

УДК 621.45.001.63:519

Р.Л. ЗЕЛЕНСКИЙ

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

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГТД ПО ПАРАМЕТРАМ ДВИГАТЕЛЯ-ПРОТОТИПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ

Рассмотрен метод оценки динамических характеристик двигателя на ранней стадии проектирования с применением теории подобия, когда известны лишь основные параметры, например, тяга. Получены переходные процессы для проектируемого двигателя.

газотурбинный двигатель, математическая модель проточной части, установившиеся и переходные режимы, теория размерности и подобия

Формулирование проблемы

Основной целью данной работы является оценка динамических характеристик двигателя и его системы автоматического управления на ранней стадии проектирования, когда известны лишь основные параметры, например, тяга. В этом случае наиболее рациональным представляется использовать имеющуюся информацию об указанных характеристиках двигателя, близкого к проектируемому по параметрам и назначению. Будем называть такой двигатель прототипом.

Однако при этом возникает проблема масштабирования характеристик при известном масштабе тяги. В данной работе эта проблема решается на основе теории подобия [2].

Решение проблемы

Статическая характеристика двигателя. Два явления подобны, если они описываются математическими соотношениями одинаковой структуры, отличающимися лишь значениями коэффициентов (параметров). Тогда по заданным характеристикам одного явления можно получить характеристики другого простым пересчетом. Для осуществления такого пересчета необходимо знать «переходные масштабы».

Рассмотрим два геометрически подобных двига-

теля, отличающихся значениями тяги. Характеристики, описывающие работу базового двигателя, известны. Они представляют зависимость параметров рабочего процесса двигателя (тяги, температуры, давления, мощности, частоты вращения ротора, расходов топлива и воздуха) от параметров, определяющих режим работы, и внешних условий. Найдем их и для проектируемого двигателя.

Известно, что площадь сечения на срезе сопла (F_c), можно найти по формуле

$$F_c = \frac{G_c \sqrt{T_m^*}}{m p_m^* \sigma_I \sigma_c q(\lambda)}. \quad (1)$$

Исходя из предположения о том, что течения в соответствующих сечениях проточных частей рассматриваемых двигателей подобны, запишем в соответствии с [3] условие подобия для температур, обозначив индексом «/» параметры проектируемого двигателя:

$$\frac{T_n^*}{T_m^*} = \frac{T_n^{*/}}{T_m^{*/}}. \quad (2)$$

Примем во внимание, что двигатели находятся в одинаковых полетных условиях ($T_n^* = T_n^{*/}$), поэтому температуры за турбинами двигателей тоже одинаковы ($T_m^* = T_m^{*/}$).

Подобие режимов работы компрессоров означает, что при этом π_k^* и η_k^* остаются постоянными,

так как они выражаются только через отношения давлений и температур на входе и выходе. Поэтому при постоянстве чисел M_a и M_u всегда будут получаться одни и те же значения π_k^* и η_k^* .

У геометрически подобных объектов все безразмерные величины равны, следовательно, все коэффициенты восстановления давления σ равны. Рабочее тело тоже одинаково, поэтому и значения m в формулах вида (1) – одинаковы. Значения $q(\lambda)$ также равны и на расчетном режиме близки к единице.

Исходя из рассмотренных условий, получим следующее отношение площадей реактивных сопел:

$$\frac{F_c}{F_c'} = \frac{G_c}{G_c'}. \quad (3)$$

Тяга двигателя рассчитывается по формуле:

$$R = G_c(c_c - V_n). \quad (4)$$

Нам известны значения тяг двигателей в стандартных атмосферных условиях и при скорости полета $V_n = 0$. Учитывая соотношение (3) и равенство скоростей c_c , получим:

$$\frac{R_c}{R_c'} = \frac{G_c}{G_c'} = \frac{F_c}{F_c'} = k_R, \quad (5)$$

где $k_R = \frac{R_c}{R_c'}$ – коэффициент отношения тяг.

Следовательно, линейные размеры изменятся в $\sqrt{k_R}$ раз.

Получим выражения для остальных параметров двигателей на установившихся режимах работы.

Мощность компрессора определяется по следующей формуле [1]:

$$N_k = G_\theta L_k, \quad (6)$$

где $L_k = \frac{k}{k-1} RT_{ex}^* (\pi_k^{*\frac{k-1}{k}} - 1) \frac{1}{\eta_k^*}$ – удельная работа сжатия.

Отношение мощностей компрессоров двух двигателей, при условии равенства π_k^* и η_k^* (а, следовательно, и равенства работ), будет равно отноше-

нию расходов. Учитывая (5), получим следующее выражение:

$$\frac{N_k}{N_k'} = k_R. \quad (7)$$

Из уравнений сохранения энергии следует, что отношение расходов топлива будет таким же, как отношение мощностей.

Используя условия подобия течений равенства потоков (равенство чисел Маха), получим следующее выражение для окружных скоростей:

$$u = u'. \quad (8)$$

Выразим окружную скорость через частоту вращения:

$$\frac{\pi d}{60} n = \frac{\pi d'}{60} n'. \quad (9)$$

Следовательно, отношение частот вращения роторов с учетом (5) будет следующим:

$$\frac{n}{n'} = \frac{1}{\sqrt{k_R}}. \quad (10)$$

Динамическая характеристика двигателя.

Динамика двигателя представлена квазилинейной математической моделью следующего вида:

$$\dot{\Delta \vec{X}} = A \Delta \vec{X} + B \Delta \vec{U}; \Delta \vec{Y} = C \Delta \vec{X} + D \Delta \vec{U}, \quad (11)$$

где \vec{X} включает частоты вращения роторов; \vec{Y} – остальные параметры двигателя; \vec{U} – внешние и управляющие воздействия; Δ – отклонения параметров от значений, соответствующих статической характеристике.

Для одновального ТРДД модель (11) примет следующий вид:

$$T \frac{dn}{dt} + \Delta n = K_1 \Delta G_m + K_2 \Delta G_{omb} + K_3 \Delta N_{omb}; \quad (12)$$

$$\Delta \vec{Y} = C \Delta n + D \Delta \vec{U}.$$

Чтобы определить новые значения коэффициентов уравнений (12), необходимо использовать методику их расчета.

Постоянную времени ротора с использованием поузловой модели двигателя можно определить следующим образом: при неизменных внешних воздействиях $\Delta \vec{U} = 0$ изменить отбор мощности на вели-

чину $\Delta N_{омб}$; этому приращению мощности соответствует ускорение ротора

$$\Delta \dot{n} = \left(\frac{30}{\pi}\right)^2 \frac{1}{J_{\omega\delta}} \frac{\Delta N_{омб}}{n_{\omega\delta}}. \quad (13)$$

В выражение (13) входит момент инерции ротора, который определяется по следующей формуле:

$$J = \sum m_i r_i^2, \quad (14)$$

где m_i – масса i -го элемента ротора; r_i – расстояние от оси вращения ротора до центра тяжести i -го элемента.

Влияние размера газогенератора (расхода воздуха) на его массу в значительной степени определяется известным законом «квадрата – куба»: при увеличении размеров двигателя его проходные сечения, а следовательно, и расход воздуха, будет изменяться пропорционально квадрату линейных размеров (см. выше), например диаметров, тогда как объем и в первом приближении масса пропорциональны третьей степени этих размеров. Отсюда следует, что отношение масс подобных двигателей будет соответствовать отношению расходов воздуха в степени $3/2$, т.е.

$$\frac{m_{\delta\epsilon}}{m'_{\delta\epsilon}} = \left(\frac{G_{\epsilon}}{G'_{\epsilon}}\right)^{\frac{3}{2}} = k_R^{\frac{3}{2}}. \quad (15)$$

Учитывая (5) и (15), получим выражение для пересчета момента инерции:

$$J' = k_R^{\frac{5}{2}} J. \quad (16)$$

Постоянная времени ротора для одновального двигателя, используемая в уравнении (12), связана с коэффициентом уравнения состояния (11) соотношением $T = \frac{1}{A}$. Коэффициент A определяется по следующей зависимости:

$$A = \frac{\Delta \dot{n}}{\Delta n} = \frac{\Delta N_{омб}}{J n \Delta n}, \quad (17)$$

где $\frac{\Delta N_{омб}}{\Delta n}$ – влияние изменения отборов мощности на изменение частоты вращения - определяется из дроссельной характеристики:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta N'_{омб}}{\Delta n'} &= \frac{N'_2 - N'_1}{n'_2 - n'_1} = \frac{N_2/k_R - N_1/k_R}{\sqrt{k_R n_2} - \sqrt{k_R n_1}} = \\ &= \frac{1}{k_R^{\frac{3}{2}}} \frac{\Delta N_{омб}}{\Delta n}. \end{aligned} \quad (18)$$

Из (16) – (18) следует:

$$T' = k_R^{\frac{1}{2}} T. \quad (19)$$

Коэффициенты K_1, K_2, K_3 уравнения (12) связаны с коэффициентами уравнения (13): $K_i = \frac{B_i}{A} = T B_i$.

Пересчет этих коэффициентов будет одинаков только в рассматриваемом случае, когда вектор управления состоит из мощности, расходов топлива и воздуха: как отмечалось выше, коэффициент пересчета данных величин одинаков, они обратно пропорциональны k_R . Поэтому

$$B'_i = k_R^2 B_i \text{ или } K'_i = k_R^{\frac{3}{2}} K_i. \quad (20)$$

Аналогичным образом определяем коэффициенты пересчета для элементов C и D уравнения (12). Результаты занесены в табл. 1.

Таблица 1
Коэффициенты коррекции параметров уравнения динамики ГТД

	R	T_i^*	P_k^*	ΔK_i
C	$k_R^{-\frac{3}{2}}$	$k_R^{-\frac{1}{2}}$	$k_R^{-\frac{1}{2}}$	$k_R^{-\frac{1}{2}}$
D_i	1	k_R	k_R	k_R

Заключение

В результате применения теории подобия нами получены масштабные факторы для коэффициентов линейной динамической модели подобного проектируемого двигателя.

Данная работа позволила оценить изменение динамических свойств объекта при его масштабировании без применения более сложного математического аппарата, так как не потребовалось формировать сложную математическую модель для получения оценочных данных.

Примеры переходных процессов базового и проектируемого двигателей представлены на рис. 1 и 2.

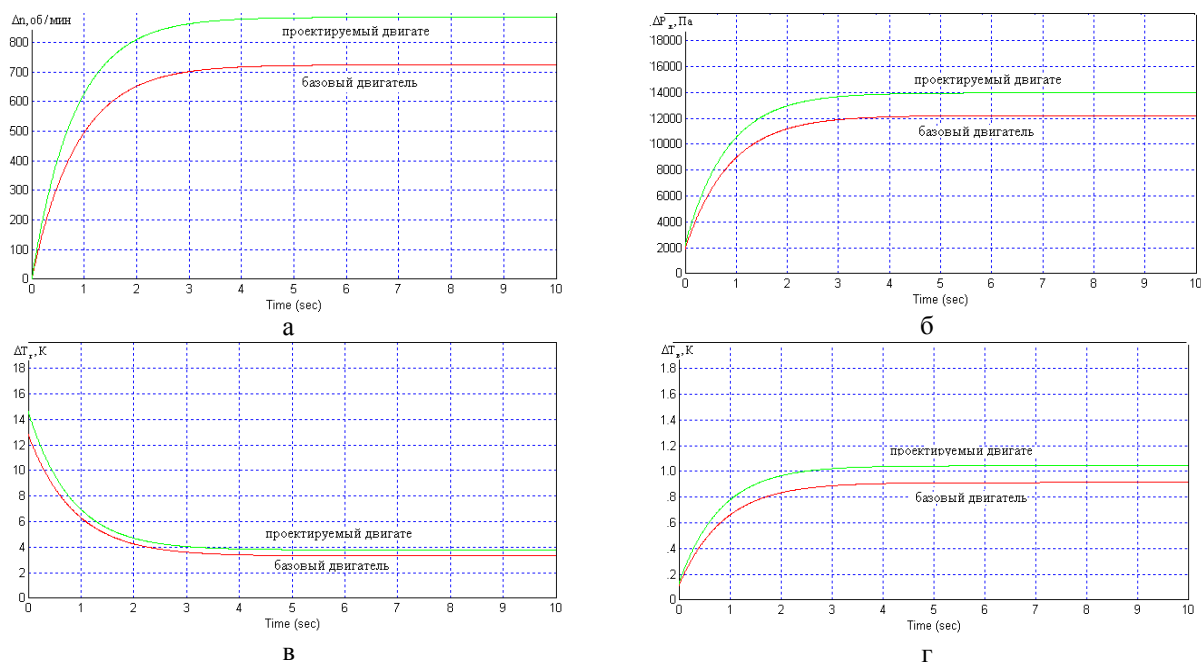


Рис. 1. Примеры переходных процессов при скачкообразном изменении расхода топлива $\Delta G = 3$ кг/ч : а – частота вращения; б – давление за компрессором; в – температура газа; г – температура за вентилятором

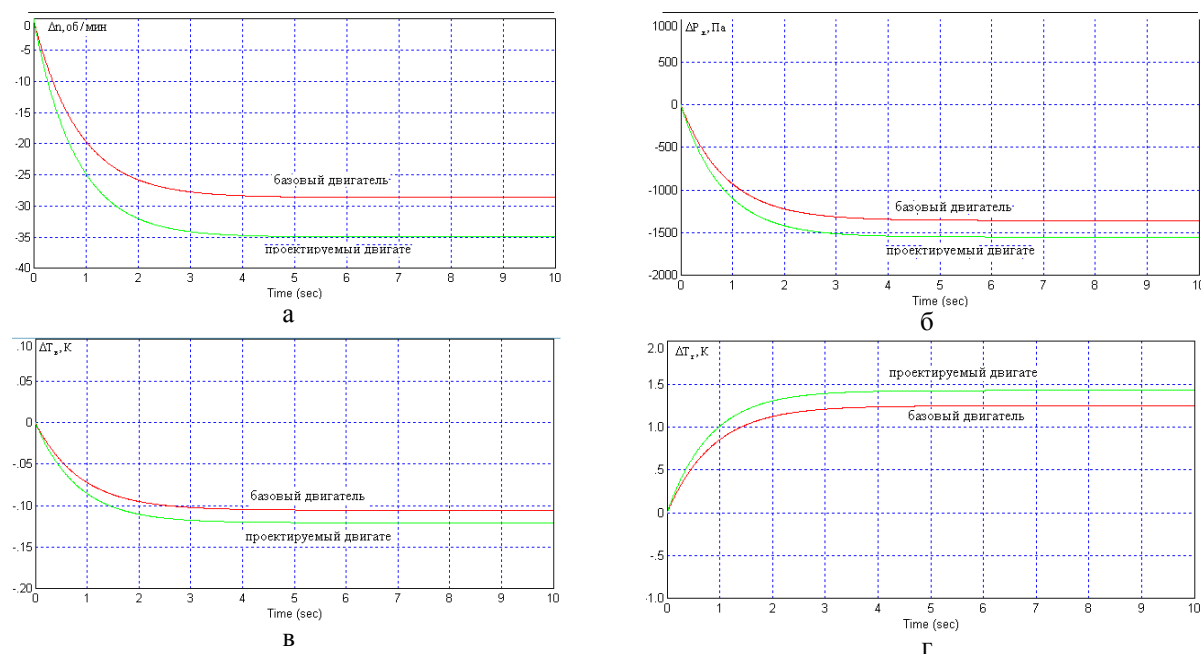


Рис. 2. Примеры переходных процессов при скачкообразном изменении отбора мощности $\Delta N = 1000$ Вт : а – частота вращения; б – давление за компрессором; в – температура газа; г – температура за вентилятором

Литература

1. Ахмедзянов А.М., Алаторцев В.П., Аксельрод С.Е. Термогазодинамические расчеты авиационных ГТД: Учебное пособие. – Уфа: УАИ, 1982. – 256 с.

2. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1987. – 432 с.

3. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 1. – М.: Машиностроение, 1977. – 312 с.

Поступила в редакцию 2.06.2006

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