

УДК 539.3

## ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И ГИБРИДНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

В. Д. Мигаль, проф., д.т.н., В. Я. Двадненко, доц., к.т.н.,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

*Аннотация.* Представлен анализ преимуществ и недостатков тяговых электродвигателей следующих типов: вентильные электродвигатели, частотно управляемые асинхронные электродвигатели, электродвигатели постоянного тока с независимым возбуждением и постоянного тока с последовательным возбуждением.

*Ключевые слова:* электромобиль, гибридный автомобиль, электропривод, преимущества и недостатки.

## ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ І ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛІВ

В.Д. Мигаль, проф., д.т.н., В.Я. Двадненко, доц., к.т.н.,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* Подано аналіз переваг і недоліків електропривода таких типів: вентильні електродвигуни, асинхронні двигуни – частотно керовані, постійного струму із двигуном незалежного збудження та постійного струму із двигуном послідовного збудження.

*Ключові слова:* електромобіль, гібридний автомобіль, електропривід, переваги і недоліки.

## SELECTION OF ELECTRIC MOTORS FOR ELECTROMOBILES AND HYBRID VEHICLES

V. Migal, Prof., D. Sc. (Eng.), V. Dvadnenko, Assoc. Prof., Cand. Sc. (Eng.),  
Kharkiv National Automobile and Highway University

*Abstract.* An analysis of the advantages and disadvantages of traction motors of the following types: BLDC motors, variable frequency driven asynchronous motors, DC motors with separate excitation, DC motors with series excitation is presented.

*Key words:* electromobile, hybrid car, electric drive, advantages and disadvantages.

### Введение

Эксплуатация электромобиля в городских условиях характеризуется произвольным чередованием режимов разгона, торможения и движения с установившейся скоростью, преодоления подъемов и спусков, кратковременных стоянок (заторы, светофоры, перекрестки) и «случайной» нагрузки на систему тягового электропривода. В этих условиях электромобиль работает практически при постоянном изменении управляющего воздействия на системы автоматического регулирования (САР), которые взаимодействуют

с аккумуляторной батареей, преобразователями частоты и напряжения и с электрической машиной.

На рис. 1 приведены экспериментально снятые параметры движения электромобиля в городских условиях. САР позволяют уменьшить неблагоприятное воздействие на электромобиль переходных процессов и имеющихся нелинейных характеристик, обусловленных наличием ферромагнитных материалов в электродвигателе. Кроме того, возможность рекуперативного торможения с помощью электрической машины позволяет вернуть некоторую часть

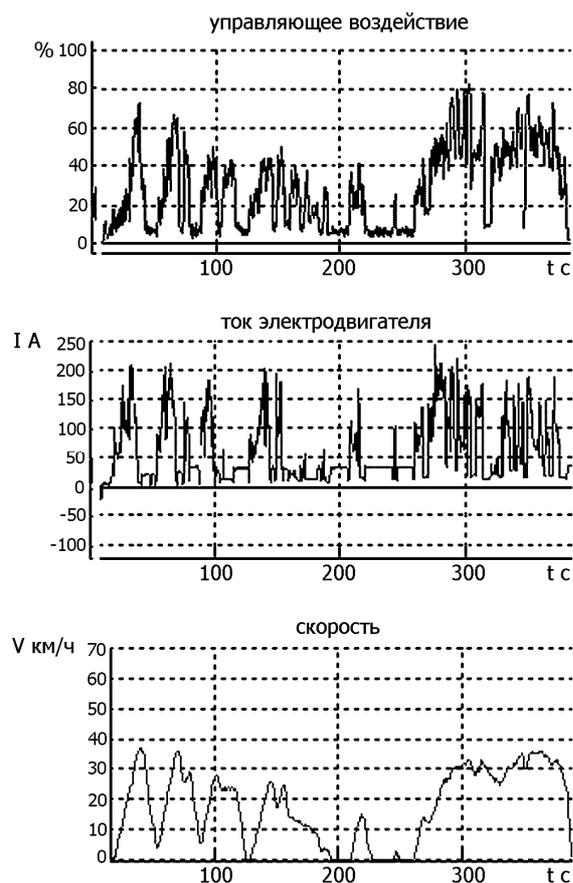


Рис. 1. Параметры движения электромобиля в городских условиях

энергии торможения в тяговый аккумулятор и существенно уменьшить как нагрев, так и износ тормозных колодок, тормозных дисков или тормозных барабанов.

### Анализ публикаций

Анализ существующих отечественных и зарубежных разработок показал [1–4], что практическое применение в электромобилях получили электроприводы следующих типов: вентильные электродвигатели (ВЭД), асинхронные частотно-управляемые (АЧУЭД), ЭД постоянного тока с независимым возбуждением (ПН) и ЭД постоянного тока с последовательным возбуждением (ПП). Сопоставление достоинств и недостатков этих двигателей с учетом эксплуатационных требований дает следующие результаты. Наиболее высокий КПД имеют ВЭД. КПД ЭД постоянного тока и асинхронных ЭД примерно равны, однако в последнее время АЧУЭД, имеющие электрические машины с малым скольжением и более точное электронное управление на основе специализированных быстрореагирующих микроконтроллеров с

набором соответствующих датчиков (векторное управление), достигают КПД, сравнимый с КПД ВЭД.

### Цель и постановка задачи

Целью исследования является выбор электропривода электромобиля или гибридного автомобиля, позволяющего получить заданные технические, экологические и эксплуатационные качества электромобиля. Методами исследований являются: анализ, сопоставление и обобщение.

### Выбор тягового электродвигателя для электромобиля и для гибридного автомобиля

Вентильные электродвигатели применяют в большинстве современных гибридных автомобилей и электромобилей. ВЭД представляет собой синхронную электрическую машину, снабженную датчиками положения ротора, запитываемую через инвертор на основе современных силовых электронных ключей и управляемую по оптимальным алгоритмам с помощью микроконтроллера с использованием минимум двух САР: по положению ротора и по предельному фазному току. Иногда добавляют САР по угловой скорости (круиз-контроль).

Синхронные электрические машины бывают с возбуждением от постоянных магнитов и с электромагнитным возбуждением. Наиболее широко применяют ВЭД на основе синхронной электрической машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами на роторе. Такие ВЭД имеют более высокий КПД и лучшие электрические характеристики. Однако они имеют высокую стоимость. Кроме того, недостатком таких ВЭД является малый диапазон скоростей вращения ротора. Поскольку скорость идеального холостого хода пропорциональна напряжению питания якоря и обратно пропорциональна магнитному потоку возбуждения ротора, для расширения скоростного диапазона, при невозможности управлять магнитным потоком, требуется увеличение напряжения питания.

Относительно недорогими и широко распространенными являются синхронные электрические машины с электромагнитным возбуждением, поскольку они применяются в качестве генераторов переменного тока, в

том числе и в качестве автомобильных генераторов. Именно этот тип электрических машин был выбран для изготовления ВЭД тягового электропривода базового автомобиля, переоборудованного в гибридный [5].

Несмотря на несколько худшие значения КПД, ВЭД на основе синхронной электрической машины с электромагнитным возбуждением, помимо невысокой стоимости, имеет ряд других важных преимуществ. Среди них – возможность организовать регулирование оборотов во второй зоне электродвигателя посредством управления потоком возбуждения. При фиксированном напряжении питания это позволяет расширить рабочий диапазон скоростей вращения ротора, а значит, увеличить передаточное число от ВЭД к ведущим колесам. В результате удаётся повысить пусковой вращающий момент и сохранить требуемую максимальную скорость. Вторым преимуществом использования ВЭД с электромагнитным возбуждением является существенно меньший тормозной момент в обесточенном состоянии, что улучшает накат гибридного автомобиля. Третье преимущество – возможность простого и эффективного управления ВЭД в режиме генератора путем регулировки сравнительно небольшого тока возбуждения. Четвертое преимущество – возможность работы без перенапряжения силовой электроники при угловой скорости, намного превосходящей угловую скорость идеального холостого хода. Такой режим необходим в гибридных автомобилях во время принудительного холостого хода ВЭД при движении автомобиля с помощью ДВС на высокой скорости. Действительно, ВЭД с постоянными магнитами имеет ЭДС вращения, пропорциональную угловой скорости, следовательно, ВЭД с постоянными магнитами должен иметь силовые ключи с рабочим напряжением, в 3–4 раза большим, чем напряжение тяговой батареи. Это приводит к существенному увеличению стоимости инвертора и снижению его КПД. В ВЭД с электромагнитным возбуждением при выключении тока обмотки возбуждения перенапряжение не возникает, поэтому рабочее напряжение ключей должно быть только примерно на 20 % выше рабочего напряжения тяговой батареи [6].

Следовательно, выбор параметров тяговых ЭД не может рассматриваться изолированно вне всей энергетической системы: аккумуля-

торная батарея – преобразователь-инвертор частоты – двигатель.

При проектировании тяговых электродвигателей используют различные критерии оптимальности, например: минимум стоимости, минимум массы, минимум проводниковых материалов, минимум потерь или максимум КПД, минимальные виброшумовые характеристики и др. Для тягового двигателя электромобиля или гибридного автомобиля критерием оптимальности могут быть минимальные потери, так как таким образом увеличивается пробег электромобиля в течение одного цикла разряда аккумуляторной батареи (АБ). Решающим критерием при выборе типа электропривода является наиболее полное использование энергии АБ. Электрическое торможение с рекуперацией энергии в АБ наиболее просто и эффективно достигается в ВЭД и ПН. В АЧУЭД осуществление этого режима затруднено, особенно в области низких частот вращения. В транспортных средствах с ПП рекуперацию не применяют.

Для оптимизации регулирования требуется возможность независимого изменения тока и потока ЭД. В полной мере такая возможность имеется в ПН, а также в ВЭД с электромагнитным возбуждением. В АЧУЭД независимое изменение тока и напряжения возможно в весьма ограниченных пределах, а в ПП связано с техническими трудностями. ВЭД и АЧУЭД имеют существенные преимущества по сравнению с ЭД постоянного тока, по массогабаритным показателям имеют существенно меньшую стоимость электрической машины, во много раз больший ресурс и надежность, практически не нуждаются в обслуживании, имеют возможность перехода двигателя в генераторный режим (режим рекуперативного торможения электромобиля). Однако СУ АЧУЭД по показателям регулирования может уступать СУ ВЭД и имеет пока более высокую стоимость. Несколько меньшую стоимость имеют СУ ПН и ПП, но у них более сложно осуществляется реверс. Наиболее сложным является выбор оптимальных параметров элементов тягового электродвигателя электромобиля. Критерием оптимальности служит, как правило, достижение максимального пробега  $L$  или максимальной полезной транспортной работы  $A = L \cdot m_n$ , где  $m_n$  – масса перевозимого груза, а также оптимизация закона регулирования ЭД с целью возврата возможно

большей части запасенной при разгоне электромобиля кинетической энергии в АБ в ходе электрического рекуперативного торможения. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором при работе от статического преобразователя частоты-напряжения сочетает достоинства наиболее простой тяговой электрической машины переменного тока с хорошими пусковыми и регулировочными свойствами двигателя постоянного тока. Для этого он должен быть спроектирован с соблюдением всех требований, предъявляемых к тяговым электрическим машинам: обеспечением защиты от воздействия окружающей среды, с современными подшипниками, не требующей замены или добавления смазки в течение 30000–50000 часов. Асинхронный двигатель позволяет практически полностью исключить техническое обслуживание в течение назначенного безопасного ресурса автомобиля. При питании электродвигателя от аккумуляторной батареи через преобразователь частоты и напряжения (инвертор) в выражении М/Р (минимальная масса/электромагнитная мощность) необходимо учитывать массу электронного блока и потери в этом блоке. Увеличение массы двигателя обычно не служит препятствием при проектировании электропривода электромобиля, так как масса двигателя обычно не превышает 2–5 % полной массы электромобиля и несоизмеримо меньше массы аккумуляторной батареи. КПД новых серий тяговых двигателей повышают по сравнению с выпускаемыми ранее двигателями за счет увеличения расхода меди и стали в том же объеме, уменьшения воздушного зазора в системе ротор–статор, повышения коэффициента заполнения пазов якоря медью. Дальнейшее совершенствование ТАБ, а также тягового электропривода позволит значительно улучшить технико-эксплуатационные характеристики электромобилей и обеспечит их широкое распространение.

### Выводы

Выбор электродвигателей для электромобилей и гибридных автомобилей должен рассматриваться с учетом всей энергетической системы и условий эксплуатации автомобиля. Тяговые коллекторные двигатели постоянного тока в новых разработках электромобилей и гибридных автомобилей не

применяют, поскольку их высокая стоимость и эксплуатационные недостатки не могут быть компенсированы несколько более низкой стоимостью силового электронного управляющего блока. По сравнению с ними ВЭД и АЧУЭД имеют значительные преимущества по массогабаритным показателям, КПД и затратам на техническое обслуживание.

### Литература

1. Косой Ю.М. Некоторые особенности проектирования асинхронных двигателей для электромобилей / Ю.М. Косой // Труды ВНИИЭМ. Вопросы проектирования и исследования специальных машин. – 1984. – Том 5. – С. 64–69.
2. Богдан Н.В. Троллейбус. Теория, конструирование, расчет / Н.В. Богдан, Ю.Е. Атаманов, А.И. Сафонов. – Минск: Ураджай, 1999. – 262 с.
3. Доржинкевич И.Б. Особенности применения тягового электродвигателя в системе электропривода электромобиля / И.Б. Доржинкевич, А.А. Максимчук, А.С. Ройтман // Труды ВНИИЭМ. Вопросы проектирования и исследования специальных машин. – 1984. – Том 5. – С. 70–75.
4. Гібридні автомобілі / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков та ін.; за заг. ред. О.В. Бажинова. – Х.: ХНАДУ, 2008. – 328 с.
5. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков, В.Я. Двадненко; за заг. ред. О.В. Бажинова. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 236 с.
6. Двадненко В. Я. Особенности двухзонного регулирования вентильного электропривода гибридного автомобиля / В. Я. Двадненко, С. А. Сериков // Перспективы развития автомобилей. Развитие транспортных средств с альтернативными энергоустановками: материалы 75-ой Международной научно-технической конференции ААИ 14.11–15.11.2011. – Тольятти, Россия. – 2011.

Рецензент: А.В. Бажинов профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 3 октября 2016 г.