

УДК 621.438

М.А. ТАРАСЕНКО

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ГТД РАЗНЫХ СХЕМ НА ЧАСТИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Рассматривается 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. В однокаскадных машинах при переходе на частичный режим приходится уменьшать температуру цикла, что может вызвать срыв утилизации. Для машин со свободной силовой турбиной ситуация лучше. Меняя температуру промощаждения можно поддерживать кпд установки достаточно высоким в широком диапазоне мощностей. Приведены результаты расчета для ГТД с разными схемами.

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. Промежуточное охлаждение циклового воздуха в ГТД с ТУК оправдано тем, что, меняя температуру воздуха на выходе из промощаждителя, можно менять мощность двигателя с незначительным понижением температуры и без срыва ТУК.

1. Формулирование проблемы

Требуется получить КПД двигателя в зависимости от температуры воздуха за воздухоохладителем при постоянной мощности, развиваемой двигателем. Анализируя полученную зависимость, можно указать то значение температуры воздуха за воздухоохладителем, при котором КПД для конкретного частичного режима максимальный. Получив такие зависимости для всего диапазона мощностей, можно предложить алгоритм изменения температуры воздуха за воздухоохладителем на частичных режимах. Во всех ГТД сложных схем важным считается вопрос потерь в теплообменных аппаратах. В данной работе автор пытается уделить этому вопросу особое внимание. Потери в теплообменных аппаратах рассматриваются на частичных режимах, более того, учитывается изменение температур на их величину. Потери в теплообменных аппаратах разбиты на две части – потери на входе и потери на выходе, что позволяет более точно учесть особенности рассматриваемого режима.

1.1. Общие соображения

В работе [2] показано, что степень восстановления полного давления на частичном режиме можно определить из следующего выражения

$$1 - v = (1 - v_{кр}) \left(q_{in}^2 / \bar{\varepsilon} \right), \quad (1)$$

где $v_{кр}$ – степень восстановления полного давления при критическом истечении; $\bar{\varepsilon} = \varepsilon(\lambda) / \varepsilon(1)$; q , ε – газодинамические функции. Часто в газодинамике используют параметр расхода [1] $g = \frac{G \cdot \sqrt{T}}{P}$ или $\bar{g} = \frac{g}{g_n} = \frac{G \cdot \sqrt{T}}{P} \cdot \frac{P_n}{G_n \cdot \sqrt{T_n}}$, где \bar{g} – отношение параметра расхода к этому же параметру на номинальном режиме.

Можно показать, что $q = \bar{g} \cdot q_n$ при этом следует учитывать, что g и q не одно и то же. Вместо $v_{кр}$ можно задаться λ_n на номинальном режиме или для $\lambda_n = 0,5$ воспользоваться формулой

$$v_{кр} = 1 - 2,8(1 - v_n). \quad (2)$$

Автор статей [2, 3] любезно предоставил следующие процедуры, позволяющие определить параметры элементов ГТД:

– для устройств типа «гидравлическое сопротивление»:

$$v = v(\bar{g}_{in}, v_n, v_{кр}, k), \quad (3)$$

$$v = v(\bar{g}_{ou}, v_n, v_{кр}, k); \quad (4)$$

– для устройства типа компрессор

$$\pi_k = \pi_k(\bar{p}_{пр}, \bar{g}_{ou}, \eta_n, \eta_{оун}, \eta_{инн}, \pi_{кн}), \quad (5)$$

$$\bar{g}_{ou} = \bar{g}_{ou}(\bar{p}_{пр}, \bar{g}_{in}, \eta_n, \eta_{оун}, \eta_{инн}, \pi_{кн}); \quad (6)$$

– для устройства типа турбина

$$\pi_T = \pi_T(g_{оп}, \pi_{Тн}, \pi_{Ткр}, \eta). \quad (7)$$

Применим зависимости (4)–(7) к ГТД, схема которого представлена на рис. 1.

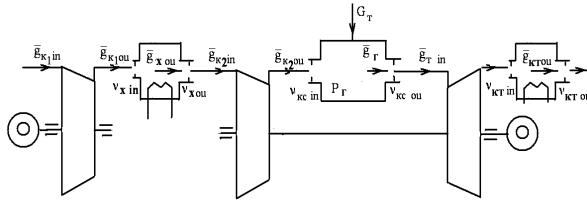


Рис. 1. Схема ГТД

Предполагается возможность регулирования температуры за ОЦВ путем частотного управления электродвигателем насоса охлаждающей воды.

Параметры ГТД на частичном режиме определяются в следующей последовательности:

1. Задаем относительным параметром расхода воздуха на выходе из компрессора $1 - \bar{g}_{k1ou}$.

2. С помощью метода (5) определяем π_{k1} , $\bar{\theta}_1$ и \bar{g}_{k1in} . Затем с помощью метода (4) определяем $v_{вх}$.

3. Определяем относительный параметр расхода воздуха в охладителе

$$\bar{g}_{xou} = \bar{g}_{k1ou} \frac{v_{xin}}{v_{xou}} \sqrt{\frac{\bar{T}_x}{\bar{T}_{k1ou}}},$$

где \bar{T}_x – относительная температура за охладителем; $\bar{T}_{k1ou} = \bar{T}_0 \cdot \bar{\theta}_1$ – температура на входе в охладитель.

С помощью метода (3) определяем v_{xou} и находим $P_{k2in} = \pi_{k1} P_0 v_{вх} \cdot v_{xin} \cdot v_{xou}$ – давление на входе в компрессор 2.

4. Вычисляем относительный параметр расхода воздуха на входе в компрессор 2

$$\bar{g}_{k2in} = \bar{g}_{xou} \cdot (v_{xouн} / v_{xou})$$

и, используя метод (6), определяем \bar{g}_{k2ou} , а также остальные параметры потока за компрессором 2.

5. Определяем давление в камере сгорания $\bar{P}_Г = \bar{P}_в \cdot (v_{kcin} / v_{kcinн})$, вычислив v_{kcin} с помощью метода (3).

В рассматриваемой схеме два компрессора и поэтому параметр расхода за вторым компрессором есть параметр расхода на входе в камеру сгорания.

Этот факт не снижает общности методики. Компрессоров может быть сколько угодно, и, переходя от одного к другому, с помощью методов (5) и (6) можно найти параметры на входе в камеру сгорания.

6. Задаем расходом газа на выходе из камеры сгорания $\bar{g}_Г$.

7. Определяем относительный расход топлива в камере сгорания

$$\bar{G}_Т = \left(\kappa_{кк} \bar{g}_Г \bar{P}_Г \sqrt{\bar{T}_Г} - \bar{g}_в \bar{P}_в \sqrt{\bar{T}_в} \right) / (\kappa_{кк} - 1),$$

$$\text{где } \kappa_{кк} = \frac{C_{pГ} g_{Гн} P_{Гн}}{C_{pв} g_{вн} P_{вн}} \sqrt{\frac{T_{Гн}}{T_{вн}}}.$$

8. С помощью метода (3) находим $v_{кcou}$ и определяем относительный параметр расхода газа на входе в турбину 1 – $\bar{g}_{Т1in} = \bar{g}_Г \cdot v_{кcou}$. Используя метод (7), находим параметры на выходе из турбины и переходим к следующей. И так до газохода.

9. Определяем давление в камере сгорания с помощью параметров турбинного тракта. Если это давление больше давления, вычисленного с помощью компрессорного тракта, то уменьшаем $\bar{g}_Г$ и повторяем пункты 6–9 до совпадения давлений.

10. Если машина однокаскадная, то скорость ее вращения известна. Мощность, отдаваемая генератору, определится из формулы

$$\bar{N}_Г = \left(\bar{N}_Т - \bar{N}_к \frac{N_{кн}}{N_{тн}} \right) / \left(1 - \frac{N_{кн}}{N_{тн}} \right), \quad (8)$$

где $\bar{N}_Т$ – относительная мощность турбины; $\bar{N}_к$ – относительная мощность, потребляемая компрессором (компрессорами).

Относительные мощности турбины и компрессора можно вычислить по следующим формулам:

$$\bar{N}_Т = \bar{g}_{in} \bar{P}_{in} \sqrt{\bar{T}_{in}} \frac{1 - \theta}{1 - \theta_n}; \quad (9)$$

$$\bar{N}_к = \bar{g}_{in} \bar{P}_{in} \sqrt{\bar{T}_{in}} \frac{\theta - 1}{\theta_n - 1}. \quad (10)$$

В формуле (9) θ – отношение температуры на выходе из турбины к температуре на входе в нее, а в формуле (10) θ – отношение температуры на выходе из компрессора к температуре на входе в него.

Если двигатель имеет свободную силовую турбину, то необходимо определить скорость вращения контуров из баланса мощностей (9)–(10). Если мощность компрессора выше мощности турбины, то заданную скорость вращения контура надо понижать. Если мощность турбины больше, то повышать.

После завершения баланса на режиме определяем КПД цикла по следующей формуле

$$\bar{\eta} = \bar{N}_Г / G_T.$$

2. Решение проблемы

Цель дальнейшего анализа – определить КПД двигателя в зависимости от температуры за воздухоохладителем. Результаты приведены на рис. 2. На рис. 2 представлен сравнительный анализ различных ГТД с ТУК и промощением. Каждый из двигателей на расчетном режиме имеет $\pi_k = 15$ и одинаковое КПД элементарной ступени турбомшины.

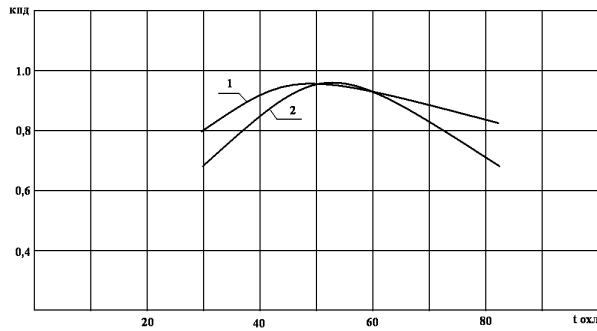


Рис. 2. Зависимости КПД двигателя от температуры за воздухоохладителем на режиме 0,7 от номинального:
1 – со свободной силовой турбиной ;
2 – однокаскадный

В схеме с промощением при определении КПД цикла учтены КПД привода компрессора 1 и мощность, необходимая на привод этого компрессора. Потери полного давления для машин с промощением одинаковы.

Анализ графиков рис. 2 позволяет указать оптимальную с точки зрения КПД температуру воздуха за воздухоохладителем. Разумеется, такие графики можно построить для всего диапазона мощностей и дать рекомендации по выбору температуры воздуха за воздухоохладителем.

Заключение

Промежуточное охлаждением циклового воздуха в ГТД с ТУК можно рассматривать как средство для обеспечения утилизации на частичных режимах.

Наибольшая эффективность ГТД может быть достигнута, если применить отдельный привод (это может быть паровая турбина ТУК) для первого компрессора. Однако такое регулирование понижает запас устойчивости двигателя.

Литература

1. Нечаев Ю.Н. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 1 / Ю.Н. Нечаев, Р.М. Федоров. – М.: Машиностроение, 1977. – 312 с.
2. Тарасенко А.А. Частичные режимы устройств типа газодинамическое сопротивление в судовых ГТД / А.А. Тарасенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 8 (55). – С. 56-58.
3. Тарасенко А.А. Применение обобщенных зависимостей для построения характеристик компрессоров с помощью ЭВМ / А.А. Тарасенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 7 (64) – С. 74-77.

Поступила в редакцию 27.05.2010

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

ОПТИМАЛЬНЕ ПРОМІЖНЕ ОХОЛОДЖЕННЯ ГТД РІЗНИХ СХЕМ НА ЧАСТКОВИХ РЕЖИМАХ

М.О. Тарасенко

Розглядається 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. В однокаскадних машинах при переході на частковий режим доводиться зменшувати температуру циклу, що може призвести до зриву утилізації. Для машин з вільною силовою турбіною ситуація краще. Змінюючи температуру промощення можливо підтримувати ккд на досить високому рівні у широкому діапазоні потужностей. Наведено результати розрахунків для ГТД з різними схемами.

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

OPTIMAL INTERMEDIATE COOLING SINGLE-STAGE GAS-TURBINE ENGINE WITH HRO AND FSC 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, ст. лаб. кафедри механіки і конструювання машин Національного університету кораблестроєння ім. адм. Макарова, Николаєв, Україна, e-mail: tai777@ukrpost.net.