

УДК 621.438:

А.И. Тарасенко

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

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ГТД СО СВОБОДНОЙ СИЛОВОЙ ТУРБИНОЙ

Рассматривается газотурбинный двигатель (ГТД) со свободной силовой турбиной, работающей на генератор в условиях электростанции. Регулирование газотурбинного двигателя осуществляется регулятором на основе управляющей ЭВМ. Предложена математическая модель газотурбинного двигателя, позволяющая разработать алгоритм регулирования и смоделировать переходные процессы в газотурбинном двигателе. Моделирование переходных процессов позволяет обосновать с помощью расчетов допустимую подачу топлива в зависимости от режима работы ГТД. В предложенной математической модели состояние двигателя определено теми же параметрами, что и в реальной работе. Именно это позволяет определить ограничения подачи топлива.

Газотурбинный двигатель, регулятор, управляющая ЭВМ, топливоподача, дифференциальные уравнения, ограничения

Введение

Рассматривается газотурбинный двигатель (ГТД) содержащий свободную силовую турбину и газогенератор (одно или двухкаскадный турбокомпрессор).

Система регулирования ГТД имеет датчики, позволяющие однозначно определить состояние ГТД.

Отладить алгоритм работы регулятора можно на упрощенной математической модели двигателя. Определить предельно допускаемые подачи топлива можно только путем тщательных и полных расчетов. Никто не возьмет на себя ответственность за увеличение подачи топлива, исходя из эмпирического опыта. Если бы все было так просто, не делали бы хитроумных защит по предельной температуре, помпажу и разному двигателя.

Известно требование к алгоритму регулирования для случая достижения предельно допустимой температуры – перейти на алгоритм поддержания именно этой предельной температуры. При этом о заранее рассчитанных ограничениях топливоподачи не упоминают.

1. Формулирование проблемы

Требуется получить систему дифференциальных уравнений, описывающих движение и состояние газотурбинного двигателя.

Решая и анализируя полученную систему уравнений, необходимо сформировать допустимую подачу топлива, исходя из следующих критериев:

- отсутствие помпажа;
- отсутствие превышения температуры;
- отсутствие погасания.

Предполагается, что быстродействующая управляющая ЭВМ, на основе которой выполнен регулятор, поддерживает заданную скорость вращения силовой турбины, и допускаемая топливоподача ничего общего с явлением разноса не имеет.

Разнос (аварийное превышение скорости вращения силовой турбины) возникает в двигателях со свободной силовой турбиной при резком сбросе нагрузки на генератор. Правильно спроектированный регулятор успеет сбросить топливоподачу, но, во первых возможно погасание, а во вторых энергии, накопленной в двигателе, достаточно для разноса.

Следует отметить, что защиты по разному, как правило, срабатывают на скорости вращения силовой турбины 3300 об/мин. При сбросе нагрузки с режима 0,5 до нуля регулятор турбины не удержит и защита срабатывает. Весь парадокс этого явления в том, что после срабатывания защиты превышение скорости будет больше по сравнению со случаем, когда защита отключена. Интересно посмотреть на того, кто рискнет отключить, однако задержку срабатывания защиты в зависимости от превышения оборотов «подпольно» установить можно. Дело в том, что на работающем двигателе защиту на разнос проверяют, изменяя скорость турбины очень медленно, и увидеть «подпольно» установленную задержку непросто.

1.1 Общие соображения

По аналогии с [5] двигатель рассматривается как совокупность «аккумуляторов» энергии. Под

«аккумуляторами» понимаются переходники между компрессорами и турбинами, а также вращающиеся ротора.

Для получения системы дифференциальных уравнений рассмотрим фрагмент двигателя рис. 1.

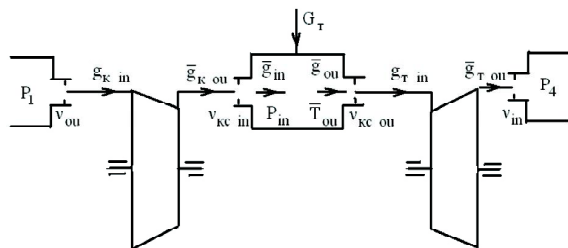


Рис. 1. Фрагмент схемы двигателя

На рис. 1 рассмотрен фрагмент двигателя, содержащий камеру сгорания, которая рассматривается как переходник.

При анализе рассматриваемого фрагмента используем относительный параметр расхода [4]

$$\bar{g} = \frac{g}{g_H} = \frac{G \cdot \sqrt{T}}{P} \cdot \frac{P_H}{G_H \cdot \sqrt{T_H}},$$

где \bar{g} – отношение параметра расхода к этому же параметру на номинальном режиме.

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

– для устройств типа «гидравлическое сопротивление»

$$v = v(\bar{g}_{in}, v_H, v_{кр}, k), \quad (1)$$

$$v = v(\bar{g}_{ou}, v_H, v_{кр}, k); \quad (2)$$

– для устройства типа компрессор

$$\pi_k = \pi_k(\bar{\pi}_{пр}, \bar{g}_{ou}, \eta_H, \eta_{ouH}, \eta_{inH}, \pi_{кH}); \quad (3)$$

– для устройства типа турбина

$$\pi_T = \pi_T(\bar{g}_{in}, \pi_{TH}, \pi_{TKP}, \eta). \quad (4)$$

Применим зависимости (1)–(4) к ГТД, фрагмент схемы которого представлен на рис. 1.

Систему дифференциальных уравнений планируется решить численным методом. В качестве численного метода можно использовать метод Хемминга или Рунге–Кутта [6]. 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 про-

изводные. Таким образом, для фрагмента рис. 1 считаются известными следующие параметры \bar{P}_1 ;

\bar{T}_1 ; \bar{P}_{in} ; \bar{T}_{ou} ; \bar{P}_4 ; $\bar{\pi}_k$; $\bar{\pi}_T$. На основании этих параметров необходимо вычислить остальные.

Рассмотрим камеру сгорания. Зададимся параметром расхода на выходе из компрессора \bar{g}_{kou} .

Используя методы (1)–(3), подберем \bar{g}_{kou} так, чтобы $\bar{P}_{in}/\bar{P}_1 = \bar{\pi}_k \cdot \bar{v}_{ou} \cdot \bar{v}_{kcin}$ и вычислим \bar{g}_{in} .

Задаемся параметром расхода на входе в турбину \bar{g}_{Tin} . Используя методы (1), (2) и (4), подберем \bar{g}_{Tin} так, чтобы $\bar{v}_{in} \cdot \bar{v}_{kcou} \cdot \bar{P}_{in}/\bar{P}_4 = \bar{\pi}_T$ и

вычислим \bar{g}_{ou} .

Для массы газа в камере сгорания из условий сплошности запишем

$$\dot{m}_{kc} \tau_{kc} = \bar{g}_{in} \frac{\bar{P}_{in}}{\sqrt{T_{in}}} - \bar{g}_{ou} \frac{\bar{P}_{in}}{\sqrt{T_{ou}}} \frac{G_{ouH}}{G_{inH}} + \bar{g}_T \frac{G_{TH}}{G_{inH}} \quad (5)$$

где $\tau_{kc} = \frac{m_H}{G_{inH}}$ – постоянная времени камеры сгорания;

$$m_H = \frac{P_{inH} V}{R T_{ouH}} \quad \text{– масса газа в камере сгорания}$$

на номинальном режиме;

G_{TH} – расход топлива на номинальном режиме;

\bar{g}_T – относительный расход топлива.

Уравнение сохранения энергии для камеры сгорания имеет вид

$$\frac{d(\bar{m} \bar{T}_{ou})}{dt} m_H T_{ouH} C_{ou} = G_{in} T_{in} C_{in} - G_{ou} T_{ou} C_{ou} + \bar{g}_T G_T Q_H$$

Если учесть, что

$$\bar{T}_{ou} = \frac{\bar{P}_{in}}{\bar{m}}, \quad (6)$$

то

$$\dot{P}_{ou} \tau_{kc} = \bar{g}_{in} \bar{P}_{in} \sqrt{T_{in}} \frac{C_{in}}{C_{ou}} \frac{T_{inH}}{T_{ouH}} - \bar{g}_{ou} \bar{P}_{ou} \sqrt{T_{ou}} \frac{G_{ouH}}{G_{inH}} + \bar{g}_T \frac{G_{TH} Q_H}{G_{inH} C_{ou} T_{ouH}}, \quad (7)$$

где C_{in} – теплоемкость газа на входе;

C_{ou} – теплоемкость газа на выходе;

Q_H – теплотворная способность топлива.

Если обозначить $k_G = \frac{G_{ouH}}{G_{inH}}$ и

$k_Q = \frac{C_{in} T_{inH}}{C_{ou} T_{ouH}}$, то выражение (7) запишем в

виде

$$\dot{P}_{ou} \tau_{kc} = k_Q \cdot \bar{g}_{in} \bar{P}_{in} \sqrt{\bar{T}_{in}} - k_G \cdot \bar{g}_{ou} \bar{P}_{ou} \sqrt{\bar{T}_{ou}} + \bar{g}_T \cdot (k_G - k_Q), \quad (8)$$

а выражение (5)

$$\dot{m}_{kc} \tau_{kc} = \bar{g}_{in} \frac{\bar{P}_{in}}{\sqrt{\bar{T}_{in}}} - k_G \cdot \bar{g}_{ou} \frac{\bar{P}_{ou}}{\sqrt{\bar{T}_{ou}}} + \bar{g}_T (k_G - 1). \quad (9)$$

Для ротора турбокомпрессора

$$\dot{n} \tau_{тк} = \frac{1}{n} (\bar{N}_T - \bar{N}_K), \quad (10)$$

где $\tau_{тк} = \frac{J \omega_H^2}{N_{TH}}$ – постоянная времени ротора тур-

бокомпрессора.

Уравнения (8) и (9) могут быть записаны для любого переходника. Уравнение (10) для любого ротора.

Таким образом, можно получить систему дифференциальных уравнений для двигателя любой степени сложности.

Решение системы уравнений начинают с номинального режима. На этом режиме все относительные параметры равны единице и начальные условия определены. Через некоторое время после начала работы программы рассчитываемые параметры ГТД стабилизируются и можно переходить к формированию ограничений.

2. Формирование ограничений

Осуществляем переход на интересующий нас режим, задавшись соответствующим значением. Дождавшись перехода двигателя на заданный режим, приступаем к формированию ограничений, задаваясь отклонениями от заданного значения.

Отклонения есть смысл задавать скачкообразно так как резкое изменение топливоподачи – самый тяжелый режим работы. Осуществив скачкообразное изменение подачи топлива, наблюдаем за переходным процессом и анализируем его.

Если переходный процесс удовлетворительный, то величину «скачка» топливоподачи увеличиваем.

Качество переходного процесса анализируется из условий достаточного запаса устойчивости, допустимого уровня температуры газов и отсутствия погасания. Вопрос погасания решается ограничением минимально допустимой температуры газа. Например, можно ориентироваться на температуру газов холостого хода двигателя или холостого хода генератора.

Традиционно [1] ограничения топливоподачи формируются в зависимости от скорости вращения компрессора высокого давления. Условно газогенератор считается однокаскадным. При изменении температуры наружного воздуха скорость вращения надлежит брать приведенную. Это обстоятельство делает замер температуры наружного воздуха важным. Задаваясь рядом значений скорости вращения турбокомпрессора можно получить зависимость максимально допустимой и минимально допустимой топливоподачи от скорости вращения турбокомпрессора. Применение ограничений показано на рис. 2.

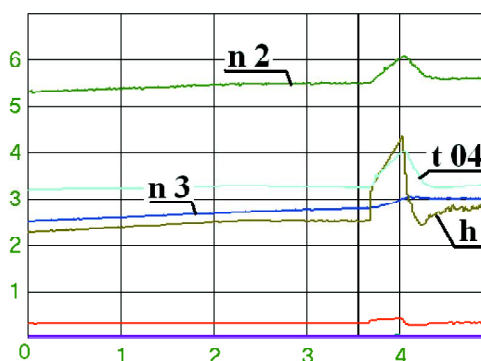


Рис. 2. Экспериментальный переходный процесс в ГТД

n_2 – скорость вращения КВД, тыс.об/мин;

n_3 – скорость вращения силовой турбины, тыс.об/мин;

h – положение дозатора, %

t_{04} – температура в 100 °С

На рис. 2 показан переходный процесс в ГТД при выходе его на НАР (начало автоматического регулирования n_3). Этот режим сохранился при использовании гидравлических регуляторов. В этих регуляторах при скорости $n_3 = 2800$ об/мин происходит переход на поддержание $n_3 = 3000$ об/мин. Иными словами при $n_3 = 2800$ об/мин гидравлический регулятор вступает в работу. При использовании регулятора на основе управляющей ЭВМ переход с регулирования скорости на режим регулирования скорости можно осуществить безударно, что заказчик и потребовал.

Эксперимент интересен тем, что при переходе с $n_3 = 2800$ об/мин на $n_3 = 3000$ об/мин вступает в работу ограничение топливоподачи по условиям устойчивой работы. На графике виден резкий скачок положения дозатора и дальнейшего плавное изменение положения в сторону увеличения в месте с увеличением скорости вращения КВД. Следует отметить, вибрацию при увеличении ограничений.

Заключение

Предложен алгоритм формирования ограничений топливоподачи для ГТД со свободной силовой турбиной, работающего в условиях электростанции.

Предложена математическая модель ГТД, позволяющая исследовать путем компьютерного моделирования переходные процессы, алгоритмы регулирования и управления двигателями сложных схем.

Защита двигателя по температуре может быть существенно упрощена.

Перечень ссылок

1. Сорока Я.Х. Теория и проектирование судовых газотурбинных двигателей: Учебное пособие. — Л.: Судостроение, 1982. — 112 с.

2. Тарасенко А.А. Частичные режимы устройств типа газодинамическое сопротивление в судовых ГТД // *Авиационнокосмическая техника и технология*, — 2008. — № 8 (55) — С. 56–58.

3. Тарасенко А.А. Применение обобщенных зависимостей для построения характеристик компрессоров с помощью ЭВМ // *Авиационнокосмическая техника и технология*, — 2009. — № 7 (64) — С. 74–77.

4. 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. — 2е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отдние, 1986. — 392 с.

5. Тарасенко А.И. Нелинейная динамическая модель судового газотурбинного двигателя // *Авиационная техника и технология*. — 2006. — № 7 (33). — С. 172–176.

6. Мак Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на Фортране. — М.: Мир, 1977.

Поступила в редакцию 30.06.2010 г.

A.I. Tarasenko

TRANSITIONAL PROCESS IN THE GTE WITH FREE POWER TURBINE BY DOUBLEPULSE REGULATION

Розглядається газотурбінний двигун (ГТД) з вільною силовою турбіною, яка працює на генератор в умовах електростанції. Регулювання газотурбінного двигуна здійснюється за допомогою регулятора на базі керуючої ЕОМ. Запропоновано математичну модель газотурбінного двигуна, яка дозволяє розробити алгоритм регулювання та змоделювати перехідні процеси газотурбінного двигуна. Моделювання перехідних процесів дозволяє обґрунтувати за допомогою розрахунків допустиму подачу пального в залежності від режиму роботи ГТД. В запропонованій математичній моделі стан двигуна визначено тими ж параметрами, що і в реальній роботі. Саме це дозволяє обчислити допустиму подачу пального.

Газотурбінний двигун, регулятор, керуюча ЕОМ, подача пального, диференційне рівняння, обмеження

Gas-turbine engine (GTE) with free power turbine, working on generator in the condition of electric power station is viewed. Regulation of gas-turbine engine realized by double-pulse regulator based on computer. That regulator is measuring speeds of rotation of contours of gas-turbine engine and make measuring of active power that generator produce. We offer a reductive mathematical model of gas-turbine engine, that allow to create an algorithm of regulation and simulate transition process in gas-turbine engine.

Gas-turbine engine (GTE), regulator proportional-integral, proportional algorithm, computer, double-pulse regulator