

УДК 629.735

О.В. КИСЛОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА РЕЖИМА РАБОТЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРА КОНВЕРТИРОВАННОГО ГТД

Рассмотрены особенности выбора режима работы одновального газогенератора наземного газотурбинного двигателя, полученного конвертированием ТРДД путем исключения вентилятора. Показано влияние расчетной степени повышения давления вентилятора на изменение режима газогенератора конвертированного ГТД при сохранении частоты вращения ротора газогенератора. Обоснован режим работы газогенератора конвертированного ГТД, удовлетворяющий требованиям, предъявляемым к наземным газотурбинным приводам. Предложен закон управления конвертированного наземного ГТД на максимальном режиме.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, газогенератор, вентилятор, приведенная частота вращения, ресурс, параметр Ларсона – Миллера.

Введение

В настоящее время все более распространенной становится практика создания наземных ГТД путем конвертирования авиационных ГТД. Чаще всего конвертируются ТРДД путем исключения вентилятора и сохранением базового газогенератора [1,2,3]. Наиболее распространенная схема конвертации показана на рис. 1.

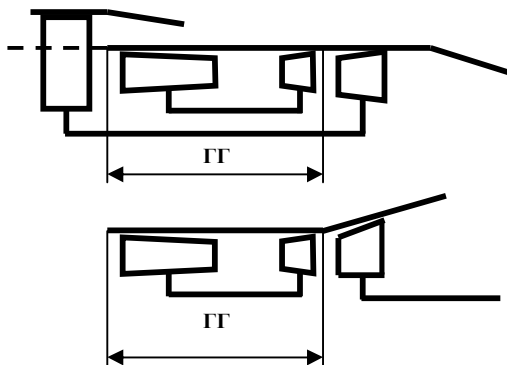


Рис. 1. Схема конвертации ТРДД в наземный турбовальный ГТД со свободной турбиной

Условия работы газогенератора в составе ТРДД и в составе турбовального ГТД со свободной турбиной разные.

Если расчетная полная температура воздуха перед ТРДД $T_{в\ p}^*$ соответствует стандартной температуре атмосферы на высоте $H = 0$, то расчетная полная температура воздуха на входе в газогенератор $T_{ввд\ p}^* > T_H = T_{в\ p}^*$. Поэтому в наземном турбовальном ГТД газогенератор будет эксплуатироваться в нерасчетных условиях (при сохранении частоты

вращения ротора газогенератора изменяется положения рабочей точки на рабочей линии, а следовательно изменяются коэффициент запаса устойчивости компрессора, температура газа перед турбиной $T_{г}^*$, КПД компрессора и турбины газогенератора).

Режим работы газогенератора наземного ГТД должен удовлетворять не только требованиям по обеспечению высоких параметров цикла, минимальных потерь в проточной части и достаточного запаса устойчивости компрессора, но и дополнительному требованию, предъявляемого к наземным ГТД, – обеспечение повышенного ресурса ГТД [4].

В связи с этим актуален вопрос выбора режима работы газогенератора.

Целью данной работы является обоснование режима работы одновального газогенератора наземного ГТД, полученного конвертированием авиационного ТРДД путем исключения вентилятора.

1. Расчетные соотношения

При исключении вентилятора температура воздуха перед газогенератором уменьшается. Величины уменьшения температуры и относительной приведенной частоты вращения ротора газогенератора (при условии сохранения частоты вращения ротора $\bar{n}_{ГГ} = 1$) зависят от расчетных значений степени повышения полного давления $\pi_{вр}^*$ и КПД $\eta_{вр}^*$ вентилятора:

$$\bar{T}_{в\ p}^* = \frac{T_{в\ p}^*}{T_{ввд\ p}^*} = f(\pi_{вр}^*) = \left(1 + \frac{\pi_{вр}^* \frac{k-1}{k} - 1}{\eta_{вр}^*} \right)^{-1},$$

$$\bar{n}_{ГГПР} = \sqrt{\frac{T_{ВВД\ p}^*}{T_{В\ p}^*}} = \sqrt{1 + \frac{\pi_{ВР}^* \frac{k-1}{k} - 1}{\eta_{ВР}^*}}$$

Соответствующие зависимости представлены на рис. 2.

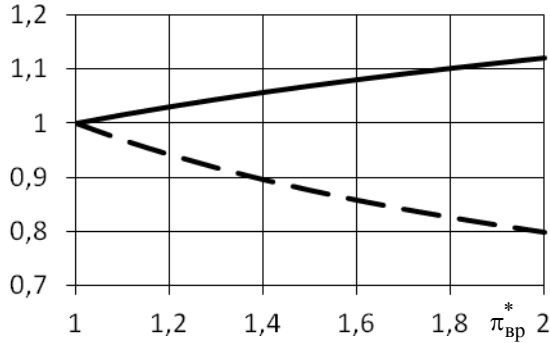


Рис. 2. Зависимости $\bar{T}_{В\ p}^*$ и $\bar{n}_{ГГ\ pР}$ конвертированного наземного ГТД от $\pi_{ВР}^*$:
 --- - $\bar{T}_{В\ p}^*$; — — — - $\bar{n}_{ГГ\ pР}$

Видно, что уже при $\pi_{ВР}^* = 1,80$ $\bar{n}_{ГГПР} = 1,10$. То есть, рабочая точка существенно смещается по рабочей линии на характеристике компрессора в область повышенных $\pi_{к}^*$, пониженного запаса устойчивости и КПД компрессора (рис. 3).

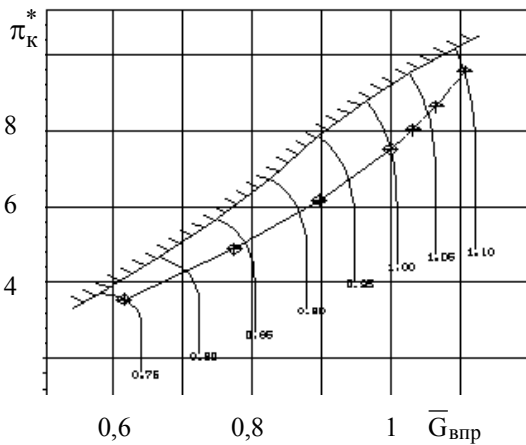


Рис. 3. Рабочая линия на характеристике компрессора

При этом однозначно увеличивается и $\frac{T_{Г}^*}{T_{В}^*}$, но

изменение $T_{Г}^*$ будет разным в зависимости от расчетной степени повышения давления компрессора газогенератора $\pi_{кР}^*$.

Как известно [1, 3], высоконапорные ($\pi_{кР}^* > 6$) и низконапорные ($\pi_{кР}^* < 6$) компрессоры при увеличении температуры воздуха на входе загружаются противоположно, что вызывает противоположное изменение температуры $T_{Г}^*$.

При выборе объекта конвертирования нецелесообразно выбирать ТРДД, который имеет газогенератор с низконапорным компрессором, по двум причинам:

- 1) конвертированный ГТД будет иметь малую степень повышения давления в цикле, что невыгодно с точки зрения экономичности и удельной мощности ГТД;
- 2) расположение рабочей линии на характеристике компрессора при повышенных приведенных частотах вращения ротора газогенератора невыгодно с точки зрения запаса устойчивости и КПД компрессора.

Поэтому дальнейший анализ выполняется для газогенератора с высоконапорным компрессором.

В частности, с помощью математической модели ГТД первого уровня для газогенератора с $\pi_{кР}^* = 7,5$ получено относительное изменение $\frac{T_{Г}^*}{T_{В}^*}$ от $\pi_{ВР}^*$ при условии поддержания $\bar{n}_{ГТ} = 1$. Эти зависимости показаны на рис. 4. Здесь же изображена зависимость $\bar{T}_{В\ p}^* = f(\pi_{ВР}^*)$.

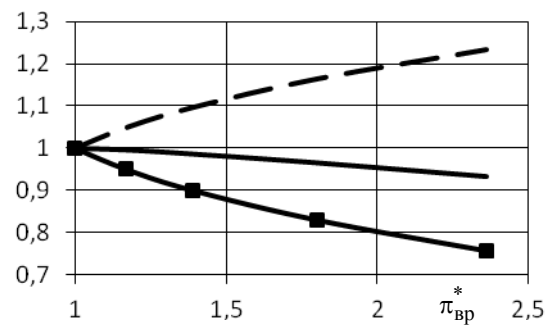


Рис. 4. Изменение $\bar{T}_{Г}^*$, $\bar{T}_{В\ p}^*$ и $\frac{\bar{T}_{Г}^*}{\bar{T}_{В}^*}$ конвертированного ГТД в зависимости от $\pi_{ВР}^*$ при $\bar{n}_{ГТ} = 1$:

—■— - $\bar{T}_{В\ p}^*$; — — — - $\bar{T}_{Г}^*$; - · - · - $\frac{\bar{T}_{Г}^*}{\bar{T}_{В}^*}$.

Из рисунка видно, что, несмотря на увеличение $\frac{T_{Г}^*}{T_{В}^*}$ при увеличении расчетной степени повышения

давления удаляемого при конвертации вентилятора $\pi_{вр}^*$, в газогенераторе с высоконапорным компрессором $T_{г}^*$ уменьшается из-за более быстрого уменьшения температуры потока перед газогенератором $T_{в}^*$. Так, при исключении вентилятора ТРДД с $\pi_{вр}^* = 1,8$ и сохранении $\bar{n}_{гг} = 1$, $T_{г}^*$ уменьшается на 3% (что составляет 39К при $T_{гг}^* = 1300$ К).

Уменьшение $T_{г}^*$, наряду с уменьшением давления в проточной части газогенератора и уменьшением температуры воздуха в компрессоре, благоприятно влияет на запас статической прочности лопаток компрессора и турбины. Увеличение запасов статической прочности приводит к росту ресурса лопаточных машин и всего газогенератора в составе наземного ГТД по сравнению с вариантом использования этого же газогенератора в составе ТРДД.

Однако этот режим работы не может быть рекомендован для газогенератора конвертированного ГТД вследствие существенных недостатков, обусловленных рассогласованием режимов работы ступеней компрессора. Чем выше приведенная частота вращения ротора газогенератора, тем ниже углы атаки первых ступеней компрессора и выше – последних. Это приводит к уменьшению КПД и запаса устойчивости компрессора. Низкий запас устойчивости компрессора при стандартной температуре на земле не позволяет эксплуатировать ГТД при пониженных температурах атмосферы. А высокие положительные и отрицательные углы атаки на последних и первых ступенях компрессора повышают нестационарность потока, что уменьшает динамическую прочность лопаточных машин и их ресурс.

Наиболее предпочтительным с точки зрения динамической прочности, КПД и запаса устойчивости компрессора является расчетный режим компрессора при $\bar{n}_{ггпр} = 1$. Для обеспечения этого режима требуется уменьшение частоты вращения ротора газогенератора в соответствии с формулой:

$$\bar{n}_{гг} = \sqrt{T_{в}^* / p}$$

При увеличении $\pi_{вр}^*$ потребное уменьшение $\bar{n}_{гг}$ возрастает. Так, при $\pi_{вр}^* = 1,8$ для обеспечения $\bar{n}_{ггпр} = 1$ требуется $\bar{n}_{гг} = 0,91$.

Вследствие того, что $\frac{T_{г}^*}{T_{в}^*} = f(\bar{n}_{ггпр})$ при неизменной степени понижения давления в турбине газогенератора [1, 3], $T_{г}^*$ понижается прямо пропорционально уменьшению $T_{в}^*$, то есть $\frac{T_{г}^*}{T_{в}^*} = \frac{T_{гг}^*}{T_{вг}^*}$

(рис. 2). При $\pi_{вр}^* = 1,8$ уменьшение $T_{г}^*$ составляет 17,5% (с 1300 К до 1106 К).

Одновременное уменьшение $\bar{n}_{гг}$, $T_{г}^*$, $T_{в}^*$ и $p_{в}^*$ приводит к существенному росту коэффициента запаса статической прочности лопаток турбины и компрессора, что увеличивает ресурс газогенератора наземной ГТД.

Приближенная оценка ресурса рабочей лопатки турбины выполнена с помощью параметра Ларсона – Миллера, который учитывает влияние на $\sigma_{дл}$, как температуры $T_{л}$, так и ресурса работы τ_p [5]:

$$P_{лм} = T_{л} (\lg \tau_p + 20)$$

Результаты расчетов показали, что при $\pi_{вр}^* = 1,8$ ресурс рабочей лопатки турбины газогенератора конвертированного ГТД возрастает в 1,78 раз за счет снижения частоты вращения, а с учетом изменения ее температуры – в 18,5 раз по сравнению с ресурсом этого же газогенератора в составе ТРДД.

Аналогично увеличивается и ресурс рабочих лопаток компрессора, что обусловлено уменьшением центробежных сил из-за уменьшения частоты вращения ротора, уменьшением изгибающего момента газовых сил из-за уменьшения давления воздуха в компрессоре и уменьшением температуры лопаток из-за уменьшения температуры воздуха перед компрессором.

Кроме того, пониженная $\bar{n}_{гг}$ и $\bar{n}_{ггпр} = 1$ при стандартных атмосферных условиях позволяют реализовать выгодный закон управления ГТД при изменении $T_{в}^*$ (рис. 5).

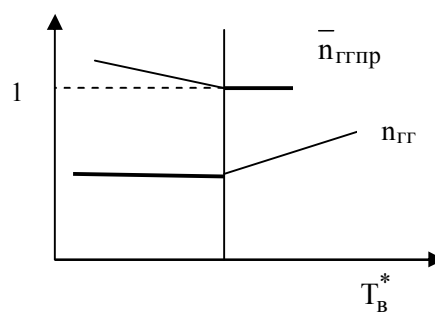


Рис. 5. Закон управления ГТД на максимальном режиме

При пониженных $T_{в}^*$ целесообразно поддерживать $\bar{n}_{гг} = \text{const}$. Тогда уменьшение $T_{в}^*$ приводит к допустимому увеличению $\bar{n}_{ггпр}$, сохраняя достаточно высокие запасы устойчивости и КПД компрессора и увеличивая параметры цикла – степень повышения давления и степень подогрева рабочего

тела. А при повышенных T_B^* , из-за пониженного значения $\bar{p}_{ГГ}$ при стандартных условиях, становится возможным закон $\bar{p}_{ГГпр} = 1$, требующий увеличения $\bar{p}_{ГГ}$ по мере увеличения T_B^* . Такой закон регулирования сохраняет подобными планы скоростей в лопаточных машинах и, как следствие, высокие КПД и запас устойчивости компрессора, не допускает снижения параметров цикла при приемлемом, с точки зрения прочности и ресурса ГТД, росте частоты вращения и T_G^* .

Заключение

В работе обоснован режим работы газогенератора наземного ГТД, полученного конвертацией ТРДД путем исключения вентилятора. Этот режим обеспечивает высокие параметры цикла и КПД элементов газогенератора, соответствие основным требованиям по прочности и ресурсу. Кроме того, он позволяет реализовать комбинированный закон регулирования ГТД при изменении температуры атмосферы, обеспечивающий поддержание высоких

параметров цикла, КПД и запаса устойчивости компрессора при соблюдении требований по ресурсу.

Литература

1. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) [Текст] / В.А. Скибин, В.И. Солонин, В.А. Палкин и др.; под ред. В.А. Скибина, В.И. Солонина. – М.: ЦИАМ, 2004. – 424 с.
2. Теория двухконтурных турбореактивных двигателей [Текст] / В.П. Деменченко, Л.Н. Дружинин, А.Л. Пархомов и др.; под ред. С.М. Шляхтенко, В.А. Сосунова. – М.: Машиностроение, 1979. – 700 с.
3. Нечаев, Ю.Н. Теория авиационных двигателей [Текст] / Ю.Н. Нечаев. – М.: ВВИА, 1990. – 704 с.
4. Довідник працівника газотранспортного підприємства [Текст] / В.В. Розгонюк, А.А. Руднік, В.М. Коломєєв та ін.; під ред. А.А. Рудніка. – К.: Росток, 2001. – 1092 с.
5. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести [Текст] / Н.Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.

Поступила в редакцию 28.05.2013, рассмотрена на редколлегии 13.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры теории авиационных двигателей В.П. Герасименко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ РЕЖИМУ РОБОТИ ГАЗОГЕНЕРАТОРА КОНВЕРТОВАНОГО ГТД

О.В. Кіслов

Розглянуті особливості вибору режиму роботи одновального газогенератора наземного газотурбінного двигуна, одержаного конвертуванням ТРДД шляхом виключення вентилятору. Показаний вплив розрахункового ступеня підвищення тиску вентилятору на змінення режиму роботи газогенератору конвертованого ГТД при зберіганні частоти обертання ротору газогенератора. Обґрунтовано режим роботи газогенератору конвертованого ГТД, який відповідає вимогам до наземних газотурбінних приводів. Запропонований закон управління конвертованого наземного ГТД на максимальному режимі.

Ключові слова: газотурбінний двигун, газогенератор, вентилятор, приведена частота обертання, ресурс, параметр Ларсона – Мілера.

FEATURES OF OPERATION MODE SELECTION OF CONVERTED GAS TURBINE ENGINE GAS GENERATORS

O.V. Kislov

The features of the operation mode selection of the ground gas turbine engine single-shaft gas generator are considered. The ground gas turbine engine is a result of converting turbofan by removing the fan. The effect of the design fan pressure ratio on change of the converted gas turbine engine gas generator mode, while maintaining the gas generator rotor speed, are shown. The operation mode of converted gas turbine engine gas generators, satisfying the requirements for ground gas turbine drives, are justified. The control law of converted ground gas turbine engines at maximum mode are proposed.

Keywords: gas turbine engine, gas generator, fan, corrected rotor speed, resource, Larson – Miller parameter.

Кіслов Олег Владимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теории авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: OBKislov@mail.ru.