

В. Б. КЛЕПИКОВ, д-р техн., наук. проф. НТУ «ХПИ»;
А. С. ГОНЧАР, преп. стаж. НТУ «ХПИ»;
А. В. СЕМИКОВ, асп. НТУ «ХПИ»;
А. Н. МОИСЕЕВ, канд. техн. наук., ст. научн. сотр. НТУ «ХПИ»;
П. М. КАСТОРНЫЙ, маст. НТУ «ХПИ»;
А. В. ТИМОЩЕНКО, ст. преп. НТУ «ХПИ»;
Д. А. ПШЕНИЧНИКОВ, канд. техн. наук., доц. НТУ «ХПИ»;
В. В. КОВТУН, зав. лаб. НТУ «ХПИ»;
Е. Ф. БАНЕВ, канд. техн. наук., мл. научн. сотр. НТУ «ХПИ»;
А. В. ХОРЕВА, мл. научн. сотр. НТУ «ХПИ»

ИЗ ОПЫТА СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С СУПЕРКОНДЕНСАТОРНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

По мнению мировых экспертов в перспективе альтернативы электромобилю нет [1]. Причинами этого является ограниченность нефтяных и газовых ресурсов, ухудшение экологического состояния в больших городах из-за выхлопных газов автомобилей, ряда технических преимуществ электропривода (ЭП) по сравнению с двигателями внутреннего сгорания (ДВС).

Для Украины, импортирующей в докризисный период 75% газовых и 80% нефтяных энергоресурсов и затрачивающей на их закупку огромные валютные средства, переход от автомобилей к электромобилям (ЭМБ) особенно актуален.

Практически все ведущие зарубежные фирмы разрабатывают, изготавливают, а многие из них уже и серийно выпускают электромобили. Сведения, поступающие из средств массовой информации, говорят о непрерывном улучшении технико-экономических показателей ЭМБ по дальности проезда без подзарядки аккумуляторов, приемистости, максимальной скорости, эксплуатационным затратам [2–7].

Анализ рынка труда в промышленном производстве Украины и вышеуказанные факты привели нас к выводу о целесообразности использования в электромобилестроении богатого опыта специалистов электроприводчиков, накопленного при создании промышленных микропроцессорно-управляемых электромеханических систем, в том числе и электроприводов транспортных средств: электрокаров, рудничных электровозов, механизмов передвижения кранов и др. В этом нас также убедило участие кафедры в европейском проекте «TEMPUS-MPAM». Наши зарубежные коллеги из Франции, Германии, Чехословакии по заказам фирм активно участвуют в разработках различных мехатронных систем автомобилей.

В результате в 2011 году на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ «ХПИ» была открыта новая специализация «Компьютеризированные системы электромобилей» и определены концептуальные положения её развития. Таковыми стали:

- сохранение традиционной основательной подготовки по теоретическим основам электротехники, механике, полупроводниковой преобразовательной подгруппе, теории автоматического управления, теории систем управления электроприводом, электрическим машинам, микропроцессорной технике и программированию;
- обеспечение в учебном процессе приобретения практических навыков диагностики, программирования, наладки и обслуживания систем управления электропривода электромобилей. С этой целью считаем необходимым самостоятельно разработать и создать систему управления тяговым электроприводом автомобиля взамен двигателя внутреннего сгорания.

Совершенно очевидно, что технические и финансовые возможности кафедры не сопоставимы с возможностями автомобильных фирм как, например, «Тоёта», «Мерседес», «Нисан», «Тесла» и другие, поэтому о конкуренции не могло быть и речи. Главной целью нашей разработки было создание образца для учебных и научных целей и приобретение при этом практического опыта для исключения начётничества при обучении студентов. В то же время предусматривалась возможность использования полученного опыта в случае массового желания автовладельцев Украины преобразовать автомобиль в электромобиль. Предпосылки для такого желания есть. Купить новый зарубежный электромобиль стоимостью более 25...35 тыс. долл. украинский автовладелец среднего достатка не в состоянии. Однако, учитывая всевозрастающую стоимость бензина, большие текущие расходы по эксплуатации (замена моторного масла, масляного и воздушного фильтров, свечей, поршневых колец, тормозных колодок и др.), а также расходы на ремонт, замена ДВС на электропривод в случае экономической целесообразности такой модернизации для многих может стать привлекательной.

С учётом вышеуказанного были определены следующие принципы разработки и создания электропривода ЭМБ:

1. Схемотехнические решения в методическом отношении должны облегчать студентам уяснение физической сущности электромагнитных и электромеханических процессов в различных режимах движения ЭМБ;
2. Конструктивные и технические решения должны соответствовать технологии модернизации автомобилей путём замены ДВС на разрабатываемый ЭП;
3. Электропривод должен обеспечить повышение энергоэффективности за счёт рекуперации энергии в тормозных режимах с последующим её использованием;
4. В максимальной мере предусматривать использование комплектующих компонентов и материалов отечественного производителя.

С учётом вышеизложенного электромобиль создавали на базе широко распространённого серийно выпускаемого в Украине автомобиля «Ланос».

Цель статьи – обобщить опыт кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ «ХПИ» по созданию на базе автомобиля «Ланос» первого в Украине электромобиля с суперконденсаторным накопителем энергии.

В качестве электродвигателя была выбрана машина постоянного тока с постоянными магнитами, что позволяет использовать полупроводниковый широтно-импульсный преобразователь (ШИП) с наиболее простой структурой и упрощает процесс работы ЭП и преобразования энергии в различных режимах движения ЭМБ. Такое решение также способствует минимизации материальных затрат и времени на создание первого образца. Особенностью создаваемого электропривода по сравнению с известными разработками в Украине является реализация в тормозных режимах (при снижении скорости, остановках, движении на спусках) возврата энергии движения накопителю, в качестве которого применена суперконденсаторная батарея. Современные суперконденсаторы по сравнению с аккумуляторами имеют ряд важных достоинств:

- ресурс более 10 лет и более 300000...1000000 циклов «заряд-разряд»;
- высокая удельная мощность до 4...10кВт/кг при КПД 95%;
- меньшая, по сравнению с аккумуляторами, зависимость характеристик от температуры.

Ток заряда суперконденсатора может достигать сотен ампер, а в тормозных режимах ЭМБ имеют место подобные значения токов. В то же время известно, что ток заряда свинцово-кислотного аккумулятора не может превышать нескольких десятков ампер.

Ёмкость одного суперконденсаторного элемента (ионистора) при напряжении около 2,5 В в сотни тысяч раз превосходит электрическую ёмкость Земли, но даже при их последовательном соединении до напряжения, требуемого электродвигателю в созданном образце сохраняется достаточно большой, чтобы принять энергию при протяжённости спуска в 1 км с уклоном в 3 градуса.

Применение суперконденсаторной батареи позволило реализовать рекуперативные режимы, используя для источника электропитания ЭП ЭМБ свинцово-кислотные аккумуляторы отечественного производства.

Как показывают расчёты, использование рекуперации энергии при торможении электромобиля позволяет экономить в различных режимах городского цикла 12...21% энергоресурса аккумуляторной батареи [9].

В свете вышеизложенных соображений и принципов был разработан и запатентован электропривод ЭМБ, принцип действия которого может быть уяснён из принципиальной схемы, представленной на рисунке 1. [8]

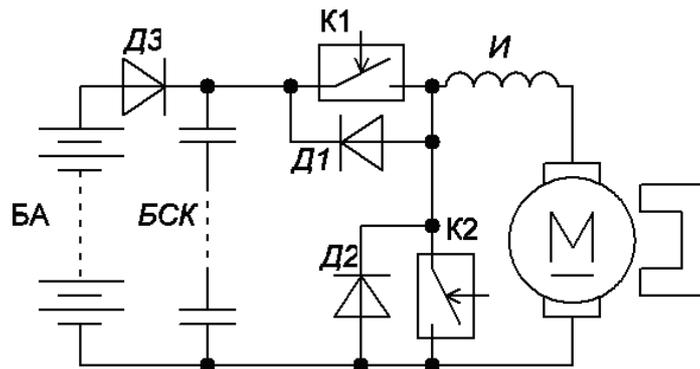


Рисунок 1 – Структурная схема ЭП

В данной схеме БА – аккумуляторная батарея, выполняющая роль источника электроэнергии. В двигательном режиме периодическое замыкание-размыкание ключа К1 по принципу ШИМ (широтно-импульсной модуляции) производит регулирование величины среднего напряжения, прикладываемого к электродвигателю М. При разомкнутом К1 ток двигателя, благодаря индуктивности якорной цепи И, поддерживается через диод Д2.

Переход к тормозному режиму осуществляется переводом ключа К1 в разомкнутое состояние, а ключа К2 в режим периодической коммутации. При этом на первом этапе под действием встречно направленной ЭДС электродвигателя ток якоря изменяет направление на противоположное, создавая тормозной момент. При замкнутом положении К2, ток стремится нарастать и в это время часть кинетической энергии движения ЭМБ

преобразовывается в электромагнитную и накапливается в индуктивности якорной цепи. Размыкание К2 приводит к протеканию тормозного тока через диод Д1 и супер-конденсаторную батарею БСК, заряжая её электрической энергией. При этом диод Д3 предотвращает протекание зарядного тока, достигающего 300 А, через батарею БА. Процесс заряда сопровождается уменьшением электромагнитной энергии в индуктивности, однако последующее замыкание К2, вновь приводит к нарастанию тока якоря. Таким образом значение тормозного тока периодически изменяется относительно некоторого среднего значения, определяющего тормозное усилие автомобиля.

После окончания тормозного режима и перехода к двигательному электрическая энергия для движения ЭМБ вначале отдаётся суперконденсаторной батареей до тех пор, пока её напряжение сравняется с напряжением аккумуляторной батареи, после чего она вступает в действие.

Значения двигательного и тормозного моментов электропривода задаются микропроцессором, управляющим состоянием ключей К1 и К2, и определяются положением педали акселератора.

В качестве аккумуляторной батареи были использованы 6 последовательно соединённых гелиевых свинцово-кислотных аккумуляторов Харьковского аккумуляторного завода «Владар» типа LS12120G с одночасовой ёмкостью 60 А·ч при номинальном напряжении 72 В. Электродвигатель типа ME1003 имеет номинальные данные: напряжение 72 В, ток 150 А. Батарея суперконденсаторов состоит из 48 последовательных элементов SCSCA1C120 и обеспечивает ёмкость 25 Ф при максимальном напряжении 125 В. Ключ К1 выполнен в виде 6 параллельно соединённых полевых транзисторов с изолированным затвором, и каждый из них шунтирован диодом Шоттки 80STQ150. На аналогичных транзисторах и диодах в виде 6 параллельных ветвей выполнена и цепочка К2 Д2. В качестве блокирующего заряд БА диода Д3 выбран клапан типа В-200.

Дискретная система управления с быстродействующим контуром регулирования тока построена на базе микроконтроллера Cortex-M4 с написанной для него программой на языке «Си». Обратные связи по току и заданию от педали момента электродвигателя осуществляются с помощью АЦП микроконтроллера.

Проверка схемотехнических решений выполнялась на лабораторном стенде и подтвердила требуемое функционирование предложенной схемы. Масса автомобиля имитировалась маховиком, напрямую соединённым с валом электродвигателя.

При компоновке электрооборудования в автомобиле использовался метод 3D моделирования. В моторном блоке размещён широтно-импульсный преобразователь, суперконденсаторная батарея, микропроцессорная плата управления, силовая коммутирующая аппаратура, источники низковольтного питания. Сигнал задания на движение и торможение задаётся педалью акселератора. Тормозная педаль используется в случаях экстренного торможения. Батарея аккумуляторов установлена в багажном отделении. Вольтметр напряжения суперконденсаторной батареи, установленный на передней панели, показывает режим работы СКБ: нарастание напряжения в период рекуперации, снижение – при движении за счёт энергии СКБ. Сцепление было устранено и электродвигатель напрямую соединён с валом коробки передач. Коробка передач сохранена, так как она включает неделимый от неё дифференциал и её замена на более простую с меньшим числом передач потребовала бы проведения больших монтажных работ. При этом полный отказ от коробки передач невозможен, так как двигатель использует постоянные магниты и, следовательно, не имеет второй зоны регулирования, обеспечивающей постоянство мощности в широком диапазоне скоростей.

Испытания электромобиля подтвердили требуемое функционирование системы управления электропривода, мягкое бесшумное трогание, надёжное торможение с рекуперацией энергии в СКБ. Они также показали, что вследствие больших усилий, передаваемых при торможении от статора ЭД корпусу коробки передач, следует обеспечить большую жесткость кронштейна, фиксирующего электродвигатель в пространстве, причём крепление должно выдерживать моменты противоположного направления при торможении, которые отсутствуют при использовании ДВС. Большой вес аккумуляторной батареи (270 кг) требует повышения жесткости задних пружин.

Создание электромобиля в условиях нынешнего существования ВУЗов оказалось очень непростой задачей. И эта задача была бы неразрешима, если бы не искренняя помощь и поддержка небезразличных к нашей работе многих людей и организаций. Авторы считают своим долгом выразить особую благодарность А.И. Терещенко, директору харьковского филиала «Приватбанка», представившего автомобиль «Ланос», на базе которого создавался электромобиль, Ю.В. Радионову, директору Харьковского аккумуляторного завода «Владар», передавшего 6 гелиевых аккумуляторов для источника питания, фирме «Юнаско-Украина», предоставившей несколько элементов суперконденсаторов на стадии лабораторных исследований, В.Б. Павлову, главному научному сотруднику института электродинамики НАН Украины, за полезные советы, основанные на опыте создания электромобилей в данном институте, Л.Л. ТОВАЖНЯНСКОМУ, Почётному ректору НТУ «ХПИ», помогавшему в решении многих организационно-технических вопросов.

В заключение позволим высказать некоторые соображения о возможном социальном значении модернизации автомобилей. Массовая модернизация, находящаяся в эксплуатации автомобилей путём замены двигателя внутреннего сгорания на энергоэффективный электропривод потребует создания большого числа предприятий малого и среднего бизнеса по производству такой модернизации. В свою очередь, это дало бы импульс для отечественных предприятий по производству электродвигателей, аккумуляторов, полупроводниковых преоб-

разователей, суперконденсаторов, электрических аппаратов и т.д. Кроме того потребовались бы станции диагностики, обслуживания, ремонта, зарядки батарей. Следствием вышесказанного станет большое увеличение числа рабочих мест.

С государственной точки зрения также существенно бы сократилось закупка нефтепродуктов, на которую затрачиваются большие валютные средства. Улучшилась бы экологическая обстановка больших городов.

И очень существенно то, что основное финансирование модернизации взяли бы на себя владельцы автомобилей, готовые избавиться от бремени непомерно растущих расходов на бензин и текущие расходы по эксплуатации импортных автомобилей.

Выводы:

Предложена схема, разработан и создан электропривод электромобиля с суперконденсаторной батареей, обеспечивающий возврат энергии движения в тормозных режимах.

Применение суперконденсаторного накопителя позволяет использовать в качестве источника электроэнергии ЭМБ свинцово-кислотные аккумуляторы отечественного производства.

Массовая модернизация автомобилей путём замены ДВС на ЭП может дать большой социальный эффект: активацию малого и среднего бизнеса, расширение производства отечественными предприятиями комплектующего оборудования, увеличение числа рабочих мест, улучшение экологической обстановки больших городов и сокращение валютных расходов на импорт нефтепродуктов.

Список литературы: 1. Шидловский А.К., Павлов В.Б., Попов А.В. Применение суперконденсаторов в автономном аккумуляторном электротранспорте // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 4. – С. 43–47. 2. Сравнение электромобилей BMW i3 и Mercedes-Benz B-class Electric Drive [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.caranddriver.com/comparisons/2014-bmw-i3-vs-2014-mercedes-benz-b-class-electric-drive-comparison-test>. 3. Описание электромобиля Tesla Model S [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.teslamotors.com/models> 4. Описание электромобиля Honda Fit EV [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://automobiles.honda.com/fit-ev/> 5. Описание электромобиля Ford Focus Electric [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.ford.com/cars/focus/trim/electric/> 6. Описание электромобиля Nissan Leaf [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.nissanusa.com/electric-cars/leaf/> 7. Описание электромобиля Toyota IQ EV [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.toyota.com/esq/vehicles/electric-vehicle/2013-scion-iq-ev.html> 8. Патент Украины №85585 «Электропривод электромобиля», НТУ «ХПИ» 9. Семиков А.В., Гончар А.С. Расчет энергоэффективности электропривода электромобиля с применением ионисторов // 36. матер. конф. «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації». – Кременчук, 2013. – С. 25–26.

Поступила (received) 25.08.2015