

УДК 629.331
ББК 39.33
Д42

- Д42 Энтони Джутон, Ксавье Рейн, Валери Совант-Мойно, Франсуа Орсини, Кристель Сабер, Седдик Бача, Оливье Бету, Эрик Лабуре
Электромобиль: устройство, принцип работы, инфраструктура / пер. с франц. В. И. Петровичева. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 440 с.: ил.

ISBN 978-5-93700-101-6

Эта книга – результат работы большой группы исследователей и инженеров Groupe Renault. Рассмотрены различные варианты архитектуры автомобилей, водородные топливные элементы, детально описаны компоненты силовой установки электромобиля, аккумуляторы, зарядные станции, а также взаимодействие с энергосистемой. Рассказано об экосистеме электромобилей, экономических и экологических аспектах развития.

Издание предназначено широкому кругу читателей, желающих лучше понять суть новой технологической революции – переход от бензинового и дизельного транспорта к электрическому. Также может быть полезно автолюбителям, рассматривающим приобретение электромобиля и желающим разобраться, что у него под капотом.

Copyright originally published in France as: Technologie des voitures électriques. Motorisations, batteries, hydrogène, interactions réseau By Olivier Bethoux, Valérie Sauvant-Moynot, Anthony Juton, Seddik Bacha, Christelle Saber, Xavier Rain, Eric Labouré, François Orsini

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но, поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

ISBN 978-2-10-081806-8 (англ.)
ISBN 978-5-93700-101-6 (рус.)

© Dunod 2021, Malakoff
© Оформление, перевод на русский язык,
издание, ДМК Пресс, 2022

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 батареями132
- 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 ChaofI 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...234	
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.....	242
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 электромашины в синусоидальном установившемся режиме	377
П1.6.4. Стратегии управления асинхронной электромашиной 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 автомобилях	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 автомобиля	416
Список используемой литературы	418
Предметный указатель	438