

УДК 621.313.333

А.В. Бажинов, профессор, д-р техн. наук,

В.Я. Двадненко, доцент, канд. техн. наук,

А.М. Дробинин, аспирант,

Х. Мауш, аспирант

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,

Харьков, 61002, ул. Петровского, 25

V.Dvadenko@mail.ru

СИСТЕМА РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

В работе изложен опыт разработки системы рекуперативного заряда тяговых литий-ионных аккумуляторных батарей для гибридных автомобилей и электромобилей. Рассмотрен метод поочередного рекуперативного заряда нижней и верхней половины тяговой литий-ионной тяговой аккумуляторной батареи.

Ключевые слова: гибридный автомобиль, вентильный двигатель, торможение, рекуперация, система управления, тяговая литий-ионная батарея.

Введение. 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). Система рекуперативного торможения позволяет улучшить ряд параметров такого автомобиля, поэтому совершенствование этой системы является актуальной задачей.

Анализ публикаций. В последние годы появилось достаточно большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей, посвященных гибридным автомобилям. 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. В работе [5] рассмотрены некоторые пути повышения эффективности системы рекуперации в простом гибридном автомобиле с внешней подзарядкой.

Цель работы. Настоящая работа посвящена дальнейшей систематизации и обобщению опыта разработки тягового электропривода силовой установки гибридного автомобиля, и в частности работе его в режиме рекуперативного торможения.

Разработка системы рекуперации для гибридного автомобиля с использованием вентильного электродвигателя с электромагнитным возбуждением. В гибридном автомобиле возникает необходимость установить достаточно мощный тяговый электродвигатель вместе с ДВС в ограниченном пространстве. Применение широко распространенных тяговых коллекторных электродвигателей постоянного тока из-за их больших габаритов и в связи с проблемами коллекторно-щеточного узла является нецелесообразным. 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. 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. 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 обесточенном состоянии, что улучшает накат гибридного автомобиля. Третье преимущество – возможность простого и эффективного управления ВЭД в режиме генератора путем регулировки сравнительно небольшого тока возбуждения. Это позволяет расширить возможности рекуперации [6], упростить и повысить

эффективность системы рекуперативного торможения. Рассмотрим условия при которых происходит рекуперативный заряд ТАБ.

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 ток в якорной цепи может быть записан в виде:

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

где I – ток, потребляемый или отдаваемый ВЭД; U – напряжение питания якоря (напряжение ТАБ); Φ – магнитный поток возбуждения; R – суммарное активное сопротивление цепи якоря. E – ЭДС вращения ВЭД, которая имеет вид:

$$E = k\Phi\omega \quad (2)$$

где ω – угловая скорость вращения ротора ВЭД; k – конструктивный параметр двигателя;

Как видно из выражения (1) ток может быть положительным (режим электродвигателя) или отрицательным (режим генератора). Условием работы в режиме генератора является более высокое значение ЭДС вращения ВЭД, чем напряжение ТАБ. ЭДС вращения пропорциональна угловой скорости ВЭД и величине $k\Phi$. Величина $k\Phi$ зависит от тока обмотки возбуждения в общем случае нелинейно и при выбранном значении этого тока может быть определена экспериментальным путем. Для этого необходимо измерить при фиксированном напряжении питания U обороты холостого хода n_{xx} . На холостом ходу потребляемый ток I_{xx} минимален (в идеальном случае стремится к нулю), поэтому предположив что $I_{xx} \approx 0$ из (1) получим $E \approx U$, следовательно из (2) $k\Phi \approx U/\omega \approx U/(2\pi n_{xx})$. Даже при максимальном токе возбуждения режим рекуперации при подключении полного напряжения ТАБ к ВЭД возможен только при оборотах ВЭД больших, чем обороты холостого хода n_{xx} , поэтому надо либо повышать напряжение вырабатываемое ВЭД в режиме генератора, либо снижать напряжение ТАБ. Снизить напряжение ТАБ можно так, как предложено в работе [5], путем перехода от последовательного соединения половин ТАБ к параллельному на время рекуперативного торможения. В этом случае удастся собрать большую часть энергии торможения, так как зарядка ТАБ продолжается и при достаточно низких скоростях автомобиля. Однако коммутация силовых цепей является достаточно сложной и дорогостоящей задачей. Кроме того, в этом случае перед такой коммутацией необходимо выравнивать потенциалы ТАБ и инвертора ВЭД, что усложняет схему и требует некоторого времени, удлиняющего процесс торможения. Если обратить внимание на то, что литий-ионные батареи допускают зарядку достаточно большими токами, до 5С, что в несколько раз превышает предельные токи ВЭД в режиме генератора, то видно, что можно организовать поочередную зарядку частей ТАБ. Это позволит заряжать части ТАБ поочередно, что существенно упрощает и удешевляет коммутацию. Разработанная для такого решения схемотехника не требует выравнивания потенциалов.

На рисунке 1 изображена функциональная схема предложенной системы рекуперативного торможения гибридного автомобиля, где обозначены: 1 – верхняя половина ТАБ, 2 – нижняя половина ТАБ, 3 – вентильный электродвигатель-генератор, 4 – контроллер вентильного электродвигателя-генератора, 5 – верхний ключ, 6 – нижний ключ, 7 – блок учета заряда верхней и нижней половин ТАБ, 8 – датчик тока отрицательного вывода ТАБ, 9 – датчик тока положительного вывода ТАБ, 10 – блок управления рекуперативной зарядкой, 11 – датчик режима торможения, 12 – три диода с общим катодом, 13 – три диода с общим анодом, 14 – обмотка возбуждения вентильного электродвигателя-генератора.

Работает система так: при срабатывании датчика торможения 11 блок управления рекуперативной зарядкой 10 включает один из ключей 5 или 6 и, одновременно блокирует (выключает) все управляемые ключи трехфазного моста в контроллере вентильного электродвигателя-генератора 4. Предположим включен ключ 5, тогда три диода с общим катодом 12 образуют положительную группу диодов трехфазного моста, при этом отрицательную группу диодов трехфазного моста образуют нижние неуправляемые ключи (диоды) контроллера вентильного электродвигателя-генератора 4. Такой трехфазный мост заряжает нижнюю половину ТАБ 2. Напряжение заряда и предельный ток заряда регулирует блок управления рекуперативной зарядкой 10 путем изменения тока в обмотке возбуждения вентильного электродвигателя-генератора 14 (через контроллер вентильного электродвигателя-генератора 4). При следующем торможении блок управления рекуперативной зарядкой 10 включает ключ 6, тогда три диода с общим анодом 13 образуют отрицательную группу диодов трехфазного моста,

при этом положительную группу диодов трехфазного моста образуют верхние неуправляемые ключи (диоды) контроллера вентильного электродвигателя-генератора 4. Такой трехфазный мост заряжает верхнюю половину ТАБ 1 также, как и в предыдущем случае. Такое поочередное включение ключей 5 и 6 сопровождается измерением суммарного заряда полученного верхней 1 и нижней 2 половиной ТАБ с помощью датчиков тока 8 и 9 и блока учета заряда верхней и нижней половин ТАБ 7. Когда заряд накопленный в той половине ТАБ, которую в результате чередования надо заряжать, окажется больше, чем в той половине ТАБ, которую заряжали перед этим, подается команда на блок управления рекуперативной зарядкой 10, который управляет ключами 5 и 6, и, в этом случае, половина ТАБ с меньшим зарядом заряжается повторно при очередном торможении.

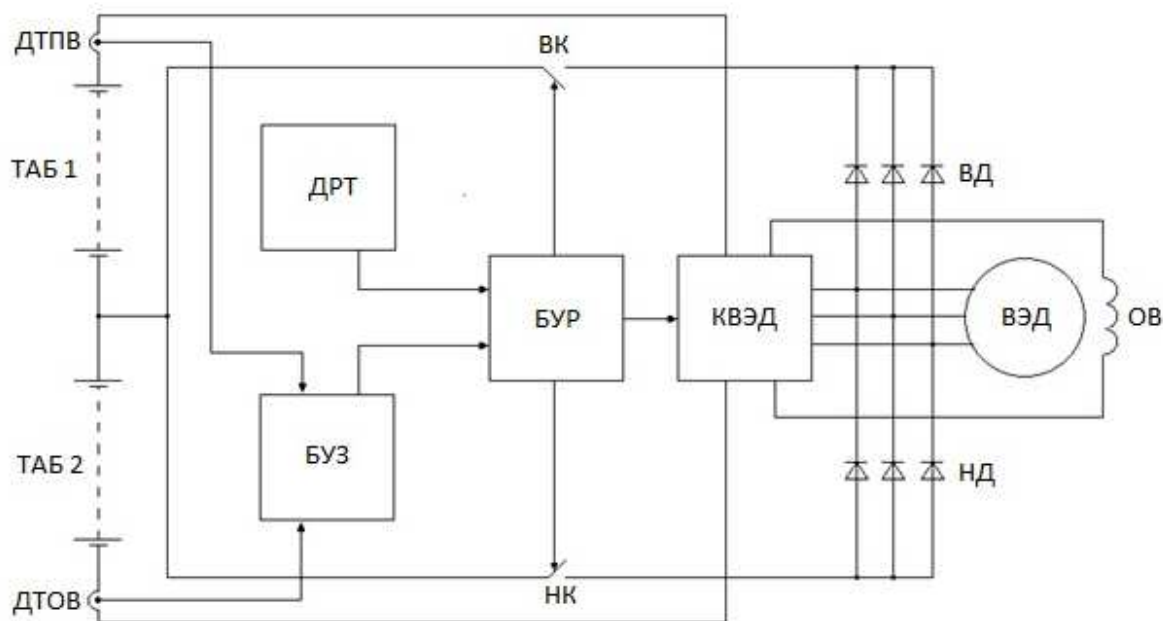


Рисунок 1 – Функциональная схема системы рекуперативного торможения гибридного автомобиля

Выводы. Таким образом, поставленная цель, а именно снижение стоимости и повышение эффективности системы рекуперации достигается за счет использования полного напряжения электродвигателя в режиме генератора для зарядки только половины ТАБ, что позволяет исключить необходимость применения дорогостоящей коммутации или мощного DC-DC конвертора. Практическая реализация рассмотренной системы рекуперации для литий-ионной ТАБ в подзаряжаемом гибридном автомобиле подтвердила ее высокую эффективность.

Библиографический список использованной литературы

1. Гібридні автомобілі / О.В. Бажинов [та ін.]; під. ред. О.В. Бажинова – 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. Двадненко, С.А. Сериков // Вісник СХУ ім. 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. Двадненко, С.А. Сериков // Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» (за галузями знань «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство») Луцького національного технічного університету. – 2010. – Вип. 28. – С.40– 45.
4. Двадненко В.Я. Двухзоновое управление тяговым вентильным электроприводом гибридного автомобиля / В.Я. Двадненко, С.А. Сериков // Труды ЛО МАИ, Науковий журнал. – Луганськ, 2011. – №1 (23). – С. 23 – 28.
5. Бажинов А.В. Разработка концепции электропривода для конверсионного гибридного автомобиля / А.В. Бажинов, В.Я. Двадненко, Хаким Мауш // Сборник научных трудов ХНАДУ «Автомобильный транспорт». – Харьков, 2012. - Вип. 30. – С 7 – 12.

6. Патент України на корисну модель №52009 . Система рекуперативного гальмування гібридного автомобіля. Бажинов А.В., Двадненко В.Я., Колесников А.В. 10.08.2010. Бюл. №15, 2010 р

Поступила в редакцію 14.06.2013 г.

Бажинов О.В., Двадненко В.Я., Дробінін О. М., Мауш Х. Система рекуперативного гальмування гібридного автомобіля

У роботі викладено досвід розробки системи рекуперативного заряду тягових літій-іонних акумуляторних батарей для гібридних автомобілів і електромобілів. Розглянуто метод почергового рекуперативного заряду нижньої і верхньої половини тягової літій-іонної тягової акумуляторної батареї.

Ключові слова: гібридний автомобіль, вентильний двигун, гальмування, рекуперація, система управління, тягова літій-іонна батарея.

Bazhinov O., Dvadenko V., Drobinin O., Maush H. Regenerative braking systems of hybrid car

It has been shown experience in the development of regenerative charging of traction lithium-ion batteries for hybrid and electric vehicles. It has been considered the method of alternating regenerative charging of the lower and upper half of the traction lithium-ion traction battery.

Keywords: hybrid car, the valve engine, braking, recovery, control system, traction lithium-ion battery.