

Оглавление

Предисловие от издательства	13
Благодарность	14
Список сокращений	15
Предисловие	16
Примечание переводчика	20
Введение	21
Электромобиль – будущее автомобильной отрасли?	21
В.1. Электрифицированные транспортные средства: гибридные, электрические, водородные	22
В.1.1. Микрогибридизация с помощью стартер-генератора (S&S)	23
В.1.2. Частичные гибриды (MHEV)	24
В.1.3. Полные гибриды (HEV)	25
В.1.4. Заряжаемый от электросети гибридный электромобиль (PHEV)	27
В.1.5. Электромобиль с увеличенным запасом хода на электроэнергии (EREV)	28
В.1.6. Аккумуляторный электромобиль (BEV)	30
В.1.7. Электромобиль на топливных элементах (FCEV)	30
В.2. Рынок электромобилей в 2020 г.	31
В.3. Действительно ли электромобиль оказывает положительное воздействие на окружающую среду?	33
В.3.1. Городской транспорт	35
В.3.2. Электромобили среднего и премиум-класса	36
В.3.3. Автобус	37
В.3.4. Коммунальные услуги – грузовые автомобили	37
В.4. Является ли электромобиль экономически выгодным?	39
В.4.1. Городской транспорт	39
В.4.2. Автомобили среднего и премиум-класса	40
В.4.3. Автобус	41
В.4.4. Коммунальные службы – грузовые автомобили	41
В.5. Достаточно ли сырьевых ресурсов для массового развития электротранспорта?	42
В.5.1. Медь	42
В.5.2. Литий	42
В.5.3. Кобальт	43
В.5.4. Редкоземельные металлы	44
В.6. Заключение	45
Часть I	
Современное состояние и перспективы в области электромобилей	47
Глава 1. Характеристики тягового электродвигателя	48

Глава 2. Текущие решения в области двигателей для электромобилей	52
2.1. Синхронный электродвигатель с постоянными магнитами	52
2.2. Асинхронный электродвигатель	58
2.3. Синхронный двигатель с фазным ротором	67
2.4. Заключение	72
Глава 3. Современное состояние и перспективы технологий двигателей для электромобилей	73
3.1. Магнитные материалы	73
3.1.1. Введение	73
3.1.2. Магнитомягкие ферромагнитные материалы	73
3.1.3. Магнитотвердые ферромагнитные материалы: постоянные магниты ...	76
3.2. Обмотка электромашин переменного тока	78
3.2.1. Введение	78
3.2.2. Укладка обмоток в выемки	78
3.2.3. Зубчатые обмотки	81
3.3. Способы охлаждения электрической машины	83
3.3.1. Введение	83
3.3.2. Воздушное охлаждение открытых электромашин	85
3.3.3. Водяное охлаждение закрытых электромашин	89
3.3.4. Охлаждение диэлектрической жидкостью (маслом)	90
3.3.5. Сравнение эффективности охлаждения электромашин в зависимости от конструкции и жидкостей	91
3.4. Нетрадиционные типы электромашин: синхронные машины с двойным возбуждением и машины с осевым потоком	93
3.4.1. Синхронные электромашин с двойным возбуждением	94
3.4.2. Электромашин с осевым потоком	95
3.5. Заключение	96
Глава 4. Силовая электроника и ее перспективы	97
4.1. Подробно об инверторе напряжения	97
4.1.1. Назначение инвертора	97
4.1.2. Традиционное устройство и ключевые параметры инверторов	100
4.1.3. Составные элементы стоимости оборудования	101
4.2. Пределы возможностей текущих решений по интеграции	103
4.2.1. Уменьшение количества разъемов и электромагнитных помех	104
4.2.2. Старение изоляторов и подшипников	106
4.2.3. Рабочее напряжение	107
4.2.4. Перспективы с точки зрения разделения обмоток электромашин	108
4.3. Полупроводники с широкой запрещенной зоной	108
4.3.1. Сравнение физических свойств различных полупроводников силовой электроники	109
4.3.2. Направления исследований по интеграции компонентов с широкой запретной зоной в электромашин	112
4.4. Заключение	114

Часть II**Современное состояние и перспективы совершенствования
батарей электромобилей..... 115****Глава 5. Принцип работы и характеристики
литий-ионной батареи..... 117**

- 5.1. Общий принцип работы батарей.....117
- 5.2. Энергия и мощность120
- 5.3. История создания литиевых батарей121
- 5.4. Принцип работы литий-ионной системы.....121
- 5.5. Выбор материала электродов.....123
- 5.6. Сепаратор и электролит126

Глава 6. Производство литий-ионных батарей..... 127

- 6.1. Производство электродов.....127
- 6.2. Сборка ячейки128
- 6.3. Завершение/тренировка.....129
- 6.4. Сборка аккумуляторной батареи130
- 6.5. Компромисс между мощностью и энергией131
- 6.6. Система управления батареей132
- 6.7. Вторичная переработка и выбросы CO₂.....132

Глава 7. Характеристики современных батарей..... 135

- 7.1. Эффективность135
- 7.2. Старение и срок службы батареи136
- 7.3. Безопасность.....137
- 7.4. Зарядка батареи.....138
- 7.5. Стоимость141
- 7.6. Производители аккумуляторов (ячеек)142

Глава 8. Инновации и перспективы 144

- 8.1. Технологические тенденции будущего144
- 8.2. Перспективы совершенствования литий-ионных батарей145
- 8.3. Твердотельные литиевые батареи147
 - 8.3.1. Материалы.....148
 - 8.3.2. Промышленное производство твердотельных батарей150
- 8.4. Литий-серные (Li-S) батареи.....152
- 8.5. Литий-воздушные батареи154
- 8.6. Заключение155

Часть III**Современное состояние и перспективы зарядных устройств
электромобилей 157****Глава 9. Инфраструктура и зарядные станции 159**

9.1. Стандартизация зарядной инфраструктуры.....	160
9.2. Инфраструктура зарядных станций электромобилей.....	163
9.2.1. Обычная точка зарядки (переменный ток, от 1,8 до 22 кВт)	164
9.2.2. Точка быстрой зарядки (43 кВт переменного тока – 50 кВт постоянного тока → 350 кВт).....	166
9.2.3. Станция быстрой зарядки.....	169
9.3. Автомобильные разъемы зарядного устройства и протоколы связи с электромобилем.....	172
9.3.1. Стандарт CCS Combo 2	174
9.3.2. Стандарт CHAdeMO	177
9.3.3. Другие форматы.....	178
Глава 10. Современные проводные зарядные устройства электромобилей	180
10.1. Типы зарядных устройств	181
10.2. Электромагнитная совместимость и безопасность зарядных устройств.....	184
10.3. Примеры бортовых зарядных устройств.....	189
10.3.1. Электромобиль Nissan Leaf: автономное бортовое зарядное устройство, изолированное от сети	189
10.3.2. Электромобиль Renault ZOE: бортовое нереверсивное зарядное устройство	190
10.3.3. SOFRACI: реверсивное бортовое зарядное устройство, интегрированное в тяговую цепь	192
10.4. Станции быстрой зарядки постоянным током высокой мощности...194	
10.4.1. Структурная схема зарядного устройства.....	194
10.4.2. Использование модульной силовой электроники	197
10.4.3. Зарядные кабели с жидкостным охлаждением	198
10.4.4. Шина постоянного тока или шина переменного тока	199
Глава 11. Перспективные технологии	202
11.1. Новые технологии	202
11.1.1. Полупроводники с широкой запретной зоной	202
11.1.2. Зарядка аккумуляторов от 800 В.....	203
11.1.3. Совместимость фильтров подавления электромагнитных помех	204
11.2. Перспективы развития зарядных устройств.....	204
11.2.1. Стандарт ChaQi как эволюция стандартов CHAdeMO и GB/T	204
11.2.2. Автоматическая зарядка	205
11.2.3. Бесконтактная зарядка.....	207
11.2.4. Протокол Plug and Charge.....	207
11.2.5. Технология V2G / связь с инфраструктурой.....	208
Глава 12. Бесконтактная зарядка электромобилей.....	209
12.1. Некоторые примеры реализации бесконтактных зарядных систем.....	210
12.1.1. Статическая зарядка.....	210
12.1.2. Динамическая зарядка	211

12.2. Стандарты инфраструктуры зарядки электромобилей.....	213
12.3. Физический принцип индукционной передачи энергии	214
12.3.1. Случай одиночной катушки	214
12.3.2. Случай магнитного взаимодействия нескольких катушек.....	215
12.4. Физический принцип передачи энергии по индукции	215
12.5. Системы индукционной передачи электроэнергии.....	218
12.5.1. Общая архитектура системы передачи электроэнергии	218
12.5.2. Электрическая схема зарядного устройства и характерные формы сигналов	219
12.5.3. Вывод уравнений и импедансов	220
12.5.4. Реализация магнитной связи двух катушек	220
12.5.5. Размерный фактор силовой электроники и потери преобразователя.....	220
12.5.6. КПД передачи электроэнергии	221
12.5.7. Общие характеристики индукционной системы передачи энергии	223
12.6. Заключение.....	225
Часть IV	
Электромобиль и электросеть	227
Глава 13. Новый потребитель электроэнергии	228
13.1. Преамбула.....	228
13.2. Новая тема для многих заинтересованных сторон	229
13.3. Краткое содержание.....	230
13.4. Определения.....	230
13.4.1. Подключение зарядного устройства к дому/зданию (V2H/B)	230
13.4.2. Работа в качестве резервного источника электроэнергии	231
13.4.3. Питание потребителей на природе, работа в качестве автономной генераторной установки (V2-Load).....	231
13.4.4. Зарядка другого электромобиля (V2-Vehicle)	231
Глава 14. Проблемы электросети	232
14.1. Введение	232
14.2. Проблемы баланса между поставкой и спросом на электроэнергию... 14.2.1. Потребление электроэнергии электромобилями	234
14.2.2. Потенциальные проблемы на уровне электрической системы	236
14.2.3. Управление зарядкой электромобилей и интеграция в электросеть возобновляемых источников энергии.....	237
14.2.4. Вопросы динамики и краткосрочного баланса энергосистемы.....	239
14.3. Потенциальные проблемы транспортной электросети	240
14.4. Интеграция электротранспорта в распределительную сеть..... 14.4.1. Точки зарядки, интегрированные в существующий объект электропотребления	243
14.4.2. Пункты зарядки, требующие создания нового подключения к электросети.....	246
14.4.3. Пункты зарядки электромобилей для дальних поездок.....	248
14.4.4. Развитие зарядной инфраструктуры, интегрированной в локальную	

электросеть	249
14.4.5. Финансовые последствия интеграции электротранспорта	252
14.5. Островные электросети	253
14.6. Инновационная экосистема на пути индустриализации	254
Глава 15. Возможности и их реализация	255
15.1. Введение	255
15.2. Является ли технология электромобилей зрелой?	255
15.3. Крупномасштабная интеграция возобновляемых источников энергии	257
15.3.1. Масштабное собственное потребление	258
15.3.2. Местный уровень	258
15.3.3. Управление на уровне электросистемы	259
15.4. Предоставление сетевых услуг	260
15.4.1. Общие положения	260
15.4.2. Национальный уровень – транспортная электросеть	260
15.4.3. Местный уровень – распределительная сеть	261
15.4.4. Местный уровень – прочие функции	262
15.5. Реализация технических решений	264
15.5.1. Еще раз о функциях, которые необходимо реализовать	264
15.5.2. Распределение ролей	265
15.5.3. Объекты, необходимые для реализации скоординированной сетевой услуги	266
15.5.4. Некоторые нормативные аспекты	268
15.6. Заключение	269
Часть V	
Современное состояние и перспективы дорожных транспортных средств на топливных элементах	271
Глава 16. Устройство и принцип работы системы топливных элементов	275
16.1. Топливный элемент для тягового применения	275
16.1.1. Технические характеристики	275
16.1.2. Принцип работы топливной ячейки и следствия из него	276
16.2. Компоненты топливного элемента	283
16.2.1. Мембрана	284
16.2.2. Активный слой электрода	285
16.2.3. Диффузионный слой электрода	287
16.2.4. Биполярные пластины	288
16.3. Система топливных ячеек	289
16.3.1. Воздушный канал системы	289
16.3.2. Водородный канал системы	291
16.3.3. Канал электрического тока	295
16.3.4. Тепловой канал	302
16.3.5. Эффективность системы ВТЭ	303

Глава 17. Перспективы развития топливных элементов и водородной инфраструктуры электротранспорта	305
17.1. Есть ли перспективы у автомобилей на водородном топливе.....	305
17.1.1. Автомобили на водородном топливе: существующие демонстрационные проекты.....	305
17.1.2. Транспортные средства на водородной энергии: уровень зрелости технологических разработок и связанные с ними тенденции	310
17.2. Развитие инфраструктуры.....	315
17.2.1. Производство водорода	316
17.2.2. Хранение водорода	323
17.2.3. Транспортировка водорода	325
17.2.4. Распределение, максимально приближенное к потребителю.....	326
17.2.5. Безопасность	327
Заключение и перспективы: общие размышления о месте водорода в электромобильном транспорте	330
Приложения.....	333
Приложение 1. Электромоторы электромобилей.....	334
П1.1. Основные законы электромагнетизма	334
П1.1.1. Понятие поля: электрическое поле.....	334
П1.1.2. Проводимость, электрическое сопротивление, электрический ток и закон Ома	336
П1.1.3. Магнитное поле, магнитная индукция.....	338
П1.1.4. Ферромагнитные материалы, понятие насыщения	340
П1.1.5. Явление индукции, закон Ленца–Фарадея	342
П1.2. Общий принцип создания крутящего момента и классификация электрических машин.....	342
П1.2.1. Введение	342
П1.2.2. Механизмы создания электромагнитного момента	343
П1.2.3. Классификация электромашин.....	346
П1.3. Создание вращающегося поля статора в электромоторе переменного тока	346
П1.3.1. Введение	346
П1.3.2. Принцип создания вращающегося поля статора.....	347
П1.4. Синхронные электромашины с невозбужденным ротором	355
П1.4.1. Введение	355
П1.4.2. Принцип работы синхронного электромотора с переменным магнитным сопротивлением	356
П1.4.3. Моделирование в синусоидальном установившемся режиме синхронной электромашины с переменным сопротивлением.....	358
П1.4.4. Стратегии управления и построение графиков характеристик синхронных электромашин с переменным магнитным сопротивлением	360
П1.5. Синхронные электромоторы с возбуждением магнитного поля	

в роторе	362
П1.5.1. Введение	362
П1.5.2. Принцип работы синхронных электромоторов с возбуждением ротора и гладкими полюсами	363
П1.5.3. Моделирование синхронных электромоторов с возбужденным ротором с гладкими полюсами в синусоидальном установившемся режиме	365
П1.5.4. Стратегии управления и графики характеристик синхронных электромашин с обмотками возбуждения и гладкими полюсами	367
П1.5.5. Тяговые электромоторы с магнитным возбуждением ротора	371
П1.6. Асинхронные электромашины	373
П1.6.1. Введение	373
П1.6.2. Принцип работы асинхронной электромашины	374
П1.6.3. Модель электромашин в синусоидальном установившемся режиме	377
П1.6.4. Стратегии управления асинхронной электромашинной и графики характеристик	382
П1.7. Введение в управление тяговыми электрическими машинами	385
Приложение 2. Введение в силовую электронику	389
П2.1. Основы электронного преобразования электроэнергии	390
П2.1.1. Управление потоком электрической энергии	390
П2.1.2. Ограничение эффективности использования энергии	391
П2.1.3. Модуляция в силовой электронике	392
П2.1.4. Общий принцип работы электронного преобразователя мощности ...	393
П2.1.5. Частный случай преобразования DC-DC	394
П2.1.6. Компоненты силовой электроники – коммутационная ячейка	395
П2.1.7. На пути к биполярной системе	402
П2.2. Потери в силовых электронных преобразователях	409
П2.2.1. Потери проводимости	409
П2.2.2. Коммутационные потери	410
П2.2.3. Максимальные значения рабочего тока и частоты коммутации силовых компонентов	411
П2.3. Электронные преобразователи энергии в электромобилях	413
П2.3.1. Тяговый инвертор и инвертор компрессора теплового насоса	413
П2.3.2. Реверсивный преобразователь DC-DC, регулирующий напряжение питания инвертора	413
П2.3.3. Бортовое зарядное устройство	414
П2.3.4. Преобразователь постоянного тока из высоковольтной сети батареи в низковольтную сеть электромобиля	416
Список используемой литературы	418
Предметный указатель	438

Список сокращений

- AC: переменный ток
- DC: постоянный ток
- LCA: анализ жизненного цикла
- AME: комбинированный мембранный электрод
- BEV: аккумуляторный электромобиль
- BMS: система управления батареями (СУБ)
- CEM: электромагнитная совместимость
- DWPT: система динамической индукционной зарядки
- EnR: возобновляемые источники энергии
- EREV: электромобиль с увеличенным автономным ходом
- FCEV: электромобиль на топливных элементах
- GaN: нитрид галлия
- GRD: оператор распределительной сети
- GRT: оператор транспортной сети
- HEMT: транзистор с высокой подвижностью электронов
- HEV: гибридный электромобиль
- IGBT: биполярный транзистор с изолированным затвором
- LFP: литиевая, железная, фосфатная (тип батареи, в которой положительный электрод изготовлен из этих материалов)
- MOSFET: металлооксидный полупроводниковый полевой транзистор
- NCA: никель, кобальт, алюминий (активный материал положительного электрода литиевых батарей, состоящий из этих трех элементов)
- NMC: никель, марганец, кобальт (активный материал положительного электрода литиевых батарей, состоящий из этих трех элементов)
- PCI: низкая теплотворная способность
- PCS: высокая теплотворная способность
- PHEV: заряжаемый от электросети гибридный электромобиль
- PPE: государственная энергетическая политика
- RMS: среднеквадратичное значение
- RPD: общественная распределительная электросеть
- S&S: автомобиль со стартер-генератором
- SEI: защитный слой отрицательного электрода
- Si: кремний
- SiC: карбид кремния
- Smart Grid: сеть, оптимальным образом объединяющая производителей и потребителей электроэнергии
- V2G: технологии взаимодействия электромобиля с электрической сетью (от автомобиля в сеть)
- VE: электрифицированные автомобили (гибридные и аккумуляторные электромобили)
- VER: Rechargeable Electrified Cars (заряжаемые гибридные автомобили и аккумуляторные электромобили)
- WLTC: стандартизированный цикл тестирования, используемый процедурой WLTP
- WLTP: Всемирная согласованная процедура испытаний легковых автомобилей
- ВТЭ: водородный топливный элемент/ячейка
- ДВС: двигатель внутреннего сгорания
- ШИМ: широтно-импульсная модуляция
- ЭМС: электромагнитная совместимость
- СДПМ: синхронный электродвигатель с постоянными магнитами
- СДФР: синхронный электродвигатель с фазным ротором

Предисловие

Электричество и автомобиль появились вместе в конце XIX века. Оба изобретения, несомненно, оказали наибольшее влияние на наши индустриальные общества. И все же, несмотря на робкую помолвку в 1880–1890 гг., которую двигатель внутреннего сгорания и экспансия нефтяной промышленности вскоре свели на нет, понадобилось более ста лет, чтобы эти две отрасли промышленности воссоединились и возобновили брак, который на этот раз оправдывает ожидания.

Электромобиль вышел из ниши, в которой он был заперт на протяжении многочисленных экспериментов, приведших лишь к созданию прототипов и небольших серий в течение XX века. В последние годы происходит быстрый рост рынка электромобилей, а также количества коммерческих моделей, которые сейчас присутствуют в каталоге большинства производителей автомобилей, что является явным признаком смены парадигмы.

Дело в том, что переход с двигателя внутреннего сгорания на электродвигатель – это не просто технологический вопрос. Это целая экосистема, которую нужно переосмыслить. Речь идет не только о замене двигателя внутреннего сгорания электродвигателем, бака – аккумулятором, системы впрыска – инвертором... Электромобиль – это еще и целая инфраструктура зарядных станций, которую необходимо развивать; и, что более неожиданно, это также невероятная «системная» возможность, которую необходимо использовать, поскольку развитие возобновляемых источников энергии и развитие электротранспорта могут дополнять друг друга, совместно уменьшая углеродный след производства электроэнергии и эксплуатации наземного транспорта. Краеугольным камнем этих двух основных преобразований нашего общества (электротранспорт и возобновляемые источники энергии) является проблема хранения электроэнергии. При этом становится ясно, что аккумуляторные технологии не только стали предметом масштабных академических исследований, но также представляют собой большие промышленные проблемы, которые Европа хорошо осознала и больше не может оставлять лидерство странам Азии. Это огромная проблема для наших инженеров и исследователей, но тем более для наших компаний, потому что речь идет о переходе от исследований к массовому производству.

Помимо глобальной экосистемы, электрификация автомобилей также основана на овладении технологиями, которые исторически не были автомобильными: электромоторы и силовая электроника теперь являются полем деятельности для инженеров-мотористов. И это настоящая революция для автомобильной промышленности, которая более ста лет основывалась на использовании нефти! Здесь снова очевидно, что технологические изменения представляют собой реальную проблему для производителей автомобилей и поставщиков оборудования. И все же нет другого выбора, кроме как очень быстро совершить переход, потому что всем известно, что периоды

технологических прорывов открывают неожиданные возможности для новых игроков, в то же время ослабляя старых игроков, которые должны управлять трансформацией своих активов и переобучением своих команд. Здесь Европа также должна проявлять инициативу, дабы не допустить, чтобы промышленная инфраструктура, выстроенная вокруг производства автомобильных двигателей, рухнула под тяжестью этой великой трансформации. У нас есть сильные стороны, и преобразования уже идут полным ходом, но конкуренция будет жесткой!

Если автомобильная промышленность меняется форсированными темпами путем электрификации автомобилей, если целая экосистема развивается вокруг электромобилей, давайте никогда не упускать из виду цель, которая сама по себе оправдывает такую революцию: содействие в борьбе с изменением климата. Потому что, помимо выбросов загрязняющих веществ (которые значительно сократились благодаря принятым нормативным документам, касающимся двигателей внутреннего сгорания), нашей целью остается сокращение выбросов CO_2 , достижение которой позволит автомобильной промышленности принять участие в решении одной из самых важных проблем, с которыми человечество столкнулось в своей истории: совместить экономическое развитие с понижением парникового эффекта выбросов газов, чтобы предотвратить климатическую катастрофу, омрачающую века прогресса. Поэтому очень важно, чтобы электрификация шла рука об руку с защитой и, разумеется, охраной окружающей среды. А для этого необходимы технологические решения, которые рассматриваются всегда через призму оценки жизненного цикла: от сырья до переработки, прохождения всех этапов жизненного цикла электромобилей и, что немаловажно, их аккумуляторов. Необходимо должным образом оценить реальное воздействие электрификации на окружающую среду. На этом этапе давайте проясним: баланс выбросов CO_2 на протяжении всего жизненного цикла уже в значительной степени склонился в пользу электромобиля по сравнению с автомобилями, оснащенными ДВС, когда мы рассматриваем европейскую структуру энергопотребления и автомобиль среднего размера. Исходя из этого, мы должны и дальше снижать углеродный след, чтобы достичь целей, определенных в амбициозном видении европейской «зеленой сделки». Если цель действительно состоит в том, чтобы резко сократить выбросы CO_2 , но также и гарантировать эффективный жизненный цикл, то, несомненно, потребуются многие технологические инновации, но не только. Нам также предстоит построить целую экосистему более эффективной мобильности, вовлекая всех частных и государственных игроков, и наконец ... научиться менять свои привычки. Это еще одна очень важная тема, поскольку ключи к контролю над изменением климата в такой же степени в руках потребителей, которыми мы все являемся!

Поэтому, читая эти строки, можно подумать, что самые большие проблемы, стоящие перед автомобильной промышленностью, состоят в том, чтобы освоить новые технологии, внедрить инновации, трансформировать заводы, найти свое место в новой экосистеме, снова и снова снижать воздействие мобильности на окружающую среду... но на самом деле первая из проблем заключается в другом. Вернее, это общий знаменатель всего этого. Первым из вызовов для развития электротранспорта, который остается единственным краткосрочным

и среднесрочным путем разумной и добродетельной мобильности, является обучение и развитие навыков. Короче, как всегда, первая проблема в высшей степени является человеческой! Потому что если целые поколения инженеров готовились к проектированию двигателей внутреннего сгорания, то теперь мы должны сделать поворот и усилить динамику проводимой переподготовки, чтобы пересмотреть программы начальной подготовки в наших школах и университетах. Необходимо подготовить команды в компаниях и даже... развивать культуру электрической мобильности и связанных с ней социальных проблем среди широкой общественности, чтобы выйти из пристрастных дебатов и вернуться к объективным фактам и установленным данным.

В контексте происходящих глубоких преобразований эта книга многих авторов выходит вовремя, чтобы принести свой вклад в здание знаний, которое нам теперь необходимо обновить, а затем расширить!

*Патрик Бастард
Директор по исследованиям, Groupe Renault*

Со времен Кюньо в 1769 г. с его «паровой повозкой» автомобиль продолжал эволюционировать и совершать прорывы как в своих технологиях, так и в способах производства и использования.

Первоначально он был предметом любопытства, роскоши, а затем досуга, но очень быстро стал основным компонентом развития наших индустриальных обществ, средством перемещения людей и товаров. В последние годы он также стал центральным объектом в законодательной деятельности, касающейся энергетических интересов и вопросов, относящихся к окружающей среде.

Предложенная вниманию читателей книга появилась в конце цикла развития тепловых двигателей и, вероятно, на рубеже новой революции: электромобили и технологии, которые они воплощают, находятся на заре серьезного развития. Этот новый электромобиль коренным образом изменит нашу жизнь и наши привычки к передвижению, нашу экономику, нашу промышленность, наши энергетические системы и окружающую среду.

Масштаб преобразований вызовет сложности для всех заинтересованных сторон: производителей автомобилей, операторов мобильной связи, операторов дорожной инфраструктуры и энергетических компаний, лиц, принимающих политические решения, автовладельцев, простых граждан ...

- Сложные энергетические вопросы: будет ли у нас достаточно электроэнергии, возобновляемых источников энергии, будут ли наши электросети устойчивыми? Как будет развиваться структура энергетики и производственные сектора? Как будут сосуществовать электричество и водород?
- Сложные вопросы экологии: являются ли обещания «чистоты» электромобилей выполнимыми, если рассматривать весь его жизненный цикл (от производства до утилизации)?

- Сложные вопросы природных ресурсов: хватит ли материалов? Сможем ли мы добывать и использовать эти ресурсы экологически чистым, устойчивым и ответственным образом?
- Сложные вопросы регионального планирования: каким образом следует преобразовать общественные пространства, частные или коллективные дома, чтобы обеспечить зарядку электромобилей или распределение водорода?
- Сложность новых экономических моделей: поставит ли стоимость технологий электрификации под сомнение модель индивидуальной собственности в пользу общественного или совместно используемого транспорта? Как будет меняться стоимость владения для пользователей в контексте как внедрения возобновляемых источников энергии, так и предложений по интеллектуальным решениям для зарядки электромобилей (умные электросети)?
- Наконец, сложность технологического выбора: какими будут технологии завтрашнего дня в области аккумуляторных батарей, топливных элементов, водородных резервуаров, электродвигателей, силовой и управляющей электроники, алгоритмов вождения, управления энергией, материалов?

Эта книга, представляющая собой пересечение взглядов академических ученых и инженеров-автомобилестроителей, является всеобъемлющим обзором современных технологий в области электромобилей. Помимо чисто технических знаний, она дает ключ к пониманию различных поднятых в ней вопросов.

*Карла Гохин,
Вице-президент по исследованиям и инновациям, Stellantis¹*

¹ **Stellantis NV** – транснациональная корпорация по производству автомобилей, образованная в 2021 году в результате слияния итальянско-американского автопроизводителя Fiat Chrysler. – *Прим. перев.*

Примечание переводчика

В книге речь идет об электрических машинах и электромобилях, поэтому применяются некоторые специфические для этой отрасли термины, которые могут нуждаться в пояснениях.

Электрическая машина (электромашина) – это электромеханический преобразователь энергии, основанный на явлениях электромагнитной индукции и силы Лоренца, действующей на проводник с током, движущийся в магнитном поле.

- Если электрическая энергия преобразуется в механическую работу и тепло, тогда электрическая машина является электрическим мотором (**электромотором, электродвигателем**).
- Когда механическая работа преобразуется в электрическую энергию и тепло, тогда электрическая машина является электрическим генератором (**электрогенератором**).
- Когда электрическая энергия одного вида преобразуется в электрическую энергию другого вида, тогда электрическая машина является **преобразователем** (например, **трансформатором**).
- Когда механическая и электрическая энергии преобразуются в тепло, тогда электрическая машина является **электромагнитным тормозом**.
- Для большинства электрических машин выполняется **принцип обратимости**, когда одна и та же машина может выступать как в роли мотора, так и в роли генератора или электромагнитного тормоза.

В **электромобилях** тяговое усилие² создает электродвигатель.

² Тяговая мощность – это числовой показатель, а горизонтальный вектор силы, преодолевающей сопротивление качения, называется тяговым усилием. – *Прим. перев.*

Электромобиль – будущее автомобильной отрасли?

С января по октябрь 2020 г. на регистрацию частных электромобилей и заряжаемых гибридных автомобилей приходилось почти 10 % общего числа регистраций во Франции, что почти в четыре раза больше, чем за тот же период 2019 г. Такая же тенденция наблюдалась в Европе, США и Китае [21].

За несколько дней до того, как рыночная капитализация компании Tesla превысила капитализацию компании Volkswagen, в газете Le Monde вышла статья о переменах, происходящих в автомобильной отрасли под заголовком «Tesla не должна быть для Volkswagen тем же, чем Apple для Nokia» [14]. В конце ноября 2020 г. компания Tesla была лидером автомобильного рынка с капитализацией 460 млрд долл., что вдвое больше, чем у второй компании Toyota, которая тем не менее продает в 20 раз больше автомобилей.

Целью многочисленных нововведений автопроизводителей являются электрификация транспортных средств, а также частичная или полная их автономность. Редко в истории приходилось видеть, чтобы промышленная отрасль претерпевала такие быстрые изменения: от преобладания механических и тепловых технологий до ведущей роли электротехники и бортовых вычислений.

Наряду с неизбежным изменением компетенций, необходимых в автомобильной промышленности, в этой книге говорится о современном состоянии технологий электрифицированных транспортных средств и последовательных инновациях в области двигателей, аккумуляторов, зарядных устройств, взаимодействии с электрической сетью и источниками водорода.

Написанная французскими учеными и производственниками, книга предназначена как для инженеров-электротехников, так и для инженеров-механиков, желающих лучше понять суть технологических изменений в автомобильной промышленности. В конце книги приведены два приложения (хорошее введение в электромоторы и силовую электронику), которые новички должны прочитать, прежде чем приступить к основной части книги. Также в интернете доступны еще два приложения для дальнейшего чтения (их можно загрузить с сайта dunod.com).

Прежде чем перейти к описанию различных технических элементов экосистемы электромобилей в следующих разделах, первая глава открывает тему общего контекста текущих изменений в автомобильной промышленности, рассматривая ее с точки зрения экономики и экологии на основе авторитетных научных исследований. Авторы рассказывают о преимуществах и недо-

статках различных типов электрифицированных транспортных средств (полностью электрических или гибридных, электромобилей или электробусов...) и об оптимизации их использования в городе или на загородных маршрутах в контексте проблем, связанных с глобальным потеплением и местным загрязнением окружающей среды.

Социальный аспект (владение автомобилем / аренда, каршеринг, отказ от автомобиля в городах в пользу велосипеда, самоката и т. д.) хотя и интересен, но здесь не рассматривается, поскольку эта тема выходит за рамки книги.

В.1. Электрифицированные транспортные средства: гибридные, электрические, водородные

Электрифицированное транспортное средство – это любое транспортное средство, движение которого, хотя бы частично, обеспечивается электродвигателем. Стандарты выбросов углекислого газа CO_2 обязывают производителей снижать выбросы от транспортных средств с двигателем внутреннего сгорания (ДВС), что в случае тяжелых транспортных средств достигается с помощью частичной гибридизации.

Ниже представлены различные конструкции электромобилей с их названиями, которые будут использоваться в этой книге.

На рис. В.1 типы электромобилей классифицируются в зависимости от степени их гибридизации, каждый из которых взят на примере автомобилей среднего размера.

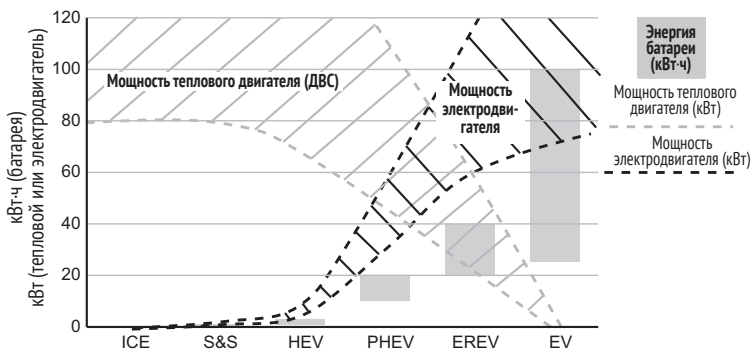


Рис. В.1. Мощность и энергия электрифицированных транспортных средств: ICE – ДВС; S&S – Автомобиль со стартер-генератором; HEV – гибридный электромобиль; PHEV – гибридный электромобиль с зарядкой от электросети; EREV – электромобиль с увеличенным запасом хода на электроэнергии (Extended Range Electric); EV – электромобиль

Отметим, что гибридизация стала для некоторых производителей способом перехода к полностью электрическому автомобилю, позволив реализовать проектирование и производство с учетом опыта предыдущего десятилетия, когда батареи были недостаточно эффективны.

В.1.1. Микрогибридизация с помощью стартер-генератора (S&S)

Стартер-генератор, введенный в широкий оборот с 2000-х гг. компанией Citroën, в частности на автомобилях марки С3 и С4, является реверсивным и достаточно мощным, чтобы запускать двигатель после каждой его остановки при движении в городе. Производители заявляют об экономии до 8 % топлива в городском цикле движения. Стартер-генератор устанавливается вместо традиционного генератора и использует ременной привод для запуска ДВС, когда он не работает, или для подзарядки аккумулятора во время его работы. Аккумулятор остается свинцовым на 12 В, но усилен, чтобы выдерживать многочисленные пуски, а ДВС немного изменен. Автомобиль не может двигаться с выключенным ДВС, поэтому он не классифицируется как электромобиль. Система Start-Stop(S&S) автоматически глушит двигатель при остановках автомобиля, дополнительно снижая расход топлива и выбросы в атмосферу.

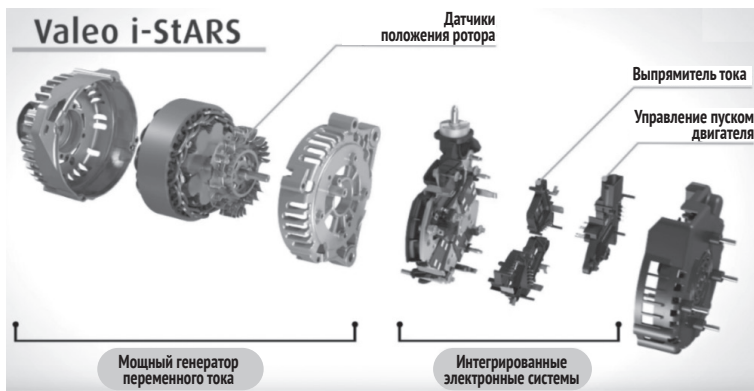


Рис. В.2. Высокотехнологичный реверсивный стартер Valeo i-StARS в разобранном виде [17]

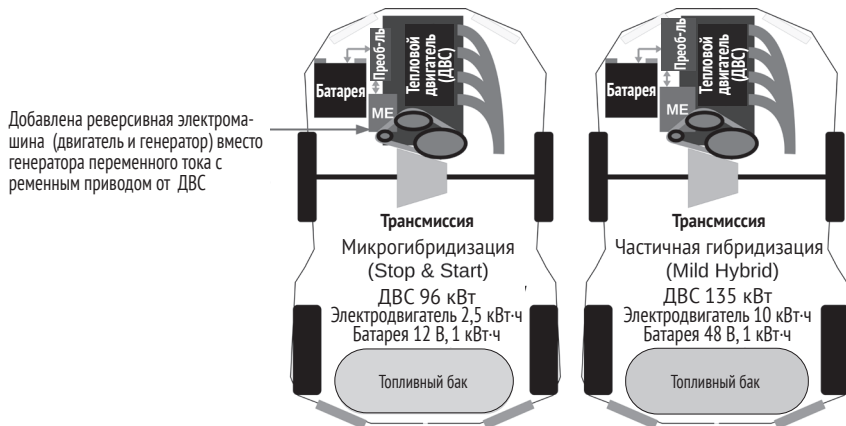


Рис. В.3. Архитектура микрогибридизации и частичной гибридной, данные автомобилей Citroën С4 SpaceTourer S&S и Mercedes Classe C EQ Boost. ME – электромотор; conv – преобразователь (здесь реверсивный инвертор)

В.1.2. Частичные гибриды (MHEV)

При частичной гибридизации электродвигатель не имеет достаточной мощности, необходимой для движения автомобиля по дороге с приемлемой скоростью и дальностью. В режиме с нулевым уровнем выбросов разрешены только очень короткие перемещения с низкой скоростью (например, парковка). Переход на бортовую сеть 48 В позволяет увеличить плотность мощности цепи аккумулятор–инвертор–двигатель. Хотя электродвигатель уже реально помогает ДВС, улучшая динамику автомобиля, но двигаться только на электрической тяге такая машина еще не может.

Электродвигатель, просто прикрепленный к тепловому двигателю и приводящий в движение ремень коленвала ДВС, обеспечивает дополнительный крутящий момент, необходимый для ускорения, предотвращает работу ДВС в режиме с низким КПД и позволяет рекуперировать энергию при торможении. Экономия топлива оказывается выше, чем при использовании простой системы S&S при разумных дополнительных затратах (двигатель, аккумулятор и электроника на 48 В, мощность порядка 10 кВт). Расход в тестовом цикле WLTP¹ для электромобиля Mercedes C200 с бензиновым двигателем и электродвигателем мощностью 10 кВт составляет 6,6 л / 100 км по сравнению с 7 л / 100 км для C180 с обычным бензиновым двигателем, что дает 6 % экономии.

Вариантов компоновки стартер-генератора два. Либо его устанавливают вместо обычного генератора, только с более мощным приводным ремнем и двумя натяжными роликами, либо заменяют электродвигателем маховик. Кроме того, частичному гибриду уже нужна дополнительная батарея небольшой емкости, способная накапливать электроэнергию, вырабатываемую при торможениях.

Некоторые полагают, что такая недорогая система экономии топлива появится на всех автомобилях с двигателем внутреннего сгорания. В 2020 г. компания Mercedes уже предлагала 8 моделей, оснащенных системой частичной гибридизации (Mild Hybrid EQ Boost), в частности в попытке соответствовать европейским стандартам выбросов CO₂.

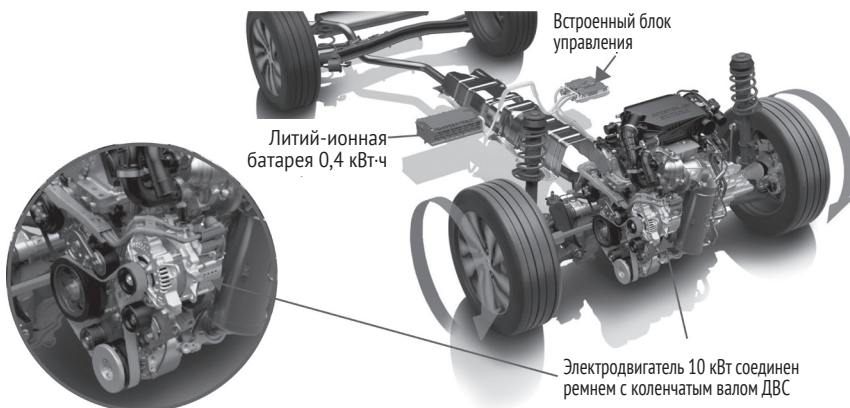


Рис. В.4. Интеграция электродвигателя в частичную гибридную систему автомобиля Suzuki 48V SHVS [15]

В.1.3. Полные гибриды (HEV)

Гибридный электромобиль, иногда называемый *полным гибридом* (full hybrid), чтобы отличить его от *частичных гибридов*, представленных выше, имеет как ДВС, так и электродвигатель, мощности которого достаточно для передвижения автомобиля, по крайней мере в городских условиях или при движении на постоянной скорости.

Распространение такой технологии началось в конце 90-х гг. с автомобиля Toyota Prius (первые модели вошли в категорию частичных гибридов). С тех пор появилось много новых моделей – как бюджетных, так и дорогих спортивных версий, в которых мощность и крутящий момент электродвигателя добавлялись к мощности ДВС. По мнению некоторых производителей, установка электродвигателей на заднюю ось переднеприводного внедорожника может означать переход на полноприводную схему с меньшими затратами.

Аккумулятор заряжается от ДВС и рекуперативного торможения. ДВС используется только в диапазоне эффективной работы. Компания Renault объявляет об экономии топлива до 40 % на тесте WLTP в городском цикле для своего электромобиля Clio e-Tech (бензиновый двигатель 67 кВт, электродвигатель на 36 кВт, емкость аккумулятора 1,2 кВт·ч, 230 В) по сравнению с неэлектрифицированной ДВС моделью.

Существует несколько схем такой технологии (параллельная, последовательная, с отводом мощности). Принято говорить о *параллельном шунте*, когда силовой узел является механическим, и о *последовательном шунте*, когда силовой узел является электрическим.

Отметим, что в то время как большинство производителей предлагают полногибридные автомобили, оснащенные батареями и двигателями с рабочим напряжением от 230 до 400 В, компания Continental предлагает для полногибридных автомобилей мотор на 48 В, 30 кВт [18].

Параллельная гибридикация

В параллельном гибридном транспортном средстве электродвигатель обеспечивает крутящий момент, который добавляется к крутящему моменту ДВС (чаще всего бензинового). Электродвигатель может быть размещен между ДВС и трансмиссией (гибридикация перед трансмиссией), между трансмиссией и колесами (гибридикация после трансмиссии) или же на задних колесах для тяги (гибридикация «на колесе»), что позволяет осуществлять режим полного привода без необходимости передачи крутящего момента через громоздкий и дорогой трансмиссионный вал, проходящий через автомобиль.

Электромобили DS5 Hybrid 4 и Peugeot 508 Hybrid 4 были параллельными гибридами с электродвигателем мощностью 27 кВт, установленным на задней оси. Новый электромобиль Peugeot 3008 Hybrid 4 сочетает в себе электродвигатель, установленный на передней трансмиссии, и электродвигатель на задней оси.

В параллельном гибридном электромобиле максимальная мощность достигается в результате сложения мощности ДВС и электродвигателя, что для экономичных транспортных средств позволяет использовать ДВС с меньшим рабочим объемом, чем на ДВС-автомобиле эквивалентной мощности.

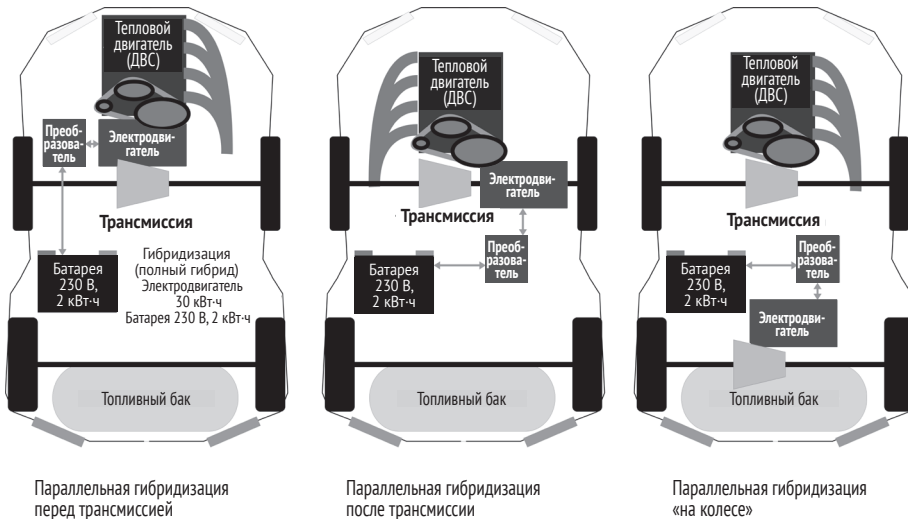


Рис. В.5. Параллельные гибридные архитектуры

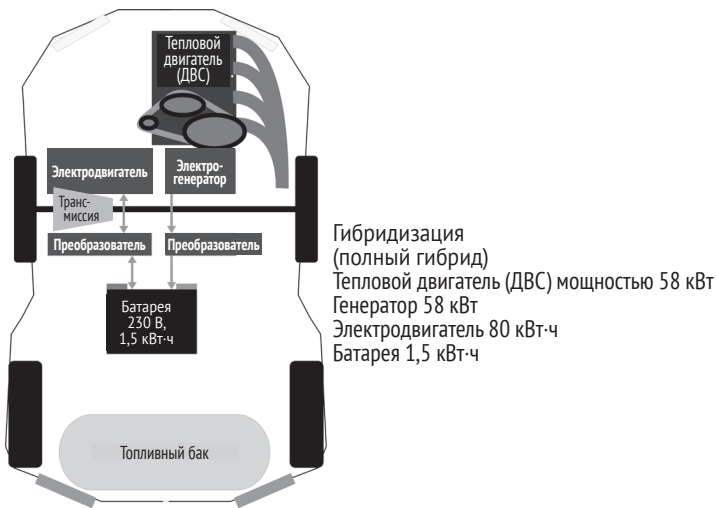


Рис. В.6. Последовательная гибридная архитектура, данные электромобиля Nissan Note e-Power

Последовательная гибридизация

В последовательном гибриде ДВС используется только для приведения в действие генератора, заряжающего аккумулятор. Во время движения он питает электродвигатель и заряжает аккумулятор. ДВС, полностью независимый от трансмиссионного вала, работает без коробки передач в режиме, близком к его оптимальной эффективности. Это предполагает наличие электродвигателя с максимальной мощностью автомобиля, а также теплового двигателя и генератора переменного тока, рассчитанных на номинальную мощность транспортного средства (мощность, необходимую для преодоления длинных подъемов

на автомагистрали). Именно поэтому последовательных гибридных легковых автомобилей мало. Компания Nissan предлагает в Японии модели электромобилей Note и Serena e-power в качестве последовательного гибрида (ДВС и генератор мощностью 58 кВт / 78 л. с. и тяговый электродвигатель мощностью 80 кВт при заявленном расходе 2,94 л / 100 км).

Преимущество этой технологии заключается в том, что ДВС работает с максимальной эффективностью независимо от типа поездки; именно на городских автобусах это преимущество проявляется лучше всего. В электробусе BAЕ Systems Serie E используется такая схема последовательной гибридизации.

Гибрид с отводом мощности

Параллельная гибридизация объединяет мощность тепловых и электрических двигателей, а последовательная гибридизация обеспечивает работу ДВС с максимальной эффективностью, даже когда транспортное средство неподвижно. Интеграция электродвигателей в сложные редукторы позволяет объединить два преимущества этих технологий. Такая схема называется *байпасом*, *отводом мощности*, или *последовательно-параллельным типом гибридизации*. В этом случае мощность электродвигателя может быть ниже номинальной мощности транспортного средства, а мощность генератора – значительно ниже.

Такой вариант гибридизации, например, используется в электромобиле Renault Clio и различных гибридах марки Toyota. На рис. В.7 приведен один из вариантов современного гибрида с байпасом.

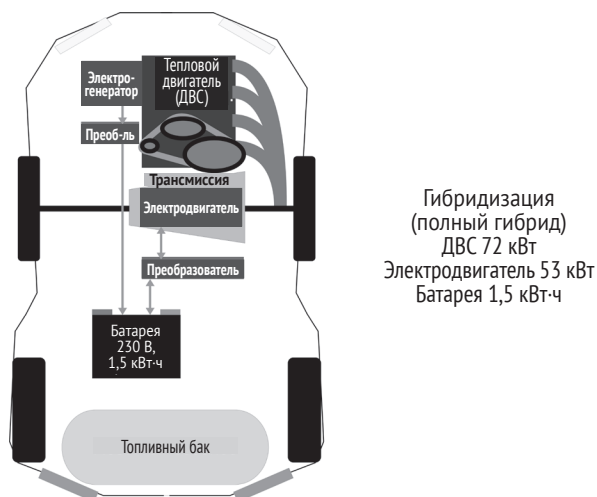


Рис. В.7. Последовательно-параллельная гибридная архитектура, данные электромобилей Toyota Prius 4

В.1.4. Заряжаемый от электросети гибридный электромобиль (PHEV)

Гибридные автомобили с возможностью зарядки АКБ от электросети типа PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) имеют ту же архитектуру, что и гиб-

ридные автомобили, но с аккумулятором большего размера, заряжаемого от электросети, что обеспечивает достаточный запас хода на электротяге в повседневных поездках по городу (от 40 до 60 км для большинства последних моделей).

Для модели Renault Captur e-Tech с гибридным двигателем, аналогичным двигателю Clio, и батареей на 9,8 кВт·ч заявлено 50 км автономного пробега в смешанном цикле тестирования WLTP.

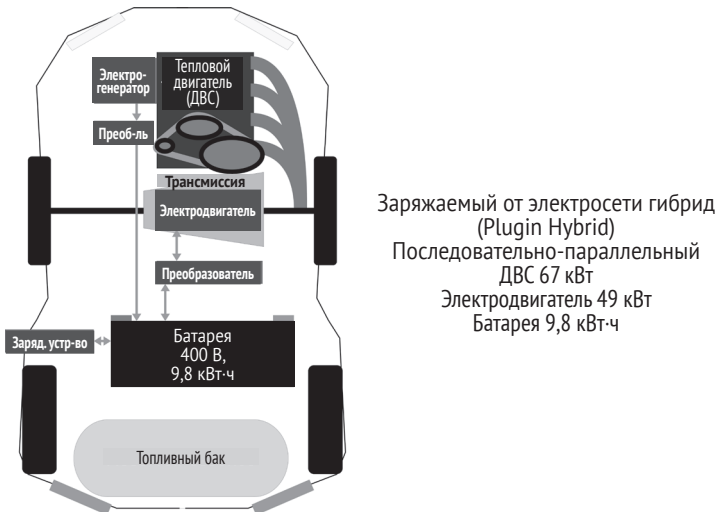


Рис. В.8. Гибридная архитектура заряжаемой от электросети модели электрокара Renault Captur

Заряжаемый от электросети гибрид, использующий электрическую тягу на протяжении большей части цикла тестирования WLTP, имеет очень низкий расход топлива (2,2 л / 100 км для модели DS7). Очевидно, если владелец не будет заряжать батарею, расход топлива будет таким же, как у эквивалентного ДВС транспортного средства, и даже превысит его из-за избыточного веса батареи. Таким образом, расход топлива зависит от владельца, который должен регулярно заряжать батарею своего электрокара, чтобы получать выгоду по топливу при его эксплуатации.

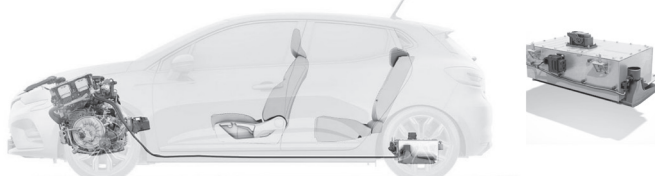
В.1.5. Электрокара с увеличенным запасом хода на электроэнергии (EREV)

Подобно последовательным гибридам, аккумуляторный электрокара с увеличенным запасом хода на электроэнергии EREV (Extended Range Electric Vehicle) отличается только небольшими размерами ДВС.

Совместное развитие заряжаемых от электросети гибридов и технологий аккумуляторов привело к исчезновению этого необычного варианта электрокара (Opel Ampera, BMW i3). Кроме того, наличие теплового двигателя, его шум и вибрация ухудшают характеристики, ожидаемые покупателем от электрокара.



Заряжаемый от электросети гибрид Renault Capture e-Tech Hybrid и батарея 400 В, 9,8 кВт·ч



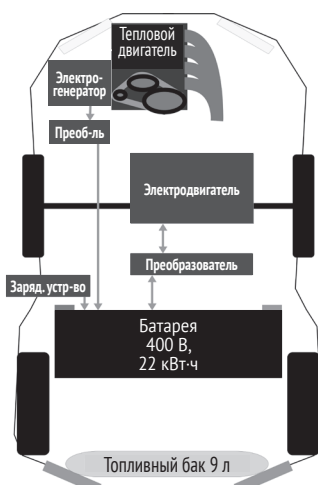
Renault Clio E-Tech Hybrid и батарея на 230 В, 1,2 кВт·ч

Электродвигатель устанавливается после коробки передач, а стартер-генератор приводится ремнем



Рис. В.9. Пример последовательно-параллельной гибридизации после трансмиссии; заряжаемый и незаряжаемый электромобили (источник: Renault)

Компания Renault предлагала в 2020 г. модели электромобилей Kangoo и Master с увеличенным запасом хода за счет использования водородного топливного элемента.



Электромобиль с увеличенным пробегом на электроэнергии (Range Extender)
 ДВС 25 кВт
 Электродвигатель 125 кВт
 Батарея 22 кВт·ч

Рис. В.10. Электрическая схема электромобилля с увеличенным запасом автономного хода. Данные электромобилля BMW i3 REX

В.1.6. Аккумуляторный электромобиль (BEV)

Аккумуляторный электромобиль класса BEV (Battery Electrical Vehicle) имеет простую конструкцию: заряжаемая от электросети аккумуляторная батарея, преобразователь и электродвигатель.

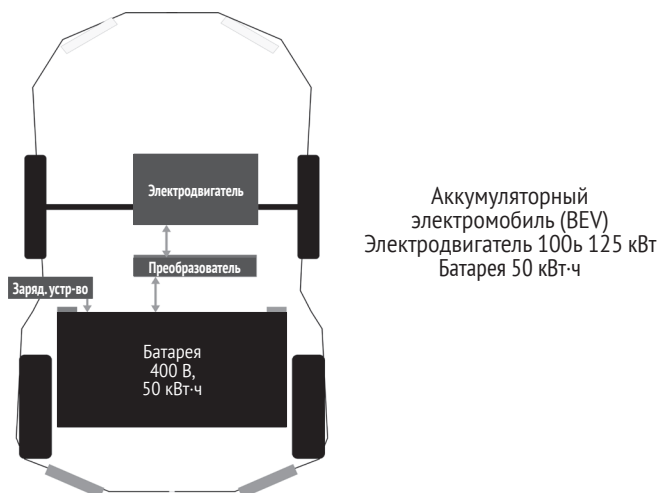


Рис. В.11. Аккумуляторный электромобиль Peugeot e-208

Упрощение конструкции приводит также к упрощению обслуживания электромобиля в сравнении с ДВС- и гибридным автомобилем. Цена и характеристики аккумуляторов, основная стоимость и избыточный вес электромобиля будут и дальше оптимизироваться, как и инфраструктура (зарядные станции, взаимодействие с электросетью). Учитывая очень строгие нормативные ограничения (например, объявленный запрет на продажу ДВС- и гибридных транспортных средств в 2035 г. в Соединенном Королевстве [22]), такая конструкция электромобиля имеет многообещающее будущее, что подтверждается показателями компании Tesla на фондовом рынке или исследованием компании Deloitte² в июле 2020 г., согласно которому в 2030 г. будет объявлено о 25%-ной доле электромобилей с аккумуляторной батареей в общих продажах легковых автомобилей [21].

В.1.7. Электромобиль на топливных элементах (FCEV)

Электромобиль на *топливных элементах*, обозначаемый как FCEV (Fuel Cell Electrical Vehicle), иногда называемый *водородным транспортным средством*, имеет на борту топливные элементы, вырабатывающие электроэнергию из водорода, в сочетании с батареей малой емкости. В начале 2021 г. электромобили Toyota Mirai и Hyundai Nexo были единственными водородными автомобилями, представленными на рынке. Эта технология по-прежнему очень дорогая и находится в стадии разработки, но она перспективна для транспортных средств с большим запасом хода (особенно для тяжелых транспортных средств). Об этом речь пойдет в пятой части книги.

² Крупнейшая международная компания в области консалтинга и аудита. – Прим. ред.

Увеличенный запас хода в этой технологии обеспечивается топливными элементами, а не комбинацией ДВС с электрогенератором. Если водородные топливные элементы предлагаются в электромобилях Renault Kangoo и Masters в качестве средства увеличения автономного пробега, то на электромобиле FCEV-типа топливный элемент является основным источником электроэнергии.

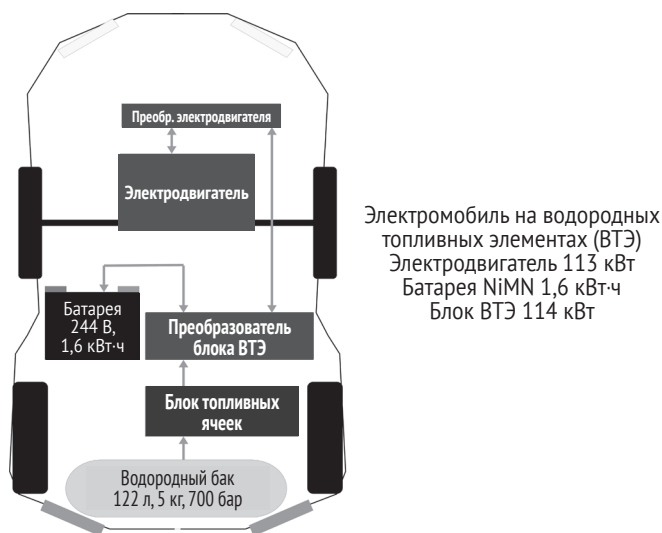


Рис. В.12. Электромобиль Toyota Mirai на топливных элементах

В.2. Рынок электромобилей в 2020 г.

На мировые рынки электромобилей (Франция, Европа, Китай, США) влияют несколько факторов:

- вводимые ограничения в центре крупных городов. Среди множества примеров отметим Копенгаген с программой «Нулевые выбросы углерода с 2030 г.» или Париж с запретом на дизельное топливо с 2024 г., а сегодня разрешена регистрация новых транспортных средств только с нулевым уровнем выбросов в дни высокого уровня загрязнения;
- государственная помощь на покупку транспортных средств, а также на установку зарядных станций и, наоборот, штрафы для транспортных средств с высоким уровнем выбросов CO₂;
- возможность иметь розетку для ежедневной зарядки (установка зарядного устройства в общественных местах или на предприятиях, наличие городских зарядных устройств для людей, у которых нет парковки, и т. д.);
- эволюция имиджа, связанная с автомобилем. Исторические критерии покупки (мощность, скорость, размер) в настоящее время теряют актуальность;
- принятие изменений в использовании: увеличенное время зарядки для необычно длительных поездок и привязка времени ежедневной зарядки к доступным зарядным станциям;

- целевые показатели сокращения выбросов CO₂, применяемые к производителям автомобилей: в среднем менее 95 г CO₂/км на автомобилях, проданных в Европе в 2020 г., а затем дополнительное уменьшение на 15 % и 37,5 % к 2025 и 2030 гг.;
- запланированный запрет на продажу автомобилей с ДВС во Франции в 2040 г., объявление Соединенным Королевством запрета на продажу автомобилей с ДВС и гибридных автомобилей в 2030 г. [22]. Другие страны (Китай, США) идут по аналогичному пути;
- технические изменения (в частности, емкость и стоимость аккумуляторов, время зарядки) и логистика (плотность расположения обычных и быстрых зарядных станций в регионе);
- цены на топливо и электроэнергию: соотношение дешевой электроэнергии и топлива, облагаемого высокими налогами, во Франции отличается, например, от США;
- энергетический баланс страны (доля ископаемых источников энергии в производстве электроэнергии) и ее обязательства по сокращению выбросов парниковых газов.

В первой половине 2020 г., отмеченной падением мирового рынка на 28 %, связанным с COVID 19, во всем мире на автомобили с аккумуляторным питанием (BEV) и заряжаемыми от сети гибридами (PHEV) приходилось около 3 % продаж легковых автомобилей [23]. Продажа электромобилей на топливных элементах остается мизерной (было продано 3500 автомобилей на общую сумму несколько десятков млн долл.).

Китай является крупнейшим в мире рынком электромобилей (BEV и PHEV), на долю которого в 2019 г. приходилось около 50 % мировых продаж [21]. 4% продаж составляют электромобили с аккумуляторными батареями благодаря сильной поддержке (субсидии, таможенные барьеры) со стороны государства, которое рассматривает молодой электроэнергетический сектор как возможность для китайской промышленности конкурировать с европейскими производителями. Автопроизводители (Geely, Chery, BAIC, BYD и др.) предлагают разные модели электромобилей, с помощью которых они намерены увеличить свою долю на рынке Европы. В Китае, хотя значительная часть электроэнергии вырабатывается из угля, электромобили помогают снизить загрязнение в городах.

В **США** сектор электромобилей BEV (2,1 % продаж) в основном определяется моделями компании Tesla (Tesla Model 3 составила 50 % продаж в 2019 г.).

Европа – континент с самым сильным ростом продаж электромобилей BEV + PHEV в 2019 г. [21]. В третьем квартале 2020 г. выделилась Норвегия, где было 54 % продаж аккумуляторных электромобилей или заряжаемых гибридов. Франция является третьим европейским рынком по уровню продаж после Германии и Великобритании [20].

Что касается транспортных средств, то на рынке доминирует электромобиль Tesla Model 3 с 142 000 шт., проданными в первой половине 2020 г., на втором месте – Renault ZOE с 38 000 шт. за тот же период [23].

Все сценарии показывают большой рост продаж электромобилей во Франции. Они предусматривают проникновение от 10 % до 30 % электромобилей

EV в автопарк к 2030 г. В табл. В.1 показаны прогнозы автомобильного сектора на 2020 и 2035 гг.

Таблица В.1. Распределение продаж новых легковых автомобилей по типу трансмиссии во Франции (источник: Plateforme de la filière automobile³)

	2020	2035
Гибридные автомобили	10,9 %	28,9 %
Подключаемые гибридные автомобили	6 %	20,4 %
Электрические транспортные средства	7,2 %	30,5 %
Бензиновые автомобили	34,3 %	14,7 %
Дизельные автомобили	41,7 %	5,6 %

Следует отметить, что значительное развитие электрического парка обходится государству очень дорого по разным причинам – в первые годы из-за субсидий на покупку электромобилей и развертывание зарядной инфраструктуры, а в дальнейшем за счет снижения объема продаваемого топлива, что является источником 5%-го дохода в госказну (35 млрд евро в 2018 г. налоговых поступлений от оборота на рынке нефтепродуктов).

Также начинает формироваться рынок подержанных электромобилей, обусловленный длительными гарантиями производителя на аккумуляторы (до 160000 км пробега).

В.3. Действительно ли электромобиль оказывает положительное воздействие на окружающую среду?

Важный аспект развития электромобилей – воздействие на окружающую среду – остается предметом дискуссий. Попробуем привести в эту дискуссию некоторые научные факты. Этот раздел книги, как и следующий, преимущественно основан на «Экономическом, энергетическом и экологическом исследовании французских автотранспортных технологий» (E4T) [2], проведенном IFPEN (Французский институт нефти) в партнерстве с ADEME (Агентство охраны окружающей среды и энергетики, Франция).

Организация COP21 поставила амбициозные цели с точки зрения сокращения выбросов парниковых газов. В настоящее время Европа стремится достичь углеродной нейтральности к 2050 г. В Европе транспорт является основным источником выбросов парниковых газов (27 %), легковые автомобили составляют 30 % от общего количества, коммерческие автомобили – 15 %, автобусы – 2 %.

³ Ассоциация, объединяющая французских игроков автомобильной промышленности. – Прим. перев.

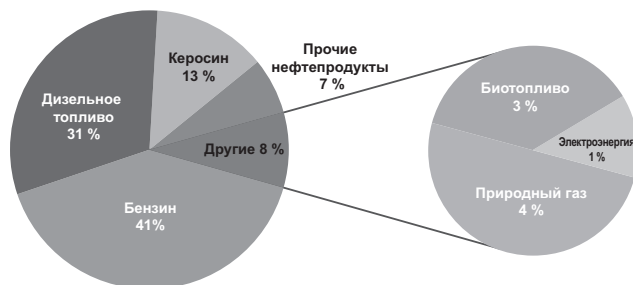


Рис. В.13. Глобальный энергетический баланс сектора транспорта в 2012 г. (источник: АИЕ – независимая некоммерческая организация)

Во Франции производство электроэнергии практически полностью исключает выбросы углерода. В Европе производство электроэнергии медленно следует по этому пути за счет внедрения возобновляемых источников энергии (35 % производства электроэнергии в Германии в 2018 г., 33 % в Испании) и закрытия угольных электростанций. Международное энергетическое агентство (МЭА) объявило в ноябре 2020 г., что во всем мире 90 % новых производственных мощностей электроэнергии будет основано на возобновляемых источниках и к 2025 г. предполагается достичь большего производства электроэнергии из возобновляемых источников, чем из угля [28].

Добавим к этому влияние на климат и стремление граждан к лучшему качеству воздуха в городах (ограничение выбросов таких загрязнителей атмосферы, как оксиды азота NO_x и мелкие частицы от сгорания топлива, а также от тормозных колодок); меньший уровень шума и необходимость снижения зависимости Франции от стран-экспортеров нефти (истощение ресурса, нестабильность цен, геополитическая независимость).

Выводы исследования Е4Т близки к выводам исследования «Электромобиль в экологическом переходе во Франции», организованного Фондом природы и человека и Европейским климатическим фондом в 2017 г. [3]. Его результаты здесь не приводятся. Дотошный читатель может обратиться к этому источнику за подтверждением.

Подход к анализу жизненного цикла (АЖЦ), использованный в исследовании Е4Т, учитывает процессы производства энергии («от скважины до бака»), а также производство транспортных средств («от исходных материалов до утилизации»), что позволяет получить полные и последовательные балансы АЖЦ. Этот процесс подробно описан в исследовании. Рассматриваются два года – 2018 и 2030. В этом временном интервале исследование учитывает запланированные улучшения в КПД двигателя и, в частности, в плотности энергии АКБ (аккумуляторной батареи). Учтено несколько категорий транспортных средств. Сохранено репрезентативное использование каждой категории транспортных средств, например:

- срок службы 10 лет и пробег 12 000 км/год для городских транспортных средств с типичными маршрутами. Продолжительные поездки в отпуск были исключены из этого исследования;
- срок службы 12 лет и 40 000 км/год для автобусов, в основном городских маршрутов.

Что касается структуры энергетики, исследование сосредоточено на Франции, которая в значительной степени отказалась от углеродного топлива из-за большой доли ядерной энергетики. В исследовании рассматриваются три типа частных транспортных средств: небольшие городские автомобили (категория А), автомобили среднего класса (категория С) и автомобили большого класса (категория D).

В.3.1. Городской транспорт

При использовании в городе сравниваются 4 автомобиля:

- бензиновый автомобиль (4 л / 100 км в стандартизированном тестовом цикле WLTP в 2030 г.);
- автомобиль с частичной гибридизацией (МНЕV, 3 л / 100 км в стандартизированном тестовом цикле WLTP в 2030 г.);
- заряжаемый гибридный электромобиль (запас хода на электротяге 50 км);
- электромобиль только с аккумулятором (запас хода 200 км; 10 кВтч / 100 км в 2030 г. в тестовом цикле WLTP).

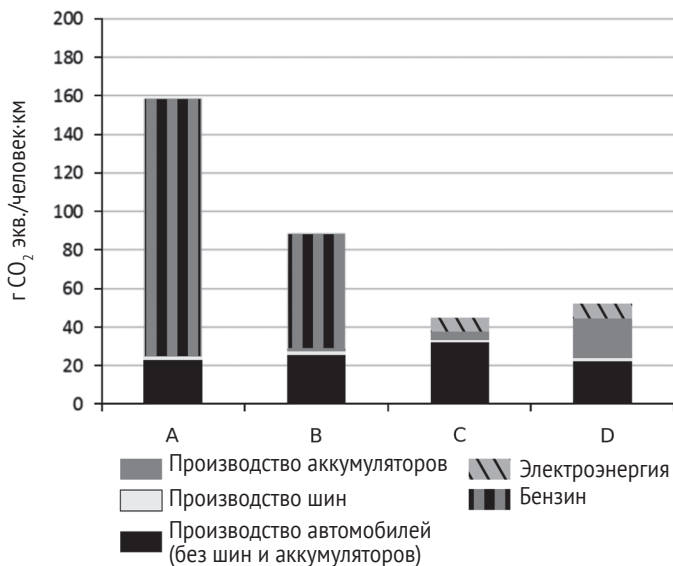


Рис. В.14. Влияние на изменение климата при использовании автомобиля А-сегмента в 2030 г. в городских условиях [2]. Обозначения: А – автомобиль с бензиновым двигателем; В – электромобиль с частичной гибридизацией (48 В); С – заряжаемый от электросети гибридный электромобиль с запасом хода на электротяге 50 км; D – аккумуляторный электромобиль с запасом хода 200 км

Ни более благоприятно выглядят результаты электромобилей с батарейным питанием, тем более что мы рассматриваем автомобили с ограниченной автономностью пробега.

Наконец, ожидаемые изменения в функциональной доступности центров крупных городов (сборы за проезд или запрет на использование транспортных средств, загрязняющих окружающую среду, стоянки для электромобилей), по-

звolyют надеяться, что будущее небольших городских транспортных средств принадлежит электромобилю. Можно также отметить более низкий уровень шума электромобилей и меньшее образование в них мелких частиц от износа тормозных колодок во время торможения благодаря вкладу электродвигателя в замедление движения автомобиля.

Отметим, что текущая тенденция к увеличению размера АКБ для увеличения автономности пробега электромобиля ради нескольких длительных поездок в году ухудшает углеродный след транспортного средства за счет увеличения выбросов CO_2 не только при производстве транспортных средств, но также и при их использовании (большая масса). Можно также отметить, что для электромобилей преобладают экологические затраты, связанные с производством, по сравнению с затратами, связанными с эксплуатацией. Это заставляет задуматься о транспортных средствах с длительным сроком службы или более часто используемых (совместное использование), что является важным социальным аспектом, но обсуждение данного вопроса выходит за рамки технических аспектов, которым посвящена эта книга.

В.3.2. Электромобили среднего и премиум-класса

Среди автомобилей среднего и премиум-класса было изучено 9 типов автомобилей. Отметим, что по состоянию на 2021 г. неэлектрифицированные транспортные средства среднего класса значительно превышают целевой показатель выбросов в 95 г/км.

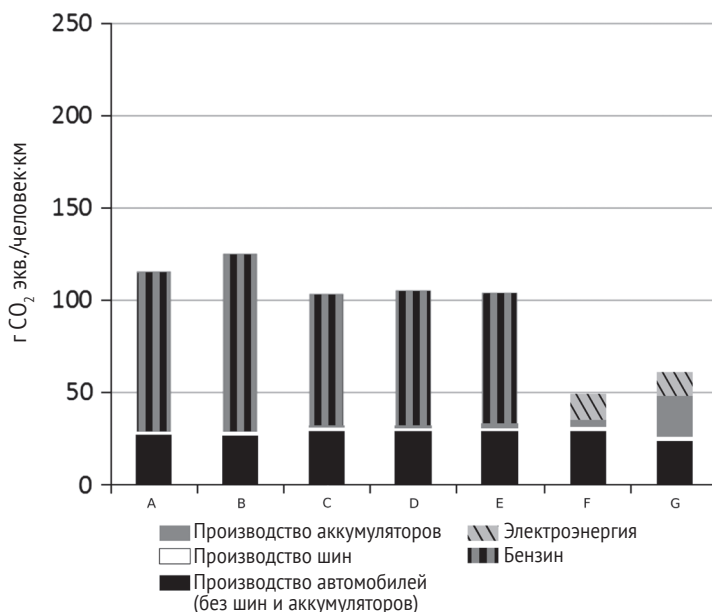


Рис. В.15. Воздействие на изменение климата при использовании автомобиля С-сегмента в 2030 г. в цикле WLTC [2]. Обозначения: А – дизельный автомобиль; В – бензиновый автомобиль; С – частичный гибридный дизель (48 В); D – частичный бензиновый гибридный (48 В), E – параллельный бензиновый гибридный; F – гибридный бензиновый двигатель; G – электромобиль на АКБ (автономность 250 км)

Кроме того, для рассмотренного типа транспортных средств возникает проблема автономной работы при поездках на большие расстояния, требующая увеличения емкости АКБ, использования механизма увеличения автономного пробега или возможности очень быстрой зарядки на шоссе.

В результате исследования были выявлены два наиболее экологичных электромобиля (как базового уровня, так и в более дорогом сегменте):

- заряжаемый от сети гибрид PHEV с автономной батареей на 50 км (что примерно соответствует батарее емкостью 10 кВт·ч, установленной на этом типе транспортного средства);
- электромобиль с небольшим аккумулятором (30 кВт·ч, запас хода 250 км) и с небольшой тепловым двигателем, увеличивающим запас хода.

Отметим, что текущая тенденция увеличения емкости аккумуляторных батарей электромобилей (до 50 кВт·ч для городских автомобилей, 80 кВт·ч для автомобилей премиум-класса) может в конечном итоге уменьшить экологический и экономический эффекты от внедрения электрифицированных транспортных средств. От электромобилей с увеличенным автономным ходом (Opel Ampera, BMW i3) на данный момент отказались в пользу заряжаемых гибридных электромобилей среднего класса. А французская компания EP Tender предлагает использование прицепов с аккумуляторами, которые можно купить или взять в аренду [13].

В.3.3. Автобус

Городской цикл езды особенно благоприятен для электромобилей из-за низкой потребляемой мощности и значительной рекуперации энергии при торможении. Таким образом, автобус является хорошим кандидатом на электрификацию, тем более что автобус с нулевым уровнем выбросов CO₂ способствует имиджу города, а владельцы компаний с большей вероятностью будут вкладывать значительные средства с окупаемостью инвестиций в течение 5 или 10 лет, чем частные лица.

Особенно интересен аспект влияния электротранспорта на выбросы парниковых газов (см. рис. В.16). Это связано с тем, что вредное воздействие производства аккумуляторов на окружающую среду очень быстро компенсируется огромным количеством километров, пройденных этим типом электротранспорта. Кроме того, маршруты, по которым курсируют автобусы со множеством остановок, особенно благоприятны для электромобилей. Многие производители автобусов (Volvo, Mercedes, Heuliez, BYD и др.) предлагают электробусы. В 2020 г. в Китае уже было в обращении более 600 000 электробусов [25].

В.3.4. Коммунальные услуги – грузовые автомобили

В исследовании E4T [2] была отмечена необходимость баланса между условиями использования электротранспорта и уровнем электрификации (размер АКБ). Использование аккумуляторного транспорта в городских условиях выгодно за счет хорошей эффективности электрической тяговой системы и ее способности восстанавливать энергию при торможении, в то время как при работе на шоссе высокое потребление энергии, связанное с ветровым сопро-

тивлением автомобиля, ограничивает время автономной работы, быстро разряжая аккумулятор. В этих условиях невозможно сделать обобщенный вывод о рентабельности коммунальных или грузовых автомобилей в целом.

Два ключевых соображения таковы:

- в городских условиях двигатель с нулевым уровнем вредных выбросов обеспечивает неограниченный доступ к центру города за счет значительного сокращения локального загрязнения воздуха. В этих условиях будет предпочтителен грузовой электротранспорт. Компания Volvo предлагает две модели электрических грузовиков (FL и FE Electric, на базе двигателей и аккумуляторов от электробусов с емкостью батареи до 400 кВт·ч и 300 кВт·ч соответственно), которые могут использоваться коммунальными службами для вывоза мусора и доставки товаров;
- для транспортных средств, работающих в основном на автомагистралях (например, большегрузных автомобилей), в исследовании подчеркивается важность использования природного газа и СПГ (сжиженного природного газа), обеспечивающих длительный срок службы АКБ и быструю заправку, но с большим углеродным следом, чем у электромобиль. Компания Volvo в сегменте дальних перевозок на данный момент отказалась от электромобиль и предлагает СПГ-грузовик. Полностью электрический грузовик модели Tesla Semi (аккумуляторы на 1000 кВт·ч), как ожидается, поступит в производство в 2021 г.⁴

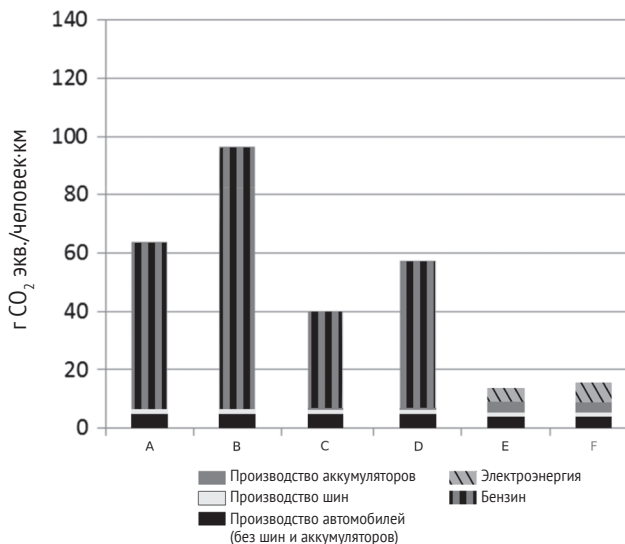


Рис. В.16. Воздействие на климат при использовании автобуса с различными технологиями и в разных городах. Временной горизонт – 2030 г. [2]. Обозначения: А – дизельный автобус (Лионский цикл); В – дизельный автобус (Парижский цикл); С – гибридный электробус (Лионский цикл); D – гибридный электробус (Парижский цикл); E – аккумуляторный электробус (Лионский цикл); F – аккумуляторный электробус (Парижский цикл)

В.4. Является ли электромобиль экономически выгодным?

Экономическая рентабельность часто служит поводом для критики электромобилей. Позволяет ли экономия топлива компенсировать дополнительные расходы на аккумулятор? В исследовании E4T [2] также тщательно изучалась совокупная стоимость владения разных категорий транспортных средств, упомянутых в предыдущем разделе. Этот индикатор учитывает все затраты, связанные с покупкой и использованием (энергия, обслуживание, страхование и т. д.) транспортного средства в течение всего срока его службы, включая его остаточную стоимость. Например, интенсивное использование транспортного средства в случае электробуса ускоряет окупаемость инвестиций.

До тех пор, пока не будет обеспечена рентабельность, развитие отрасли должно быть обеспечено за счет государственных субсидий, направленных на компенсацию дополнительных расходов. Поэтому в исследовании E4T государственные дотации учтены при расчете совокупной стоимости владения в 2018 г., но исключены из предполагаемой совокупной стоимости владения в 2030 г.

В.4.1. Городской транспорт

Для небольшого городского электромобиля (сегмент А), проезжающего 8000 км в год, в 2030 г. конкурентное экономическое преимущество составит 19% по сравнению с бензиновым автомобилем.

Отметим интересное позиционирование электромобиля с частичной гибридизацией (48 В), которое при относительно ограниченных начальных вложениях (близких к стоимости ДВС-автомобиля) позволяет значительно сэкономить на потреблении горючего.

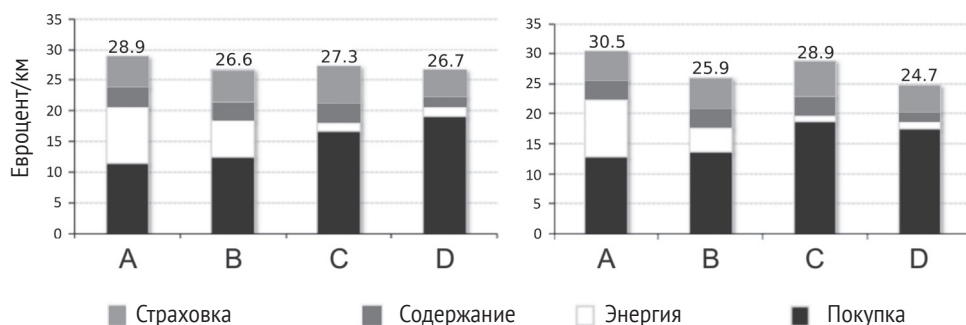


Рис. В.17. Совокупная стоимость владения транспортным средством сегмента А в 2015 г. (слева) и в 2030 г. (справа) в городском цикле [2]. Обозначения: А – автомобиль с бензиновым двигателем; В – электромобиль с частичной гибридизацией (48 В); С – заряжаемый гибридный электромобиль с запасом хода на электротяге 50 км; D – аккумуляторный электромобиль с запасом хода 200 км

Конкурентный разрыв между электромобилем и ДВС-автомобилем увеличивается, если рассматривать только городские поездки при условии не слишком

ком большой АКБ. Точно так же экономическое преимущество электромобиля возрастает с увеличением количества пройденных километров, при этом стоимость ежедневной зарядки невысока (примерно 0,15 евро/кВт·ч, или примерно 2 евро на 100 км).

В.4.2. Автомобили среднего и премиум-класса

Что касается автомобилей среднего класса, то следует отметить, что электромобиль остается конкурентоспособным даже при учете замены АКБ один раз в рассматриваемые 10 лет эксплуатации при условии ограничения мощности батареи примерно в 30 кВт·ч, чего в большинстве случаев достаточно для ежедневных поездок по городу туда и обратно.

Проблема для таких транспортных средств заключается в ограниченной дальности поездки. Согласятся ли пользователи увеличить автономный пробег электромобиля (дополнительные расходы, потеря части багажника) или каждые 200 км останавливаться и ждать подзарядку в течение 30 мин (возможно, меньше в 2030 г.) при нечастых дальних поездках в выходные и праздничные дни?

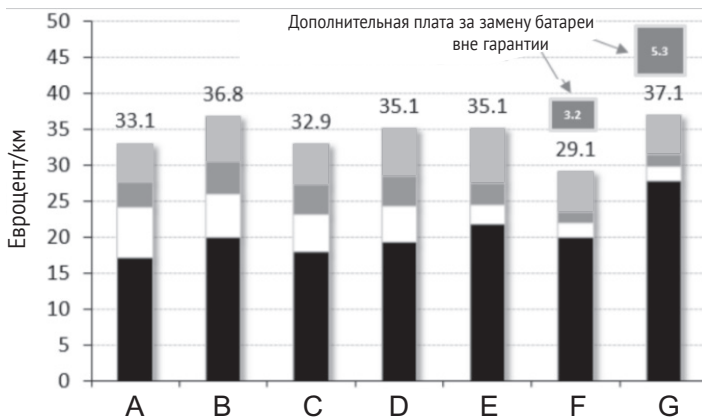


Рис. В.18. Сравнение совокупной стоимости владения автомобилем С-сегмента в 2030 г. по циклу WLTC [2]. Обозначения: А – бензиновый; В – дизельный; С – частичный гибрид (48 В) D – параллельный гибрид; E – бензиновый заряжаемый гибрид; F – аккумуляторный электромобиль (дальность хода 250 км); G – аккумуляторный электромобиль (дальность хода 500 км)

Заряжаемый от электросети гибридный автомобиль является экологически чистым, если он заряжается каждый день. Но в настоящее время он не очень конкурентоспособен из-за стоимости двух двигателей и аккумулятора. На рынок выходят гибриды среднего класса (Renault Captur, Kia Niro) с небольшим ДВС (66 кВт для Captur) и ценами, которые на данный момент все еще превышают 30 000 евро.

Увеличение срока службы АКБ для электромобилей с батарейным питанием является одним из решений проблем, отмеченных в исследовании, как с точки зрения выбросов парниковых газов при производстве, так и с точки зрения рентабельности.

В.4.3. Автобус

Автобусам присущ специфический профиль нагрузок (многочисленные остановки и старты с места), поэтому гибридизация обеспечивает значительную экономию расхода топлива по сравнению с обычным двигателем, достигающую 40 %.

Полностью электрический автобус с аккумулятором ограниченного размера, учитывая замену аккумулятора в течение срока службы автомобиля, будет конкурентоспособным к 2030 г. В 2020 г. компания RATP⁵ анонсировала 154 маршрута электрических автобусов с использованием такой технологии, но пока не сдержала обещания, поскольку эксплуатация электробусов на 50 % менее рентабельна по сравнению с автобусами на биогазе [24].

Общая стоимость владения электробусами, показанными на рис. В.19, включает установку зарядной станции.

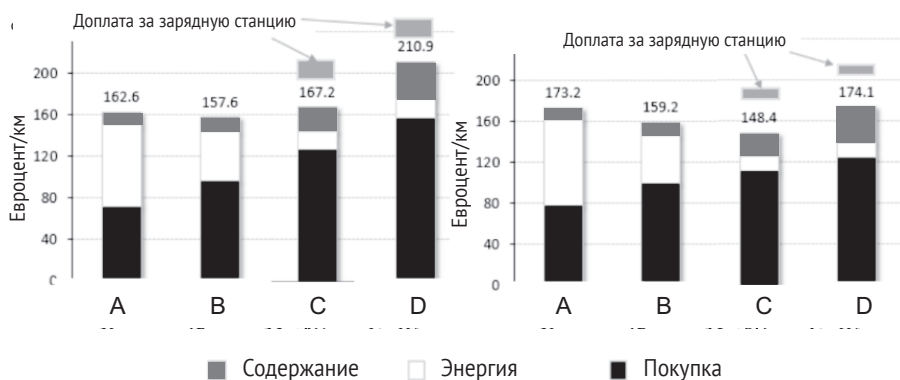


Рис. В.19. Сравнение совокупной стоимости владения автобусами в 2015 г. (слева) и 2030 г. (справа) по парижскому циклу [2]. Обозначения: А – автобус с дизельным двигателем; В – гибридный автобус; С – электробус на АКБ (уменьшенная автономность); D – электробус на АКБ (увеличенная автономность)

В.4.4. Коммунальные службы – грузовые автомобили

Как упоминалось в предыдущем разделе, в ближайшей перспективе только городской грузовой транспорт может извлечь выгоду из преимуществ, связанных с полной электрификацией. При этом очевидно, что профили использования грузовика-сборщика бытовых отходов, автобуса и грузовика, движущегося в основном по шоссе, значительно различаются между собой. Добавим только два замечания:

- высокая стоимость батареи и значительное аэродинамическое сопротивление на высоких скоростях делают рентабельность инвестиций в электрический грузовой транспорт сомнительной в настоящее время, но она может стать приемлемой к 2030 г.;
- многочасовая «быстрая зарядка» такого транспортного средства при современных технологиях, помимо ночного времени, была бы экономически неприемлема. Эту проблему предстоит решить в долгосрочной перспективе.

В.5. Достаточно ли сырьевых ресурсов для массового развития электротранспорта?

В электромобиле такие металлы, как медь, литий, кобальт, неодим, диспрозий, применяются в намного большем количестве, чем в ДВС-автомобиле. Доступность ресурсов и производств на планете рассматривается как очевидное препятствие на пути развития электромобилей.

Национальная геологическая служба BRGM (Бюро геологических исследований и горных работ) представила подробное исследование доступности каждой из руд этих металлов, где они классифицированы как стратегически важные либо крайне важные.

Отметим, что переработка аккумуляторов и электродвигателей позволяет повторно использовать значительную часть из этих материалов (до 90 % для некоторых материалов аккумуляторов).

В.5.1. Медь

Электромобиль содержит в 3–9 раз больше меди, чем ДВС-автомобиль. Наряду с ростом потребления электроэнергии наблюдается рост основных средств производства электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии (солнечной и ветровой), которые при эквивалентной установленной мощности требуют больше меди, чем углеродные средства производства (уголь и газ) [6, 8].

Почти половина мировых запасов меди находится в Центральной и Южной Америке, в основном в Чили и Перу. В Чили стоимость добычи увеличивается из-за необходимости использования морской воды на чилийских шахтах для сохранения запасов пресной воды.

Вот почему, согласно исследованию французского института нефти IFPEN (проект Generate), запас гарантированной поставки меди составляет всего 17,3% от потребности для базового сценария (4 °C глобального потепления в 2100 г.) и менее 4 % для оптимистичного сценария (2 °C глобального потепления в 2100 г.), ожидаемых в результате массового развития возобновляемых источников энергии к 2050 г. Дополнительные залежи руды найдены, но их добыча требует более высоких экономических и экологических затрат. Поэтому институт BRGM классифицирует поставку меди как фактор со средним уровнем риска.

В.5.2. Литий

Литий – незаменимый металл при производстве аккумуляторов для современных электромобилей. Более половины запасов расположено в Южной Америке, а Боливия, стремящаяся развивать собственную литиевую промышленность, еще не приступила к добыче. Солончаки, содержащие этот материал, находятся в пустынных районах, в то время как для добычи необходима вода; это сдерживает развитие шахт [5, 9].

Несмотря на значительные запасы лития, его цена выросла с 7 долл. за кг в 2014 г. до 20 долл. за кг в 2018 г. из-за неизбежного разрыва между инвес-

тиями в его добычу и появлением на рынке карбонатов или гидроксидов лития.

На Китай, который в настоящее время обеспечивает более 50 % мирового спроса на литиевые катоды, сегодня приходится более 40 % мирового потребления лития.

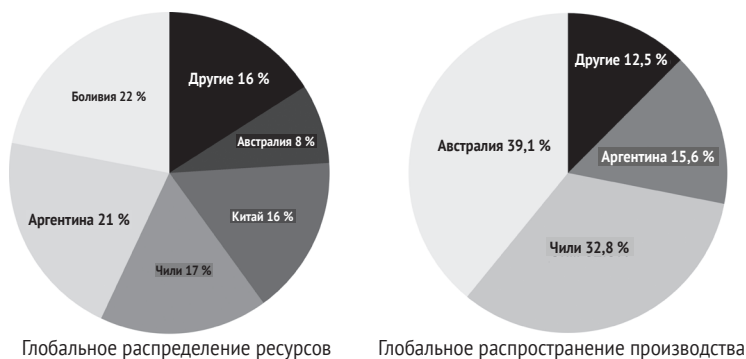


Рис. В.20. Распределение мировых ресурсов лития (слева) и добычи лития (справа) в 2016 г. [9]

Дальнейшее повышение стоимости лития приведет к снижению спроса, однако позволит организовать вторичную переработку этого металла, которая в настоящее время невыгодна. Исходя из этого, BRGM классифицирует доступность лития как фактор со средним уровнем риска.

В.5.3 Кобальт

Производство кобальта, наиболее важного металла для аккумуляторов, постоянно отстает от нарастающего спроса.

Половина добываемого кобальта идет на производство аккумуляторов. В настоящее время более 65 % производства сосредоточено в Демократической Республике Конго, стране, экономическая и политическая ситуация в которой постоянно нестабильна. Горнодобывающая промышленность Конго регулярно сталкивается с обвинениями со стороны неправительственных организаций в высоком уровне коррупции, эксплуатации детского труда и несоблюдении безопасности производства [10].

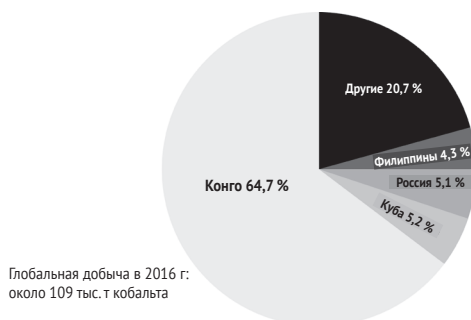


Рис. В.21. Производство кобальта в 2016 г. (источник: Darton Commodities, 2017) [10]

Политическая нестабильность порождает ценовые колебания. Вот лишь три примера скачков цены кобальта: 21 тыс. долл. за тонну в начале 2016 г., 90 тыс. долл. за тонну в 2018 г. и 30 тыс. долл. за тонну в конце 2020 г.

Отметим, что 51 % добываемого кобальта перерабатывается Китаем.

Организация BRGM классифицирует доступность кобальта как фактор со средним или высоким риском. В настоящее время успешно проводятся исследования по значительному сокращению количества кобальта в батареях и разрабатывается этичный процесс извлечения кобальта [26] (см. раздел 8.2).

В.5.4. Редкоземельные металлы

Редкоземельные металлы необходимы при производстве мощных постоянных магнитов – ключевых компонентов электродвигателей и генераторов переменного тока с высокой удельной мощностью. Для магнитов на основе металлов неодим-железо-бор требуется неодим (Nd), а также небольшое количество диспрозия (Dy) для улучшения термостойкости магнитов. Основными потребителями неодимовых постоянных магнитов являются морские ветряные электростанции, где мощные магниты применяются в генераторах для уменьшения веса гондол и, следовательно, размера мачт, а также электромобили для уменьшения габаритов и веса электродвигателя.

Разведанные запасы редкоземельных металлов оцениваются в диапазоне от 50 до 500 лет использования при росте спроса. Проблема связана с тем, что месторождения с достаточной концентрацией металла в руде, которые можно разрабатывать по разумной цене, находятся почти исключительно в Китае, это касается как неодима, так и диспрозия [11, 12].

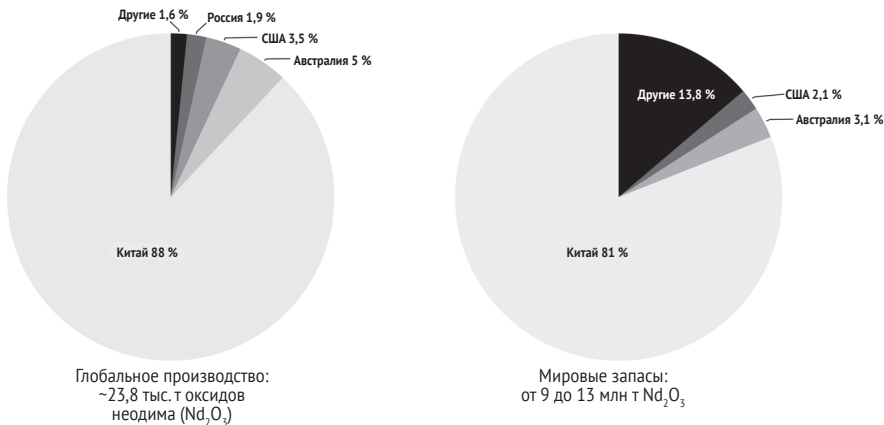


Рис. В.22. Распределение добычи (слева) и запасов (справа) неодима в 2014 г. (оценка из Roskill, 2015) [11]

В 2011 г. Китай продемонстрировал свою монополию, играя на цене на редкоземельные металлы:

- неодим: 25 долл./кг в 2010 г., 460 долл./кг в 2011 г., 50 долл./кг с 2016 г.;
- диспрозий: 200 долл./кг в 2010 г., 3400 долл./кг в 2011 г., 250 долл./кг с 2016 г.

Этот внезапный скачок цен в 2011 г. дестабилизировал промышленное производство генераторов переменного тока и электродвигателей. Компания Renault решила строить более тяжелые и сложные двигатели без постоянных магнитов, и в настоящее время проводятся исследования, направленные на резкое сокращение количества редкоземельных металлов в электродвигателях с постоянными магнитами (см. часть I).

И неодим, и диспрозий классифицируются институтом BRGM как факторы высокого риска.

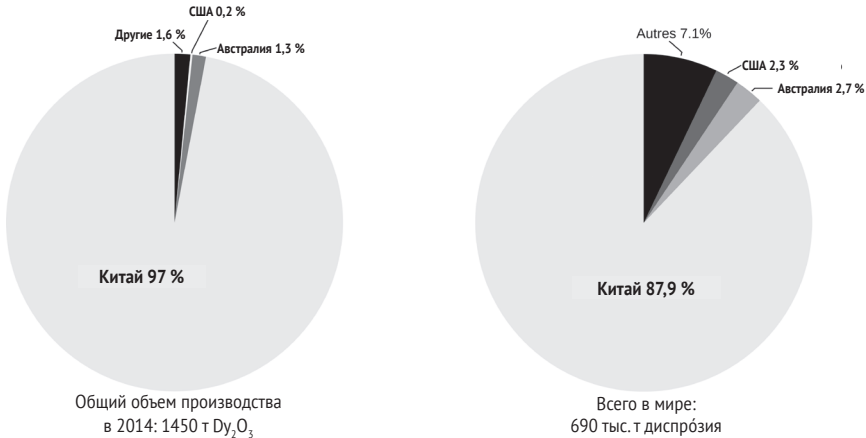


Рис. В.23. Распределение добычи диспрозия в 2014 г. (слева) и запасов диспрозия в 2015 г. (справа) (оценки Roskill, SNL и TMR, 2015) [12]

В.6. Заключение

Итак, во введении было показано, что электромобили, эксплуатируемые в черте города, являются экологически чистым и экономичным транспортом, частично решающим проблемы глобального потепления и локального загрязнения населенных пунктов. Что касается поездок за пределы города, электромобили должны все больше завоевывать популярность благодаря увеличению запаса автономного пробега и сокращению времени зарядки (в сочетании с развитием зарядной инфраструктуры), а также снижению стоимости АКБ, что приведет в конечном итоге к отмене широко предоставляемых сегодня государством субсидий на электромобили. Гибридные автомобили, заряжаемые гибриды или газ для грузовиков позволяют снизить выбросы CO_2 в переходный период ознакомления широкой публики с электрическим приводом.

Удобство в использовании (низкий уровень шума, линейное ускорение), низкие затраты на техническое обслуживание и положительный имидж также являются аргументами в пользу аккумуляторного электромобиля. Исследования производителей показывают, что немногие покупатели электромобилей возвращаются затем к автомобилям с ДВС.

Таким образом, рынок полностью электрических и гибридных транспортных средств с зарядкой от сети, которому благоприятствуют нормативные акты и технический прогресс, будет продолжать поглощать рынок индиви-

дуальных автомобилей с ДВС – при условии, что инфраструктура индивидуальных и общественных зарядных станций будет удовлетворять потребности автовладельцев до момента возможного появления водородных электромобилей, производство которых пока незначительно.

Требования потенциальных покупателей с точки зрения стоимости и удобства использования (автономность, время зарядки), нормативных требований и ограничений инфраструктуры и поставок критически важных материалов будут и впредь определять новые разработки и способствовать благоприятному развитию рынка электромобилей и сокращению количественного разрыва с автомобилями на ДВС, у которых осталось мало возможностей для улучшения.

Европейские автопроизводители на протяжении 100 лет были лидерами на высококонкурентном автомобильном рынке. Подгоняемые правительствами своих стран и конкуренцией со стороны компании Tesla и азиатских автопроизводителей, они вкладывают значительные средства, чтобы предложить разнообразные, привлекательные и качественные электромобили. Будем надеяться, что инвестиции в эти технологии не прекратятся.

Полезного вам чтения!