

## Электротрансмиссия транспортных средств на базе вентильных машин комбинированного возбуждения

ГАНДЖА С.А., КИЕСШ И.Е.

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

*Ключевые слова: вентильная машина, комбинированное возбуждение, постоянные магниты, обмотка возбуждения, регулирование магнитного потока, моделирование электромагнитного поля, средства транспорта*

Правительства многих стран объявили переход на электромобили в 2015–2020 гг., одоблив соответствующие проекты на развитие электротранспорта в больших городах, сильно страдающих от загрязнения воздуха. Ведущие автомобильные фирмы ведут научные и инженерные работы в этом направлении. По прогнозам аналитической компании Price Waterhouse Coopers мировое производство электромобилей будет ежегодно увеличиваться на 500 тыс. в год.

В России военным системам и системам специального назначения дан новый импульс в развитии. На уровне правительства было заявлено, что развитие этих систем вновь ставится под государственный контроль. В связи с этим требования к трансмиссиям специального назначения возросли, порой, настолько, что их уже невозможно удовлетворить в рамках известных инженерных решений. Требуется новые научные исследования и разработки.

Следует отметить, что серьезные научные заделы в этой области имеются. В частности, заслуживают внимания разработки зарубежных фирм Toyota (модель Toyota Prius), Lexus (модель Lexus CT200h), Volkswagen (модель Golf 8). Из отечественных разработок следует отметить электротрансмиссии фирмы ООО «Русэлпром – Электропривод» [1].

И все же основные технические проблемы остаются не решенными и продолжают нарастать по мере развития исследований в этом направлении. Окончательно не определены не только кинематическая схема и компоновка, но и тип электрической машины. На энергетическом факультете Южно-Уральского государственного университета в те-

чение последних 10 лет проводятся эти исследования. В статье показаны результаты этой работы, в частности, возможности применения вентильной машины комбинированного возбуждения для электротрансмиссии транспортного средства.

**Выбор типа электрической машины.** Трансмиссия транспортного средства – это совокупность сборочных единиц, соединяющих двигатель внутреннего сгорания с ведущими колёсами. Она предназначена для передачи крутящего момента от двигателя к колесам, изменения тяговых усилий, скорости и направления движения.

Возможны три варианта трансмиссии – механическая, гидромеханическая и электрическая. Анализ достоинств и недостатков первых двух оставим за рамками данной статьи. Отметим только, что для них принципиально невозможно использовать накопление и использование (рекуперацию) электрической энергии в процессе движения транспортного средства. Электротрансмиссия включает электрический генератор, тяговый электродвигатель (или несколько), электрическую систему управления. Основное достоинство электротрансмиссии – обеспечение наиболее широкого диапазона автоматического изменения крутящего момента и силы тяги, а также отсутствие жёсткой кинематической связи между агрегатами, что позволяет создавать различные компоновочные схемы.

С точки зрения обеспечения надежности для электротрансмиссии транспортного средства конкурентоспособным может быть только вариант бесконтактной управляемой машины. К таким машинам можно отнести: асинхронную частотно-регулируемую; вентильно-индукторную; синхронную частотно-регулируемую с постоянными магнитами;

вентильную магнитоэлектрическую постоянного тока.

Проведем краткий критический анализ предложенных вариантов применительно к электротрансмиссии транспорта.

Асинхронная машина при прочих равных условиях проигрывает по габаритным размерам вариантам с использованием мощных постоянных магнитов. Она не имеет внутренних источников для создания поля возбуждения в виде обмотки возбуждения или постоянных магнитов и вынуждена забирать 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 машинами. 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 ее для электробульдозера на ООО НТЦ «Приводная техника» (Челябинск) [2].

Синхронный частотно-регулируемый привод имеет преимущества перед выше названными приводами по размерам электрической машины, но его широкое применение ограничивает сложность реализации векторного управления, которого, по-прежнему, 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 такого привода на ОАО НПО «Электромашин» (Челябинск) [3] показала, что возможности регулирования частоты вращения при этом ограничены. Приходится применять в двигателе две якорные обмотки: одну, предназначенную для работы на низких частотах вращения и большом моменте, другую – на высоких частотах вращения и малом значении момента. В противном случае габаритные размеры силовой электроники, которые определяются значениями тока и напряжения, превысили бы в несколько раз габариты самой машины. Такая проблема могла бы не возникнуть, если бы машина обладала возможностью регулирования магнитного потока поля возбуждения.

В связи с этим возникла задача разработки вентильной машины постоянного тока с дискретной коммутацией комбинированного возбуждения, которая имела бы преимущества вентильной магни-

тоэлектрической машины при отсутствии ее недостатков.

**Основные преимущества машины комбинированного возбуждения.** Такая машина возбуждается постоянными магнитами и обмотками возбуждения [4]. Оценим качественно объем, занимаемый системой возбуждения, при применении обмотки возбуждения постоянных магнитов, обозначив линейный размер через  $a$ .

При электромагнитном возбуждении (от обмотки возбуждения) магнитный поток зависит от площади поперечного сечения магнитопровода и площади поперечного сечения обмотки, т.е. магнитный поток пропорционален линейному размеру в четвертой степени:

$$\Phi_{\text{о.в}} \propto a^4,$$

где  $\Phi_{\text{о.в}}$  – магнитный поток от обмотки возбуждения.

Как известно, мощность, идущая при этом на возбуждение, составляет 5–15% номинальной мощности машины [3], поэтому электроника управления имеет малые габариты и достаточно дешевая.

При магнитоэлектрическом возбуждении (от постоянных магнитов) магнитный поток зависит от объема постоянного магнита, т.е. от линейных размеров в третьей степени:

$$\Phi_{\text{п.м}} \propto a^3,$$

где  $\Phi_{\text{п.м}}$  – 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 около 90% номинальной мощности, требует дорогостоящей электроники, занимающей при этом значительный объем.

Машина комбинированного возбуждения позволяет изменять магнитный поток в широких пределах, так как имеет возможность потока от обмотки возбуждения как вычитать от магнитного потока постоянных магнитов, так и прибавлять к нему:

$$\Phi_{\text{с}} = \Phi_{\text{п.м}} \mp m\Phi_{\text{о.в}},$$

где  $\Phi_{\text{с}}$  – 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 час-

тоту вращения 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 машины комбинированного возбуждения.** Реализация принципа комбинированного возбуждения возможна в различных исполнениях, одно из них приводится ниже [5].

На рис. 1 и 2 представлены продольный и поперечный разрезы машины.

Статор машины содержит шихтованные пакеты 1 и 2 с пазами, которые в осевом направлении совпадают. В пазы уложена многофазная обмотка 3. Шихтованные пакеты напрессованы на массивные

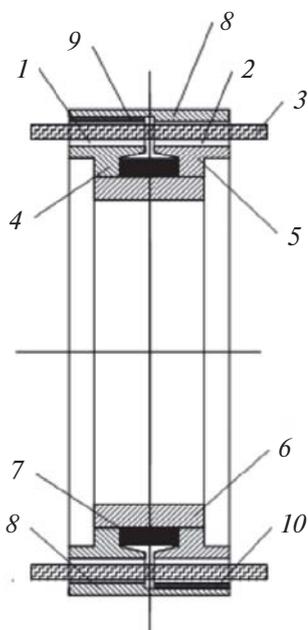


Рис. 1

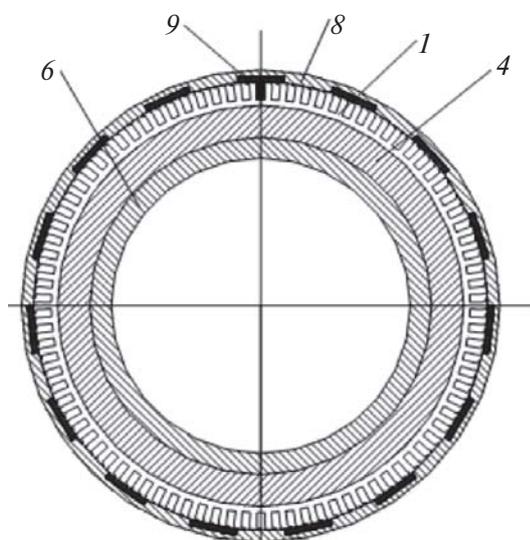


Рис. 2

детали магнитопровода 4 и 5, насаженные на втулку 6. Между пакетами магнитопровода находится неподвижная обмотка возбуждения 7. Ротор генератора, расположенный снаружи статора, имеет массивные полюса 8 и постоянные магниты 9 и 10. Постоянные магниты и полюса чередуются между собой по окружности, образуя два кольца, которые охватывают шихтованные пакеты 1 и 2. Кольца расположены так, что в осевом направлении напротив полюса 8 находится постоянный магнит 9 или 10, имеющие 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 от постоянных магнитов замыкается по 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, на остальных участках магнитопровода они 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 суммироваться с ЭДС постоянных магнитов, так и вычитаться из нее, что обеспечивает глубокое регулирование по цепи возбуждения.

На данную конструкцию получен патент Российской Федерации [6].

**Функциональная схема электротрансмиссии на базе машин комбинированного возбуждения для гибридного транспорта.** Как и всякая электрическая машина, вентиляционная машина комбинированного возбуждения может работать как генератором, так и двигателем. Это дает машинам комбинированного возбуждения существенные преимущества перед другими типами электротрансмиссий. При этом предлагаются следующие конструктивные решения: генератор встраивается в корпус двигателя внутреннего сгорания; силовая электроника (для генератора — трехфазный выпрямительный мост, для двигателя — коммутатор с дискретной коммутацией) встраивается в машину; управление приво-

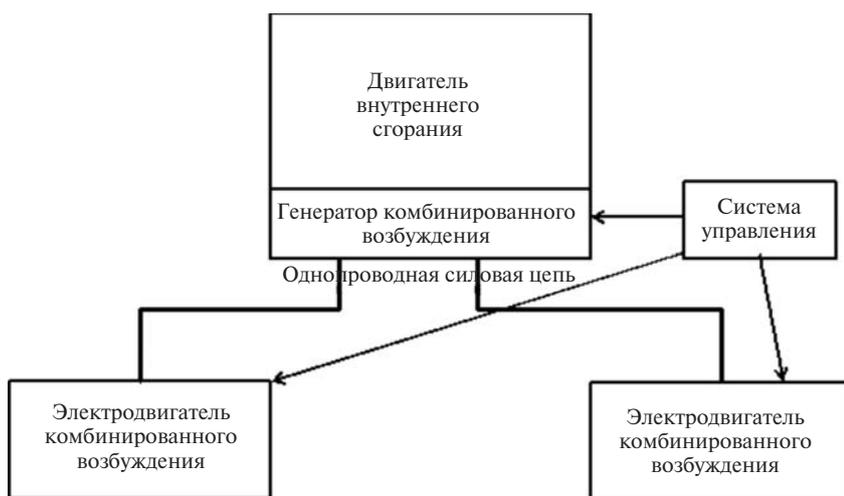


Рис. 3

дом осуществляется по слаботочной цепи возбуждения.

Для генератора таким образом возможно менять выходное напряжение от нуля до номинального значения, для двигателя возможность регулирования возбуждения позволит в широком диапазоне изменять частоту вращения.

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

Электротрансмиссия гибридного транспорта в представленном функциональном исполнении имеет следующие основные преимущества: минимально возможные габаритные размеры силовых электрических машин за счет высоких удельных показателей машин комбинированного возбуждения; практически отсутствие объема для силовой электроники за счет встраивания ее в электрические машины; максимальное упрощение системы регулирования привода за счет использования управления по слаботочной цепи возбуждения.

**Методика анализа электромагнитных процессов в машине комбинированного возбуждения.** При внешней простоте конструкции электромагнитные процессы 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 и позволяющий 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.** Особенность разработки электротрансмиссии в том, что электрические машины должны быть встроены в габарит конкретного автомобиля, для которого должен

быть разработан свой дизайн генератора и двигателя, которые вписывались бы в необходимый объем.

На данном этапе разработки (энергетический факультет ЮУрГУ) предлагают только концепцию применения машин комбинированного возбуждения. Для практического применения этой концепции необходима проработка исполнения для конкретного автомобиля.

Ниже приводятся результаты моделирования и макетирования машин комбинированного возбуждения, выполненных для конкретных заказчиков. Основные параметры дизель-генераторной установки с высокими массоэнергетическими

показателями ДСГУ8-П/28.5-2-М1:	
номинальная мощность, кВт	8
номинальное напряжение, В	28,5
номинальный ток, А	280
род тока	постоянный
марка дизеля	В 2С 8,2/7,8
номинальная частота вращения, об/мин	3000
расход топлива (не более), кг/ч	2,5
емкость топливного бака, л	10
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.

Работы проводились по заказу ОАО «Электроагрегат», Новосибирск. По требованию заказчика необходимо было максимально уменьшить габариты и массу существующей серийной установки.

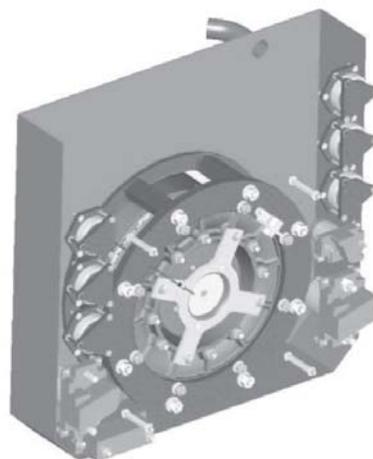


Рис. 4



Рис. 5

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

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

Натурные испытания опытного образца подтвердили значения параметров, представленные выше.

Применительно к электротрансмиссии в рамках научно-исследовательской работы, проводимой в ЮУрГУ, был разработан проект мотор-колеса для легкового автомобиля с параметрами:

тип	постоянного тока
номинальное напряжение, В	240
максимальный ток, А	350
мощность, кВт	35
номинальная частота вращения, об/мин	3000
охлаждение	жидкостное
размеры (не более), мм	420x120
масса электродвигателя (не более), кг	40

Предлагаемое мотор-колесо представляет собой законченную сборку, которую планируется поставлять как комплектующее изделие для гибридного или электротранспорта; включает вентильный двигатель комбинированного возбуждения, силовой электронный коммутатор, встроенный редуктор, дисковую тормозную систему. Трехмерная твердотельная модель мотор-колеса представлена на рис. 6.

Электромагнитные расчеты в программе Maxwell подтвердили заявленные характеристики.

**Вывод.** Применение вентильных машин комбинированного возбуждения позволяет уменьшить габариты и стоимость привода за счет использования мощных постоянных магнитов для двигателей и ге-

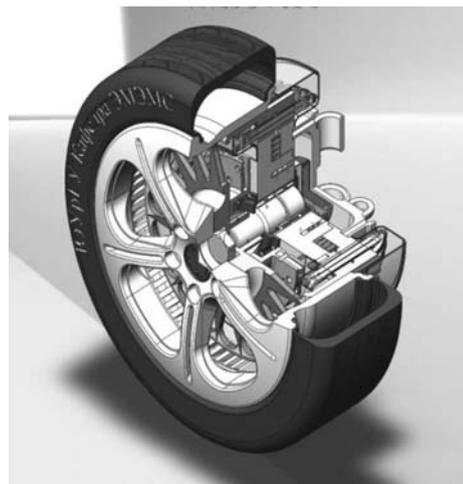


Рис. 6

нератора и применения слаботочной электроники для регулирования по цепи возбуждения. Эффективность привода повысится при комплексном применении данной концепции – для генератора и двигателей. Ее достоверность подтверждается сложными инженерными расчетами с применением метода конечных элементов и результатами тестирования опытных образцов.

Энергетический факультет ЮУрГУ имеет все возможности проведения исследований по предлагаемой тематике.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Официальный** сайт предприятия ООО «Русэлпром-Электротрипривод»: <http://www.autoengineer.org>
2. **Официальный** сайт предприятия ООО Научно-технический центр «Приводная техника»: <http://www.momentum.ru>
3. **Официальный** сайт предприятия ОАО «Электромашина»: <http://www.electromashina.ru>
4. **ГОСТ 27471.** Машины электрические вращающиеся. Термины и определения.
5. **Ганджа С.А., Ерлышева А.В.** Расчет магнитного поля постоянных магнитов стартер-генератора для автономных источников электроснабжения. – Труды VI Международного симпозиума «Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования» (Москва, 2–6 октября 2006 г.), т. 2, с. 111–115.
6. **Патент РФ № 2244996.** Генератор переменного тока/С.А. Ганджа, Е.В.Соломин, А.Д. Шауфлер. Оpubл. 20.01.05.

[26.10.15]

*Авторы: Ганджа Сергей Анатольевич окончил Челябинский политехнический институт в 1978 г. В 2013 г. защитил докторскую диссертацию «Вентильные электрические машины с аксиальным магнитным потоком. Анализ, синтез, внедрение в производство». Профессор, декан энергетического факультета Южно-Уральского государственного университета, Челябинск.*

*Киесш Ирина Егоровна – старший преподаватель кафедры теоретических основ электротехники Южно-Уральского государственного университета, Челябинск.*

*Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 2, pp. 52–57.*

## Electrical Transmission of Vehicles Constructed Using Converted-Fed Machines with Combined Excitation

**GANDZHA Sergei Anatol'yevich** (*South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia*) –  
*Professor, Dr. Sci. (Eng.)*

**KIESH Irina Egorovna** (*SUSU, Chelyabinsk, Russia*) – *Senior Lecturer*

*The article shows the advantage of using a converter-fed machine with combined excitation (from permanent magnets and field winding) for organizing electrical transmission of vehicles as compared with other types of machines: converter-fed magnetolectric, converter-fed inductor, and asynchronous ones. The advantage consists in that a converter-fed machine with combined excitation has a more compact design, and so is its electronic control system owing to the possibility of performing control via the low-current excitation circuit. The patented design of the machine and the principle of its operation are described. Simulation of the electromagnetic fields using the finite element method is shown, and the results from testing experimental models are given.*

**Key words:** *converter-fed machine, combined excitation, permanent magnets, field winding, magnetic flux control, simulation of electromagnetic field, means of transport*

### REFERENCES

1. **Ofitsial'nyi sait predpriyatiya OOO «Ruselprom-Elektroprivod»** (Official site of LLC): <http://www.autoengineer.org>
2. **Ofitsial'nyi sait predpriyatiya OOO Nauchno-tehnicheskii tsentr «Privodnaya tekhnika»** (Official site of LLC): <http://www.momentum.ru>
3. **Ofitsial'nyi sait predpriyatiya OAO «Electromachina»** (Official site of JSC): <http://www.electromashina.ru>
4. **GOST 27471. Mashiny elektricheskkiye vrashchayushchiyesya. Terminy i opredeleniya.** (Electric and rotating machines. Terms and determinations).
5. **Gandzha S.A., Erlysheva A.V. Trudy VI Mezhdunarodnogo simpoziuma «Perspektivy i tendentsii razvitiya elektrotekhnicheskogo oborudovaniya»** (Proc. of VI Intern. Symposium «Prospects and Trends in Electrical Equipment», Moscow, 2–6 October 2006), vol. 2, pp. 111–115.
6. **Patent RF No. 2244996. Generator peremennogo toka.** (AC Generator)/S.A. Gandzha, E.V. Solomin, A.D. Shauffer. Publ. 20.01.05.