

Application brushless machines with combine excitation for a hybrid car and an electric car

Gandzha S.A., Kiessh I.E.
South Ural State University
Chelyabinsk, Russian Federation

Abstract. This article shows advantages of application the brushless machines with combined excitation (excitation from permanent magnets and excitation winding) for the hybrid car and the electric car. This type of electric machine is compared with a typical brushless motor and an induction motor. The main advantage is the decrease of the dimensions of electric machine and the reduction of the price for an electronic control system. It is shown the design and the principle of operation of the electric machine. The machine was modeled using Solidworks program for creating design and Maxwell program for the magnetic field analysis. The result of tests is shown as well.

Keywords: brushless electric machine, combined excitation, permanent magnet, excitation coil, magnetic flow control.

Utilizarea mașinilor ventil electrice cu excitație combinată pentru transport electric hibrid

Gandja S.A., Chiesș I.E.
Universitatea Națională de Stat Ural-Sud
or. Celiabinsk, Federația Rusă

Rezumat. În articolul sunt demonstrate avantajele de utilizare a mașinii ventil cu excitație combinată (excitație de la magneți permanenți și de la înfășurarea de excitație) în sistemele electrice de transmisie a mijloacelor de transport comparație cu mașina magnetoelectrică cu ventile, cu mașina cu ventile cu inducție, și cu mașina asincronă. Avantajul constă în micșorarea gabaritelor mașinii de acest tip și a sistemului electronic de comandă, deoarece funcția de transmisie a semnalelor de comandă fi efectuată, utilizând circuitul de excitație de curent cu intensitate loasă. Se descrie construcția patentată și principiul de funcționare a ei. Este efectuată modelarea câmpurilor electromagnetice cu utilizarea metodei elementelor finite. Sunt prezentate rezultatele de testare a mostrelor experimentale.

Cuvinte-cheie: mașina electrică cu ventile, excitație combinată, magneți permanenți, înfășurare de excitație, reglarea fluxului magnetic.

Применение вентиляльных машин комбинированного возбуждения для гибридного и электротранспорта

Ганджа С.А., Киесш И.Е.
«Южно-Уральский государственный университет»
г. Челябинск, Российская Федерация

Аннотация. В статье показано преимущество применения вентиляльной машины комбинированного возбуждения (возбуждения от постоянных магнитов и от обмотки возбуждения) для электрической трансмиссии транспортных средств по сравнению с вентиляльной магнитоэлектрической машиной, вентиляльно-индукторной машиной и асинхронной машиной. Оно заключается в уменьшении габаритов самой машины и электронной системы управления, которая может осуществляться по слаботочной цепи возбуждения. Дано описание запатентованной конструкции и принципа ее действия. Показано моделирование электромагнитных полей с применением метода конечных элементов. Приведены результаты тестирования опытных образцов.

Ключевые слова: вентиляльная машина, комбинированное возбуждение, постоянные магниты, обмотка возбуждения, регулирование магнитного потока.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наметилась тенденция перехода автомобильного транспорта на гибридный и электротранспорт. Правительства многих стран объявили переход на электромобили в 2015-2020 г., одобрив соответствующие проекты на

развитие электротранспорта в больших городах, которые сильно страдают от загрязнения воздуха. Все ведущие автомобильные фирмы ведут научные и инженерные работы в этом направлении. Каждый год рынок электромобилей быстро растет. По прогнозам консалтинговой компании PricewaterhouseCoopers мировое

производство электромобилей будет ежегодно увеличиваться на 500 тысячам штук в год.

Не смотря на достигнутые результаты в этой области, основные технические проблемы не решены и продолжают нарастать по мере развития этой индустрии. Окончательно не решен вопрос не только кинематической схемы и компоновки гибрида, но выбора типа электрической машины. На энергетическом факультете ЮУрГУ в течении последних 10 лет проводятся эти исследования. В данной статье показаны результаты этой работы, в частности, возможности применения вентильной машины комбинированного возбуждения для электротрансмиссии транспортного средства.

Выбор типа электрической машины

Для электротрансмиссии транспортного средства конкурентоспособным может быть только вариант бесконтактной управляемой машины. К таки можно отнести:

- асинхронную частотно регулируемую машину;
- синхронную частотно-регулируемую машину с постоянными магнитами;
- вентильную электрическую машину постоянного тока с дискретной коммутацией;
- вентильно-индукторную машину постоянного тока с дискретной коммутацией.

В рамках данной статьи приведем краткий критический анализ предложенных вариантов применительно к электротрансмиссии транспорта.

Асинхронная машина при прочих равных условиях проиграет вариантам с использованием мощных постоянных магнитов по габаритным размерам. Она не имеет внутри себя источников для создания поля возбуждения в виде обмотки возбуждения или постоянных магнитов и вынуждена брать эту энергию из внешней цепи через якорную обмотку. Соответственно, якорь для выполнения этой функции должен иметь габариты на 5-15 % больше, по сравнению с синхронной и вентильной машиной. При этом частотное регулирование по силовой цепи якоря требует мощной и дорогой электроники.

Аналогичные недостатки по габаритам электродвигателя, сложности и объему силовой электроники можно отнести к вентильно-индукторной машине. Это

подтверждает практика применения его для электробульдозера на ООО НТЦ «Приводная техника» г. Челябинск.

Синхронный частотно-регулируемый привод имеет преимущества перед выше названными по размерам электрической машины, но широкое применение его ограничивает проблема с пуском и сложность реализации векторного управления, которая порой не требуется для привода колес.

По приведенным выше показателям вентильная машина постоянного тока с дискретной коммутацией выглядит наиболее предпочтительно. Сама электрическая машина с применением мощных коэрцитивных магнитов имеет компактное исполнение. Силовая электроника, реализующая дискретную коммутацию, достаточно проста. Но практика использования этого привода на ОАО НПО «Электромашина» г. Челябинск показала, что возможности регулирования частоты вращения для него ограничены. Приходится в двигатель закладывать две якорные обмотки: одну на низкие обороты и большой момент, другую на высокие обороты и маленький момент. В противном случае габаритные размеры силовой электроники, которые определяются током и напряжением превысили бы в несколько раз габариты самой электрической машины. Такой проблемы бы не возникло, если бы в машину была заложена возможность регулирования магнитного потока поля возбуждения.

В связи с этим возникла задача разработки вентильной машины постоянного тока с дискретной коммутацией комбинированного возбуждения, которая бы содержала все преимущества вентильной магнито-электрической машины и исключала ее недостатки.

ОСНОВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА МАШИНЫ КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Машина с комбинированным возбуждением это вращающаяся электрическая машина, возбуждаемая постоянными магнитами и обмотками возбуждения [1].

Оценим качественно объем системы возбуждения при применении обмотки возбуждения и при применении постоянных

магнитов, обозначив линейный размер через "а".

При электромагнитном возбуждении (от обмотки возбуждения) магнитный поток зависит от площади поперечного сечения магнитопровода и площади поперечного сечения обмотки. То есть магнитный поток пропорционален линейному размеру в 4 степени:

$$\Phi_{OB} \equiv a^4,$$

где Φ_{OB} - магнитный поток от обмотки возбуждения

Как известно, мощность, идущая при этом на возбуждение, составляет 5-15% от номинальной мощности машины [2], поэтому электроника управления имеет малые габариты и достаточно дешевая.

При магнитоэлектрическом возбуждении (от постоянных магнитов) магнитный поток зависит от объема постоянного магнита, то есть от линейных размеров в 3 степени:

$$\Phi_{PM} \equiv a^3,$$

где Φ_{PM} - магнитный поток от постоянных магнитов. При этом постоянные магниты имеют большое магнитное сопротивление для внешней магнитной цепи. Практически невозможно провести внешнее магнитное поле через объем постоянного магнита. По этой причине магнитоэлектрические машины не регулируются по цепи возбуждения, что ограничивает их применение. Регулирование по якорной цепи, через которую проходит 95-85 % номинальной мощности, требует дорогостоящей электроники, которая занимает при этом существенный объем. Машина комбинированного возбуждения позволяет изменять магнитный поток в широких пределах, так как имеет возможность магнитный поток от обмотки возбуждения как вычитать от магнитного потока постоянных магнитов, так и прибавлять к нему.

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_{PM} \mp \Phi_{OB},$$

где Φ_{Σ} - результирующий магнитный поток.

Таким образом, применение машины комбинированного возбуждения позволяет уменьшить габариты за счет использования мощных высококоэрцитивных магнитов,

упростить и удешевить электронику, позволяющую регулировать момент и обороты по цепи возбуждения. При этом появляется возможность использовать преимущества двух систем возбуждения и исключить их недостатки. Требуется только решить инженерную задачу разработки такой конструкции.

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ВЕНТИЛЬНОЙ МАШИНЫ КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

На Энергетическом факультете ЮУрГУ в течение ряда лет велись научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию вентильных машин постоянного тока комбинированного возбуждения. Описание конструкции и принципа работы одной из них приводятся ниже [3]. На рис.1 представлен продольный разрез машины. На рис.2 представлен поперечный разрез машины.

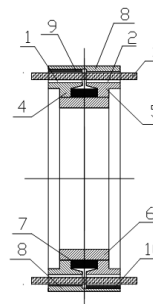


Рис. 1. Продольный разрез машины комбинированного возбуждения.

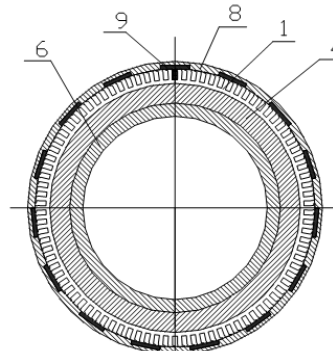


Рис. 2. Поперечный разрез машины комбинированного возбуждения.

Машина состоит из статора и ротора. Статор содержит шихтованные пакеты 1 и 2 с пазами. Пазы пакетов в осевом направлении совпадают. В пазах пакетов расположена

многофазная обмотка 3. Шихтованные пакеты напрессованы на массивные детали магнитопровода 4 и 5. Детали 4 и 5 насажены на втулку 6. Между пакетами магнитопровода расположена неподвижная обмотка возбуждения 7. Ротор генератора расположен снаружи статора. Он имеет массивные полюса 8 и постоянные магниты 9 и 10. Постоянные магниты и полюса чередуются между собой, располагаясь по окружности. При этом они образуют два кольца, которые охватывают шихтованные пакеты 1 и 2. Кольца расположены между собой таким образом, что в осевом направлении напротив полюса 8 находится постоянный магнит 9 или 10. Магниты 9 и 10 имеют радиальную намагниченность, при этом в одном кольце магниты имеют «южную» намагниченность 9 на поверхности, обращенной к пакету, в другом кольце - «северную» 10.

Машина работает следующим образом. При питании обмотки возбуждения 7 постоянным током она создает магнитный поток, который замыкается по пути: шихтованный пакет 1, воздушный зазор, массивный полюс 8 первого кольца, спинка ротора, массивный полюс 8 второго кольца, воздушный зазор, шихтованный пакет 2, деталь магнитопровода 5, втулка 6, деталь магнитопровода 4.

Магнитный поток, который создается постоянными магнитами замыкается по следующему пути: шихтованный пакет 1, воздушный зазор, «южный магнит» 9, спинка ротора, «северный» магнит 10, воздушный зазор, шихтованный пакет 2, деталь магнитопровода 5, втулка 6, деталь магнитопровода 4. Таким образом, магнитные потоки имеют общие участки только во втулке и спинке ротора. В остальных участках магнитопровода магнитные потоки не пересекаются. Направление магнитного потока от постоянных магнитов не меняется. Направление потока от обмотки возбуждения зависит от полярности источника питания, к которому она подключена. При этом ЭДС от обмотки возбуждения может, как прибавляться к ЭДС постоянных магнитов, так и вычитаться из него, что обеспечивает глубокое регулирование по цепи возбуждения.

На данную конструкцию имеется патент Российской Федерации 2244996.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИИ НА БАЗЕ МАШИН КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЛЯ ГИБРИДНОГО ТРАНСПОРТА

Как и для всякой электрической машины, для вентильной машины комбинированного возбуждения применим принцип обратимости. Она может работать и в режиме генератора и в режиме двигателя. Применение машины комбинированного возбуждения, как для генератора, так и для тяговых двигателей, дает существенные преимущества перед другими типами электротрансмиссий. При этом предлагаются следующие конструктивные решения:

1. Генератор встраивается в корпус двигателя внутреннего сгорания

2. Силовая электроника (для генератора это трехфазный выпрямительный мост, для двигателя это коммутатор с дискретной коммутацией) встраивается в электрические машины.

3. Управление приводом осуществляется по слаботочной цепи возбуждения

Для генератора таким образом менять выходное напряжение от 0 до номинала с возможностью перегрузки.

Для двигателя возможность менять возбуждение позволит в широком диапазоне изменять частоту вращения.

На рис. 3 приведена функциональная схема электротрансмиссии для варианта гибридного транспорта.

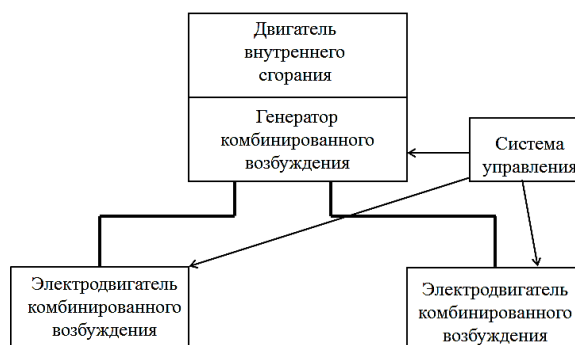


Рис.3. Функциональная схема электротрансмиссии

Электротрансмиссия гибридного транспорта в представленном функциональном исполнении имеет следующие основные преимущества:

1. Минимально возможные габаритные размеры силовых электрических машин за счет высоких удельных показателей машин комбинированного возбуждения.

2. Практически отсутствует объем для силовой электроники за счет встраивания ее в электрические машины.

3. Максимально упрощена система управления приводом за счет использования управления по слаботочной цепи возбуждения.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНЕ КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

При внешней простоте конструкции электромагнитные процессы, происходящие в машине комбинированного возбуждения, достаточно сложны. Поэтому для их анализа были использованы новейшие инженерные технологии, в частности программный комплекс Maxwell, реализующий метод конечных элементов для расчета магнитных полей. Программный комплекс позволяет определить все необходимые параметры и характеристики (ЭДС, напряжения, токи, момент, потери). Расчеты подтвердили работоспособность данной конструкции и ее эффективность.

ТРЕХМЕРНОЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГЕНЕРАТОРА И МОТОР-КОЛЕСА ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИИ

Особенность разработки электротрансмиссии заключается в том, что электрические машины должны быть встроены в габарит конкретного автомобиля. То есть для каждого автомобиля должен быть разработан свой дизайн генератора и двигателя, которые вписывались бы в необходимый объем.

На данном этапе Энергетический факультет ЮУрГУ предлагает только концепцию применения машин комбинированного возбуждения. Для конкретного применения этой концепции необходима проработка исполнения для конкретного автомобиля.

Ниже приводятся результаты моделирования и макетирования машин комбинированного возбуждения, выполненных для конкретных заказчиков.

Дизель-генераторная установка с высокими массо-энергетическими показателями ДСГУ8-П/28.5-2-М1

Основные параметры установки приведены в табл.1.

Таблица 1. Технические характеристики дизель-генераторной установки

Параметры	Величины
Номинальная мощность, кВт	8
Номинальное напряжение, В	28,5
Номинальный ток, А	280
Род тока	пост.
Марка дизеля	В 2Ч 8,2/7,8
Номинальная частота вращения, об/мин	3000
Расход топлива не более, кг/ч	2,5
Емкость топливного бака, л	10,0
Время непрерывной работы, ч	48
Габаритные размеры, мм	600*620*1030
Масса, не более, кг	180

Трехмерная модель собственно генератора комбинированного возбуждения представлена на рис.4.

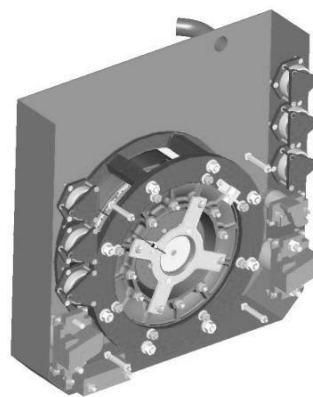


Рис. 4. Трехмерная твердотельная модель генератора

Работы проводились по заказу ОАО «Электроагрегат» г. Новосибирск. По его требованию необходимо было максимально сократить габариты и массу существующей серийной установки.

В результате применения генератора указанной конструкции габаритные размеры и масса установки сократилась примерно в 2 раза.

В рамках заказа был изготовлен опытный образец дизель-генераторной установки (рис.5).



Рис. 5. Опытный образец дизель-генераторной установки

Натурные испытания опытного образца подтвердили параметры, представленные в табл.1.

Применительно к электротрансмиссии в рамках научно-исследовательской работы, проводимой на факультете, был разработан проект мотор-колеса для легкового автомобиля, параметры которого представлены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры мотор-колеса

Тип	Пост. тока
Ном. напряжение, В	240
Максимальный ток, А	350
Мощность, кВт	35
Ном. частота вращения, об/мин	3000
Охлаждение	жидкостное
Габаритные размеры, мм, не более	420*120
Масса электродвигателя, кг	не более 40

Особенность предлагаемого мотор-колеса заключается в том, что оно представляет собой законченную сборку, которую планируется поставлять как комплектующее изделие для гибридного или электротранспорта. Оно содержит в себе вентильный двигатель комбинированного

возбуждения, силовой электронный коммутатор, встроенный редуктор, дисковую тормозную систему.

Трехмерная твердотельная модель мотор-колеса представлена на рис.6.

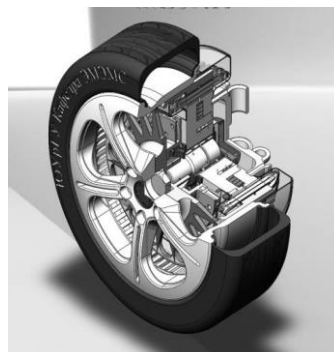


Рис.6. Трехмерная твердотельная модель мотор-колеса

Электромагнитные расчеты в программе Maxwell подтвердили заявленные характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные научные исследования и опытно-конструкторские работы применительно к электротрансмиссии транспортных средств позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Применение вентильных машин комбинированного возбуждения позволяют снизить габариты и стоимость привода за счет использования мощных постоянных магнитов для двигателей и генератора и применения слаботочной электроники для регулирования по цепи возбуждения.
2. Эффективность привода повысится, если данную концепцию применить комплексно, и для генератора, и для двигателей.
3. Достоверность предлагаемой концепции подтверждается сложными инженерными расчетами с применением метода конечных элементов и результатами тестирования опытных образцов.
4. Энергетический факультет ЮУрГУ владеет методами анализа и синтеза предлагаемых приводов и имеет возможность проведения НИОКР по предлагаемой тематике.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- [1] GOST 27471. [Rotating electric motors. Terms and definition] Mashini electriccheskie vraschaischiesia. Termini i opredelenia. (In Russian).
- [2] Kopilov I.P. [Electric machines] Elektricheskie mashini . 5 izdanie - Moskva: Visshaya shkola, 2006, 607 p. (In Russian).
- [3] Gandzha S.A., Erlisheva A.V. [Starter-generator for autonomous source of energy supply] Starter-generator dlia avtonomnih istochnikov pitaniy. Vestnik Iuzhno-uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria "Energetika", 2005, Vipusk 6. N 9, pp.84-86. (In Russian).

Сведения об авторах:



Ганджа Сергей Анатольевич - декан Энергетического факультета , заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» ЮУрГУ, д.т.н., сфера научных интересов – разработка вентильных электроприводов.
Gandja_sa@mail.ru



Киеш Ирина Егоровна - старший преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники» ЮУрГУ, сфера научных интересов – теория цепей, электромеханика и электромеханические системы
kieshie@list.ru