

Д.А. Шумилин¹, А.В. Сизякин², М.Ю. Румянцев³

1 – студент, 2 – консультант ВКР, 3 – руководитель проекта и ВКР

РАЗРАБОТКА МИКРОТУРБИННОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ РАБОТАЮЩЕЙ ПО ОРГАНИЧЕСКОМУ ЦИКЛУ РЕНКИНА

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты разработки и исследования высокоскоростных турбогенераторов с лепестковыми газодинамическими подшипниками, работающих на органическом цикле Ренкина (ОЦР), а также воздушных турбогенераторов. Представлены результаты исследования перспективных рабочих тел для реализации ОЦР. При проектировании генератора была получена теоретическая зависимость влияния частоты вращения и диаметра магнита на величину магнитной индукции в воздушном зазоре. Также для анализа поведения машины при пуске разработана модель системы управления и определен подход к пуску маломощных высокоскоростных турбогенераторов.

Ключевые слова – высокоскоростной турбогенератор, фреон, органический цикл Ренкина, лепестковые газодинамические подшипники, автономная энергоустановка, синхронный магнитоэлектрический генератор, постоянные магниты, бандаж, микротурбина, низкопотенциальное тепло, вспомогательная силовая установка

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции в энергетике во многом определяются увеличением доли децентрализованных систем энергоснабжения и систем распределенной генерации. В соответствии с прогнозом Navigant Research и ИНЭИ РАН (рис.1), к 2026 году ввод новых мощностей распределенной генерации в мире будет превышать ввод мощностей централизованной генерации более чем в три раза [1]. Представленная тенденция говорит об увеличении спроса на объекты распределенной генерации и необходимости науки, рынка и технологий своевременно отвечать на этот спрос.

Важно отметить, что развитие распределенной генерации связано не только с применением возобновляемых источников, использующих энергию ветра, солнца и воды, но и с развитием энергоустановок, использующих для выработки электроэнергии сбросное тепло от промышленных производств и транспорта, геотермальную энергию Земли, местные виды топлива, включая древесину, торф, биотопливо и сжиженный природный газ, а также традиционные виды углеводородного топлива.



Рис. 1. Прогноз Navigant Research и ИНЭИ РАН по объемам ввода мощностей распределенной генерации.

Одним из перспективных типов установок малой мощности для децентрализованных систем энергоснабжения являются высокоскоростные микротурбинные энергетические установки (МКТЭУ) на основе газовых или паровых турбин, в последнем случае работающих на органических циклах Ренкина. Утилизируя низкопотенциальное тепло, подобные установки повышают суммарную эффективность оборудования, являясь дополнительным источником полезной электрической энергии, уменьшают тепловое загрязнение окружающей среды.

При строительстве объектов распределенной энергетики очень часто имеем дело с населенными пунктами и объектами, находящимися на отдалении от централизованных энергетической и газотранспортной систем. В таких регионах проживает свыше 20 млн. человек. Привозное топливо резко удорожает стоимость единицы произведенной тепловой и электрической энергии. Применение МКТЭУ, работающих на местных, возобновляемых видах топлива, позволяет эффективно решить проблему энергообеспечения таких регионов, населённых пунктов, промышленных и иных объектов.

Поскольку для МКТЭУ наиболее важным элементом является турбогенератор (ТГ), преобразующий энергию топлива в электроэнергию, то данная работа посвящена в наибольшей степени разработке именно высокоскоростных ТГ. В статье представлены результаты разработки ТГ мощностью 20 кВт и частотой вращения 65 000 об/мин, работающего на фреоне по ОЦР, а также результаты исследования и разработки ТГ мощностью 1 кВт и частотой вращения 150 000 об/мин с приводом от воздушной турбины.

2. ТУРБОГЕНЕРАТОР ДЛЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА

2.1. Выбор рабочего тела для реализации цикла

Важной составляющей разработки энергоустановки является выбор теплового цикла, определяющий её предельную эффективность. Поскольку ОЦР является достаточно эффективным в широком диапазоне температур, то выбор рабочего тела становится важным этапом разработки. На базе анализа разных разрешенных рабочих тел и расчетов эффективности ОЦР для них было установлено, что, в зависимости от исходных диапазонов температур, наиболее предпочтительны следующие рабочие тела: для реализации циклов с начальной температурой от 150 до 300 °С наиболее эффективен фреон RC318 и затем R227ea; при реализации цикла с начальной температурой до 150 °С наиболее эффективен фреон R245fa, затем R236fa, далее RC318.

Также был определен подход к выбору оптимального начального давления цикла на основе определения интенсивности прироста термического КПД $\Delta\eta/\eta_{\max}$ в зависимости от давления. Оптимальное давление находится на участке низкого приращения при удовлетворении выбранного давления условиям прочности корпуса ТГ.

2.2. Разработка проточной части микротурбины на ОЦР

Разработка проточной части МКТЭУ велась под разработанный в НИУ «МЭИ» высокоскоростной генератор на 30кВт, 100 000 об/мин, герметичного типа.

Поскольку критическими величинами для разработки проточной части высокоскоростной микротурбины являются высота лопатки и осевое усилие, то наиболее

предпочтительным шагом для начала проектирования становится выбор типа турбины на основе сравнения проекторочных расчетов [2-3] или использования приближенной формулы, разработанной в ЦАГИ для оценки быстроходности вентиляторов. По этой процедуре для разрабатываемой машины был определен оптимальный тип проточной части – радиально-осевая турбина с канальным сопловым аппаратом.

При последующей разработке использовался метод конечных элементов для детальной проработки проточной части и исключения диффузорных участков в рабочем колесе. Достигнутый расчётный внутренний КПД турбины составил 81% при высоте сопловой лопатки в 4 мм. Получившееся рабочее колесо удовлетворяет требованиям прочности, и его первая собственная частота колебаний находится выше рабочей частоты вращения.

Поскольку проведение испытаний подобного типа машин требует создания специальных газовых стендов, сопряжено с закупкой сложного оборудования, входящего в цикл, то стоимость и сложность испытаний высокоскоростных генераторов для ОЦР возрастает. Поэтому, для отработки методов проектирования и проверки правильности принятых решений, было решено разработать экспериментальный образец ТГ с приводом от воздушной турбины на мощность 1кВт с целью его исследования на лабораторном воздушном стенде НИУ «МЭИ».

3. ВОЗДУШНЫЙ ТУРБОГЕНЕРАТОР

Отправной точкой для создания экспериментального образца высокоскоростного ТГ стало определение параметров лабораторного воздушного стенда, а именно измерение: расхода воздуха, гидравлического сопротивления сети и возможного давления во входном патрубке. В соответствии с результатами разработки проточной части для установки на ОЦР был определен тип проточной части для воздушного ТГ – радиально-осевая турбина с канальным сопловым аппаратом, образованным дугой окружности.

Проектирование проточной части также проводилось методом конечных элементов. Достигнутый расчетный внутренний КПД турбины при высоте сопловой лопатки в 4,1 мм составил 83%.

3.1. Синхронный генератор с постоянными магнитами

Выбор постоянных магнитов для высокоскоростных турбогенераторов малой мощности в составе теплового цикла не велик. Чаще всего применяются магниты из сплава редкоземельных металлов на основе Sm-Co. Поскольку прочность этих сплавов не высока, а центробежные усилия велики, приходится компенсировать нагрузку установкой непроводящего металлического бандажа горячим натягом. С учётом оценки прочности ротора и необходимого натяга, было теоретически получено распределение магнитной индукции вдоль радиуса воздушного зазора. Полученное распределение амплитуды магнитной индукции от диаметра постоянного магнита при различных частотах вращения представлено на рисунке 2 при технологическом ограничении минимальной толщины бандажа в 1 мм.

В попытке сократить массу и потери в электрической машине, а также упростить обмотку, была рассмотрена возможность применения типового порошкового магнитомягкого материала Somaloy для реализации магнитопровода машины. Был

проведен расчет трех электрических машин: с классической конфигурацией магнитопровода; с числом пазов на полюс и фазу, равным 2 ($q=2$) и укорочением обмотки 5/6; обмоткой вида «зубец-катушка» с $q=1$ и укорочением 1/3.

У генератора с конфигурацией «зубец-катушка» с магнитопроводом из Somaloy КПД составил 92%, а с классической конфигурацией - 94,4%, что говорит о большей эффективности классической конструкции и возможности удешевления процесса укладки обмотки в пазы посредством снижения КПД. У генератора с классической конфигурацией магнитопровода, выполненного из электротехнической стали 2421, КПД составил 96,3%. Это в свою очередь, может свидетельствовать о неэффективности использования типового материала Somaloy при высоких частотах перемагничивания статора.

Был спроектирован генератор с индукции в воздушном зазоре в 1мм от диаметра классической конструкцией постоянного магнита из Sm-Co и частоты магнитопровода [4] из стали 2421, выполнен его поверочный расчет методом конечных элементов и получена его внешняя характеристика. Также проведен его тепловой расчет МКЭ, определена температура нагрева обмотки генератора при свободной конвекции без введения охлаждающего воздуха внутрь корпуса генератора. Температура обмотки составила 132°C.

3.2. Прочность ротора

Для дальнейшей оценки прочности роторной системы была создана детальная 3D модель воздушного ТГ, представленная на рисунке 3.

Для оценки прочности роторной системы был проведен расчет методом конечных элементов. Рабочее колесо из сплавов алюминия выдерживает центробежную нагрузку, а роторная система имеет запас прочности не менее двух. Также были определены собственные частоты колебаний системы и подтверждено, что ротор проходит по критериям надежности. Ротор в ТГ на газодинамических лепестковых подшипниках должен быть жестким (его первая собственная частота колебаний находится выше чем номинальная рабочая частота вращения).

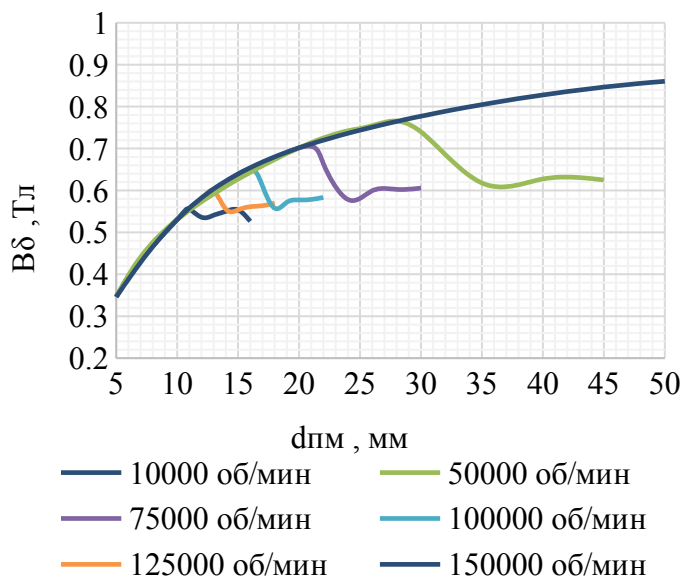


Рис. 2. Зависимость амплитуды магнитной

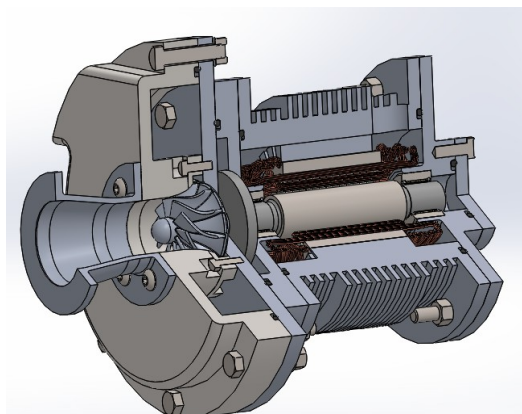


Рис. 3. 3D модель воздушного ТГ

(его первая собственная частота колебаний находится выше чем номинальная рабочая частота вращения).

4. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПУСКОМ МАЛОМОЩНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Для создания автономных источников энергии необходимо создание хорошей системы автоматизации пуска и поддержания работы системы. Для маломощных ТГ номинальное давление создает большое осевое усилие, которое прижимает пята упорного лепесткового газодинамического подшипника (ЛГП) к корпусу, создавая большой момент сухого трения, препятствующий разгону машины. Ситуация усугубляется еще и тем, что полезный пусковой крутящий момент на рабочем колесе очень мал у маломощных машин, поскольку велика частота вращения ротора. Все это приводит к тому, что запустить маломощные ТГ на ЛГП естественным образом становится невозможно. Возможным решением проблемы запуска МКТЭУ является использование свойства обратимости электрических машин и раскрутка ротора при работе в двигательном (стартерном) режиме. Источником энергии в этом случае может являться либо аккумуляторная батарея, установленная в шине постоянного тока электронного преобразователя, либо сеть переменного тока в случае работы МКТЭУ параллельно с этой сетью. В стартерном (пусковом) режиме фазы электрической машины подключаются к инвертору напряжения, и осуществляется раскрутка ротора МКТЭУ до заданной частоты подхвата. После подачи газа на турбину, этот же инвертор может быть переведён в режим активного выпрямителя с целью выпрямления напряжения ТГ, формирования формы его фазных токов и стабилизации напряжения шины постоянного тока.

На рисунке 4 представлена разработанная модель системы пуска маломощного высокоскоростного ТГ, которая соответствует процессу разгона ТГ в двигательном режиме, с учетом потерь на вентиляцию ротором [5]. В дополнение, модель переводит систему с разгона от инвертора в разгон турбиной при достижении частоты в 2000 Гц самостоятельной системой регулирования частоты вращения ТГ. Турбина моделируется при помощи математических выражений, описанных в [2], с учетом динамических процессов, описанных в [6].

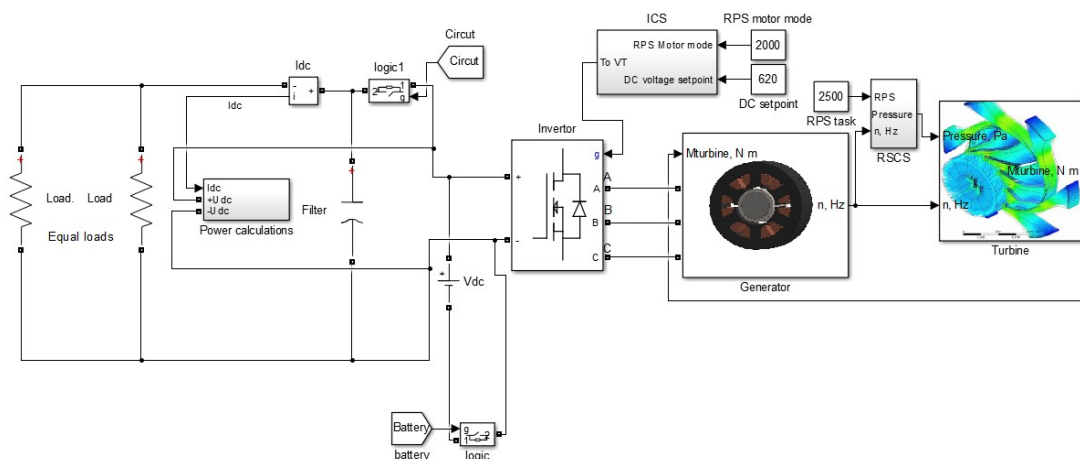


Рис. 4. Модель системы пуска и поддержания номинальной частоты вращения маломощного высокоскоростного ТГ

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы были исследованы рабочие тела, которые могут эффективно использоваться в ОЦР, а также определен подход к выбору оптимального начального давления рабочего тела и типа турбины. Разработаны ТГ на ОЦР и воздушный ТГ для проведения экспериментальных исследований.

В процессе разработки выполнены исследования прочности бандажа и величины натяга для различных диаметров и частот вращения роторов, а также теоретически выведен метод оценки магнитной индукции в воздушном зазоре электрогенератора с постоянным магнитом и с числом пар полюсов равным двум. Расхождение в определении магнитной индукции в зазоре, в сравнении с численными методами, составляет не более 5%. При проектировании генератора оказалось, что наилучшей эффективностью обладает классическая конструкция магнитопровода из стали 2421 с укороченной обмоткой 5/6, которая увеличивает жесткость внешней характеристики уменьшая индуктивность обмотки.

Разработана концепция и модель системы пуска посредством широтно-импульсной модуляции [7] и поддержания частоты вращения маломощных высокоскоростных ТГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина; ИНЭИ РАН–Московская школа управления Сколково – Москва, 2019. – 210 с.
2. **А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний**; Под редакцией А.Г. Костюка, В.В. Фролова. Турбины тепловых и атомных электрических станций: Учебник для вузов. - 2е изд. М.: Издательство МЭИ, 2001. – 488 с.
3. **А.Е. Зарянкин, А.Н. Шерстюк**. Радиально-осевые турбины малой мощности. М.: Машгиз, 1963. – 248 с.
4. **Балагуров В.А.** Проектирование специальных электрических машин переменного тока. М.: Высш. школа, 1982. – 272 с., ил.
5. **Rumyantsev M.Yu., Sizyakin A.V., Shevyrev N.I.** Analysis of electromagnetic processes in high-speed electrical machines with foil gas-dynamic bearings // IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference. 2016. Varna. pp. 530-536.
6. **Г.С. Самойлович, Б.М. Трояновский**. Переменный режим работы паровых турбин. – М.: Госэнергоиздат, 1955. – 280 с.
7. **Калачёв Ю.Н.** Векторное регулирование (заметки практика). [Электронный ресурс]. http://www.efo-power.ru/BROSHURES_CATALOGS/KALACHEV.pdf (дата обращения: 20.03.2020)