

АВТОТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА

УДК 629.1.07

ЭЛЕКТРОПРИВОД ДЛЯ КОНВЕРСИОННОГО ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

**А.В. Бажинов, профессор, д.т.н., В.Я. Двадненко, доцент, к.т.н.,
Хаким Мауш, аспирант, ХНАДУ**

Аннотация. Рассмотрена концепция конверсии автомобиля с двигателем внутреннего сгорания и механической коробкой передач в гибридный. Предложены методика выбора параметров электропривода и простое техническое решение для достижения возможности эффективной работы ВЭД как в тяговом режиме, так и в режиме рекуперации.

Ключевые слова: гибридный автомобиль, тяговая аккумуляторная батарея, электропривод, вентильный электродвигатель.

ЕЛЕКТРОПРИВІД ДЛЯ КОНВЕРСІЙНОГО ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

**А.В. Бажинов, професор, д.т.н., В.Я. Двадненко, доцент, к.т.н.,
Хакім Мауш, аспірант, ХНАДУ**

Анотація. Розглянуто концепцію конверсії автомобіля з двигуном внутрішнього згорання і механічною коробкою передач у гібридний. Запропоновано методику вибору параметрів електропривода і простий технічний розв'язок для досягнення можливості ефективної роботи ВЕД як у тяговому режимі, так і в режимі рекуперації.

Ключові слова: гібридний автомобіль, тягова акумуляторна батарея, електропривід, вентильний електродвигун.

THE ELECTRIC DRIVE FOR A CONVERSION HYBRID CAR

**A. Bazhinov, Professor, Doctor of Engineering Science, V. Dvadnenko, Associate Professor,
Candidate of Engineering Science, Hakim Maouche, postgraduate, KhNAHU**

Abstract. The concept of converting a car with an internal combustion engine and manual transmission in a hybrid is regarded. Is regarded the technique of choosing the parameters of the electric and simple technical solution to achieve the efficient operation of the brushless electric motor in the traction mode and into recovery mode.

Key words: hybrid vehicle, traction battery, electric drive, the brushless electric motor.

Введение

Конверсионный гибридный автомобиль – это массово выпускаемый недорогой автомобиль с двигателем внутреннего сгорания (ДВС), дополненный электродвигателем, тяговой аккумуляторной батареей (ТАБ) и спе-

циальной системой управления, которая позволяет наиболее оптимально использовать возможности электропривода и ДВС. Такой путь модернизации автомобиля при сравнительно небольших затратах позволяет значительно уменьшить расход топлива, эксплуатационные расходы и вредные выбросы.

Гибридный автомобиль является для существующего в настоящее время уровня техники эффективным решением с точки зрения экономичности, экологической безопасности и эксплуатационных качеств. Особенно удачно сочетает лучшие качества электромобилей и автомобилей с ДВС гибридный автомобиль с внешней подзарядкой (Plug in Hybrid).

Анализ публикаций

В последние годы появилось достаточно большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей, посвященных гибридным автомобилям. Многие исследователи проявляют интерес к «гибридизации» серийных автомобилей. Аналитический обзор таких публикаций можно найти в [1].

На кафедре автомобильной электроники Харьковского национального автомобильно-дорожного университета разработана технология конверсии автомобиля с ДВС и механической коробкой передач в гибридный автомобиль.

В работах [2–4] рассматриваются особенности конструкции и результаты испытаний опытного образца этого гибридного автомобиля.

Цель работы

Настоящая работа посвящена дальнейшей систематизации и обобщению опыта разработки тягового электропривода для силовой установки гибридного автомобиля.

Разработка концепции электропривода для гибридного автомобиля

Результаты теоретических и экспериментальных исследований [2, 3] показывают, что оснащение серийного автомобиля дополнительным тяговым электроприводом и накопителем энергии в виде ТАБ с возможностью подзарядки от сети позволяет значительно сократить расход топлива, повысить экологическую безопасность, а также существенно облегчить процесс управления в городском цикле движения путем соответствующего выбора привода на ведущие колеса либо от ДВС, либо от электродвигателя. Однако из-за сравнительно малого количества энергии в ТАБ такого гибридного автомобиля целесо-

образно, с одной стороны, использовать относительно небольшой вклад электрической энергии в общую энергию, расходуемую при движении; с другой стороны, необходимо максимально использовать новые возможности, появляющиеся при такой конверсии. К таковым относятся возможность рекуперации энергии и возможность замены торможения ДВС в режиме принудительного холостого хода (ПХХ) на торможение электродвигателем. Торможение электродвигателем выгодно отличается от торможения ДВС в режиме ПХХ тем, что допускает простое включение и выключение, позволяющее максимально использовать для движения автомобиля его кинетическую и потенциальную энергию. Следовательно, применяя электропривод, целесообразно исключить относительно маломощные и неэкономичные режимы работы ДВС: холостой ход, старт с места, медленное перемещение. Разгон автомобиля с использованием электропривода должен осуществляться только до некоторой, относительно небольшой, скорости. По её достижении необходимо автоматически запустить ДВС, и дальнейшее движение производить в обычном режиме. При снижении скорости – выключать ДВС и тормозить электродвигателем. При этом необходимо обеспечить эффективное торможение, в том числе с возвратом электроэнергии в ТАБ, независимо от степени заряженности ТАБ. Полезной оказывается и возможность подзарядать при необходимости ТАБ вентильным двигателем в режиме генератора во время движения на ДВС, когда последний мало нагружен. Очевидно, что управление режимами работы гибридной силовой установки и переход с одного режима на другой должны осуществляться системой автоматического управления. Для водителя процесс управления гибридным автомобилем не должен быть сложнее, чем управление обычным автомобилем.

Управление тягово-скоростными, а также тормозными режимами и, кроме того, процессом зарядки-разрядки ТАБ осуществляется соответствующими электронными блоками. Выбор компонентов, схемотехника и параметры всех узлов электропривода гибридного автомобиля должны удовлетворять различным, часто противоречивым требованиям. Эффективность гибридной силовой установки в значительной степени определяется качеством управления электроприводом

на различных режимах его функционирования. Некоторые особенности такого управления исследуются в данной работе.

При конверсии автомобиля с ДВС в гибридный автомобиль возникает необходимость установить компактный и достаточно мощный тяговый электродвигатель, не удаляя ДВС. Применение широко распространенных тяговых коллекторных электродвигателей постоянного тока из-за их больших габаритов и в связи с проблемами коллекторно-щеточного узла является нецелесообразным. Кроме того, качественный коллекторный тяговый электродвигатель имеет высокую стоимость. Наименьшими габаритами и наибольшим КПД при заданной мощности обладают современные вентильные электродвигатели (ВЭД), которые применяют в большинстве современных гибридных автомобилей. 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.

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 малодоступны и 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 конвертируемого автомобиля.

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 без увеличения запаса мощности ВЭД. Вторым преимуществом использования ВЭД с электромагнитным возбуждением является существенно меньший тормозной момент в обессточенном состоянии, что улучшает накат гибридного автомобиля. Третье преимущество – возможность эффективного управления ВЭД в режиме генератора путем регулировки тока возбуждения.

Рассмотрим, как наиболее рационально использовать имеющиеся преимущества ВЭД с электромагнитным возбуждением.

В качестве тяговых ВЭД используют синхронные машины, включенные по схемам с достаточно малым межкоммутационным периодом. Это относится и к выбранной нами трехфазной схеме с реверсивным питанием. Для таких ВЭД может быть использована стандартная модель электропривода постоянного тока в предположении бесконечно малого межкоммутационного периода, без учета реакции якоря на магнитный поток возбуждения и без учета индуктивности фазных обмоток якоря [4]. В этом случае имеем

$$I = \frac{U - E}{R}, \quad E = k\Phi\omega, \quad (1)$$

где I – ток, потребляемый ВЭД; U – напряжение питания якоря (статора); E – ЭДС вращения; k – конструктивный параметр двигателя; Φ – магнитный поток возбуждения; ω – угловая скорость вращения ротора ВЭД; R – суммарное активное сопротивление цепи якоря. Электромагнитный момент ВЭД

$$M = k\Phi I. \quad (2)$$

При оговоренных допущениях уравнение механической характеристики ВЭД имеет вид

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2}. \quad (3)$$

Как видно из выражения (1), ток может быть положительным (режим электродвигателя) или отрицательным (режим генератора). Рассмотрим, какая необходима мощность электродвигателя для разгона до выбранной скорости [5]. Сила сопротивления качению автомобиля

$$P_f = fmg \cos \alpha,$$

где m – масса автомобиля; g – ускорение свободного падения; f – коэффициент трения качения; α – угол уклона дороги. Скатывающая сила при наличии уклона дороги рассчитывается по формуле

$$P_\alpha = mg \sin \alpha.$$

Сила аэродинамического сопротивления

$$P_v = S v^2 c_x \rho / 2,$$

где S – площадь фронтальной проекции автомобиля m^2 ; v – скорость движения автомобиля m/c ; ρ – плотность воздуха kg/m^3 ; c_x – коэффициент аэродинамического сопротивления. Произведение суммы сил, действующих на автомобиль, на его скорость равно мощности на колесах автомобиля. График зависимости максимальной скорости автомобиля от мощности двигателя для автомобиля «Таврия» приведен на рис. 1.

Кривая 1 соответствует горизонтальному участку дороги, кривая 2 – подъему 2 % и кривая 3 – подъему 5 %. Из этого графика видно, что относительно малая мощность двигателя требуется примерно до 30–40 км/ч. Для достижения такой скорости необходима мощность около 4 кВт на колесах автомобиля. Такую мощность может обеспечить вентильный двигатель на основе недорогого и доступного автомобильного генератора Г290, представляющего собой синхронную электрическую машину с электромагнитным возбуждением. Максимальный продолжитель-

ный ток для Г290 равен 150 А, кратковременно – до 200 А. С учетом КПД вентильного двигателя 90 % и КПД трансмиссии 95 % потребляемая мощность от ТАБ должна быть около 4,7 кВт. Следовательно, при токе 150 А напряжение ТАБ должно быть не менее 31,2 В. Выберем для ТАБ литий-ионные железофосфатные аккумуляторы (LiFePO₄/LiFeYPO₄) WB-LYP100АНА с емкостью 100 Ач. Такой выбор обусловлен высокой удельной емкостью, возможностью 80 % разряда, большими токами разряда, возможностью быстрого заряда и очень большим числом циклов заряд-разряд. По совокупности параметров они существенно превосходят свинцовые аккумуляторы. Чтобы иметь некоторый запас по напряжению, используем 12 банок с напряжением 3,2 В каждая, в сумме – 38,4 В. ВЭД в этом случае будет иметь долговременную мощность двигателя 5,2 кВт и кратковременную – 6,9 кВт. Этого достаточно, чтобы достичь указанной выше скорости. Движение с более высокими скоростями будет осуществляться за счет ДВС гибридного автомобиля. Скорость перехода на движение с помощью ДВС может быть меньше или больше, в зависимости от состояния покрытия и уклона дороги.

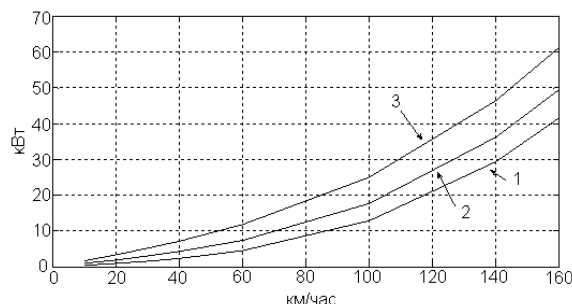


Рис. 1. Зависимость максимальной скорости автомобиля от мощности двигателя

Как было показано в работе [4], наиболее выгодно выбирать максимально возможное передаточное число от вала электродвигателя к колесам, ограниченное только максимально допустимыми оборотами электродвигателя. При этом требуемые момент и угловую скорость можно обеспечивать как за счет регулирования напряжения питания U с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в первой зоне, так и за счет изменения Φ – магнитного потока возбуждения во второй зоне. Магнитный поток меняется путем ШИМ-регулирования тока обмотки возбуждения. Для синхронной электрической

машины Г290 обороты холостого хода составляют 1900 об/мин при напряжении питания 38,4 В и максимальном магнитном потоке (ток возбуждения 4 А). С передаточным числом от вала ВЭД к колесам $i = 8$ это соответствует скорости автомобиля «Таврия» около 23 км/ч. Более высокая скорость, как следует из выражения (3), будет достигаться при переходе в область регулирования во второй зоне. При таком регулировании для достижения скорости 40 км/ч ток возбуждения должен снижаться примерно до 2 А. Как показано в работе [4], для наилучшего соответствия положения педали акселератора тяге электродвигателя необходимо регулирование как в первой, так и во второй зоне осуществлять с токовой петлей обратной связи.

Поскольку в гибридном автомобиле используется и тяговый, и генераторный режим ВЭД, необходимо правильно выбрать U – величину напряжения ТАБ. Как было показано выше, для достижения требуемой мощности электродвигателя необходимо питающее напряжение U не менее 38,4 В. С другой стороны, для более эффективного использования запасенной кинетической энергии желательно, чтобы процесс рекуперационного торможения происходил до достаточно низких скоростей автомобиля (низких значений ω). Последнему требованию наоборот, как видно из (1), удовлетворяет низкое значение напряжения ТАБ. Для устранения этого противоречия применяют схемы бустерного преобразователя постоянного напряжения, как, например, сделано в автомобиле «Тоёта Приус» [1]. Однако такой путь дорог и связан с потерями в преобразователе. Для конверсионного гибридного автомобиля было применено другое техническое решение, а именно – деление ТАБ на две одинаковые секции, которые для работы в тяговом режиме соединяются последовательно, а для работы в режиме рекуперации – параллельно.

На рис. 2 приведена функциональная схема электропривода гибридного автомобиля с применением такого технического решения.

Две последовательные сборки по 6 банок при параллельном включении имеют при заряде максимальное напряжение 24 В (т.к. максимально допустимое напряжение одной банки в режиме заряда – 4,0 В).

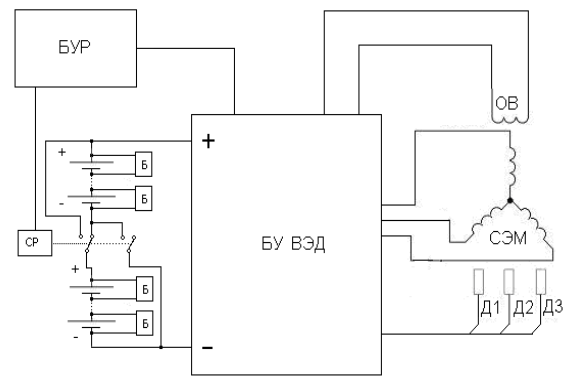


Рис. 2. Функциональная схема электропривода гибридного автомобиля: БУ ВЭД – блок управления ВЭД, СЭМ – синхронная электрическая машина, ОВ – обмотка возбуждения, Д1 – Д3 – датчики положения ротора, Б – балансир банки литий-ионного аккумулятора, СР – силовое реле

В режиме генератора Г290 обеспечивает напряжение 24 В при нулевом токе при 1350 об/мин, максимальный ток 150 А при 24 В – при 2260 об/мин. Дальнейшее повышение оборотов позволяет обеспечивать те же 24 В и 150 А с уменьшенным значением тока обмотки возбуждения. С передаточным числом от вала ВЭД к колесам $i = 8$ 2260 об/мин соответствует скорости автомобиля «Таврия» 27,4 км/ч, а 1350 об/мин – 16,3 км/ч. Таким образом, для торможения с высокой скорости до 27,4 км/ч можно использовать полную мощность генератора, которая, с учетом КПД генератора, позволяет отбирать с колес автомобиля механическую мощность до 6 кВт. Снижение скорости с 27,4 км/ч до 16,3 км/ч также позволяет тормозить ВЭД в режиме генератора, но на этом интервале скоростей отбираемая от колес мощность снижается с 6 кВт до нуля. Такое торможение в описываемом гибридном автомобиле применяется при нейтральной передаче КПП вместо торможения ДВС в режиме принудительного холостого хода, включается вместе со стоп-сигналом, при малом ходе педали тормоза и еще не работающих штатных тормозах. Следовательно, кинетическая и потенциальная энергии автомобиля максимально будут использованы либо для движения накатом (когда педаль акселератора отпущена, а педаль тормоза не нажата), либо для рекуперации. Действительно, при таком торможении со скорости 60 км/ч до 27,4 км/ч кинетическая энергия автомобиля снизится со 125 кДж до 26 кДж. Снижение составляет 79 %

от начальной кинетической энергии. На интервале скоростей от 27,4 км/ч до 16,3 км/ч с помощью ВЭД можно погасить еще 7 % первоначальной энергии, что в сумме составит 86 %. Для остановки автомобиля при низких скоростях водитель просто будет давить сильнее на педаль тормоза и задействует штатную тормозную систему, которая израсходует оставшуюся часть энергии. Естественно, при экстренном торможении существенно большая часть энергии будет рассеяна механической тормозной системой автомобиля. Даже если ТАБ окажется полностью заряженной, энергию, вырабатываемую ВЭД в режиме генератора, можно будет использовать для поддержания теплового баланса ДВС и продолжать также эффективно тормозить ВЭД. Появляющаяся возможность безопасного движения накатом, в том числе в горных условиях, является использованием кинетической и потенциальной энергии с минимальными потерями. Такое использование кинетической и потенциальной энергии более выгодно, чем преобразование их в электрическую энергию и сохранение последней в аккумуляторе.

Выводы

В работе рассмотрен один из вариантов конверсии автомобиля с ДВС и механической коробкой передач в гибридный. Предложены методика выбора параметров электропривода и простое техническое решение для достижения возможности эффективной работы ВЭД как в тяговом режиме, так и в режиме рекуперации. Обоснована возможность более эффективного использования не только химической энергии углеводородного топлива и электрической энергии, имеющих на борту автомобиля, но и появляющихся во время движения автомобиля кинетической и потенциальной энергии, в том числе с мини-

мальными потерями для движения автомобиля накатом.

Литература

1. Бажинов О.В. Гібридні автомобілі / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков та ін. – Харків: ХНАДУ, 2008. – 327 с.
2. Бажинов А.В. Система управления гибридной силовой установки с тяговым электроприводом на базе вентильного двигателя с электромагнитным возбуждением / А.В. Бажинов, В.Я. Двядненко, С.А. Сериков // Вісник СНУ імені Володимира Даля. – 2010. – №7 (149). – С.61 – 66.
3. Бажинов А.В. Повышение экономичности и экологической безопасности транспортных средств с гибридными силовыми установками / А.В. Бажинов, В.Я. Двядненко, С.А. Сериков // Наукові нотатки (за галузями знань «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство»): міжвуз. зб. наук. пр. Луцького національного технічного університету. – 2010. – Вип. 28. – С. 40–45.
4. Двядненко В.Я. Двухзонное управление тяговым вентильным электроприводом гибридного автомобиля / В.Я. Двядненко, С.А. Сериков // Труды ЛО МАИ, Науч. журн. – 2011. – №1(23). – С. 23–28.
5. Мацкерле Ю. Современный экономичный автомобиль / Ю. Мацкерле. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.

Рецензент: О.Я. Никонов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 08 мая 2012 г.