

КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДЛЯ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Петриченко Д. А., Папкин И. А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)», (107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д.38), e-mail: dmitry.petrichenko@gmail.com

В статье описана концепция системы эффективного преобразования энергии отработавших газов для когенерационных установок. Рассмотрен состав системы эффективного преобразования энергии отработавших газов. Проведен краткий анализ по составным частям системы, описаны достоинства и недостатки. Рассмотрена компоновка турбогенератора в выпускной системе двигателя внутреннего сгорания. Проведен сравнительный анализ применяемых турбин для турбогенератора. Проведен выбор наиболее предпочтительных электрических машин и сравнение их характеристик. Описана конструкция турбогенератора и рассмотрены характеристики основных составных частей. Представлена трехмерная модель макета системы эффективного преобразования энергии отработавших газов для когенерационных установок.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, когенерационные установки, системы рекуперации энергии, турбогенератор.

CONSTRUCTION OF ENERGY CONVERSION EXHAUST FOR CO-GENERATION POWER PLANTS

Petrichenko D. A., Papkin I. A.

Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow state university of mechanical engineering (MAMI)" (107023, Moscow, st. Bolshaya Semenovskaya, 38), e-mail: dmitry.petrichenko@gmail.com.

The paper describes the concept of the energy conversion efficiency of exhaust gas for cogeneration plants. The structure of the system of effective energy conversion of exhaust gases is considered. A brief analysis of the constituent parts of the exhaust system of an internal combustion engine is given along with the description of its advantages and disadvantages. The layout of the turbogenerator in the exhaust system of an internal combustion engine is described. Comparative analysis of the turbines is provided in the paper. The choice of the most preferable types of electric machines is given along with the comparison of their characteristics. The paper also describes the design of the turbogenerator and the construction of its basic parts. Finally it presents a three-dimensional model of the system of the effective energy conversion of exhaust gases for cogeneration plants.

Keywords: internal combustion engine, cogeneration powerplants, energy recovery systems, turbogenerator.

Введение

На сегодняшний день двигатели внутреннего сгорания широко применяются в области малой энергетики, они совершенствуются с каждым годом, повышается их удельная мощность, снижается расход топлива, улучшается экологичность, растет эффективность.

Они остаются основными силовыми агрегатами для когенерационных установок малой и средней мощности, которые обеспечивают электрической и тепловой энергией, а в некоторых областях промышленности и сельского хозяйства и углекислым газом с общей эффективностью установки в 80–90 % [1]. Эффективность энергоустановок, в первую очередь, зависит от степени преобразования энергии сгорания топлива в электрическую и тепловую энергию. Количество электрической энергии напрямую зависит от количества механической энергии, вырабатываемой двигателем внутреннего сгорания, на сегодняшний день современные когенерационные установки с газовыми двигателями показывают

значение электрического КПД около 38 %, в случае дизельных двигателей эта цифра выше. Оставшаяся часть тепловой энергии около 60 % может быть использована в системах рекуперации энергии для увеличения электрического КПД без существенного снижения теплового КПД [2]. Одним из перспективных методов рекуперации энергии отработавших газов и увеличения электрического КПД является применение турбогенераторов. На основании исследований, проведенных рядом компаний, применение данного вида рекуперации для дизельных двигателей позволяет снизить расход топлива до 7–10 % при той же электрической мощности, а также повысить суммарный КПД энергоустановки до 46 % [3–6].

Концепция конструкции турбогенератора

Турбогенератор представляет собой узел, устанавливаемый в систему выпуска когенерационной установки, который позволяет вырабатывать электрическую энергию за счет использования энергии отработавших газов. В состав турбогенератора входят:

- турбина, корпус турбины и подшипниковый узел;
- электрическая машина;
- вспомогательные системы.

В ходе анализа конструкции турбогенератора были проработаны несколько вариантов реализации и рассмотрены следующие из них:

- компоновки турбогенератора в системе выпуска;
- типов применяемых турбин;
- типов используемых электрических машин.

Компоновка турбогенератора в системе выпуска

В процессе выбора компоновки турбогенератора в системе выпуска для сравнения были приняты 2 схемы, представленные на рисунке 1:

- последовательная установка турбогенератора в систему выпуска;
- параллельная установка турбогенератора в систему выпуска.

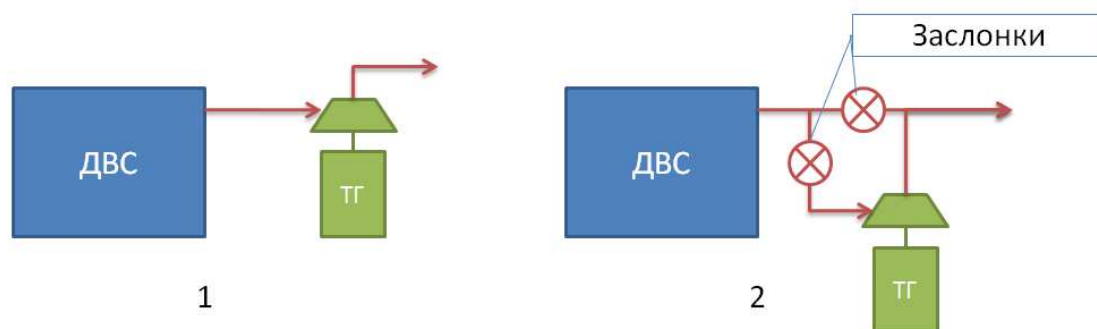


Рисунок 1. Схемы подключения турбогенератора

1 – последовательная; 2 – параллельная.

Последовательная схема подключения турбогенератора упрощает конструкцию системы выпуска, позволяет турбогенератору работать постоянно совместно с энергоустановкой, исключает дополнительные гидравлические потери в заслонках и ответвлениях, в связи с чем и является более предпочтительной.

Параллельная схема подключения турбогенератора позволяет управлять расходом отработавших газов через турбогенератор, тем самым снижая при необходимости сопротивление на выпуске, и производить регулировку мощности, а также позволяет в случае возникновения аварийных ситуаций перекрыть подачу отработавших газов через турбину. Данная схема все-таки является более предпочтительной для транспортных средств, для которых регулирование процесса выпуска, а также отключение турбогенератора в режиме холостого хода является необходимым, в отличие от энергоустановок, в том числе когенерационных, которые работают, в большинстве случаев, в установившемся режиме.

Типы применяемых турбин

В качестве привода в турбокомпрессорах чаще всего используют радиально-осевые реактивные турбины, которые обеспечивают хорошее соотношение цены и эффективности. Данный тип турбин очень распространен, а технология изготовления отработана годами. Однако данный тип турбин может применяться до определенного расхода отработавших газов (около 4 кг/с) и должен выбираться в зависимости от типоразмера двигателя. В качестве турбины для турбогенератора данный тип турбин более предпочтителен в случае нормальной работы в заданном диапазоне расходов.

Второй тип турбин, применяемых для турбокомпрессоров, это осевые турбины, которые устанавливаются на крупноразмерные судовые, тепловозные и пр. двигатели. Данный тип турбин характеризуется большой ценой и сложной конструкцией, однако в случае крупноразмерных двигателей эти затраты оправданы.

Типы используемых электрических машин

В ходе разработки концепции турбогенератора был проведен анализ типов электрических машин, в ходе которого были выбраны два наиболее предпочтительных типа электрических машин, отвечающие требованиям по массогабаритным параметрам и максимальным частотам вращения:

- вентильно-индукторные генераторы (реактивные);
- вентильная машина с постоянными магнитами.

Оба типа электрических машин являются на сегодняшний день перспективными. Вентильно-индукторные машины (ВИМ) отличаются от любых других типов электромеханических преобразователей энергии тем, что имеют ярко выраженную

полюсность ротора и разное количество зубцов (полюсов) на статоре и роторе. При этом ротор не имеет никаких активных частей (обмоток с током или магнитов). Электромагнитный момент в таких машинах создается за счет изменения магнитной проводимости между зубцами статора и ротора. Данный тип машин не может функционировать без специального преобразователя, даже в генераторном режиме.

К основным преимуществам ВИМ относятся:

- простота и технологичность конструкции;
- низкая себестоимость;
- высокая надежность;
- высокая ремонтпригодность;
- низкие потери в роторе;
- минимальные температурные эффекты;
- низкий момент инерции;
- возможность работы на больших частотах вращения;
- возможность работы в агрессивных средах.

К недостаткам ВИМ можно отнести:

- высокий уровень шумов и вибраций;
- функционирование только совместно с преобразователем частоты, что существенно усложняет управление;
- пониженная электросовместимость с сетью из-за высокого содержания высших гармоник в токах обмоток.

Высокая надежность и хорошая управляемость позволили широко применять ВИМ в промышленности, особенно в узлах с большим диапазоном скоростных режимов, высоким темпом пуска. Также они нашли свое применение в авиационной технике, автомобилестроении, медицинской аппаратуре, бытовой технике и других. Вентильные машины с постоянными магнитами (ВМПМ) призваны объединить в себе лучшие качества двигателей переменного тока и двигателей постоянного тока, что обуславливает их достоинства:

- широкий диапазон изменения частоты вращения;
- бесконтактность и отсутствие узлов, требующих частого обслуживания (коллектора);
- возможность использования во взрывоопасной и агрессивной среде;
- большая перегрузочная способность по моменту;
- высокие энергетические показатели (КПД выше 90 %);
- высокий удельный момент;
- простота в управлении;

- доступность в приобретении;
- большой срок службы и высокая надёжность за счёт отсутствия скользящих электрических контактов.

К недостаткам ВМПМ относятся:

- высокая стоимость двигателя, обусловленная использованием дорогостоящих постоянных магнитов в конструкции ротора;
- относительно сложная структура двигателя;
- необходимость дополнительной системы защиты от короткого замыкания обмоток.

Сравнение двух типов электрических машин показало, что ВМПМ прост в управлении, обладает высоким удельным моментом и сроком службы, обладает высокой перегрузочной способностью и высокими энергетическими и эффективными показателями. Поэтому в качестве электрической машины для турбогенератора предпочтительно применять вентильные двигатели с постоянными магнитами.

Конструкция турбогенератора

В ходе проведения научно-исследовательской работы в рамках государственного контракта № 14.516.11.0075 от «27» июня 2013 г. при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации был создан макетный образец системы рекуперации энергии отработавших газов. В качестве привода электрической машины была взята турбинная часть турбокомпрессора Garrett GT1241, оснащенная жидкостной системой охлаждения, системой подачи и слива масла. Турбина обладает максимальной эффективностью 65 % при расходе 2.5-3.5 кг/мин, что соответствует расходу бензинового двигателя объемом 1.6 л на режимах средних нагрузок, на котором будут проводиться испытания. В качестве электрической машины был выбран вентильный двигатель с постоянными магнитами Neu 2230/1Y. Это четырехполюсная электрическая машина с постоянными магнитами с пиковой мощностью 10 кВт может развивать частоту вращения ротора до 60000 мин⁻¹, что соответствует выходному напряжению в 77.5 В. По данным производителя, электрическая машина обладает эффективностью в режиме двигателя 93 %, при работе в генераторном режиме эта цифра будет несколько меньше. За счет того, что электрическая машина выбрана несколько большей мощности, чем планируется к получению с турбогенератора, можно будет управлять частотой вращения турбогенератора в заданном диапазоне рабочих частот. Управление частотой вращения турбогенератора будет осуществляться с помощью управляемой активной нагрузки при работе электрической машины в генераторном режиме.

Электрическая машина устанавливается на корпус турбины с помощью стального промежуточного фланца, устанавливаемого на место улитки компрессора. Колесо

компрессора демонтируется, после чего устанавливается промежуточная втулка, соединяющая вал турбины и вал электрической машины. Трехмерная модель турбогенератора представлена на рисунке 2.



Рисунок 2. Трехмерная модель турбогенератора

Ожидается, что разработанная модель турбогенератора будет вырабатывать электрическую энергию мощностью до 5 кВт, что должно составлять около 10 % от мощности, развиваемой двигателем внутреннего сгорания. Использование вышеописанного турбогенератора в составе энергоустановок по выработке тепла и электроэнергии позволит обеспечить увеличение значения электрического КПД когенерационных установок не менее чем на 5 %.

Список литературы

1. Ипатов А. А., Хрипач Н. А., Лежнев Л. Ю., Папкин Б. А., Шустров Ф. А., Иванов Д. А., Юрков М. Н. Разработка технологической схемы автономной системы с комбинированным тепло- и электроснабжением отдельно стоящих объектов с возможностью использования в качестве топлива продуктов переработки биомассы // Труды НАМИ / ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». – Вып. №242: Комбинированные энергоустановки автотранспортных средств: сб. научн. ст. – М., 2009. – С. 85–95.
2. Хрипач Н. А., Лежнев Л. Ю., Папкин Б. А., Шустров Ф. А., Татарников А. П., Тингаев Н. В. Анализ конструкций, обеспечивающих максимальную термодинамическую эффективность поршневых двигателей // Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. – М.: МГТУ «МАМИ», 2012. – № 2 (14). – Т. 1. – С. 360–367.

3. Bumby J., Crossland S. and Carter J., "Electrically Assisted Turbochargers: Their Potential For Energy Recovery", Proc. Hybrid Vehicle Conf., Inst. Eng. and Technology, Coventry, UK, 2006. pp. 43-52.
4. Thompson I., "Investigation into the Effects of Turbocompounding", Differentiation Report. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Queen's University Belfast, Northern Ireland, unpublished. 2009.
5. Keiichi Shiraishi, Yoshihisa Ono, Hybrid Turbocharger with Integrated High Speed Motor-generator, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review Vol. 44 No. 1 (Mar 2007).
6. Mamat A. M. I., A. Romagnolil and R. F. Martinez-Botas, "Design and Development of a Low Pressure Turbine For Turbocompounding Applications", Proc. IGTC 2011, Osaka, Japan, 2011.

Рецензенты:

Ерохов В.И., д.т.н., профессор, Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), г. Москва.

Фомин В. М., д.т.н., профессор, Российский университет дружбы народов (РУДН), г. Москва.