
**СУЧАСНІ СИСТЕМИ ПРОМИСЛОВОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДА**

MODERN ELECTRIC DRIVE SYSTEMS

УДК 629.113.066

К СОЗДАНИЮ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ**В. Б. Клепиков, Ю. Н. Кутовой, Д. А. Пшеничников**Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина. E-mail: pshenich_dm@mail.ru

Рассмотрена совокупность мехатронных систем и подсистем автомобиля как функциональной основы при разработке мехатронных систем электроавтомобиля. Определены признаки соответствия терминов «электропривод» и «мехатронная система». Указаны основные принципы и особенности создания силового электропривода и других электроприводов электроавтомобилей как современных мехатронных систем.

Ключевые слова: мехатроника, электропривод, электроавтомобиль, микропроцессорное управление.

ДО ПОБУДОВИ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ**В. Б. Клепиков, Ю. М. Кутовой, Д. О. Пшеничников**Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"
вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна. E-mail: pshenich_dm@mail.ru

Розглянуто сукупність мехатронних систем і підсистем автомобіля як функціональної основи при розробці мехатронних систем електроавтомобіля. Визначено ознаки відповідності термінів «електропривод» і «мехатронна система». Визначено основні принципи й особливості створення силового електропривода й інших електроприводів електроавтомобілів як сучасних мехатронних систем.

Ключові слова: мехатроніка, електропривод, електроавтомобіль, мікропроцесорне керування.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Настоящее исследование вызвано прежде всего всевозрастающим интересом специалистов-электроприводчиков к созданию электроприводов электроавтомобилей и их стремлением использовать для этой цели большой опыт разработки современных электроприводов, в том числе в области автономных средств движения: электрокаров, рудничных электровозов и др.

Вторым побудительным мотивом явилось положительное отношение ряда кафедр ВУЗов Украины к открытию на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы» (АЭМС) НТУ «ХПИ» специализации «Компьютеризованные системы электроавтомобилей», а также их усилия по открытию подготовки специалистов в области электроавтомобилестроения в своих учебных заведениях.

И, наконец, участие кафедры АЭМС НТУ «ХПИ» в международном проекте по развитию обучения в области мехатроники по программе TEMPUS MPRAM, в которой принимают участие ВУЗы из Франции, Чехии, Болгарии и России, показало, что именно электроприводчикам, имеющим основательную подготовку по промышленной электронике, электрическим машинам, микропроцессорной технике, теории автоматического управления, целесообразно активно включиться в неотвратимый процесс перехода в автомобилестроении от двигателей внутреннего сгорания к автоматизированному электроприводу.

В этом убеждает опыт Института электродинамики НАН Украины, где успешно созданы электроприводы не только на базе автомобилей, но и для ряда других автономных средств движения [1].

В современном автомобиле имеется более 30 электроприводов различного назначения. Специфика электроавтомобиля как автономного средства передвижения требует мехатронного подхода при разработке и создании его электроприводов. Это значит, что помимо решения традиционных схематехнических задач, расчетов и выбора полупроводниковых и электромеханических преобразователей,

передаточных механизмов, синтеза системы автоматического регулирования, программирования микропроцессоров, тепловых расчетов, необходимо стремиться объединить составные части электропривода, насколько это возможно, в едином конструктиве с рабочим органом.

Естественно, что функциональное назначение многих мехатронных узлов автомобиля сохранится и в электроавтомобиле.

Целью настоящей статьи является представление для заинтересованных специалистов-электроприводчиков систематизированного обзора по основным мехатронным системам автомобилей, выполненного при подготовке лекционных курсов по новой специализации, а также по техническим решениям силовых систем электропривода электроавтомобилей, которые, несомненно, будут совершенствоваться в процессе их развития.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В [2] дано определение мехатроники как новой области науки и техники, посвященной созданию и эксплуатации машин и систем с компьютерным управлением движением, которая базируется на знаниях в области механики, электроники и микропроцессорной техники, информатики и компьютерного управления движением машин и агрегатов. В данном определении особо подчеркнута триединая сущность мехатронных систем, в основу построения которых заложена идея глубокой взаимосвязи механических, электронных и компьютерных элементов. Наличие трех обязательных частей – электромеханической, электронной и компьютерной, связанных энергетическими и информационными потоками, – является первичным признаком, отличающим мехатронные системы. В автомобильной отрасли для таких систем также используется термин «автотроника» [3].

Нетрудно видеть, что вышеприведенное определение по своей сущности практически совпадает с определением электропривода, который является электромеханической системой, предназначенной

для преобразования электрической энергии в механическую и, наоборот, с целью приведения в движение рабочих органов машин и механизмов и управления движением в соответствии с требованиями технологического процесса.

Сходство понятий еще более усиливается, если сопоставить функциональные схемы обеих систем.

Общая структура мехатронной системы представлена на рис. 1. Роль мехатронного модуля выполняет электромеханический преобразователь.

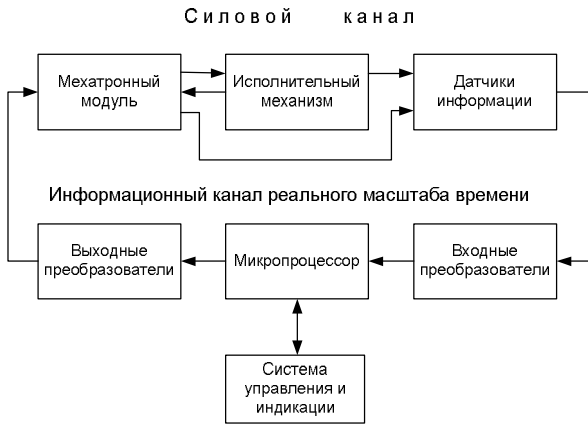


Рисунок 1 – Структура мехатронной системы

Не приводя известной классической структурной схемы ЭП, отметим, что в ней датчики информации, входные и выходные аналоговые и цифровые преобразователи, а также микропроцессор объединены общим понятием «устройство управления». В то же время в ней имеются такие важнейшие элементы силового канала, как силовое преобразовательное устройство, электродвигательное устройство и передаточный механизм, отсутствующие в структуре мехатронной системы (рис. 1). Эти устройства, не будучи названными, входят в мехатронный модуль. Это не означает, однако, исключение необходимости решать при разработке мехатронного модуля совокупности традиционных для электроприводчиков схемотехнических задач, а также расчета и выбора элементов вышеуказанных устройств.

В то же время вышеуказанное терминологическое отличие означает стремление объединить эти устройства в едином конструктиве, что накладывает дополнительные требования к минимизации габаритов, массы, к помехоустойчивости и обеспечению теплового режима.

Отметим еще одно отличие. Согласно классическому определению, исполнительный механизм (рабочий орган) не входит в состав электропривода. Однако без знания его характеристик и особенностей технологического процесса спроектировать электропривод невозможно. Поэтому, решая задачи расчета и исследования электроприводов, электроприводчики оперируют понятием «электромеханическая система», каковой является мехатронная система.

Мехатронные системы автомобилей по функциональному назначению делятся на основные группы [4]:

- системы управления двигателем;
- системы управления трансмиссией;
- системы управления ходовой частью;

– системы комфорта.

Система автоматического управления двигателем (САУД) включает подсистемы, представленные в табл. 1.

Таблица 1 – Состав подсистем САУД

Подсистема САУД	Датчики	Исполнительные устройства
Топливная система	Датчик давления топлива в контуре низкого давления	Электрический топливный насос; перепускной клапан
Система впрыска	Датчик давления топлива; датчик частоты вращения коленчатого вала; датчик Холла; датчик положения педали газа; расходомер воздуха; датчик температуры охлаждающей жидкости; датчик температуры воздуха на впуске	Форсунки; клапан регулирования давления
Система впуска	Расходомер воздуха; датчик температуры воздуха на впуске; датчик положения дроссельной заслонки; датчик давления во впускном коллекторе	Привод дроссельной заслонки; привод впускных заслонок
Система зажигания	Датчик положения педали газа; датчик частоты вращения коленчатого вала; датчик Холла; датчик детонации; расходомер воздуха; датчик температуры воздуха на впуске; датчик температуры охл. жидкости; кислородные датчики	Катушки зажигания
Система рециркуляции отработавших газов и улавливания паров бензина	Датчик температуры отработавших газов; кислородный датчик перед нейтрализатором; кислородный датчик после нейтрализатора; датчик оксидов азота	Электромагнитный клапан управления подачей вторичного воздуха; электродвигатель насоса вторичного воздуха; электромагнитный клапан продувки адсорбера
Система охлаждения	Датчик температуры охлаждающей жидкости; датчик температуры масла	Термостат; реле дополнительного насоса охлаждающей жидкости; вентилятор радиатора; реле охлаждения двигателя

Принцип работы системы управления двигателем основан на комплексном управлении величиной крутящего момента двигателя в зависимости от его режима работы.

Изменение крутящего момента производится путем регулирования наполнения цилиндров воздухом и регулированием угла опережения зажигания.

При создании электроавтомобиля именно данная система подвержена радикальному изменению в связи с заменой двигателя внутреннего сгорания на электро-

двигатель. Все подсистемы САУД (табл. 1) исключаются. Из датчиков сохраняются датчики частоты вращения электродвигателя, положения педали газа как акселераторной педали, температуры двигателя либо охлаждающей жидкости для электродвигателей с жидкостным охлаждением. Для определенных систем электропривода требуется датчик положения ротора. В зависимости от типа электродвигателя выбирается тип входящего в мехатронный модуль полупроводникового преобразователя: широтно-импульсный – для двигателей постоянного тока, автономный инвертор – для асинхронного двигателя, система электронных ключей для модификаций синхронного двигателя, шаговых, индукторных и вентильных двигателей. Фирмы-производители электромобилей не разглашают деталей схемотехнических решений систем силового электропривода. Известно их принципиальное многообразие, требующее, однако, особого рассмотрения.

Общим требованием при создании современной силовой мехатронной системы электромобиля является необходимость обеспечения энергосберегающих свойств, что обусловлено ограниченностью ресурса источника электроэнергии.

В отличие от автомобиля с ДВС, электропривод электромобиля способен возвращать источнику электропитания кинетическую энергию при динамических торможениях и потенциальную при продолжительных спусках. Создание мехатронных систем, реализующих данные рекуперативные режимы, сопряжено с существенным, в зависимости от типа электропривода, увеличением объема работ по программированию микропроцессора. Кроме того, рекуперация требует решения проблемы выбора накопителя. Литий-ионные аккумуляторные батареи, способные воспринимать при заряде токи порядка 10^2 А, для отечественного потребителя дороги и имеют небольшой срок службы, а широко распространенные свинцово-кислотные не допускают тока заряда более 5–10 А. Применение в качестве буферных накопителей электроэнергии суперконденсаторов (ионисторов), достоинства и недостатки которых описаны в [1], требуют специальных схемотехнических решений и практической проверки.

Ниже приводятся сведения из обзора по остальным группам мехатронных систем автомобиля. Эти системы могут в той или иной мере влиять на управление двигателем, поэтому знания о них следует использовать при создании электромобиля.

Системы управления трансмиссией

По уровню автоматизации управления трансмиссии могут быть разделены на полуавтоматические, которые автоматизируют управление отдельными ее узлами (например, сцеплением), и автоматические, управляемые без участия водителя.

Система управления сцеплением

Система автоматического управления фрикционным сцеплением выполняет следующие функции:

– принудительное выключение сцепления на период переключения передач и при снижении частоты вращения коленчатого вала до уровня, соответствующего режиму холостого хода двигателя;

– принудительную блокировку, гарантирующую его работу без пробуксовки после разгона автомобиля;

– регулирование момента трения по заданным законам во время разгона с целью наименьшего буксования при одновременном сохранении высоких тягово-скоростных качеств автомобиля.

Последний режим предполагает формирование оптимального закона изменения момента трения в зависимости от угла открытия дроссельной заслонки, частоты вращения коленчатого вала и его ускорения. Параметром обратной связи является разность между текущей и заданной частотами вращения. Исполнительными электромеханическими элементами системы являются управляемые микропроцессорным блоком электромагнитные клапаны, регулирующие давление воздуха в сервокамере, шток которой воздействует на выжимной подшипник сцепления.

Система автоматического переключения передач

Автоматическая коробка переключения передач (АКПП) содержит в своем составе многоступенчатую механическую коробку с переключением скоростей при помощи управляемых электромагнитных клапанов.

Входными сигналами являются следующие:

- частота вращения коленчатого вала;
- частота вращения выходного вала АКПП или скорость движения автомобиля;
- положение дроссельной заслонки и скорость её перемещения;
- нагрузка ДВС;
- температура ДВС;
- положение рычага АКПП;
- положение переключателя программ.

Программное управление автоматическим переключателем скоростей осуществляется по различным алгоритмам. Экономичный режим движения обеспечивает минимальный расход топлива. Спортивный режим обеспечивает максимальные динамические характеристики [5].

Системы управления ходовой частью

Управление ходовой частью включает управление процессами движения, изменения траектории, торможения, поддержания заданной скорости движения путем воздействия на подвеску, рулевое управление и тормозную систему.

Применяемые САУ подвеской предназначены для повышения безопасности и комфортабельности автомобиля путём автоматического управления уровнем демпфирования амортизаторов в зависимости от режима движения. Система работает по информации от датчиков скорости, положения рулевого колеса, интенсивности торможения, угла открытия дроссельной заслонки.

В качестве привода используется дискретный исполнительный механизм, осуществляющий ступенчатое изменение диаметра перепускного отверстия амортизатора при помощи электрического двигателя.

Управление высотой кузова обеспечивается с помощью упругих пневматических элементов, устанавливаемых на колесах. Используется сигнал от

датчика высоты. Если текущая высота отличается от номинальной, регулируется давление в упругих элементах, включая электродвигатель компрессора (для увеличения давления) или соленоид выпускного клапана (для уменьшения давления). Таким образом, обеспечивается постоянная, не зависящая от нагрузки на подвеску, высота кузова.

Системы управления тормозами

Электронные системы, обеспечивающие управление тормозами, по функциональному назначению могут быть классифицированы следующим образом: *антиблокировочные, регулирования тормозных усилий, антипробуксовочные.*

Антиблокировочная система (АБС) препятствует блокировке колес при резком торможении, благодаря чему сохраняется управляемость автомобиля.

Для решения данной задачи АБС, в зависимости от замедления затормаживаемых колес и относительного скольжения, автоматически изменяет давление в цилиндрах или тормозных камерах исполнительных тормозных механизмов.

Система регулирования тормозных усилий предназначена для предотвращения блокировки задних колес вследствие меньшей нагрузки на заднюю ось за счет управления тормозным усилием задней оси и представляет собой программное расширение АБС.

Антипробуксовочная система также построена на основе антиблокировочной системы и предназначена для предотвращения пробуксовки ведущих колес [6].

Система курсовой устойчивости, оценивая действия водителя и параметры движения автомобиля, позволяет удерживать его в пределах заданной водителем траектории при различных режимах движения. Система курсовой устойчивости является системой активной безопасности более высокого уровня и включает все электронные системы управления тормозами.

К датчикам системы, используемым для оценки действий водителя, относятся:

- датчик угла поворота рулевого колеса;
- датчик давления в тормозной системе.

При оценке фактических параметров движения используются датчики угловой скорости колес, продольного и бокового ускорения, скорости поворота автомобиля и датчик давления в тормозной системе.

Система взаимодействует с блоком управления САУД и АКПП.

Стабилизация движения автомобиля достигается следующими способами:

- подтормаживанием определенных колес;
- изменением крутящего момента двигателя;
- изменением угла поворота передних колес;
- изменением степени демпфирования амортизаторов.

Система стабилизации скорости (адаптивный круиз-контроль) предназначена для автоматического управления скоростью движения автомобиля.

Основным датчиком системы является датчик расстояния, служащий для измерения скорости и расстояния до впереди идущего автомобиля. Датчик локационного типа радио- или инфракрасного диапазона.

Своих исполнительных устройств система не имеет, а использует другие системы:

- курсовой устойчивости;
- дроссельную заслонку с электроприводом системы управления двигателем;
- автоматическую коробку передач.

Адаптивный круиз-контроль обеспечивает движение автомобиля в режимах постоянной скорости, ускорения и замедления.

При отсутствии на дороге других автомобилей система поддерживает заданную водителем скорость. При ускорении или перестроении впереди идущего автомобиля происходит ускорение автомобиля до заданной водителем скорости.

При замедлении или перестроении из соседнего ряда впереди идущего автомобиля происходит замедление автомобиля до заданной водителем дистанции.

Система рулевого управления

Усилитель рулевого управления, в котором усилие, необходимое для поворота рулевого колеса, изменяется в зависимости от скорости автомобиля, называется *адаптивным усилителем рулевого управления.*

В *активной системе рулевого управления* передаточное число рулевого механизма изменяется в зависимости от скорости движения автомобиля. Исполнительным механизмом данной системы является электродвигатель.

Системы комфорта

Состав подсистем представлен в табл. 2.

Таблица 2 – Состав подсистем комфорта

Система	Датчики	Исполнительные устройства
Система климат-контроля	Датчик температуры наружного воздуха; датчик уровня солнечного излучения; датчики выходной температуры; потенциометры заслонок; датчик температуры испарителя; датчик давления в системе кондиционирования	Приводы заслонок; электродвигатель вентилятора приточного воздуха
Система активного головного света	Датчики положения модуля лампы; датчики уровня кузова; датчик угла поворота рулевого колеса	Электродвигатель корректора фары; электродвигатель динамического активного головного света
Электро-стеклоподъемник	Датчик положения стекла	Электродвигатель
Стеклоочистители	Датчик дождя; датчик освещенности	Электродвигатель
Центральный замок	Концевые выключатели дверей; микропереключатели в конструкции замка	Электродвигатель с редуктором

В результате изложенного можно выделить особенности автомобильных мехатронных систем:

- широкий спектр датчиков информации различной физической природы, часть которых является

микроэлектромеханическими [7];

– основными исполнительными элементами являются электромагнитные и электромашинные преобразователи;

– используются системы стабилизации, программного управления и следящие;

– развитая вычислительная часть в виде микропроцессорной системы управления;

– значительная доля адаптивных систем управления;

– возрастающая роль и доля программного обеспечения в разработке мехатронных систем автомобилей;

– САУ строятся по иерархическому принципу.

Одной из перспектив развития автомобильных бортовых устройств является применение второго рабочего напряжения 42 В для питания новых потребителей: силовых электромагнитных клапанов, преобразователей, мощных электродвигателей.

ВЫВОДЫ. Мехатронные системы, широко используемые в автомобилях, по функциональному назначению, принципу действия, средствам и способам управления являются системами автоматизированного электропривода. Прогнозируемый мировыми экспертами переход в ближайшие десятилетия от автомобилей с ДВС к электромобилям делает целесообразным активное участие специалистов-электроприводчиков в исследовании и создании мехатронных систем электромобилей. В условиях Украины может стать эффективной модернизация экс-

плуатируемых автомобилей заменой ДВС на автоматизированный электропривод

ЛИТЕРАТУРА

1. Шидловский А.К., Павлов В.Б., Попов А.В. Применение суперконденсаторов в автономном аккумуляторном электротранспорте // *Технічна електродинаміка*. – 2008. – № 4. – С. 43–47.

2. Подураев Ю.В., Кулешов В.С. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем // *Мехатроника*. – 2000. – № 1.

3. Соснин Д.А. Автотроника. Электрооборудование и системы бортовой автоматизации современных легковых автомобилей. – М.: СОЛОН-Р, 2001. – 172 с.

4. Бутылин В.Г., Иванов В.Г., Лепешко И.И. и др. Анализ и перспективы развития мехатронных систем управления торможением колеса // *Мехатроника. Механика. Автоматика. Электроника. Информатика*. – 2000. – № 2. – С. 33–38.

5. Доровских Д.В., Курочкин И.М. Электронные системы мобильных машин. – Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – 264 с.

6. Бронштейн М.И. Электронное управление двигателем, трансмиссией и ходовой частью автомобиля. – Харьков: ХГАДТУ. 2001. – 150 с.

7. Клепиков В.Б., Пшеничников Д.А. Состояние и тенденции развития микро- и нанoeлектромеханических систем // *Вісник НТУ „ХПІ”*. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2010. – № 28. – С. 34–38.

ABOUT CREATION OF ELECTRIC VEHICLE MECHATRONIC SYSTEMS

V. Klepikov, Y. Kutovoy, D. Pshenichnikov

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

ul. Frunze, 21, Kharkov, 61002, Ukraine. E-mail: pshenich_dm@mail.ru

Article is devoted to the review of the automobile mechatronics systems and subsystems. They are functional base for design of electric vehicle mechatronic systems. Features of adequacy of terms "electric drive" and «mechatronics system» are determined. Data about structure, principles of construction and functioning of the basic automobile systems with microprocessor control are cited. There are engine, transmission, undercarriage control systems and comfort systems. Main principles and features of electric vehicles electric drives creation are declared.

Key words: mechatronics, electric drive, electric vehicle, microprocessor control.

REFERENCES

1. Shidlovskiy A.K., Pavlov V.B., Popov A.V. Using of capacitors in autonomous accumulator electric transport // *Technical electrodynamics*. – 2008. – № 4. – PP. 43–47. [in Russian]

2. Poduraev Y.V., Kuleshov V.S. Construction principles and modern development tendencies of mechatronics systems // *Mechatronics*. – 2000. – № 1. [in Russian]

3. Sosnin D.A. *Autotronics. Modern cars electric-al equipment and onboard automatic systems*. – M.: SOLON-R, 2001. – 172 p. [in Russian]

4. Butylin V.G., Ivanov V.G., Lepeshko I.I. Analysis and development perspectives of wheel braking control mechatronic systems // *Mechatronics. Automatics. Electronics. Informatics*. – 2000. – № 2. – PP. 33–38. [in Russian]

5. Dorovskikh D.V., Kurochkin I.M. *Automotive electronic systems*. – Tambov: FGBOU VPO “TGTU”, 2011. – 264 p. [in Russian]

6. Bronshtein M.I. *Electronic control of car's engine, transmission and undercarriage*. – Kharkov: KGADTU, 2001. – 150 p. [in Russian]

7. Klepikov V.B., Pshenichnikov D.A. Condition and development tendencies of micro- and nanoelectromechanical systems // *Visnyk NTU „KhPI”*. – Kharkiv: NTU „KhPI”, 2010. – № 28. – PP. 34–38. [in Russian]

Стаття надійшла 24.07.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Сінчуком О.М.