

DOI: 10.15593/2224-9982/2019.57.01

УДК 681.5.033.5

П.В. Петров, В.А. Целищев

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

Традиционный подход в исследовании управления двигателя основывается, как известно, на линеаризации моделей двигателя и системы регулирования (управления), и в основном его использование приводит к желаемым результатам. Данный подход позволяет устанавливать главные физические явления, опуская второстепенные детали. Так, линейная модель позволяет оценить основные свойства САР, такие как точность, устойчивость, управляемость и робастность. Разработаны и успешно применяются три основных метода синтеза САР: желаемых амплитудно-фазовых частотных характеристик, корневого годографа и метод пространства состояний. Однако в связи с интересом к особенностям рабочего процесса и особенно для исследования регуляторов разгона двигателя все более актуальным становится имитационное моделирование с использованием фундаментальных уравнений сохранения. Переход к подобного рода моделям обусловлен невозможностью описания с помощью линейных стационарных уравнений устройств с переменной структурой или работы систем при больших сигналах управления. Рассматриваются вопросы, связанные с проблемами численного моделирования динамических процессов, протекающих в гидромеханических системах регулирования авиационного двигателя, в нелинейной постановке. Приводятся математические модели астатического регулятора в нелинейной постановке и комплексная модель ГТД и его САУ. Отмечается, что для полного представления о процессах, протекающих в сложных устройствах гидроавтоматики, а также для правомерного рационального выбора предварительных конструктивных параметров необходима основательная доработка существующих моделей гидромеханических устройств, представленных в линейной постановке.

Ключевые слова: авиационный двигатель, диагностическое моделирование, нелинейные явления, устройства гидроавтоматики, математические модели, численное исследование, вычислительный эксперимент.

P.V. Petrov, V.A. Tselischev

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

NUMERICAL STUDY OF SAR CCD FOR STEADY-STATE AND TRANSIENT MODES

The traditional approach in the study of engine control is based, as is known, on the linearization of the engine models and the control system (control) and, basically, this leads to the desired results. This approach allows to establish the main physical phenomena, omitting minor details. Thus, the linear model allows to estimate the basic properties of ATS, such as accuracy, stability, controllability and robustness. Three main methods of ATS synthesis have been developed and successfully applied: the desired amplitude-phase frequency characteristics, the root locus and the state space method. However, due to the interest in the features of the workflow and, especially, for the study of engine acceleration regulators, simulation modeling using the fundamental conservation equations becomes more and more relevant. The transition to models of this kind is caused by the impossibility of describing devices with variable structure or the operation of systems with large control signals using linear stationary equations. The article deals with the issues related to the problems of numerical simulation of dynamic processes occurring in the hydromechanical control systems of the aircraft engine, in a nonlinear formulation. Mathematical models of an astatic controller in a nonlinear formulation and a complex model of a gas turbine engine and its automatic control system are given. It is noted that for a complete understanding of the processes occurring in complex hydraulics automatic devices, as well as for a legitimate rational selection of preliminary design parameters, a thorough refinement of the existing models of hydromechanical devices presented in a linear formulation is necessary.

Keywords: aircraft engine, diagnostic modeling, nonlinear phenomena, hydraulic automation devices, mathematical models, numerical research, numerical experiment.

Введение

Для подробного конструктивного анализа и параметрического синтеза любой гидромеханической системы в первую очередь необходимо располагать ее математической моделью. При моделировании устройств автоматики ГТД общепринято разбивать систему на элементы, в этом случае уравнения динамики системы записываются для каждого звена в отдельности.

При рассмотрении систем с сосредоточенными параметрами описывать систему следует с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений. В данном случае появляется возможность описывать гидродинамические процессы в изучаемом объекте на основе физических законов, которые в целом и определяют эти процессы. Как правило, за основу берут фундаментальные законы сохранения. Для устройств гидроавтоматики такими являются уравнения баланса расходов жидкости через дроссельные каналы и уравнения движений для подвижных элементов.

Математические модели гидромеханических устройств автоматики широко представлены в многочисленных изданиях [1, 2]. В целом основа, или структура основных моделей гидромеханических устройств давно известна и описана многочисленными авторами [1]. Формирование таких моделей в основном происходило в эпоху, когда вычислительная техника в значительной степени отставала по своему развитию, что в целом и обуславливало использование на практике линейных аналитических методов. Именно этот фактор и стал причиной отсутствия у разработчика поэлементных динамических моделей в нелинейной постановке.

Таким образом, для полного представления о процессах, протекающих в сложных устройствах гидроавтоматики, а также для правомерного рационального выбора предварительных конструктивных параметров необходима основательная доработка существующих моделей гидромеханических устройств, представленных в линейной постановке.

В связи с интересом к особенностям рабочего процесса и особенно для исследования регуляторов разгона двигателя все более актуальным становится имитационное моделирование с использованием фундаментальных уравнений сохранения.

Обращение к имитационным моделям обусловлено невозможностью описания с помощью линейных стационарных уравнений устройств с переменной структурой или работы систем при больших сигналах управления. В целом интерес к имитационным моделям всегда имел место, но сдерживался уровнем развития ЭВМ. Кроме того, в качестве недостатка в работе [1] отмечается значительное время расчета процессов по таким моделям, которое существенно больше времени реально протекающих процессов.

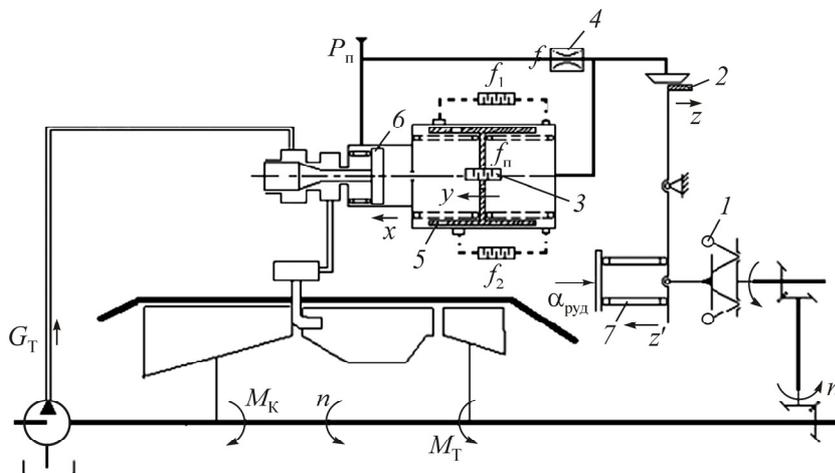


Рис. 1. Принципиальная схема изохромного регулятора ГТД: 1 – центробежный датчик частоты вращения; 2 – маятниковый распределительный элемент; 3 – дроссельный пакет; 4 – входной дроссель; 5 – статический поршень; 6 – астатический поршень; 7 – задающее устройство

Например, всережимный регулятор, представленный на рис. 1, является характерным примером регулятора с переменной структурой, выполняющий функции как изодромного регулятора статических установившихся режимов, так и функции автомата разгона переходных процессов [3]. Задача, которая ставится в данной работе, заключается в следующем: сделать полный конструктивный анализ работы данного типа регулятора совместно с работой ГТД. Рассматривается самая простая схема – одновальный и одноконтурный ТРД с астатическим регулятором (см. рис. 1).

Этот регулятор состоит из центробежного датчика частоты вращения 1, маятникового распределительного элемента 2, выполненного в виде сопло-заслонка, статического 5 и астатического 6 поршней, дроссельного пакета 3, входного дросселя 4 и задающего устройства 7. У поршня 6 также имеется пружина, однако она имеет пренебрежимо малую жесткость, подбираемую из условия герметичности в нерабочем состоянии.

Анализ работы САР на установившихся и переходных режимах

При математическом описании системы регулирования (см. рис. 1) был принят ряд стандартных допущений [1]. В результате динамическая модель САР включает в себя следующее: уравнения баланса расходов через статический поршень, уравнение движения для статического поршня и уравнение двигателя [1].

Движение статического поршня массой m , согласно второму закону Ньютона, будет описываться с помощью уравнения

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_u p - F_u p_0 - k_v \frac{dy}{dt} - c_{\Sigma} y - F_{тр}, \quad (1)$$

где y – перемещение статического поршня; F_u – площадь поршня; k_v – приведенный коэффициент вязкого трения; $F_{тр}$ – сила сухого трения; p_0, p – соответственно давление слева и справа поршня изодрома; c_{Σ} – суммарная жесткость пружин; m – приведенная масса подвижной части поршня изодрома.

Объемный расход жидкости через дроссель (для правой полости) записывается в виде

$$\mu f \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_n - p)} = \mu b z_{щ} \sqrt{\frac{2}{\rho} p} + \mu f_{II} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p - p_0)} + F_u \frac{dy}{dt} + \frac{V_0 + F_u y}{E} \frac{dp}{dt}, \quad (2)$$

где f и f_{II} – соответственно площади входного и изодромного дроссельных пакетов; μ – коэффициент расхода; b – ширина щели распределителя (щель считается прямоугольной); ρ – плотность рабочей жидкости; V_0 – начальный объем; E – модуль объемной упругости жидкости.

Уравнение баланса расхода через основной дроссельный пакет

$$\mu f_{II} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p - p_0)} + F_u \frac{dy}{dt} = F_{ди} \frac{dx}{dt}, \quad (3)$$

где $F_{ди}$ – площадь астатического поршня дозирующей иглы; x – перемещение дозирующей иглы.

Уравнение чувствительного элемента представляется в виде

$$k_{тр} n^2 = c (z'_н + z'), \quad (4)$$

где $k_{тр}$ – коэффициент грузиков; n – частота вращения двигателя; c – жесткость пружины чувствительного элемента; $z'_н$ – начальная затяжка пружины.

Уравнение двигателя представляется в линейном виде и является замыкающим уравнением системы:

$$T_{дв} \frac{dn}{dt} + \Delta n = k_{дв} (\Delta G_T + \Delta f_B), \quad (5)$$

где $T_{дв}$ и $k_{дв}$ – соответственно постоянная времени и коэффициент усиления двигателя; Δl – приращение оборотов; G_T – подача топлива, $G_T = k_{ди}x$, где x – перемещение астатического поршня и дозирующей иглы; Δf_b – внешнее воздействие, выраженное в долях расхода топлива.

Для более полного описания динамической модели САР необходимо дополнить ее статическими соотношениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho}} (p_n - p_0) = \mu b z_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}} p_0; \\ k_{чз} n_0^2 = c (z'_н + z'_0); \\ z = \frac{l_2}{l_1} z', \end{array} \right. \quad (6)$$

где l_1 и l_2 – длина плеч рычага маятникового гидрораспределителя; $k_{чз}$ – коэффициент чувствительного элемента, $k_{чз} = \frac{k_{гп} n_0^2}{c}$.

Далее предполагается, что в исходном равновесном состоянии $f = b z_0$ и, следовательно, $p_0 = \frac{p_n}{2}$.

Проблема моделирования двигателя на нестационарных режимах работы (разгон, торможение и др.) подробно рассмотрена в работах [4, с. 153–160; 5–7].

Динамическая модель САР для процесса разгона, в отличие от модели установившегося режима, представлена как система уравнений в натуральной форме Коши:

$$\left\{ \begin{array}{l} m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = F \Delta p - c_2 Y_0(y) - k_v Y_1(y) \cdot \frac{dy}{dt} - F_c; \\ E \cdot \left(\begin{array}{l} \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho}} (p_0 f_{01}^2 - \Delta p) - \mu b Z(z) \sqrt{\frac{2}{\rho}} (p_0 + \Delta p) - F_u Y_1(y) \frac{dy}{dt} - \\ - \mu f_{п1} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \Delta p - \mu F_1(y) \sqrt{\frac{2}{\rho}} \Delta p \end{array} \right); \\ \frac{dp}{dt} = \frac{V_{\Sigma} + F_u \Delta y}{V_{\Sigma} + F_u \Delta y}; \\ \frac{dx}{dt} = \frac{1}{F_d} \cdot \left(\mu f_{п1} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \Delta p + \mu F_1(y) \sqrt{\frac{2}{\rho}} \Delta p \right); \\ \frac{dn}{dt} = \frac{1}{T_{дв}} \cdot (k_{дв} k_{ди} \Delta x - \Delta n); \end{array} \right. \quad (7)$$

где $Y_0(y) = \text{if}(y < y_m, y, y_m)$ – условие, которое ограничивает перемещение изодромного поршня; $Y_1(y) = \text{if}(y < y_m, 1, 0)$ – условие, которое ограничивает скорость перемещения изодромного поршня; $Z(z) = \text{if}((z_0 - \Delta z_0 + \Delta z) > 0, (z_0 - \Delta z_0 + \Delta z), 0)$ – условие, которое не позволяет принимать отрицательные значения величины ширины щелей маятникового распределителя; $F_1(y) = \text{if}(y < y_m N, 0, f_1)$ – условие, которое используется для введения в работу дросселя f_1 .

Целью дальнейшего анализа динамики является получение информации, необходимой для обоснованного динамического синтеза параметров регулятора [8]. Полученные системы уравнений (1–6) имеют 5-й порядок и включают в себя более трех десятков параметров, значения которых варьируются в диапазоне от 10^{-7} до 10^8 . В таких случаях для точного решения системы уравнений методом Рунге – Кутты 4-го порядка требуется примерно от 10 до 60 тыс. рас-

четных шагов. Для уменьшения времени и повышения точности расчета в выражениях первых производных были сделаны некоторые преобразования. Так, к примеру, умножение модуля упругости жидкости на площади отверстий приводит к значениям, близким к единице, что значительно ускоряет процесс расчета и делает его более точным. Полученные в результате решения систем уравнений (1–6) и (7) переходные процессы показаны на рис. 2.

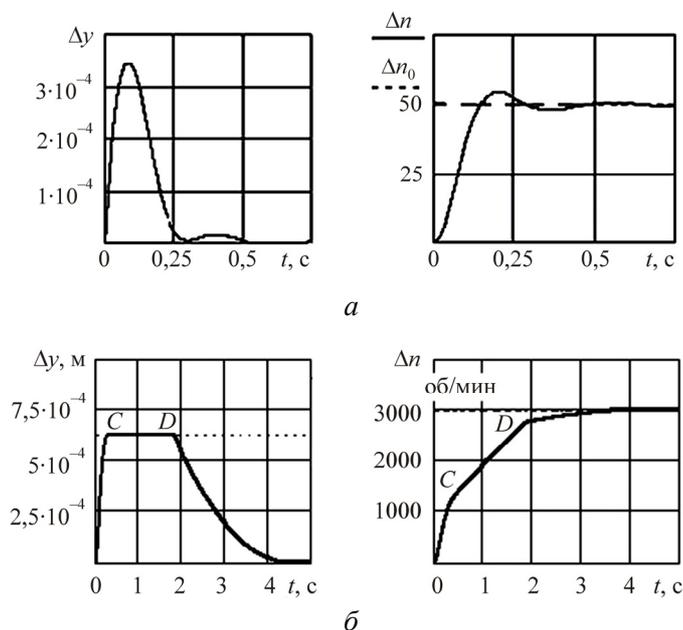


Рис. 2. Типовые переходные процессы изохронной САР: *а* – работа регулятора на статическом режиме работы ГТД; *б* – работа регулятора на переходном (разгон) режиме работы ГТД

Обычные методы оценки качества переходного процесса в случае такой существенно нелинейной системы не годятся. Ввиду этого качественная оценка выполняется по положению характерных точек переходного процесса.

Таким образом, желаемый вид переходного процесса по частоте вращения можно условно разбить на два поддиапазона: *OC* – быстрый набор частоты вращения и *CD* – сравнительно медленный переход к заданному значению частоты вращения. Здесь *C* – точка переключения, а *D* – точка достижения 97 % от желаемого значения частоты вращения. Обе точки определяются по переходному процессу визуально с допустимой точностью 2–5 %, причем участок *OC* практически полностью определяется параметрами статической части регулятора, а *CD* – его астатической частью.

Построение комплексной математической модели ГТД и его системы управления

Общеизвестно, что авиационный газотурбинный двигатель и САР являются наиболее сложной технической системой. Основными отличительными особенностями ГТД являются: большое разнообразие типов, сравнительно большая расходонапряженность, многорежимность и широкий диапазон изменения внешних условий. Многие физические явления остаются непонятными и не имеют даже физического толкования, не говоря уже о математическом описании. Составление полной всеобъемлющей модели в этих условиях не представляется возможным, поэтому на практике большое распространение получили частные модели, характеризующиеся теми или иными допущениями и относящиеся к данному этапу проектирования.

Несмотря на то, что поэлементная модель является наиболее адекватной и наилучшим образом подходит для разработки системы управления, до последнего времени наибольшим распространением пользовались упрощенные модели, в основном линейные.

Такой традиционный подход в исследовании управления двигателя основывается, как известно, на линеаризации моделей двигателя и системы регулирования (управления), и в основном его использование приводит к желаемым результатам. Данный подход позволяет устанавливать главные физические явления, опуская второстепенные детали. Так, линейная модель позволяет оценить основные свойства САР: точность, устойчивость, управляемость и робастность. Разработаны и успешно применяются три основных метода синтеза САР: желаемых амплитудно-фазовых частотных характеристик, корневого годографа и метод пространства состояний.

Но, как известно, устройства гидроавтоматики, к которым можно отнести и различные регуляторы разгона двигателя, включают в себя не только естественные, но и специально введенные с целью повышения эффективности или упрощения структуры нелинейности. И уже на стадии имитационного моделирования необходимо учитывать такие особенности систем при их расчете. Кроме того, не все физические процессы, которые происходят в ГТД подробно изучены. Применение аналитических методов на данном этапе становится недостаточным. Поскольку линейное описание таких систем становится невозможным, приходится оставлять модели в их естественном виде, чаще всего в виде уравнений сохранения, которые, как правило, решаются только численными методами [9].

При численном моделировании ГТД помимо общепринятых уравнений баланса мощностей, расходов и энергии следовало бы рассмотреть такие факторы, как неравномерный и неполный прогрев элементов конструкции, нестационарные процессы горения и т.п. [1, 10–12]. Кроме того, более подробно следовало бы описать компрессор и камеру сгорания. В осевом компрессоре первые и последние ступени на нерасчетных режимах ведут себя противоположно; камера сгорания является узлом прямых и обратных связей. С другой стороны, модель может и должна быть упрощена, так как она в данном случае второстепенна и предназначена для исследования системы регулирования.

В качестве компромиссного варианта была принята так называемая поэлементная динамическая модель, в основу которой положены уравнения неразрывности (равенство расходов через контрольные сечения компрессора, турбины и реактивного сопла), баланса мощностей, энергии в камере сгорания [3, 13, 14]. Для описания процессов при совместной работе ГТД и его системы регулирования была составлена обобщенная равносложная математическая модель, т.е. к системе уравнений (1)–(6) добавились уравнения, описывающие процессы в ГТД: уравнения динамического баланса мощностей на турбине и компрессоре; баланс расходов через компрессор и сопловой аппарат турбины; динамический баланс расходов через сопловой аппарат турбины и критическое сечение реактивного сопла; уравнение нестационарного подвода тепла в случае приращения расхода топлива ΔG_{T0} .

Расчет систем (7), (8) проводился для разных значений задающего воздействия (0–10 % от номинального режима) и нулевых начальных условий. В результате были получены динамические характеристики ГТД. На основе вычислительного эксперимента проводился численный анализ влияния основных конструктивных параметров на качество работы системы для задающих и возмущающих воздействий [15]. Ниже представлены графики, на каждом из которых показано изменение частоты вращения вала двигателя и перемещение статического поршня (причем для исходного значения параметра графики выполнены сплошной линией (синий цвет), параметр в два раза больше исходного – пунктирной линией (красным цветом), параметр в два раза меньше исходного – штрихпунктирной линией (зеленым цветом)). На рис. 3 представлены предварительные результаты расчета по комплексной модели в размерном виде с примером параметрического анализа, в частности влияния площади изодрома F_u и площади F_d на изменение частоты вращения ротора двигателя.

$$\left. \begin{aligned}
 m \frac{d^2 y}{dt^2} &= F_u \Delta p - k_v \frac{dy}{dt} - c_{\Sigma} \Delta y - F_{тр}; \\
 \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_0 - \Delta p)} &= \left(\begin{aligned}
 &\mu b \Delta z_{ш} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_0 + \Delta p)} + \mu f_{II} \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} + \\
 &+ F_u \frac{dy}{dt} + \frac{V_0 + F_u \Delta y}{E} \frac{dp}{dt}
 \end{aligned} \right); \\
 f_{II} \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} + F_u \frac{dy}{dt} &= F_{ду} \frac{dx}{dt}; \\
 \Delta z &= \frac{l_2}{l_1} k_{чз} \Delta n; \\
 J \omega \frac{d\omega}{dt} &= \left(\begin{aligned}
 &\frac{G_{\Gamma} R_{\Gamma} T_{\Gamma}^*}{\chi_{\Gamma}} \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_{\Gamma}^*} \right)^{\chi_{\Gamma}} \right] \eta_{\Gamma}^* \eta_m - \\
 &\frac{G_{\text{вх}} T_{\text{вх}}^* R}{\chi} \left[\pi_k^{\chi} - 1 \right] \frac{1}{\eta_k^*}
 \end{aligned} \right); \\
 \frac{V_k}{RT_k} \frac{dP_k^*}{dt} &= G_{\text{в}} - m_{\text{крг}} \frac{P_{\Gamma}^* q(\lambda_{\text{ca}}) F_{\text{ca}}}{\sqrt{T_{\Gamma}}}; \\
 \frac{V_{\text{Тс}}}{R_{\Gamma} T_{\Gamma}^*} \frac{dP_{\Gamma}^*}{dt} &= m_{\text{крг}} \frac{P_{\Gamma}^* q(\lambda_{\text{ca}}) F_{\text{ca}}}{\sqrt{T_{\Gamma}^*}} - m_{\text{крг}} \frac{P_{\Gamma}^* q(\lambda_{\text{кр}}) F_{\text{кр}}}{\sqrt{T_{\Gamma}^*}}; \\
 C_{\text{рэф}} \frac{V_{\text{кс}} P_{\Gamma}^*}{RT_{\Gamma}^*} \frac{dT_{\Gamma}^*}{dt} &= C_{\text{рэф}} G_{\text{в}} T_k^* + (G_{\text{то}} \pm \Delta G_{\Gamma}) H_u \eta_{\text{кс}}^* - C_{\text{рэф}} G_{\Gamma} T_{\Gamma}^*,
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где ω – угловая скорость вращения турбины; J – момент инерции турбины; G_{Γ} – расход воздуха на выходе из компрессора; $T_{\text{вх}}^*$ – температура газа на входе; T_{Γ}^* – температура газа перед турбиной; P_{Γ}^* – давление газа перед турбиной; χ_{Γ} – степень сухости газа; π_{Γ}^* – степень понижения давления в турбине; π_k^* – степень повышения давления в компрессоре; η_{Γ}^* – КПД турбины по параметрам заторможенного потока; η_m – КПД за турбиной; R – газовая постоянная; η_k^* – КПД компрессора по параметрам заторможенного потока; V_k – объем за компрессором; T_k – температура газа за компрессором; P_k^* – давление торможения на выходе из компрессора; $q(\lambda_{\text{ca}})$ – производительность соплового аппарата; F_{ca} – геометрическая площадь соплового аппарата; $V_{\text{Тс}}$ – объем между турбиной и реактивным соплом; P_{Γ}^* – давление торможения на выходе из турбины; T_{Γ}^* – температура газа за турбиной; $F_{\text{кр}}$ – геометрическая площадь критического сечения реактивного сопла; $q(\lambda_{\text{кр}})$ – производительность критического сечения реактивного сопла; $C_{\text{рэф}}$ – теплоемкость газа при нестационарном подводе тепла; $V_{\text{кс}}$ – объем между входным соплом и турбиной; H_u – удельная теплота сгорания; $G_{\text{в}}$ – массовый расход воздуха на входе в компрессор; $G_{\text{то}}$ – расход топлива.

На рис. 3 представлены графики, на каждом из которых показано изменение частоты вращения и перемещение статического поршня (исходное значение параметра на графике – линия 1, параметр в два раза больше исходного – линия 2, параметр в два раза меньше исходного – линия 3).

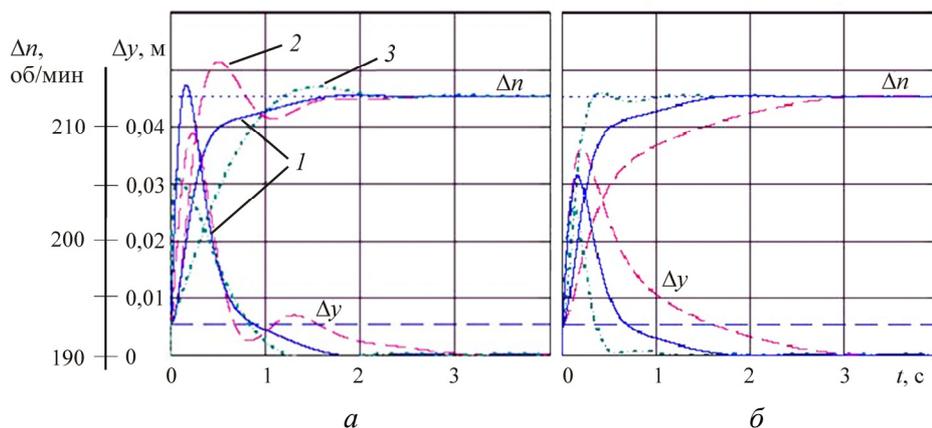


Рис. 3. Влияние площади изохрома F_u (а) ($F_u = 0,5 \dots 2$) и площади F_d (б) ($F_d = 0,5 \dots 2$) на изменение частоты вращения ротора двигателя: 1 – исходное значение параметра; 2 – параметр в два раза больше исходного; 3 – параметр в два раза меньше исходного

Ситуация, когда статический поршень встает на упор, возникает при больших значениях одного из коэффициентов усиления регулятора и одновременно малом значении площади изохрома F_u .

Заключение

В работе была реализована поэлементная равносложная математическая модель ГТД и его системы управления. Полученные результаты по разработанным нелинейным многопараметрическим моделям конструктивно сложных САУ ГТД позволят исключить при разработке и проектировании сложных комбинированных систем метод проб и ошибок, что значительно повлияет на увеличение качества синтезируемых новых конструктивных исполнений и снижение трудовых и финансовых затрат на их изготовление.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00394.

Библиографический список

1. Петров П.В., Целищев В.А. Основы алгоритмического моделирования нелинейных гидромеханических устройств: учеб. пособие / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2012. – 137 с.
2. Методика представления и использования многомерной характеристики винтовентилятора при автоматизированном проектировании ГТД и его САУ / И.А. Кривошеев, Г.И. Погорелов, В.С. Фатиков, А.Г. Годованюк // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т. 13, № 1(34). – С. 3–8.
3. Коева А.А., Петров П.В., Целищев В.А. Концепция исследований устройств гидроавтоматики сложных энергетических систем // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16, № 5(50). – С. 103–108.
4. Гуревич О.С. Системы автоматического управления авиационными ГТД: энцикл. справ. / под ред. О.С. Гуревича. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. – 208 с.
5. Ахмедзянов Д.А., Кривошеев И.А., Сунарчин Р.А. Совместная работа авиационных газотурбинных двигателей и топливной автоматики на режимах разгона и торможения // Вестник СГАУ. – 2006. – № 1. – С. 24–25.
6. Ахмедзянов Д.А., Власова Е.С., Кишалов А.Е. Методология имитационного моделирования неустановившихся режимов работы авиационных ГТД // Вестник СГАУ. – 2006. – № 2(10). – С. 41–44.
7. Ахмедзянов Д.А. Неустановившиеся режимы работы авиационных ГТД // Вестник УГАТУ. – 2006. – Т. 7, № 1(14). – С. 36–46.
8. Петров П.В., Целищев В.А., Коева А.А. Методические основы исследования систем автоматического регулирования авиационного двигателя // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16, № 8 (53). – С. 7–14.

9. Мусина Л.С., Петров П.В. Численное исследование нелинейных гидросистем // XIII Королевские чтения: сб. тр. междунар. молодеж. науч. конф. / Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Самара, 2015. – С. 269–270.
10. Кишалов А.Е., Власова Е.С. Параметрическая идентификация математической модели ГТД в системе DVIGwp // Мавлютовские чтения: материалы всерос. науч. конф. / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2007. – Т. 1. – С. 56–57.
11. Кишалов А.Е., Ключев Н.А. Моделирование и анализ характеристик ТРДДФсм для самолетов V поколения в системе DVIGw // Мавлютовские чтения: материалы X Всерос. молодеж. науч. конф. / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2016. – С. 199–203.
12. Михайлова А.Б. Методики и компьютеризированная технология двухуровневого газодинамического моделирования компрессоров авиационных ГТД: дис. ... канд. техн. наук / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2011. – 242 с.
13. Кривошеев И.А., Ахмедзянов Д.А., Кишалов А.Е. Имитационное моделирование работы авиационных ГТД с элементами систем управления // Вестник УГАТУ. Машиностроение. – 2008. – № 2(29). – С. 3–11.
14. Ахмедзянов Д.А., Кишалов А.Е. Моделирование переходных процессов, протекающих при отладке автоматики при испытаниях ТРДДФ // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 7, № 8. – С. 152–158.
15. Обзор и анализ параметров потока в основных узлах авиационных двигателей / Д.А. Ахмедзянов, А.Е. Кишалов, Ю.А. Шабельник, К.В. Маркина, Н.И. Полежаев // Молодежный Вестник УГАТУ. – 2012. – № 4(5) – С. 25–36.

References

1. P.V. Petrov, V.A. Tselishev, Bases of nonlinear hydrome-chanical devices algorithmic modeling, (in Russian). Ufa: Ufa state aviation technical university, 2012.
2. I.A. Krivosheev, G.I. Pogorelov, V.S. Phatikov, A.G. Godovanyuk, «Methodology of presentation and use of multi-dimensional characteristics propfan with aided design GTE and ACS», (in Russian), in Vestnik UGATU, vol. 13, no. 1(34), pp. 3-8, 2009.
3. A.A. Koeva, P.V. Petrov, V.A. Tselishev, “Concept of compound energy systems hydroautomatic devices researches,” (in Russian), in Vestnik UGATU, vol. 16, no. 5 (50), pp. 103-108, 2012.
4. O.S. Gurevich, Automatic control systems for aircraft GTE: Encyclopedic Reference, (in Russian). Moscow: TORUS PRESS, 2011. pp. 153-160.
5. D.A. Akhmedzyanov, I.A. Krivosheev, R.A. Sunarchin, «The joint work aviation gas turbine engines and fuel system at the acceleration and deceleration modes», (in Russian), in Vestnik SGAU, no. 1, pp. 24-25, 2006.
6. D.A. Akhmedzyanov, E.S. Vlasova, A.E. Kishalov, «Methodology of modeling unsteady works modes of aircraft gas turbine engines», (in Russian), in Vestnik SGAU, no. 2(10), pp. 41-44, 2006.
7. D.A. Akhmedzyanov, «Unsteady works modes aircraft GTE», (in Russian), in Vestnik UGATU, vol. 7, no. 1(14), pp. 36-46, 2006.
8. P.V. Petrov, V.A. Tselishev, A.A. Koeva. “Methodical bases of aviation engine automatic control systems research,” (in Russian), in Vestnik UGATU, vol. 16, no. 8(53), pp. 7-14, 2012.
9. Musina L.S., Petrov P.V. Numerical study of nonlinear hydraulic systems // in the collection: XIII Royal readings. International youth scientific conference, proceedings. Samara state aerospace University named after academician S.P. Korolev (national research University). 2015. P. 269-270.
10. Kishalov A.E., Vlasova E.S. Parametricheskaja identifikacija matematicheskoy modeli GTD v sisteme DVIGwp [Parametric identification of the mathematical model of gas turbine engine system in DVIGwp] // All-Russian NTK «Mavlyutovskie readings». – Ufa: USATU, 2007. T. 1. pp. 56-57
11. Kishalov A.E., Klyuchev N.A. Modelirovanie i analiz harakteristik TRDDFsm dlja samoljotov V pokolenija v sisteme DVIGw [Simulation and analysis performance for afterburning turbofan engine airplanes V generation system DVIGw] // Mavlyutovskie readings: Materials of All-Russian Youth Scientific Conference «Mavlyutovskie readings». Ufa: USATU, 2016. pp. 199-203.
12. A.B. Mikhailova, Methods and computer-aided technology for gas turbine engines compressor two-level gas dynamic simulation: candidate of science thesis. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2011.

13. Krivosheev I.A., Akhmedzyanov D.A., Kishalov A.E. Imitacionnoe modelirovanie raboty aviacionnyh GTD s jelementami sistem upravlenija [Imitation modeling of gas turbine engines with controls systems] // Vestnik UGATU. – Ufa: USATU, 2008. No. 2(29). pp. 3-11.

14. Akhmedzyanov D.A., Kishalov A.E. Modelirovanie perehodnyh processov, protekajushhih pri ot-ladke avtomatiki pri ispytaniyah TRDDF [Modelling of transients occurring when you debug automation at afterburning turbofan engine test] / The Bulletin of VSTU. Voronezh, 2011. vol. 7(8). pp. 152-158

15. Akhmedzyanov D.A., Kishalov A.E., Shabelnik J.A., Markina K.V., Polezhaev N.I. Obzor i analiz parametrov potoka v osnovnyh uzlah aviacionnyh dvigatelej [Review and analysis of flow parameters in the main nodes aviation engines] // Youth herald USATU – Ufa: USATU, 2012. No. 4(5). pp. 25-36.

Об авторах

Петров Павел Валерьевич (Уфа, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная гидромеханика» ФГБОУ ВО УГАТУ (450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: pgl.petrov@mail.ru).

Целищев Владимир Александрович (Уфа, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная гидромеханика» ФГБОУ ВО УГАТУ (450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: pgl.ugatu@mail.ru).

About the authors

Pavel V. Petrov (Ufa, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor of Applied Hydromechanics Department, Ufa State Aviation Technical University (12, K. Marksa st., Ufa, 450008, Russian Federation, e-mail: pgl.petrov@mail.ru).

Vladimir A. Tselischev (Ufa, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Applied Hydromechanics Department, Ufa State Aviation Technical University (12, K. Marksa st., Ufa, 450008, Russian Federation, e-mail: pgl.ugatu@mail.ru).

Получено 26.03.2019