

УДК 629.124.74

**А.И. ТАРАСЕНКО***Национальный университет кораблестроения  
им. адмирала Макарова, Николаев, Украина*

## **НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СУДОВОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ СЛОЖНОЙ СХЕМЫ**

Рассматривается газотурбинный двигатель сложной схемы, т.е. газотурбинный двигатель, содержащий теплообменные аппараты, например, утилизационный котел или воздухоохладитель. Теплообменный аппарат рассмотрен как аккумулятор энергии, на входе и выходе из которого имеются газодинамические сопротивления. При составлении расчетной схемы считаются известными характеристики турбин, компрессоров и газодинамических сопротивлений. Предложен алгоритм определения состояний компрессоров и турбин с учетом характеристик газодинамических сопротивлений на входе и выходе. Получена система обыкновенных дифференциальных уравнений, которая описывает динамику рассматриваемого агрегата. Предложен алгоритм их решения.

**турбина, компрессор, камера сгорания, коэффициент восстановления полного давления, расход, характеристика, математическая модель**

### **Введение**

Исследование газотурбинных двигателей сложной схемы требует более тщательной проработки математических моделей отдельных компонентов двигателя в сравнении с двигателем простой схемы.

С точки зрения динамики газотурбинный двигатель (ГТД) сложной схемы – это двигатель, содержащий теплообменные аппараты.

Разработанная автором [1] методика моделирования ГТД простой схемы при применении к сложной схеме не рассмотрит ряд существенных моментов, например, работу с сухим парогенератором или промежуточным охладителем воздуха, работающем в нерасчетном режиме.

Упрощенная постановка задачи [1], которая оправдана для ГТД простой схемы, в случае необходимости может быть дополнена предлагаемой ниже методикой.

### **1. Формулирование проблемы**

Необходимо разработать математическую модель газотурбинного двигателя, содержащего теплообменные аппараты с учетом нелинейных характеристик компрессоров, турбин и газодинамических сопротив-

лений в переходных устройствах двигателя.

При разработке математической модели ГТД считаются известными: характеристики компрессоров и турбин, параметры номинального режима и характеристики газодинамических сопротивлений. Текущий режим определен относительной подачей топлива в камеру сгорания, а также режимами работы теплообменных аппаратов [2, 3].

Все рассматриваемые параметры ГТД представлены в относительном виде, т.е. рассматривается отношение параметра в выбранном «сечении» двигателя к этому же параметру и в этом же сечении на номинальном режиме. Данный подход позволяет начать расчет на номинальном режиме, т.к. известны начальные условия – все относительные параметры равны 1,0.

**1.1. Общие соотношения.** Газотурбинный двигатель представляется как совокупность взаимодействующих между собой аккумуляторов энергии. В качестве таких аккумуляторов рассматриваются ресиверы (переходники, теплообменные аппараты и камеры сгорания) и вращающиеся ротора.

Мнемоническая схема (схема связей) газотурбинного двигателя представлена на рис. 1, на кото-

ром указаны параметры определяющие состояние двигателя.

Состояние газотурбинного двигателя определено следующими параметрами:  $P_0, T_0, P_1, T_1, P_2, T_2, P_3, T_3, P_4, T_4, P_5, T_5, P_6, T_6, G_f, n_1, n_2, n_3$ . Это относительные параметры, т.е. параметры отнесенные к значениям на номинальном режиме. Температуры и давления – температуры и давления заторможенного потока. Значения  $P_0, T_0$

и  $G_f$  – считаются известными. Температуры и давления внутри ресиверов (12 параметров) и скорости вращения  $n_1, n_2, n_3$  (6 параметров) подлежат определению с помощью дифференциальных уравнений (18 уравнений первого порядка). Следует отметить, что для определения скорости вращения необходимо решать дифференциальное уравнение второго порядка, т.е. на одну скорость два параметра.

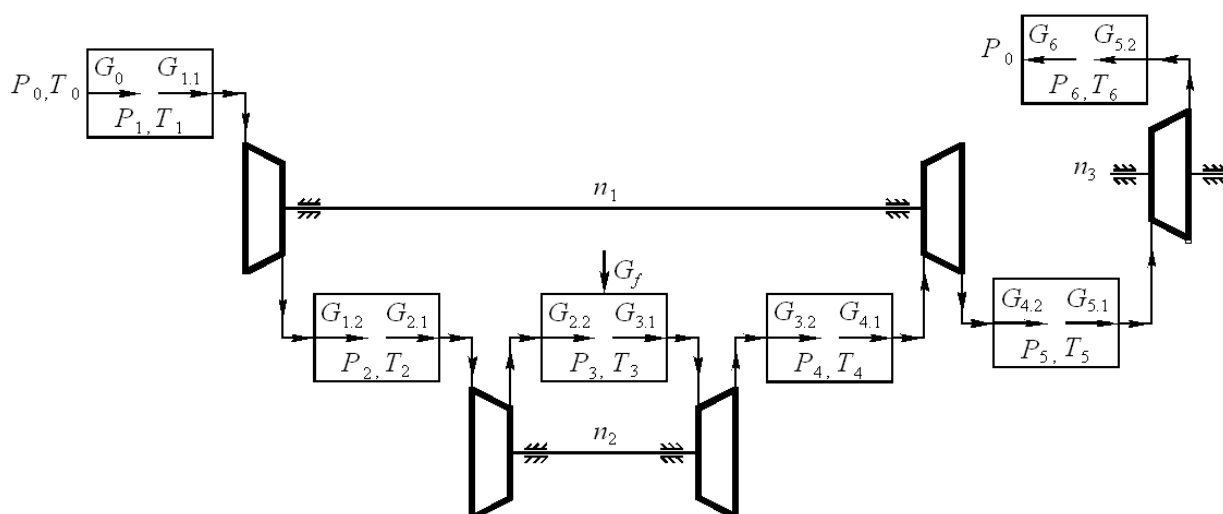


Рис. 1. Мнемоническая схема газотурбинного двигателя

На входе и выходе каждого ресивера находится устройство типа газодинамическое сопротивление, каждое из них характеризуется коэффициентом восстановления полного давления  $n_{in}$  или  $n_{ou}$ . Из расчета номинального режима известен общий коэффициент для ресивера  $n_n = n_{in} \cdot n_{ou}$ . Если нет данных по  $n_{in}$  и  $n_{ou}$ , их можно считать одинаковыми.

Частичные режимы устройств типа газодинамическое сопротивление можно характеризовать графиком, приведенным на рис. 2 (рисунок предоставлен Тарасенко А.А.).

Выражение

$$\frac{G_{ou}}{G_{in}} = \frac{v_n}{v} = \frac{P_{ou}}{P_{in}} \quad (1)$$

позволяет с помощью графика рис. 2 определить

коэффициент восстановления полного давления на частичном режиме.

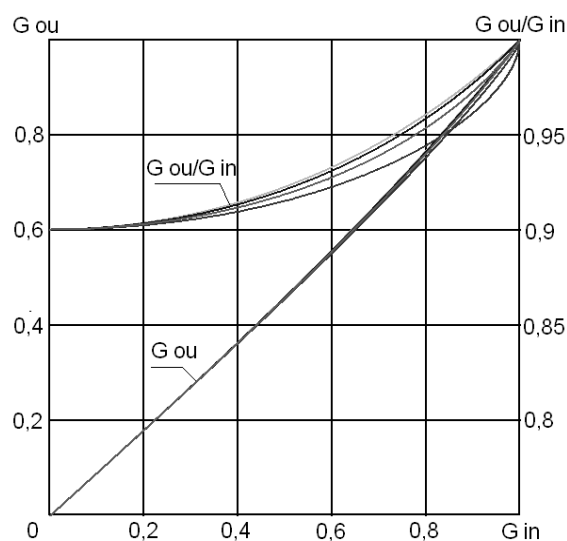


Рис. 2. Зависимости  $G_{ou} - G_{in}$  для  $n_n = 0,9$  при  $\lambda_n = 1,0; 0,75; 0,5$  и  $0,25$

Необходимые характеристики турбин и компрессоров используются в стандартном виде. В случае отсутствия данных можно воспользоваться обобщенными характеристиками, приведенными в [4, 6].

Определение расхода воздуха рассмотрим на примере компрессора низкого давления (КНД), мнемосхема которого показана на рис. 3.

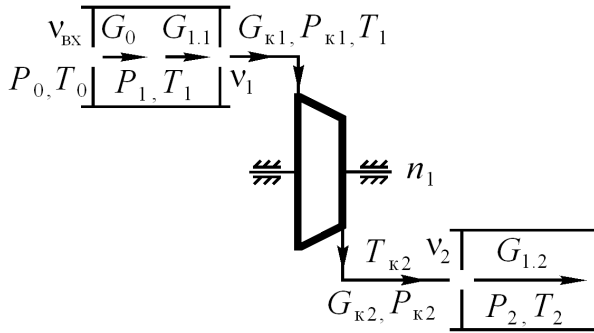


Рис. 3. Мнемоническая схема КНД

Характеристика компрессора – это зависимость

$$\pi_k = \pi_k \left( G_{к1}, \frac{n_1}{\sqrt{T_1}} \right).$$

Поскольку  $n_1$  и  $T_1$  известно, то можно получить изодрому  $\pi_k = \pi_k (G_{к1})$ , а также аналогичную зависимость для адиабатического КПД. Изодрома задана рядом базовых точек  $G_{к1}$ ,  $\pi_k$ ,  $\eta$ . Для каждой базовой точки по известному  $G_{к1}$  определяем с помощью графика аналогичного рис. 2 расход  $G_{1.1}$ , а затем вычисляем, используя (1)

$$P_{к1} = P_1 \frac{G_{1.1}}{G_{к1}} \quad \text{и} \quad \text{далее} \quad P_{к2} = P_{к1} \frac{P_{кн}}{P_{кн}},$$

$$G_{к2} = G_{к1} \frac{\pi_{кн}}{\pi_k} \sqrt{\frac{1 + (\pi_k^{x_k} - 1)/\eta}{1 + (\pi_{кн}^{x_k} - 1)/\eta_n}} \quad \text{и} \quad \text{также}$$

$$T_{к2} = T_1 \frac{1 + (\pi_k^{x_k} - 1)/\eta}{1 + (\pi_{кн}^{x_k} - 1)/\eta_n}. \quad \text{По известному } G_{к2}$$

определяем с помощью графика аналогичного рис. 2

$$\text{расход } G_{1.2}, \text{ а затем давление } P_2 = P_{к2} \frac{G_{к2}}{G_{1.2}}.$$

Таким образом будет получена зависимость

$P_2 = P_2 (G_{1.1})$ , но  $P_2$  известно и, зная его, можно найти  $G_{1.1}$ , а затем и  $G_{1.2}$ .

Расход  $G_0$  можно найти, зная отношение  $P_1/P_0$  с помощью графика аналогичного рис. 2.

Определение расхода газа рассмотрим на примере силовой турбины, мнемосхема которого показана на рис. 4.

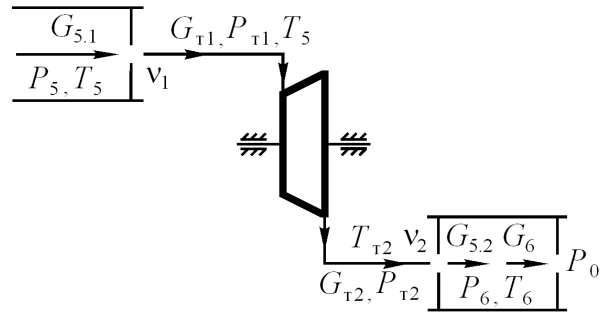


Рис. 4. Мнемоническая схема силовой турбины

Однолинейная характеристика турбины – это зависимости  $\pi_m = \pi_m (G_{m1})$  и  $\eta = \eta (G_{m1})$ . Эти зависимости заданы базовыми точками  $G_{m1}$ ,  $P_m$ ,  $\eta$ .

Для каждой базовой точки по известному  $G_{m1}$  определяем с помощью графика аналогичного рис. 2 расход  $G_{5.1}$ , а затем вычисляем, используя (1)

$$P_{m1} = P_5 \frac{G_{5.1}}{G_{m1}} \quad \text{и} \quad \text{далее} \quad P_{m2} = P_{m1} \frac{\pi_{mн}}{\pi_m},$$

$$G_{m2} = G_{m1} \frac{\pi_m}{\pi_{mн}} \sqrt{\frac{1 - (1 - \pi_m^{x_m}) \eta}{1 - (1 - \pi_{mн}^{x_m}) \eta_n}} \quad \text{и} \quad \text{также}$$

$$T_{m2} = T_5 \frac{1 - (1 - \pi_m^{x_m}) \eta}{1 - (1 - \pi_{mн}^{x_m}) \eta_n}. \quad \text{По известному } G_{m2}$$

определяем с помощью графика аналогичного рис. 2

$$\text{расход } G_{5.2}, \text{ а затем давление } P_6 = P_{m2} \frac{G_{m2}}{G_{5.2}}.$$

Таким образом будет получена зависимость  $P_6 = P_6 (G_{5.1})$ , но  $P_6$  известно и, зная его, можно найти  $G_{5.1}$ , а затем и  $G_{5.2}$ .

## 2. Решение проблемы

Решение проблемы можно добиться, составив и решив систему дифференциальных уравнений, которая получена в [1] с учетом изложенной выше методики определения расходов и параметров потока на входе и выходе из ресиверов.

Рассмотрим для примера дифференциальное уравнение ресивера между компрессорами.

$$\dot{m}_2 \cdot \tau_2 = G_{1,2} - G_{2,1}; \quad (2)$$

$$\dot{P}_2 \cdot \tau_2 = T_{к 2} G_{1,2} - G_{2,1} T_2 - q, \quad (3)$$

где  $m_2$  – масса газа в ресивере;

$$\tau_2 = \frac{m_2}{G_{1,2 H}} - \text{постоянная времени};$$

$q$  – относительное количество теплоты, отводимое от газа в ресивере (случай котла или промежуточного охладителя).

Эти уравнения записаны для массы газа в ресивере и давления в нем. Учитывая уравнение состояния, можно записать

$$T_2 = \frac{P_2}{m_2}. \quad (4)$$

Если температура потока на выходе из ресивера поддерживается постоянной, то с помощью (4) можно определить производную от  $P_2$ , а затем, используя выражение (3) найти необходимое  $q$ .

Система дифференциальных уравнений существенно нелинейная и решается любым численным методом на ЭВМ. Изложенный в [5] предиктор-корректор метод хорошо сходится и устойчив.

## Заключение

Предложенная методика позволяет исследовать динамику и частичные режимы газотурбинных двигателей практически любой схемы.

Режим газотурбинного двигателя задается физически понятным параметром – расходом топлива (как это делают на реальном объекте), что позволяет моделировать и отрабатывать алгоритмы регулирования и управления.

## Литература

1. Тарасенко А.И. Нелинейная динамическая модель судового газотурбинного двигателя // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 7 (33). – С. 172-176.
2. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч. I. – М.: «Машиностроение», 1977. – 312 с.
3. Теория и расчет турбокомпрессоров: Учеб. Пособие для студентов вузов машиностроительных специальностей / К.П. Селезнев, Ю.Б. Галеркин, С.А. Анисимов и др.; Под общ. ред. К.П. Селезнева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 392 с.
4. Романовський Г.Ф., Ващенко М.В., Сербін С.І. Теоретичні основи проектування судових газотурбінних агрегатів: Навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 304 с.
5. Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на Фортране. – М.: Мир, 1977. – 460 с.
6. Сорока Я.Х. Теория и проектирование судовых газотурбинных двигателей: Учебное пособие. – Л.: Судостроение, 1982. – 112 с.

*Поступила в редакцию 7.05.2008*

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