DOI: 10.17117/na.2015.05.116

Поступило в редакцию: 01.05.2015

<http://ucom.ru/doc/na.2015.05.116.pdf>

Барсков В.В., Забелин Б.Ф.
К вопросу повышения конкурентоспособности
и технологичности малорасходных
газотурбогенераторов на этапе проектирования

Barskov V.V, Zabelin B.F.
The issue of increasing the competitiveness and adaptability
of economical gas turbo generators at the design stage

В статье рассматриваются проблемы при проектировании малорасходных газотурбогенераторов, рассмотрены основные направления совершенствования установок, предложена новая тепловая схема и три возможные компоновки, описаны их преимущества и недостатки

Ключевые слова: малорасходные газотурбогенераторы, компоновка, тепловая схема

The article discusses issues in the design of economical gas turbo generators, the main directions of improvement of installations proposed new thermal circuit and three possible layouts, described their advantages and disadvantages

Key words: low mass flow rate of the gas turbo generators, layout, thermal circuit

Забелин Борис Федорович

Кандидат экономических наук, доцент
 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
 г. Санкт-Петербург, Полустровский проспект, 14

Zabelin Boris Fedorovich

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor
 St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great
 Saint-Petersburg, Polyustrovsky Avenue, 14

Барсков Виктор Валентинович

Аспирант
 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
 г. Санкт-Петербург, Полустровский проспект, 14

Barskov Viktor Valentinovich

Graduate
 St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great
 Saint-Petersburg, Polyustrovsky Avenue, 14

Малорасходные газотурбогенераторы (МГТГ) находят все более широкое применение в качестве автономных энергоисточников. На рынке востребованы подобные автономные энергоисточники с длительным ресурсом, низким уровнем выбросов, возможностью работать на различных видах энергоносителей и с относительно высоким КПД. При проектировании и компоновке МГТГ возникает ряд вопросов и противоречий при выборе тепловой схемы и применении основных конструкторских решений [1].

Актуальность проблемы заключается в том, что многообразие потребителей энергии и требований к виду и качеству энергообеспечения, заставляет

по-новому взглянуть на роль автономных энергетических агрегатов малой мощности (от десятков киловатт до нескольких мегаватт) в общей структуре энергетики. В условиях современной государственной политики и курса экономики на импортозамещение, в ближайшей перспективе серьезное внимание следует уделить сооружению отечественных, относительно дешевых автономных энергетических установок (АЭУ) малой мощности, различного назначения, финансирование которых возможно как из местных бюджетов, так и за счет инвестиций частного капитала.

Одной из наиболее сложных проблем является проблема масштаба и со-размерности обстановки проточной части МГТГ. Вследствие данной особенности отдельные потери КПД будут происходить в промежутке между камерой сгорания, турбиной, компрессором и регенеративным воздухоподогревателем. Такие потери возникают в результате:

- Изгибов и поворотов в патрубках;
- Ответвлений, переходов и развилок в патрубках;
- Фланцевых соединений;
- Зазоров между элементами конструкции;
- Высокой шероховатости на внутренней поверхности патрубков;
- Установленных датчиков и зондов.

Указанные потери, при проектировании МГТГ без компенсации перечисленных факторов, могут значительно снизить КПД установки, полученный при оптимизации компрессора и турбины (Рис.1) [1, 2]

Относительный коэффициент изменения потерь элементов ГТУ

Рис. 1. Относительный коэффициент изменения потерь элементов ГТУ

Известна простая тепловая схема газотурбогенератора, когда на оси одного вала находится компрессор турбина и генератор. Камера сгорания представляет отдельный блок расположенный вокруг турбины или перпендику-

лярно оси вала. В обоих случаях происходит поворот потока на 90° или 180° . В случае применения рекуперативного воздухоподогревателя тракты воздуха и газа еще более осложняются, что существенно снижает КПД установки [1].

Тепловая схема газотурбогенератора со свободной турбиной позволяет оптимально подобрать обороты компрессора и обороты свободной турбины. По воздушному и газовому тракту с учетом газоходов имеются те же проблемы. Преимуществом двухвального ГТГ является облегченный пуск, который требует меньших затрат энергии, т.к. силовая турбина в нем не участвует ($n=0$). Для пуска в обоих случаях требуется специальное устройство [1, 2].

В простых схемах оптимизация происходит по пути определения оптимальной частоты вращения компрессора, удовлетворяющей также и оптимальным параметрам турбины. Поскольку КПД компрессора меньше, то выбор частоты вращения ротора компрессора является определяющим при выборе рабочей частоты. С потерей в КПД турбины приходится мириться.

Рис. 2. Относительный коэффициент изменения КПД турбины и компрессора

Из Рис. 2 видно, что КПД турбины все равно, выше КПД компрессора, хотя рабочее число оборотов турбины находится не в оптимальной точке. Оптимальный относительный КПД установки обеспечивается при меньшем относительном КПД турбины.

Для решения указанной проблемы предлагается тепловая схема газотурбогенератора, где компрессор приводится во вращение от электродвигателя (Рис.3).

В случае развязанных механически валов турбины с генератором и компрессора с электродвигателем возможно:

- Выбрать оптимальное значение оборотов компрессора, причем, определяющим будет максимально допустимые обороты по прочности колеса;
- Сделать осевой вход в компрессор (наименьшие потери со стороны входного патрубка, нет поворота потока, как в случае с улиткой) такая возможность имеется при исполнении двухпорного ротора генератора с консольным вылетом рабочего колеса компрессора;
- Выбрать оптимальное значение оборотов турбины, причем определяющим будет максимально допустимая температура, перед рабочим колесом турбины исходя из жаропрочности и жаростойкости материала колеса. В большей степени, КПД турбины определяет температура на входе (T_3);

– Выбрать оптимальную компоновку МГТГ. [3]

Рис. 3. Предлагаемая тепловая схема газотурбогенератора

1 – комплексное воздухоочистительное устройство; 2 – компрессор;
3 – камера сгорания; 4 – турбина; 5 – генератор; 6 – электродвигатель;
7 – блок силовой электроники генератора; 8 – блок силовой электроники электродвигателя – пусковое устройство; 9 – аккумуляторы

Электродвигатель при пуске получает энергию от внешнего источника питания, а в процессе работы от генератора, приводимого турбиной. Излишек энергии генератор отдает потребителю.

Существенным недостатком предложенной схемы будет необходимость применения одновременно двух электрических машин, что негативно повлияет на:

- КПД установки, т.к. максимальный суммарный КПД двух электрических машин не будет превышать 0,98;
- Полезную мощность, т.к. электрические машины ограничены по габаритным размерам;
- Надежность, т.к. для управления требуется сложная система автоматики и регулирования;
- Стоимость, т.к. для изготовления электрических машин с достаточным КПД требуются значительные материальные и трудовые затраты.

Однако указанные недостатки не перекрывают достоинств предложенной схемы, на ее основе разработаны три компоновки МГТГ.

На Рис. 4 показаны предлагаемые 3D модели компоновок МГТГ.

Рис. 4 а) 3D модель МГТГ простой тепловой схемы без рекуперативного воздухоподогревателя; б) 3D модель компоновки МГТГ с прямоточным рекуперативным воздухоподогревателем; в) 3D модель МГТГ с противоточным рекуперативным воздухоподогревателем

Основные факторы которые необходимо учесть при проектировании:

- Необходимо минимизировать количество переходных патрубков;
- Переходные патрубки необходимо минимизировать по длине;
- Переходные патрубки необходимо минимизировать по количеству поворотов [4].

Критерием создания компоновки (Рис. 4а) послужило то, что в газо-воздушном тракте имеется всего один поворот потока в тупиковой камере сгорания. Воздух из компрессора поступает в тупиковую камеру сгорания. Из камеры сгорания газ поступает в улитку перед сопловым аппаратом. Но КПД установки будет слишком низким (менее 15%) из-за отсутствия рекуперативного воздухоподогревателя.

Подобная компоновка возможна в случае:

- Применения установки в качестве резервной или аварийной с кратковременным режимом работы, т.к. КПД не будет иметь весомого значения;
- Применения установки в условиях наличия доступного стороннего источника тепла для подогрева воздуха, например отходящие газы от более мощных газотурбинных установок. (При этом возможно разнесение турбины и компрессора на значительно расстояние).
- Применения установки в составе другой, более мощной установки в качестве вспомогательного агрегата.

Критерием создания компоновки (Рис. 4б) послужило то, что с учетом рекуперативного воздухоподогревателя в газо-воздушном тракте имеется 4 поворота потока, причем рекуперативный воздухоподогреватель прямоточный. Как и в предыдущей компоновке применена камера сгорания тупикового типа. Но из-за низкой степени регенерации данная схема не перспективна, т.к. КПД установки будет относительно низким (менее 25%).

Подобная компоновка возможна в тех же случаях, что и предыдущая.

Критерием создания компоновки (Рис. 4в) послужило то, что в газоз-воздушном тракте имеется 3 поворота потока, причем 2 из них в противоточном

рекуперативном воздухоподогревателе. Как и в предыдущей схеме применена камера сгорания тупикового типа. Данная схема наиболее перспективна т.к.:

- КПД установки будет относительно высоким (34-35%);
- Возможно применение установки в качестве основной энергоустановки

с длительным режимом работы;

С конструкторской стороны сборка предложенных вариантов более простая, чем классическая схема, т.к. собираемых частей меньше:

- В случае замены единичной детали в компрессоре или турбины, надо будет разобрать только ту сборку, где надо заменить единичную деталь;

– Балансировка любого из двух коротких двухопорных роторов намного проще, чем одного длинного трехопорного ротора.

Применение компрессора с отдельным электроприводом позволит:

- Повысить КПД компрессора, за счет увеличения η_k в пределе для простой тепловой схемы, то можно получить общее КПД ГТГ 34% – 35%;

– Уменьшить габариты и, как следствие, массу компрессорной части;

– Уменьшить потери в газо-воздушном тракте за счет оптимальной компоновки. Следует также отметить упрощение тепловых компенсаций от расширения узлов от температуры;

– Применение двух коротких роторов вместо одного длинного позволит еще более снизить уровень вибрации, что, повысит надежность изделия;

– Применение двух коротких роторов уменьшает радиальную нагрузку на подшипники, т.к. вес любого из коротких роторов меньше одного длинного, что повысит надежность подшипников и при сохранении степени нагрузки позволит уменьшить осевые размеры роторов;

– Сборка отдельно двух турбомашин значительно проще сборки одновального ГТГ;

– Собственная сборка общей схемы осуществляется по двум фланцам для компрессора (вход и выход), присоединение проводов питания и по двум фланцам для турбины (вход от камеры сгорания и выход) и присоединение проводов питания;

– Сборка одновального ГТГ состоит из сборки отдельных частей ротора (генераторная часть, компрессорная часть и турбинная) с соответствующими статорными частями.

В конструкции двухвальной МГТГ мощность генератора возрастает и становится равной мощности турбины за вычетом потерь. Соответственно возрастают и размеры генератора. В случае использования уже разработанного и освоенного в производстве генератора, мощность турбины уменьшается и, соответственно, ее размеры становятся меньше. Уменьшение мощности турбины ведет к уменьшению расхода воздуха, т.е. мощность потребляемая компрессором уменьшается, и в качестве электродвигателя, используя свойство обратимости электромашин, можно применить укороченный генератор от турбины. Мощность этой электрической машины пропорциональна длине рабочей части. Одновременное увеличение оборотов компрессора еще больше уменьшит потребляемую мощность и, следовательно, габариты МГТГ.

Список литературы:

1. Кириллов И.И. Теория турбомашин. Л., Машиностроение, 1972. 533 с.
2. Галеркин Ю.Б., Козаченко Л.И. Турбокомпрессоры. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. СПб., 2008.
3. Рассохин В.А., Забелин Н.А., Матвеев Ю.В. Основные направления развития микротурбинных технологий в России и за рубежом // Научно-технические ведомости СПбГПУ. СПб., 2011. № 4 (135). С. 41-51.
4. Беседин С.Н. и др. Разработка и создание автономных энергетических установок малой мощности на базе газотурбинного цикла простой схемы с сильно-развитой системой регенерации тепла // Инновационная политика и изобретатели (Россия – начало XXI века). Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.

© 2015, Барсков В.В., Забелин Б.Ф.

К вопросу повышения конкурентоспособности и технологичности малорасходных газотурбогенераторов на этапе проектирования

© 2015, Barskov V.V, Zabelin B.F.

The issue of increasing the competitiveness and adaptability of economical gas turbo generators at the design stage