $CV$  ток снижается по экспоненте. На этой стадии аккумулятор не должен оставаться до бесконечности. Заряд должен быть автоматически прекращен после снижения тока до  $0,05-0,1C$ .

На рисунке 1.10 показана кривая заряда литий-ионного элемента, где отображены различные параметры, такие как напряжение, время зарядки, зарядный ток и заряженная емкость. Когда элементы собираются в виде аккумуляторной батареи для какого-либо применения их необходимо заряжать методом постоянного тока и постоянного напряжения ( $CC - CV$ ).

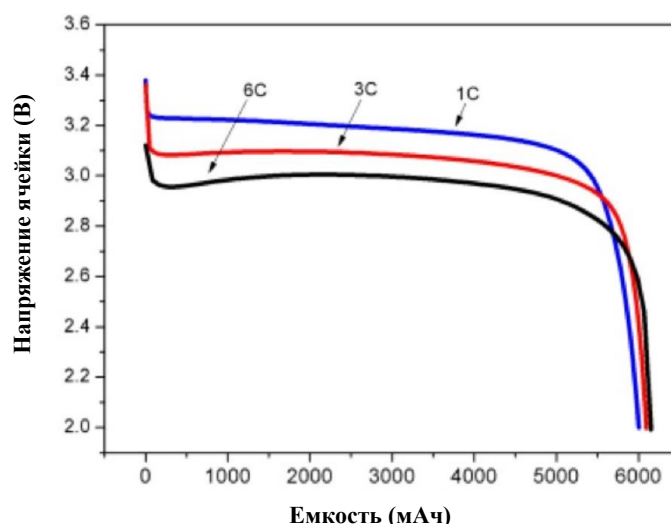


Рисунок 1.10 – Кривая разряда литий-ионного элемента при различной скорости разряда

Кривая разряда литий-ионного элемента отображает зависимость напряжения от разрядной емкости.

### 1.7. Состояния заряда аккумуляторных батарей

Состояние заряда (SOC) – это измерение количества энергии, доступной в батарее в определенный момент времени, выраженное в процентах. По сути, SOC действует как указатель уровня топлива в автомобиле. Он информирует пользователей о том, как долго они могут управлять устройством или машиной, прежде чем у него закончится энергия и он больше не сможет работать. Фактически, считыватели SOC заменили указатель уровня топлива в электромобилях [36].

Состояние заряда батареи (state of charge) отражает показатель, характеризующий степень ее заряженности. Формально SOC может быть выражен как:

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_{max}} \quad (1.3)$$

где  $Q(t)$  – остаточная емкость батареи.

SOC – уровень заряда аккумуляторной батареи, где 0% это полностью разряжен, а 100% полностью заряжен.

Эта взаимосвязь между напряжением и SOC напрямую зависит от используемой аккумуляторной технологии.

Распространенным способом измерения остаточной емкости  $Q(t)$  является использование счетчика ампер-часов, позволяющего определить емкость, принятую при заряде или отданную при разряде батарей, за определенное  $t$  – время.

$$Q(t) = \int_{t_0}^t I(t)dt \quad (1.4)$$

где  $I(t)$  – текущий заряд батареи.

Степень заряда аккумуляторной батареи вычисляется следующим образом:

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{\int_{t_0}^t idt}{Q_0} \quad (1.5)$$

Или

$$SOC(t) = -\frac{i(t)}{Q_0} \quad (1.6)$$

где  $i$  – ток нагрузки, который имеет положительное значение во время заряда и отрицательное во время разряда аккумулятора,  $t$  – время работы, а  $Q_0$  – номинальная емкость аккумулятора.

Истинная емкость аккумулятора зависит от степени работоспособности (SOH) и уменьшается по мере старения аккумулятора.

У всех типов батарей есть одна общая черта: напряжение на их клеммах уменьшается или увеличивается в зависимости от уровня их заряда. Напряжение будет самым высоким, когда аккумулятор полностью заряжен, и самым низким, когда он разряжен [7].

На рисунке 1.11 представлены результаты для литий-ионного аккумулятора ICR18650-22p с номинальным напряжением  $U_0 = 3.6$  (В), максимальной емкостью  $Q_0 = 2,15$  (Ач), пороговым значением напряжения



отсечки  $U_{cut\ off} = 2,75$  (В) и максимальным током продолжительной разрядки  $I_{max} = 10$  (А).

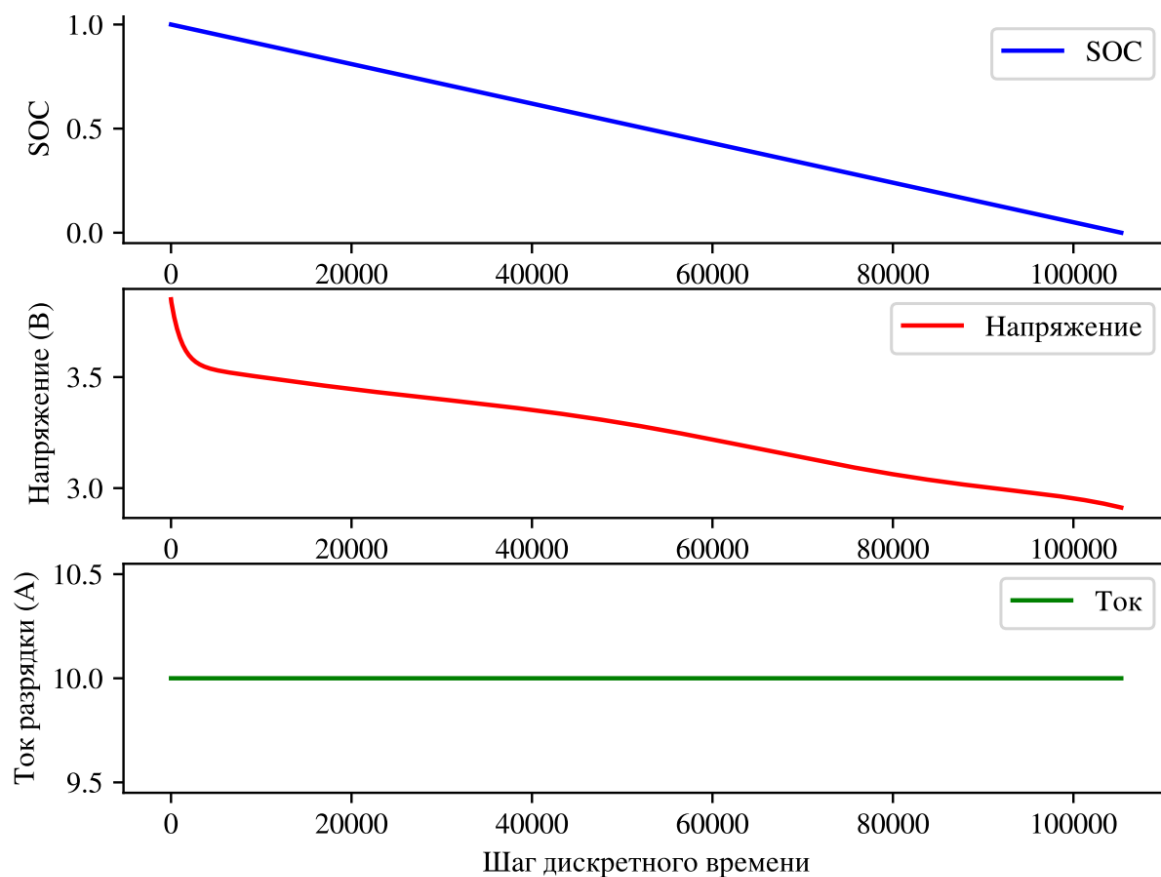


Рисунок 1.11 – Графики зависимостей SOC, напряжения и тока разряда от времени при моделировании разряда аккумулятора постоянным током

На рисунке 1.12 представлены аналогичные зависимости при разряде пульсирующим током с амплитудой  $\Delta I = 10$  (А), коэффициентом заполнения 50% и периодом следования импульсов 20000 шагов дискретного времени.

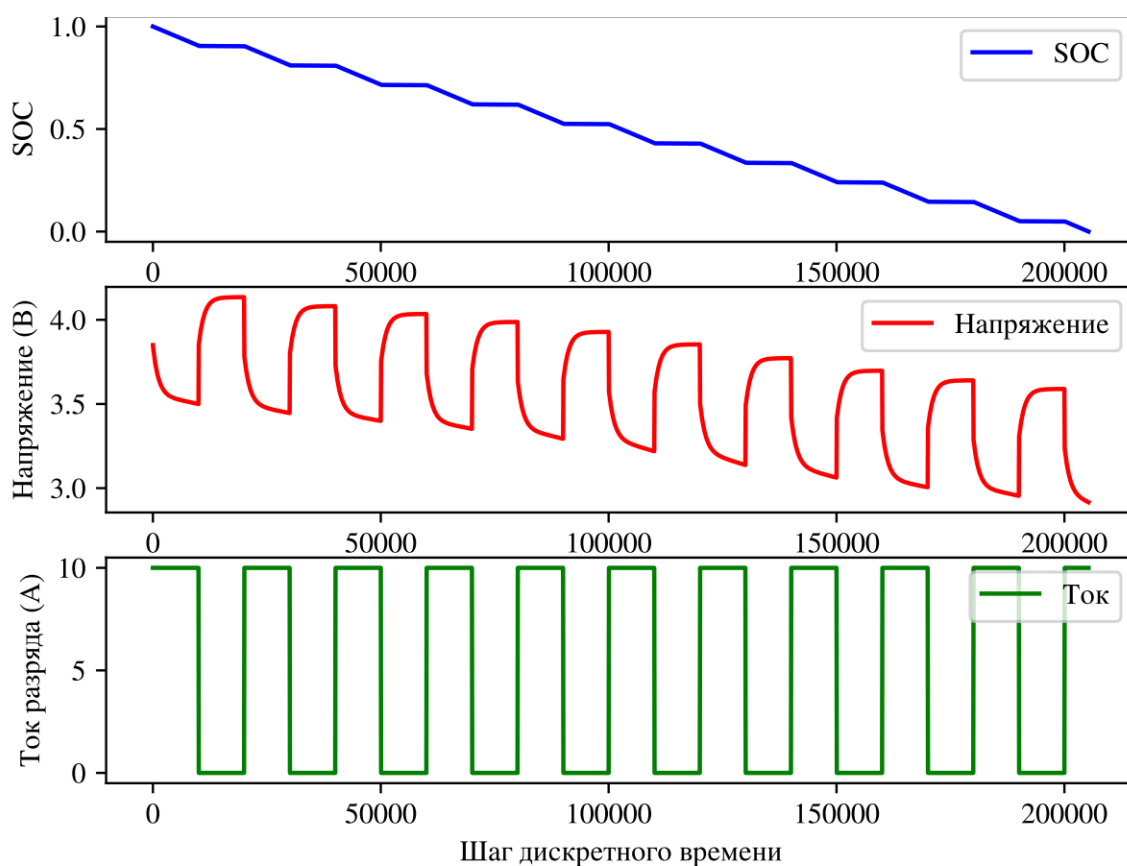


Рисунок 1.12 – Графики SOC, напряжения и тока разряда при моделировании разряда аккумулятора пульсирующим током

### 1.8. Влияние глубины разряда на ресурс

Перезаряд литий-ионных аккумуляторов приводит к необратимой деградации аккумулятора, а также снижению его емкости и мощности. При перезаряде отрицательного электрода происходит осаждение на нем металлического лития. Слишком большой избыток лития за счет несбалансированного исходного соотношения масс положительного и отрицательного электродов является основной причиной осаждения. Потенциал положительного электрода вследствие той же несбалансированности не достигает своего оптимального состояния. Еще одной причиной перезаряда отрицательного электрода является форсированный заряд, приводящий, в ряде случаев, к чрезмерной поляризации электрода [32]. Осаждающийся на углероде литий, быстро реагирующий с

растворителем, образует на поверхности электрода пленку, покрытую слоем соли и других продуктов. Пленка, блокируя поры в углероде, снижает величину его рабочей поверхности, что приводит к уменьшению активности электрода и деградации емкости.

Перезаряд положительного электрода сопровождается целым рядом электрохимических реакций, зависящих от конкретных условий: природы материала электрода, состава электролита, температуры и др. Образование инертного материала также приводит к потере емкости. Высокий уровень потенциала может приводить к экзотермическим реакциям окисления органических растворителей с образованием газообразных и нерастворимых твердых продуктов, в частности,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , блокирующих поры электрода.

Основным путем предотвращения перезаряда литий-ионных аккумуляторов является обеспечение сбалансированности по литию между положительным и отрицательным электродами.

Влияние глубины разряда на ресурс аккумуляторной батареи происходит по-разному для различных химических составов электродов.

Для литий-ионных батарей уровень заряда является одним из факторов, влияющих на ресурс.

Увеличение ресурса можно достичь уменьшением глубины разряда, а также достижением одинакового уровня степени заряженности. При этом эксплуатация в средних диапазонах улучшает ресурс, в отличие от эксплуатации при высоких диапазонах степени заряженности, т.е. неполный заряд батареи также повышает максимальное количество циклов [31].

Глубина разряда подразумевает используемую емкость аккумуляторной батареи в различном диапазоне степеней заряженности. На рисунке 1.13 показаны графики уменьшения емкости.

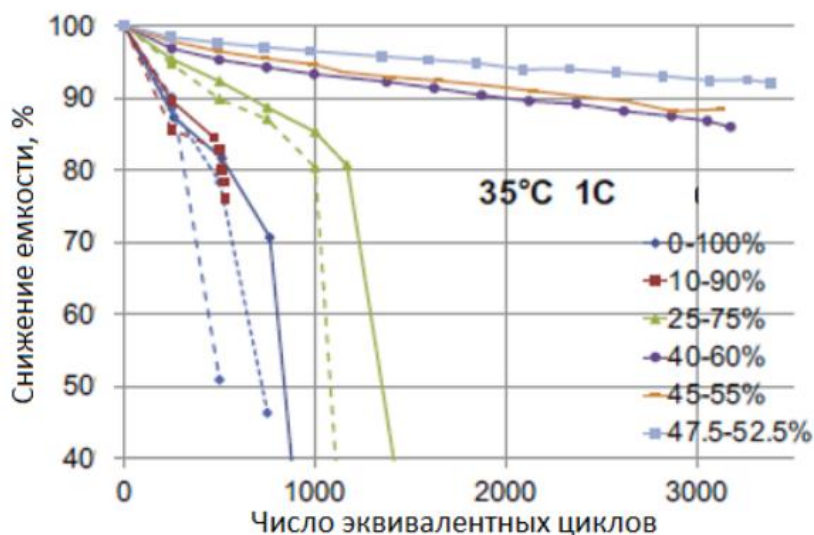


Рисунок 1.13 – Изменение емкости аккумулятора NMC при различных диапазонах степеней заряженности, циклирующим током 1С.

На рисунке 1.14 показаны результаты испытаний на циклирование, при различных уровнях напряжения батареи. Результаты показали, что эксплуатация аккумуляторной батареи наиболее ресурсоэффективна при номинальном значении напряжения.

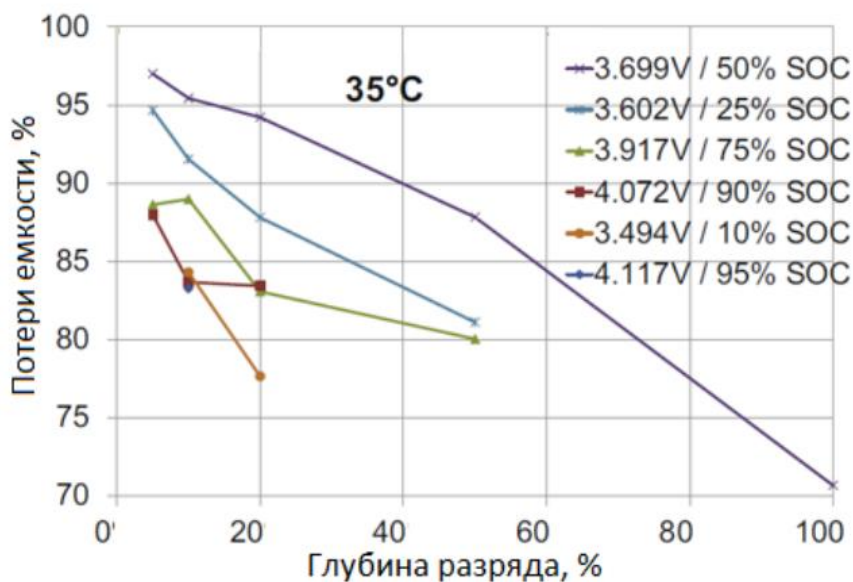


Рисунок 1.14 – Снижение емкости при разных напряжения аккумулятора

Не смотря на низкий уровень напряжения, диапазон между 5 и 15% снижает ресурс аккумулятора. Единичный аккумулятор, циклирующий в диапазоне от 40 до 60%, содержит минимальное снижение емкости батареи. Диапазон 60 – 80% снижает ресурс, эквивалентно нижнему диапазону, что объясняется высоким уровнем напряжения.

Литий-ионные элементы могут заряжаться при температуре от 0<sup>0</sup>С до 60<sup>0</sup>С и разряжаться при температуре от -20<sup>0</sup>С до 60<sup>0</sup>С.

Стандартная рабочая температура 25±2<sup>0</sup>С во время зарядки и разрядки обеспечивает работоспособность элемента в соответствии с его техническими данными.

Элементы, разряжающиеся при температуре ниже 25<sup>0</sup>С, обеспечивают более низкое напряжение и меньшую емкость, что приводит к снижению передаваемой энергии. С другой стороны, элементы, разряжающиеся при температуре выше 25<sup>0</sup>С, обеспечивают более высокое напряжение и большую емкость. Более высокая рабочая температура обеспечивает лучший поток электронов, что приводит к увеличению передаваемой энергии. Но есть и недостаток – сокращение срока службы элемента при работе при более высоких температурах [9].

Еще один экологический аспект – это диапазон относительной влажности. Литий-ионные элементы должны работать при относительной влажности от 0% до 60%.

### **1.9. Резервная (запасная) емкость литий-ионных аккумуляторов**

Аккумулятор работает хорошо, пока он новый, но емкость вскоре начинает снижаться по мере использования и времени. Чтобы обеспечить надежную работу в течение всего срока службы батареи, инженеры-проектировщики увеличивают размер аккумулятора, включив в него некоторую запасную емкость. Это похоже на запас топлива в самолете, чтобы

обеспечить возможность ожидания или попытку второго захода на посадку, когда это необходимо.

Новые аккумуляторы работают (должны работать) на 100 процентов емкости. Все батареи должны иметь безопасный уровень резервной емкости для покрытия наихудших сценариев.

В дополнение к нормальному снижению емкости, низкая температура снижает емкость, особенно литий-ионных аккумуляторов. Потеря емкости литий-ионного энергоэлемента составляет около 17 процентов при 0°C, 34 процента при -10°C и 47 процентов при -20°C. Силовые элементы работают лучше при низких температурах с меньшими потерями мощности, связанными с холодом, чем энергетические элементы.

Недостаток резервной мощности является распространенной причиной сбоев системы. Обычно это происходит во время более плотного, чем обычно, дорожного движения или в чрезвычайной ситуации [38].

Рисунок 1.15 иллюстрирует структуру батареи, включающую снижение емкости и резервную емкость. Если добавить 20 процентов на затухание и 20 процентов на резерв в качестве страховки, останется только 60 процентов фактической емкости.



Рисунок 1.15 – Резервная (запасная) емкость аккумулятора

Резервные мощности следует рассчитывать для наихудшего сценария. Допустимый диапазон мощности 80-100%; для критического использования рекомендуется резервная емкость в размере 20 процентов. Обеспечьте большой резерв мощности при работе при низкой температуре.

Батареи лучше всего работают при комнатной температуре. Согревание разряженной батареи мобильного телефона или фонарика в джинсах может обеспечить дополнительное время автономной работы за счет улучшения электрохимической реакции. Вероятно, это также причина, по которой производители предпочитают указывать аккумуляторы с температурой 27 С. Эксплуатация батареи при повышенных температурах улучшает производительность, но длительное воздействие сокращает срок ее службы.

## ГЛАВА 2. ОЦЕНКА ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ СНИЖЕНИЯ ЕМКОСТИ АККУМУЛЯТОРОВ В ЭЛЕКТРОМОБИЛЯХ

### 2.1. Влияние температуры на производительность и безопасность литий-ионных аккумуляторов

Для поддержания рабочей температуры литий-ионного аккумулятора в оптимальном диапазоне важна и необходима эффективная система управления температурой аккумулятора.

Проблема исследования заключается в том, что в настоящее время в индустрии литий-ионных аккумуляторов нет четкой теории о влиянии температуры на емкость литий-ионных аккумуляторов. Кроме того, соответствующие расчетные формулы и математические модели все еще находятся на стадии исследования.

Закон Джоуля гласит, что количество тепла, выделяемого за секунду, равно потерям мощности в цепи. Это означает, что ток, протекающий в проводниках аккумуляторной батареи электромобиля, будет производить больше тепла, чем мощнее аккумуляторная ячейка. Таким образом, температура является основным ограничивающим фактором при разработке более мощных двигателей электромобилей.

Аккумуляторы электромобилей работают путем преобразования накопленной химической энергии в электрическую энергию. Однако на эту химическую реакцию влияет температура [4].

Типичный график заряда литий-ионного аккумулятора показан на рисунке 2.1. Зарядка происходит в три этапа: заряд постоянным током (объемный 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.



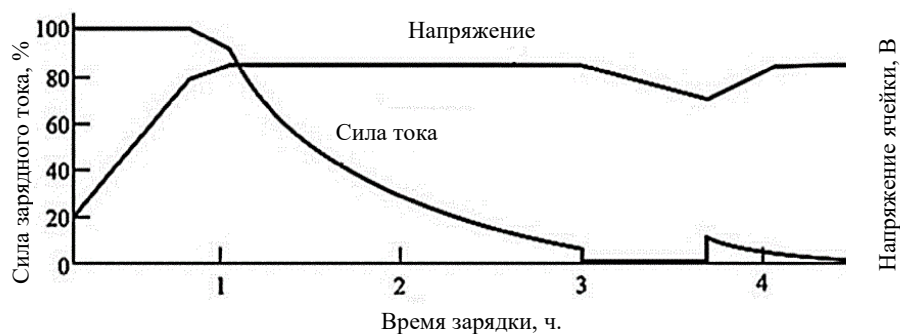


Рисунок 2.1 – Зарядка литий-ионного аккумулятора

Температура эксплуатации литий-ионных аккумуляторов допустима в диапазоне от  $-20$  до  $+60$  °С, а для элементов питания подвида  $\text{LiFePO}_4$  и других морозостойких моделей – от  $-30$  или даже  $-40$  до  $+55$  °С (рисунок 2.2).

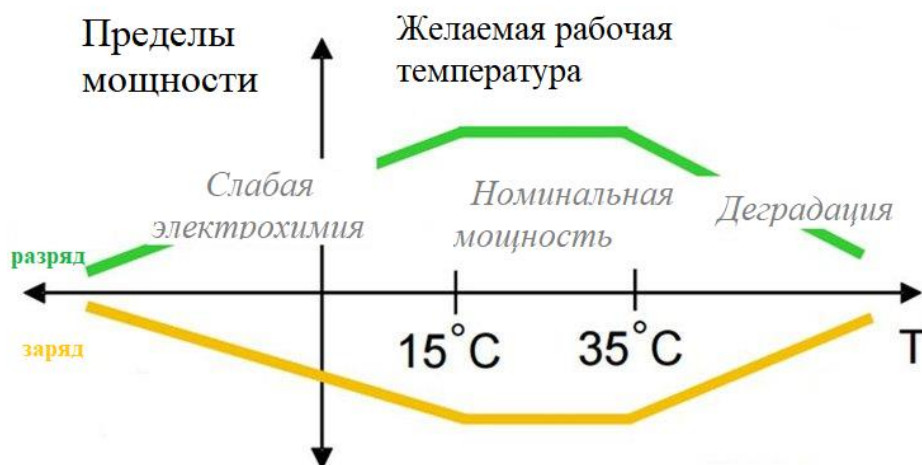


Рисунок 2.2 – Диапазон рабочих температур аккумуляторных батарей

Температура эксплуатации литий-ионных аккумуляторов допустима в диапазоне от  $-20$  до  $+60$  °С, а для элементов питания подвида  $\text{LiFePO}_4$  и других морозостойких моделей – от  $-30$  или даже  $-40$  до  $+55$  °С. Но это не значит, что при всех значениях указанного в инструкции рабочего диапазона аккумуляторы будут работать одинаково [5].

Эксплуатация Li-ion элементов при температурах, близких к граничным значениям, негативно отражается на основных характеристиках АКБ, таких как:

- стабильность напряжения;
- уровень рабочей емкости;
- способность запасать и отдавать энергию;
- время работы без подзарядки;
- циклический ресурс.

Систематическое использование в пограничных режимах приводит к ускоренному износу аккумуляторной батареи и ухудшению ее технических параметров. Выход за границы температурного диапазона недопустим, т.к. в лучшем случае приводит к быстрой деградации химических источников тока и делает эксплуатацию АКБ небезопасной.

Литий-ионные аккумуляторы не могут поглощать перезаряд. Даже небольшой непрерывный ток после достижения полного заряда приведет к увеличению напряжения на ячейке. Когда напряжение ячейки достигает 4,7 В, происходит распад электролита и растворителей и образуются легковоспламеняющиеся газы, ведущие к вздутию батареи и, в 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 этого является потеря зарядной емкости и рост дендритов (волокна из металлического лития). Эти образования могут стать причиной замыкания и выхода из строя батареи.

В холодную погоду химические реакции внутри батареи замедляются, что снижает способность батареи эффективно отдавать энергию. Это может привести к уменьшению общего запаса хода электромобиля. С другой стороны, в очень жаркую погоду аккумулятор может стареть быстрее, что приводит к снижению общего срока его службы.

В таблице 2.1 приведены данные относительно запаса хода аккумулятора электромобиля в холодную погоду.

Таблица 2.1 – Запас хода аккумуляторных батарей в зависимости от температуры

Температура, °С	Уменьшение дальности действия батареи
От 0 до -10	12-34%
От -10 до -20	35-50%
Ниже -20	До 50% и более

Чем выше температура, тем менее эффективной будет батарея, т.к.:

- Химические реакции внутри батареи чувствительны к нагреву, что приводит к более быстрому разрушению батареи;
- Более высокая температура приводит к более быстрому разряду аккумулятора;
- Нагрев снижает способность аккумулятора сохранять и высвободить заряд;
- Чрезмерное тепло может часто активировать систему терморегулирования аккумулятора, что приводит к потере энергии и уменьшению запаса хода аккумулятора.

С повышением температуры аккумуляторы электромобилей могут перегреться и потерять способность обеспечивать питание автомобиля. В связи с чем могут возникнуть различные проблемы:

- Срок службы батареи сокращается: высокие температуры вызывают более быструю деградацию компонентов батареи.
- Уменьшение дальности действия: высокие температуры уменьшают количество энергии, которую может хранить аккумулятор, что приводит к уменьшению дальности действия.
- Управление аккумулятором: система управления температурным режимом снижает производительность аккумулятора, поскольку управляет нагревом.
- Нагрев аккумуляторной батареи: при экстремальных температурах система управления температурой батареи потребляет больше энергии батареи, чем обычно, сокращая запас хода.

Какой запас хода обеспечивают аккумуляторы электромобилей?

Запас хода — один из наиболее важных вопросов, стоящих перед водителями электромобилей. Это потому, что для электромобиля он варьируется гораздо больше, чем для обычного автомобиля с двигателем внутреннего сгорания, и, в отличие от обычного автомобиля, вы не можете заполнить бак на одной из многих заправочных станций всего за несколько минут [4].

Большинство современных электромобилей имеют запас хода более 320 км на полной зарядке, но некоторые, такие как Lucid Air Grand Touring, могут проезжать более 800 км. Nissan Leaf S, у которого стандартный аккумулятор меньшего размера, имеет один из самых низких запасов хода среди всех продаваемых сегодня электромобилей: 238 км. Chevy Bolt EV, который на данный момент является самым доступным электромобилем, имеет запас хода 414 км. Но многие электромобили преодолели отметку в 480 км, включая некоторые модели Ford Mustang Mach-E, Tesla Model Y Long Range и некоторые версии Hyundai Ioniq 5 и Kia EV6. Многие роскошные модели, такие как Mercedes-Benz EQS, и грузовики, такие как Rivian R1T и Ford F-150 Lightning, имеют определенные модели, которые также могут проезжать более 480 км. Эдмундс провел испытания запаса хода в реальных условиях на более чем 70 электромобилях [41].

Количество полезной энергии от аккумулятора уменьшается с понижением температуры. Это влияет на запас хода и производительность электромобиля. На рисунке 2.3 ток разряда визуализируется в зависимости от температуры.

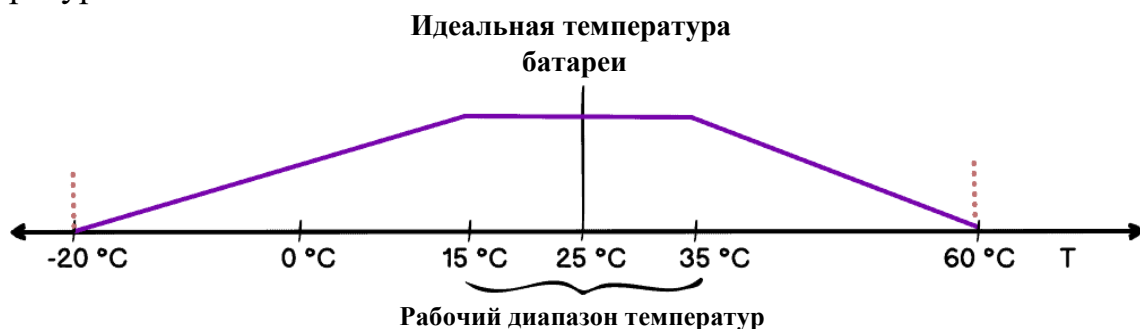


Рисунок 2.3 – Изменение тока разряда в зависимости от температуры

Последствия для зарядки аккумуляторов еще больше. Чтобы продлить срок службы литий-ионных аккумуляторов, их не следует заряжать при температуре ниже нуля градусов или только очень малым током (капельный заряд).

Потеря емкости для аккумуляторов электромобилей при определенной температуре представлено на рисунке 2.4.

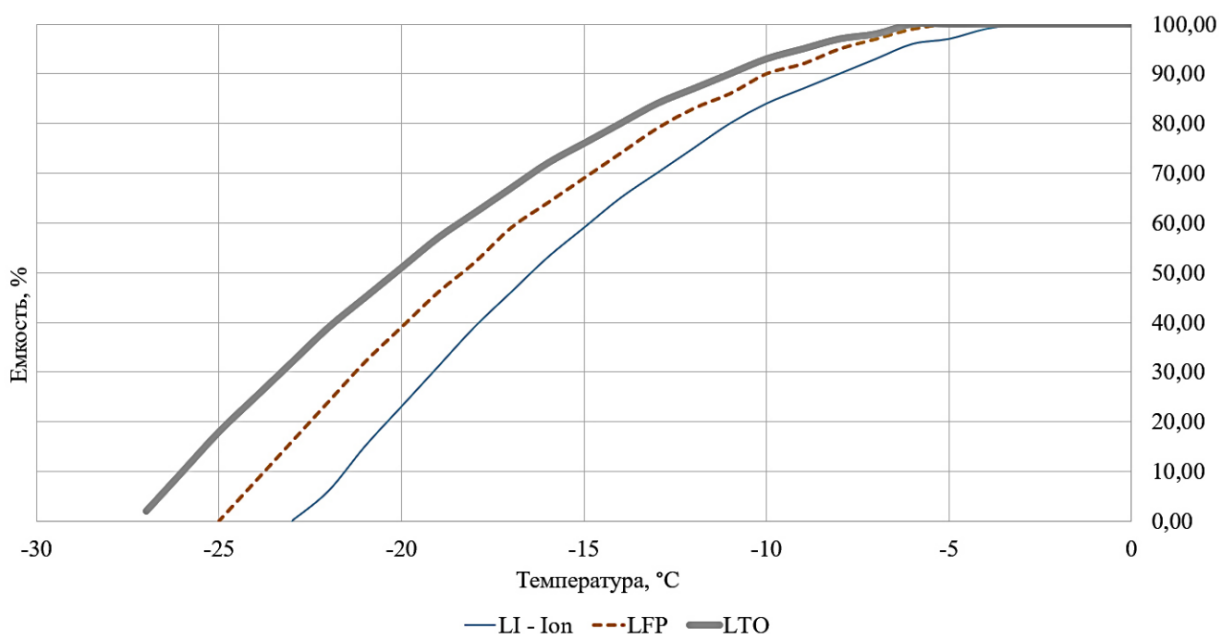


Рисунок 2.4 – Зависимость доступной емкости от температуры

В частности, может потребоваться быстрая зарядка постоянным током, охлаждение или даже активное охлаждение.

Тот факт, что литий-ионные аккумуляторы нельзя заряжать при температуре ниже 0 °C, влияет не только на процесс зарядки автомобиля, но и на его вождение. Регенеративное торможение = зарядка аккумуляторов. Поэтому блок управления автомобилем (БКУ) должен это учитывать, и водителю придется чаще использовать гидравлическое торможение, когда аккумуляторная батарея еще холодная. Ограниченные возможности рекуперативного торможения — еще одна причина уменьшения запаса хода зимой.

Желаемая рабочая температура литий-ионного аккумулятора в электромобиле составляет от 15 °C до 35 °C. При температуре ниже 15 °C

электрохимия идет хуже, а доступная мощность ограничена. Существенная и заметная разница, вероятно, начинается при температуре ниже нуля градусов. В области верхних температур доступную мощность ограничивает не батарея. Вместо этого электромобиль должен ограничивать мощность, чтобы свести к минимуму дальнейшее повышение температуры и предотвратить деградацию или, что еще хуже, тепловой выход из-под контроля. Идеальная температура аккумулятора для увеличения срока службы и полезной емкости составляет от 15 °С до 35 °С. Однако температура, при которой батарея может обеспечить большую часть энергии, составляет около 45 °С.

Деградация батареи приводит к снижению емкости, постепенно уменьшая запас хода, что показано на рисунке 2.5. Емкости аккумуляторов транспортных средств снижаются со скоростью 2,3 % в год. Тем не менее, аккумулятор электромобиля может разряжаться с большей или меньшей скоростью в зависимости от того, как эксплуатируется электромобиль: скорость разряда/заряда, температура хранения и эксплуатации и т. д.

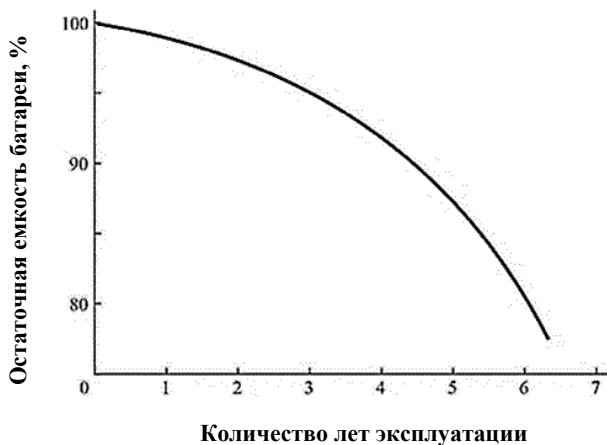


Рис. 2.5. Зависимость остаточной емкости батареи от пробега электромобиля

Каждая зарядка аккумулятора электромобиля на 100 % значительно сокращает срок его службы, так как это приводит к коррозии алюминиевого коллектора и образованию газов внутри батареи, ведущих к внутреннему механическому напряжению. В итоге это приводит к разрядке аккумулятора.

Чтобы продлить срок службы зарядка должна быть не более 80 % полной емкости. Оставшиеся 20 % позволят осуществлять рекуперативное торможение, которое может преобразовывать кинетическую энергию в полезную энергию, так как при заряде более 80 % эта функция автоматически отключается [26].

Температуру батареи следует регулировать в пределах допустимых значений, чтобы избежать проблем с перегревом и повысить производительность. Диапазон температур влияет на заряд батареи и срок ее службы (рисунки 2.6 и 2.7). В то же время распределение температуры должно быть равномерным, чтобы гарантировать работоспособность батареи и срок ее службы. Это также причина, по которой система терморегулирования батареи необходима для аккумуляторной системы.

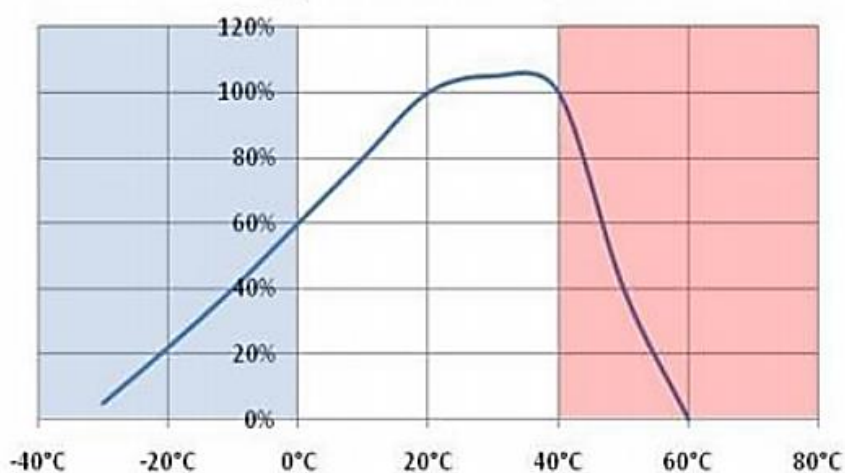


Рисунок 2.6 – Зависимость заряда батареи от температуры



Рисунок 2.7 Зависимость продолжительности цикла от температуры

Нельзя разряжать аккумулятор до 0%. Такая глубокая разрядка аккумуляторной батареи приведет к чрезмерному износу и ухудшению состояния медного токосъемника и переходных металлов. Зарядку необходимо осуществлять только тогда, когда заряд аккумулятора электромобиля упадет до 10 %, чтобы он не оставался разряженным в течение длительного периода времени.

Рабочая температура аккумулятора в основном относится к режиму работы, в котором энергия берется из аккумулятора. Большинство аккумуляторов, включая литий-ионные, нельзя заряжать, если их температура ниже 0°C. Заявленное количество циклов совпадает с достижением состояния работоспособности батареи (SOH) на уровне 80%. Большинство производителей аккумуляторов рекомендуют заменять аккумулятор, когда SOH упадет ниже этого значения, однако это не означает, что аккумулятор после этого перестанет работать. Все зависит от условий, в которых эксплуатировалось конкретное транспортное средство [24].

Диапазон рабочих температур аккумуляторной батареи в среднем составляет от -20 °C до 50 °C. Изменения температуры напрямую влияют на эффективность разряда и разрядную емкость литий-ионного аккумулятора.



Температуру батареи следует регулировать в пределах допустимых значений, чтобы избежать проблем с перегревом и повысить производительность. Диапазон температур влияет на заряд батареи и срок ее службы (рисунки 2.2, 2.3).

В то же время распределение температуры должно быть равномерным, чтобы гарантировать работоспособность батареи и срок ее службы. Это также причина, по которой система терморегулирования батареи необходима для аккумуляторной системы. Когда температура колеблется от 20°C до 40°C, заряд батареи достигает максимума (рисунок 2.3).

Срок службы медленно снижается ниже 10°C из-за анодного покрытия и быстро падает выше 60°C из-за разрушения электродных материалов.

Аккумуляторы можно заряжать с разной скоростью, которая пропорциональна количеству тока, протекающего через аккумулятор. С увеличением как зарядного, так и разрядного токов увеличивается не только интенсивность работы, но и скорость старения.

Как правило, температуру необходимо регулировать в диапазоне от 20°C до 40°C для обеспечения производительности и срока службы. Кроме того, вентиляция также важна для аккумуляторной системы, и ее следует принимать во внимание.

## **2.2. Причины уменьшения ресурса аккумуляторной батареи в зависимости от температурного диапазона**

Из-за широкого распространения электромобилей по географии, времени и сезонам температура эксплуатации литий-ионных аккумуляторных батарей также находится в широком диапазоне.

Вообще говоря, диапазон рабочих температур силовой батареи составляет от 20 °C до 50 °C. Изменения температуры непосредственно влияют на производительность разряда и разрядную емкость литий-ионной батареи. При понижении температуры внутреннее сопротивление батареи

увеличивается, скорость электрохимической реакции замедляется, внутреннее поляризационное сопротивление быстро увеличивается, а разрядная емкость и разрядная платформа уменьшаются, что влияет на мощность батареи и выход энергии. Низкая температура приведет к резкому снижению разрядной емкости литий-ионного аккумулятора. Разрядная емкость при высокой температуре близка к комнатной температуре или немного превышает ее. Высокая температура может ускорить скорость миграции ионов лития.

Когда аккумуляторный модуль разряжается при низкой температуре, резистор выделяет тепло для повышения температуры батареи, что выражается в увеличении напряжения. По мере разряда напряжение постепенно падает. Среди всех факторов окружающей среды температура оказывает наибольшее влияние на характеристики заряда и разряда литий-ионных аккумуляторов [40].

В настоящее время в индустрии литий-ионных аккумуляторов нет четкой теории о влиянии температуры на емкость литий-ионных аккумуляторов с различными анодами. Кроме того, соответствующие расчетные формулы и математические модели все еще находятся на стадии исследования. В таблице 2.2 показан статистический результат разрядной емкости литий-железо-фосфатной батареи.

Таблица 2.2. Влияние температуры на разрядную способность (1С) литий-железо-фосфатной батареи

Температура, °C	Разрядная емкость, мАч				Относительная пропускная способность контрольной точки испытания, %				
	1	2	3	Среднее значение	1	2	3	Среднее значение	Скорость изменения
-10	4842,1	4953,9	4799,9	4865,3	46,5	47,4	46,1	46,6	-53,4
-20	7981,3	7841,2	7579,2	7800,6	76,6	75,1	72,8	74,8	-25,2
-10	9179,2	9250,6	9147,5	9192,4	88,1	88,4	87,8	88,1	-11,9
0	10,228	10,21	10,106	10,181	98,1	97,6	97,1	97,6	-2,4
+25	10,421	10,460	10,416	10,432	100	100	100	100	0
+40	11,430	11,352	11,933	11,572	109,8	108,5	110,9	110,9	10,9
+55	10,768	10,938	10,992	10,899	103,3	104,6	104,4	104,4	4,4
+60	10,134	10,655	10,233	10,340	97,2	101,9	99,1	99,1	-0,9

На рисунке 2.8 показана кривая разрядной емкости литий-железо-фосфатной батареи при различных температурах, где выполняется согласование емкости литий-железо-фосфатной батареи с температурой. Согласованная кривая показана на рисунке 2.9.

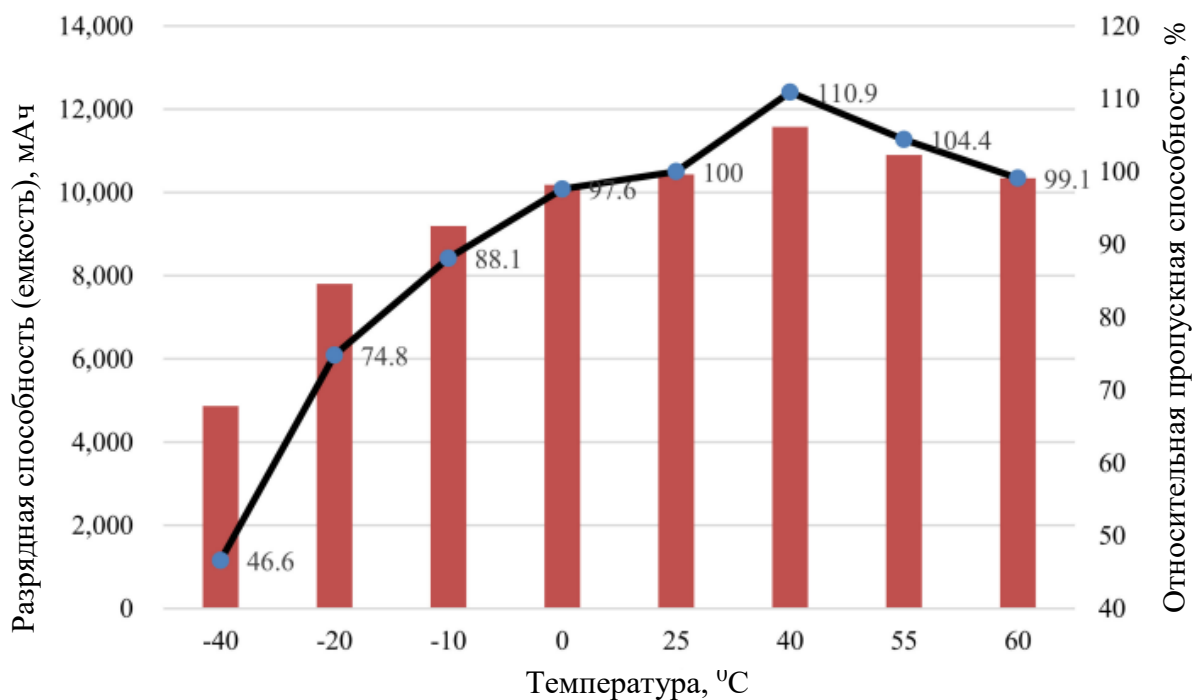


Рис. 2.8 – Разрядная способность литий-железо-фосфатной батареи при различных температурах

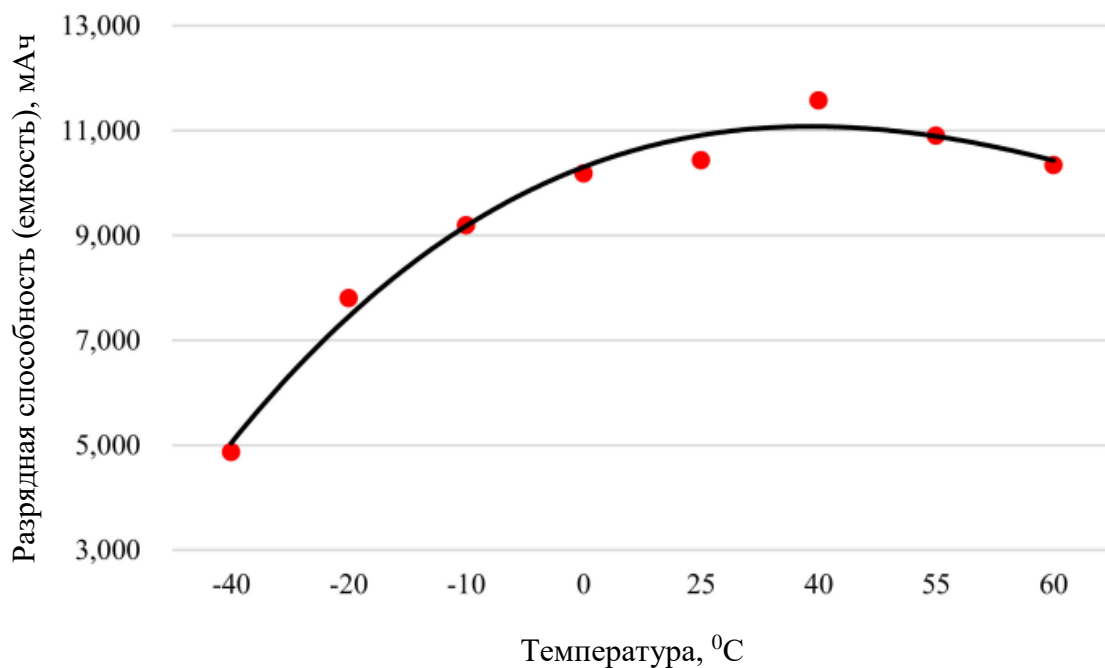


Рисунок 2.9 – Кривая разрядной емкости литий-железо-фосфатной батареи при различных температурах

Благодаря всестороннему анализу приведенных выше графиков можно видеть, что независимо от материала катода, разрядная емкость литий-ионной батареи будет уменьшаться при понижении температуры при низких температурах.

Причины этого явления заключаются в следующем. С одной стороны, снижение температуры приведет к снижению активности активного электролита в литий-ионной батарее и увеличению концентрации, что, в свою очередь, замедлит скорость деинтеркаляции ионов лития в процессе разряда.

С другой стороны, снижение температуры увеличит внутреннее сопротивление литий-ионной батареи, что приведет к преждевременному достижению напряжения отключения разряда, и разряд закончится. При температуре выше  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  разрядная способность литий-ионного аккумулятора в основном остается выше 93,4%.

Когда температура ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , разрядная емкость литий-ионного аккумулятора начинает уменьшаться, и она резко падает при понижении температуры. Когда температура достигает  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , емкость литий-железо-фосфатной батареи составляет 46,6%, емкость литий-манганатной батареи - 36,8%, а емкость литий-кобальто-оксидной батареи - 11,7%.

При температуре окружающей среды выше  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  разрядная емкость аккумулятора будет увеличиваться по мере повышения температуры. Это связано с повышением активности внутренних материалов батареи, тем быстрее происходит деинтеркаляция ионов лития, а также снижением внутреннего сопротивления. Когда температура окружающей среды продолжает повышаться до  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , разрядная емкость литий-ионного аккумулятора из трех материалов немного ниже, чем при  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Основная причина заключается в том, что активность активного внутреннего электролита батареи и реакционная способность материала электрода снижаются в условиях высокой температуры окружающей среды. Более того, чрезмерно высокая температура приведет к разрушению решетки

материала катода, что приведет к необратимому снижению емкости батареи. Поэтому следует избегать использования литий-ионных аккумуляторов при высоких температурах. Учитывая эффективность разряда и срок службы, наилучшая рабочая температура литий-ионного аккумулятора составляет 20-50 °С.

Эксплуатация АКБ при низких температурах, как правило, приводит к необратимому снижению емкости аккумуляторов. Снижение емкости АКБ при низких температурах, связывают с осаждением металлического лития на поверхности отрицательных электродов в ходе зарядного процесса, а также с затруднением транспортировки ионов лития в объеме электрода, из-за снижения скорости их твердофазной диффузии в углеродном материале. На стабильности отрицательных электродов, помимо отрицательной температуры, также оказывает и повышенная температура. Снижение емкости полностью заряженных углеродов всегда меньше, чем полностью разряженных. Разрушение поверхности твердоэлектролитной пленки, приводит к непрерывному деэтированию объема электрода и последующему взаимодействию атомов лития с раствором электролита [11].

Основным видом потерь является потери электролита, а не разрушение анода. При малом токе заряда, потери в основном связаны с временем и температурой, а глубина разряда влияет незначительно.

На рисунке 2.10 представлена многопараметровая характеристика, описывающая диапазоны работы аккумуляторной батареи и влияние на срок службы.

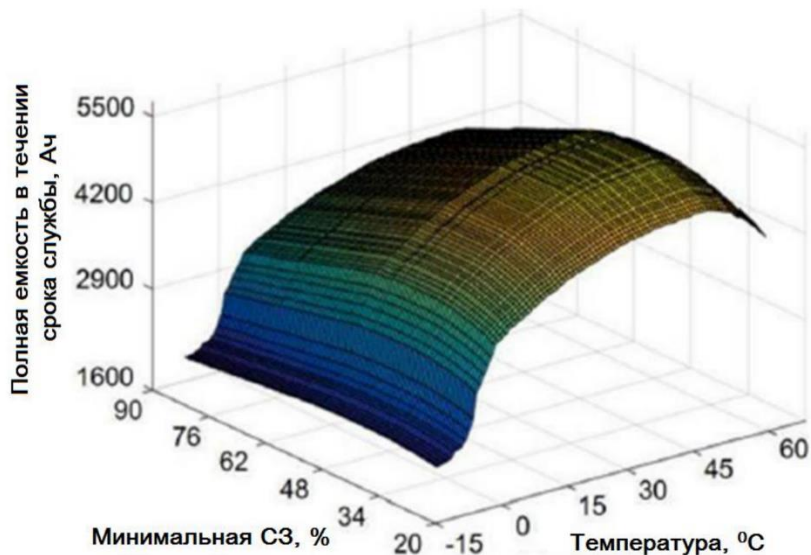


Рисунок 2.10 – Многопараметровая характеристика, показывающая зависимость снижения емкости аккумулятора от температуры и степени заряженности

В результате можно сделать вывод, что наиболее благоприятный диапазон температур, позволяющий получить наиболее эффективные ресурсные характеристики 250С, а диапазон степеней заряженности от 30 до 60 %.

Чтобы литий-ионные аккумуляторы могли быстро заряжаться в условиях низких температур, они должны иметь короткое время зарядки и быстрое повышение температуры без потери срока службы батареи или безопасности [12].

Чтобы предотвратить литиевое покрытие, отрицательная область литий-ионных аккумуляторов должна иметь значительную разность потенциалов твердо-жидкости во время зарядки, но общее напряжение поляризации должно быть низким.

Кроме того, верхнее и нижнее напряжения отсечки должны быть выше, чем напряжение на двух концах литий-ионной батареи.

### **2.3. Методы управления температурным режимом аккумуляторов электромобилей**

Исследования в области технологии управления температурой аккумуляторов электромобилей в настоящее время в основном сосредоточены на том, как экспортировать тепло, выделяемое аккумулятором во время работы, чтобы аккумулятор мог работать в оптимальном температурном диапазоне.

Электрический двигатель намного меньше греется, и не требуется мощное охлаждение. Однако в любом BEV все равно можно встретить и радиатор, и систему тепловых магистралей, которые нужны тяговой батарее.

Ведь наиболее эффективно она работает лишь в ограниченном диапазоне температур, а при большой нагрузке, частых переходных цикла разряд/заряд во время движения или при скоростной зарядке сильными токами батарея сильно греется. Терморегулирование может понадобиться и инвертору, через который протекают токи очень высокой силы.

Система охлаждения, работающая в режиме «теплового насоса» (как инверторный кондиционер в помещениях), способна с минимальными энергозатратами обеспечить комфорт в салоне [4].

Охлаждение литий-ионных аккумуляторов находится в центре внимания исследователей и автопроизводителей в последние несколько лет как основное препятствие для разработки электромобилей. Основной проблемой является регулирование температуры, связанное с литий-ионными батареями. Чрезмерное локальное повышение температуры в литий-ионных батареях приводит к сокращению срока службы и может привести к "тепловому выходу из строя" отдельного элемента или всего аккумуляторного блока. В аккумуляторной батарее, где элементы расположены плотно, чтобы использовать преимущество высокой энергии и удельной мощности Li ion, тепловое излучение элементов распространяется и приводит к сильному выходу из строя всей батареи.

Чаще всего чрезмерное или неравномерное повышение температуры в модуле или блоке значительно сокращает срок его службы. Однако для коммерческого применения важно не перестраивать систему охлаждения и не усложнять аппаратные средства управления без необходимости. Следовательно, возникает интерес к активному терморегулированию, то есть к системе охлаждения, которая требует наличия вентилятора и распределения воздушного потока для поддержания температуры и теплового профиля батареи в желаемом диапазоне.

Расчеты теплового потока.

Конвективный теплообмен для плоских поверхностей аккумуляторной батареи при воздушном охлаждении может быть выражен как:

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2.1)$$

где  $h$ , а также  $T_s$  и  $T_\infty$  обозначают коэффициент конвективной теплопередачи, температуру поверхности и температуру окружающей среды соответственно.

Конвективная теплопередача в трубах, используя среднюю арифметическую разницу температур, может быть выражена как:

$$Q_{conv} = hA_s\Delta T_{avg} \quad (2.2)$$

при

$$T_{avg} = T_s - \frac{T_e + T_i}{2} \quad (2.3)$$

где  $T_e$  - температура на выходе из трубы, а  $T_i$  - температура на входе. Важно знать, что  $T_s$  может изменяться в зависимости от местоположения, а  $h$  может быть функцией как местоположения, так и температуры, однако для простоты в данном случае они считаются одинаковыми. Как упоминалось в предположениях, предполагается, что  $T_s$  является постоянным, и в установившемся режиме батарея и максимальный потребляемый ток  $T_s$  будут составлять 90°C.

Предположим, что скорость воздухообмена или изменения количества воздуха в час (АСч) составляет от 1,0 до 3,0 в час при закрытых окнах и отсутствии механической вентиляции, от 1,8 до 3,7 в час при закрытых окнах



с вентилятором, включенным на рециркуляцию, от 13,3 до 26,1 в час при открытых окнах без механической вентиляции. вентиляция и между 36,2 и 47,5 в час при закрытом окне с вентилятором, включенным на приток свежего воздуха. АСч при закрытых окнах без вентиляции будет выше для более старого автомобиля, чем для более нового. Как упоминалось ранее, предполагается, что вентилятор настроен на подачу свежего воздуха, и в этом случае АСч принимается равным 40. Объем салона для автомобилей малого и среднего размера колеблется в пределах 2-3,5 м<sup>3</sup>. Предполагая объем кабины 2,5 м<sup>3</sup>. Скорость воздуха может быть вычислена:

$$V = \frac{m}{\rho S} \quad (2.4)$$

где  $V$  – скорость воздуха (м/с),  $m$  – массовый расход воздуха в воздуховодах системы кондиционирования автомобиля (кг/с),  $\rho$  - плотность воздуха (кг/м<sup>3</sup>, изменяется в зависимости от температуры воздуха, в данном случае постоянная) и  $S$  – площадь воздуховода (м<sup>2</sup>) при указанная активная зона (например, зона размораживания лобового стекла, вентиляционные каналы передней панели приборов и т.д.).

На рисунке 2.11 представлена обтекаемая линия скорости вокруг Nissan Leaf, движущегося со скоростью 35 м/с. На рисунке 2.12 показано соотношение скорости автомобиля и скорости воздуха.

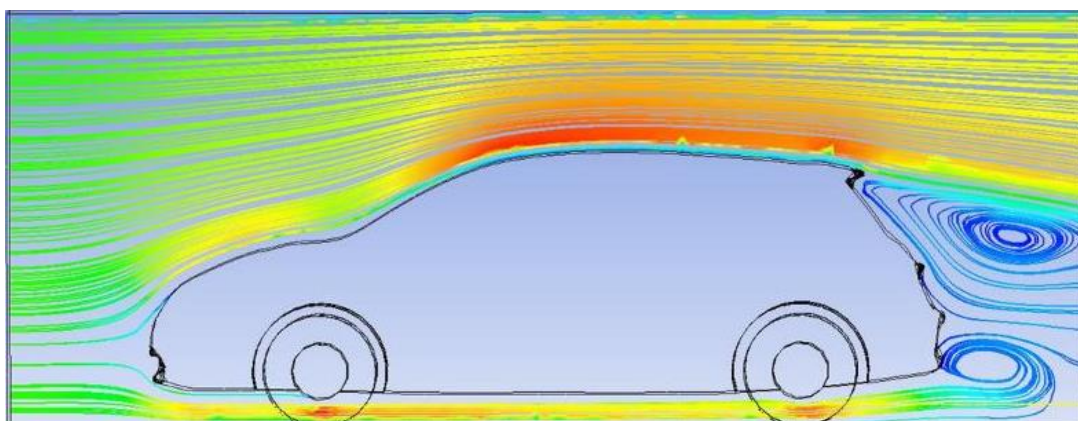


Рисунок 2.11 – Обтекаемая линия скорости вокруг Nissan Leaf, движущегося со скоростью 35 м/с

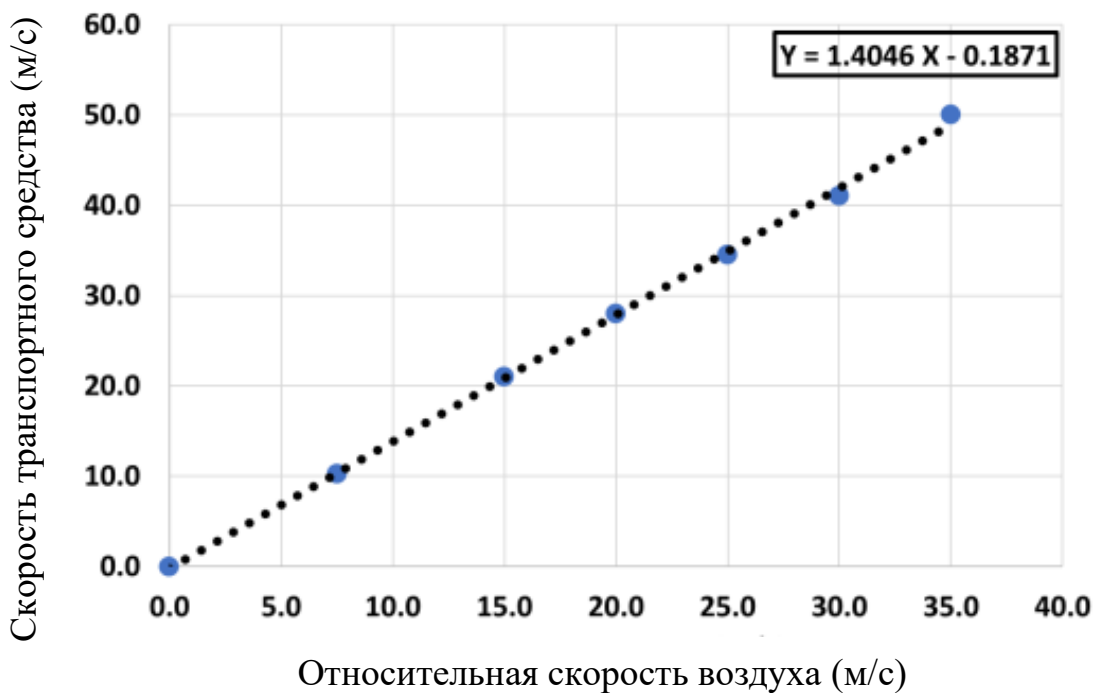


Рисунок 2.12 – Относительная скорость воздуха в зависимости от скорости транспортного средства

Из графика видно, что относительная скорость воздуха под автомобилем должна быть выше, чем у самого автомобиля, поскольку часть объема воздуха перед автомобилем должна проходить под ним, а поскольку площадь потока под автомобилем меньше, скорость воздуха должна быть выше.

Таким образом отношение между относительной скоростью воздуха под автомобилем и скоростью движения транспортного средства зависит от внешнего дизайна.

#### **2.4. Численная оценка терморегулирования снижения емкости аккумуляторов в электромобилях**

Электромобили, являясь основной стратегией смягчения последствий изменения климата, широко используют литий-ионные батареи в качестве источника энергии. Однако работа, производительность и срок службы литий-ионных аккумуляторов зависят от температуры аккумулятора, которая может иметь широкий диапазон из-за выделения тепла внутри аккумулятора и

значительных изменений условий окружающей среды из-за смены времен года и географических мест, где находятся электромобили. Температура батареи оказывает преобладающее влияние на снижение емкости, и ее можно контролировать с помощью эффективного управления температурным режимом.

Системы терморегулирования литий-ионных батарей всегда рассматривались как важная область из-за возможности выхода из-под контроля температуры, который может привести к нежелательным последствиям. Значительные усилия в данной области направлены на изучение систем охлаждения аккумуляторов и влияния систем охлаждения на производительность аккумуляторов [22].

Снижение емкости батареи значительно увеличивается с увеличением количества циклов разрядки/зарядки в течение времени работы батарей, а также с увеличением рабочей температуры батареи. Ускоренное ухудшение характеристик батареи происходит при повышенных рабочих температурах, что указывает на важность управления температурой батареи для контроля рабочей температуры батареи, а, следовательно, производительности и долговечности батареи.

Чтобы предсказать эффективность теплообмена, теплопередачу, как правило, можно выразить с использованием общего коэффициента теплопередачи следующим уравнением:

$$q = UA\Delta T_M \quad (2.5)$$

Где  $q$  Скорость теплопередачи [Вт];  $U$  Общий коэффициент теплопередачи [Вт/(м<sup>2</sup>·°C)];  $A$  Площадь поверхности теплопередачи [м<sup>2</sup>];  $\Delta T_M$  Приблизительная средняя разница температур [°C].

Полная ёмкость литий-ионного аккумулятора, как правило, известна в начальный момент его использования и по мере эксплуатации будет снижаться. В реальной системе электропитания происходят неполные циклы разряда-заряда аккумулятора, поэтому определению полной ёмкости при

частичном заряде и разряде представляет собой еще одну не менее важную задачу.

Ёмкость аккумулятора – характеризует количество электрического заряда, которое может отдать полностью заряженный аккумулятор при определенном режиме разряда и температуре от начального до конечного напряжения.

Таким образом становится возможным определить полную ёмкость литий-ионного аккумулятора по линейному участку разрядной характеристики. Исходными данными для этого является зависимости степени заряженности аккумулятора SOC от напряжения без нагрузки. Используя эту характеристику, можно вычислить SOC следующим образом:

Предположим, что в некоторый начальный момент времени известны значение ёмкости  $Q_1$  и соответствующая ей степень заряженности  $SOC_1$ . Далее при разряде аккумулятора счётчиком ампер-часов подсчитывается изменение ёмкости аккумулятора ( $Q_1 - Q_2$ ) на интервале времени ( $t_2 - t_1$ ). Уменьшение остаточной ёмкости литий-ионного аккумулятора приведёт к снижению степени заряженности до значения  $SOC_2$ .

Предполагая линейность характеристик литий-ионного аккумулятора на интервале ( $t_2 - t_1$ ), полную электрохимическую ёмкость аккумулятора можно определить по выражению:

$$Q_{max} = \frac{(Q_1 - Q_2)}{(SOC_1 - SOC_2)} \quad (2.6)$$

Более удобное эмпирическое правило — приближение, справедливое для температур, близких к комнатной: на каждые 10 °С повышения температуры скорость реакции удваивается. Таким образом, час при 35 °С эквивалентен времени автономной работы двум часам при 25 °С. Тепло — враг батареи, и, как показывает Аррениус, даже небольшое повышение температуры будет иметь большое влияние на производительность батареи, влияя как на желательные, так и на нежелательные химические реакции.

Изменение емкости батареи в зависимости от скорости разряда можно определить по формуле:

$$C = I^n \cdot T_i \quad (2.7)$$

Где:  $I$  – ток разряда [Ампер],  $n$  – постоянная заряда батареи ( $n=1,35$  для типичных свинцово-кислотных аккумуляторов),  $T_i$  – время разряда при токе  $I$  [Секунды],  $C$  – теоретическая емкость батареи [Ампер-час]

Состояние заряда (SOC) при постоянной скорости разряда равно:

$$SOC = 1 - \frac{I \cdot t}{C} \quad (2.8)$$

Для непостоянных скоростей разряда приведенное выше уравнение должно быть изменено и оценено с небольшими временными интервалами:

$$\Delta SOC = \frac{I \Delta t}{3600} / C_1 (I_2 - I_1)^{n-1} \quad (2.9)$$

Где:  $C$  – емкость аккумулятора, индексы 1 и 2 относятся к различным состояниям скорости разряда.

Высокие и низкие температуры, выходящие за пределы идеального рабочего диапазона, влияют не только на доступную емкость, но и на срок службы батареи. В то время как низкие температуры в основном приводят к снижению доступной емкости, высокие температуры приводят к деградации батареи.

Эквивалентный показатель состоянию заряда батареи это глубина разряда (DOD), который определяется:

$$DOD = 100\% - SOC \quad (2.10)$$

Например, если SOC:

100% - аккумулятор полностью заряжен, а DOD равен 0%.

75% — Аккумулятор заряжен на 3/4, а DOD составляет 25%.

50% — аккумулятор заряжен на 1/2, а DOD составляет 50%.

0% — батарея заряжена на 0, а DOD равен 100%.

Глубина разряда (DOD) – реальное количество (от заявленной) энергии, которое аккумуляторная батарея может отдать без увеличения температуры.

При данной температуре и скорости разряда количество активных химикатов, трансформируемых при каждом цикле зарядки-разрядки, будет пропорционально глубине разряда.

DOC определяет полезную долю оставшегося заряда, учитывая средний ток разряда. Большими токами разряда обусловлено преждевременное снижение заряда батареи, тем самым параметр DOC всегда меньше или равен параметру SOC.

$$DOC = 1 - \frac{Q_e}{C(I_{avg}, \theta)} \quad (2.11)$$

где  $Q_e$  – заряд батареи, А·с;  $C$  – емкость аккумулятора, А·с;  $\theta$  – температура электролита, °С;  $I_{avg}$  – текущий средний ток разряда, А.

Текущий средний ток разряда  $I_{avg}$  определяется по формуле

$$I_{avg} = 1 - \frac{I_m}{(\tau_1 s + 1)} \quad (2.12)$$

где  $I_{avg}$  – текущий средний ток разряда, А;  $I_m$  – ток основной ветви, А;  $\tau_1$  – постоянная времени основной ветви, с.

Изменение температуры электролита в батарее  $\theta$  происходит из-за резистивных потерь  $P_s$  с учетом температуры окружающей среды  $\theta_a$ .

Потеря мощности  $P_s$  это мощность тепловых потерь, с помощью которой можно рассчитать нагрев ТАБ. На основе описанных математических уравнений далее будет сформирована математическая модель, которая позволяет учитывать процессы, происходящие в аккумуляторной батарее с учетом профиля тока [28].

Поведение заряда, особенно характеристика окончания заряда (ЕОС), различается и зависит от типа батареи. В литий-ионных аккумуляторах напряжение быстро возрастает, когда батарея достигает полной зарядки. Это явление моделируется термином поляризационного сопротивления. В режиме зарядки сопротивление поляризации увеличивается до тех пор, пока батарея не будет почти полностью заряжена ( $it = 0$ ). Выше этой точки сопротивление поляризации резко возрастает.

Экспоненциальное напряжение для литий-ионной батареи представляет собой:

$$A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (2.13)$$

где  $A$  – экспоненциальное напряжение, В;  $B$  – экспоненциальная емкость, Ач<sup>-1</sup>;  $it$  – извлеченная емкость, Ач.

Для типа литий-ионного аккумулятора в модели используются следующие уравнения.

Модель разряда ( $i^* > 0$ )

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (2.14)$$

Модель заряда ( $i^* < 0$ )

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0,1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (2.15)$$

В уравнениях:

где  $E_{Batt}$  – нелинейное напряжение, В;  $E_0$  – постоянное напряжение, В;  $Exp(s)$  – экспоненциальная динамика зоны, В;  $Sel(s)$  – представляет режим работы от батареи (значение параметра ( $Sel$ ) = 0 во время разряда аккумулятора, значение параметра ( $Sel$ ) = 1 во время зарядки аккумулятора);  $K$  – постоянная поляризации, В/Ач, или сопротивление поляризации, Ом;  $i^*$  – динамика низкочастотного тока, А;  $i$  – ток аккумулятора, А;  $Q$  – максимальная емкость аккумулятора, Ач.

Для типа литий-ионного аккумулятора влияние температуры на параметры модели представлено следующими уравнениями.

Модель разряда ( $i^* > 0$ )

$$f_1(it, i^*, i, T, T_a) = E_0(T) - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{Q(T_a)-it} \cdot (i^* + it) + A \cdot \exp(-B \cdot it) - C \cdot it \quad (2.16)$$

Модель заряда ( $i^* < 0$ )

$$f_1(it, i^*, i, T, T_a) = E_0(T) - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{it+0,1 \cdot Q(T_a)} \cdot i^* - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{Q(T_a)-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) - C \cdot it \quad (2.17)$$

при:

$$t(T) = f_1(it, i^*, i, T, T_a) - R(T) \cdot i \quad (2.18)$$

$$E_0(T) = E_0|T_{ref} + \frac{\partial E}{\partial T} (T - T_{ref}) \quad (2.19)$$

$$K(T) = K|T_{ref} \cdot \exp\left(\alpha \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad (2.20)$$

$$Q(T_a) = Q|T_a + \frac{\Delta Q}{\Delta T} \cdot (T_a - T_{ref}) \quad (2.21)$$

$$R(T) = R|T_{ref} \cdot \exp\left(\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad (2.22)$$

где  $T_{ref}$  – номинальная температура окружающей среды,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T$  – внутренняя температура элемента,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_a$  – температура окружающей среды,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $E/T$  – температурный коэффициент обратимого напряжения, выраженный в  $\text{В}/^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha$  – постоянная скорости Аррениуса для поляризационного сопротивления;  $\beta$  – постоянная скорости Аррениуса для внутреннего сопротивления;  $\Delta Q/\Delta T$  – температурный коэффициент максимальной емкости, выраженный в  $\text{Ач}/^{\circ}\text{C}$ ;  $C$  – наклон номинальной кривой разряда, в  $\text{В}/\text{Ач}$  (для литий-ионных аккумуляторов с менее выраженными кривыми разряда (таких как литий-железо-фосфатные аккумуляторы) этот параметр установлен равным нулю) [29].

Внутренняя температура элемента ( $T$ ) в любой момент времени ( $t$ ) выражается как:

$$T(t) = L^{-1}\left(\frac{P_{loss}R_{th}+T_a}{1+s \cdot t_c}\right) \quad (2.23)$$

при

$$P_{loss} = (E_0(T) - V_{batt}(T)) \cdot i + \frac{\partial E}{\partial T} \cdot i \cdot T \quad (2.24)$$

Где  $R_{th}$  – тепловое сопротивление элемента по отношению к окружающей среде ( $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ );  $t_c$  – тепловая постоянная времени от элемента к окружающей среде;  $P_{loss_{nomeri}}$  – это общее количество тепла, выделяемого ( $\text{Вт}$ ) в процессе зарядки или разряда, и выражается:

## 2.5. Влияние температуры на скорость старения литий-ионного аккумулятора



Путем исследования максимальной емкости накопителя заряда ( $Q_m$ ) и влияния изменения температуры от 25 до 55°C могут быть получены ценные результаты, которые помогут определить подходящие условия использования литий-ионного аккумулятора.

На рисунке 2.13 показано, что емкость накопителя заряда ( $Q_m$ ) постепенно уменьшается с увеличением числа циклов. Установлено, что механизмы деградации для этой необратимой потери емкости при циклическом старении связаны со структурными изменениями вводимого электрода, разложением электролита, растворением активных материалов, фазовыми изменениями в вводимом электроде и образованием пассивной пленки на электродах и поверхности токоприемника.

Чем выше температура, тем больше  $Q_m$ , за исключением падения при 55°C. В принципе, температура повышает производительность литий-ионных батарей в краткосрочной перспективе за счет увеличения его емкости. Но это также увеличивает скорость деградации  $Q_m$ , как показано на рис. 2.13.

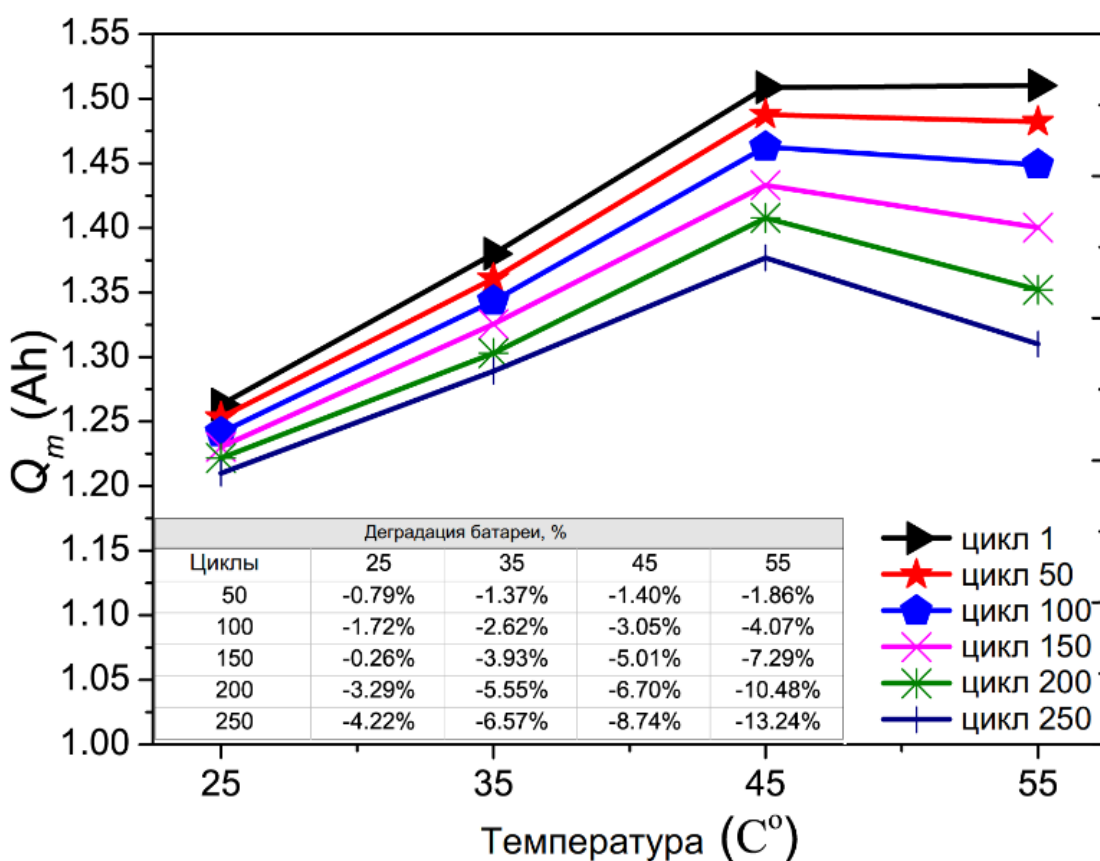


Рисунок 2.13 – Влияние температуры на скорость старения литий-ионной батареи, работающей при температуре выше комнатной (емкость батареи 1,35 мАч, номинальное напряжение 3,6 В)

Из этого графика видно, что при более высоких температурах мы получаем более высокую максимальную полезную емкость. Однако недостатком является то, что максимальная емкость быстро снижается по мере увеличения количества циклов.

Повышение температуры влияет на химические реакции, происходящие внутри батареи. По мере повышения температуры батареи химические реакции внутри батареи также ускоряются. При более высоких температурах одним из последствий для литий-ионных батарей является повышение производительности и увеличение емкости аккумулятора.

Повышение температуры с 25 до 55 °С приводит к увеличению максимальной емкости накопителя заряда на 20%. Однако у такого повышения производительности есть побочный эффект: срок службы батареи со временем сокращается [30].

Когда аккумулятор заряжается при температуре 55°С в против 25°С, ухудшение жизненного цикла гораздо более значительное при более высокой температуре. За первые 200 циклов производительность батареи снижается всего на 3,3% при температуре 25 °С; при 55 °С производительность снижается на 6,7%.

Из-за большей деградации при более высоких температурах срок службы батареи может значительно сократиться из-за постоянного воздействия экстремально высоких температур. Хотя воздействие тепла действительно временно увеличивает емкость аккумулятора, ущерб, который оно наносит жизненному циклу, может вызвать долгосрочные проблемы, поэтому следует избегать длительного воздействия тепла.

Возрастающая скорость деградации  $Q_m$  во время циклов с повышением температуры, показанная на рисунке 2.14, объясняется тем, что механизмы

деградации необратимой потери емкости ускоряются при повышенной температуре.

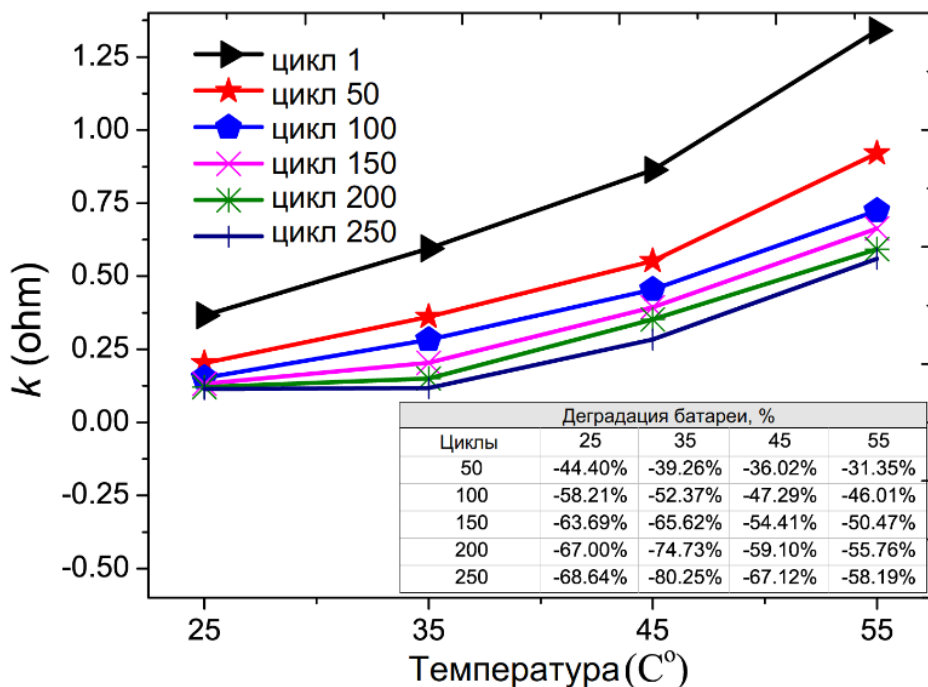


Рисунок 2.14 – Зависимость постоянной скорости старения от температуры

В таблице на рисунке 2.14 показан процент деградации батареи в зависимости от количества циклов при различных температурах.

На рисунке 2.15 наблюдаются два различных механизма деградации, а именно значительное начальное падение значения  $K$  (скорости переноса заряда,) за которым следует более медленное снижение значения  $K$  после 100 циклов.

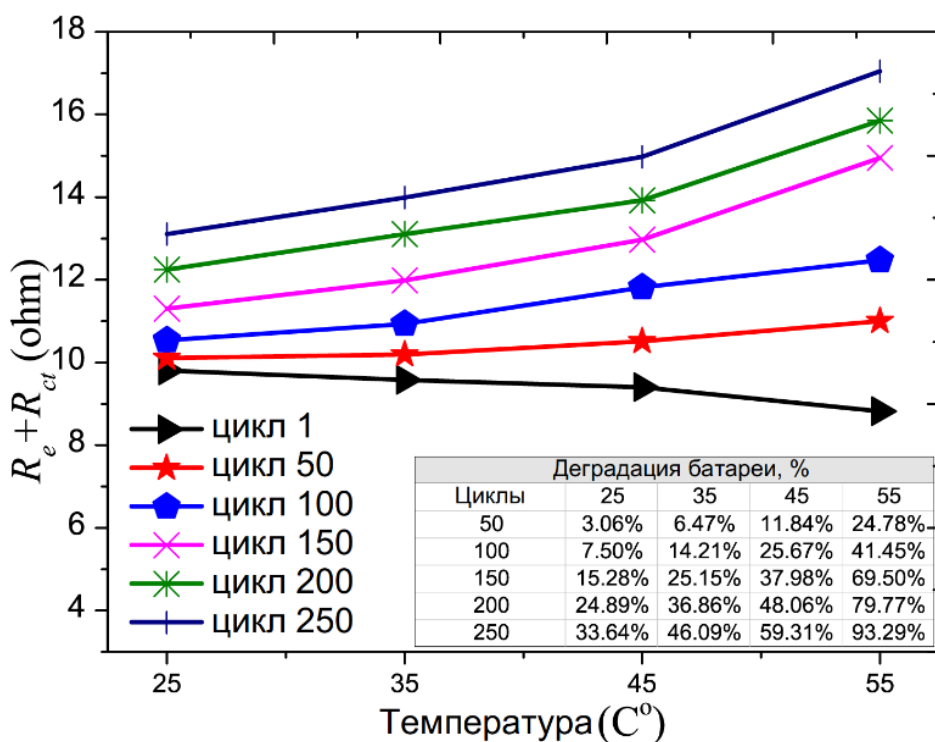


Рисунок 2.15 – Общее сопротивление электродов и старение сопротивления электрода/электролита в зависимости от температуры. Процент деградации в зависимости от количества циклов при различных температурах показан во вставленной таблице.

Изучение рисунка 2.15 показывает, что температура не оказывает существенного влияния на скорость снижения значения К после 100 циклов, когда диапазон температур составляет 35-55 °С.

## **2.6. Модель тепловыделения для литий-ионной батареи, используемой в электромобилях**

Известно, что колебания температуры внутри аккумулятора могут существенно повлиять на его производительность, срок службы и надежность. Чтобы лучше понять процесс выделения тепла в литий-ионных батареях, необходимо иметь понимание простых моделей выделения тепла, позволяющих прогнозировать тепловое поведение аккумуляторной батареи.

Использование в настоящее время и в будущем энергоемких аккумуляторных батарей в качестве источников питания в транспортных средствах, таких как автомобильный и воздушный транспорт сопряжено с высокими требованиями эксплуатации (быстрые циклы заряда и разряда, возникающими в результате активации работы отдельных узлов транспортного средства, например, запуск вспомогательной силовой установки воздушного судна). Эти особенности применения значительно увеличивают рабочую температуру батареи и могут вызывать неоднородные распределения напряжения и тока. Последнее приводит к снижению производительности и безопасности батареи.

Изменение температуры внутри батарей может привести к неравномерному распределению температуры, что создает неравномерный режим заряда/разряда внутри блока. В худшем случае в элементе может произойти утечка тепла, когда нагрев не контролируется должным образом, что может привести к пожару и взрыву. По этим причинам необходимость регулирования температуры аккумуляторной батареи жизненно важна для электрических и гибридных транспортных средств, чтобы поддерживать оптимальную производительность автомобиля.

Кроме того, если теплообмен батареи с окружающей средой затруднен, её температура может повышаться очень быстро (также и скорость химической реакции в объеме электролита). В результате выходит из-под контроля процесс «заряд-разряд» и может произойти тепловой разгон.

Эффект теплового разгона является основной проблемой безопасности, например, самого перспективного по оценкам литий-ионного аккумулятора и может привести к возгоранию и взрыву из-за перегрева или короткого замыкания батареи.

Важно понимать, как вырабатывается тепло внутри батареи. Тепло вырабатывается в батареях из двух источников: электрохимического действия и джоулева нагрева.

Способ расчета теплоты батареи с использованием термодинамического энергетического баланса, в упрощенном виде приведена в уравнении 3 ниже, где первый член – это тепловыделение за счет джоулева нагрева, а второй член – тепловыделение за счет изменения энтропии.

$$q = I(U - V) - I\left(T \frac{dU}{dT}\right) \quad (2.25)$$

Во время процессов зарядки / разрядки элемент имеет четыре источника тепла: тепло электрохимической реакции, омическое тепло, тепло поляризации и тепло побочной реакции (всегда игнорируется). В связи с чем необходимо связать электрохимические параметры с электрическими и тепловыми параметрами, которые можно легко измерить для описания источников тепла. Поскольку разница между напряжением на клеммах элемента и напряжением разомкнутой цепи (OCV) может быть выражена в единицах тока и сопротивления, тепловыделение внутри элемента может быть рассчитано с помощью:

$$Q_{\text{всего}} = I(U - V) + IT \frac{dU}{dT} = I^2(R_0 + R_p) + IT \frac{dU}{dT} \quad (2.26)$$

где  $Q_{\text{всего}}$  – общее тепловыделение внутри элемента,  $I$  – ток через элемент (A),  $V$  – напряжение на клеммах элемента,  $U$  – напряжением разомкнутой цепи OCV,  $T$  – температура элемента,  $dU/ dT$  – коэффициент энтропии,  $R_0$  – омическое сопротивление,  $R_p$  – сопротивление поляризации,  $I^2$  – омическое тепло,  $I^2R_p$  – тепло поляризации, а  $IT dU/ dT$  – тепло электрохимической реакции.

Тепловыделение на единицу объема внутри элемента:

$$q_{\text{элемент}} = \frac{Q_{\text{total}}}{V_b} = \frac{1}{V_b} (I^2(R_0 + R_p) + IT \frac{dU}{dT}) \quad (2.27)$$

где  $V_b$  – объем элемента ( $\text{м}^3$ ).

Внутреннее тепло батареи в основном состоит из омического тепла, тепла электрохимической реакции, тепла поляризации и тепла побочных реакций. С увеличением скорости зарядки и разрядки аккумулятора будет выделяться больше тепла.

Модель внутреннего тепловыделения:

$$\dot{q} = \frac{1}{V} \left[ (E_0 - U) - T \frac{dE_0}{dT} \right] \quad (2.28)$$

где  $\dot{q}$  – скорость тепловыделения в единице объема батареи ( $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-3}$ ),  $E_0$  – напряжение холостого хода (В);  $U$  – напряжение на клеммах аккумулятора (В);  $I$  – ток (А),  $V$  – объем аккумулятора ( $\text{м}^3$ );  $T$  – термодинамическая температура батареи (К),  $\frac{dE_0}{dT}$  – коэффициент влияния температуры ( $\text{ВК}^{-1}$ ).

Из уравнения 1 можно получить следующую формулу:

$$Q = I \left[ (E_0 - U) - T \frac{dE_0}{dT} \right] \quad (2.29)$$

где  $Q$  – тепловая мощность аккумулятора (Вт).

В теплоизоляционном устройстве потерями тепла можно пренебречь. Тепло батареи остается практически прежним, а тепло, выделяемое батареями в единицу времени, можно рассчитать исходя из удельной теплоемкости батареи и скорости изменения температуры:

$$\dot{Q} = c_p m \frac{dT}{dt} \quad (2.30)$$

где  $\dot{Q}$  – теплотворная способность в единицу времени ( $\text{Дж} \cdot \text{с}^{-1}$ );  $m$  – масса ячейки (кг);  $c_p$  – удельная теплоемкость аккумулятора ( $\text{Дж} (\text{кг} \cdot \text{К})^{-1}$ ).

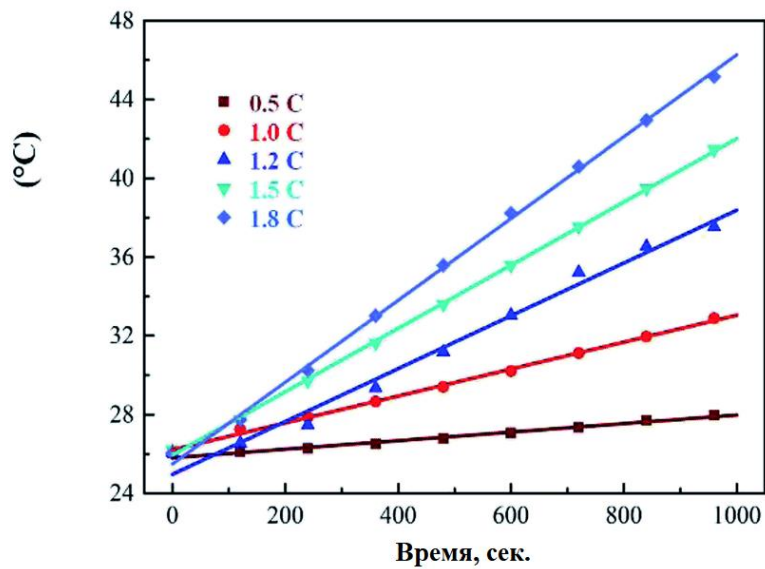


Рисунок 2.16 – Аппроксимация кривой средней температуры аккумуляторной батареи при различных токах

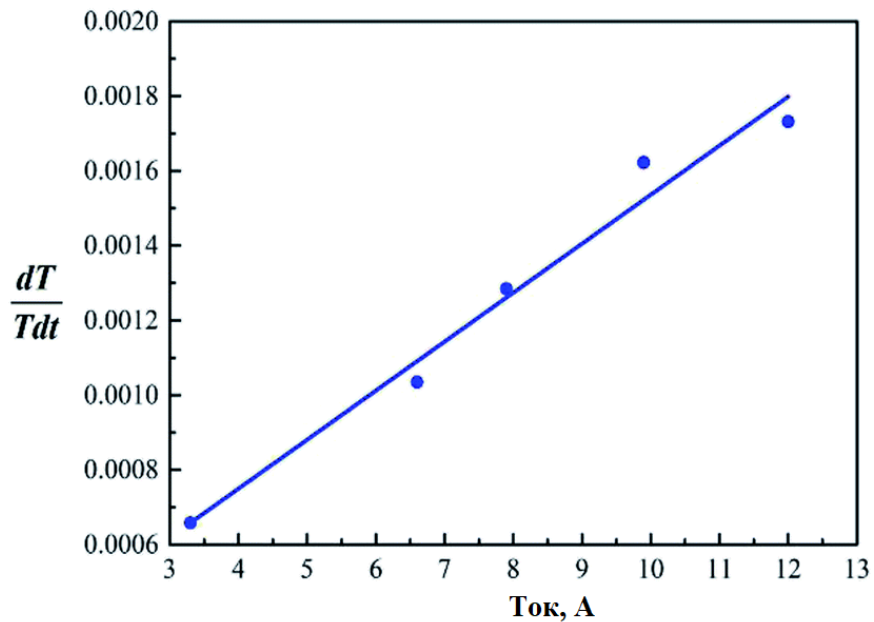


Рисунок 2.16 – Аппроксимация кривой – зависимости между  $\frac{dT}{Tdt}$  и I.



## 2.7. Определение температурных режимов тяговой аккумуляторной батареи электробуса

Одним из основных параметров, влияющих на ресурс аккумуляторной батареи является температура. Как было сказано ранее эксплуатация аккумуляторной батареи при низких температурах приводит к резкому снижению количества циклов. При положительных температурах, рекомендуемым диапазоном эксплуатации является 10-35<sup>0</sup>С. В течение режима работы происходит нагрев стенок аккумуляторной батареи.

На рисунке 2.17 показана разница температур, достигаемая аккумуляторной батареей электробуса. В качестве транспортного средства для определения эксплуатационных характеристик был выбран электробус большого класса. Электробус двигался пустым, масса составляла 12000 кг.

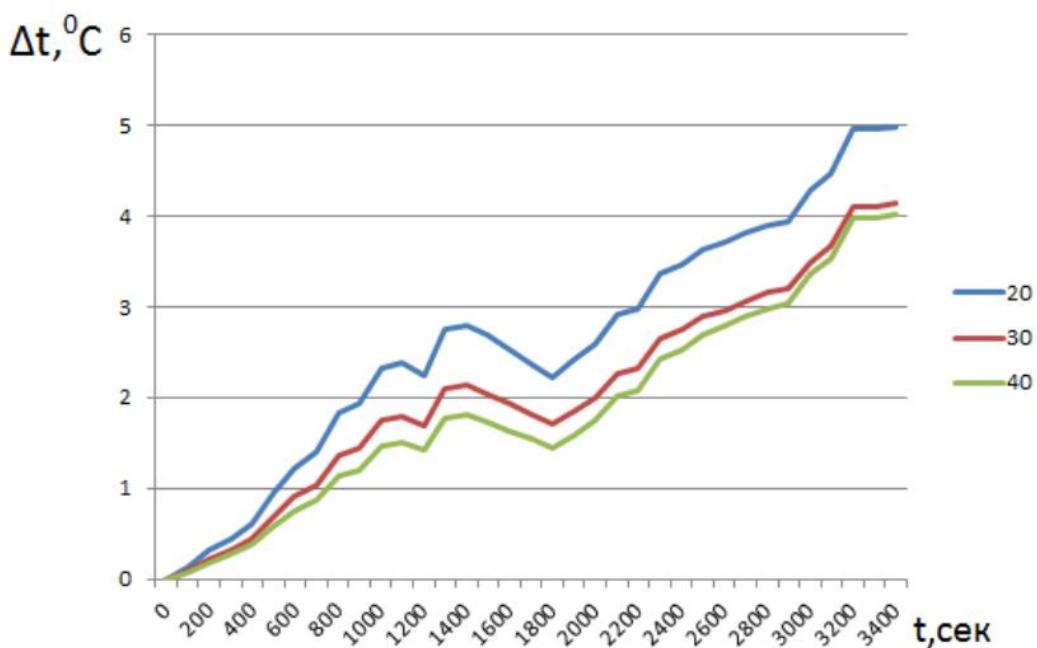


Рисунок 2.17 – Нагрев АКБ при разных значениях температуры окружающей среды

Отсутствие системы охлаждения в модели позволяет определить степень нагрева не только на внешних стенках аккумулятора, но и внутри ячейки. В случае, когда цикл заряда/разряда идет непрерывно, температура

ячейки не опускается до первоначального состояния, а наоборот, продолжает увеличиваться.

На рисунках 2.18 – 2.21 представлены значения нагрева аккумулятора электробуса при разной степени заряженности для начальных температур 10, 20, 30 и 40<sup>0</sup>С соответственно.

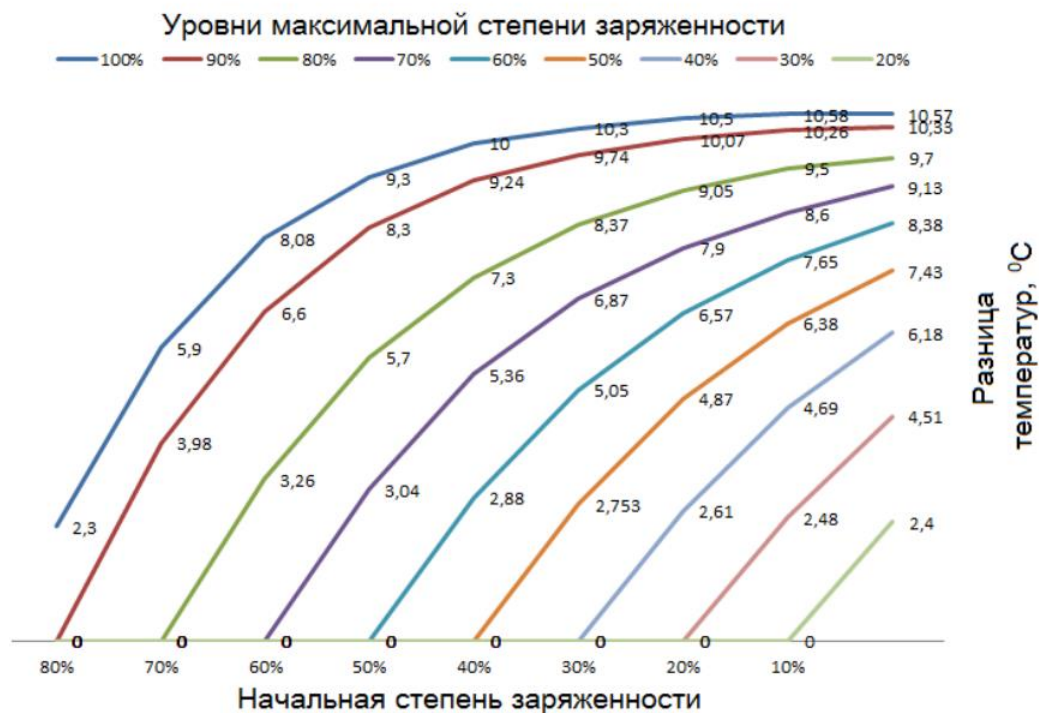


Рисунок 2.18 – Нагрев аккумулятора в диапазоне начальной степени заряженности от 10 до 80% при начальной температуре 10<sup>0</sup>С

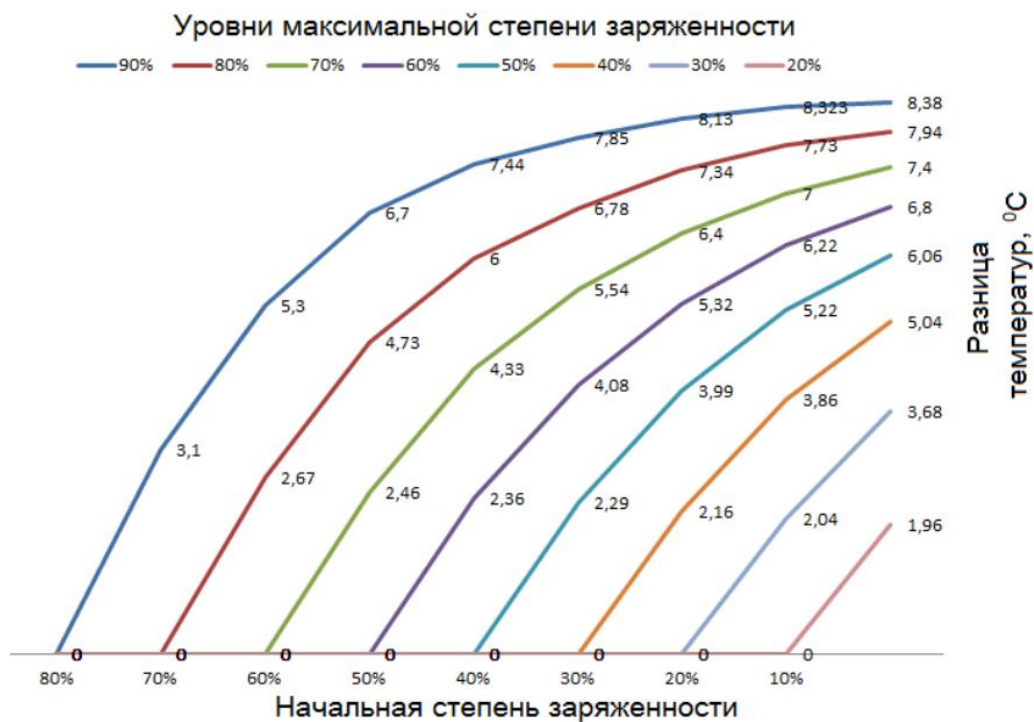


Рисунок 2.19 – Нагрев аккумулятора в диапазоне начальной степени заряженности от 10 до 80% при начальной температуре 20<sup>0</sup>C

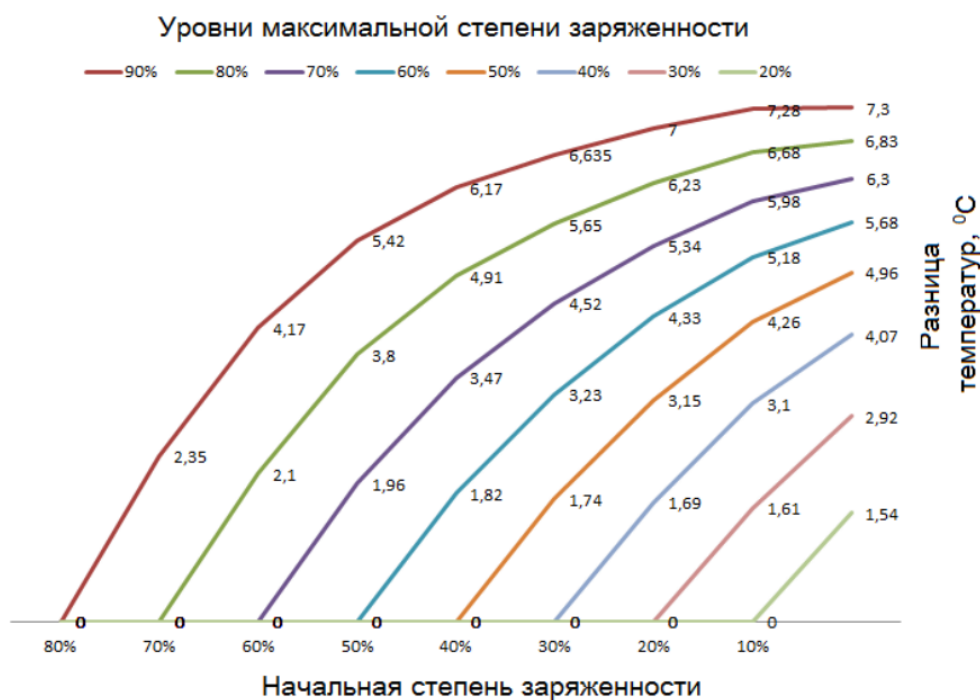


Рисунок 2.20 – Нагрев аккумулятора в диапазоне начальной степени заряженности от 10 до 80% при начальной температуре 30<sup>0</sup>C

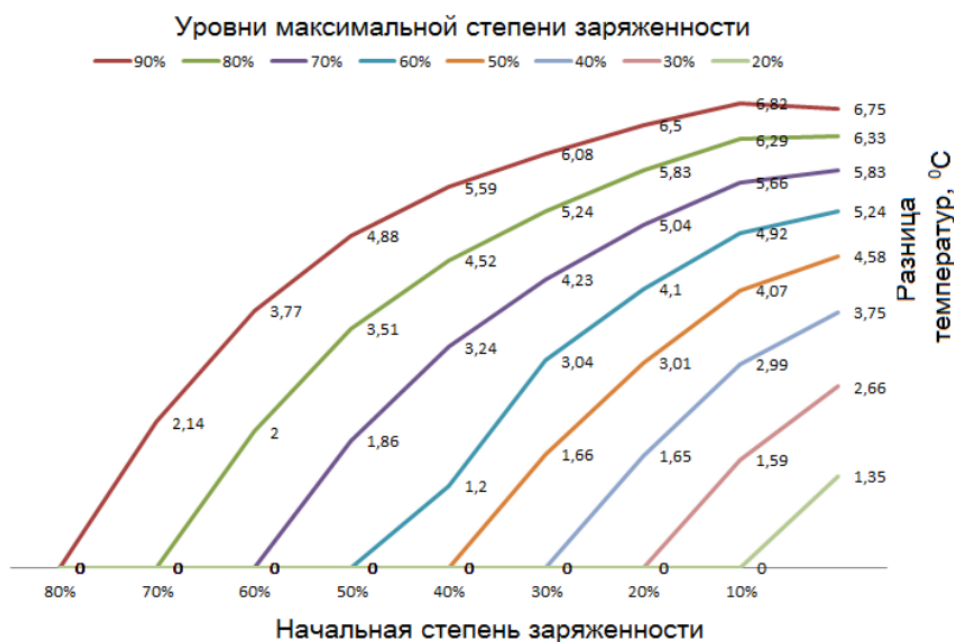


Рисунок 2.21 – Нагрев аккумулятора в диапазоне начальной степени заряженности от 10 до 80% при начальной температуре 40<sup>0</sup>C

С ростом температуры аккумулятора интенсивность нагрева значительно снижается. При этом рассчитанные диапазоны позволяют в дальнейшем четко определить, каков будет последующий нагрев аккумулятора после разряда аккумуляторной батареи и установки электробуса на заряд.

Для повышения отдачи емкости необходимо повышать уровень зарядного напряжения, кроме этого заряд при отрицательных температурах снижает ресурс батареи, о чем указывают практически все производители аккумуляторных батарей. Данные показывают, что эксплуатация при низких температурах является наименее энергоэффективным режимом эксплуатации аккумуляторной батареи электробуса.

Наибольшее снижение ресурса аккумуляторной батареи происходит при высоком уровне степени заряженности аккумулятора так как, при высокой степени заряженности аккумулятор работает в верхнем уровне напряжения, что значительно снижает ресурс.

На рисунках 2.22 – 2.224 представлены графики потери емкости при разряде аккумуляторной батареи электробуса. Аккумуляторы испытывались при трех значениях начальной температуры, различных глубинах разряда и при разных значениях зарядно-разрядных токов.

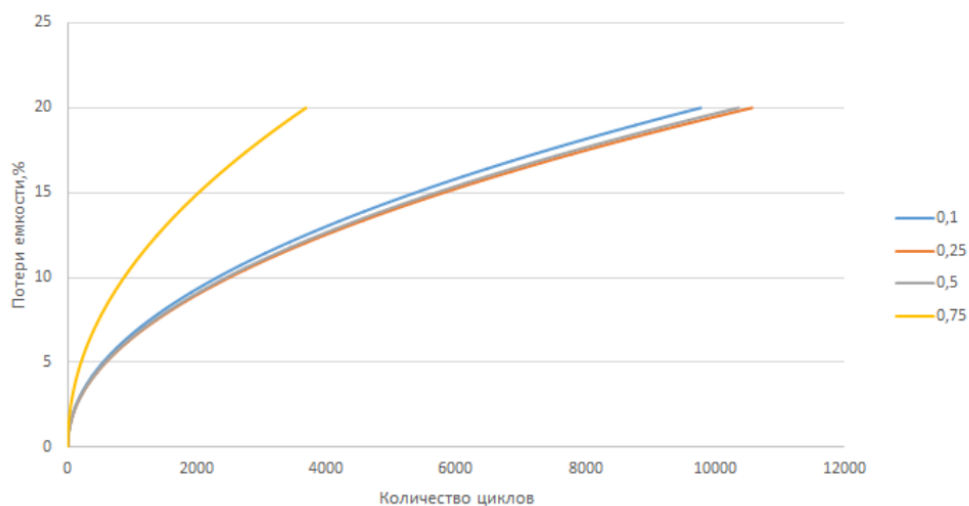


Рисунок 2.22 – Потери емкости при разряде аккумуляторной батареи электробуса при температуре 20 °C

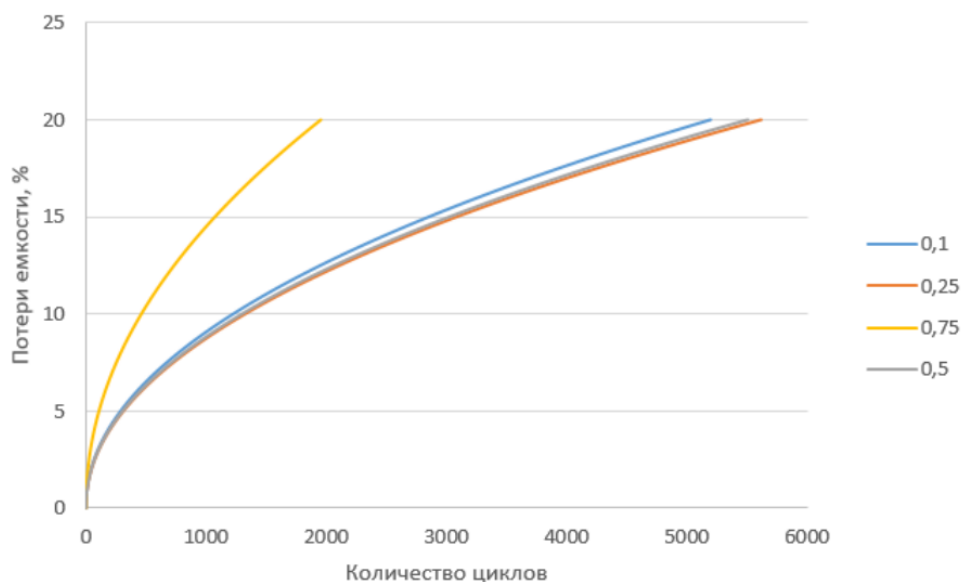


Рисунок 2.23 – Потери емкости при разряде аккумуляторной батареи электробуса при температуре 30 °C

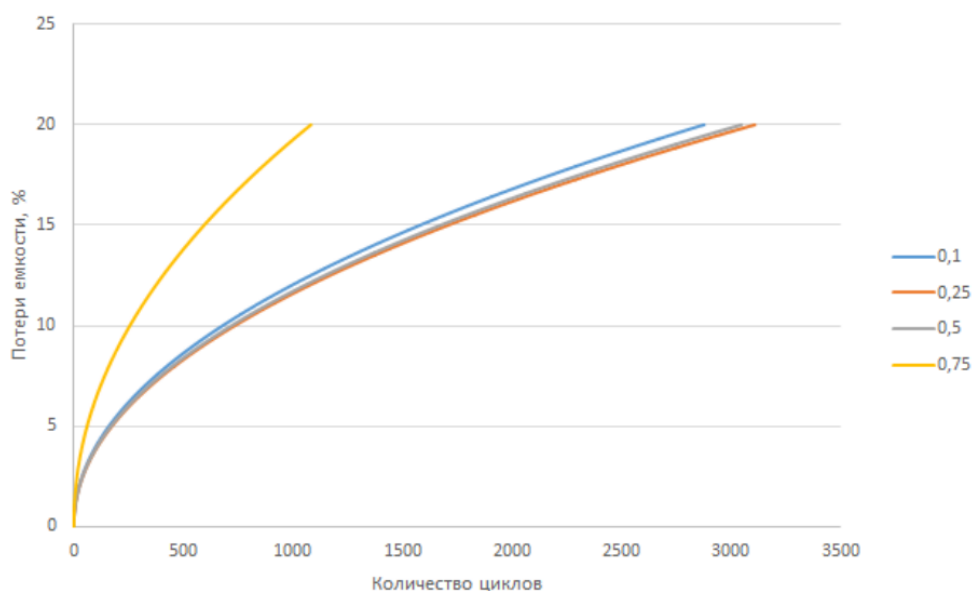


Рисунок 2.24 – Потери емкости при разряде аккумуляторной батареи электробуса, при температуре 40 °С

На графиках по горизонтальной оси изображены полные циклы обеспечивающие номинальную емкость 18 А·ч. При высоком уровне степени заряженности используемая емкость составляла 25%, поэтому она делилась на номинальную и на процент от глубины разряда. В результате таких преобразований удастся определить число эквивалентных циклов, с помощью которых можно провести сравнительный анализ снижения емкости до 80%, при различных условиях эксплуатации.

Наибольшее снижение ресурса аккумуляторной батареи происходит при высоком уровне степени заряженности аккумулятора, это связано с несколькими причинами: во-первых, при высокой степени заряженности аккумулятор работает в верхнем уровне напряжения, что, как было сказано в первой главе, значительно снижает ресурс. Во-вторых, при переводе используемой емкости в количество циклов для достижения одного эквивалентного необходимо было использовать четыре расчетных цикла. В диапазоне от 0 до 10% происходит увеличение внутреннего сопротивления из-за высокого нагрева аккумулятора, поэтому общее количество циклов меньше чем при 25% и 50%. Полученные данные в достаточной степени сопоставляются с аналитическими, полученными в первой главе. В результате

наиболее энергоэффективный диапазон эксплуатации от 10 до 60% позволяет увеличить ресурс аккумуляторной батареи [25].

Показанные графики являются типовыми, большинство производителей стремятся улучшить данные показатели за счет использования других материалов электродов, но в целом тенденция к изменению эксплуатационных показателей аккумуляторной батареи сохраняется.

## 2.8. Модель жизненного цикла аккумуляторных батарей

Известно, что в процессе увеличения потребления тока аккумулятора происходит увеличение потерь на внутреннем сопротивлении, при этом процесс разряда происходит при более низком уровне напряжении и срок службы аккумулятора начинает уменьшаться [35].

В литературе описано много случаев попыток определения зависимости между фактической емкостью и током разряда, но для многих случаев данная зависимость имеет сложный характер и применение их на практике очень затруднительно.

Для исследования процесса старения аккумулятора составлены уравнения, описывающие зависимость снижения емкости аккумулятора от температуры, уровня заряда и значений зарядно-разрядных токов:

$$Q_{loss} = a_c(SOC_{min}, Ratio) \cdot \exp\left(-\frac{E_{a_c}}{R \cdot T}\right) \cdot Q_e^z \quad (2.31)$$

где  $Q_{loss}$  - процент потери мощности;  $a_c$  – фактор, зависящий от степени заряженности и отношения времени заряда к времени разряда:

$$a_c = \alpha_c + \beta_c \cdot (Ratio)^b + \gamma_c \cdot (SOC_{min} - SOC_0)^c \quad (2.32)$$

где  $SOC_{min}$  – минимальная степень заряженности;  $Ratio$  – отношение времени разряда, ко времени заряда тяговой аккумуляторной батареи;  $E_{a_c}$  – энергия активации процесса снижения ресурса;  $SOC_0$  – начальная степень заряженности;  $z$  – коэффициент степенного закона (в статистике степенной закон (англ. power law) – это такая функциональная зависимость между двумя величинами, при которой относительное изменение одной величины приводит

к пропорциональному относительному изменению другой величины, независимо от исходных значений этих величин: зависимость одной величины от другой представляет собой степенную функцию).

По мере старения ячеек при циклировании измеренные емкости неуклонно снижаются, в то время как форма профилей разряда остается неизменной. Данные о потере емкости в зависимости от количества циклов были собраны для разработки модели жизненного цикла. Функциональная форма модели жизненного цикла может быть выражена как:

$$Q_{loss} = f(t, T, DOD, Rate) \quad (2.33)$$

Где  $t$  – это время цикла,  $T$  – это температура испытания,  $DOD$  – глубина разряда, а  $Rate$  – скорость разряда для циклического тестирования.

Скорость снижения емкости примерно одинакова для каждого  $DOD$ , что указывает на то, что влияние времени цикла более значительно, чем  $DOD$ . Таким образом, эффект  $DOD$  можно не учитывать при разработке модели для низких скоростей разряда.

После устранения  $DOD$  на снижение емкости могут влиять только время ( $t$ ) и температура ( $T$ ) при скорости разряда  $C/2$ . В этом случае модель срока службы батареи примет вид:

$$Q_{loss} = B \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)t^z \quad (2.34)$$

Вместо использования времени выбираем Ач-пропускную способность в качестве параметра для моделирования срока службы.

Ач-пропускная способность представляет количество заряда, получаемого батареей во время цикла.

При каждой скорости  $C$  пропускная способность Ач прямо пропорциональна времени; однако преимущество использования Ач-пропускной способности заключается в том, что она позволяет нам количественно оценить и соотнести поведение снижения пропускной способности для различных скоростей  $C$ .

Модель срока службы может быть выражена как:



$$Q_{loss} = B \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)(Aч)^z \quad (2.35)$$

где  $Q_{loss}$  – процент потери мощности,  $B$  – предэкспоненциальный коэффициент,  $E_a$  – энергия активации в Дж моль<sup>-1</sup>,  $R$  – газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура;  $z$  – коэффициент степенного закона;  $Aч$  – пропускная способность  $Aч$ , которая выражается как:

$$Aч = (\text{число циклов}) \times (\text{DOD}) \times (\text{полная емкость ячейки}) \quad (2.36)$$

На рисунке 2.25 показан процент потери мощности в зависимости от  $Aч$ -пропускной способности в логарифмической шкале при 0, 15, 45 и 60 °С. Линии представляют линейное соответствие при каждой температуре. Данные при температуре -30 °С не были нанесены на график, поскольку ячейки при такой температуре обычно работают недостаточно долго для получения достаточных данных. Наклон каждой линии при каждой из оцененных температур соответствует степенному коэффициенту  $z$ .

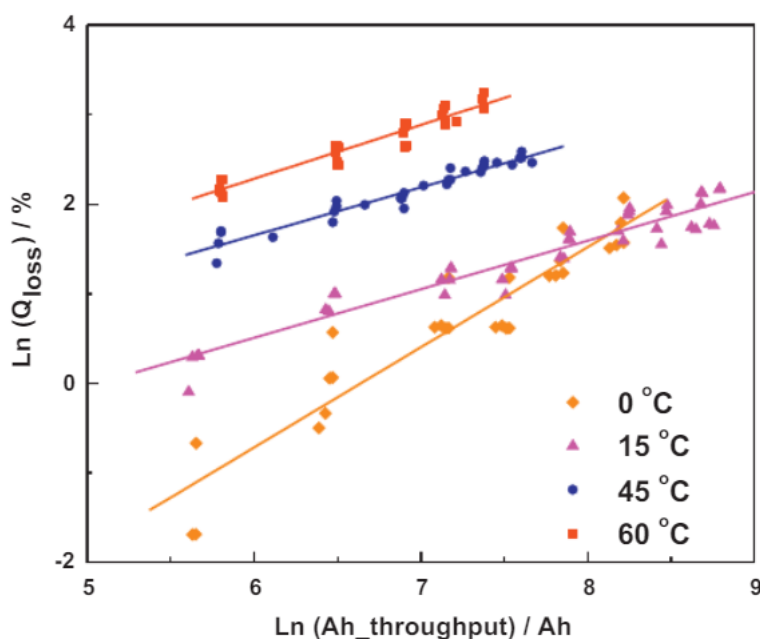


Рисунок 2.25. Соответствие, достигнутое при использовании уравнения для прогнозирования потери мощности в зависимости от температуры

Потеря мощности показана как функция пропускной способности  $Aч$  при 0, 15, 45 и 60 °С. При каждой температуре достигается существенная линейность. (Приведены данные по каждой скорости разряда DOD и C/2)

Как показано на рис. 5, установленные линии параллельны друг другу при 15, 45 и 60 °С, что указывает на то, что наклон этих линий очень похож. Эти результаты позволяют предположить, что температурный эффект не зависит от коэффициента степенной зависимости  $z$ . При 0°С крутой наклон предполагает, что другие механизмы могут быть ответственны за наблюдаемую ускоренную потерю емкости.

## ГЛАВА 3. ПОВТОРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И УТИЛИЗАЦИЯ АККУМУЛЯТОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

### 3.1. Старение литий-ионных аккумуляторов электромобилей

Старение батареи является очень сложным, нелинейным процессом и зависит от многих параметров. Например, можно заметить, что батареи стареют, даже если они не используются. Но, как правило, батареи стареют быстрее, если ими пользоваться. Чтобы справиться со сложностью, общепринятой практикой является разделение старения на три сегмента: календарное, циклическое и обратимое старение :

**Календарное старение** – постепенная деградация батарей с течением времени, даже если они не используются. Это сравнимо со старением человека: даже если мы целый день ничего не делаем, мы все равно стареем.

**Циклическое старение.** Батареи изнашиваются при каждом цикле зарядки и разрядки. Другими словами, каждый раз, когда батарея используется, происходит некоторая степень старения. Возвращаясь к аналогии с людьми, некоторые из нас стареют быстрее при высоких нагрузках или стрессе.

**Обратимое старение.** В то время как циклическое и календарное старение описывает необратимые эффекты старения, обратимое старение, такое как эффект анодного нависания, описывает механизмы старения, которые могут увеличить срок службы батареи.

Когда батареи стареют, одновременно действуют различные механизмы старения. Каждый механизм старения влияет на поведение батареи. Воздействие можно разделить на два рабочих параметра: емкость и внутреннее сопротивление.

**Емкость** показывает, сколько электрического заряда может хранить аккумулятор, выражается в ампер-часах (Ач).

**Внутреннее сопротивление** является характеристикой каждой батареи и может считаться ограничивающим фактором ее мощности. Это коррелирует

с внутренними потерями, возникающими при зарядке или разрядке аккумулятора.

Как на сложную электрохимическую систему, на производительность литий-ионного аккумулятора может влиять множество факторов, таких как температура окружающей среды, режим вождения и эффект старения. Среди этих факторов температура и эффект старения являются двумя наиболее важными факторами. При различных уровнях старения или температурах фиксированная модель литий-ионной батареи и алгоритм оценки состояния могут оказаться не в состоянии предсказать поведение и правильно выдать результат оценки.

По мере увеличения пробега электромобиля производительность аккумулятора постепенно снижается [14].

Следовательно, это также влияет на производительность электромобилей. Основными причинами низкой производительности являются уменьшенная емкость и повышенное внутреннее сопротивление устаревшей батареи. Типичная кривая срока службы литий-ионной батареи представлена на рис. 3.1. Емкость литий-ионной батареи уменьшается по мере увеличения циклов.

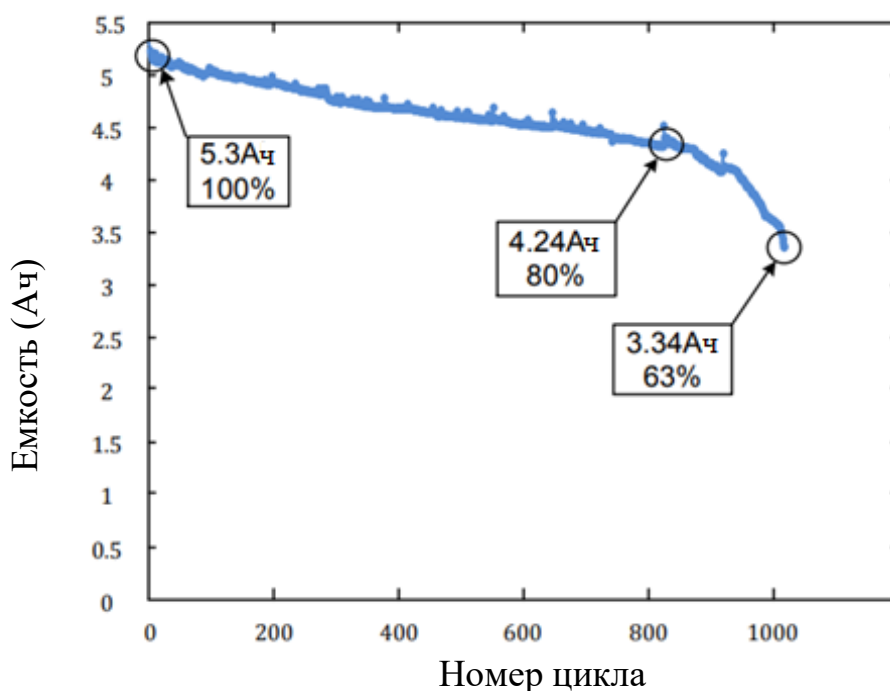


Рисунок 3.1 – Снижение емкости литий-ионного аккумулятора с увеличением количества циклов работы

Разряд батареи при вождении на электромобилях чувствителен к целому ряду факторов – от поведения пользователя до условий окружающей среды. Пробег при ежедневном использовании электромобиля связан с глубиной разряда батареи (DOD); скорость движения и ускорение связаны с током разряда батареи; а основным фактором окружающей среды, влияющим на старение батареи, является температура.

Сводя к минимуму воздействие условий, которые в наибольшей степени ускоряют старение батареи, можно продлить срок службы батареи. Работа при высоких температурах вызовет побочные реакции в батарее, в то время как металлизация лития на аноде ускоряется при низких температурах.

Кроме того, высокий зарядный ток сокращает время зарядки электромобиля, но значительно ускоряет старение аккумулятора. Наконец, работа с высоким SOC (например, высокое напряжение отключения, работа на холостом ходу при высоком SOC и/или циклическая работа при высоком DOD) также приводит к ускоренному износу батареи [18].

Старение батареи часто определяется как отношение разрядной емкости старого единичного аккумулятора, к тому же, когда он был новым. Данный критерий называется окончанием срока службы. Процесс старения, как функция времени, находится под влиянием условий эксплуатации аккумулятора.

Для оценки остаточной ёмкости литий-ионного аккумулятора ( $Q_{ост}$ ) необходимо знать его полную ёмкость ( $Q_{max}$ ) и степень заряженности. При этом остаточная ёмкость может быть вычислена по уравнению:

$$Q_{ост} = Q_{max} \cdot SOC \quad (3.1)$$

где SOC – степень заряженности аккумуляторной батареи и определяет величину оставшегося заряда аккумулятора:

$$SOC = \frac{Q_e}{Q_{max}} \quad (3.2)$$

где  $Q_e = \int_0^t I(t)$  – текущий заряд в батарее.

Состояние годности батареи (state of health, SOH) – качественный показатель, характеризующий текущую степень деградации емкости батареи. Результатом оценки SOH является не численное значение, а ответ на вопрос: «необходимо ли заменить батарею в данный момент?». В настоящее время нет стандарта, регламентирующего на основе каких параметров батареи должен вычисляться SOH. Разные производители BMS используют для этого различные показатели, например, сравнение исходной и действительной емкости батареи  $Q_{\max}$  или внутреннего сопротивления.

Повышенное внутреннее сопротивление не только ограничивает пиковую мощность при ускорении и рекуперативном торможении, но и выделяет дополнительное тепло для ускорения процесса старения.

Другим фактором, влияющим на литий-ионную батарею, является температура окружающей среды. При низкой температуре производительность батареи значительно снижается, что приводит к сокращению доступного запаса хода электромобилей.

Следовательно, для осуществления точной оценки состояния батареи и повышения производительности электромобилей необходимо понимать неопределенности, связанные с температурой и старением литий-ионных аккумуляторов, а также методы преодоления этих неопределенностей.

Скорость старения может быть количественно описана коэффициентом старения, который содержит кривую емкостных потерь. При этом зарекомендовал себя способ, при котором аппроксимируются данные при построении зависимости внутреннего сопротивления от величины, обратно пропорциональной температуре ( $1/T$ ), которая называется Линией Аррениуса и описывается следующим соотношением:

$$r = A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (3.3)$$

где  $r$  – коэффициент старения (скорость, с которой протекает химическая реакция);  $A$  – экспоненциальный коэффициент (частотный коэффициент, связанный с частотой столкновений между молекулами, обычно принимаемый как константа в небольших диапазонах температур);  $e^{x_r}$  – математическая константа = 2,71828;  $E_a$  – энергия активации (константа, представляющая минимальную энергию, необходимую для протекания реакции),  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура в градусах Кельвина;  $kT$  – средняя кинетическая энергия реакции.

Уравнение Аррениуса определяет связь между температурой и скоростью, с которой протекает химическое действие. Это показывает, что скорость увеличивается экспоненциально с повышением температуры.

Более удобное эмпирическое правило — приближение, справедливое для температур, близких к комнатной: на каждые 10 °C повышения температуры скорость реакции удваивается. Таким образом, час при 35 °C эквивалентен времени автономной работы двум часам при 25 °C. Тепло – враг батареи, и, как показывает Аррениус, даже небольшое повышение температуры будет иметь большое влияние на производительность батареи, влияя как на желательные, так и на нежелательные химические реакции [9].

Для типа литий-ионного аккумулятора влияние старения (из-за цикличности) на емкость аккумулятора и внутреннее сопротивление представлено следующими уравнениями эффекта старения:

$$Q(n) = \left\{ \begin{array}{l} (Q_{BOL} - \varepsilon(n) \cdot (Q_{BOL} - Q_{EOL})) \\ Q(n - 1) \end{array} \right\} \quad (3.4)$$

$$R(n) = \left\{ \begin{array}{l} (R_{BOL} + \varepsilon(n) \cdot (R_{EOL} - R_{BOL})) \\ R(n - 1) \end{array} \right\} \quad (3.5)$$

при  $n=kT_h$  ( $k=1,2,3 \dots \infty$ ).

где  $T_h$  – это продолжительность полупериода в секундах. Полный цикл получается, когда аккумулятор разряжается и заряжается или наоборот.

$Q_{BOL}$  – максимальная емкость аккумулятора в Ач в начале срока службы (BOL) и при номинальной температуре окружающей среды.

$Q_{EOL}$  – максимальная емкость аккумулятора в Ач по истечении срока службы (EOL) и при номинальной температуре окружающей среды.

$R_{BOL}$  – это внутреннее сопротивление аккумулятора в омах при BOL и номинальной температуре окружающей среды.

$R_{EOL}$  – это внутреннее сопротивление аккумулятора в омах при EOL и номинальной температуре окружающей среды.

$\varepsilon$  – коэффициент старения аккумулятора. Коэффициент старения равен нулю и единице в BOL и EOL.

Коэффициент старения аккумулятора,  $\xi$ , выражается как

$$\varepsilon(n) = \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon(n-1) + \frac{0,5}{N(n-1)} \left( 2 - \frac{DOD(n-2)+DOD(n)}{DOD(n-1)} \right) \\ \varepsilon(n-1) \end{array} \right\} \quad (3.6)$$

где:

$DD$  – это уровень заряда батареи (%) по истечении половины цикла.

$N$  – является максимальным числом циклов и задается формулой:

$$N(n) = H \left( \frac{DOD(n)}{100} \right)^{-\varepsilon} \cdot \exp\left(-\sigma \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_a(n)} \right)\right) \cdot (I_{dis_{ave}}(n))^{-\gamma_1} \cdot (I_{ch_{ave}}(n))^{-\gamma_2} \quad (3.7)$$

где:

$H$  – постоянная величина числа циклов.

$\varepsilon$  – коэффициент экспоненты.

$\sigma$  – постоянная частоты вращения по Аррениусу для числа циклов.

$I_{dis_{ave}}$  – средний ток разряда в А за половину цикла.

$I_{ch_{ave}}$  – средний ток заряда в А за половину цикла.

$\gamma_1$  – экспоненциальный коэффициент тока разряда.

$\gamma_2$  – коэффициент экспоненты для тока заряда.

Состояние годности батареи (state of health, SOH) – качественный показатель, характеризующий текущую степень деградации емкости батареи.



Результатом оценки SOH является не численное значение, а ответ на вопрос: «необходимо ли заменить батарею в данный момент?». В настоящее время нет стандарта, регламентирующего на основе каких параметров батареи должен вычисляться SOH. Разные производители BMS используют для этого различные показатели, например, сравнение исходной и действительной емкости батареи  $Q_{\max}$  или внутреннего сопротивления [6].

Используя статистические инструменты для анализа этих данных о температуре и емкости, оказывается, что существует приблизительно линейная корреляция между емкостью и температурой, как показано на рис. 3.2. В связи с тем, что максимальное изменение температуры составляет всего 4 °С, изменение емкости составляет до 0,2 Ач/1%. Таким образом, можно сделать вывод, что в реальных условиях разброс мощностей будет больше.

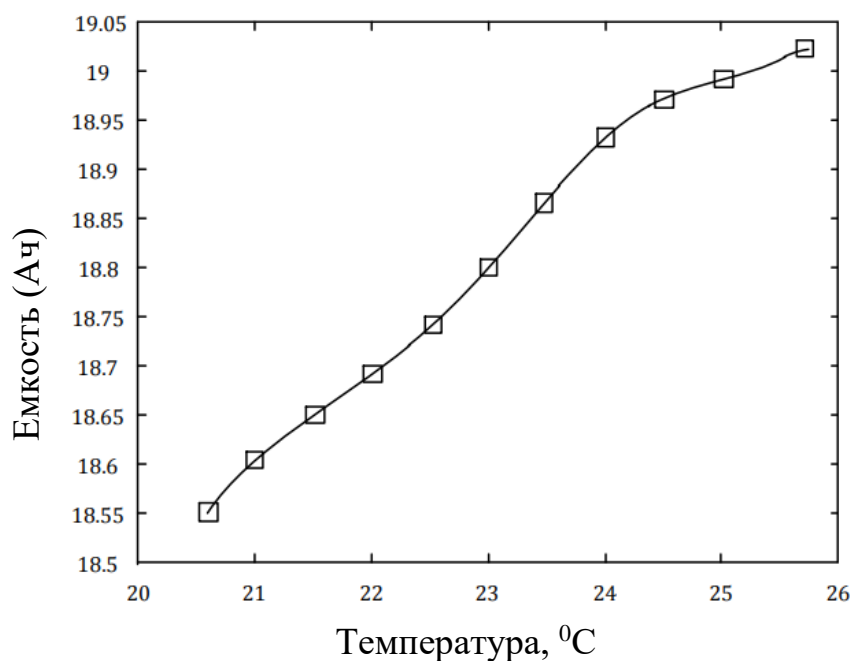


Рисунок 3.2 Приблизительная линейная корреляция между температурой и производительностью

### 3.2. Моделирование старения и прогнозирования срока службы аккумуляторной батареи

Для моделирования старения и прогнозирования срока службы обычно используются два подхода, а именно:

- модели, основанные на производительности
- модели с взвешенной производительностью в ампер-часах.

Что касается моделей производительности, они могут учитывать скорость изменения параметров модели по мере старения батареи. Например, в моделях, основанных на эквивалентных схемах, значения конденсаторов и резисторов могут изменяться по мере медленного старения батареи, и из этих значений можно вывести информацию об окончании срока службы (EOL).

В другом методе взвешенной пропускной способности в ампер-часах модель старения работает путем отслеживания количества циклов (пропускной способности в ампер-часах), которые демонстрирует батарея.

Эти методы должны учитывать условия, при которых батарея работает циклически, такие как скорость зарядки-разрядки, температуры и экстремальные агрессивные условия, выходящие за рамки допустимого.

В данном пособии предлагается метод, основанный на модели алгоритма прогнозирования заряда батареи.

Остаточный срок службы (residual life) после определенного количества разрядок определяется следующим образом:

$$\text{Residual life} = 1 - \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{L_{tot(i)}} \quad (3.8)$$

где  $L_{tot}$  определяется как общее количество заряда, которое может быть извлечено из батареи.

Срок службы заряда ( $L_{ah}$ ) определяется как срок службы, выраженный в Ач, который определяется следующим образом:

$$L_{Aч} = L_{ц} \cdot DOD \cdot Aч_0 \quad (3.9)$$

Например, срок службы заряда при 10% DOD может быть рассчитан следующим образом: Глубина разгрузки (DOD)

$$L_{Aч}(DOD = 10\%) = 5400 \text{циклов} \cdot \frac{10}{100} \cdot 6,5 \text{Ач} = 3510 \text{Ач}$$

Существует метод прогнозирования срока службы для определения влияния двух основных параметров на старение батареи, а именно: глубины разряда и скорости разряда. Влияние глубины разряда для данного события описывается следующим уравнением:

$$Aч_{эфф} = \left(\frac{D_A}{D_R}\right)^{u_0} \cdot e^{u_1\left(\frac{D_A}{D_R}-1\right)} Aч_{факт} \quad (3.10)$$

где  $D_R$  – это процентная глубина разряда, при которой был определен номинальный срок службы цикла,  $D$  – представляет собой фактический разряд в процентах от номинальной мощности,  $Aч_{эфф}$  – определяется как эффективный разряд в ампер-часах после регулировки глубины разряда и скорости разряда,  $Aч_{факт}$  – это фактическая пропускная способность в ампер-часах.

Что касается скорости разряда, то эффективный разряд для определенного события рассчитывается следующим образом:

$$Aч_{эфф} = \left(\frac{C_R}{C_A}\right)^{\vartheta_0} \cdot e^{\vartheta_1\left(\frac{C_R}{C_A}-1\right)} Aч_{факт} \quad (3.11)$$

Где,  $C_A$  определяется как емкость элемента, определенная при заданной скорости разряда, а  $C_R$  определяется как емкость, определенная при номинальной скорости разряда. Комбинируя оба эффекта путем умножения:

$$Aч_{эфф} = \left(\frac{D_A}{D_R}\right)^{u_0} \cdot e^{u_1\left(\frac{D_A}{D_R}-1\right)} \left(\frac{C_R}{C_A}\right)^{\vartheta_0} \cdot e^{\vartheta_1\left(\frac{C_R}{C_A}-1\right)} Aч_{факт} \quad (3.12)$$

Это уравнение может быть использовано для расчета эффективной емкости  $Aч$  для данного события разрядки.

Суммируя эффективные разряды из серии событий разрядки, прогноз срока службы батареи может быть рассчитан следующим образом:

$$L_{time} = \frac{Aч_{Rtotal}}{\frac{Aч_{Atotal}}{T}} = \frac{L_R D_R C_R}{\sum_{i=1}^n Aч_{эфф}} T \quad (3.13)$$

$Aч_{RTotal}$  – это срок службы элемента (в  $Aч$ ) при известных, четко определенных циклах зарядки и разрядки при заданной глубине разряда и

номинальном токе разряда.  $A_{\text{чRTotal}}$  – срок службы элемента в фактических условиях эксплуатации,  $T$  – время работы.

Важнейшим параметром аккумуляторной батареи является ее емкость ( $Q_{\text{Max}}$ ), определяемая как максимальное количество электрической энергии, которое батарея отдает в нагрузку с момента полного заряда до состояния разряда, не приводящего к преждевременной деградации аккумуляторов.

### **3.3. Как продлить срок службы литий-ионных аккумуляторов**

Литий-ионные аккумуляторы продолжают совершенствоваться. Достигнуты заметные успехи в долговечности и безопасности, в то время как емкость постепенно увеличивается. Сегодня литий-ионный аккумулятор практически соответствует ожиданиям большинства потребительских устройств, но все равно много вопросов остаются мало изученными.

Каждая аккумуляторная система имеет уникальные требования с точки зрения скорости зарядки, глубины разряда, нагрузки и воздействия неблагоприятных температур. Необходимо понимать, что вызывает потерю емкости, как повышение внутреннего сопротивления влияет на производительность, к чему приводит повышенный саморазряд и насколько низко может разряжаться аккумулятор.

Литий-ионный аккумулятор работает за счет перемещения ионов между положительным и отрицательным электродами. Теоретически такой механизм должен работать вечно, но цикличность, повышенная температура и старение со временем снижают производительность. Производители придерживаются консервативного подхода и указывают срок службы литий-ионных аккумуляторов в большинстве потребительских товаров в диапазоне от 300 до 500 циклов разряда/зарядки [14].

Аккумулятор электромобиля стареет, и его емкость уменьшается, но производитель должен предоставить гарантию на аккумулятор в течение восьми лет. Это достигается за счет увеличения размера аккумулятора. Когда

аккумулятор новый, используется только около половины доступной энергии. Это достигается путем зарядки аккумулятора только до 80% вместо полной зарядки и разрядки до 30%, когда израсходован доступный запас хода. По мере разряда аккумулятора требуется больше места для хранения. Запас хода остается постоянным, но водителю неизвестно, что аккумулятор постепенно заряжается до более высокого уровня и разряжается глубже, чтобы компенсировать затухание.

Привычки вождения и температура также влияют на старение, что стало очевидным, что аккумуляторы электромобилей, работающие в теплом климате, преждевременно разряжаются. Хранение аккумулятора при повышенной температуре и высоком уровне заряда вызывает больший стресс, чем агрессивное вождение. Другими словами, хранение полностью заряженного литий-ионного аккумулятора при температуре 30°C и выше ускоряет процесс старения больше, чем вождение при умеренной температуре. Многие аккумуляторы электромобилей включают жидкостное охлаждение, чтобы уменьшить износ батареи, связанный с нагревом.

Как только емкость аккумулятора падает до 80%, защита от перегрузки срабатывает, и система обслуживания аккумулятора (BMS) выполняет полную зарядку и разрядку. Это подвергает аккумулятор электромобиля нагрузке, аналогичной нагрузке мобильного телефона, и водитель начинает замечать уменьшение дальности движения. Может потребоваться замена аккумулятора, но стоимость будет значительной и выше, чем у двигателя внутреннего сгорания.

Оценка срока службы батареи по подсчету циклов не является достоверной, поскольку глубина разряда может варьироваться, и нет четко определенных стандартов того, что составляет цикл. Батарея может выйти из строя в течение отведенного времени из-за интенсивного использования или неблагоприятных температурных условий; однако срок службы большинства аккумуляторов значительно превышает заявленный производителем.

Производительность аккумулятора измеряется емкостью, основным показателем работоспособности. Внутреннее сопротивление и саморазряд также играют определенную роль, но они менее важны для прогнозирования окончания срока службы современных литий-ионных аккумуляторов.

При интенсивном использовании, глубина разряда (DoD) определяет количество циклов работы аккумулятора. Чем меньше разряд (низкий DoD), тем дольше прослужит аккумулятор. Если это вообще возможно, избегайте полной разрядки и чаще заряжайте аккумулятор между использованиями. Частичная разрядка литий-ионных аккумуляторов допустима. Память отсутствует, и батареям не нужны периодические циклы полной разрядки для продления срока службы.

В следующих таблицах указаны потери емкости литий-ионных аккумуляторов на основе кобальта, связанные с напряжением. Напряжения фосфата железа лития и титаната лития ниже и не соответствуют приведенным справочным значениям напряжения.

В таблицах 3.1 – 3.4 показаны общие тенденции старения распространенных литий-ионных аккумуляторов на основе кобальта в зависимости от глубины разряда, температуры и уровней заряда, в таблице 6 дополнительно рассматривается потеря емкости при работе в заданных диапазонах и при разрядке. В таблицах не рассматриваются сверхбыстрая зарядка и разряды при высокой нагрузке, которые сокращают срок службы батареи [36].

В таблице 3.1 указано количество циклов разряда/зарядки, которые Li-ion может выполнить при различных уровнях DoD, прежде чем емкость аккумулятора упадет до 70 процентов. DoD представляет собой полную зарядку, за которой следует разрядка до указанного в таблице уровня состояния заряда (SoC).

Таблица 3.1 – Продолжительность циклов в зависимости от глубины разряда

	Циклы разряда
--	---------------

Глубина разряда	LiPO <sub>4</sub>
100% DoD	~600
80% DoD	~900
60% DoD	~1,500
40% DoD	~3,000
20% DoD	~9,000
10% DoD	~15,000

Частичный разряд снижает напряжение и продлевает срок службы батареи, как и частичная зарядка. Повышенная температура и большие токи также влияют на продолжительность цикла.

100% DoD – это полный цикл; 10% - это очень короткий цикл. Таким образом, циклическое использование в режиме среднего уровня заряда обеспечивает наилучшую долговечность.

Литий-ионный аккумулятор испытывает «стресс» при воздействии тепла, так же как и при поддержании высокого напряжения заряда элемента. Температура батареи выше 30°C считается повышенной, а для большинства литий-ионных аккумуляторов, а напряжение выше 4,10 В на элемент считается высоким напряжением. Воздействие высокой температуры на аккумулятор и пребывание в полностью заряженном состоянии в течение длительного времени может негативно сказаться на аккумуляторной батарее. В таблице 3.2 показано снижение емкости в зависимости от температуры и SoC.

Таблица 3.2 – Расчетная восстанавливаемая емкость при хранении Li-ion в течение одного года при различных температурах

Температура	40% заряда	100% заряда
0°C	98% (через 1 год)	94% (через 1 год)
25°C	96% (через 1 год)	80% (через 1 год)
40°C	85% (через 1 год)	65% (через 1 год)
60°C	75% (через 1 год)	60% (через 3 месяца)

Повышенная температура ускоряет необратимую потерю емкости.

Использование пониженного уровня заряда SOC на 50% увеличивает ожидаемый срок службы литий-ионного аккумулятора автомобиля на 44-130%.

Производители электромобилей, обычно ограничивают заряд до 85% и разряд до 25%, или 60% энергопотребления, чтобы продлить срок службы батареи.

Аккумуляторы имеют низкую теплотворную способность по сравнению с ископаемым топливом, и нет особого смысла питать от них грузовой поезд, океанское судно или большой самолет. Исследование показывает, что замена керосина на аккумуляторы может поддерживать самолет в воздухе менее 10 минут. Стоимость – еще одна проблема, и зарядка аккумуляторов занимает много времени. Быстрая и удобная заправка, поскольку наполнение бака жидким или газообразным топливом невозможно с помощью электрохимического устройства. Для зарядки также требуется высокая мощность. Сверхбыстрая зарядка EV потребляет электроэнергию, эквивалентную мощности пяти домохозяйств. Зарядка парка электромобилей может привести к проблемам электропотребления города.

Достижений в области аккумуляторных технологий, достигнутых за последние 20 лет, недостаточно для замены ископаемого топлива. Расширение возможностей аккумуляторов напоминает нам о многих их ограничениях, которые включают низкую плотность энергии, длительное время зарядки, высокую стоимость и короткий срок службы. В таблице 3.3 приведены значения энергетической плотности обычных видов топлива, включая аккумулятор.

Таблица 3.3 – Энергетические плотности ископаемого топлива и батарей.

Вид топлива	Энергия на единицу массы (Вт ч/кг)
Водород (350 бар)	39,300
Бензин, дизельное топливо, природный газ (250 бар)	12,000–13,000
Каменный уголь (твердый), метанол	6,000–7,000
Древесина (средняя)	2,300
Литий-ионный аккумулятор	100–250
Свинцово-кислотный аккумулятор	40



Ископаемое топливо содержит во много раз больше энергии на единицу массы по сравнению с батареями, но электроэнергию можно использовать более эффективно, чем при сжигании ископаемого топлива.

Резкая нагрузка также сокращает время автономной работы. Из-за своего большого размера аккумулятор электромобиля подвергается лишь умеренной нагрузке даже при ускорении.

В электромобиле нет возможности оповещать водителя о емкости аккумулятора, а только можно увидеть уровень заряда (SoC) в виде дальности движения. Это сделано отчасти из опасения жалоб клиентов, если емкость упадет ниже установленного уровня в конце гарантийного срока. Чем меньше знаний, тем лучше.

На рисунке 3.3 показан срок службы литий-ионных аккумуляторов с различными конечными точками заряда и разряда.

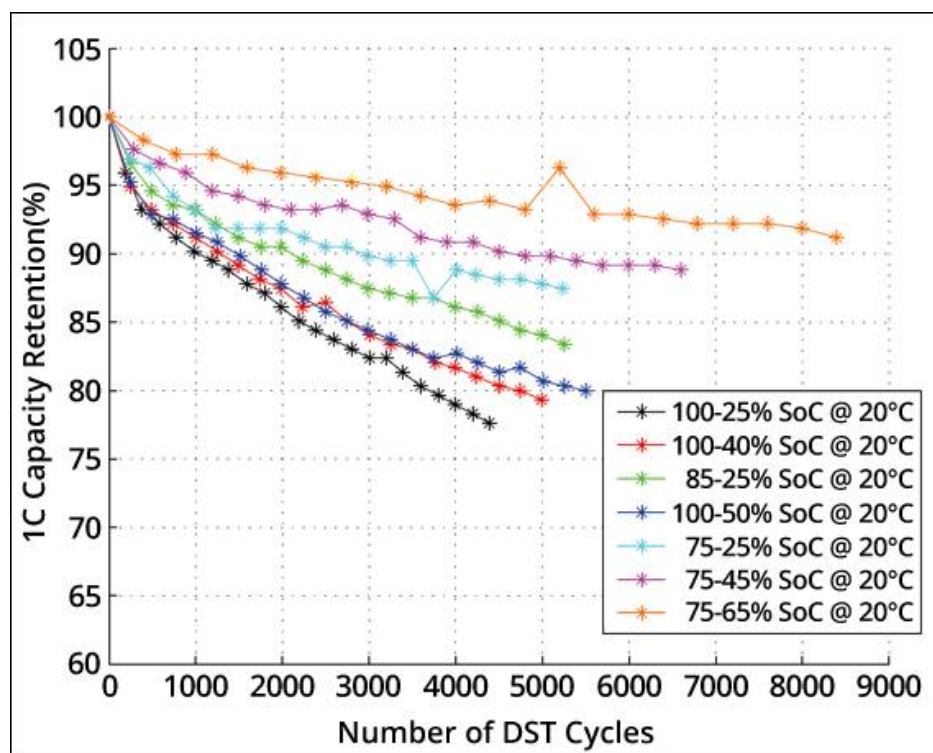


Рисунок 3.3 – Потеря емкости литий-ионных аккумуляторов в зависимости от точек отсечения заряда и разряда.

Наибольшая потеря емкости литий-ионных аккумуляторов происходит при зарядке до 100% и разрядке до 25% (черные звездочки). Циклическое

переключение между 85% и 25% (зеленый) обеспечивает более длительный срок службы, чем зарядка до 100% и разрядка до 50% (темно-синий).

Наименьшая потеря емкости происходит при зарядке литий-ионных аккумуляторов до 75% и разрядке до 65%. Это, однако, приводит к чрезмерному увеличению размеров и недостаточному использованию батареи.

Скорость процесса деградации в режиме ожидания, известного как календарное старение, варьируется в зависимости от SOC и температуры.

Данные календарного старения литий-оксид-марганцевой батареи с указанными SoC и температурой и данные о сроке службы батареи с указанными DoD и температурой представлены на рисунках 3.4 и 3.5.

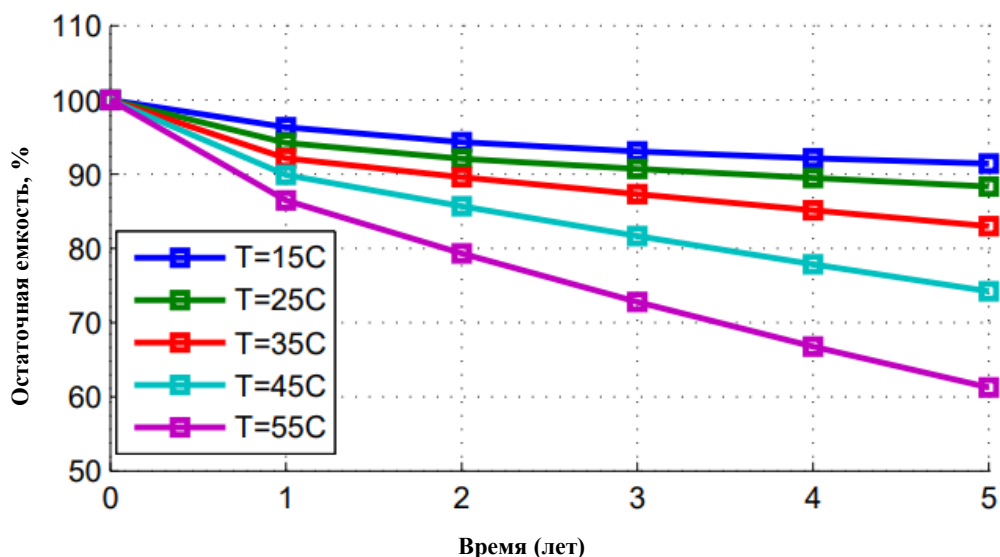


Рисунок 3.4 – Снижение емкости аккумуляторной батареи при 50% SoC

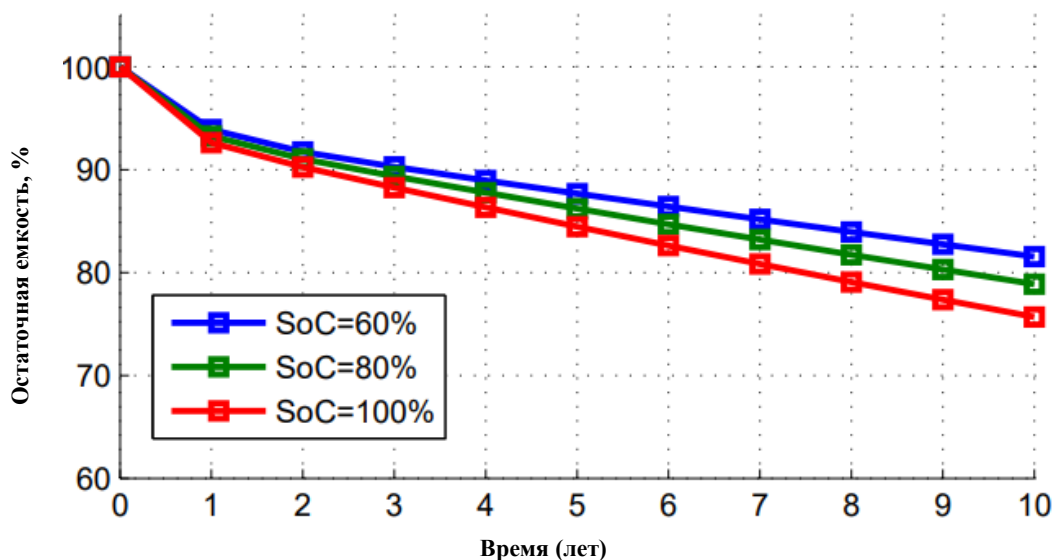


Рисунок 3.5 – Снижение емкости аккумуляторной батареи при 25% SoC

Низкие температуры увеличивают сопротивление батареи и снижают ее производительность.  $20^{\circ}\text{C}$  является разделительной линией между поведением при высоких и низких температурах, поскольку сопротивление батареи падает с повышением температуры, пока температура остается выше  $20^{\circ}\text{C}$ , но увеличивается, если температура падает ниже  $20^{\circ}\text{C}$ . Снижение емкости аккумулятора более заметно при высоких температурах, чем при умеренных. Кроме того, высокие SOC также ускоряют снижение емкости из-за высокого напряжения.

Данные календарного теста на старение, использованные в этом исследовании, показывают, что скорость старения при  $15^{\circ}\text{C}$  меньше, чем при  $20^{\circ}\text{C}$ . Однако, поскольку не было доступно данных для температур ниже  $15^{\circ}\text{C}$ , рекомендуется использовать предложенную модель температурного напряжения только для батарей, работающих при температуре выше  $15^{\circ}\text{C}$ .

Саморазряд также является важным процессом при календарном старении, который приводит к снижению напряжения и снижению доступной энергии. Ток саморазряда увеличивается с увеличением SOC, и тенденция к росту особенно очевидна при высокой температуре  $55^{\circ}\text{C}$ .

Во время работы в режиме ожидания, при высокой температуре и высоком SOC деградация батареи ускорится, и явление саморазряда будет более очевидным.

Старение в процессе зарядки неизбежно. По сравнению со старением при вождении процесс старения при зарядке легче контролировать. Обычно для минимизации износа аккумулятора и сокращения времени зарядки можно использовать различные методы зарядки.

Однако проблема разряда батареи все еще нуждается в дальнейших исследованиях, особенно в отношении работы электромобилей. В настоящее время литература, касающаяся определения механизма снижения производительности аккумулятора и последующего старения, очень ограничена и часто основана на данных, полученных с использованием стандартизированных циклов вождения, которые не всегда отражают реальную работу аккумулятора в электромобилях.

### 3.4. Утилизация аккумуляторов электромобилей

На рисунке 3.6 показан потенциал глобального рынка повторного использования аккумуляторных батарей, основанный на совокупной емкости аккумуляторов электромобилей с истекшим сроком службы, которые могут быть повторно использованы во вторичных приложениях до 2050 года



Рисунок 3.6 – Прогнозируемая совокупная глобальная емкость аккумуляторов электромобилей с истекшим сроком службы, доступных для повторного использования

Если предположить, что аккумуляторы будут использоваться в приложениях второго срока службы в течение 10 лет, то глобальная емкость всех повторно используемых аккумуляторов, все еще доступных в данный год, составит 96 ГВтч в 2030 году, 910 ГВтч к 2035 году, 3000 ГВтч к 2040 году и 12 000 ГВтч к 2050 году.

В дополнение к экономической выгоде от использования аккумуляторов электромобилей с истекшим сроком службы в системах вторичного использования, экологические выгоды могут быть достигнуты за счет снижения спроса на сырье для вновь производимых аккумуляторов.

Вместо того, чтобы выбрасывать аккумуляторы, предприятия по переработке автомобилей (предприятия, ранее известные как свалки) отправляют их специализированным фирмам, которые разбирают аккумуляторы и разбирают их на различные материалы: провода, схемы, пластик и сами элементы. Элементы и контуры измельчаются, чтобы отделить и очистить содержащиеся в них различные металлы, включая никель и литий.

Современные возможности робототехники, компьютерного зрения и искусственного интеллекта для обращения с разнообразными отходами действительно существуют, и эти системы продемонстрировали достаточную надежность, чтобы получить признание в ядерной промышленности Великобритании, например, при внедрении систем, управляемых искусственным интеллектом и машинным зрением роботизированные манипуляторы для резки загрязненных отходов в радиоактивных средах.

В настоящее время данные технологии адаптируются к сложной задаче роботизированной разборки аккумуляторных батарей. При различных масштабах разборки – снятии упаковки, разборке корпуса, извлечении модуля

и разделении элементов – существуют различные проблемы и барьеры на пути автоматизации. Некоторые из них представлены на рисунке 3.7.

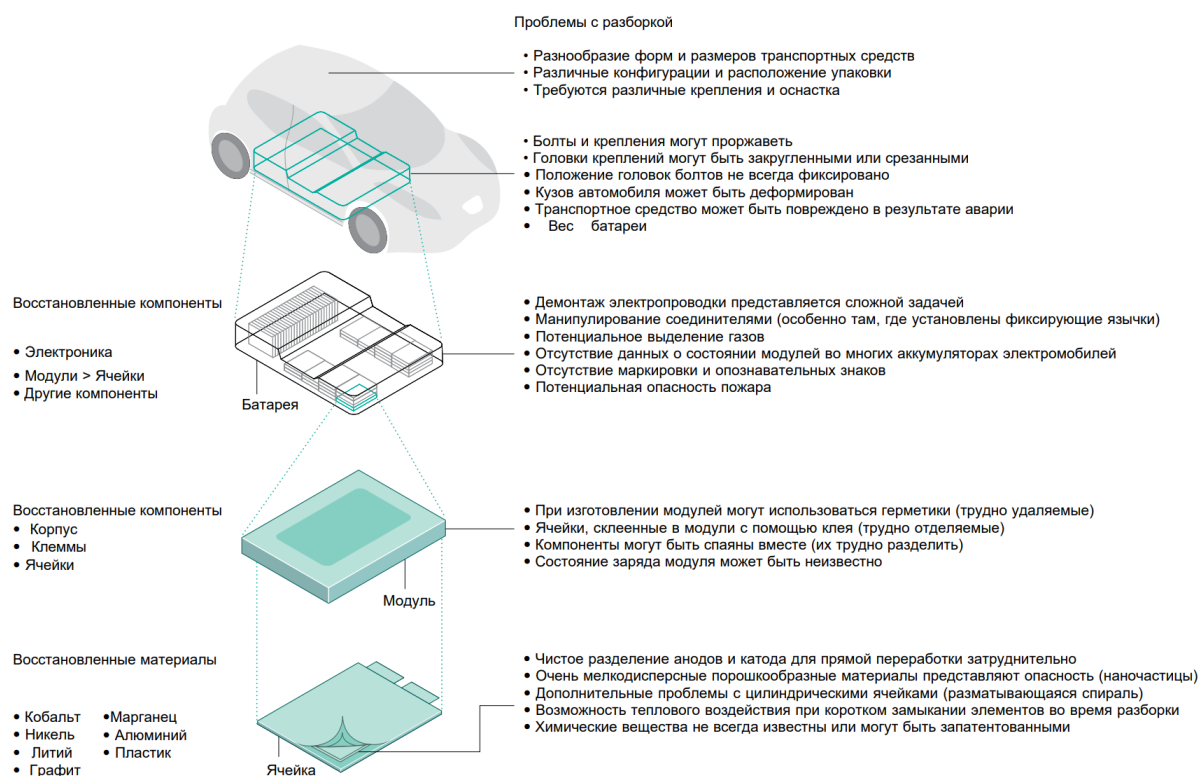


Рисунок 3.7 – Диаграмма, показывающая проблемы разборки на разных уровнях масштаба.

Аккумуляторные батареи электромобилей имеют сложную конструкцию, состоящую из жгутов проводов, шин, электроники, модулей, элементов питания и других компонентов. Существует также множество различных типов креплений, включая винты, болты, клеи, герметики и припой, которые не предназначены для роботизированного демонтажа.

Дилерские центры также ответственно утилизируют использованные гибридные аккумуляторы, полагаясь на программы сбора, созданные автопроизводителями, которые отправляют эти аккумуляторы тем же переработчикам для прохождения тех же процедур разборки. Программа Toyota, пожалуй, самая примечательная, учитывая, что автопроизводитель продал большую часть гибридных автомобилей в США.

Хотя аккумуляторы электромобилей содержат в 20–100 раз больше энергии, чем аккумуляторы гибридов, они перерабатываются практически так же, как и аккумуляторы меньшего размера. Аккумуляторы отправляются на предприятие, специализирующееся на разборке аккумуляторов и переработке их компонентов. Некоторые детали просты: стальной, медный и алюминиевый лом обычно отправляется на общенациональную переработку металлов. Пластик, возможно, не подлежит вторичной переработке, но он составляет небольшую часть от общего содержимого аккумуляторной батареи электромобиля.

Переработка товаров является крупным бизнесом во многих отраслях, и автомобильный бизнес не является исключением: такие металлы, как сталь и алюминий, из которых состоит большая часть кузова автомобиля, обычно перерабатываются в конце срока службы автомобиля. Однако электромобили отличаются друг от друга благодаря металлу их аккумуляторов.

В 2017 году технологический предприниматель из Кремниевой долины с обширным опытом работы в автомобильных стартапах основал собственную компанию по расширению сбора и переработки аккумуляторов. Дж. Б. Штробель, один из первых сотрудников Tesla (а также бывший технический директор автопроизводителя), привлек сотни миллионов долларов венчурного капитала, когда объявил о запуске стартапа по переработке аккумуляторов и их поставке. Штаб-квартира Redwood Materials сейчас находится в Карсон-Сити, штат Невада, недалеко от завода Tesla по производству аккумуляторов в районе Рино. Решение Штробеля сосредоточиться на поставках полезных ископаемых для аккумуляторов спровоцировало инвестиционную гонку, и в различных частях индустрии переработки аккумуляторов появилось более дюжины стартапов или корпоративных организаций, финансируемых венчурными фондами.

Однако вторичная переработка по-прежнему имеет решающее значение для обеспечения того, чтобы материалы из аккумуляторов электромобилей с

истекшим сроком службы извлекались и использовались для поддержания цепочек поставок полезных ископаемых. На рисунке 3.8 показано, как вторичная переработка может снизить спрос на сырье, необходимое для производства новых аккумуляторов электромобилей. Предполагается, что 50% собранных батарей с истекшим сроком службы за данный год непосредственно перерабатываются, в то время как остальные 50% повторно используются во вторичных целях в течение 10 лет, прежде чем будут доступны для вторичной переработки.

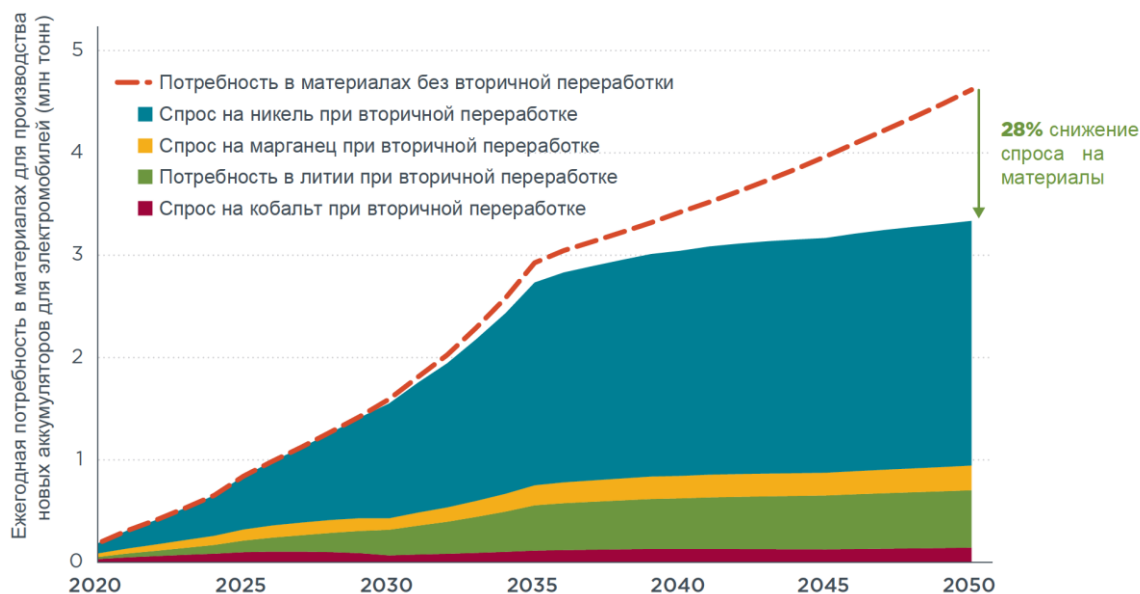


Рисунок 3.8 – Годовой спрос на литий, никель, кобальт и марганец для глобальных продаж электромобилей

Как показано на рисунке 3.8, ежегодный спрос на материалы для аккумуляторных батарей резко возрастет с 2020 по 2035 год, поскольку несколько ведущих рынков электромобилей приближаются к достижению 100% продаж новых малотоннажных электромобилей. Однако, учитывая задержку срока службы транспортного средства, утилизация электромобилей с истекшим сроком службы начнет набирать обороты только в начале 2030-х годов. После 2035 года более медленный рост продаж электромобилей и растущая доступность переработанных материалов могут привести к значительному сокращению потребности в новых материалах. В целом, анализ показывает, что переработка отходов может снизить совокупный годовой



спрос на необработанный кобальт, литий, марганец и никель на 3% в 2030 году, на 11% в 2040 году и на 28% в 2050 году. Таким образом, эффективные методы утилизации могли бы стабилизировать ежегодный спрос на сырье, несмотря на продолжающийся рост производства аккумуляторов для электромобилей.

### **Техническая осуществимость повторного использования батарей**

Технический процесс повторного использования батарей включает в себя ряд этапов, которые могут отличаться в разных центрах повторного использования, поскольку для оптимизации процесса постоянно проводятся исследования и разработки. Процесс, повторного использования батареи, показанный на рисунке 3.9, который включает в себя пять основных этапов: 1) сбор батареи; 2) транспортировка батареи; 3) проверка батареи; 4) сортировка и перегруппировка; и 5) установка батареи на второй срок службы.

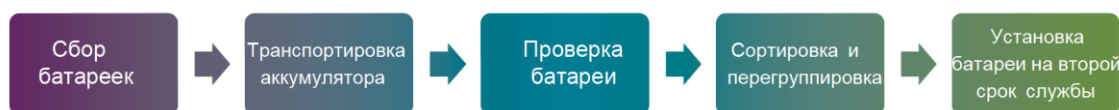


Рисунок 3.9 – Основные этапы процесса повторного использования аккумуляторной батареи электромобиля.

На рисунке 3.10 кратко представлены основные этапы утилизации литий-ионных аккумуляторов. Как показано, вплоть до стадии разборки батареи этапы утилизации литий-ионных аккумуляторов аналогичны этапам, представленным на рисунке 3.9.

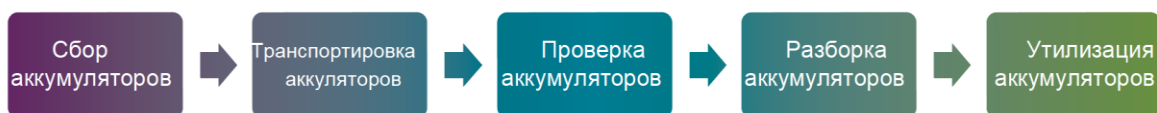


Рисунок 3.10 – Основные этапы процесса утилизации аккумуляторных батарей электромобилей

*Сбор и транспортировка батареек.* Необходимо наладить логистику сбора батареек, чтобы их можно было отслеживать на протяжении всего срока

службы и, следовательно, безопасно собирать по истечении срока службы. Кроме того, транспортировка аккумуляторов для электромобилей может быть дорогостоящей, особенно когда утилизация аккумуляторов осуществляется за границей, что требует получения нескольких лицензий для каждой пересекаемой юрисдикции. К транспортным расходам также добавляются меры безопасности, которым подвергаются аккумуляторы для электромобилей из-за их классификации как опасных отходов

*Проверка аккумулятора.* Когда аккумулятор для электромобилей с истекшим сроком службы поступает в центр утилизации, часто бывает трудно получить информацию о его химическом составе и других технических характеристиках. В то время как пути гидрометаллургической переработки, как правило, специализированы для данного химического состава батарей, заводы по прямой переработке также могут быть специализированы только для конкретной конструкции батарей. Доступная информация о химическом составе и конструкции батарей, таким образом, является предварительным условием эффективного распределения отработанных батарей на соответствующие заводы по переработке.

*Разборка аккумуляторных батарей.* Большинство процессов утилизации аккумуляторных батарей требуют демонтажа аккумуляторных блоков. Поскольку конструкция литий-ионных аккумуляторных блоков, модулей и элементов питания, используемых в электромобилях, значительно различается в зависимости от моделей и производителей, этот этап в основном выполняется вручную, что может представлять угрозу для здоровья и безопасности работников. При более стандартизированной геометрии и архитектуре ячейки ручная разборка могла бы быть заменена автоматизированными процессами, что снизило бы эти риски и еще больше повысило эффективность

*Переработка аккумуляторных батарей.* В связи с растущими масштабами и быстрым развитием технологий существует большое разнообразие подходов к переработке литий-ионных аккумуляторов, что

открывает широкие возможности для инноваций. В общих чертах можно выделить три основных пути: пирометаллургическая переработка, которая включает также гидromеталлургические стадии, обычная гидromеталлургическая переработка и прямая переработка. Этапы этих трех основных путей могут быть объединены, и возможны смешанные вариации путей.

В настоящее время самой большой проблемой Redwood является закупка достаточного количества аккумуляторов для электромобилей для переработки. Компания разработала программы с торговыми группами по переработке автомобилей и автопроизводителями, включая Ford и Volkswagen, чтобы увеличить поставки использованных элементов для использования в измельчителях и очистителях. Министерство энергетики США даже предоставило Redwood кредит в 2 миллиарда долларов на строительство завода в Неваде.

Считается, что срок службы аккумуляторной батареи электромобиля подходит к концу, когда ее емкость составляет не более 70–75 процентов от первоначальной емкости. Для достижения этой отметки может потребоваться 10 и более лет. Даже при потере четверти или более пиковой мощности устаревшие аккумуляторные блоки по-прежнему обеспечивают достаточное количество энергии — от 20 до 90 киловатт-часов, или до трех дней электричества для среднего дома. Долгое время считалось, что может возникнуть устойчивая индустрия «второго использования», которая будет покупать и перепрофилировать использованные упаковки, продлевая их жизнь еще на 10 или более лет.

Однако этого не произошло ни в каком масштабе. Конечно, автопроизводители реализовали первые демонстрационные проекты, и некоторые установки по накоплению энергии сейчас работают в разных странах, но потенциальные клиенты для хранения энергии на месте в основном продолжают предпочитать новые новые элементы пестрому набору

использованных электромобилей с неизвестным использованием и режимом работы. циклы (в основном, износ от вождения).

Проблема повторного использования особенно сложна, поскольку новые элементы сейчас значительно дешевле, до такой степени, что больше не ясно, существует ли бизнес-модель покупки, транспортировки, перепрофилирования и перепродажи использованных элементов из старых аккумуляторных блоков.

Переработка аккумуляторов электромобилей является важной частью обеспечения устойчивого будущего для электромобилей. Существует несколько вариантов переработки аккумуляторов электромобилей, каждый из которых имеет свои преимущества и проблемы.

Одним из вариантов переработки аккумуляторов электромобилей является извлечение ценных материалов, таких как литий, кобальт и никель, для повторного использования в новых батареях. Этот процесс включает в себя разрушение старых батарей и разделение различных компонентов для восстановления этих ценных материалов. Этот метод помогает снизить спрос на вновь добытые материалы, которые могут оказать существенное влияние на окружающую среду.

Другой вариант – перепрофилировать старые аккумуляторы электромобилей для использования в других целях. Хотя аккумуляторы больше не имеют достаточной емкости для использования в электромобилях, их все равно можно использовать для хранения энергии из возобновляемых источников, таких как солнечные панели или ветряные турбины. Это продлевает срок службы батарей и снижает потребность в производстве новых батарей.

**Для повторного использования батарей и обеспечения эффективной утилизации необходимо учесть следующее:**

1. По состоянию на 2024 год на заводах нет внутренних мощностей по переработке батарей с истекшим сроком службы. Кроме того, аккумуляторы часто классифицируются как опасные отходы, и связанные с

этим меры предосторожности увеличивают расходы на транспортировку и логистику. Исследования показали, что транспортные расходы могут составлять до 63% от общей стоимости повторного использования или утилизации аккумуляторов. Таким образом, развитие внутреннего потенциала для повторного использования и утилизации аккумуляторов могло бы значительно снизить затраты, стимулируя местную экономику и уменьшая зависимость от международных цепочек поставок. Насколько это возможно, правительства могли бы разрабатывать программы стимулирования, создавать благоприятные налоговые и торговые положения и развивать государственно-частное партнерство для поддержки внутреннего потенциала в области повторного использования и переработки.

2. Аккумуляторы для электромобилей с истекшим сроком службы обычно поступают в центр повторного использования или утилизации с небольшим количеством информации о характеристиках аккумуляторов (например, химическом составе), состоянии здоровья или истории эксплуатации.

Повышение доступности этой информации может снизить затраты, связанные с повторным использованием или переработкой отходов, за счет сокращения дорогостоящих проверок состояния здоровья и обеспечения возможности предварительной сортировки батарей по более оптимизированным направлениям. Правительство может потребовать, чтобы производители батарей раскрывали информацию о батареях. Более того, обязательные требования к долговечности батарей могут стимулировать производство долговечных аккумуляторов и, таким образом, поддерживать использование с длительным сроком службы.

3. Современные заводы по переработке аккумуляторных батарей промышленного масштаба используют либо пирометаллургический способ с относительно высоким уровнем выбросов парниковых газов, который также включает гидromеталлургические процессы, либо менее углеродоемкий гидromеталлургический способ без предварительной пирометаллургической

обработки. В то время как оба способа позволяют извлекать металлы, такие как кобальт, медь и никель, извлечение алюминия и лития обычно достигается только гидрометаллургическим способом. Гидрометаллургические способы могут также позволить извлекать графит и пластмассы. Третьим способом переработки, который еще не реализован на коммерческом уровне, является прямая переработка. В принципе, этот способ позволяет напрямую извлекать катодные и анодные материалы. Правительство могло бы поддержать текущие исследования и разработки в области процессов переработки, чтобы расширить ассортимент материалов для аккумуляторов.

4. Конкурентоспособность вторичной переработки зависит от содержания дорогостоящих материалов, которые содержатся в аккумуляторах электромобилей с истекшим сроком службы, таких как кобальт, никель или литий. Тем не менее, начиная с 2022 года, сталкиваясь с нестабильностью цепочек поставок и пытаясь сократить затраты на материалы, производители переходят на химикаты с более низким содержанием кобальта и никеля или те, которые не содержат кобальта и никеля, такие как литий-железо-фосфатные батареи (LFP).

Это может поставить под сомнение общую рентабельность операций по утилизации. Правительство могло бы рассмотреть обязательные целевые показатели по утилизации конкретных элементов для обеспечения эффективной утилизации всех ключевых материалов для аккумуляторных батарей. Такие целевые показатели также позволяют избежать использования только тех материалов, которые приносят прибыль. Для дальнейшего обеспечения высокой чистоты переработанного материала можно было бы ввести минимальные доли переработанных материалов для конкретных элементов при производстве новых батарей.

## Выводы

Электротранспорт по совокупности технико-экономических показателей уже сейчас демонстрирует более высокую эффективность по сравнению с машинами на двигателе внутреннего сгорания. В настоящее время это касается только промышленного транспорта, функционирующего на основе систем тягового электропривода, а также складской техники на аккумуляторных батареях. В указанных случаях проблема запаса хода на батарее практически отсутствует, поскольку электровозы вообще не имеют автономного хода, а складская техника не отъезжает далеко от зарядных устройств и в любой момент при необходимости может быть поставлена на зарядку.

В области потребительского транспорта – легковых электромобилей – одной из ключевых проблем является запас автономного хода, что вынуждает производителей наращивать емкость аккумуляторной батареи. При нынешних ценах на аккумуляторные батареи это приводит к значительной диспропорции между стоимостью электромобиля, с одной стороны, и его техническими показателями, и уровнем комфорта – с другой. Тем не менее, объем продаж электромобилей нарастает с ускорением. Это является следствием некоторого снижения стоимости аккумуляторных батарей, что позволяет производителям предлагать потребителю инновационный продукт по более приемлемой цене, а также следствием расширения модельного ряда чистых электромобилей и подключаемых гибридов. Более того, реализация ряда инвестиционных проектов должна привести не только к дальнейшему снижению стоимости, но и к росту показателей плотности энергии и скорости зарядки батарей.

Конкурентоспособность электромобилей в определяющей степени зависит именно от аккумуляторов: сегодня они формируют до половины себестоимости электрокара и определяют его характеристики по пробегу и удобству эксплуатации. В России необходимо срочно разворачивать

прикладные технологические разработки и создавать производства тяговых аккумуляторов для электротранспорта.

Таким образом, синергия электротранспорта и возобновляемых источников позволит кардинально снизить уровень антропогенного воздействия на природную среду со стороны транспортного сектора.

Подводя итог можно сказать, что батареи не имеют фиксированного срока службы, и они не разряжаются внезапно, а постепенно изнашиваются. Долговечность определяется условиями окружающей среды, а не только циклическим использованием. Пользователь может в некоторой степени продлить срок службы батареи, избегая сверхбыстрой зарядки, работая при умеренной температуре и избегая полной зарядки. Также помогает избегать резких нагрузок и полной разрядки.

Тепло – враг большинства аккумуляторов, и наихудшим состоянием является хранение полностью заряженного литий-ионного аккумулятора при повышенных температурах. Даже при самом тщательном уходе срок службы аккумулятора составляет всего один сезон, и в конечном итоге блоку грозит выход из строя при отключении питания.

Рассеивание тепла по поверхности батареи зависит от методов терморегулирования, используемых для батареи, и в данном исследовании оно представлено термином конвекционных теплопотерь. Следовательно, интенсивность отвода тепла от поверхности батареи зависит от используемых методов терморегулирования.

Следует отметить, что потери тепла от излучения поверхности аккумулятора не учитываются, поскольку отдельная батарея в автомобильных аккумуляторных блоках упакована таким образом, что внешние поверхности отдельной батареи не подвергаются непосредственному воздействию более низкой температуры окружающей среды. Кроме того, как показывает это исследование, снижение емкости батареи (или ухудшение производительности) зависит от температуры батареи, на которую влияют используемые методы терморегулирования.



Батареи в аккумуляторном блоке могут иметь одинаковую температуру, а могут и не иметь ее, в зависимости от эффективности используемых систем терморегулирования. Таким образом, настоящее исследование сосредоточено на снижении емкости отдельной батареи, в то время как снижение емкости батарей в батарейном блоке может быть определено по распределению температуры в батарейном блоке.

Следует отметить, что приведенная выше модель включает электрохимические, транспортные и тепловые явления, а подмодель ухудшения характеристик батареи рассматривает только два основных механизма ухудшения: образование пленки SEI и рост вокруг электрода твердых частиц в электродах и потерю активного материала для электродов - эти явления обычно происходят при работе батареи температура выше точки замерзания, особенно при высоких температурах выше 35° C. С другой стороны, литий-ионные аккумуляторы, работающие при температурах ниже нуля, могут образовывать литиевые дендриты, вызывая короткое замыкание, невозможность запуска и другие эксплуатационные сбои.

Тепловая подмодель предполагает равномерную температуру батареи, при этом колебания температуры по всей батарее не учитываются. Это приемлемо для настоящего анализа, поскольку преобладает температура батареи и если система терморегулирования эффективна.

Изменение температуры в работающей батарее может происходить в зависимости от эффективности управления температурой батареи, и это вторичный эффект, который не рассматривается в текущем исследовании.

Когда аккумулятор подвергается воздействию чрезвычайно высоких температур, выходящих за пределы рекомендованного диапазона, его емкость быстро падает. Высокая температура может сократить срок службы батареи и навсегда повредить внутреннюю структуру батареи.

Поэтому настоятельно рекомендуется избегать зарядки аккумуляторов электромобилей в экстремальных температурных условиях, чтобы предотвратить нежелательное повреждение аккумулятора вашего автомобиля.

В данной статье влияние методов терморегулирования на снижение емкости литий-ионных аккумуляторов, используемых в электромобилях, оценивалось с использованием тепловой модели. Результаты показывают, что температура батареи оказывает преобладающее влияние на работу, производительность и срок службы батарей, следовательно, их емкость снижается; это можно контролировать с помощью эффективного терморегулирования.

Таким образом снижение емкости батареи более существенно зависит от различных методов терморегулирования при более низкой начальной температуре батареи ( $20^{\circ}\text{C}$ ) по сравнению с более высокими температурами ( $35^{\circ}\text{C}$  и  $50^{\circ}\text{C}$ ) исследовано, следовательно, терморегулирование гораздо эффективнее снижает потерю емкости при температурах батареи, близких к  $20^{\circ}\text{C}$ , которая считается оптимальной рабочей температурой для литий-ионных аккумуляторов. Срок службы батареи может быть увеличен на целых 25% благодаря эффективному регулированию температуры. Кроме того, использование более низкого напряжения зарядки может уменьшить потерю емкости во время цикла привода, а срок службы батареи может быть значительно увеличен (удвоен) при использовании более низкого напряжения зарядки в сочетании с рекуперативным торможением.

Глубина разряда оказывает существенное влияние на срок службы батареи, зависимость между DOD и сроком службы является экспоненциальной. Например, если DOD для данного элемента составляет 90%, элемент проработает 500 циклов. Однако, если один и тот же элемент разряжен на 10%, батарея может работать до 5000 циклов. Чтобы замедлить скорость разряда батареи, на которую в основном влияет Министерство обороны, большинство автопроизводителей ограничивают диапазон использования батареи. Например, General Motors (GM) использует около 65% емкости батареи Volt. Это достигается за счет поддержания значений SOC в диапазоне от 22% до 87%. Новый BMW ActiveE оснащен аккумуляторной

батареей емкостью 32 кВт\*ч, однако полезная емкость установлена только на уровне 28 кВт\*ч, чтобы продлить срок службы батареи.

Запас хода BEV зависит от количества и типа используемых батарей. Вес и тип транспортного средства, а также местность, погода и работоспособность водителя также оказывают влияние, как и на пробег традиционных транспортных средств. Эффективность преобразования электромобиля зависит от ряда факторов, включая химический состав аккумулятора:

Внутреннее сопротивление некоторых аккумуляторов может значительно увеличиться при низкой температуре, что может привести к заметному сокращению запаса хода автомобиля и срока службы аккумулятора.

Нахождение экономического баланса между запасом хода и производительностью, емкостью аккумулятора и весом, типом аккумулятора и стоимостью является непростой задачей для каждого производителя электромобилей.

Благодаря системе переменного тока или усовершенствованной системе постоянного тока рекуперативное торможение может увеличить запас хода до 50% в экстремальных условиях движения без полной остановки. В противном случае запас хода увеличивается примерно на 10–15% при движении по городу и лишь незначительно при движении по шоссе, в зависимости от местности.

Для литий ионных батарей уровень заряда является одним из факторов, влияющих на ресурс. Увеличение ресурса можно достичь уменьшением глубины разряда, а также достижением одинакового уровня степени заряженности. При этом эксплуатация в средних диапазонах улучшает ресурс, в отличие от эксплуатации при высоких диапазонах степени заряженности, т.е. неполный заряд батареи также повышает максимальное количество циклов.

## Список использованных источников

1. Баранник А.Ю. Использование природного газа в качестве топлива для автомобилей – одно из приоритетных направлений по обеспечению экологической безопасности страны / А.Ю. Баранник, В.В. Овчинников, М.Ю. Курбатов, С.Г. Мингалеев // Технологии гражданской безопасности. – 2020. – Т. 17. – № 3 (65). – С. 21–28.
2. Бахмутов С.В. Конструктивные схемы автомобилей с гибридными силовыми установками: учеб. пособие / С.В. Бахмутов, А.Л. Карунин, А.В. Круташов [и др.]. – М.: МГТУ «МАМИ», 2007. – 71 с.
3. Бахмутов С.В. Экологически чистый городской автомобиль с гибридной силовой установкой / С.В. Бахмутов, В.В. Селифонов // Наука – производству. НТП «Виращ-центр». – 2001. – № 7.
4. Влияние рабочей температуры на емкость тяговых аккумуляторных батарей электромобилей / Е. П. Парлюк, В. И. Карагодин, А. А. Солнцев, Л. Л. Зиманов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2024. – № 2(77). – С. 60-70.
5. Дидманидзе О.Н. Температурные показатели охлаждающих жидкостей для аккумуляторов электротракторов и электромобилей / О. Н. Дидманидзе, Е. П. Парлюк, А. И. Сучков [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2023. – Т. 17, № 4. – С. 55-61.
6. Дубасова В.С. Исследования и производство материалов для литий-ионных аккумуляторов в России и за рубежом / В.С.Дубасова, Л.С. Каневский // Электрохимическая энергетика. 2005. Т.5. - №2. – С.109-119.
7. Каневский Л.С. Деградация литий-ионного аккумулятора и методы борьбы с ней/ Л.С. Каневский, В.С.Дубасова // Электрохимия. – 2005. – том 41. №1, с.3-19.

8. Капустин А.А. Гибридные автомобили: учебное пособие / А.А. Капустин, В.А. Раков // М-во образ. и науки РФ, Вологод. гос. ун-т. – Вологда: ВоГУ, 2016. – 96 с.
9. Карпухин К.Е. Автомобиль с гибридной силовой установкой. Алгоритм управления автомобилем с ГСУ / К.Е. Карпухин, В.В. Селифонов // Материалы 49-й Международной научно-технической конференции ААИ. – М.: МГТУ, 2018.
10. Карунин А.Л. Экспериментальный многоцелевой гибридный автомобиль / А.Л. Карунин, С.В. Бахмутов, В.В. Селифонов, А.В. Круташов, Е.Е. Баулина, К.Е. Карпухин, Е.В. Авруцкий // Автомобильная промышленность. – 2006. – № 3.
11. Кашкаров А.П. Современные электромобили. Устройство, отличия, выбор для российских дорог: практическое руководство / А.П. Кашкаров. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 92 с. – ISBN 978-5-97060-568-4.
12. Оспанбеков Б.К. Перспективные направления развития зарядных станций для электромобилей / В.Е. Ютт, Б.К. Оспанбеков // Электроника и электрооборудование транспорта. 2013. №6. С. 10-12.
13. Отчет «Прогноз российского парка электромобилей до 2030 года», АВТОСТАТ, 2023.
14. Отчет «Парк электрокаров и гибридов в России», АВТОСТАТ, 2023
15. Парлюк, Е. П. Особенности зарядки аккумуляторной батареи электромобиля постоянным током / Е. П. Парлюк, Р. Т. Хакимов // Известия Международной академии аграрного образования. – 2024. – № 72. – С. 42-49.
16. Парлюк, Е. П. Энергоэффективность блочно-модульной охлаждающей системы функциональных агрегатов автотракторной техники : специальность 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Парлюк Екатерина Петровна. – Москва, 2022. – 281 с.
17. Пачурин Г.В. Кузов современного автомобиля: материалы, проектирование и производство: учебное пособие / Г.В. Пачурин [и др.]. –

Санкт-Петербург: Лань, 2018. – 316 с. – URL: <https://elanbook.com/book/107953>.

18. Пеньшин Н.В. Эффективность и качество как фактор конкурентоспособности услуг на автомобильном транспорте: монография / Н.В. Пеньшин; под науч. ред. В.П. Бычкова. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 224 с.

19. Раков В.А. Эксплуатация и обслуживание автомобилей с гибридными силовыми установками: монография / В.А. Раков. – Вологда: ВоГУ, 2014. – 143 с.

20. Распоряжение Правительства РФ от 22 ноября 2008 года N 1734-р «Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года (с изменениями на 11 июня 2014 года)». – 496 с.

21. Распоряжение Правительства РФ от 28 апреля 2018 года N 831-р «Об утверждении Стратегии развития автомобильной промышленности до 2025 года». – 1 с.

22. Савич Е.Л. Легковые автомобили: учебник / Е.Л. Савич. – Минск: Новое знание, 2013. – 758 с. URL: <https://elanbook.com/book/43872> 16. Пат. 55445 на полезную модель. Приемно-распределительное устройство преимущественно для комбинированных энергетических установок транспортных средств (варианты) / Селифонов В.В., Круташов А.В., Баулина Е.Е.; заявл. 29.12.2005; опубл. 10.08.2006, Бюл. № 22.

23. Селифонов В.В. Устойчивость и управляемость автомобиля при переменной схеме привода / В.В. Селифонов, Е.Е. Баулина. – М.: МГТУ «МАМИ», 2006.

24. Селифонов В.В. Электромобиль особо малого класса с гибридной энергетической установкой / В.В. Селифонов, А.В. Круташов, Е.Е. Баулина // Автотракторное электрооборудование. – 2004. – № 9. – С. 20–22.

25. Селифонов В.В. Электромобиль особо малого класса с комбинированной энергетической установкой / В.В. Селифонов, К.Е. Карпухин, Е.Е. Баулин // Автотракторное электрооборудование. – 2003. – № 1.

26. Сергеев Н.В. Современные проблемы и направления развития конструкций автотранспортных средств: учебное пособие / Н.В. Сергеев, В.А. Оберемок. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2019. – 156 с.

27. Сидоров К.М. Комбинированные энергетические установки в системе автономного электроснабжения / К.М. Сидоров., В.Е. Ютт, Т.В. Голубчик // Вестник МАДИ. – 2013. – №4. – С. 37-44.

28. Строганов В.И. Моделирование систем электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой в процессах проектирования и производства: монография / В.И. Строганов, В.Н. Козловский – М.: МАДИ, 2014. – 264 с.

29. Строганов В.И. Моделирование электронной системы VVT управления двигателем легкового автомобиля / В.И. Строганов, В.Н. Козловский, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 4. – С. 5–12.

30. Строганов В.И. Модель ремонтпригодности как инструмент прогнозирования качества и надёжности легкового автомобиля / В.И. Строганов, В.Н. Козловский // Автомобильная промышленность. – 2013. – № 11. – С. 19–21.

31. Строганов В.И. Повышение эксплуатационных характеристик электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой: дис. д-ра техн. наук / Строганов Владимир Иванович. – М., 2015. – 356 с.

32. Строганов В.И. Электронная система моделирования скорости движения в режимах поддержания и ограничения скорости / В.И. Строганов, В.В. Дебелов, В.В. Иванов, В.Е. Ютт, В.Н. Козловский // Грузовик. – 2013. – № 12. – С. 19–24.

33. Умняшкин В.А. Автомобили особо малого класса (квадроциклы) с гибридной энергосиловой установкой / В.А. Умняшкин, Н.М. Филькин, К.С. Ившин, Д.В. Скуба; под общ. ред. В.А. Умняшкина. – Ижевск: НИЦ «Регуляторная и хаотическая динамика», 2006. – 137 с.

34. Умняшкин В.А. Выбор мощности тягового электродвигателя, двигателя внутреннего сгорания и параметров накопителей гибридных силовых установок автомобилей: учебное пособие / В.А. Умняшкин, Н.М. Филькин, Р.С. Музофаров, Р.П. Хамидуллин. – Ижевск: НИЦ «Регуляторная и хаотическая динамика», 2006. – 138 с.
35. Федотова Ю. Гибридные автомобили: настоящее и будущее / Ю. Федотова // Аймпресс. – 2005. – № 9 (49). – С. 23–27.
36. Червенчук В.Д. Исследование эксплуатационных параметров гибридомобилей серии Toyota Prius / В.Д. Червенчук // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сб. науч. тр. нац. науч.-практ. конф. – Омск, 2018. – С. 183–187.
37. Червенчук В.Д. Перспективные направления повышения эффективности эксплуатации автомобильного электрооборудования / В.Д. Червенчук // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации: материалы науч.-практ. конф. [Электронный ресурс], 2016. – С. 725–729.
38. Fagnant D.J., Kockelman K.M. (2014) The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. – Vol. 40. – P. 1–13.
39. Gruel W., Stanford J.M. (2016) Assessing the long-term effects of autonomous vehicles: A speculative approach // Transportation Research Procedia. – Vol. 13. – P. 18–29.
40. Hellgren J. Maximisation of brake energy regeneration in a hybridelectric parallel car / J. Hellgren, E. Jonasson // Int. J. Electric and Hybrid Vehicles. – 2007. – Vol. 1. – No 1. – P. 95–121.
41. Kim D-H, Kim J-M, Hwang S-H, and Kim H-S. Optimal brake torque distribution for a four-wheeldrive hybrid electric vehicle stability enhancement // Proc. Instn Mech Engrs, Part D: J. Automobile Engineering. – 2007. – 221. P. 1357–1366.



42. Kockelman K.M., Fagnant D.J. (2015) Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations // Transportation Research. Part A: Policy and Practice. – Vol. 77. – P. 167–181.
43. Loeb B., Kockelman K.M., Liu J. (2018). Shared autonomous electric vehicle (SAEV) operations across the Austin, Texas network with charging infrastructure decisions // Transportation Research. Part C. – Vol. 89. – P. 222.
44. Milakis D., van Arem B., van Wee B. (2017) Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research // Journal of Intelligent Transportation Systems. – № 4. – P. 324–348.
45. Van den Berg V.A.C., Verhoef E.T. (2016) Autonomous cars and dynamic bottleneck congestion: The effects on capacity, value of time and preference heterogeneity // Transportation Research. Part B: Methodological. – Vol. 94. – P. 43–60.

*Учебное пособие*

# **Управление температурным режимом аккумуляторов электромобилей**

Материалы издаются в авторской редакции

Подписано в печать 30.09.2024. Формат 60×90/16.  
Усл.-печ. л. 8,06. Тираж 100 экз.

Заказ № 38443

Отпечатано в типографии «OneBook.ru»  
ООО «Сам Полиграфист»  
129090 г. Москва, Протопоповский пер., 6  
[www.onebook.ru](http://www.onebook.ru)