

УДК 621.45.018

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЙ ГАЗОГЕНЕРАТОРА ДВУХКОНТУРНОГО ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

И. Н. Грибков¹

¹gribkov@avid.ru

¹АО «ОДК-Авиадвигатель»

Поступила в редакцию 20.03.2023

Аннотация. Сформирована и приведена математическая модель испытаний газогенератора двухконтурного турбореактивного двигателя, применяемая для повышения уровня автоматизации испытаний. Математическая модель описывает технологический процесс испытаний газогенератора двухконтурного турбореактивного двигателя с имитацией требуемых входных термогазодинамических параметров. Показано, что результаты расчетов по предлагаемой модели хорошо согласуются с экспериментальными данными работы специализированного испытательного комплекса для испытаний газогенератора двухконтурного турбореактивного двигателя.

Ключевые слова: испытания газогенератора, двухконтурный турбореактивный двигатель, математическая модель, имитация требуемых термодинамических параметров.

ВВЕДЕНИЕ

Испытания газогенератора двухконтурного турбореактивного двигателя с имитацией требуемых входных термогазодинамических параметров являются одним из важнейших этапов в процессе создания перспективного двухконтурного турбореактивного двигателя. [1, 2, 3].

В настоящее время основным недостатком таких испытаний является высокий уровень ручного труда при управлении режимами работы технологического оборудования, его много итерационный характер и как следствие значительное время на установку требуемых входных термогазодинамических параметров на входе в испытуемый газогенератор. Одним из действенных решений является повышение уровня автоматизации испытаний, что невозможно без использования математической модели технологического процесса испытаний. Использование математической модели при проектировании системы автоматизации испытаний позволяет оценить на начальных этапах проектирования основные параметры технологического процесса и при необходимости выполнить необходимые конструктивные решения, а в процессе эксплуатации исследовать нештатные ситуации и обеспечить выбор оптимального плана проведения испытаний.

Целью статьи является разработка комплексной математической модели технологического процесса испытаний газогенератора двухконтурного турбореактивного двигателя с имитацией требуемых термодинамических параметров для создания системы автоматизации испытаний.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЙ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Вопросам математического моделирования технологического процесса испытаний турбореактивных двигателей традиционно уделяется большое внимание. Об этом свидетельствует

большое количество публикаций, в которых рассматриваются различные математические методы и способы, описывающие протекание основных физических процессов как в отдельных элементах турбореактивного двигателя, так и во всем технологическом процессе испытаний в целом. Так, например, Калниным В.М. [4] впервые предложена эффективная нелинейная математическая модель основных элементов ракетных двигателей, разработаны методы исследования и математического моделирования полного цикла эксплуатационных режимов работы. Авторы Добрянский Г.В. и Мартыянова Т.С. [5] представили результаты исследований в области разработки математических моделей газотурбинной техники и предложили их общую классификацию в зависимости от требуемой точности моделирования.

Известны несколько подходов к описанию математических моделей технологического процесса испытаний турбореактивных двигателей. Один из них основан на использовании физического описания протекающих процессов в виде системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений или уравнений в частных производных. Так, например, Гольберг Ф.Д. [6] представил математическую модель турбореактивного двигателя, составленную с помощью нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений, последовательно описывающих работу основных элементов турбореактивного двигателя. Уравнения представляют собой преобразованные уравнения термодинамики, газовой динамики и механики, записанные в нестационарной форме, что позволяет при изменении характеристик какого-либо элемента изменить лишь те уравнения модели, которые описывают изменяемый элемент, а точность статических и динамических характеристик технологического процесса напрямую зависит от точности задания характеристик основных элементов технологического процесса. Авторы Лебсак В.А. [7], *Jansen W.* [8], *Krosel S.M.* [9] приводят обобщенную математическую модель, описывающую переходные процессы в компрессорных аэродинамических трубах, состоящую из активных объемов с сосредоточенными параметрами, что эквивалентно замене действительного распределения параметров рабочего потока кусочно-постоянной аппроксимацией с введением сильных разрывов на границах моделируемых участков.

Другие подходы основаны на идентификации модели заданного вида по результатам экспериментальных значений входных и выходных переменных. Так, например, Кудрин Н.А. [10] предлагает математическую модель технологического процесса испытаний газотурбинной техники, где порядок и коэффициенты уравнения определяются с помощью аппроксимации результатов экспериментальных наблюдений переходных процессов разностным уравнением. Вершинин И.Д. [11] представил математическую модель компрессора аэродинамической трубы с помощью дифференциальных и алгебраических уравнений с кусочно-линейными коэффициентами, что представляет собой эмпирическую модель. Поэтому изменение характеристик какого-либо элемента технологического процесса потребует изменения практически всего набора коэффициентов модели. Лянцев О.Д. [12] предлагает методику идентификации передаточных функций газогенератора турбореактивного двигателя с использованием кубических сплайнов и метода наименьших квадратов. В ряде работ [13, 14] авторы рассматривают перспективы применения теории нейронных сетей для создания математических моделей сложных технических объектов двигателестроения.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИСПЫТАНИЙ ГАЗОГЕНЕРАТОРА ДВУХКОНТУРНОГО ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Увеличение доли научно-исследовательских испытаний газогенератора двухконтурного турбореактивного двигателя на начальных этапах проектирования требует организации испытаний с минимальными финансовыми и материальными затратами. Одним из действенных решений является применение специализированных испытательных комплексов с имитацией требуемых входных термогазодинамических параметров [3].

Одним из примеров решения поставленной задачи является специализированный испытательный комплекс для испытания газогенератора двухконтурного турбореактивного двигателя [15].

Разработанный комплекс реализует идею определения наиболее простого и экономичного средства получения рабочего тела требуемых термогазодинамических параметров для заранее определенного диапазона объектов испытания различной тяги (мощности) и назначения. Принципиальная схема специализированного испытательного комплекса представлена на рисунке 1.

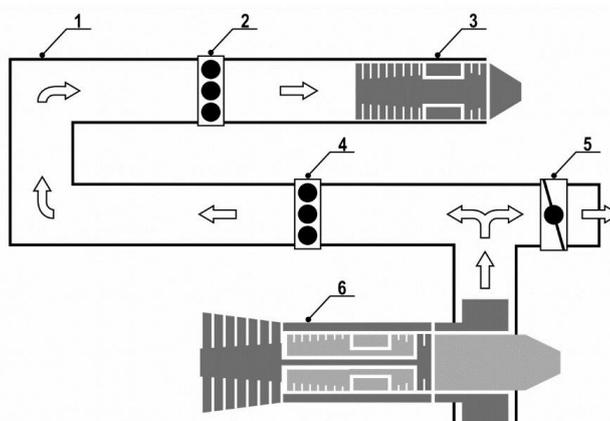


Рис 1. Принципиальная схема специализированного испытательного комплекса для испытаний ГГ ТРДД с имитацией входных термогазодинамических параметров: 1 – система воздухопроводов; 2, 4 – дискретный перепуск рабочего тела в атмосферу; 3 – ГГ ТРДД; 5 – регулируемый перепуск рабочего тела в атмосферу; 6 – ТТРДД

В основе рассматриваемого специализированного испытательного комплекса лежит технологический процесс получения рабочего тела с требуемыми термодинамическими параметрами, где воспроизведение требуемых параметров выполняется на базе модифицированного двухконтурного турбореактивного двигателя без смешения потоков внутреннего и внешнего контуров с организацией независимого отбора рабочего тела из внешнего контура – технологический турбореактивный двухконтурный двигатель (ТТРДД). Рабочее тело внешнего контура ТТРДД через систему подвода рабочего тела (СПРТ) поступает на вход испытуемого ГГ ТРДД, чем обеспечивается имитация входных термогазодинамических параметров. В свою очередь СПРТ представляет собой систему воздухопроводов, содержащую устройства перепуска рабочего тела в атмосферу – регулируемая заслонка перепуска и клапаны дискретного перепуска.

Однако, принципиальным недостатком подобных испытательных комплексов является то, что обеспечение требуемых входных термогазодинамических параметров как правило осуществляется фактически в ручном режиме работы, что приводит к существенному удорожанию и усложнению испытаний. Например, существенным ограничением при изменении режима работы ТТРДД и процента перепуска рабочего тела в СПРТ, является необходимость сохранения газодинамической устойчивости компрессора ТТРДД в ограниченной области работы связанное с конструктивным исполнением специализированного испытательного комплекса. Поэтому при ручном управлении режимом работы ГГ ТРДД, ТТРДД и СПРТ из-за необходимости обеспечения согласованной работы элементов комплекса в условиях быстроизменяющихся процессов существует высокая вероятность возникновения нештатных ситуаций, например, таких как помпаж ГГ ТРДД и ТТРДД

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЙ ГАЗОГЕНЕРАТОРА ДВУХКОНТУРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассматривается задача разработки математической модели технологического процесса испытаний газогенератора двухконтурного двигателя для создания системы автоматизации испытаний. Использование математической модели технологического процесса прежде всего обеспечивает возможность тестирования алгоритмов системы автоматизации испытаний в том числе в различных нештатных ситуациях. Это позволяет при необходимости выполнить как

алгоритмические, так и конструктивные изменения на начальных этапах проектирования и тем самым значительно снизить технические и финансовые риски при проектировании системы автоматизации испытаний.

Таким образом математическая модель должна с хорошей точностью отражать все основные динамические явления, имеющие место в процессе испытаний и, вместе с тем, быть достаточно простой для применения существующих методов теории управления к анализу и синтезу алгоритмов системы автоматизации испытаний. Поэтому задачи моделирования очень быстрых и очень медленных процессов, таких, например, как акустические и упругие колебания элементов или изменение параметров процесса по мере выработки ресурса не рассматриваются в рамках данной работы. Математическая модель прежде всего должна описывать основные типы переходных процессов, имеющие место в рассматриваемом технологическом процессе, а именно установление давления, температуры и расхода рабочего тела, где наибольший научный интерес представляет задача математического обеспечения взаимосвязанной работы всех элементов технологического процесса.

Для решения рассматриваемой задачи предлагается использовать комплексную математическую модель, представляющую собой взаимосвязанную совокупность функциональных модулей, которые наиболее полно отражают функциональную структуру рассматриваемого технологического процесса, которые в свою очередь могут быть представлены последующей взаимосвязанной совокупностью функциональных модулей, отражающих уже функциональную структуру ранее определенных элементов технологического процесса. Такая многоуровневая функциональная декомпозиция рассматриваемого объекта выполняется до момента получения функционально однородных модулей, которые в свою очередь могут быть представлены взаимосвязанной совокупностью базовых модулей, построенных уже по принципу достаточно точного описания происходящих в них физических процессов [16].

Описание базового модуля основывается на его представлении, как некотором физическом объеме с входом, выходом и расходной характеристикой входа, где течение рабочего тела является одномерным. В этом случае поток рабочего тела в расчетном сечении полностью определяется тремя термодинамическими параметрами: давлением, температурой, и скоростью или, при известной площади проходного сечения, расходом рабочего тела. Обобщенная схема базового модуля представлена на рисунке 2.

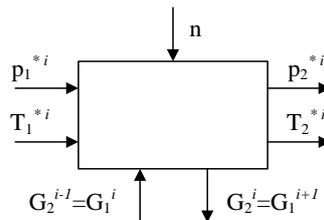


Рис 2. Обобщенная схема i базового модуля: p_1^{i*}, p_2^{i*} – давление рабочего тела на входе и выходе i базового модуля; T_1^{i*}, T_2^{i*} – температура рабочего тела на входе и выходе i базового модуля; G_1^i, G_2^i – расход рабочего тела на входе и выходе i базового модуля; G_2^{i-1} – расход рабочего тела на выходе $i - 1$ базового модуля; G_1^{i+1} – расход рабочего тела на входе $i + 1$ базового модуля; n – подводимая механическая энергия

Для определения связи между параметрами на входе и выходе базового модуля запишем уравнение для энергии идеального рабочего тела:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho v^2}{2} + \rho u \right) = -\nabla \left(\rho \vec{v} \cdot \left(\frac{v^2}{2} + i \right) \right), \quad (1)$$

где ρ – плотность рабочего тела; u – внутренняя энергия единицы массы рабочего тела; i – энтальпия единицы массы рабочего тела; v – скорость рабочего тела.

Интегрируя по всему объему базового модуля, получим

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \left(\frac{\rho v^2}{2} + \rho u \right) dV = - \int \nabla \left(\rho \vec{v} \cdot \left(\frac{v^2}{2} + i \right) \right) dV, \quad (2)$$

Выполнив преобразования в интеграл по поверхности, получим

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \left(\frac{\rho v^2}{2} + \rho u \right) dV = - \int \left(\rho \vec{v} \cdot \left(\frac{v^2}{2} + w \right) \right) d\vec{S}, \quad (3)$$

Сделаем предположение о том, что отсутствует поток тепла, через поверхность базового модуля. Таким образом будем считать, что поверхность базового модуля являются адиабатической и рабочее тело входит по нормали к поверхности, тогда

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \left(\frac{\rho v^2}{2} + \rho u \right) dV = \rho_1^i v_1^i \cdot \left(\frac{v_1^{i2}}{2} + i_1^i \right) S_1^i - \rho_2^i v_2^i \cdot \left(\frac{v_2^{i2}}{2} + i_2^i \right) S_2^i, \quad (4)$$

где ρ_1^i, ρ_2^i – плотность рабочего тела на входе и выходе i базового модуля; v_1^i, v_2^i – скорость рабочего тела на входе и выходе i базового модуля; i_1^i, i_2^i – энтальпия единицы массы рабочего тела на входе и выходе i базового модуля; S_1^i, S_2^i – площадь входа и выхода i базового модуля.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \left(\frac{\rho v^2}{2} + \rho u \right) dV = \left(\frac{v_1^{i2}}{2} + i_1^i \right) G_1^i - \left(\frac{v_2^{i2}}{2} + i_2^i \right) G_2^i, \quad (5)$$

где G_1^i, G_2^i – расход рабочего тела на входе и выходе i базового модуля.

Сделаем предположение о том, что вкладом направленного движения рабочего тела можно пренебречь, тогда

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho u dV = i_1^i G_1^i - i_2^i G_2^i, \quad (6)$$

или

$$\frac{\partial U}{\partial t} = i_1^i G_1^i - i_2^i G_2^i, \quad (7)$$

где U – полная внутренняя энергия рабочего тела в рассматриваемом объеме.

Изменение массы рабочего тела в рассматриваемом объеме может быть представлено следующим образом:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = G_1^i - G_2^i, \quad (8)$$

где m – масса рабочего тела в рассматриваемом объеме.

При наличии механической энергии описание базового модуля дополняется уравнением движения:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_K - M_{agr}, \quad (9)$$

где J – момент инерции вращающихся масс ротора рассматриваемого контура; ω – угловая скорость; M_T, M_K, M_{agr} – соответственно крутящий момент, развиваемый турбинной, потребляемый компрессором и другими агрегатами рассматриваемого контура.

В зависимости от происходящих физических процессов описание базового модуля может быть представлено несколькими вариантами. Первый вариант представляет собой описание функционально активных элементов технологического процесса, например, таких как воздухозаборник, компрессора, камера сгорания, турбины и реактивное сопло. Второй вариант представляет собой описание функционально пассивных элементов технологического процесса, обеспечивающих возможность согласования режимов работы активных элементов процесса.

Поэтому для решения поставленных в работе задач предложено выполнить структурную и функциональную декомпозицию рассматриваемого технологического процесса испытаний на отдельные функциональные модули, а именно ТТРДД, СПРТ и ГГ ТРДД. Структура математической модели технологического процесса испытаний газогенератора двухконтурного двигателя представлена на рисунке 3.

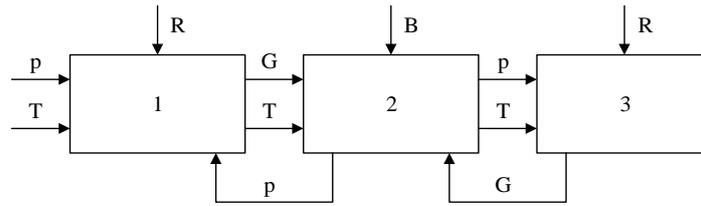


Рис.3. Структура математической модели технологического процесса испытаний ГГ ТРДД: 1 – ТТРДД; 2 – СПРТ; 3 – ГГ ТРДД; R – режим работы; B – перепуск рабочего тела; p – давление рабочего тела; T – температура рабочего тела; G – расход рабочего тела

Функциональный модуль ГГ ТРДД описывает изменение параметров рабочего тела на установившихся и неуставившихся режимах работы ГГ ТРДД и может быть представлен взаимосвязанной системой базовых модулей, описывающих работу функциональных модулей ГГ ТРДД, таких как компрессор, камера сгорания и турбина [5, 6]. Структура математической модели функционального модуля ГГ ТРДД представлена на рисунке 4. Описание соответствующего базового модуля, может быть представлено системой нелинейных уравнений (7) – (9), где исходными данными в значительной степени определяющими точность полученной модели являются геометрические размеры проточной части, газодинамические характеристики узлов, характеристики топлива и т.п.

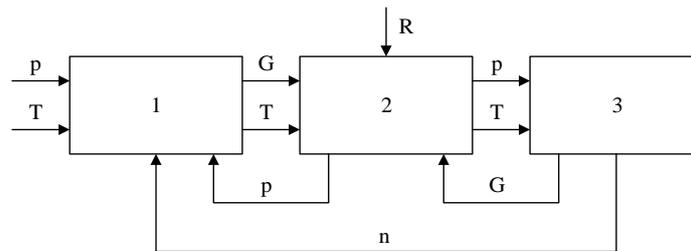


Рис. 4. Структура математической модели функционального модуля ГГ ТРДД: 1 – компрессор; 2 – камера сгорания; 3 – турбина; R – режим работы (расход топлива); p – давление рабочего тела; T – температура рабочего тела; G – расход рабочего тела; n – подводимая механическая энергия

Характеристики компрессора задаются в виде полиномиальной зависимости степени повышения давления рабочего тела (π_k^*) и коэффициента полезного действия компрессора (η_k^*) от приведенной частоты вращения компрессора ($n_{к пр}$), приведенного расхода рабочего тела через компрессор ($G_{к пр}$) и положения направляющего аппарата отдельных ступеней компрессора ($\varphi_{к на}$):

$$\pi_k^* = f(n_{к пр}; G_{к пр}; \varphi_{к на}), \quad (10)$$

$$\eta_k^* = f(n_{к пр}; G_{к пр}; \varphi_{к на}). \quad (11)$$

Характеристики турбины задаются в виде полиномиальной зависимости приведенного расхода рабочего тела через турбину ($G_{т пр}$) и коэффициента полезного действия турбины (η_t^*) от перепада давления рабочего тела на турбине (π_t^*) и приведенной частоты вращения турбины ($n_{т пр}$):

$$G_{т пр} = f(\pi_t^*; n_{т пр}), \quad (12)$$

$$\eta_t^* = f(\pi_t^*; n_{т пр}). \quad (13)$$

Характеристики камеры сгорания задаются в виде полиномиальной зависимости коэффициента восстановления полного давления ($\sigma_{к с}$) от приведенной скорости потока ($\lambda_{к с}$), а также зависимости полноты сгорания топлива ($\eta_{к с}$) от коэффициента избытка воздуха ($\alpha_{к с}$):

$$\sigma_{к с} = f(\lambda_{к с}), \quad (14)$$

$$\eta_{к с} = f(\alpha_{к с}). \quad (15)$$

Функциональный модуль ТТРДД описывает изменение параметров рабочего процесса на установившихся и неуставившихся режимах работы ТТРДД и наследует принципы создания математической модели, используемые при создании функционального модуля ГГ ТРДД. Однако, отличительной особенностью рассматриваемого модуля с точки зрения моделирования процессов является наличие двух механически не связанных каскадов компрессора и турбины, связанных между собой только газодинамической связью. Поэтому для согласования работы дополнительных каскадов необходимо рассматривать нестационарные процессы в дополнительных газовых полостях, расположенных между каскадами компрессора и турбины, что решается использованием соответствующих уравнений (7) – (9) применительно к рассматриваемым узлам.

Функциональный модуль СПРТ описывает изменение параметров рабочего процесса в СПРТ на установившихся и неуставившихся режимах работы ГГ ТРДД и ТТРДД. Рассматриваемый модуль позволяет обеспечить взаимосвязанную работу автономных функциональных модулей ГГ ТРДД и ТТРДД и тем самым определяет полноту взаимосвязанной работы элементов технологического процесса.

Можно сделать допущение, что параметры рабочего тела в отдельных элементах СПРТ переменны по времени, но одинаковы во всех точках рассматриваемой системы, так как время изменения параметров рабочего тела в отдельных элементах СПРТ более чем на два порядка больше времени распространения возмущений давления [7, 10]. Тогда математическая модель СПРТ может быть представлена пневматической емкостью, заполненной рабочим телом, движущимся под действием перепада давлений, создаваемого работой ГГ ТРДД, ТТРДД и перепуском рабочего тела СПРТ. Поэтому уравнения (7) – (9) при отсутствии внутри модуля выделенных элементов, таких как источники массы и энергии, могут быть преобразованы к виду:

$$\frac{dp_{\text{ВЫХ}}}{dt} = \frac{\chi R}{V} (G_{\text{ВХ}} T_{\text{ВХ}} - G_{\text{ВЫХ}} T_{\text{ВЫХ}}), \quad (16)$$

$$\frac{dT_{\text{ВЫХ}}}{dt} = \frac{RT_{\text{ВЫХ}}}{p_{\text{ВЫХ}} V} [(1 - \chi) G_{\text{ВХ}} T_{\text{ВЫХ}} + G_{\text{ВХ}} (\chi T_{\text{ВХ}} - T_{\text{ВЫХ}})], \quad (17)$$

где $p_{\text{ВЫХ}}$ – давление на выходе СПРТ; $T_{\text{ВХ}}$ и $T_{\text{ВЫХ}}$ – температура на входе и выходе СПРТ; V – объем СПРТ; $G_{\text{ВХ}}$ и $G_{\text{ВЫХ}}$ – массовый расход на входе и выходе из СПРТ; R – газовая постоянная; χ – показатель адиабаты.

Математическая модель регулируемой заслонки перепуска рабочего тела СПРТ в виду сложности протекающих физических процессов прежде всего в пространстве может быть представлена в виде полиномиальной зависимости физического расхода рабочего тела через заслонку ($G_{\text{засл}}$) от перепада давления рабочего тела на заслонке ($\pi_{\text{засл}}^*$) и процента открытия заслонки ($\varphi_{\text{засл}}$):

$$G_{\text{засл}} = f(\pi_{\text{засл}}^*; \varphi_{\text{засл}}). \quad (18)$$

Описываемая зависимость получена на основе результатов математического моделирования с распределенными параметрами в пространстве и, в общем случае, времени. Зависимость физического расхода рабочего тела через регулируемую заслонку перепуска рабочего тела СПРТ показана на рисунке 5.

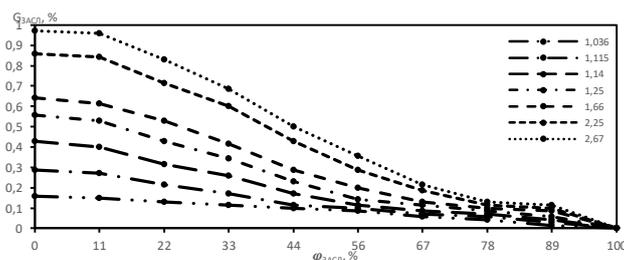


Рис. 5. График физического расхода рабочего тела через регулируемую заслонку перепуска рабочего тела СПРТ

В общей сложности разработанная математическая модель технологического процесса представляет собой совокупность более пятидесяти дифференциальных уравнений, содержащих коэффициенты, имеющие значительный нелинейный характер, учитывающие природу протекающих физических явлений. Все размерные величины и коэффициенты в уравнениях приведены в системе СИ.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование разработанной математической модели осуществлялось с использованием ПЭВМ (Процессор *Intel® Core™ i7 CPU 2.67 GHz*, ОЗУ 12 Гб) в ПО *MATLAB® Simulink*. Оценка достоверности математической модели проводилась путем сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными работы специализированного испытательного комплекса для испытаний ГГ ТРДД. На рисунке 6 приведен пример изменения давления, температуры и расхода рабочего тела на входе в ГГ ТРДД и физической частоты вращения ГГ ТРДД, вызванных совместным изменением режима работы ГГ ТРДД, ТТРДД и СПРТ. Результаты моделирования показаны сплошной линией, а результаты эксперимента показаны пунктирной линией.

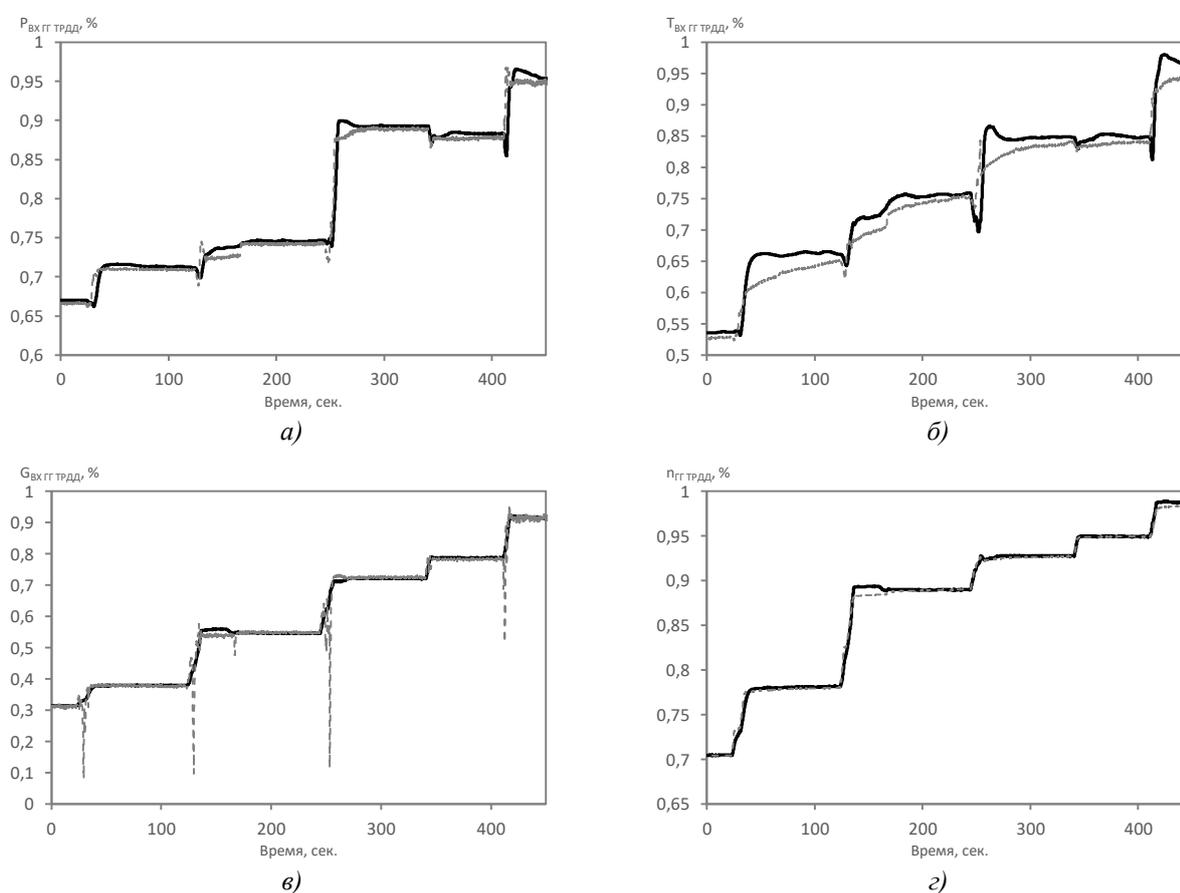


Рис. 6. Графики изменения термогазодинамических параметров ГГ ТРДД: а) давление рабочего тела на входе в ГГ ТРДД, б) температура рабочего тела на входе в ГГ ТРДД, в) расход рабочего тела на входе в ГГ ТРДД, д) частота вращения ротора ГГ ТРДД

Анализ результатов моделирования показал, что качественное поведение кривых полностью соответствует физическим закономерностям рассматриваемого технологического процесса, где максимальная ошибка для рассматриваемых параметров на статических режимах работы не превышает 3%. Однако на динамических режимах работы при максимальной ошибке для параметров давления рабочего тела на входе в ГГ ТРДД и частоте вращения ротора

ГГ ТРДД, которая не превышает 7% имеет место максимальная ошибка по параметрам температуры и расхода рабочего тела на входе в ГГ ТРДД, которая составляет 11÷15%.

Для последующей минимизации ошибок результатов моделирования на динамических режимах работы можно сделать предположение, что наличие ошибок связано в большей степени с отсутствием математической модели информационно-измерительной системы в разработанной математической модели технологического процесса. Так как эксперименты по идентификации математической модели проводились с использованием штатной информационно-измерительной системы специализированного испытательного комплекса для испытаний ГГ ТРДД, при этом регистрируемые переходные процессы включали также и динамику измерительной системы (датчики, усилители и т.п.). Поэтому одним из возможных направлений дальнейшего исследования является определение влияния математической модели информационно-измерительной системы специализированного испытательного комплекса на точность результатов моделирования на переходных режимах работы.

Особый интерес представляют результаты моделирования определенных режимов технологического процесса, потенциально приводящие к возникновению нештатных ситуаций. Например, одним из таких режимов является дискретная перекачка поворотных лопаток компрессора высокого давления ТТРДД из положения «А» в положение «Б» и из положения «Б» в положение «А». Перекачка поворотных лопаток компрессора высокого давления ТТРДД сопровождается резким изменением параметров рабочего тела во всех элементах технологического процесса, что потенциально может привести к потере газодинамической устойчивости ТТРДД и ГГ ТРДД. Это связано прежде всего с газодинамической инерционностью СПРТ и соотношением режимов работы ГГ ТРДД, ТТРДД и СПРТ. Результаты моделирования дискретной перекачки поворотных лопаток компрессора высокого давления ТТРДД из положения «А» в положение «Б» и из положения «Б» в положение «А» показаны на рисунке 7. Изменение положения рабочей точки компрессора низкого давления ТТРДД показано сплошной линией, а границы газодинамической устойчивости компрессора низкого давления ТТРДД показаны пунктирными линиями.

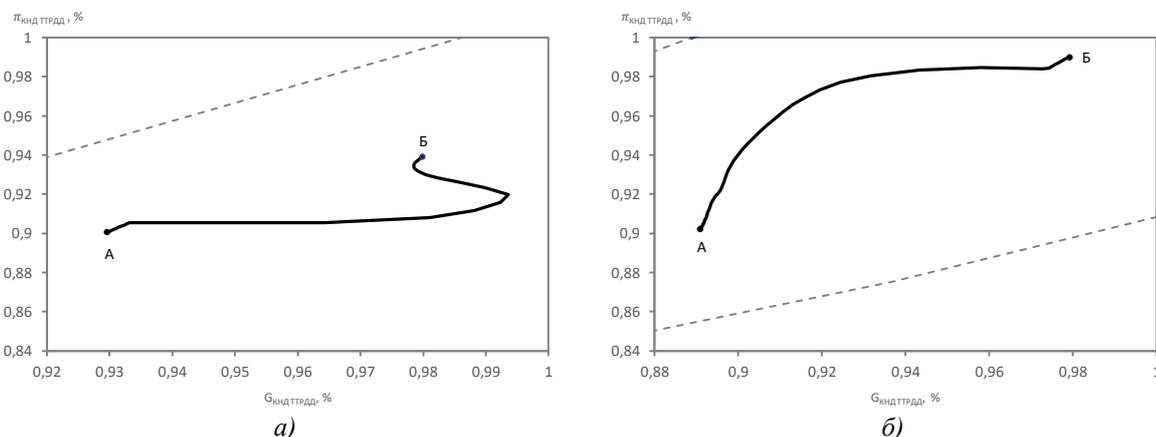


Рис. 7. Графики изменения положения рабочей точки ТТРДД при дискретной перекачке поворотных лопаток компрессора высокого давления ТТРДД: а) из «А» в «Б», б) из «Б» в «А»

Разработанная математическая модель позволяет решать путем математического эксперимента в наиболее полной постановке сложные вопросы, связанные с управлением и обработкой переходных режимов технологического процесса в том числе и анализ потенциальных нештатных ситуаций. Таким образом разработанная комплексная математическая модель технологического процесса может быть использована для создания системы автоматизации испытаний газогенератора двухконтурного турбореактивного двигателя с имитацией требуемых термодинамических параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель, описывающая технологический процесс испытаний газогенератора двухконтурного турбореактивного двигателя с имитацией требуемых входных термогазодинамических параметров. Результаты моделирования, полученные с помощью данной модели, показывают высокую сходимость с результатами эксперимента работы специализированного испытательного комплекса для испытаний ГГ ТРДД.

Математическая модель может быть использована для решения широкого спектра задач, связанных с разработкой системы автоматизации испытаний газогенератора двухконтурного турбореактивного двигателя с имитацией требуемых термодинамических параметров.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, академику РАН Иноземцеву А.А., д.т.н. Августиновичу В.Г., к.т.н. Саженкову А.Н., Торопчину С.В. за обстоятельные консультации по вопросам математического моделирования турбореактивных двигателей и проектирования систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schiewe C., Neuburger N., Staudacher S. How future propulsion systems influence future component testing: latest results from Stuttgart University's altitude test facility // Proceedings of Global Power and Propulsion Society Technical Conference GPPS (Jan. 16-17 2019). GPPS-TC-2019-051. P. 1-7
2. Бабкин В. И., Солонин В. И. Современная методология создания конкурентоспособных авиационных двигателей и место науки в этом процессе // Двигатель. 2017. №1. С. 10 – 13. [V. N. Babkin, V. I. Solonin, "Modern methodology for creating competitive aircraft engines and the place of science in this process". (in Russian). Dvigatel. 2007. №1. pp. 10–13.]
3. Иноземцев А. А., Торопчин С. В., Грибков И. Н., Галлямов М. Д. Научно-исследовательские испытания газогенератора перспективного двухконтурного турбореактивного двигателя с имитацией требуемых входных термогазодинамических параметров в условиях моторостроительного предприятия / А. А. Иноземцев, С. В. Торопчин, И. Н. Грибков, М. Д. Галлямов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2021. №65. С. 28 – 37. [A. A. Inozemtsev, S. V. Toropchin, I. N. Gribkov, M. D. Gallyamov, "Research tests of the advanced bypass turbojet engine core with simulation of target input thermgasodynamic parameters in the conditions of the engine building enterprise". (in Russian). Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika. 2021. №65. pp. 28–37.]
4. Шевяков А. А. Системы управления ракетных двигателей и энергетических установок / А.А. Шевяков, В. М. Калнин, Т. С. Мартянова. М.: Машиностроение, 1985. 184 с. [A. A. Shevyakov, V. M. Kalnin, T. S. Martyanova, Control systems of rocket engines and power plants. (in Russian). M.: Mashinostroenie, 1985. 184 p.]
5. Добрянский Г. В. Динамика авиационных ГТД / Г.В. Добрянский, Т.С. Мартянова. М.: Машиностроение, 1989. 240 с. [G. V. Dobryansky, T. S. Martyanova, Dynamics of aircraft gas turbine engines. (in Russian). M.: Mashinostroenie, 1989. 240 p.]
6. Гольберг Ф. Д. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления / Ф.Д. Гольберг, А.В. Батенин. М.: Изд-во МАИ, 1999. 80 с. [F. D. Holberg, A. V. Batenin, "Mathematical models of gas turbine engines as control objects". (in Russian). M.: Izdatel'stvo MAI, 1999. 80 p.]
7. Лебсак В. А., Лыжин О. В. Математическая модель переходных процессов в компрессорных аэродинамических трубах // Ученые записки ЦАГИ. 1985. Т.16, №2. С. 33 – 40. [V. A. Lebsak, O. V. Lyzhin, "Mathematical model of transient processes in compressor wind tunnels". (in Russian). Uchenye zapiski CAGI, 1985. T.16, №2. pp. 33–40.]
8. Jansen W., Swarden M. C., Carlson A. W. Compressor sensitivity to transient and distorted transient flows // AIAA Paper. 1971. №670. P. 1-17
9. Krosel S. M., Cole G. L., Bruton W. M. and Szuch J. R. A Lumped Parameter Mathematical Model for Simulation of Subsonic Wind Tunnels // NASA TM-87324. 1987. P. 1-35
10. Кудрин Н. А., Петров В. В. Идентификация математической модели компрессорной аэродинамической трубы как объекта управления // Ученые записки ЦАГИ. 1993. Т.24, №2. С. 100 – 106. [N. A. Kudrin, V. V. Petronevich, Identification of the mathematical model of the compressor wind tunnel as a control object. (in Russian). Uchenye zapiski CAGI, 1993. T.24, №2. pp. 100–106.]
11. Вершинин И. Д., Зленко Н. А., Кукинов А. Г. Эмпирико-математическая модель компрессора аэродинамической трубы // Ученые записки ЦАГИ. 1979. Т.10, №3. С. 115 – 122. [I. D. Vershinin., N. A. Zlenko, A. G. Kukinov, "Empirical and mathematical model of a wind tunnel compressor". (in Russian). Uchenye zapiski CAGI, 1979. T.10, №3. pp. 115–122.]
12. Лянцев О. Д., Казанцев А. В., Васин А. С. Методика идентификации передаточных функций газогенератора ТРДД // Инновационная наука. 2015. №4. С. 43 – 46. [O. D. Lyantsev, A. V. Kazantsev, A. S. Vasin, "Methodology for identifying the transfer functions of a core engine of a turbofan engine". (in Russian). Innovacionnaya nauka, 2015. №4. pp. 43–46.]

13. **Asgari H., Chen X. Q., Menhaj M. B., Sainudiin R.** Artificial neural network – based system identification for a single-shaft gas turbine // *Journal of Engineering for a Gas Turbines and Power: American Society of Mechanical Engineers*. 2013. Т. 135, №9. P. 092601-7

14. **Килин Г. А., Кавалеров Б. В., Суслов А. И., Грибков И. Н., Плешивых А. С.** Перспективы нейросетевого моделирования для полунатурных испытаний систем автоматического управления сложными техническими объектами двигателестроения // *Автоматизация в промышленности*. 2021. №6. С. 13 – 16. [G. A. Kilin, B. V. Kavalerov, A. I. Suslov, I. N. Gribkov, A. S. Pleshivikh, “*Prospects for neural network modeling for semi-routine tests of automatic control systems for complex technical objects of engine building*”. (in Russian). *Avtomatizaciya v promyshlennosti*, 2021. №6. pp. 13–16.]

15. Пат. 2622588 Российская Федерация, МПК G 01 M 15/14. Стенд для испытания газогенераторов турбореактивных двухконтурных двигателей / Иноземцев А. А., Галлямов М. Д., Двинских А. В., Грибков И. Н., Полулях А. И. ; заявитель и патентообладатель акционерное общество «ОДК-Авиадвигатель». – № 2016122365 ; заявл. 06.06.2016 ; опубл. 16.06.2017, Бюл. № 17. – 7 с. [A. A. Inozemtsev, M. D. Gallyamov, A. V. Dvinsky, I. N. Gribkov, A. I. Polulyakh, “*Test bench for gas generators of turbojet dual-circuit engines*”. (in Russian). Pat. 2622588 Rossijskaya Federaciya, MPK G 01 M 15/14., Vyul. № 17. 7 p.]

16. **Грибков И. Н.** Математическое моделирование технологического процесса научно-исследовательских испытаний газогенератора двухконтурного турбореактивного двигателя в условиях моторостроительного предприятия. В кн.: Математическое моделирование. Тезисы II Международной конференции. М., 2021. С. 96 – 98. [I. N. Gribkov, “*Mathematical modeling of the technological process of research tests of the gas generator of a double-circuit turbojet engine in the conditions of a motor-building enterprise*”. (in Russian). V kn.: *Matematicheskoe modelirovanie. Tezisy II Mezhdunarodnoj konferencii*. М., 2021. pp. 96–98.]

ОБ АВТОРАХ

ГРИБКОВ Игорь Николаевич, начальник отдела расчетно-экспериментальных работ и проектирования систем автоматического управления АО «ОДК-Авиадвигатель». Иссл. в обл. разработки систем управления сложными техническими объектами.

METADATA

Title: Mathematical model of the technological process of testing the gas generator of a bypass turbojet engine.

Authors: I.N. Gribkov¹

Affiliation:

¹ JSC “UEC-Aviadvigatel”, Russia.

Email: ¹ gribkov@avid.ru

Language: Russian.

Source: *Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology)*, vol. 27, no. 2 (100), pp. 42-52, 2023. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: A mathematical model for testing a gas generator of a bypass turbojet engine, which is used to increase the level of test automation, has been formed and presented. The mathematical model describes the technological process of testing the gas generator of a bypass turbojet engine with the simulation of the required input thermogasdynamical parameters. It is shown that the results of calculations using the proposed model are in good agreement with the experimental data of the operation of a specialized test complex for testing the gas generator of a bypass turbojet engine.

Key words: gas generator testing, bypass turbojet engine, mathematical model, simulation of required thermodynamic parameters.

About authors:

GRIBKOV Igor, Head of Automatic Control Systems Design Department JSC «UEC-Aviadvigatel».