

АНАЛИЗ СИСТЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДЛЯ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Хрипач Н. А., Татарников А. П.

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

В статье проведен анализ существующих концепций систем эффективного преобразования энергии отработавших газов когенерационных энергоустановок в электроэнергию. Рассмотрено преобразование тепловой энергии отработавших газов в механическую энергию посредством двигателей Стирлинга и тепловых машин, работающих по циклу Ренкина. Рассмотрены существующие концепции преобразования тепловой энергии в электрическую с помощью термогенераторов. Рассмотрены различные концепции использования кинетической энергии отработавших газов в силовых турбинах, турбокомпрессорах с электрической машиной, а также применение турбогенераторов. В заключение проведено сравнение существующих концепций, а также определен выбор наиболее перспективной системы преобразования энергии отработавших газов.

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

ANALYSIS OF REGENERATIVE EXHAUST SYSTEMS FOR COGENERATION POWER PLANTS

Khripach N. A., Tatarnikov A. P.

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

This paper analyze the existing concepts of energy conversion systems for efficient exhaust gas cogeneration power plants in electricity. A transformation of thermal energy of exhaust gas into mechanical energy by Stirling engines and machines working on the Rankine cycle. The existing concept of converting thermal energy into electrical energy using thermoelectric generators. The different concept of using the kinetic energy of the exhaust gas in power turbines, turbo compressors with an electric motor, as well as the use of turbo-generators. Finally, a comparison of the existing concepts of energy conversion of exhaust gases, as well as a selection of the most promising.

Keywords: internal combustion engine, cogeneration power plants, energy recovery systems, exhaust gases.

Введение

Тепловые двигатели являются основным элементом когенерационных установок, они позволяют вырабатывать механическую энергию, которая в дальнейшем преобразуется в электрическую и тепловую энергию за счет отбора энергии от отработавших газов, охлаждающей жидкости и системы смазки. Эффективность энергоустановок, в первую очередь, зависит от степени преобразования энергии сгорания топлива в электрическую и тепловую энергию. Современные когенерационные установки имеют суммарный КПД около 85–90 %, причем тепловой энергии вырабатывается значительно больше, чем электрической. Электрический КПД установки ограничивается механическим КПД теплового двигателя и электрическим КПД генератора и преобразователя, что обуславливает его низкое значение

по сравнению с тепловым КПД [2]. На рисунке 1 представлен энергетический баланс когенерационной установки с газовым двигателем внутреннего сгорания.

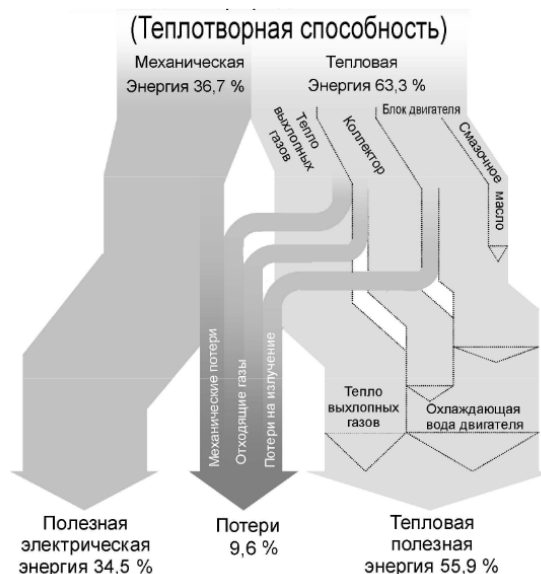


Рисунок 1. Энергетический баланс когенерационной установки с газовым двигателем

Современные направления развития систем рекуперации энергии отработавших газов когенерационных установок можно разделить по следующим направлениям:

- преобразование тепловой энергии в механическую:
 - двигатель Стирлинга;
 - машины, работающие по циклу Ренкина (паровому или органическому);
- преобразование тепловой энергии отработавших газов в электрическую:
 - применение термоэлектрических генераторов;
- преобразование кинетической энергии отработавших газов:
 - применение систем турбонаддува;
 - применение силовых турбин;
 - применение электрических машин в системах турбонаддува;
 - применение электрических турбогенераторов [1].

Двигатель Стирлинга

Двигатель Стирлинга или двигатель внешнего сгорания обладает рядом преимуществ по сравнению с двигателями внутреннего сгорания. У него нет сложных топливных систем, он практически бесшумен, может работать на любом виде топлива или тепловой энергии, обладает высокой приспособляемостью, а также высоким теоретическим КПД 50 %. Современные двигатели Стирлинга применяют в качестве рабочего тела такие газы, как водород или гелий, что создает дополнительные трудности их эксплуатации.

Несмотря на все очевидные преимущества, двигатели Стирлинга обладают существенными недостатками для применения их в когенерационных установках:

- сложность в управлении и регулировке;
- сложность в обеспечении уплотнений рабочего тела;
- увеличенный размер радиатора;
- высокий удельный вес;
- трудность в повышении быстроходности;
- необходимость применений в качестве рабочего тела таких газов, как гелий и водород.

Цикл Ренкина

Еще одним способом увеличения КПД когенерационной установки является применение установок, работающих по циклу Ренкина. Технология, использующая экологически чистый цикл Ренкина, может работать на любом тепловом источнике с минимальной разницей температур $52\text{ }^{\circ}\text{C}$ между источником тепла и теплоотводом. Установка, работающая по циклу Ренкина, содержит теплообменник, в котором подводимое тепло идет на нагрев рабочего тела и превращение его в газ. Газ (пар) поступает в турбину и вращает генератор, после чего пар попадает в конденсатор, где охлаждается и превращается в жидкость, после чего поступает обратно в первый теплообменник. Общая схема установки представлена на рисунке 1.

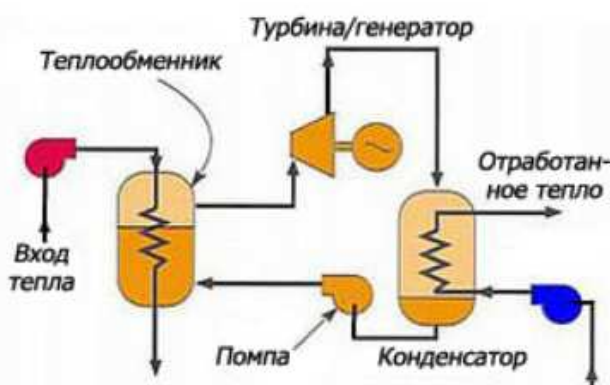


Рисунок 1. Общая схема установки

Компанией BMW была проведена работа по применению парового цикла Ренкина для увеличения эффективности двигателя внутреннего сгорания, однако вместо турбины и генератора был установлен модуль расширения, который передавал мощность на коленчатый вал. По данным BMW такая система позволяет снизить расход топлива до 15 % [8].

Термоэлектрические генераторы

Термоэлектрический генератор позволяет преобразовать тепловую энергию в электрическую, принцип действия которых основывается на эффекте Пельтье. Компанией BMW был предложен вариант применения рекуперации отработавших газов для питания бортовой сети автомобиля. Рядом с системой выпуска размещается термоэлектрогенератор

на основе теллурида висмута, который позволяет вырабатывать до 600 Вт мощности при высоких значениях температур отработавших газов [3, 10].

Достоинством элемента Пельтье являются:

- небольшие размеры;
- отсутствие каких-либо движущихся частей, а также газов и жидкостей;
- отсутствие механических частей;
- отсутствие шума.

К недостаткам элементов Пельтье относят:

- очень низкий коэффициент полезного действия;
- высокая стоимость элемента.

Однако, несмотря на низкий КПД, элементы Пельтье применяют для охлаждения различных приборов и в качестве генераторов для установок с большой мощностью для вырабатывания энергии бортовой сети установки.

Применение силовых турбин

Для повышения мощности и эффективности двигателей внутреннего сгорания, в основном для тяжелых двигателей, применяют силовые турбины, которые позволяют преобразовывать энергию отработавших газов в механическую, которая посредством редуктора или гидравлической передачи передается на коленчатый вал двигателя. Подобные системы применяют на своих двигателях фирмы Scania, Volvo, Cummins и др. В большинстве случаев силовые турбины устанавливаются на двигателях с турбонаддувом второй ступенью после колеса турбины. После прохождения отработавших газов через ступень турбины турбокомпрессора энергия и температура газов снижается, однако все же позволяет раскручивать колесо силовой турбины до 50–55 тысяч оборотов в зависимости от размера двигателя. Передачу крутящего момента обеспечивают с помощью редуктора посредством жесткой связи с коленчатым валом или применяют гидравлическую передачу. Около 20–25 % тепловой энергии теряется с отработавшими газами, применение силовой турбины позволяет преобразовать около 20 % тепловой энергии в механическую. Производитель Volvo заявляет об увеличении мощности двигателя до 10 % и увеличении эффективности на 5 %, а также снижении расхода топлива [4]. По данным Scania, применение силовых турбин позволяет снизить расход топлива до 5–10 % в зависимости от режима работы двигателя.

Компанией Daimler были проведены исследования дизельного двигателя с турбокомпрессором и последовательно-установленной осевой силовой турбиной. При мощности двигателя в 354 кВт на режиме полной нагрузки силовая турбина увеличивала мощность двигателя на 24 кВт, что составляет около 6.5 % [13].

Применение электрических машин в системах турбонаддува

В последнее время довольно много производителей начали заниматься вопросом оснащения турбокомпрессоров электрическими машинами. Компактный электрический турбокомпрессор подходит для двигателей с различными компоновками, что позволяет не вносить существенных изменений в конструкции существующих двигателей [7]. Применение электротурбокомпрессора позволяет снизить расход топлива до 10 %, а также избежать механических и гидравлических потерь по сравнению с силовыми турбинами [6]. Кроме того, если сравнивать с турбокомпаундными двигателями, у которых производительность компрессора является практически линейной зависимостью, то электрический турбокомпрессор ограничен лишь температурой отработавших газов и максимальной частотой вращения [9].

Компанией Mitsubishi Heavy Industries, Ltd была проведена исследовательская работа по оснащению тяжелого турбокомпрессора для судовых двигателей электрической машиной. Электрическая машина соединялась с турбокомпрессором посредством вала, за счет чего она могла как разгонять турбокомпрессор при необходимости, а также вырабатывать электрическую энергию. Данная конструкция электрического турбокомпрессора позволила регулировать частоту вращения турбокомпрессора для обеспечения заданного давления наддува, а также отбирать до 250 кВт электрической энергии при избытке мощности на валу турбокомпрессора, что составляет около 5 % от мощности двигателя [11].

Применение электрических турбогенераторов

Помимо электрических турбокомпрессоров также проводятся исследования в области применения турбогенераторов. В качестве турбогенератора используется узел, состоящий из электрической машины и корпуса турбины с турбинным колесом, соединенные валом. Обсуждаются различные схемы подключения турбогенераторов [5], как последовательные, так и параллельные. В случае последовательного подключения турбогенератора после турбокомпрессора дополнительно используется обводная труба в обход турбогенератора, а также управляемая заслонка. Такая компоновка позволяет не создавать лишнего противодавления в системе выпуска, а также позволяет продолжить работу установки при поломке турбогенератора. Схемы подключения представлены на рисунке 3.

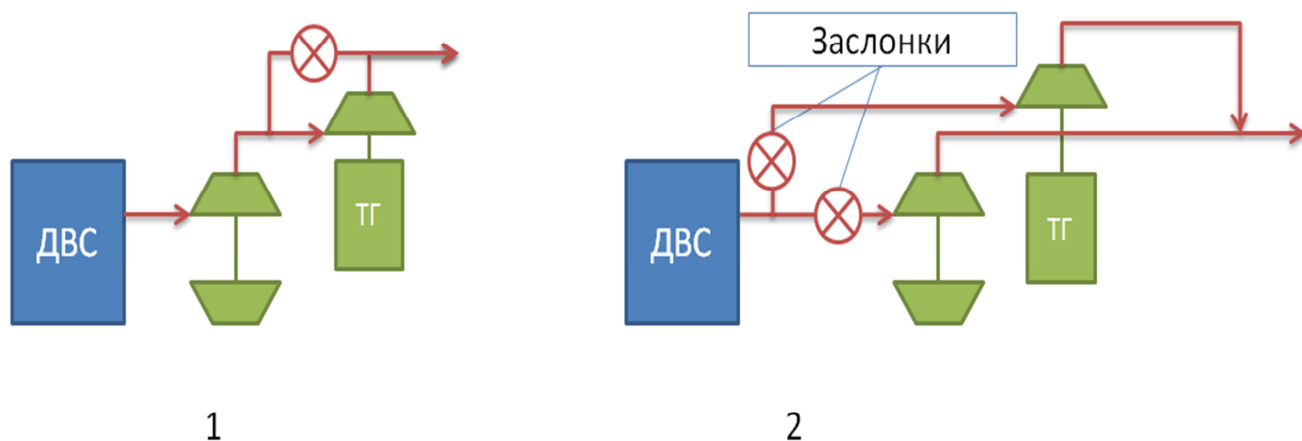


Рисунок 3. Схемы подключения турбогенератора: 1 – последовательная схема; 2 – параллельная

Одним из ведущих производителей сельскохозяйственной техники в США John Deere совместно с фирмой Caterpillar были проведены исследования по установке на турбодизельные двигатели турбогенератора для обеспечения электроэнергией бортовой сети и навесного оборудования. Схема системы фирмы John Deere представлена на рисунке 4.

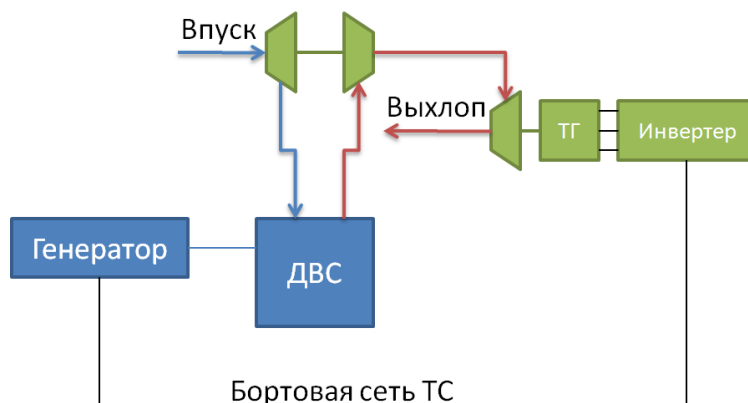


Рисунок 4. Схема системы фирмы John Deere

В ходе работы был собран испытательный образец с установленным турбогенератором мощностью 50 кВт, инвертером и проведены испытания. Результаты испытаний показали следующие параметры эффективности:

- КПД турбины турбокомпрессора 85 %;
- КПД компрессора турбокомпрессора 78 %;
- КПД инвертера 95 %;
- КПД турбины турбогенератора 85 %;
- суммарный КПД установки 46 %.

Компания Bowman Power Group Ltd занимается разработкой турбогенераторов для дизельных генераторных установок на базе различных дизельных двигателей с

турбонаддувом. После турбокомпрессора устанавливается турбогенератор с управляемым сопловым аппаратом для увеличения эффективности турбины. Установка турбогенератора позволяет снизить удельный эффективный расход топлива установки в целом до 7 %, а также повысить мощность на 15 %. Турбогенератор подключен к электрическому преобразователю, который позволяет получить на выходе заданные параметры напряжения в зависимости от требования заказчика [12].

Заключение

На основании анализа современных научно-технических источников, проведенного в ходе выполнения научно-исследовательской работы, в которой были рассмотрены различные методы использования энергии отработавших газов двигателя, можно сделать следующие выводы:

1. Применение двигателя Стирлинга для рекуперации тепловой энергии отработавших газов двигателя, несмотря на высокую эффективность, осложняется большой металлоемкостью, массогабаритными характеристиками, дороговизной уплотнительных элементов и рабочего тела. Причем, в случае использования в качестве рабочего тела водорода, необходимо также обеспечивать установку системы контроля и безопасности.

2. Применение систем, работающих по циклу Ренкина, для когенерационных установок осложняется сложностью конструкции, большими размерами основных узлов, невозможностью применения в качестве рабочего тела воды в зонах с низкими температурами, где зачастую применяются энергоустановки.

3. Применение тепловой энергии для термохимического преобразования воды или углеводородного топлива в водород требует постоянно высоких значений температуры отработавших газов, а также дорогостоящих катализаторов. Применение подобного принципа для когенерационных установок, которые в большинстве применяют в качестве энергоустановок дизельные двигатели, становится невозможным из-за низкой температуры отработавших газов.

4. Применение систем турбонаддува для когенерационных установок является обычной практикой для большинства силовых агрегатов, за счет чего повышается мощность и эффективность двигателей. Современные турбокомпрессоры являются высокоэффективными агрегатами с управляемыми сопловыми аппаратами, которые позволяют достигнуть высоких значений эффективности.

5. Применение силовых турбин в качестве системы рекуперации энергии отработавших газов когенерационных энергоустановок ограничивается высокой ценой производства, а также сложностью и дороговизной редуктора, который передает мощность на коленчатый вал. Также проблемой применений силовых турбин для когенерационных

установок является то, что на каждый двигатель должна быть разработана своя силовая турбина, своя компоновка.

6. Применение электрических машин в системах турбонаддува в качестве системы эффективного преобразования энергии отработавших газов в электрическую ограничивается тем фактом, что лишь небольшая область рабочих режимов позволяет работать электрической машине в качестве генератора, во всех остальных областях режимов электрическая машина либо не работает и создает дополнительную инерционную нагрузку, либо помогает раскручивать компрессорное колесо для повышения давления наддува.

7. На основании проведенного анализа применение электрических турбогенераторов в качестве системы эффективного преобразования энергии отработавших газов в электрическую является наиболее приемлемым вариантом, исходя из стоимости, габаритных размеров, удобства компоновки и эффективности.

Работа подготовлена в рамках государственного контракта № 14.516.11.0075 от «27» июня 2013 г. при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

1. Ипатов А. А., Хрипач Н. А., Лежнев Л. Ю., Папкин Б. А., Иванов Д. А. Разработка элементов автономной когенерационной установки, работающей на биотопливе // Труды НАМИ / ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». – Вып. №242: Комбинированные энергоустановки автотранспортных средств: сб. научн. ст. – М., 2009. – С. 96 - 104.
2. 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.
3. A. Eder, Thermoelectric Power Generation – The Next Step to Future CO2 Reductions, Presentation, San Diego, September 30, 2009.
4. A. Greszler, “Diesel Turbocompound Technology”, Presentation to ICCT/NESCCAF Workshop, San Diego, USA, 2008.
5. A. M. I. Mamat, A. Romagnolil and R. F. Martinez-Botas, "Design and Development of a Low Pressure Turbine For Turbocompounding Applications", Proc. IGTC 2011, Osaka, Japan, 2011.

6. I. Thompson, "Investigation into the Effects of Turbocompounding", Differentiation Report. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Queen's University Belfast, Northern Ireland, unpublished. 2009.
7. J. Bumby, S. Crossland and J. Carter, "Electrically Assisted Turbochargers: Their Potential For Energy Recovery", Proc. Hybrid Vehicle Conf., Inst. Eng. and Technology, Coventry, UK, 2006. pp. 43-52.
8. J. Ringler, M. Seifert, V. Guyotot and W. Hübner. (2009) Rankine Cycle for Waste Heat Recovery of IC Engines (SAE 2009-01-0174).
9. Jay Vaidya, President Electrodynamics Associates, Inc. Advanced electric generator & control for high speed micro/mini turbine based power systems.
10. K. Matsubara, in Twenty-first International Conference on Thermoelectrics, Proceedings, ICT'02, 418 (2002).
11. Keiichi Shiraishi, Yoshihisa Ono, Hybrid Turbocharger with Integrated High Speed Motor-generator, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review Vol. 44 No. 1 (Mar 2007).
12. T. Davies, The new wave in energy, Bowman Power Group Ltd presentation.
13. Timothy J. Callahan, David P. Branyon, Ana C. Forster, Michael G. Ross, Dean J. Simpson: Effectiveness of Mechanical Turbo Compounding in a Modern Heavy-Duty Diesel Engine, International Journal of Automotive Engineering, Vol.3, No.2, pp.69-73 (2012).

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.