

УДК 574.46

РАЗРАБОТКА ГСУ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

А. М. МАГАДЕЕВ¹, А. А. СТАРОСТИН², Р. Д. КАРИМОВ³

¹puma2000-174@mail.ru, ²alstarost35@mail.ru

¹⁻³ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Поступила в редакцию 25.04.2023

Аннотация. В рамках данной статьи рассмотрены гибридные силовые установки параллельного и последовательного типа. Области применения гибридных силовых установок. Дан обзор электрогенераторов для гибридных силовых установок.

Ключевые слова: ГСУ, гибридная силовая установка, электродвигатель, электрогенератор, ДВС, автомобиль с ГСУ.

ВВЕДЕНИЕ

Для современного машиностроения характерны установившиеся тенденции улучшения эксплуатационных свойств (производительность, экономичность, экологичность и др.) вновь проектируемых и модернизируемых машин.

Это является следствием, с одной стороны, жесткой конкуренции на мировом товарном рынке, и с другой – сознания обществом проблемы конечности сырьевых ресурсов и необходимости бережного отношения к богатствам природы и к окружающей среде, неотъемлемой частью которой является человек.

Поэтому в процессе совершенствования автомобильного транспорта значительные усилия направлены на снижение расхода топлива и токсичности выхлопных газов. Весьма перспективным направлением решения данных задач в настоящее время считается применение гибридных силовых установок. Анализ ранее проведенных работ в области исследования автомобиля с ГСУ показывает, что большинство исследований гибридных силовых установок транспортных машин направлено на теоретическое и экспериментальное изучение управления таким автомобилем и на изучение управления топливной экономичностью автомобиля с ГСУ, изучение автоматизированного синтеза и поиск оптимальных параметров энергосиловых установок.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ РАБОТЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ГИБРИДНОЙ УСТАНОВКИ

Схема работы последовательного гибридного транспорта проста: ДВС проворачивает напрямую соединенный с ним генератор, вырабатываемый генератором электрический ток, подается в электродвигатель, который, в свою очередь, приводит в движение колесо или колеса. Это избавляет от необходимости в коробке передач и сцеплении. Свое название схема получила потому, что поток мощности поступает на ведущие колеса, проходя ряд последовательных преобразований: из механической энергии, вырабатываемой двигателем внутреннего сгорания (ДВС), в электрическую, вырабатываемую генератором, и опять в механическую.

При этом часть энергии неизбежно теряется. Последовательный гибрид позволяет использовать ДВС малой мощности, причем он постоянно работает в диапазоне максимального КПД либо же его можно совсем отключить. При отключении ДВС электродвигатель и батарея должны быть в состоянии обеспечить необходимую мощность для движения. Поэтому они, в отличие от ДВС, должны быть более мощными, а значит, они имеют и большую стоимость [1].

Преимущество последовательных гибридных установок состоит в том, что дорогостоящая емкая аккумуляторная батарея не является их критически важным элементом – просто при ее отсутствии ДВС должен работать постоянно. Важной особенностью этой силовой установки является то, что сложения мощностей ДВС и электромоторов при вращении колес не происходит. Двигатель внутреннего сгорания никак не соединен с колесами такого автомобиля. Преимуществом такой схемы является возможность использования мотор-колес. Мотор-колесо представляет собой агрегат, объединяющий колесо и встроенные в него тяговый электродвигатель, силовую передачу и тормозную систему (таким образом, каждое мотор-колесо имеет индивидуальный привод. Электродвигатель может функционировать в двух режимах – тяговом и генераторном. В тяговом режиме вращение передается с вала якоря электродвигателя, работающего в двигательном режиме, через редуктор к внутреннему зубчатому венцу ведущего колеса. В генераторном режиме, используемом для электрического торможения, электродвигатель переходит в генераторный режим работы, а электроэнергия преобразуется в тепло на тормозном реостате (реостатное торможение) либо возвращается в электрическую сеть, либо применяется для зарядки аккумуляторов (рекуперативное торможение) [2].

Наиболее эффективна последовательная схема при движении в режиме частых остановок, торможений и ускорений, движении на низкой скорости, то есть в городе. Поэтому используют ее в городских автобусах и других видах городского транспорта. По такому же принципу работают также большие карьерные самосвалы, в которых необходимо передать большой крутящий момент на колеса и для которых не требуются высокие скорости движения. Например, на карьерных самосвалах БелАЗ мощный дизель-генератор питает электромоторы, интегрированные непосредственно в колеса. Такая схема позволяет передать на колеса мощное тяговое усилие, критически важное для таких машин, и при этом полностью избавиться от механической трансмиссии: карданных валов, коробок передач, дифференциалов, раздаточных коробок и т. д., которые для требуемой мощности имели бы просто колоссальную массу.

Недостатком, препятствующим широкому распространению автомобилей – последовательных гибридов, являются относительно большие габариты, масса и стоимость электрических трансмиссий (особенно если используются электрические машины постоянного тока). Однако с развитием электротехнической промышленности и массовым распространением разных видов электрического привода для последовательных гибридов открываются новые возможности [1].

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ РАБОТЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ГИБРИДНОЙ УСТАНОВКИ

Схема гибридной силовой установки параллельного типа запатентована еще в 1905 г. немцем Генри Пипером. Электромотор в данном случае выполняет вспомогательную роль. И ДВС, и электродвигатель механически соединены с колесами посредством дифференциала, который обеспечивает возможность их работы как по отдельности, так и совместно. Тяговый электромотор является дополнительным, он помогает резко ускоряться и трогаться с места. Для их согласованной параллельной работы используется компьютерное управление. При этом сохраняется необходимость в обычной трансмиссии, и двигателю приходится работать в неэффективных переходных режимах. Момент, поступающий от двух источников, распределяется в зависимости от условий движения: в переходных режимах (старт, ускорение) в помощь ДВС подключается электродвигатель, а в устоявшихся режимах и при торможении он работает как генератор, заряжая аккумулятор. Таким образом, в параллельных гибридах большую часть времени работает ДВС, а электродвигатель используется для помощи ему. Поэтому

параллельные гибриды могут использовать меньшую аккумуляторную батарею по сравнению с последовательными гибридами. Поскольку ДВС непосредственно связан с колесами, то и потери мощности значительно меньше, чем в последовательном гибриде [3].

Приверженцем такой схемы гибридов является компания Honda. Гибридная система этой компании получила название Integrated Motor Assist (интегрированный помощник двигателя). Она предусматривает прежде всего использование бензинового двигателя с увеличенным КПД. И лишь тогда, когда двигателю становится трудно, на помощь ему должен приходиться электрический мотор. В этом случае система не требует сложного и дорогостоящего силового блока управления, и, следовательно, себестоимость такого автомобиля оказывается ниже, кроме того, возможно ее применение вместе с механической коробкой передач, что еще больше уменьшает стоимость.

Система ИМА состоит из бензинового двигателя (который предоставляет основной ресурс мощности), электромотора, который предоставляет дополнительную мощность, и дополнительной батареи для электромотора. Когда автомобиль с обычным бензиновым двигателем замедляется, его кинетическая энергия гасится сопротивлением мотора (торможение двигателем) или рассеивается в виде тепла при нагреве тормозных дисков и барабанов [3].

Автомобиль с системой ИМА начинает тормозить электромотором. Таким образом, электромотор работает как генератор, вырабатывая электричество. Сохраненная при торможении энергия запасается в батарее. И когда автомобиль вновь начнет ускоряться, батарея отдаст всю накопленную энергию на раскрутку электромотора, который снова перейдет на свои тяговые функции. А расход бензина уменьшится ровно настолько, сколько энергии было запасено при предыдущих торможениях, не считая потерь, конечно. Компания Honda считает, что гибридная система должна быть максимально простой, электрический мотор выполняет лишь одну функцию – помогает двигателю внутреннего сгорания сэкономить как можно больше горючего. Как вариант, традиционный стартер и генератор могут быть полностью заменены на электродвигатель, который используется для запуска двигателя и его поддержки. Электромотор и батареи в данном случае также не предназначены для того, чтобы самостоятельно приводить автомобиль в движение [3].

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА

Рассмотрим на базе карьерного самосвала БЕЛАЗ 75603, предназначенного для транспортирования горной массы в разрыхлённом состоянии по технологическим дорогам на открытых разработках полезных ископаемых с различными климатическими условиями (табл. 1–2).

Таблица 1

Исходные данные

Номинальный режим работы	Продолжительный
Число пар полюсов	8
Номинальная мощность, кВт	1250
Частота вращения, об/мин	15000
Напряжение постоянного тока, В	600
Количество фаз статора	3
Тип постоянных магнитов	Sm ₇ Co ₂₈
Коэффициент мощности	0,9

Сравнение результатов расчета

Параметры генератора	Расчет в программе ANSYS Maxwell
Мощность, кВт	1282
Частота вращения, об/мин	15000
Номинальное напряжение, В	875,6
Активная длина, мм	460
Внешний диаметр статора, мм	317
Диаметр расточки статора, мм	233
Диаметр ротора по постоянным магнитам, мм	221
Частота тока, Гц	2000
Ток, А	933,02
КПД, %	99,75
Плотность тока, А/мм ²	6,4
Линейная нагрузка, А/мм	61,1
Активное сопротивление фазы при 20 °С, Ом	0,4859
Площадь паза в свету, мм ²	340,27
Коэффициент заполнения паза, %	64,65
Масса активной части, кг	162,12

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В процессе моделирования была рассмотрена модель магнитоэлектрического генератора (МЭГ), чтобы оценить влияние магнитной системы на выходные характеристики. Для построения математической модели генератора был использован метод конечных элементов, позволяющий наиболее точно описать электромагнитное поле электрической машины. Толщина магнитов составляет 20 мм. В модели используются полукруглые постоянные магниты.

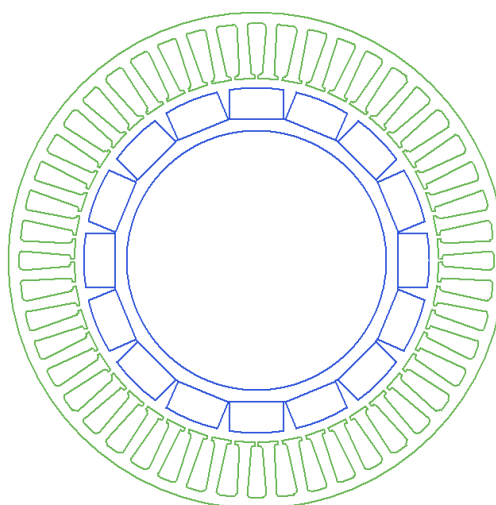


Рис.1. Модель МЭГ с полукруглой магнитной системой

Из-за неравномерного воздушного зазора, обусловленного геометрическими особенностями магнитной системы с полукруглыми ПМ, на результирующую магнитную индукцию оказывается значительное влияние. В связи с этим целесообразно проведение оценки влияния на выходные параметры МЭГ. Модель МЭГ была рассчитана и разработана в программном комплексе *Ansys Electromagnetic Suite* (рис.1)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены гибридные силовые установки для наземной транспортной техники, которые могут обеспечивать необходимую мощность.

Выполнен обзор на типы гибридных силовых установок для наземной транспортной техники.

Также был произведен расчет энергоэффективного магнитноэлектрического генератора приведена математическая модель и основные характеристики энергоэффективного магнитноэлектрического генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Наука и техника.** Последовательная гибридная силовая установка: от танка Маус до спорткаров [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://naukatehnika.com/posledovatel'naya-gibridnaya-silovaya-ustanovka-ot-tanki-maus-do-sportkarov.html>
2. **Тарантас ньюс** [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tarantas.news/posts/id29153-mkg7rylj4jdbqpwcgmz>
3. **Наука и техника.** Как работает гибридная силовая установка параллельного типа на автомобилях [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://naukatehnika.com/kak-rabotaet-gibridnaya-silovaya-ustanovka-parallelnogo-tipa-na-avtomobilyax.html>
4. **Власов А. И.** Предварительная оценка главных размеров электрических машин по постоянной Арнольда/ Власов А.И., Волокитина Е.В., Опалев Ю.Г. // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. №3. С. 28–30.
5. **Власов А. И.** Численное моделирование магнитного поля вентильных электродвигателей постоянного тока/ Волокитина Е.В., Власов А.И., Ники-тин В.В., Опалев Ю.Г.// Всероссийская научно-техническая конференция "Наука – производство – технологии – экология: Сб. мат-лов: В 7 т. Киров: Изд-во ВятГУ, 2018. Т. 3. ЭТФ. С.223-225.

ОБ АВТОРАХ

МАГАДЕЕВ Алексей Маратович, маг-т. каф. АТиТ. Дипл. Теплоэнергетика и теплотехника (УГАТУ, 2022).

СТАРОСТИН Алексей Андреевич, маг-т. каф. АТиТ. Дипл. Теплоэнергетика и теплотехника (УГАТУ, 2022).

КАРИМОВ Руслан Динарович, к.т.н. каф. АТиТ.

METADATA

Title: Development of HPP for ground transport equipment.

Authors: A. M. Magadeev ¹, A. A. Starostin ², R. D. Karimov ³

Affiliation:

^{1,2,3} Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹ puma2000-174@mail.ru, ² alstarost35@mail.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 3 (29), pp. 121-125, 2023. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: Within the framework of this article, hybrid power plants of parallel and sequential type are considered. Application areas of hybrid power plants. A review of electric generators for hybrid power plants is given.

Key words: hybrid power plant, electric motor, electric generator, internal combustion engine, car with HPP.

About authors:

MAGADEEV, Alexey Maratovich, Student, Dept. of Aviation heat engineering and heat power engineering (UGATU, 2022).

STAROSTIN, Alexey Andreevich, Student, Dept. of Aviation heat engineering and heat power engineering (UGATU, 2022).

KARIMOV, Ruslan Dinarovich, ass. Prof. of the Dept. of Aviation heat engineering and heat power engineering (UUST). Dipl. Magistr (USATU, 2012). Cand. of Tech. Sc. (USATU, 2018)