

Литература:

- 1 Yano T. Performance of centrifugal blower under pulsating flow // Bull. of JSME.- 1963.- V.6, № 23.- P.478 - 486.
- 2 Епифанова В.И. Компрессорные и расширительные турбомашинны радиального типа.- М.: Изд-во МГТУ, 1998.- 624 с.
- 3 Турбомашинны и МГД-генераторы газотурбинных и комбинированных установок: Учебное пособие / В.С.Бекнев, В.Е.Михальцев, А.Б. Шабаров и др.- М.: Машиностроение, 1983.- 392 с.
- 4 Холщевников К.В., Емин О.Н., Митрохин В.Т. Теория и расчет авиационных лопаточных машин.- М.: Машиностр.,1986.-432 с.
- 5 Гришин Ю.А. Расчет отрывных потерь в решетках осевых турбин.- Настоящ. сборник.
- 6 Селезнев К.П., Галеркин Ю.Б. Центробежные компрессоры.Л.: Машиностроение, 1982.- 271 с.
- 7 Chesse P., Hetet J., Flayret J. Determination par simulation d'une zone critique des champs compresseur situee entre le pompage et la stabilite // Entropie.- 1966.- V.32, № 201.- P.9-18.
- 8 Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. 4-е изд. перераб. и доп.- М.: Наука, 1976.- 888 с.
- 9 Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин.- М.: Энергия, 1970.- 384 с.

ГАЗОТУРБИНАЯ УСТАНОВКА ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА НА БАЗЕ СИСТЕМ «ДВИГАТЕЛЬ- ГЕНЕРАТОР»

Дидов В.В., Сергеев В.Д.

(Дальневосточный государственный технический университет)

Разработка высоконадежных генераторов электрической и тепловой энергии представляет собой важную и актуальную задачу. Рост цен на жидкое углеводородное топливо вынуждает активно искать ему замену. Одним из путей значительного сокращения затрат на топливо является сжигание пылеугольных смесей в замкнутом газотурбинном цикле. Преимущество сжигания угля в газотурбинной установке замкнутого цикла (ГТУЗЦ) возрастает при использовании плазменной топливохимической подготовки углей. К особенностям ГТУЗЦ относится следующее: внутренний тракт ГТД замкнут и отделен от атмосферы, рабочее тело не смешивается ни с атмосферным воздухом, ни с топливом [1].

Использование радиальных турбомашин малых размеров позволяет значительно сократить массу установки и ее габариты и при этом обеспечить высокий внутренний КПД агрегатов. Консольная компоновка центростремительной турбины и высоконапорного центробежного компрессора с подшипниками на газовой смазке позволяет получить высоконадежную систему «двигатель-генератор» с внутренним КПД агрегатов, равным 0,84 [2].

Применение в ГТУ на газовых подшипниках, работающих по открытому циклу, в качестве топлива угля приводит к эрозии сопловых и рабочих лопаток и отложениям в проточной части турбомашин, что в свою очередь влечет разбалансировку ротора и выход подшипников из строя. Газовые подшипники также чувствительны к загрязнению газовой среды, в которой они работают, а при использовании ГТУ открытого цикла неизбежно попадание угольной пыли в подшипники.

Применение замкнутых циклов в ГТУ устраняет эти проблемы и позволяет более успешно применять в них газовые подшипники и при этом значительно снизить затраты на выработку электрической и тепловой энергии, так как стоимость угля в десятки раз меньше стоимости дизельного топлива или мазута.

В ДВГТУ разработаны эскизные проекты систем «двигатель-генератор» для работы в составе ГТУЗЦ на различные мощности. В представленном проекте ГТУЗЦ в качестве рабочего тела выбрана смесь неона с гелием (20He%+80Ne%). Теплоемкость смеси газов подобрана таким образом, чтобы получить умеренные скорости на внешнем диаметре колеса турбины и небольшое число ступеней турбины. На рис. 1 представлены зависимости эффективного КПД ГТУЗЦ от степени повышения давления в цикле при степенях регенерации равных, $r=0$, $r=0,75$, $r=0,85$, $r=0,9$. Температура газа перед соплами турбины высокого давления составляет $T_3=1123$ К; температура газа перед компрессорами составляет $T_1=303$ К; внутренний КПД турбины 0,84, адиабатный КПД компрессора 0,84; КПД камеры сгорания 0,98; механический КПД ГТУ 0,99.

Из полученных зависимостей видно, что эффективный КПД ГТУЗЦ достигает наибольшего значения, равного 0,38 при $r=0,9$ и степени повышения давления в цикле $\pi_k=2,5$.

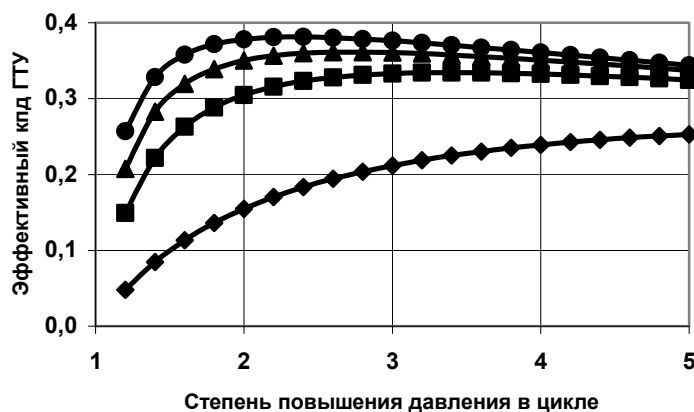


Рис. 1. Зависимость эффективного КПД ГТУЗЦ от степени повышения давления в цикле; \diamond - $r=0$; \blacksquare - $r=0,75$; \blacktriangle - $r=0,85$; \bullet - $r=0,9$

На рис. 2 представлена тепловая схема ГТУЗЦ. При использовании чистого гелия число ступеней увеличивается, так как располагаемый теплоперепад значительно

увеличивается. Применение смеси гелия с неоном позволяет уменьшить количество ступеней и, следовательно, количество систем «двигатель-генератор».

В качестве топлива в данной установке возможно использование угля или пылеугольной смеси, применение которых в настоящее время экономически более эффективно по сравнению с жидкими видами топлив, например мазутом.

Смесь газов из конечного охладителя 21 проходит через четырех ступенчатое сжатие (компрессора 5-8 ступени), проходя через охладители 18-20 после каждой ступени, затем она поступает в регенератор 17 и в воздушный котел 24, где нагревается до температуры $T_3=1123$ К и затем через центробежные турбины (ЦСТ) четырех ступеней 1-4. После турбины смесь газов поступает в регенератор 17, где отдает часть тепла, а затем поступает в конечной охладитель 21 и цикл повторяется.

В системе установлены аккумуляторы высокого 14 и низкого давления 13. При вводе в установку смеси газов из системы высокого давления увеличивается плотность смеси газов, массовый расход и, следовательно, мощность, а при его выпуске в аккумулятор низкого давления, наоборот плотность смеси газов, массовый расход и, следовательно, мощность уменьшаются.

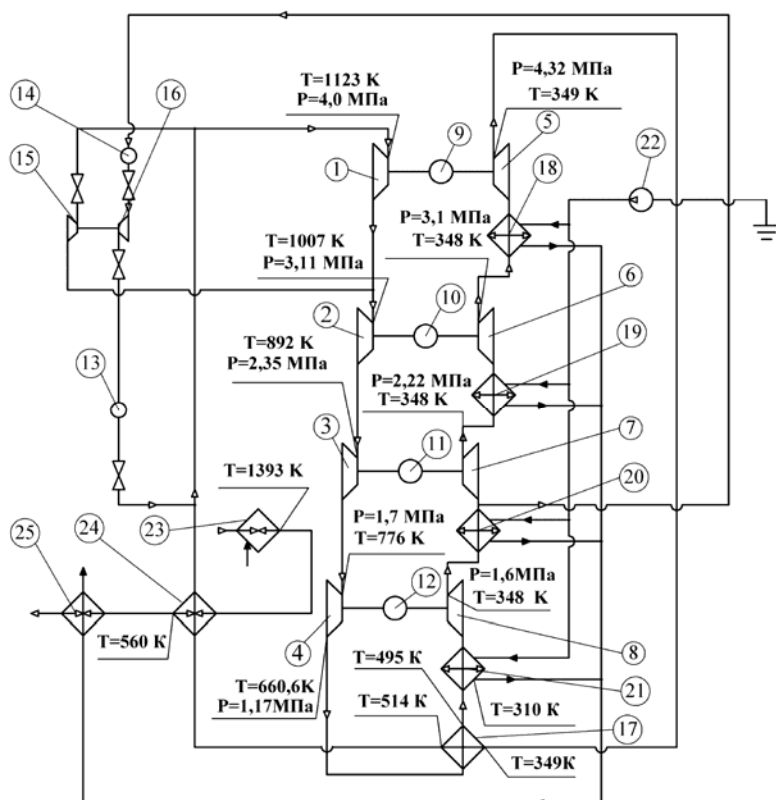


Рис. 2. Тепловая схема ГТУ замкнутого цикла: 1-4 турбины системы «двигатель-генератор»; 5-8-компрессоры системы «двигатель-генератор»; 9-12 -электрогенераторы; 15 -турбина системы регулирования; 16- компрессор системы регулирования; 17 -регенератор; 14-аккумулятор высокого давления; 13- аккумулятор низкого давления; 23 - газовый котел; 21 - концевой охладитель рабочего тела; 22- насос системы теплофикации; 25-котел-утилизатор

При противодавлении газа после турбины 1,17 МПа эффективная мощность установки достигает 1600 кВт, тепловая мощность установки 2800 кВт. Коэффициент использования тепла ГТУЗЦ может достигать 90%.

В качестве подшипников в каждой из четырех систем «двигатель- генератор» используются лепестковые газодинамические подшипники. Проектирование подшипников системы «двигатель-генератор» должно учитывать весь спектр статических и динамических нагрузок на радиальные и осевые подшипники. Так, в частности, должны быть определены область устойчивости ротора и допустимые амплитуды вынужденных колебаний ротора на радиальных подшипниках, рассчитаны осевые усилия от газодинамических сил со стороны турбины и компрессора. Профилирование их проточной части необходимо осуществить не только с точки зрения получения максимального внутреннего КПД турбины и адиабатного КПД компрессора, но и с целью уменьшения результирующего осевого усилия, действующего на осевой подшипник.

Кроме того, так как электрогенератор установлен на одном валу с турбиной и компрессором, то он в свою очередь также является источником вынужденных колебаний. Вынужденные колебания генератора вызваны воздействием высших гармоник электромагнитных сил и моментов от несинусоидальности тока и магнитного поля [3,4]. Этот фактор также следует учитывать при проектировании подшипников. Такой подход позволяет создать не только надежные конструкции подшипников системы «двигатель-генератор», но и уменьшить механические потери в них.

В качестве высокоскоростных генераторов для установки приняты в соответствии с рекомендациями [3,4] синхронные генераторы с возбуждением от современных постоянных магнитов Nd-Fe-B.

Генератор расположен между радиальным и радиальноосевым подшипниками. На валу располагаются полюсы и постоянные магниты, охваченные бандажом из высокопрочной немагнитной стали.

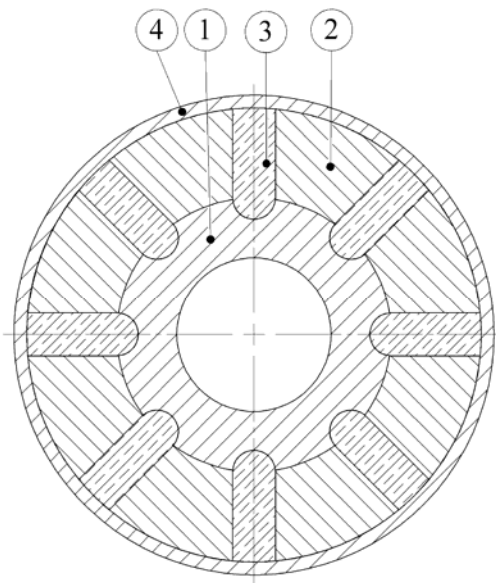


Рис. 3. Конструктивная схема ротора с тангенциальным намагничиванием; 1- немагнитный вал; 2-полюс; 3-магнит; 4- немагнитный бандаж.

Ротор генератора, представленный на рис. 3, служит индуктором. Из-за высокой частоты вращения диаметр ротора ограничен условиями механической прочности. Поэтому ограничен также радиальный размер призматических постоянных магнитов. В этих условиях предпочтительно тангенциальное намагничивание магнитов. Важной особенностью конструкции с тангенциальным намагничиванием является возможность

получения рабочих индукций в зазоре, превышающих индукцию на поверхности магнита. Полюса выполняются из магнитомягкой стали с большой магнитной проницаемостью. Они могут быть монолитными или шихтованными с учётом потерь от высших гармоник полей и переходных процессов.

Статор генератора имеет обычную пазовую конструкцию или беспазовую, если очень мал диаметр ротора. Для сердечника статора используется тонколистовая электротехническая сталь (толщиной 0,05 мм и менее), пригодная для работы в высокочастотных полях. Обмотка статора трёхфазная двухслойная петлевая, выполняемая из высокочастотного провода для уменьшения влияния эффекта вытеснения тока.

Постоянные магниты индуктора не позволяют регулировать поток возбуждения и поддерживать напряжение на нагрузке на заданном уровне. Используются иные способы регулирования и стабилизации напряжения генератора.

Высокоскоростные генераторы вырабатывают электроэнергию высокой частоты (килогерцы), а большинство потребителей рассчитано на переменное напряжение стандартной частоты 50 Гц или на напряжение постоянного тока.

Следовательно, с учётом необходимости стабилизации напряжения и понижения частоты генератор с возбуждением от постоянных магнитов необходимо дополнить управляемым преобразователем частоты и напряжения (на наш взгляд, со звеном постоянного тока). Автоматическое управление параметрами электроэнергии генератора и процессами газотурбинной установки целесообразно возложить на современный полупроводниковый контроллер. Соответствующим управлением можно минимизировать содержание высших гармоник в токе обмотки статора.

Управляемые преобразователи и промышленные контроллеры широко применяются в силовой технике. Некоторые затруднения могут возникнуть при реализации преобразователей при очень больших скоростях вращения и частотах генераторов. Но и в этих случаях можно подобрать для преобразователей подходящие IGBT-транзисторы.

Мощные генераторы рассчитываются на напряжение в несколько киловольт. Для согласования с допустимым напряжением силовых элементов выпрямителя необходим специальный трёхфазный высокочастотный трансформатор. Последний можно изготовить с навитым разъёмным сердечником и обмотками из такой же стали и такого же провода, как у генератора. При высокой частоте трансфор-

мотор имеет небольшие габариты. Между инвертором преобразователя и потребителем электроэнергии при необходимости можно использовать подходящий стандартный трансформатор. Основные характеристики синхронных магнитоэлектрических генераторов приведены в таблице 1. Все четыре генератора включаются параллельно на общие шины.

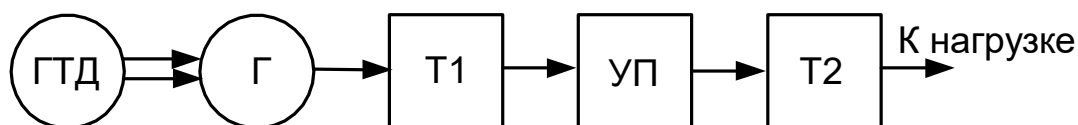


Рис.4. Общая функциональная схема электрической части ГТУЗЦ: ГТД – газотурбинный двигатель; Г – электрический генератор; Т1 - высокочастотный трансформатор; УП – управляемый преобразователь напряжения и частоты; Т2 – трансформатор промышленной частоты

Таблица 1. Основные характеристики синхронных магнитоэлектрических генераторов

Номер системы «двигатель-генератор»	Частота вращения ротора, мин ⁻¹	Мощность системы «двигатель-генератор», кВт	Частота генератора, Гц	Диаметр индуктора генератора, мм	КПД генератора	Длина активной части ротора, мм	Относительная масса индуктора, кг/кВт
1	54600	340	3640	0,112	0,977	228	0,046
2	50600	340	3373	0,120	0,977	229	0,0526
3	46600	340	3107	0,130	0,976	230	0,0618
4	41900	340	2793	0,142	0,975	232	0,0767

Число фаз $m=3$, номинальное фазное напряжение 690 В, соединение фаз – звезда. Линейная токовая нагрузка 40 000А/м, плотность тока в обмотке 9 А/мм². Номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi=0,85$. Число пар полюсов $p=4$. Магниты Nd-Fe-B марки 35 EH, $B_r=1,2$ Тл, $H_c=820\ 000$ А/м. Пазовая конструкция сердечника статора.

Литература

1. Михайлов А.И., Борисов В.В., Калинин Э.К. Газотурбинные установки замкнутого цикла. – М.:Изд-во АН СССР, 1962.-147 с.
2. Розенберг Г.Ш. и др. Центростремительные турбины судовых установок/ Г.Ш. Розенберг, Н.М. Ткачев, В.Ф. Костыркин. - Л.: Судостроение, 1973.-216 с.
3. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
4. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины.–М.:Высш.шк.,1990– 416с.

МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ РСА ТКР С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОЙ ВСХ АВТОМОБИЛЬНОГО ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ УДОВЛЕТВОРЯЮЩЕЙ СОВРЕМЕННЫМ ЭКОЛОГИЧЕСКИМ И ЭКОНОМИЧЕСКИМ ТРЕБОВАНИЯМ

Епифанов Д.В. (ОАО «ЗМЗ»)

Современный автомобильный дизельный двигатель, удовлетворяющий в со-