

УДК 629.3.01

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

А. В. Шабанов, к. т. н., В. В. Ломакин, к. т. н. / Центр испытаний «НАМИ» (НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ») /
А. А. Шабанов, инж. / Университет машиностроения

По данным экспертов, на долю потребления автомобилями топлива нефтяного происхождения в США приходится около 60 % [1]. Потребление значительного количества топливно-энергетических ресурсов приводит к удорожанию нефтепродуктов. В связи с этим в последние годы наметилась тенденция сокращения потребления нефтяного топлива с целью уменьшения зависимости от стран — экспортёров нефти. При современном уровне насыщения мегаполисов автотранспортом всё больше внимания также уделяется снижению выбросов вредных веществ автотранспортом в окружающую среду. Резервы повышения топливной экономичности на традиционных автомобилях исчерпываются. В качестве одного из направлений для решения этой проблемы рассматривается вопрос о применении в больших городах так называемого чистого автомобильного электротранспорта (Pure Electric Car) [1, 2].

Известно, что ключевой проблемой в рамках разработки и создания электромобилей является аккумуляторная батарея. До недавнего времени в производстве находились лишь свинцово-кислотные аккумуляторы, имеющие ограниченный срок службы, относительно низкую энергоёмкость и длительное время накопления энергии. Поэтому вопрос об использовании электромобилей на автодорогах городов не ставился. Электромобили применялись лишь там, где, например, исключалась работа силовых транспортных агрегатов, использующих двигатели внутреннего сгорания, например в закрытых помещениях складов.

Благодаря передовым технологиям и новым материалам в области производства литий-ионных (Li-Ion) и литий-полимерных (Li-Polymer) аккумуляторов нового поколения в настоящее время получило развитие в опытном и промышленном производстве направление по созданию электромобилей [1–3]. Современные аккумуляторы лишены многих недостатков свинцовых аккумуляторов. Li-Ion-батареи позволяют получить наиболее высокое значение запасаемой энергии при небольших габаритах. Если на загородных автотрассах электромобиль не может конкурировать с обычным автомобилем, то в городе, выполняя маршрутные пассажирские перевоз-

ки, он может найти свою нишу и быть эффективнее по экологическим и экономическим показателям [4].

Существует мнение, что если рассматривать затраты на производство электроэнергии для электромобилей, то по экологическим показателям и общим затратам электромобиль может быть не так эффективен, как его рекламируют в технической литературе его сторонники. Да, при производстве электричества на тепловых станциях расходуется топливо, но следует учитывать, что это топливо низкого качества и цены, например уголь, мазут. А электростанции расположены на значительном удалении от городов. На выхлопных трубах ТЭЦ для очистки газов установлены современные фильтры. Электричество также вырабатывают речные электростанции. Цена произведённой электроэнергии, используемой для зарядки батарей электромобилей, составляет 2,5 руб. за кВт·ч, и она реально учитывает все произведённые затраты. Электромобилю с массой 1 000 кг для преодоления расстояния 150 км на одной зарядке требуется 20 кВт·ч энергии (20 кВт·ч × 2,5 руб. = 50 руб.), а традиционному бензиновому автомобилю для преодоления этого расстояния нужно 8 л топлива (8 л × 31 руб. = 248 руб.) [5]. Учитывая это, можно сказать, что использование электроэнергии в электромобиле значительно



Рисунок 1. Электромобиль Mercedes-Benz E-Class на станции быстрой зарядки

выгоднее (до пяти раз), чем применение нефтяного топлива на традиционных автомобилях.

Следует отметить, что на современном этапе промышленного производства вопрос применения электромобилей в городских условиях приобретает ещё большую актуальность в связи с созданием в последние годы быстрозаряжаемых литий-ионных аккумуляторных батарей, которые за счёт увеличения зарядного тока и напряжения позволяют довести время полной зарядки до 10–20 минут. Компанией Toshiba в 2005 году создана литий-ионная аккумуляторная батарея, которая заряжается со скоростью 2–3 % от общей мощности в минуту. В США с 2007 года на электромобили устанавливаются литий-ионные аккумуляторные батареи энергоёмкостью 35 кВт·ч, которые заряжаются за 10 минут. Дальность пробега автомобиля с таким аккумулятором на одной зарядке составляет 200 км [5, 6]. На рис. 1 показана заправка электромобиля на зарядной станции [2].

Основные характеристики станции быстрой зарядки для типа сети 3P + N: частота — 50 Гц, максимальная мощность — 21 кВт, максимальное напряжение — 380 В, максимальный ток зарядки — 32 А. Зарядные станции имеют степень электрозащиты IP-44 и IP-55 [7].

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ

В табл. 1 приведены основные характеристики электромобилей. Как видно из табл. 1, электромобили по динамическим качествам не уступают традиционным автомобилям, а по эффективности использования энергии, как это было показано выше, значительно их превосходят. Следует сказать, что запаса хода в 150–180 км для городских условий эксплуатации при использовании станций быстрой зарядки является вполне удовлетворительным. По скоростным свойствам электромобиль существенно уступает традиционным автомобилям, но для городских условий это не является недостатком.

Более подробно рассмотрим характеристики электромобиля El Lada. Энергоёмкость современного блока аккумуляторов, применяемого на российском электромобиле El Lada, состоящего из отдельных литий-фосфат-железных батарей весом 3,2 кг, составляет 23 кВт·ч. При этом ёмкость одной батареи напряжением 3,2 В составляет 90 А·ч. Общая масса батареи — 270 кг. Максимальное напряжение батареи — 320 В. Энергоёмкость батареи в пересчёте на тепловую энергию составляет 82,8 МДж, что соответствует энергии 2,5 литра высокооктанового бензина. Максимальный ток разряда батареи в режиме движения автомобиля — 270 А, что позволяет электромобилю развивать пиковую мощность 86,4 кВт. Максимальный ток заряда батареи от зарядных источников питания автомобиля — 180 А. На автомобиле установлен трёхфазный электродвигатель с жидкостной системой охлаждения, развивающий максимальную мощность 80 кВт при крутящем моменте 275 Н·м. Максимальные обороты электродвигателя достигают 8 000 мин⁻¹. Редуктор привода обеспечивает суммарное передаточное отношение 6,645 [8].

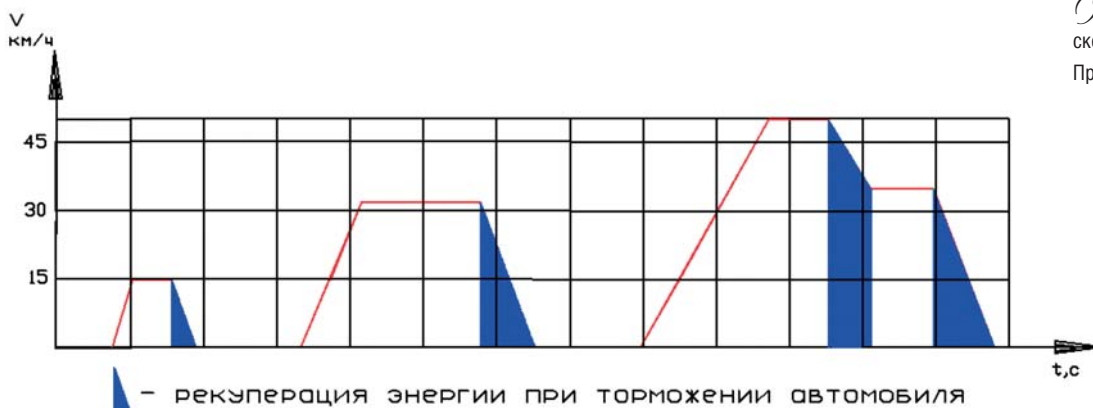


Рисунок 2. Городской испытательный цикл Правил № 83–05 ЕЭК ООН

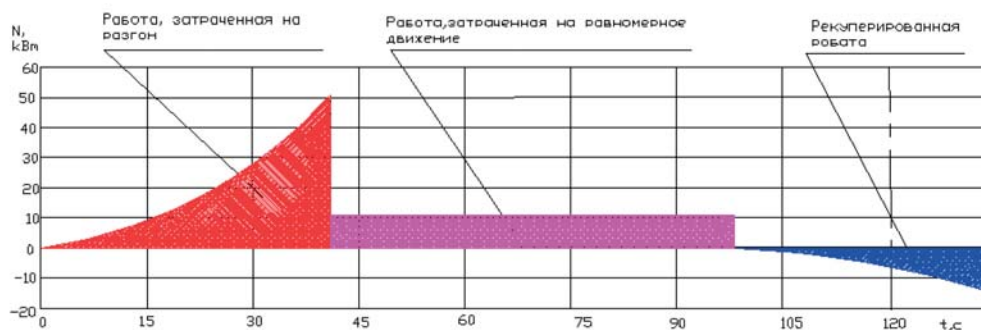


Рисунок 3. Баланс работ при движении электромобиля в городском цикле

Выполненные авторами статьи расчёты показывают, что до колёс традиционного автомобиля в городском цикле доходит не более 15 % общей выделенной энергии при сгорании топлива ($\eta \leq 0,15$). А общий КПД электропередачи в электромобиле составляет примерно 0,6 с учётом КПД тягового электродвигателя, КПД преобразователя и КПД аккумуляторной батареи. Следовательно, эффективность использования энергии электромобиля в четыре раза выше, чем у традиционного автомобиля, в городском цикле движения. Эти данные получены на основе расчёта энергопотребления автомобиля при движении его в городском цикле Правил № 83–05 ЕЭК ООН [9, 11]. Разница в расходе энергии объясняется меньшими потерями в электроприводе электромобиля и установкой системы рекуперации энергии на электромобиль.

Существенным недостатком электромобиля по отношению к транспортным средствам, использующим двигатель внутреннего сгорания, является то, что в зимний период энергия от аккумуляторных батарей у него расходуется на обогрев салона. Производители электромобилей для обогрева салона или устанавливают автономные топливные обогреватели, или используют электронагреватели. Требуемый на обогрев салона в зимний период расход энергии при электронагреве можно оценить косвенно, используя из теории ДВС данные теплового баланса по распределению энергии сгорания топлива. Эта энергия идёт на полезную работу ДВС, энергию, отводимую в систему охлаждения, и энергию, отводимую отработавшими газами.

$$Q_m = Q_e + Q_{\text{охл}} + Q_{\text{газ}},$$

где Q_m — количество теплоты, вводимой в двигатель с топливом; Q_e — полезная (эффективная) тепловая энергия ДВС; $Q_{\text{охл}}$ — количество теплоты, передаваемой охлаждающей жидкости; $Q_{\text{газ}}$ — потеря теплоты с отработавшими газами.

Теплота, используемая для обогрева салона автомобиля и идущая от системы охлаждения, в зависимости от режима работы ДВС составляет от 20 до 30 %

расходуемой энергии ДВС. В первом приближении можно сказать, что при пиковом значении отрицательных температур воздуха в зимних условиях она сопоставима с полезной энергией сгорания топлива. При этом надо учитывать, что у электромобиля на обогрев салона идёт энергия аккумуляторной батареи, а у традиционного автомобиля — это невозвратная энергия системы охлаждения ДВС. На электромобиле El Lada установлен жидкостной 4-киловаттный обогреватель [8]. При работе в режиме полной мощности в течение трёх часов он потребляет энергию 12 кВт·ч, что составляет половину запасаемой энергии аккумуляторной батареи.

Для повышения эффективности использования энергии на электромобилях применяют рекуперацию энергии торможения. Продолжительность поездки зависит от манеры езды водителя. Если часто использовать режим торможения, то установленная на автомобиле система рекуперирования энергии позволит более полно использовать запасаемую аккумуляторными батареями энергию.

Для сравнительных испытаний и оценки работы систем автомобиля Правилами № 83–05 ЕЭК ООН установлен городской цикл (рис. 2). При движении в городе электромобиль должен трогаться и разгоняться до определённой скорости, заданной характеристикой движения для автомобиля категории M_1 . Для выполнения испытательного цикла автомобиль должен обладать необходимой динамикой разгона с целью исключения возможности торможения городского транспортного потока в реальных условиях. В соответствии с Правилами № 83–05 ЕЭК ООН ускорение при разгоне должно быть порядка 1 м/с^2 . Разгон должен осуществляться до скорости 15, 30 и 50 км/ч. Замедление при торможении должно быть в интервале $0,5\text{--}1 \text{ м/с}^2$. При торможении происходит рекуперация энергии, и аккумулятор батареи заряжается. Выполненные авторами данной статьи расчёты показывают, что за время городского цикла рекуперированная энергия для автомобиля категории M_1 в процессе замедления может составлять 19 % от общей энергии движения по испытательно-

Таблица 1. Характеристики электромобилей [2, 3]

Электромобили*	Масса, снаряжённая — полная, кг	Мощность двигателя, N, кВт (Мк, Н-М)	Время разгона до 100 км/ч	Максимальная скорость, V, км/ч	Батареи, ёмкость, масса, кВт·ч	Запас хода на одной зарядке, км
Mitsubishi i-MiEV** (производство с 2006 года)	1 035 — 1 450	49 (180)	15,9	130	16 (Li-Ion), 330 В	130
Nissan Leaf E (производство с 2010 года, «Автомобиль года»)	1 525 — 1 965	80 (280)	11,9	144	24 (Li-Ion), 250 кг	175
Volvo C30 Electric (производство с 2012 года)	1 690 — 1 995	82 (230) 3-Phasen-Drehstrommotor	10,9	130	23 (Li-Ion), 280 В	150
Renault Fluence (производство с 2012 года)	1 605 — 2 025	70 (226) AS Synchron ≈	13	135	22 (Li-Ion), 398 В	185
Renault Zoe (производство с 2012 года)	1 390 —	60 (222) AS Synchron ≈	—	135	(Li-Ion), 400 В	160
Roll-Royce 102EX (презентация — 2012 год)	—	290 (800)	8	165	Li-nikel-cobalt manganese-oxide, 610 кг	200
Chevrolet Volt E (производство с 2011 года)	—	111	—	—	16 (Li-Ion) 9 модулей, 288 ак- кум. по 1,75 кг, Σвес = 198 кг	—
Volkswagen E-Up! (презентация — 2011 год)	—	40	—	135	18 (Li-Ion)	130
Audi EV (презентация — 2012 год)	—	55	—	120	17,3 (Li-Ion), DC/DC инвертор	140
E Lada (презентация — 2012 год)	1 250 — 1 610	60 (275)	14	130	23 DC/DC инвертор (литий-фосфат- железо), 270 кг	150

* Кроме электромобилей, приведённых в табл. 1, ведущие автомобильные компании разработали и сделали презентацию в журналах и каталогах следующих моделей: Citroën C-zero, Hyundai i 10EV, Opel Ampera E-REV, Peugeot iON, BMW, Mercedes-Bens [2].

** На Женевском автосалоне 2013 года был представлен электромобиль Mitsubishi CA-MiEV с батареей нового поколения и запасом хода 300 километров.



Рисунок 4. Размещение силовых агрегатов на полноприводном электромобиле

му циклу [9]. На рис. 3 приведены результаты расчёта баланса энергий при движении электромобиля по городскому циклу.

На рис. 4 показано размещение электродвигателей, аккумуляторных батарей и других силовых агрегатов на полноприводном электромобиле [2]. Электродвигатели расположены на ведущих осях, а аккумуляторная батарея — в центре автомобиля под днищем кузова для равномерной осевой нагрузки на автомобиль, что позволяет обеспечить развесовку по осям электромобиля 50:50. Справа у аккумуляторной батареи расположен воздухозаборник, который вместе с системой охлаждения обеспечивает необходимый температурный режим батареи.

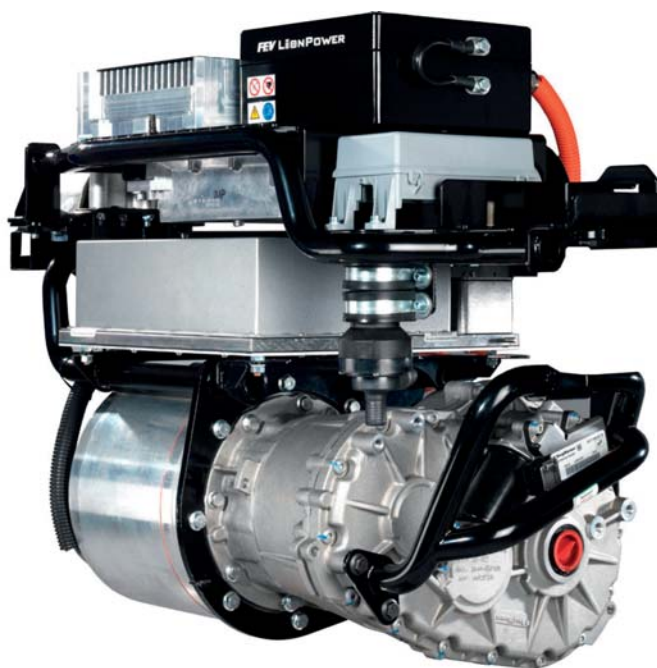


Рисунок 5. Электроустановка электромобиля

Энергоёмкость современных батарей достигает 27кВт·ч, срок службы — пять лет, число зарядно-разрядных циклов — 1 000, температурный диапазон эксплуатации — от -40 до +70 °С. Li-Ion-аккумуляторы накапливают энергию 100–200 Вт·ч на 1 кг собственной массы [4, 6]. Разработчики аккумуляторных энергоносителей в настоящее время продолжают активно совершенствовать литий-ионные и литий-полимерные аккумуляторы.

Удельная энергоёмкость литий-ионных аккумуляторов превышает энергоёмкость металлгидридных батарей (Ni-MH), которые нашли применение на гибридных автомобилях. Для безопасности в батареях используют не чистый литий, а соединения лития, так как его активность может спровоцировать перегрев батарей. Нормальный тепловой режим батареи в интервале 15–35 градусов поддерживает электронная система охлаждения. Для контроля уровня разрядки батареи на автомобиле установлена сигнализирующая система, которая предупреждает водителя о необходимости подзарядить аккумулятор.

На электромобилях в силовом приводе наибольшее распространение получили асинхронный электродвигатель переменного тока и электропривод с синхронным двигателем на основе постоянных магнитов. Отметим, что в настоящее время нет достоверной методики сравнительной оценки электродвигателей различных типов. Электропривод с синхронным двигателем на основе постоянных магнитов имеет некоторое преимущество в коэффициенте полезного действия и высоких удельных мощностных характеристиках. На электромобилях Volvo C30 Electric, Nissan Leaf E, Renault Fluence, Renault Zoe, El Lada использованы трёхфазные электродвигатели переменного тока [2, 3].

На рис. 5 представлена электроустановка электромобиля, состоящая из электромотора синхронного типа с постоянными магнитами мощностью 45 кВт, приводного редуктора и блока литий-ионных батарей энергоёмкостью 12 кВт·ч. Силовая установка



Рисунок 6. Мотор-колесо электромобиля: 1 — статор, 2 — опора вала, 3 — ротор, 4 — колесо

обеспечивает электромобилю пробег 80 км на одной зарядке при движении в городских условиях. Мощность энергоустановки позволяет развить электромобилю максимальную скорость 120 км/ч. На рис. 6 приведена конструкция приводного мотор-колеса электромобиля [2].

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Рассмотрим характеристики современных и перспективных аккумуляторных батарей, их достоинства и недостатки, а также направления их развития. Срок службы АБ составляет пять лет. Уже созданы аккумуляторные батареи, которые могут служить до десяти лет или обеспечить автомобилю 240 тысяч километров пробега. Для Li-Ion-аккумуляторов, если они не используются, характерен 5%-й саморазряд в течение месяца, число их рабочих циклов существенно зависит от разрядной мощности батарей [8]. Кроме того, после полной разрядки Li-Ion-аккумуляторы приходят в негодность. У никель-металлогидридной батареи (Ni-MH) этого не происходит — после полной разрядки она полностью восстанавливается. Но по энергоёмкости никель-металлогидридные уступают Li-Ion-аккумуляторам. Уже созданы системы зарядки батарей от обычной сети 220 В и разработан аккумулятор мощностью 70 кВт·ч, который позволяет увеличить дальность пробега автомобиля до 400 км, что практически сравнимо с бензиновыми машинами [2,10].

Одними из перспективных аккумуляторов, над которыми в настоящее время работают учёные, являются воздушно-литиевые батареи, способные обеспечить плотность энергии 1 500 Вт·ч на 1 кг массы. На такой 100-килограммовой батарее автомобиль мог бы проехать 500 км без подзарядки. Технология их ещё не проработана до окончательного производства. Ожидается, что новая батарея будет дешевле, чем используемые на электромобилях в настоящее время [4].

ВЫВОДЫ

На современном этапе развития передовых энергосберегающих технологий в автомобилестроении актуальность приобретает применение на транспорте электромобилей. Уже более десятка западных фирм активно работают в этом направлении и добились значительных результатов в разработке и производстве электромобилей. Это стало возможным благодаря созданию в последние годы быстрозаряжаемых литий-ионных аккумуляторных батарей и станций быстрой зарядки электромобилей.

Сравнительный анализ применения электромобилей и традиционных автомобилей в городских условиях эксплуатации показал более высокую эффективность применения электромобилей при эксплуатации их в городских условиях. Электромобиль по энергетической эффективности превосходит традиционный автомобиль в пять раз, но в зимних условиях его эффективность значительно ниже.

Разработчики аккумуляторных батарей и электромобилей продолжают совершенствовать силовые энергоустановки в направлении увеличения их энергоёмкости и, соответственно, запаса хода электромобиля, планируя получить показатели, не уступающие традиционным автомобилям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Эткин Д. М. Некоторые технико-экономические аспекты электрификации массовых автомобилей в США // Журнал автомобильных инженеров. — 2010. — № 2 (61).
2. Electric & Hybrid Vehicle Technology International. — January, 2011.
3. Automobil Revue: каталоги автомобилей. — 2006–2011.
4. Скрипко А. А. Электромобиль «Газель» на московском маршруте // Автомобильная промышленность. — 2012. — № 10.
5. Петров В. Ю. Легковой автотранспорт будущего: электромобили, водородные или традиционные автомобили? // Автомобильная промышленность. — 2009. — № 5.
6. Главная проблема электромобиля // Наука и техника автомобилестроения. Информационный обзор. — 2001. — № 48.
7. I Всероссийский форум по электротранспорту и зарядной инфраструктуре. Электромобиляда-2012: рекламный проспект. — М., 2012.
8. El Lada: рекламный проспект. — 2012.
9. Конструктивные схемы автомобилей с гибридными силовыми установками: учеб. пособие для вузов / С. В. Бахмутов, В. В. Селифонов, В. В. Ломакин и др. — М.: МГТУ «МАМИ», 2007.
10. Морозов С., Сальникова Е. Московский международный автомобильный салон — 2012 // Журнал автомобильных инженеров. — 2012. — № 5 (76).
11. Загарин Д. А., Шабанов А. В., Ломакин В. В., Шабанов А. А. Плюс-электропривод // Энергоэффективность и энергосбережение. — 2013. — № 9–10.