

# Оглавление

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

<b>Глава 2. Текущие решения в области двигателей для электромобилей .....</b>	<b>52</b>
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
<b>Глава 3. Современное состояние и перспективы технологий двигателей для электромобилей .....</b>	<b>73</b>
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
<b>Глава 4. Силовая электроника и ее перспективы .....</b>	<b>97</b>
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 мощность .....120
- 5.3. История создания литиевых батарей .....121
- 5.4. Принцип работы литий-ионной системы.....121
- 5.5. Выбор материала электродов.....123
- 5.6. Сепаратор и электролит .....126

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

- 6.1. Производство электродов.....127
- 6.2. Сборка ячейки .....128
- 6.3. Завершение/тренировка.....129
- 6.4. Сборка аккумуляторной батареи .....130
- 6.5. Компромисс между мощностью и энергией .....131
- 6.6. Система управления батареей .....132
- 6.7. Вторичная переработка и выбросы CO<sub>2</sub>.....132

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

- 7.1. Эффективность .....135
- 7.2. Старение и срок службы батареи .....136
- 7.3. Безопасность.....137
- 7.4. Зарядка батареи.....138
- 7.5. Стоимость .....141
- 7.6. Производители аккумуляторов (ячеек) .....142

**Глава 8. Инновации и перспективы ..... 144**

- 8.1. Технологические тенденции будущего .....144
- 8.2. Перспективы совершенствования литий-ионных батарей .....145
- 8.3. Твердотельные литиевые батареи .....147
  - 8.3.1. Материалы.....148
  - 8.3.2. Промышленное производство твердотельных батарей .....150
- 8.4. Литий-серные (Li-S) батареи.....152
- 8.5. Литий-воздушные батареи .....154
- 8.6. Заключение .....155

**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
<b>Глава 10. Современные проводные зарядные устройства электромобилей .....</b>	<b>180</b>
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
<b>Глава 11. Перспективные технологии .....</b>	<b>202</b>
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
<b>Глава 12. Бесконтактная зарядка электромобилей.....</b>	<b>209</b>
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
<b>Часть IV</b>	
<b>Электромобиль и электросеть .....</b>	<b>227</b>
<b>Глава 13. Новый потребитель электроэнергии .....</b>	<b>228</b>
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
<b>Глава 14. Проблемы электросети .....</b>	<b>232</b>
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
<b>Глава 15. Возможности и их реализация .....</b>	<b>255</b>
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
<b>Часть V</b>	
<b>Современное состояние и перспективы дорожных транспортных средств на топливных элементах .....</b>	<b>271</b>
<b>Глава 16. Устройство и принцип работы системы топливных элементов .....</b>	<b>275</b>
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
<b>Глава 17. Перспективы развития топливных элементов и водородной инфраструктуры электротранспорта .....</b>	<b>305</b>
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
<b>Заключение и перспективы: общие размышления о месте водорода в электромобильном транспорте .....</b>	<b>330</b>
<b>Приложения.....</b>	<b>333</b>
<b>Приложение 1. Электромоторы электромобилей.....</b>	<b>334</b>
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 электромашин 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 электромашин 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
<b>Приложение 2. Введение в силовую электронику .....</b>	<b>389</b>
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
<b>Список используемой литературы .....</b>	<b>418</b>
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>438</b>



# Предисловие от издательства

## Отзывы и пожелания

Мы всегда рады отзывам наших читателей. Расскажите нам, что вы думаете об этой книге – что понравилось или, может быть, не понравилось. Отзывы важны для нас, чтобы выпускать книги, которые будут для вас максимально полезны.

Вы можете написать отзыв или оставить комментарий к книге в разделе «Отзывы и рецензии». Также можно послать письмо главному редактору по адресу [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com); при этом укажите название книги в теме письма.

Если вы являетесь экспертом в какой-либо области и заинтересованы в написании новой книги, заполните форму на нашем сайте по адресу [http://dmkpress.com/authors/publish\\_book/](http://dmkpress.com/authors/publish_book/) или напишите в издательство по адресу [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com).

## Список опечаток

Хотя мы приняли все возможные меры для того, чтобы обеспечить высокое качество наших текстов, ошибки все равно случаются. Если вы найдете ошибку в одной из наших книг – возможно, ошибку в основном тексте или программном коде, – мы будем очень благодарны, если вы сообщите нам о ней. Сделав это, вы избавите других читателей от недопонимания и поможете нам улучшить последующие издания этой книги.

Если вы найдете какие-либо ошибки в коде, пожалуйста, сообщите о них главному редактору по адресу [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com), и мы исправим это в следующих тиражах.

## Нарушение авторских прав

Пиратство в интернете по-прежнему остается насущной проблемой. Издательства ДМК Пресс и Dunod очень серьезно относятся к вопросам защиты авторских прав и лицензирования. Если вы столкнетесь в интернете с незаконной публикацией какой-либо из наших книг, пожалуйста, пришлите нам ссылку на интернет-ресурс, чтобы мы могли применить санкции.

Ссылку на подозрительные материалы можно прислать по адресу электронной почты [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com).

Мы высоко ценим любую помощь по защите наших авторов, благодаря которой мы можем предоставлять вам качественные материалы.

# Благодарность

Авторы благодарят за советы и тщательную корректуру Иссама Багдади, Жюльена Бернара, Фабьена Буджемаа, Дидье Деруи, Эммануэль Лансель-Бельтран, Мохамеда Габси, Эммануэля Хоанга, Кристиана Моги, Фредерика Мазалейрата, Седрика Нуйана, Хавьера Охеду, Масато Оригути, Оливье Плуа и Бернара Саху.

# 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-х 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<sub>2</sub>, достижение чего 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>, 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, Stellantis<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> 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 усилие<sup>2</sup> создает электродвигатель.

---

<sup>2</sup> 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](http://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.

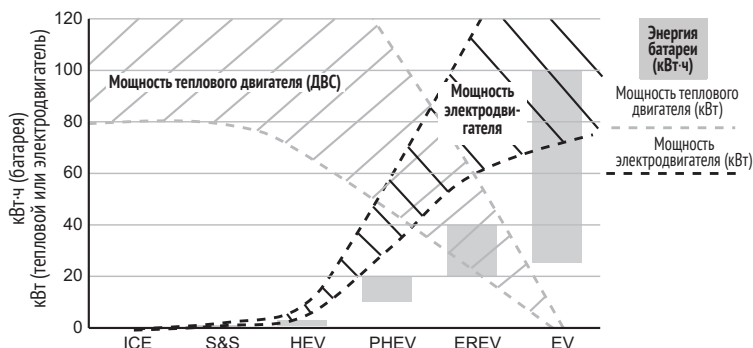
Социальный аспект (владение автомобилем / аренда, каршеринг, отказ от автомобиля в городах в пользу велосипеда, самоката и т. д.) хотя и интересен, но здесь не рассматривается, поскольку эта тема выходит за рамки книги.

## 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  $\text{CO}_2$  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. Высокопроизводительный реверсивный стартер Valeo i-StARS в разобранном виде [17]

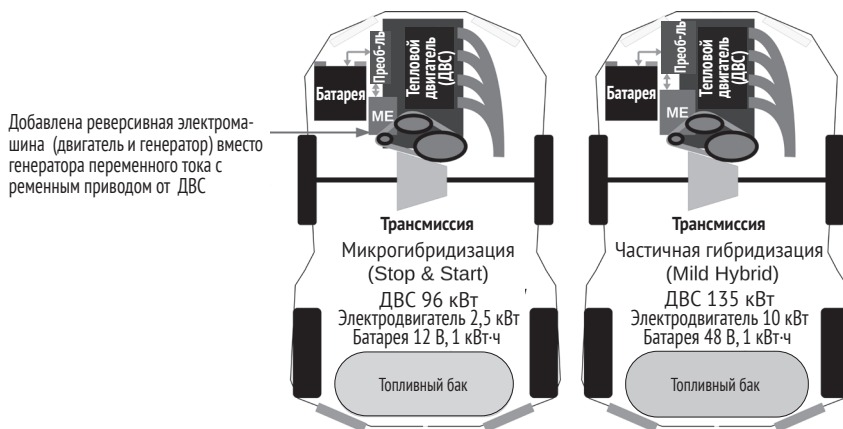


Рис. В.3. Архитектура микрогибридизации и частичной гибридизации, данные автомобилей Citroën С4 SpaceTourer S&S и Mercedes Classe C EQ Boost. ME – электромотор; conv – преобразователь (здесь реверсивный инвертор)

### 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 WLTP<sup>1</sup> 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 CO<sub>2</sub>.

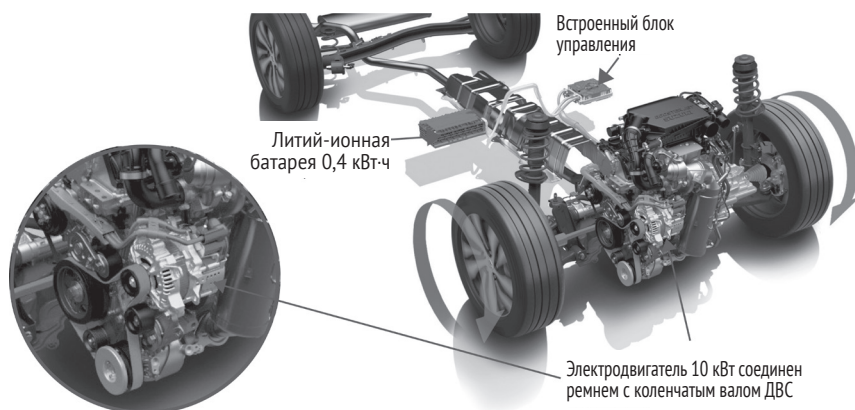


Рис. В.4. Интеграция электродвигателя в частичную гибридную систему автомобиля Suzuki 48V SHVS [15]

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)