

Бажинов А.В., д.т.н., Двадненко В.Я., к.т.н., Колесников А.В., аспирант

ХНАДУ, г. Харьков

РАЗРАБОТКА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

Изложен материал экспериментального исследования разработанного тягового электропривода гибридного автомобиля на основе трехфазной синхронной электрической машины (автомобильного генератора). Показано хорошее соответствие полученных результатов требованиям, предъявляемым к гибриднему автомобилю минимальной стоимости.

Введение

Основной вклад в повышение цены современного гибридного автомобиля по сравнению с обычным автомобилем вносят аккумуляторная батарея, вентильный двигатель-генератор с высококоэрцитивными постоянными магнитами на роторе и силовая электроника, управляющая вентильным электродвигателем-генератором. В данной работе рассмотрим тяговый электродвигатель и систему управления к нему. Из-за сравнительно небольшого количества энергии, запасенной в аккумуляторе гибридного автомобиля, целесообразно иметь относительно небольшой вклад электрической энергии в общую энергию, расходуемую автомобилем. Особенно это актуально для гибридного автомобиля с внешним подзарядом (plug in hybrid). В этом случае целесообразно исключать самые неэкономичные режимы работы ДВС, а именно: холостой ход, старт с места и медленное перемещение. Разгон автомобиля на электроприводе при обычном режиме движения должен происходить только до некоторой относительно небольшой скорости. Затем необходимо автоматически запустить ДВС, и дальнейший набор скорости и движение осуществлять как в обычном автомобиле. При торможении в таком гибридном автомобиле желательно предусмотреть рекуперацию. От работающего ДВС возможна зарядка аккумулятора. Применительно к этой концепции недорогого гибридного автомобиля, сформулируем ряд требований к тяговому электроприводе.

1. Электропривод должен быть сравнительно дешевым. Этому требованию способствует то, что он должен быть относительно небольшой мощности.

2. Для удешевления аккумуляторной батареи и блока инвертора желательно, чтобы применяемый двигатель был сравнительно низковольтным.

3. Электродвигатель должен быть высокомоментным, а, следовательно, многополюсным. Многополюсность делает его низкооборотным, что усугубляется не слишком высоким питающим напряжением. Решением этой проблемы может быть двухзоновое регулирование, которое должен допускать этот электродвигатель.

4. Поскольку у электродвигателя есть кинематическая связь с колесами, то при движении автомобиля важно иметь электропривод с минимальным сопротивлением вращению в отключенном состоянии, что уменьшит потери при движении на ДВС.

Не в полной мере подходящим для данного гибридного автомобиля является применяемый в современных гибридных автомобилях вентильный двигатель с постоянными магнитами на роторе машины, так как он малодоступен, очень дорог, и не допускает двухзонового регулирования. Кроме того, такой двигатель характеризуется сравнительно высоким сопротивлением вращению в отключенном состоянии из-за перемагничивания ферромагнитного сердечника статора в поле вращающихся постоянных магнитов. Для такого гибридного автомобиля применимы асинхронные двигатели с частотным управлением и вентильно-индукторные двигатели с зубчатым ферромагнитным ротором, имеющие минимальные потери на вращение в отключенном состоянии. Но асинхронные двигатели при малой мощно-

сти имеют низкий пусковой момент. Вентильно-индукторные двигатели для гибридного автомобиля (электромобиля) пока находятся в стадии разработки.

Для создания электропривода хорошо удовлетворяющего поставленным требованиям, по нашему мнению, подходит трехфазная синхронная электрическая машина переменного тока с электромагнитным возбуждением, дополненная необходимыми датчиками и электронными блоками для работы в режиме вентильного двигателя. Было принято решение разработать соответствующую систему управления и провести исследование вентильных двигателей на основе недорогих серийно выпускаемых автомобильных синхронных трехфазных генераторов переменного тока. При этом принимались во внимание следующие преимущества использования автомобильных генераторов: существенное удешевление, благодаря использованию готовой конструкции с относительно невысокой ценой; полезная возможность уменьшения сопротивления вращению при неработающем вентильном двигателе путем отключения обмотки возбуждения (при движении гибридного автомобиля только за счёт ДВС); управление скоростью вращения в широком диапазоне при сравнительно низком напряжении питания, обеспечиваемое возможностью двухзонового регулирования: достаточно простой метод рекуперации энергии при торможении автомобиля, так как можно регулировать сравнительно небольшой ток обмотки возбуждения.

Следует отметить также недостатки такого вентильного двигателя: расход электроэнергии на питание обмотки возбуждения, что приводит к небольшому снижению КПД (на несколько процентов); наличие щеточного узла; некоторый нагрев ротора. Первый недостаток неустранимый, но он уменьшается при использовании более мощных электрических машин. Второй недостаток является несущественным, потому как щетки передают малый ток без какой-либо коммутации, вносят очень малое сопротивление вращению и, как показывает опыт эксплуатации автомобильных генераторов, служат длительное время без обслуживания. Нагрев ротора также не создает заметных проблем, поскольку мощность, расходуемая на возбуждение сравнительно мала.

Изложение основного материала исследований

Для проведения исследований генератор модели 29.3701, имеющий в генераторном режиме рабочее напряжение 14 В и ток 50 А, был доработан следующим образом: трехфазный диодный мост был удален, а клеммы фаз обмотки статора, соединенной в «звезду», снабжены гибкими выводами. Под шкивом на верхней крышке генератора была укреплена панель с оптическими датчиками положения ротора (ДПР), а на шкиве — диск, снабженный полупериодными шторками. Датчики крепятся к панели через дополнительное кольцо для обеспечения возможности регулирования угла коммутации.

Система управления (инвертор), схематически представлена на рис. 1. Поскольку определить необходимое рабочее напряжение планировалось в результате эксперимента, в качестве ключей были применены IGBT транзисторы с большим запасом по напряжению (до 600 В). На рисунке использованы обозначения: БПД — блок питания драйверов; БУК — блок управления ключами; R-F — переключатель направления вращения; Блок. — блокировка управления; Д1-Д3 — датчики положения ротора; БУВ — блок управления возбуждением; БТЗ — блок токовой защиты. Уравнение механической характеристики такого двигателя имеет вид

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2}, \quad (1)$$

где ω — угловая скорость; U — напряжение питания якоря (статора); M — электромагнитный момент; Φ — магнитный поток ротора; R — активное сопротивление обмоток якоря; k — конструктивный параметр двигателя.

тально полученные обороты холостого хода (в *об/мин*) при различных напряжениях питания и 2-х значениях тока возбуждения приведены в табл. 1.

Таблица 1
Экспериментальные значения оборотов холостого хода (в *об/мин*) вентильного двигателя

U	12	24	36	48
$I_{\phi}=2,5$	665	1320	2080	2660
$I_{\phi}=1,25$	970	1920	2840	3780

Как следует из приведенной таблицы, уменьшение тока возбуждения до 1,25А обеспечивает регулирование во второй зоне, т.е. примерно в 1,5 раза позволяет повысить обороты. Нахождение рабочих механических характеристик и, соответственно, максимальной мощности полученного вентильного двигателя для различных напряжений питания при номинальном токе возбуждения производилось по следующей методике. С помощью тормозного стенда двигатель нагружался при максимальном коэффициенте ШИМ ($k = 1$), фиксировались показания измерителя момента, обороты двигателя, потребляемый ток и напряжение питания под нагрузкой. По найденным точкам и точке холостого хода строилась механические характеристики в виде прямых линий. Дополнительно рассчитывалась мощность двигателя в точках измерения момента нагрузки: $P = M \cdot \omega$. Максимальная мощность для каждого напряжения питания рассчитывалась так: точку мощности, близкой к максимальной, находили посередине отрезка механической характеристики, ограниченного осями абсцисс и ординат. Для этой точки находили произведение $M \cdot \omega$, которое и являлось искомой максимальной мощностью. Полученные результаты для трех значений питающего напряжения приведены на графике (рис. 2). Точка, соответствующая мощности 1580 Вт (при 48 В), с учетом КПД

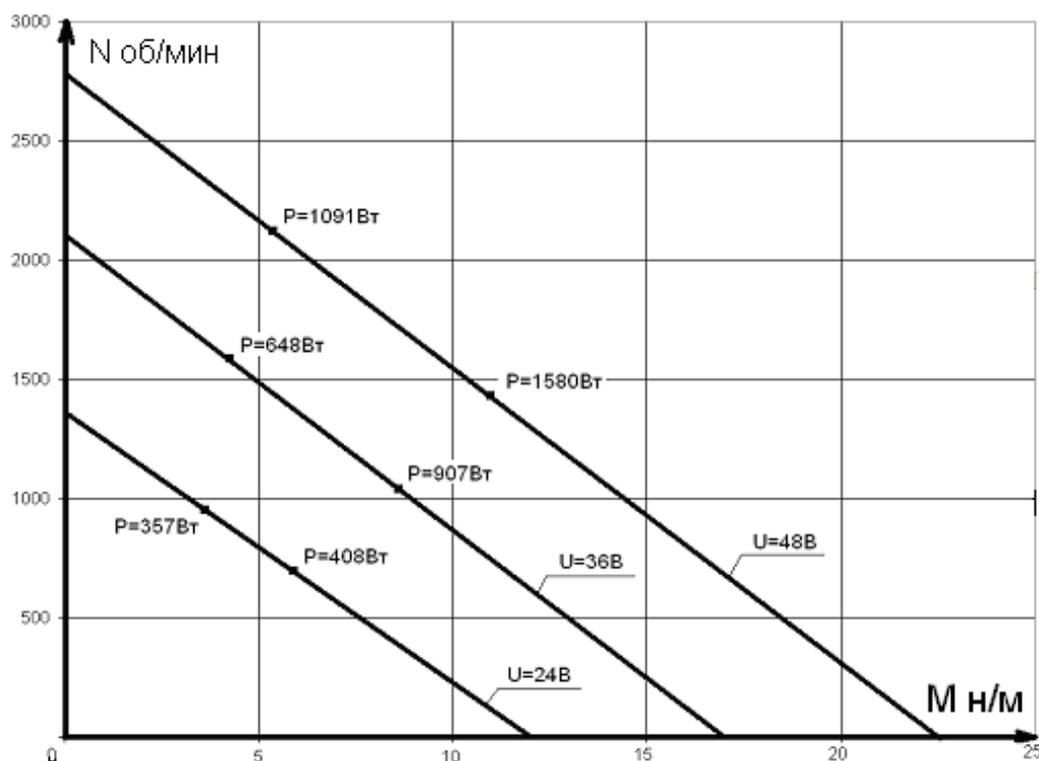


Рис. 2. Механические характеристики вентильного двигателя

даёт значение среднего тока обмоток статора приблизительно 50 A , что соответствует предельно допустимому току в обмотках статора в генераторном режиме. Следовательно, можно считать, что полученная мощность 1580 Вт является рабочей для длительного режима. Кратковременно мощность можно повысить либо увеличением напряжения питания, либо форсированием тока возбуждения. Для одной из точек на механической характеристике с помощью экспериментальных данных для тока и напряжения определена потребляемая мощность, а также рассчитана для этой точки соответствующая механическая мощность. По этим данным для испытуемого электродвигателя в этой точке рассчитан КПД без учета потерь на возбуждение, который составил 81% . С учетом потерь на возбуждение ($2,5\text{ A}$ и 12 В) КПД составил $78,4\%$.

Выводы

По результатам проделанной работы можно сделать выводы:

1. Вентильный двигатель с электромагнитным возбуждением, также как и вентильный двигатель с постоянными магнитами, имеет мощность в режиме двигателя примерно в 2-2,5 раза большую, чем в генераторном режиме, что соответствует данным, приведенным в работе [2].

2. На базе генератора с напряжением 14 В вентильный двигатель обеспечивает номинальную мощность при питании от источника с напряжением около 48 В . Соответственно для вентильного двигателя на базе генератора на 28 В нужно напряжение около 96 В .

3. Полученные сравнительно низкие значения питающих напряжений позволяют использовать в качестве ключей трехфазного моста инвертора полевые MOSFET транзисторы, что по сравнению с IGBT транзисторами снизит стоимость блока инвертора и уменьшит падение напряжения на ключах (повысит к.п.д.).

Поскольку в автомобильной технике применяются синхронные генераторы мощностью до $4,2\text{ кВт}$ и более, возможно создание подобных вентильных двигателей на мощности до $5-15\text{ кВт}$. Это позволит создать недорогой и технологичный гибридный автомобиль согласно вышеописанной концепции.

Список литературы

1. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе / И.Е. Овчинников. — СПб: Корона-век, 2007. — 336 с.
2. Бажинов О.В. Гібридні автомобілі / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков та інш. — Харків: ХНАДУ, 2008. — 327 с.

Стаття надійшла до редакції 08.05.09

© Бажинов А.В., Двадненко В.Я., Колесников А.В., 2009