

УДК 629.3+504

А.В.Бажинов, В.Я.Двадненко, С.А.Сериков

Харковский национальный автомобильно-дорожный университет

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ГИБРИДНЫМИ СИЛОВЫМИ УСТАНОВКАМИ

*В работе рассмотрены вопросы расчета гибридной силовой установки для легкового автомобиля с ДВС и электродвигателем. Предлагаются методики вычислительных экспериментов с соответствующими математическими моделями. Показаны результаты конверсии автомобиля с ДВС и механической коробкой передач в гибридный автомобиль.*

Ключевые слова *гибридный автомобиль, гибридная силовая установка, вентильный электрический двигатель, аккумуляторные батареи, система управления.*

Постановка проблемы. Перспективным направлением решения задачи повышения экологической чистоты и экономичности транспортных средств (ТС) на сегодняшний день считается применение гибридных силовых установок (ГСУ). Такая силовая установка включает в себя, помимо основного двигателя внутреннего сгорания (ДВС), вспомогательный двигатель и контур рекуперации энергии. Вспомогательным двигателем выступает, как правило, электродвигатель. Контур рекуперации энергии состоит из генератора, аккумуляторной батареи, преобразователя напряжения, инвертора и т.д.

Основным достоинством ГСУ является ее способность поддерживать наиболее экономичный и экологически безопасный режим работы ДВС на большинстве тягово-скоростных режимов ТС, либо, в течение некоторого времени, обеспечивать движение без использования ДВС. Другим важным достоинством является способность аккумулировать излишки кинетической энергии ТС при торможении или потенциальной энергии при движении под уклон, что оказывается очень выгодным в городском цикле движения [1].

Эффективность работы ГСУ в значительной степени определяется характеристиками ее системы управления, обеспечивающей управление перераспределением потоков мощности между ходовой частью автомобиля, основным двигателем, вспомогательным двигателем и контуром рекуперации энергии.

Автомобили с ГСУ способны обеспечить выполнение требований наиболее жестких экологических стандартов. При этом затраты топлива снижаются на 10...80%, а выбросы в атмосферу токсичных компонентов отработавших газов на 20...90% без ухудшения тягово-скоростных характеристик автомобиля.

При проектировании новых гибридных транспортных средств возникает сложная проблема научного обоснования базовых параметров и характеристик ГСУ. Для решения данной проблемы могут использоваться методики, основанные на проведении вычислительных экспериментов с соответствующими математическими моделями. При этом проведение сравнительного анализа различных конструктивных решений не представляется возможным без оптимизации алгоритмов управления как ГСУ в целом, так и составляющих ее отдельных агрегатов на различных тягово-скоростных режимах [2, 3].

Общая характеристика и полученные результаты исследований. Разработаны методы структурной и параметрической идентификации математических моделей гибридных автомобилей с параллельной и последовательно-параллельной схемами построения ГСУ, моделей отдельных агрегатов силовой установки гибридного автомобиля, а также математических моделей задающих и возмущающих воздействий.

При получении математической модели ДВС используется аппроксимация его скоростных характеристик и показателей токсичности отработавших газов при помощи искусственной нейронной сети. Данный подход оказывается особенно эффективным в условиях высокой стоимости экспериментальных данных, их ограниченного количества, высокой зашумленности, неполноте, а часто и противоречивости. Модели на основе искусственных нейронных сетей выборочно чувствительны в областях сосредоточения данных и дают гладкую интерполяцию в других областях. Достоинствами предложенного подхода можно считать простоту настройки

модели на конкретный тип двигателя при использовании экспериментально полученных скоростных или нагрузочных характеристик и невысокий уровень сложности.

В настоящее время в качестве тягового электропривода ГСУ часто применяют вентильный двигатель (ВД) – систему регулируемого электропривода, состоящую из электродвигателя переменного тока, конструктивно подобного синхронной машине, вентильного преобразователя и устройства управления, обеспечивающего коммутацию цепей обмоток статора в зависимости от углового положения ротора. Полученная математическая модель ВД позволяет исследовать особенности его работы в составе ГСУ как в двигательном, так и в генераторном (рекуперация энергии) режиме, в том числе оптимизировать управление вектором тока статора. В качестве критерия оптимизации выступает минимум полного тока потребления ВД в статическом режиме при заданном моменте вращения. Математическая модель позволяет исследовать ВД в том числе и в зоне использования «ослабления поля» [4].

В роли накопителя энергии контура рекуперации ГСУ чаще всего выступают электрохимические источники тока – тяговые аккумуляторные батареи (ТАБ). Имеется большое количество типов аккумуляторов, пригодных для использования в ТАБ. Однако ни один из этих типов в полной мере не отвечает всем требованиям, предъявляемым к ТАБ, и не существует однозначного критерия выбора оптимального аккумулятора. В настоящее время большинство производителей гибридных автомобилей отдают предпочтение никель-металлогидридным аккумуляторным батареям (NiMH), которые имеют хорошие удельные показатели, зарядно-разрядные характеристики и приемлемый срок службы. Перспективными для использования в тяговом электроприводе считаются аккумуляторы на основе лития (литий-ионные, в частности литийфосфатжелезные). Их широкое внедрение в настоящее время сдерживает ряд нерешенных технологических проблем и высокая стоимость. Математическая модель ТАБ, предложенная для использования при моделировании контура рекуперации ГСУ, пригодна для исследования влияния конструктивных особенностей ГСУ и режима движения ТС на энергетический баланс силовой установки. К ее достоинствам можно также отнести простоту параметрической идентификации по результатам экспериментальных исследований конкретного типа ТАБ.

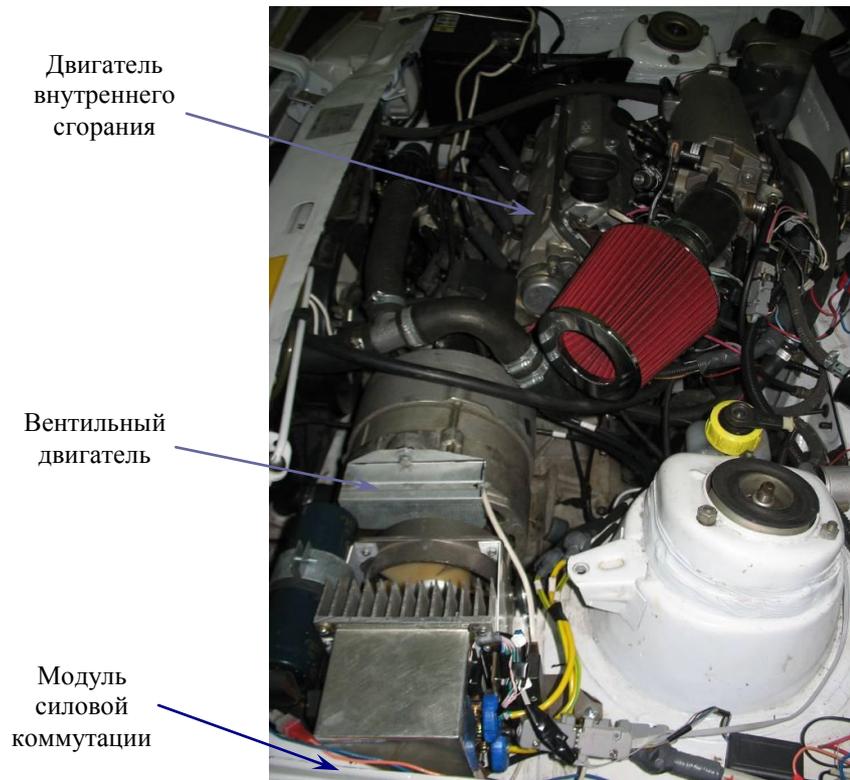
Для предложенного семейства математических моделей ГСУ разработаны методы формализации и решения оптимизационной задачи синтеза управляющих воздействий. Эти методы определяют формирование критериев качества управления, способы учета ограничений на управляющие воздействия и элементы вектора состояния, способы решения оптимизационной задачи с учетом особенностей ГСУ как объекта управления.

При этом модель задающих воздействий определяется выбранным стандартным ездовым циклом движения, а модель возмущений – характером рельефа опорной поверхности и аэродинамическим сопротивлением. Экспериментальные исследования. С целью подтверждения полученных теоретических результатов создан экспериментальный гибридный автомобиль с ГСУ параллельного типа на базе переднеприводного автомобиля «Таврия-пикап» с механической коробкой переключения передач (КПП). На рис.1 – рис.5 показаны основные элементы данного гибридного автомобиля. В качестве вспомогательного двигателя ГСУ применён оригинальный ВД с электромагнитным возбуждением [5]. Данный двигатель имеет ряд конструктивных и технико-эксплуатационных преимуществ по сравнению с традиционными ВД, среди которых возможность управления магнитным потоком ротора на высоких оборотах. Данная возможность позволяет обеспечить расширенный диапазон рабочих скоростей электропривода с высоким КПД без существенного увеличения напряжения ТАБ. Другим достоинством разработанного ВД является отсутствие дополнительного момента сопротивления на холостом ходу, который характерен для традиционных ВД с возбуждением от расположенных на роторе постоянных магнитов. В качестве накопителя энергии ГСУ используются герметизированные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи с обездвиженным электролитом, что объясняется в первую очередь их низкой стоимостью. Таким образом, рассматриваемый автомобиль относится к так называемым подзаряжаемым гибридам. Кроме того, подзарядка ТАБ происходит в процессе рекуперативного торможения или в случае движения под уклон, а также возможна от работающего в генераторном режиме тягового электродвигателя в процессе равномерного движения автомобиля, когда ДВС мало нагружен.

В процессе подзарядки аккумуляторной батареи от электрической сети предусмотрена возможность подогрева охлаждающей жидкости в системе охлаждения ДВС к моменту выезда.



Рис.1. Экспериментальный гибридный автомобиль



Двигатель  
внутреннего  
сгорания

Вентильный  
двигатель

Модуль  
силовой  
коммутации

Рис.2. Гибридная силовая установка



Рис.3. Размещение тяговой аккумуляторной батареи



Рис.4. Система управления гибридной силовой установкой



Рис.5. Установка вентильного двигателя

Разработанная микропроцессорная система управления силовой установкой экспериментального гибридного автомобиля не только обеспечивает управление всеми агрегатами ГСУ на задаваемых тягово-скоростных режимах, но и позволяет в исследовательских целях задавать тактику управления перераспределением потоков мощности между ДВС, электроприводом и контуром рекуперации энергии, а также осуществлять постоянный мониторинг основных параметров ГСУ.

Кинематическая схема ГСУ обеспечивает сохранение всех свойств автомобиля-прототипа и при выключении электропривода не накладывает никаких ограничений на движение с использованием ДВС.

Предварительные результаты пробной эксплуатации конвертированного экспериментального гибридного автомобиля позволяют сделать вывод о том, что применение ГСУ при движении в городских условиях обеспечивает экономию топлива до 50% и более по сравнению с автомобилем-прототипом. При высокой плотности транспортного потока и движении в пробках тягово-скоростной режим обеспечивается в основном за счет электротяги без включения ДВС. При этом рычаг КПП находится в нейтральном положении и автомобиль с механической КПП приобретает все преимущества автомобиля с автоматической коробкой. Вместе с тем, сохранение механической коробки передач оказывается чрезвычайно выгодным при экстремальных условиях движения.

Практическая значимость исследований. Внедрение в практику проектирования гибридных транспортных средств созданной методики синтеза систем управления ГСУ позволит обеспечить высокие эксплуатационные показатели автомобилей в заданных условиях.

Использование разработанных методов математического моделирования и созданного программного обеспечения позволит проводить исследования влияния различных конструктивных и мощностных параметров ГСУ на эксплуатационные свойства автомобиля, что позволит существенно сократить сроки разработки новых конструкций и объем отладочных испытаний за счет выбора наиболее эффективных технических решений еще на ранней стадии проектирования.

Опыт создания экспериментального гибридного автомобиля может оказаться полезным при разработке технологии конверсии серийных автомобилей эконом класса в гибридные с целью повышения их экономичности, экологической безопасности и удобства эксплуатации.

Применение разработанного вентильного двигателя с электромагнитным возбуждением позволит улучшить технико-эксплуатационные показатели тягового электропривода гибридного автомобиля и уменьшить его стоимость.

1. Бажинов О.В., Смирнов О.П., Сериков С.А., Гнатов А.В., Колесников А.В. Гібридні автомобілі. - Харків, ХНАДУ, 2008. – 327 с.
2. Сериков С.А., Бороденко Ю.Н. Гибридная силовая установка автомобиля как объект управления // Автомобильный транспорт: Сб. научн. тр. – Харьков: ХНАДУ. – 2009. – Выпуск 24. – С. 15 – 19.
3. Sergey A. Serikov. Synthesis of Optimal Control of Hybrid Engine Unit. // Journal of Automation and Information Sciences. Begell House, Inc. (USA) '2009, volume 41, issue 3. – Pages 71-81.
4. Сериков С.А. Управление вектором тока тягового вентильного электродвигателя силовой установки гибридного автомобиля: Сб. научн. тр. – Харьков: ХНАДУ. – 2009. – Выпуск 25. – С. 127–133.
5. Бажинов А.В., Двадненко В.Я., Колесников А.В. Разработка тягового электропривода гибридного автомобиля // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник/ АДІ ДонНТУ. – С. 94-98.