

УДК 621.438

М.А. ТАРАСЕНКО

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ОДНОКАСКАДНОГО ГЕНЕРАТОРНОГО ГТД С ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫМ КОНТУРОМ И ОТДЕЛЬНОСТОЯЩИМ КОМПРЕССОРОМ НА ЧАСТИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Рассматривается однокаскадный газотурбинный двигатель (ГТД) для электростанции, имеющий теплоутилизационный контур (ТУК) и промежуточное охлаждение в компрессоре. Компрессор считается состоящим из двух агрегатов. Компрессор до воздухоохладителя может иметь отдельный привод. Такой компрессор называем отдельностоящим компрессором (ОСК). Особенностью работы генераторной машины является постоянная скорость вращения во всем диапазоне рабочих режимов (частота должна быть постоянной). При переходе на частичный режим расход воздуха уменьшается мало (обороты постоянны), поэтому приходится уменьшать температуру цикла. Уменьшение температуры цикла понижает КПД и может вызвать срыв утилизации. Меняя температуру промощаждения можно поддерживать КПД установки достаточно высоким в широком диапазоне мощностей.

Ключевые слова: ГТД, ТУК, компрессор, промощаждение, КПД, расход, температура цикла.

Введение

Особенностью однокаскадных ГТД, работающих на генератор, является практически постоянная скорость вращения. При работе на частичном режиме расход воздуха (газа) через турбомашину меняется незначительно. Поэтому уменьшение мощности достигается понижением температуры цикла. Резкое понижение температуры цикла на частичных режимах может вызвать срыв работы ТУК и резкое понижение КПД.

Если в ГТД применено промежуточное охлаждение циклового воздуха, то, меняя температуру воздуха на выходе из промощаждителя, можно менять мощность двигателя с незначительным понижением температуры.

1. Формулирование проблемы

Требуется обосновать температуру воздуха на выходе из промощаждителя, которая является оптимальной для заданного частичного режима.

Если отдельностоящий компрессор (ОСК) имеет управляемый привод, то необходимо указать способ управления им.

1.1. Общие соображения

Рассматривается однокаскадный ГТД, степень повышения давления в компрессоре которого равна

шестнадцать. Степень повышения давления в компрессоре после охладителя циклового воздуха (ОЦВ) равна восьми.

На рис. 1 показана схема рассматриваемой ГТД.

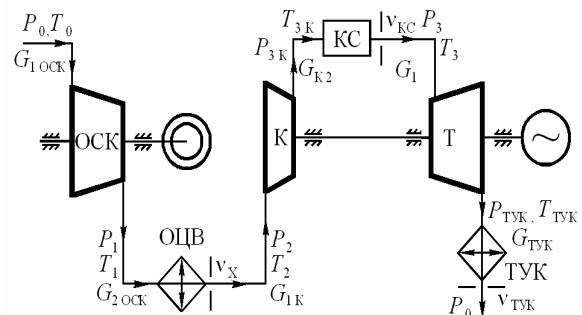


Рис. 1. Схема ГТД

Предполагается возможность регулирования температуры за ОЦВ, например, изменением количества прокачиваемой воды путем частотного управления электродвигателем насоса.

Параметры в характерных сечениях можно получить по приведенному ниже алгоритму:

1. Задаемся относительным обобщенным расходом газа на входе в турбину:

$$G_{1T} = \frac{G_T \cdot \sqrt{T_{03}}}{P_{03}} \cdot \frac{P_{03H}}{G_{TH} \cdot \sqrt{T_{03H}}}$$

2. По характеристике турбины компрессора $\bar{G} = f(\pi_{TK})$, $\bar{\eta}_{TK} = \varphi(\pi_{TK})$ определяют степень понижения давления в турбине и ее адиабатический КПД $\eta_{TK} = \bar{\eta}_{TK} \cdot \eta_{TKH}$. Зная эти величины, определим параметры на выходе из турбины.

Действительно, понижение температуры в турбине

$$\Delta t_{TK} = T_{03} \cdot (1 - \pi_{TK}^{-x_T}) \cdot \eta_{TK}.$$

Температура на выходе из турбины (она же на входе в ТУК) определится следующим выражением

$$T_{04} = T_{03} \cdot \left[1 - (1 - \pi_{TK}^{-x_T}) \cdot \eta_{TK} \right].$$

Таким образом, известен относительный обобщенный расход газа на входе в ТУК.

$$P_{ТУК} = P_{03} / \pi_{TC}.$$

Относительный обобщенный расход на входе в ТУК

$$G_{ТУК} = \frac{G_T \cdot \sqrt{T_{ТУК}}}{P_{ТУК}} \cdot \frac{P_{ТУKH}}{G_{TH} \cdot \sqrt{T_{ТУKH}}}.$$

Подставив полученные выше выражения, запишем:

$$G_{ТУК} = G_{1T} \cdot K_{1T},$$

$$\text{где } K_{1TC} = \frac{\pi_{TT}}{\pi_{TTH}} \cdot \sqrt{\frac{1 - (1 - \pi_{TC}^{-x_T}) \cdot \eta_{TCH} \cdot \bar{\eta}}{1 - (1 - \pi_{TCH}^{-x_T}) \cdot \eta_{TCH}}}$$

3. Зная степень понижения давления в турбине и степень восстановления полного давления в переходнике и газоходе (ТУКе)

$$v_{ТУК} = 1 - (1 - v_{ТУKH}) \cdot G_{ТУК}^2,$$

определим давление на входе в турбину и, учитывая потери давления в камере сгорания по известному G_{1T} , определим обобщенный относительный расход за компрессором G_{K2} .

Тогда

$$v_{KC} = v_{KCH} \cdot G_{1T} / G_{K2}.$$

Давление за компрессорами

$$P_{3K} = (\pi_{TK} \cdot \pi_{TC}) / (v_{ТУК} \cdot v_{KC}).$$

Давление перед турбиной компрессора

$$P_{03} = P_{3K} \cdot v_{KC}.$$

4. Определяем параметры процессов в компрессорах.

– степень повышения давления компрессора газогенератора:

$$\pi_K = P_{3K} / P_2.$$

При определении степени повышения давления считается известным давление перед компрессором газогенератора P_{02} , которое задано;

– зная π_K , с помощью ниже приведенной

$$\text{формулы } G_{K2} = G_{1K} \frac{\pi_{KH}}{\pi_K} \sqrt{\frac{1 + (\pi_K^{x_K} - 1) / \eta}{1 + (\pi_{KH}^{x_K} - 1) / \eta_H}}$$

построим зависимость $G_{K2} - G_{1K}$, с помощью которой, зная G_{K2} , найдем G_{1K} и η_K ;

– повышение температуры в компрессоре:

$$\Delta t_K = T_{02} \cdot (\pi_K^{x_K} - 1) / \eta_K;$$

– степень повышения давления ОСК:

$$\pi_{ОСК} = P_{02} / (P_0 \cdot v_x),$$

где v_x – степень восстановления полного давления в воздухоохладителе;

– повышение температуры в ОСК:

$$\Delta t_{ОСК} = T_0 \cdot (\pi_{ОСК}^{x_{ОСК}} - 1) / \eta_{ОСК}.$$

Температурой T_{03} можно задаться произвольно. Действительно двигатель однокаскадный и из баланса мощностей турбины и компрессора можно определить мощность, отдаваемую или потребляемую двигателем (потребление мощности из сети возможно при низкой T_{03} , что плохо для генератора). Для получения высокого КПД температуру надо держать максимально высокой как вариант номинальной, а мощность понижать увеличением температуры за проохладителем.

Далее расчеты выполняются согласно [3, 4].

2. Решение проблемы

Цель дальнейшего анализа – определить КПД двигателя в зависимости от относительной мощности (режима). Результаты приведены на рис. 2.

На рис. 2 представлен сравнительный анализ ГТД с ТУК традиционной схемы и ГТД с ТУК и проохлаждением. Каждый из двигателей на расчетном режиме имеет оптимальное π_K и одинаковое КПД элементарной ступени турбомшины. В схеме с проохлаждением учтены при определении КПД цикла КПД привода ОСК и мощность, необходимая на привод ОСК. Давление за ОСК на каждом режиме выбиралось соответствующее максимальному КПД цикла с одновременным оптимальным выбором температуры за воздухоохладителем (температура могла изменяться в сторону увеличения).

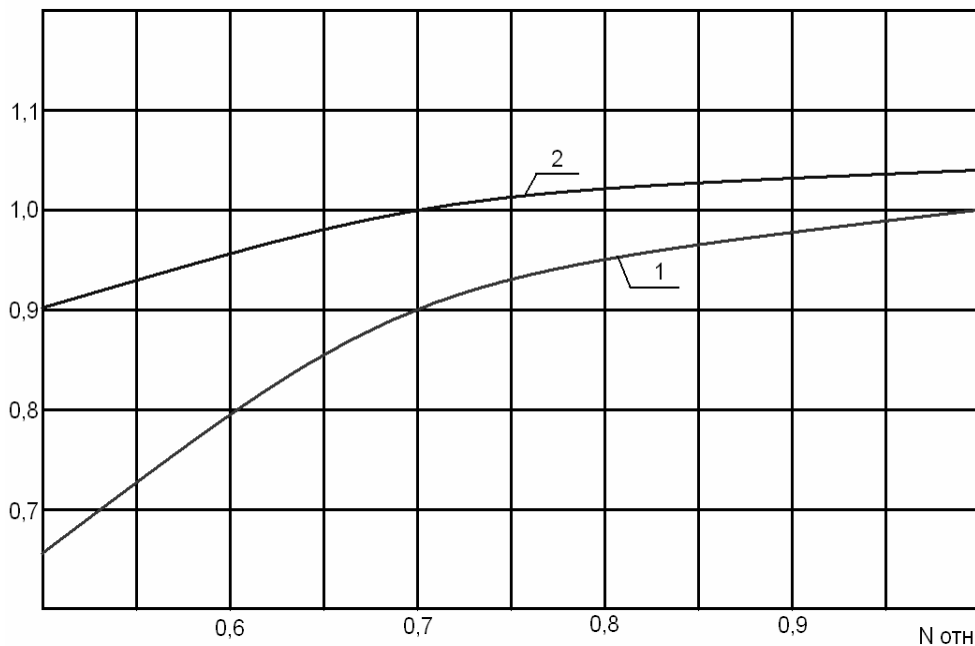


Рис. 2. Зависимости КПД двигателя от вырабатываемой мощности
1 — обычный двигатель с ТУК; 2 — с промозахлаждением и оптимальным управлением ОСК

Заклучение

Можно сделать вывод о существенном увеличении экономичности двигателя с промежуточным охлаждением циклового воздуха на частичных режимах.

Наибольшая эффективность ГТД может быть достигнута, если мощность изменять путем изменения давления за отдельно стоящим компрессором. Однако такое регулирование требует отдельного привода (это может быть паровая турбина ТУК) и понижает запас устойчивости двигателя.

Изменение только температуры за отдельно стоящим компрессором также эффективно, но в меньшей степени.

Поддержание высокой температуры понижает ресурс двигателя. Поэтому температуру не следует держать номинальной, а есть смысл поддерживать такую температуру, которую двигатель выдерживает долго, но ТУК при этом может нормально работать.

Есть смысл специально спроектировать двигатель на некоторый оптимальный режим, а максимальную мощность получать увеличением давления за отдельно стоящим компрессором.

При рассмотрении простой схемы с утилизацией не учитывался «срыв» ТУК на низких режимах т.е. при сравнении реальных двигателей эффект от применения промежуточного охлаждения будет выше.

При применении отдельного привода для отдельно стоящего компрессора двигатель есть смысл сделать «двух этажным» т.е. ОСК установить на вхо-

де в воздухозаборную шахту, в которой можно организовать воздухоохладитель.

Если отдельного привода не предусматривается, то при «двух этажной» компоновке можно применить привод с передачей мощности между скрещивающимися валами, например, коническую.

Литература

1. Романовський Г.Ф. Теоретичні основи проектування судових газотурбінних агрегатів: навчальний посібник / Г.Ф. Романовський, М.В. Василенко, С.І. Сербін. — Миколаїв: УДМТУ, 2003. — 304 с.
2. Нечаев Ю.Н. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч. I / Ю.Н. Нечаев, Р.М. Федоров. — М.: Машиностроение, 1977. — 312 с.
3. Радченко Н.И. Исследование эффективности охлаждения циклового воздуха судовых газотурбинных двигателей / Н.И. Радченко, А.А. Сирота, М.А. Тарасенко // Вестник двигателестроения: научно-технический журнал. — 2006. — № 3. — С. 46-49.
4. Тарасенко М.А. Частичные режимы судового газотурбинного двигателя с промежуточным охлаждением / М.А. Тарасенко // Авиационно-космическая техника и технология. — 2008. — № 7 (54). — С. 154-157.

Поступила в редакцию 7.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Р. Ткач, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев.

**ОПТИМАЛЬНЕ ПРОМІЖНЕ ОХОЛОДЖЕННЯ ОДНОКАСКАДНОГО ГЕНЕРАТОРНОГО ГТД
З ТЕПЛОУТИЛІЗУЮЧИМ КОНТУРОМ ТА ОКРЕМОСТОЯЧИМ КОМПРЕСОРОМ
НА ЧАСТКОВИХ РЕЖИМАХ**

М.О. Тарасенко

Розглядається однокаскадний газотурбінний двигун (ГТД) для електростанції, який має теплоутилізуючий контур (ТУК) та проміжне охолодження в компресорі. Компресор вважається побудованим з двох агрегатів. Компресор до повітроохолоджувача може мати окремий привод. Такий компресор називаємо окремостоячим компресором (ОСК). Особливістю роботи генераторної машини є постійна швидкість обертання у всьому діапазоні робочих режимів (частота повинна бути сталою). При переході на частковий режим витрата повітря зменшується мало (швидкість обертання постійна), тому доводиться зменшувати температуру циклу. Зменшення температури циклу зменшує ККД і може призвести до зриву утилізації. Змінюючи температуру промохолодження можливо підтримувати ККД на досить високому рівні у широкому діапазоні потужностей.

Ключові слова: ГТД, ТУК, компресор, проміжне охолодження, ККД, витрата, температура циклу.

**OPTIMAL INTERMEDIATE COOLING SINGLE-STAGE GAS-TURBINE ENGINE
WITH HEAT-RECOVERING OUTLINE AND FREE-STANDING COMPRESSOR
ON PARTIAL REGIME**

M.A. Tarasenko

We view single-stage gas-turbine engine (GTE) for electric power station, that has a heat-recovering outline (HRO) and intermediate cooling in the compressor. Compressor is consist with two units. Compressor could has a separate drive to air-cooler. That compressor is called as free-standing compressor (FSC). Peculiarity of work of the producer machine is constant rate of rotation in all diapason of working regime. (frequency must be constant). During transition on partial regime, expenditure of air is cut down a little (turns are constant), thats why temperature of cycle must be cut down too. Cuting down of the temperature of the cycle demote efficiency and can be reason of the failure of utilization. Changing temperature of intercooling we can uphold efficiency of the setting high enough in the wide range of power.

Key words: GTE, heat-recovering, compressor, intermediate cooling, efficiency, charge, temperature of cycle.

Тарасенко Марія Александровна – інженер, старший лаборант кафедри механіки і конструювання машин Національного університета кораблестроєння ім. адмирала Макарова, Николаєв, Україна, e-mail: tai777@ukrpost.net.