

УДК 629.124:

Г.Ф. РОМАНОВСКИЙ, А.А. ТАРАСЕНКО

Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ПУСКА СУДОВОГО ГТД НА ЭВМ

Предлагается алгоритм моделирования динамики процесса пуска газотурбинного двигателя (ГТД). При моделировании процессов пуска используются, разработанные авторами, обобщенные характеристики компрессоров, турбин, устройств типа «газодинамическое сопротивление» и устройств перепуска полученные на основе использования газодинамических функций и общих соотношений. В качестве исходных данных используются параметры номинального режима. Приведен пример расчета процесса запуска. Процесс изображен на характеристике компрессора при различных мощностях стартера.

Ключевые слова: *Запуск, характеристика компрессора или турбины, расход, кнд, степень повышения давления, стартер, устройства перепуска воздуха.*

Введение

Динамические явления при запуске газотурбинного двигателя, особенно вновь разработанного, очень часто оказывают существенное влияние на состояние двигателя [1, 2].

Процесс запуска, особенно одновальных машин, может сопровождаться явлениями срыва (помпажом) и так называемым "горячим зависанием".

Под "горячим зависанием" подразумевается режим, при котором скорость вращения двигателя не увеличивается, а температура за камерой сгорания постоянна или возрастает. Увеличение подачи топлива на таком режиме не решает проблему и весьма опасно.

При расчете динамики процессов запуска нужно учесть наличие устройств перепуска воздуха (ЛПВ) и менять момент их закрытия.

Имея обобщенную методику расчета динамики пуска ГТД, можно получить расчетным путем зависимость параметров ГТД от времени (временную диаграмму процесса) и использовать эту зависимость при реальных запусках.

1. Формулирование проблемы

Необходимо получить и реализовать на ЭВМ систему дифференциальных уравнений, описывающих параметры газотурбинного двигателя при запуске с учетом динамических свойств роторов и объемов (как минимум объема камеры сгорания).

Разрабатываемые алгоритмы должны позволить выявить явления срыва и проанализировать процесс запуска на отсутствие состояния типа "го-

рячее зависание", а также предложить рациональный алгоритм запуска.

Цель работы – разработать методику расчета параметров при запуске газотурбинного двигателя с учетом динамических свойств роторов и объемов (как минимум объема камеры сгорания).

1.1 Общие соотношения

Схема газотурбинного двигателя в минимальной комплектации [1, 2] показана на рис. 1.

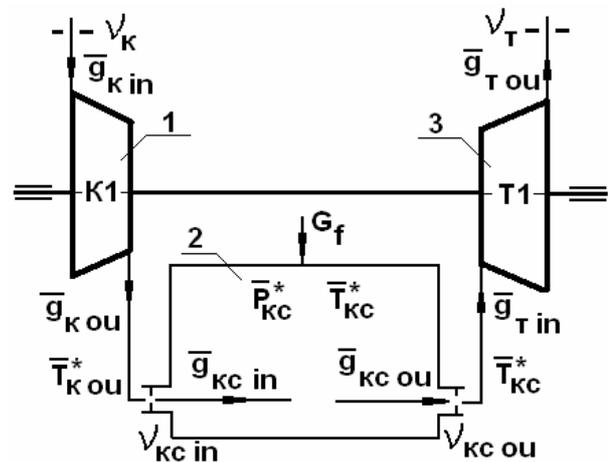


Рис. 1. Схема газотурбинного двигателя:
1 – компрессор (K1); 2 – камера сгорания;
3 – турбина (T1)

Как известно [1, 2] простейший газотурбинный двигатель состоит из компрессора, камеры сгорания и турбины. Такая схема не очень хороша на запуске и частичных режимах, но в силу своей простоты используется в энергетических целях.

Разработанная методика излагается на примере простейшей схемы рис. 1, однако, это не снижает общность и область применения описываемой методики. При описании выкладок это будет показано.

В схеме рис. 1 газодинамические потери учтены коэффициентом восстановления полного давления на входе в компрессор – v_k и коэффициентом восстановления полного давления на выходе из турбины – v_T . Что касается камеры сгорания, то газодинамические потери в ней учтены, по аналогии с [3], коэффициентами восстановления полного давления на входе и выходе – $v_{kc\ in}$ и $v_{kc\ ou}$.

Потери на входе в камеру сгорания мало зависят от температуры на выходе из нее, в то время как, потери на выходе существенно зависят от этой температуры. Это особенно актуально на режиме запуска.

Характеристики компрессоров, турбин и устройств типа "газодинамическое сопротивление" описаны в статьях авторов [4 – 6]. При построении характеристик использован параметр расхода $g = \frac{G \cdot \sqrt{T}}{P}$. Полезно отметить, что относительный параметр расхода численно равен отношению газодинамической функции $q(\lambda)$ к этой же функции на номинальном режиме.

При формировании системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику двигателя, ГТД рассматривают, согласно [3], как совокупность "аккумуляторов энергии". Один "аккумулятор энергии" – это ротор (как маховик), а другой – это объем газа в камере сгорания. Накопление энергии в других полостях не рассматривается потому, что их сопротивление на запуске мало из-за малых расходов воздуха (газа).

Дифференциальные уравнения камеры сгорания, полученные в [3] на основе сохранения энергии и сохранения массы, могут быть записаны в следующем виде:

$$\dot{m}_{kc} \tau_{kc} = \bar{P}_{kc}^* \left[\frac{\bar{g}_{kc\ in}}{\sqrt{\bar{T}_{kc\ ou}^*}} - \frac{\bar{g}_{kc\ ou}}{\sqrt{\bar{T}_{kc}^*}} (1 + k_F) \right] + \bar{G}_F k_F; \quad (1)$$

$$\dot{\bar{P}}_{kc}^* \tau_{kc} = \bar{P}_{kc}^* \left[k_t \bar{g}_{kc\ in} \sqrt{\bar{T}_{kc\ ou}^*} (1 + k_F) \bar{g}_{kc\ ou} \sqrt{\bar{T}_{kc}^*} + \bar{G}_F k_F k_Q \right]; \quad (2)$$

где $\bar{m}_{kc} = \frac{\bar{P}_{kc}^*}{\bar{T}_{kc}^*}$ – масса газа в камере сгорания, отнесенная к массе на номинальном режиме;

\bar{P}_{kc}^* – полное давление газа в камере сгорания, отнесенное к полному давлению на номинальном

режиме;

\bar{T}_{kc}^* – полная температура газа в камере сгорания, отнесенная к полной температуре на номинальном режиме;

$$\tau_{kc} = \frac{m_{kc\ n}}{G_{kc\ in\ n}} \text{ – постоянная времени камеры}$$

сгорания;

$\bar{g}_{kc\ in}$ – параметр расхода на входе в камеру сгорания, отнесенный к параметру расхода на номинальном режиме в той же точке;

$\bar{g}_{kc\ ou}$ – параметр расхода на выходе из камеры сгорания, отнесенный к параметру расхода на номинальном режиме в той же точке;

$\bar{T}_{kc\ ou}^*$ – полная температура газа на выходе в камеру сгорания (за компрессором), отнесенная к полной температуре на номинальном режиме в той же точке;

$$k_F = \frac{G_{F\ n}}{G_{kc\ in\ n}} = \frac{1}{\alpha \cdot L_0} \text{ – коэффициент подачи}$$

топлива;

$G_{F\ n}$ – расход топлива на номинальном режиме;

$G_{kc\ in\ n}$ – расход воздуха на входе в камеру сгорания на номинальном режиме;

α – коэффициент избытка воздуха на номинальном режиме;

L_0 – масса воздуха необходимая для сжигания одного килограмма топлива;

$$k_t = \frac{C_{p\ in}}{C_{p\ kc}} \frac{T_{kc\ in\ n}}{T_{kc\ n}};$$

$C_{p\ in}$ – теплоемкость газа на входе;

$C_{p\ kc}$ – теплоемкость газа на выходе;

$$k_Q = \frac{Q_{низ} + C_F T_F}{C_{p\ kc} \cdot T_{kc\ n}};$$

$Q_{низ}$ – низшая теплотворная способность топлива.

Для ротора турбокомпрессора

$$\dot{n} \tau_{тк} = \frac{1}{n} (\bar{N}_T - \bar{N}_K + \bar{N}_{ст}), \quad (3)$$

где $\tau_{тк} = \frac{J \omega_H^2}{N_{тн}}$ – постоянная времени ротора турбокомпрессора;

$\bar{n} = \omega / \omega_H$ – отношение угловой скорости турбокомпрессора к угловой скорости на номинальном

режиме;

$$\bar{N}_T = \frac{N_T}{N_{TH}} \text{ – относительная мощность турбины;}$$

ны;

$$\bar{N}_K = \frac{N_K}{N_{TH}} \text{ – относительная мощность компрессора;}$$

прессора;

$$\bar{N}_{CT} = \frac{N_{CT}}{N_{TH}} \text{ – относительная мощность стартеров.}$$

ров.

Из уравнения (2) для случая номинального режима можно получить следующее выражение

$$k_F k_Q = 1 + k_F - k_t.$$

Подстановка в записанное выражение формул для коэффициентов даст следующее верное тождество

$$Q_{низ} G_{FH} = G_{FH} (T_{КСH}^* C_{pKC} - C_F T_F) + G_{КСin} (T_{КСH}^* C_{pKC} - T_{Kin}^* C_{pin}).$$

Систему дифференциальных уравнений (1) – (3) планируется решить численным методом. В качестве численного метода можно использовать метод Хемминга или Рунге–Кутта [7]. Во всех этих методах задача пользователя – по известным значениям параметров найти первые производные этих параметров. Иными словами – числовые значения неизвестных переменных выдает численный метод, а задача программиста, получив эти числовые значения, вычислить первые производные.

Таким образом, для ГТД рис. 1 считаются известными следующие параметры $\bar{P}_{КС}^*$, $\bar{m}_{КС}$ и \bar{p} .

Находим температуру в камере сгорания $T_{КС}^* = \frac{\bar{P}_{КС}^*}{\bar{m}_{КС}}$.

Задаваясь параметром расхода на входе в камеру сгорания $\bar{g}_{КСin}$, подбираем его так, чтобы произведение всех $\bar{\pi}_K$ и \bar{v} дало $\bar{P}_{КС}^*$. Аналогично, задаваясь параметром расхода $\bar{g}_{КСou}$ на выходе из камеры сгорания, подбираем его так, чтобы произведение всех $\bar{\pi}_T$ и \bar{v} дало $\bar{P}_{КС}^*$.

В статьях [4 – 6] приведены методики, позволившие разработать следующие процедуры для элементов ГТД:

$$\begin{aligned} \pi_K &= \pi_K (\bar{p}_{пр}, \bar{g}_{Кou}, \eta_{KH}, \pi_{KH}); \\ \bar{g}_{Кou} &= \bar{g}_{Кou} (\bar{p}_{пр}, \bar{g}_{Kin}, \eta_{KH}, \pi_{KH}); \\ \pi_T &= \pi_T (\bar{g}_{in}, \pi_{TH}, \pi_{TKP}, \eta); \\ v &= v (\bar{g}_{ou}, v_H, v_{KP}, k); \\ v &= v (\bar{g}_{in}, v_H, v_{KP}, k); \end{aligned}$$

$$\frac{\bar{g}_{ou}}{\bar{g}_{in}} = \frac{v_H}{v}.$$

Эти процедуры позволяют проделать указанные выше действия и найти первые производные согласно уравнений (1) – (3).

2. Сравнительный анализ запуска ГТД стартерами различной мощности

Разработанные программы позволили провести расчеты запуска одновального ГТД для разной мощности стартеров. Начальные условия назначаются единицами (номинал). Затем считают случай прекращения топливоподачи и вращение на стартерах перед розжигом. На рис. 2 показан нормальный запуск ГТД.

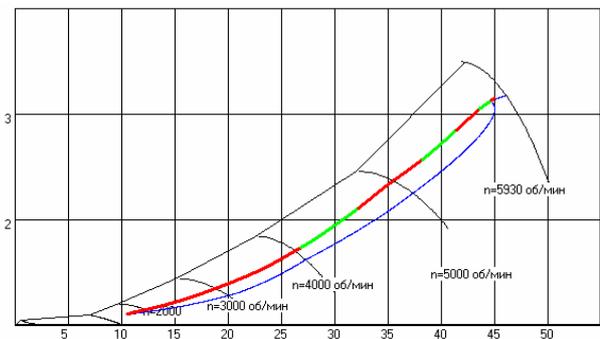


Рис. 2. Запуск ГТД стартером большой мощности

На рис. 2 показан удовлетворительный запуск ГТД, который позволяет надеяться на возможность уменьшить мощность стартера. Запуск при недостаточной мощности стартеров показан на рис. 3.

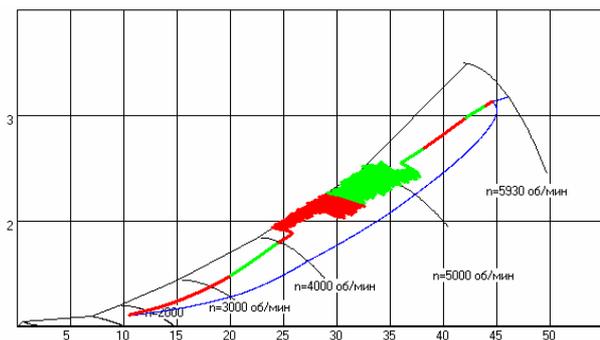


Рис. 3. Запуск ГТД стартером, мощность которого недостаточна

На рис. 3 видны явления срыва при наличии запаса устойчивости. Запас устойчивости при запуске (рис. 3) небольшой, но он есть и, казалось бы, можно работать. Однако учет динамики запуска позволяет утверждать обратное.

Заключение

Разработанная методика позволяющая моделировать на ЭВМ процесс пуска с получением временной диаграммы.

Расчеты на ЭВМ по изложенной методике позволяют обнаружить явления срыва потока (помпаж) в процессе пуска ГТД.

Вариантные расчеты на ЭВМ позволяют обосновано выбрать мощность стартеров.

Изложенная методика позволяет выбрать рациональный алгоритм запуска ГТД.

Литература

1. Романовський Г.Ф. Теоретичні основи проектування суднових газотурбінних агрегатів: навчальний посібник / Г.Ф. Романовський, М.В. Ващиленко, 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. Тарасенко А.И. Расчетное обоснование ограничений при регулировании ГТД со свободной силовой турбиной / А.И. Тарасенко // Вестник двигателестроения. – 2010. – № 2. – С. 65-68.

4. 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.

5. 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.

6. Тарасенко А.А. Применение обобщенных зависимостей для построения характеристик турбин с помощью ЭВМ / А.А. Тарасенко // Авиационно-космическая техника и технология, – 2010. – № 7 (74). – С. 164-167.

7. Мак-Кракен Д. Численные методы и программирование на Фортране / Д. Мак-Кракен, У. Дорн. – М.: Мир, 1977. – 360 с.

Поступила в редакцию 24.05.2011

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

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ ПУСКУ СУДНОВОГО ГТД НА ЕОМ

Г.Ф. Романовський, О.О. Тарасенко

Пропонується алгоритм моделювання динаміки процесу пуску суднового газотурбінного двигуна (ГТД). При моделюванні процесу пуску використовуються розроблені авторами узагальнені характеристики компресорів, турбін, пристроїв типу "газодинамічний опір" та пристроїв перепуску повітря, одержаних на базі використання газодинамічних функцій і загальних співвідношень. В якості базових даних використовуються основні параметри номінального режиму. Наведено приклад розрахунку процесу запуску. Процес зображено на характеристиці компресора при різних потужностях стартеру.

Ключові слова: запуск, характеристика компресора та турбіни, витрата, ккд, ступінь підвищення тиску, стартер, пристрій перепуску повітря.

MODELING OF THE DYNAMICS OF THE SHIP GTE STARTING ON THE COMPUTER

G.F. Romanovsky, A.A. Tarasenko

An algorithm for modeling the dynamics of the process of starting a gas turbine engine (GTE) is proposed. In the simulation of the start the generalized characteristics of compressors, turbines, devices such as "gas-dynamic resistance" and bypass devices obtained by authors through the use of gas-dynamic functions and general relations are used. As the initial data parameters of the nominal mode are used. Example of calculation of the startup process is shown. The process is shown in the compressor characteristics in various capacities on the starter.

Key words: Start-up, compressor or turbine characteristics, consumption, efficiency, pressure ratio, the starter, bypass air device.

Романовський Георгій Федорович – д-р техн. наук, проф., завідує кафедрою турбін Національного університету кораблестроєння ім. адм. Макарова, Николаев, Украина.

Тарасенко Александр Александрович – аспірант кафедри турбін Національного університету кораблестроєння ім. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: tai777@ukrpost.net.