

Шустров Федор Андреевич

заместитель начальника

Татарников Алексей Павлович

ведущий инженер

Иванов Денис Алексеевич

ведущий инженер

НТЦ «Силовые агрегаты»

ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»

г. Москва, Московская область

DOI: 10.21661/r-497297

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКООБОРОТНОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Аннотация: в докладе описана конструкция макета высокооборотного турбогенератора для двигателя внутреннего сгорания, обоснованы технические решения, принятые в ходе ее разработки. Представлены результаты моделирования теплового состояния элементов разработанного макета турбогенератора.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, рекуперация тепловой энергии, энергоэффективность, энергосбережение, турбогенератор, высокооборотный электрический генератор.

Настоящая работа подготовлена в рамках соглашения №14.574.21.0154 от «26» сентября 2017 года о предоставлении субсидии при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57417X0154).

При сравнении существующих систем рекуперации тепловой энергии двигателей внутреннего сгорания следует выделить систему на базе турбогенератора, выполняющего роль преобразователя тепловой и кинетической энергии отработавших газов двигателя в электрическую. Преимущество турбогенератора перед прочими системами, в том числе, механическим турбокомпаундом,

термоэлектрогенераторами, системами рекуперации на основе цикла Ренкина, Джоуля или Стирлинга и пр., заключается в том, что он имеет довольно простую и надежную конструкцию, включающую небольшое число компонентов, и лучшие удельные массогабаритные характеристики. Турбогенератор является отдельным узлом, который подключается к стандартным системам смазки и охлаждения двигателя внутреннего сгорания, не требуя при этом внесения существенных изменений в их конструкцию [1 – 4]. Значимым преимуществом турбогенератора также является его стоимость по сравнению с другими системами рекуперации, что в совокупности со снижением расхода топлива повышает его инвестиционную привлекательность для потребителя.

В настоящем докладе представлено описание конструкции макета турбогенератора, ориентированного на эксплуатации в составе двигателя внутреннего сгорания мощностью 100 кВт.

При создании турбогенератора решался ряд задач, направленных на обеспечения высокой энергоэффективности этого агрегата, основной из которых являлась необходимость разработки и интеграции в состав макета высокооборотного электрического генератора. Анализ существующих типов электрических машин показал, что наиболее подходящими для использования совместно с двигателями внутреннего сгорания, особенно транспортного назначения, являются синхронные электрические машины на неодимовых магнитах, которые позволяют обеспечить высокие КПД электрической машины и лучшие массогабаритные параметры турбогенератора в целом. Использование постоянных магнитов в конструкции турбогенератора наложило ряд дополнительных ограничений на работу макета, в том числе, по обеспечению оптимального температурного режима ротора электрической машины, минимизации вибрационных нагрузок на ротор электрической машины и уменьшению вероятного контакта магнитов с охлаждающей жидкостью и моторным маслом.

На начальном этапе на основании результатов теоретических [5–9] и расчетных исследований [10] была разработана принципиальная схема макета турбогенератора, представленная на рисунке 1. Принципиальная схема иллюстрирует

общий состав макета турбогенератора и взаимное расположение его основных элементов и систем.

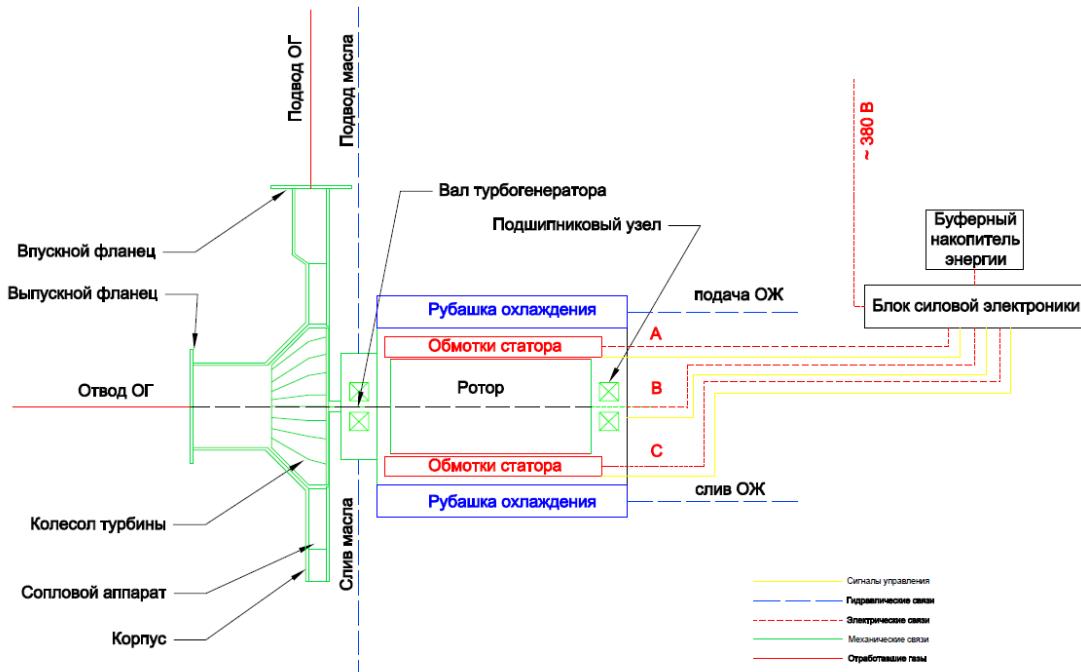


Рис. 1. Принципиальная схема высокогооборотного турбогенератора
для двигателя внутреннего сгорания

В ходе проведения конструкторских работ была разработана трехмерная модель макета турбогенератора, представленная на рис. 2.

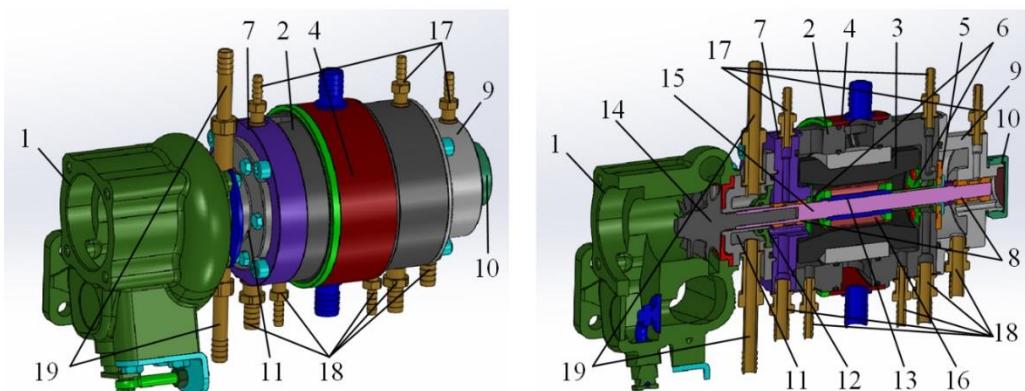


Рис. 2. Трехмерная модель высокогооборотного турбогенератора для двигателя
внутреннего сгорания

В качестве основных элементов макета турбогенератора можно выделить направляющий аппарат турбины 1, корпус макета 2 с установленными в нем через

резиновые уплотнительные кольца статором электрического генератора 3 и наружным кожухом охлаждения с штуцером 4, упорным подшипником 5 и маслоотражательным экраном 6, переднюю крышку 7 с установленными в ней маслоотражательным экраном 6 и подшипником скольжения 8, заднюю крышку 9 с установленными в ней подшипником скольжения 8 и заглушкой 10, втулку охлаждения 11 с установленной в ней крышкой втулки 12, вал макета 13 состоящий из турбины с валом 14, на которую напрессована втулка вала 15, на которую в свою очередь устанавливается ротор высокоскоростной электрической машины 16 и фиксируется за счет лысок на валу, а также штуцеры подвода 17 и отвода масла 18 и штуцеры втулки охлаждения 19.

К особенностям разработанной конструкции макета можно отнести следующее:

- вал макета турбогенератора является единым, как для турбины, так и для ротора высокоскоростной электрической машины, это позволило избавиться от сложного соединения, что существенно облегчило сборку и балансировку узла;
- высокоскоростная электрическая машина представляет собой комплект из ротора и статора, которые устанавливаются на вал и в корпус макета турбогенератора соответственно;
- в состав макета входят два подшипника скольжения, устанавливаемых в переднюю и заднюю крышки, а также упорный подшипник, фиксирующий вал от осевых перемещений в корпусе макета.
- система охлаждения обеспечивает охлаждение статора электрической машины посредством циркуляции охлаждающей жидкости через полость охлаждения в корпусе макета и снижение теплового потока от турбинного узла к переднему подшипниковому узлу и ротору электрического генератора за счет циркуляции жидкости через полость втулки охлаждения;
- система смазки обеспечивает подачу масла к подшипникам скольжения и упорному подшипнику, а также обеспечивает слив масла, которое может попасть во внутреннюю полость электрической машины, за счет двух дренажных отверстий в корпусе макета;

– для минимизации попадания масла во внутреннюю полость высокоскоростной электрической машины на переднюю крышку и на корпус макета устанавливаются маслоотражательные экраны, которые за счет малого зазора между валом и отверстиями экранов препятствуют проникновению масла.

После разработки трехмерной модели была проведена расчетная оценка нагрева твердотельных элементов макета турбогенератора при помощи диаграммы с распределением температуры в продольно-осевом сечении макета. Учитывая высокий градиент температур вдоль макета, выполнено разделение макета на два независимых участка, каждый из которых имеет собственную температурную шкалу.

На рис. 3 показано распределение температуры твердотельных элементов макетов турбогенератора в их продольно-осевом сечении.

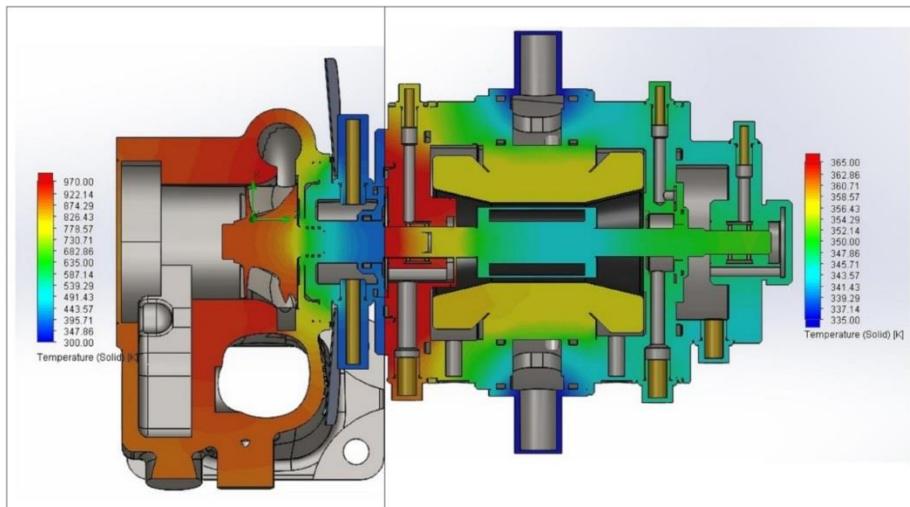


Рис. 3. Распределение температуры твердотельных элементов макета турбогенератора

Согласно полученным результатам моделирования теплового состояния макета турбогенератора температуры вала, ротора электромашины и подшипников находятся в допустимом диапазоне. В таблице 1 представлены параметры макета турбогенератора, полученные в результате CFD-моделирования.

Таблица 1

Расчетные характеристики макета турбогенератора

| | |
|--|---------|
| Количество лопаток колеса турбины | 10 |
| Частота вращения колеса турбины, мин ⁻¹ | 107471 |
| Крутящий момент на валу турбины, Н·м | 1,029 |
| Мощность на валу турбины, кВт | 11,58 |
| Электрическая мощность электромашины, кВт | 10,7 |
| Тепловая мощность, выделяемая в электромашине турбогенератора, кВт | 0,535 |
| Температура ОЖ на входе/выходе из электромашины, °C | 60/60,7 |
| Максимальная температура обмоток статора, °C | 84,6 |

По результатам проведенного CFD-моделирования макета турбогенератора и проработки его конструкции был изготовлен макет турбогенератора (рис. 4), в котором использованы все технические решения, описанные в настоящем докладе.

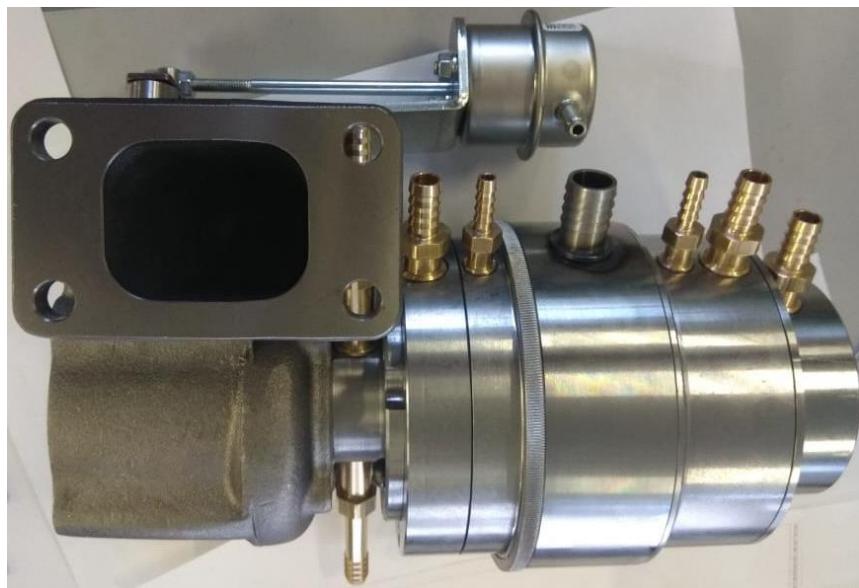


Рисунок 4 – Макет высокооборотного турбогенератора

Список литературы

1. Greszler, «Diesel Turbocompound Technology», Presentation to ICCT/NES-CCAF Work-shop, San Diego, USA, 2008.
2. 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).

-
3. B. Sedyka and J Soczwka, «Recovery Of Exhaust Gases Energy By Means Of Turbocompound», Proc. 6th Int. Symp. Diagnostics and Modeling of Combustion In Internal Combustion Engines, Yokohama, Japan, 2004, pp. 99–103.F. Gerke, «Diesel Engine Waste Heat Recovery Utilizing Electric Turbocompound Technology», Proc. 7th Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Workshop, Portsmouth, USA, 2001.
4. Лежнев Л.Ю. Энергоустановки автомобильного транспорта с тяговым электроприводом: монография / Л.Ю. Лежнев, Н.А. Хрипач, Ф.А. Шустров [и др.]. – Тамбов: Консалтинговая компания Юком, 2017. – 204 с.
5. Хрипач Н.А. Системы повышения эффективности работы автомобильных энергоустановок: учебное пособие / Н.А. Хрипач, Л.Ю. Лежнев. – Ставрополь: Логос, 2017. – 38 с.
6. N. Khripach, L. Lezhnev, A. Tatarnikov, R. Stukolkin, A. Skvortsov «Turbo-generators in energy recovery systems», International Journal of Mechanical Engineering & Technology, 2018.
7. Хрипач Н.А. Применение турбогенераторов в силовых установках городского транспорта / Н.А. Хрипач, В.А. Неверов, Б.А. Папкин [и др.] // Приоритетные направления развития науки и образования: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2018. – С. 131 – 134. DOI: 10.21661/r-473087.
8. Татарников А.П. Турбогенераторы как инструмент повышения энергоэффективности объектов малой энергетики / А.П. Татарников, Ф.А. Шустров, Д.А. Иванов [и др.] // Модернизация и инновационное развитие топливно-энергетического комплекса: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – №1. – СПб.: СПбФ НИЦ МС, – 2018. – С. 42 – 47.
9. Lezhnev, L. Yu., Tatarnikov, A. P., Skvortsov, A. A., Papkin, I. A., Nekrasov, A. S. 2018. Turbogenerator: Part 1: Simulation. International Journal of Engineering & Technology, 7 (3.15): 277–279. DOI: 10.14419/ijet.v7i3.15.18688.