

УДК 629.3+504

**Смирнов О.П., к.т.н., Калмыков В.И., к.т.н., Боженков В.С.,  
Быков А.М., аспирант, Воробьев Д.А., магистр**

**ХНАДУ, г. Харьков**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВЕНТИЛЬНЫХ МАШИН В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ АВТОМОБИЛЕЙ**

*Проанализированы функциональные возможности вентильных электрических двигателей в тяговых электроприводах электромобилей и гибридных силовых установках автомобилей*

### ***Введение***

Экологические и экономические свойства автотранспортного средства (АТС) зависят в первую очередь от энергетических характеристик тяговой силовой установки. В данном контексте электропривод или гибридные силовые установки выглядят более перспективно по сравнению с традиционными силовыми установками. Это связано в первую очередь с тем, что для привода автомобиля используется экологически чистый вид двигателя – электрический.

### ***Анализ исследований и публикаций***

Вентильные двигатели в настоящее время являются самыми перспективными из всех типов электродвигателей, применяемых в современных регулируемых электроприводах. Это объясняется их конструктивными и технико-эксплуатационными преимуществами по сравнению с существующими типами электрических машин. Основные положительные свойства вентильных электрических машин - это высокий КПД (более 90 %) и надежность. Использование вентильных машин для привода электромобилей или в составе гибридных силовых установок автомобилей обусловлено еще и тем, что они имеют высокий пусковой момент, хорошую помехоустойчивость, возможность работы в средах с высокой температурой, высокое быстродействие. Кроме того, они имеют практически неограниченный диапазон регулирования частоты вращения и возможность ее регулирования по различным законам [1,2].

В настоящее время изготовлением вентильных электрических машин занимаются практически все ведущие электромашиностроительные компании (“Siemens”, “Bosch”, “General Electric” и многие другие). Специально для нужд автомобильного транспорта разрабатывают и изготавливают вентильные машины компании “Toyota”, “Honda”, “Mitsubishi”, в том числе и для установки в мотор-колеса электромобилей.

### ***Цель и постановка задачи***

Проблему создания экологически чистых транспортных средств невозможно решить без исследования функциональных возможностей основных компонентов системы, поэтому целью данной работы является проведение анализа функциональных возможностей вентильных электрических двигателей для их использования в тяговых электроприводах гибридных силовых установок автомобилей. Основные задачи данного исследования – это анализ структуры и принципа действия вентильных машин, а также исследование устойчивой работы тягового вентильного двигателя для привода автомобиля.

### ***Принцип действия вентильных машин***

Принцип действия вентильных машин основан на тех же электромагнитных явлениях, которые используются в традиционных электрических машинах. По физическим процессам, которые в них протекают, они близки к коллекторным машинам постоянного тока [3]. Элек-

трехфазная часть вентильного двигателя, т. е. самого тягового электрического двигателя, аналогична известным структурным модификациям синхронных машин. Конструктивно трехфазную обмотку якоря размещают на неподвижном статоре, а на вращающемся роторе – магнитные полюса (постоянные магниты), которые осуществляют магнитоэлектрическое возбуждение. Благодаря применению высококоэрцитивных постоянных магнитов из материалов «железо-неодим-бор» и использованию специальных конструктивных решений в активных частях магнитной системы эти двигатели имеют оптимальные габаритно-массовые параметры и значительную перегрузочную способность. Именно поэтому вентильные двигатели нашли свое применение в мотор-колесах.

При подаче на трехфазную обмотку статора переменного напряжения в вентильном электродвигателе возникает вращающееся магнитное поле, которое, взаимодействуя с полюсами постоянных магнитов ротора, создает крутящий момент (рис. 1,а). Крутящий момент практически пропорционален силе тока, а скорость вращения ротора регулируется частотой переменного тока. Оптимальное управление угловым смещением оси магнитов ротора и вращающимся магнитным полем статора позволяет получить на валу двигателя высокий полезный крутящий момент во всех скоростных режимах. В режиме генератора вращающееся магнитное поле ротора наводит ток в обмотке статора.

Система вентильной коммутации состоит из датчика синхронизирующих сигналов, системы управления и управляемого коммутатора (рис. 1,б). Датчик синхронизирующих сигналов, определяя порядок и частоту переключения элементов коммутатора, представляет собой либо датчик положения ротора (при позиционном управлении), либо датчик фазы напряжения (при фазовом управлении). Система управления обеспечивает формирование и усиление синхронизирующих сигналов, а управляемый коммутатор реализует бесконтактное переключение в силовых цепях вентильного двигателя.

Зависимости между основными усредненными электромагнитными и механическими показателями вентильного двигателя могут быть представлены формулами, подобными известным аналогичным формулам для коллекторных машин постоянного тока, а именно:

а) среднее значение противо-ЭДС двигателя

$$E_n = K_e K_u \Phi \omega_d, \quad (1)$$

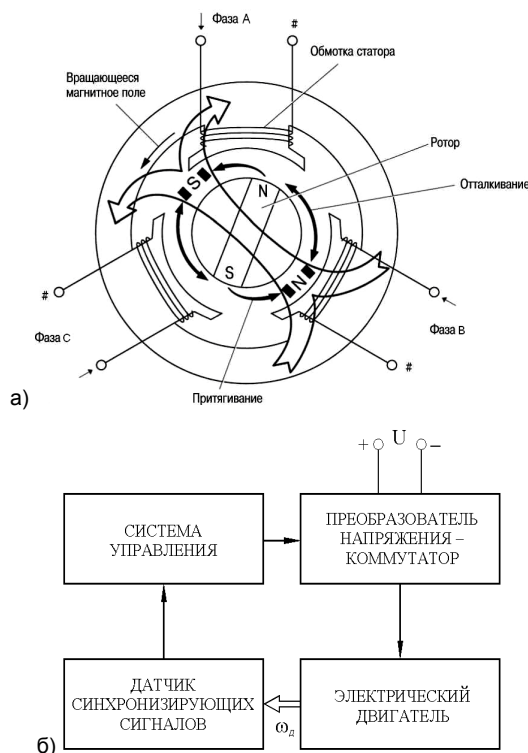
где  $K_e$  – конструктивный коэффициент ЭДС,  $K_u$  – коэффициент инвертирования коммутатора,  $\Phi$  – полный магнитный поток с учетом реакции якоря и рассеяния,  $\omega_d$  – угловая частота вращения двигателя;

б) среднее значение напряжения, приложенного к двигателю

$$U = E_n + I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{я}}$  – среднее значение потребляемого двигателем тока,  $R_{\text{я}}$  – эквивалентное активное сопротивление цепи якоря двигателя;

в) угловая частота вращения двигателя с учетом выражений (1) и (2)



$U$  – напряжение постоянного тока;

$\omega_d$  – угловая скорость вращения двигателя.

Рис. 1. Конструкция вентильного двигателя (а) и функциональная схема электропривода (б)

$$\omega_{\partial} = \frac{U - I_{я} R_{я}}{K_e K_u \Phi}; \quad (3)$$

г) электромагнитная мощность двигателя

$$P_{\partial} = E_n I_{я}; \quad (4)$$

д) электромагнитный момент двигателя с учетом выражения (3)

$$M = \frac{P_{\partial}}{\omega_{\partial}} = K_m \cdot K_u \cdot \Phi \cdot I_{я}, \quad (5)$$

где  $K_m$  – конструктивный коэффициент момента.

Специфика вентильных двигателей для приведенных выражений проявляется в наличии коэффициента  $K_u$  и использовании полного потока  $\Phi$  с учетом реакции якоря. Если реакция якоря проявляется слабо, то вентильные двигатели по протекающим в них процессам ближе к двигателям постоянного тока, чем к синхронным двигателям [2]. Проведен анализ устойчивой работы вентильного двигателя для привода автомобиля.

Согласно выражениям (1 – 5) скорость вращения вентильного двигателя можно регулировать, изменяя напряжение питания, активное сопротивление в цепи якоря, ток возбуждения при электромагнитном возбуждении и коэффициент инвертирования. Последний способ является специфичным для вентильного двигателя. Кроме того, определив зависимость напряжения, приложенного к двигателю, от тока якоря двигателя, т. е.  $U = f(I_{я})$ , нетрудно определить внешнюю характеристику источника электроэнергии, которую он должен иметь согласно заданной характеристике АТС, учитывая также соизмеримость мощности, необходимой для движения, и мощностей вентильного электропривода.

Устойчивая работа такого тягового двигателя возможна при условии, что

$$M = M_c, \quad (6)$$

где  $M_c$  – момент сопротивления на валу, обусловленный приводом, на который работает двигатель.

Зависимость  $M_c = f(\omega_{\partial})$  часто называют статической характеристикой потребителя или характеристикой сопротивления. При изменении скорости электродвигателя  $\omega_{\partial}$  в общем случае изменяются как момент  $M$ , так и  $M_c$ . От того, как происходит такое изменение, зависит степень устойчивости работы тягового электродвигателя.

Известно [4], что характеристика сопротивления АТС, определяемая в основном дорожными условиями и режимом работы тягового двигателя, близка к квадратичной параболе со смещенной относительно начала координат вершиной. Совмещение в одной системе координат обобщенной механической характеристики тягового вентильного двигателя и характеристики сопротивления АТС (рис. 2) показывает, что равновесный режим работы двигателя может поддерживаться в течение конечного интервала времени только при выполнении условия (6).

Следовательно, положение устойчивой работы тягового электропривода определяется точкой А, в которой пересекаются указанные характеристики.

Если скорость вращения электродвигателя под действием каких-либо возмущающих воздействий изменится, то возникнет соответствующий динамический момент  $M_j$  (положительный или отрицательный), под воздействием которого скорость вращения вернется к прежнему значению:

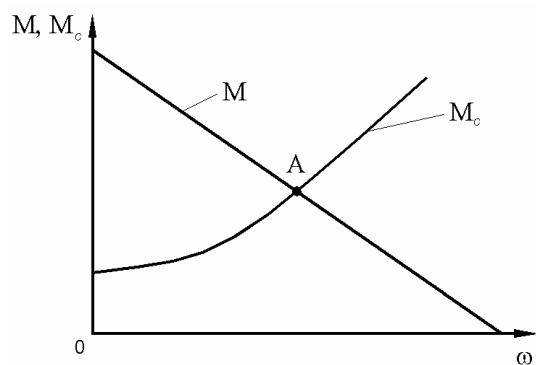


Рис. 2. Условие устойчивой работы тягового электродвигателя

$$M_j = M - M_c. \quad (7)$$

Таким образом, для устойчивой работы тягового электродвигателя необходимо, чтобы при уменьшении скорости вращения на величину  $d\omega_\delta$  вращающий момент получал положительное приращение  $+dM$ , а момент сопротивления  $M_c$  получал отрицательное приращение  $-dM_c$ , и наоборот. Итак, устойчивая работа тягового электропривода автомобиля будет обеспечена во всех случаях, когда

$$\frac{dM}{d\omega_\delta} < \frac{dM_c}{d\omega_\delta}, \quad (8)$$

а неустойчивая работа будет иметь место во всех случаях, когда

$$\frac{dM}{d\omega_\delta} > \frac{dM_c}{d\omega_\delta}. \quad (9)$$

Тогда оценкой устойчивости режима работы электродвигателя может служить отношение

$$F_\delta = \frac{dM_c - dM}{d\omega_\delta}, \quad (10)$$

которое называется фактором устойчивости двигателя [4].

Если  $F_\delta > 0$ , то тяговый вентильный двигатель имеет положительное самовыравнивание и режим работы будет устойчивым, а если  $F_\delta < 0$ , то двигатель имеет отрицательное самовыравнивание и режим работы будет неустойчивым.

Современные электронные системы управления и достижения в области энергетической электроники позволяют синтезировать микропроцессорный силовой коммутатор, который способен осуществлять регулирование скорости вращения вентильных электродвигателей по различным законам в очень широком диапазоне. Это обеспечивает получение требуемой кратности скорости вращения и электромагнитного момента, а также необходимых электромеханических и регулировочных характеристик.

Следовательно, согласно выполненным теоретическим исследованиям основного уравнения движения тягового электропривода с вентильным электродвигателем установлено, что он обладает достаточным запасом устойчивости и имеет более гибкие регулировочные характеристики, что позволяет при соответствующей системе управления получить нужные тяговые характеристики АТС.

### **Выводы**

Проведенный анализ функциональных возможностей и электромеханических характеристик вентильных электродвигателей, а также достижения в области современной силовой электроники и микропроцессорной техники свидетельствуют о том, что имеются реальные предпосылки для применения тяговых электродвигателей нового поколения для привода электромобилей или в составе гибридных силовых установок автомобилей.

### **Список литературы**

1. Вентильный электропривод: шанс для российских производителей // Оборудование: рынок, предложение, цены. – 2004. – № 1. – С. 17-19.
2. Извеков В.И., Кузнецов В.А. Вентильные электрические двигатели. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – 180 с.
3. Розанов Ю.К., Соколова Е.М. Электронные устройства электромеханических систем. – М.: Academia, 2004. – 270 с.
4. Крутов В.И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект. – М.: Машиностроение, 1979. – 472 с.

Стаття надійшла до редакції 08.06.07

© Смирнов О.П., Калмиков В.И., Боженов В.С., Биков О.М., Воробйов Д.О., 2007