

А. А. Коева, П. В. Петров

## КОНЦЕПЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ УСТРОЙСТВ ГИДРОАВТОМАТИКИ СЛОЖНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассматриваются вопросы моделирования и исследования устройств гидроавтоматики (систем автоматического регулирования) с целью их предконструкторского синтеза. Обсуждаются вопросы влияния различных параметров на частоту вращения двигателя как объекта регулирования. Приводятся математические модели систем автоматического регулирования в размерном и безразмерном видах. *Математическое моделирование; численный эксперимент; система автоматического регулирования; обобщенная математическая модель; критерии подобия*

Процесс разработки систем автоматического регулирования (САР) состоит из нескольких этапов. Первый этап заключается в решении задач синтеза всей системы, т. е. совокупности объектов регулирования, регуляторов и вспомогательных устройств, причем исходными данными этого этапа являются технические требования к системе при различных видах движения. Второй этап состоит в предварительном выборе и расчете параметров отдельных устройств системы, в том числе и регуляторов, а исходными данными для этого этапа являются результаты предыдущих расчетов. Далее на следующих этапах осуществляется выбор остальных параметров, опытно-конструкторская проработка, компоновка и рабочее проектирование [1].

Естественно, всякий раз используются различные модели, отличающиеся допущениями, содержанием и уровнем сложности. Вначале используются простейшие стационарные и линейные динамические модели; затем используются разнообразные динамические модели, причем начинают с самых простых и по мере необходимости усложняют, последовательно отменяя ранее принятые допущения. Для углубленного детального изучения процессов и проверки работоспособности на различных режимах и при наличии внешних возмущений составляется и исследуется имитационная модель.

### 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Разработка современных гидромеханических систем автоматического регулирования с целью повышения энергоэффективности дви-

гателя сопровождается устойчивой тенденцией последних лет к сокращению финансирования. Основную долю затрат при создании гидромеханических систем автоматического регулирования составляют затраты на отработку таких систем в составе двигательной установки. С целью сокращения времени и средств на разработку энергоэффективной системы регулирования проектировщик все чаще приходит к мысли о необходимости частичной замены экспериментальной отработки математическим моделированием (или виртуальным экспериментом). В связи с этим задачей первоочередной важности становится все более широкое внедрение и совершенствование методов проведения автоматизированного вычислительного эксперимента на основе математического описания рабочих процессов в системах автоматического регулирования двигателя. Изложенное позволяет считать основной целью работ в рассматриваемой области создание виртуального автоматизированного вычислительного стенда, разработанного на основе взаимного взаимодействия математических моделей, алгоритмов и программ расчета. Только в этом случае появится возможность реализовать идею замены огневых стендовых испытаний автоматизированным вычислительным экспериментом на ЭВМ, что позволит в минимальные сроки и при ограниченно малых финансовых вложениях реализовать новые системы регулирования двигателей с улучшенными показателями качества работы. Надежность работы системы регулирования двигателя и ее качество будет в целом определять и степень энергоэффективности двигателя летательного аппарата [2].

Контактная информация: kerargirit@rambler.ru

Работа выполнена в ходе проведения НИР в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объектом исследования в данной работе является САР частоты вращения, где объектом регулирования является реактивный двигатель, с которым регулятор образует замкнутый контур регулирования.

Для правильного и эффективного функционирования системы управления летательным аппаратом необходимо осуществлять оптимальный выбор наиболее эффективных параметров САР [3]. Поэтому на предварительном этапе проектирования возникает необходимость математического моделирования, поскольку в этом случае появляется возможность предварительно оценить работу всей системы, ее поведение, а также влияние ее характеристик на эффективность работы всей системы в целом на различных эксплуатационных режимах.

Таким образом, изначально необходимо разработать математическую модель системы регулирования, которая позволит исследовать динамику системы, а соответственно, заранее отследить влияние основных факторов на изменение ее параметров во времени. Исходя из этого, разрабатывается нелинейная математическая модель.

## 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Принципиальная схема объекта исследования приведена на рис. 1. Основными элементами регулятора являются чувствительный элемент (центробежный датчик частоты вращения), преобразующий частоту вращения двигателя  $n_{дв}$  в перемещение  $y$ , рычаг, преобразующий это перемещение в перемещение  $x$  (и соответствующее изменение ширины щели плоского клапана типа сопло-заслонка), гидроусилитель, преобразующий изменение щели клапана в пропорциональное изменение положения поршня  $z$ , дозирующая игла, преобразующая перемещение  $z$  в изменение расхода  $G_T$  топлива.

При действии внешних возмущений  $f_b(t)$  на двигатель ( $p_n^*(t)$ ,  $T_n^*$  и нагрузка со стороны летательного аппарата) регулируемая величина  $n(t)$  отклоняется от заданной  $n_0$  так, что появляется рассогласование  $n_{\Sigma}(t) = n_0 - n(t)$ . Задача регулятора в этом случае заключается в скорейшем возвращении регулируемой величины к исходному значению. В действительности регулирование всегда осуществляется за конечное время и неточно (статическая или динамическая погрешность регулирования); более того, система может вообще потерять устойчивость, т. е. в ней могут появиться незатухающие колебания.

При изменении положения ручки управления двигателя к регулятору прикладывается управляющее воздействие  $f_{упр}$  (в данном случае  $n_{01}$ ); регулятор должен перевести двигатель на новый режим, причем это должно произойти как можно быстрее с минимальной статической и динамической погрешностью.

Так как приоритетным требованием является обеспечение требуемых статической и динамической ошибок при заданных внешних воздействиях, необходимо определить характеристики точности, устойчивости и управляемости. Для этого требуется провести исследование динамики системы при действии различных входных воздействий, а значит, предварительно промоделировать систему, используя математическую модель, состоящую:

- из уравнения динамического равновесия мощностей на турбине и компрессоре:

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = \frac{G_T R_T T_T^*}{\chi_T} \left[ 1 - \left( \frac{1}{\pi_T^*} \right)^{\chi_T} \right] \eta_T^* \eta_m - \frac{G_B T_{вх}^* R}{\chi} [\pi_k^{\chi} - 1] \frac{1}{\eta_k^*},$$

где  $J$  – момент инерции турбины;  $\omega$  – угловая скорость вращения турбины;  $G_T$  – расход воздуха на выходе из компрессора;  $T_T^*$  – температура газа перед турбиной;  $\chi_T$  – степень сухости газа;  $\pi_T^*$  – степень понижения давления в турбине;  $\eta_T^*$  – КПД турбины по параметрам заторможенного потока;  $\eta_T$  – КПД за турбиной;  $G_B$  – расход воздуха на входе в компрессор;  $T_{вх}^*$  – температура на входе в двигатель;  $R$  – газовая постоянная;  $\eta_k^*$  – КПД компрессора по параметрам заторможенного потока;

- уравнения динамического баланса расходов через компрессор и сопловой аппарат турбины (при пренебрежении потерями полного давления в сопловом аппарате до его горла):

$$R \frac{V_k}{T_k} \cdot \frac{dp_k^*}{dt} = G_B - m_{кр} \frac{p_k^* \cdot q(\lambda_{ca}) F_{ca}}{\sqrt{T_T^*}},$$

где  $V_k$  – объем за компрессором;  $T_k$  – температура газа за компрессором;  $p_k^*$  – давление торможения на выходе из компрессора;  $q(\lambda_{ca})$  – производительность соплового аппарата;  $F_{ca}$  – геометрическая площадь соплового аппарата;

- уравнения динамического баланса расходов через сопловой аппарат турбины и критическое сечение реактивного сопла:

$$\frac{V_{Tc}}{R_T T_T^*} \frac{dp_T^*}{dt} = m_{кр} \frac{p_r^* q(\lambda_{ca}) F_{ca}}{\sqrt{T_r^*}} - m_{кр} \frac{p_T^* \cdot q(\lambda_{кр}) F_{кр}}{\sqrt{T_T^*}},$$

где  $V_{Tc}$  – объем между турбиной и реактивным соплом;  $p_T^*$  – давление торможения на выходе из турбины;  $T_T^*$  – температура газа за турбиной;  $F_{кр}$  – геометрическая площадь критического сечения реактивного сопла;  $q(\lambda_{кр})$  – производительность критического сечения реактивного сопла;

• уравнения нестационарного подвода тепла в случае приращения расхода топлива  $\Delta G_T$ :

$$C_{p33} \frac{V_{kc} p_r^*}{RT_r^*} \frac{dT_r^*}{dt} = C_{p33} G_b T_{к}^* + (G_{T0} \pm \Delta G_T) H_u \eta_{kc}^* - C_{p33} G_r T_r^*,$$

где  $C_{p33}$  – теплоемкость газа при нестационарном подводе тепла;  $V_{kc}$  – объем между входным соплом и турбиной;  $H_u$  – удельная теплота сгорания.

Расход воздуха на расчетном режиме при изменении условий полета рассчитывается по соотношению:

$$G_b = G_{b0} \sqrt{\frac{288}{T_n}} \frac{p_n}{0,101 \cdot 10^6}.$$

Результаты интегрирования для случая ступенчатого уменьшения расхода топлива представлены на рис. 2–5.

Несмотря на существенные допущения, принятые при составлении размерной модели, она остается слишком громоздкой. В принципе можно установить определяющие факторы и выполнить численное исследование влияния их на основные характеристики. Но практически сделать это весьма непросто. И особенно сложно выполнить обобщающие выводы. Представление результатов в виде критериальных зависимостей не только упрощает анализ за счет сокращения числа аргументов, но и позволяет делать самые общие заключения.

Преобразование модели к безразмерной форме можно выполнить различным образом, например, в зависимости от выбора масштабов преобразования. Так, в качестве масштаба времени можно положить все три характеристические постоянные времени:  $T_c, T_y, T_v$ .

Обобщенная математическая модель двигателя после преобразований и выделения комплексов будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{1}{\tau_n \cdot \frac{n_{np}}{n_0}} \left( \left( 1 - 0,042 \left( 1 - \frac{n_{np}}{n_0} \right) \left( \frac{p_{к0}}{p_{вх}} \right)^2 + \right) \times \left( q_{T0} + \frac{\Delta G_T}{G_{b0}} \right) \right) \times \left( \frac{T_{r0}}{T_{вх} \chi_r} \left( 1 - \left( \frac{p_{T0}}{p_{к0} \sigma_{к0}} \right)^{\chi_r} \right) \right) \times \eta_{T0} \eta_m - \frac{\left( \left( \frac{p_{к0}}{p_{вх}} \right)^{\chi} - 1 \right) \left( 1 - 0,042 \left( 1 - \frac{n_{np}}{n_0} \right) \left( \frac{p_{к0}}{p_{вх}} \right)^2 \right)}{\chi \cdot \eta_{к0}} = \frac{\dot{n}_{np}}{n_0},$$

$$\frac{1}{\tau_{pk}} \cdot \left( \frac{p_{к0}}{p_{вх}} + 1 \right) \times \left( \left( 1 - 0,042 \times \left( 1 - \frac{n_{np}}{n_0} \right) \cdot \left( \frac{p_{к0}}{p_{вх}} \right)^2 \right) - \frac{G_{ca} \cdot \frac{p_{к0}}{p_{вх}}}{\sqrt{\left| \frac{T_{r0}}{T_{вх}} \right|} \cdot \text{sign} \left( \frac{T_{r0}}{T_{вх}} \right)} \right) = \frac{\dot{p}_{к0}}{p_{вх}},$$

где  $\tau_n = \frac{(2 \cdot \pi)^2 J n_0^2}{G_{b0} RT_{вх}}$ ,  $\tau_{pk} = \frac{V_{kc} p_{вх}}{RT_{вх} G_{b0}}$ ,

$\overline{G_{ca}} = \frac{m_{кр} F_{ca} p_{вх} \sigma_{к0}}{G_{b0} \sqrt{T_{вх}}}$  – безразмерные параметри-

ческие комплексы;

$$\frac{\sqrt{\left| \frac{T_{r0}}{T_{вх}} \right|} \text{sign} \left( \frac{T_{r0}}{T_{вх}} \right)}{\tau_{pT}} \times$$

$$\left( \frac{\frac{p_{к0}}{p_{вх}} \overline{F_{ca}} - \frac{p_{T0}}{p_{вх}}}{\sqrt{\left| 1 - \eta_{T0} \left( 1 - \left( \frac{p_{T0}}{p_{к0} \cdot \sigma_{к0}} \right)^{\chi_r} \right) \right|}} \times \frac{1}{\sqrt{\text{sign} \left( 1 - \eta_{T0} \left( 1 - \left( \frac{p_{T0}}{p_{к0} \cdot \sigma_{к0}} \right)^{\chi_r} \right) \right)}} \right) = \frac{\dot{p}_{T0}}{p_{вх}},$$

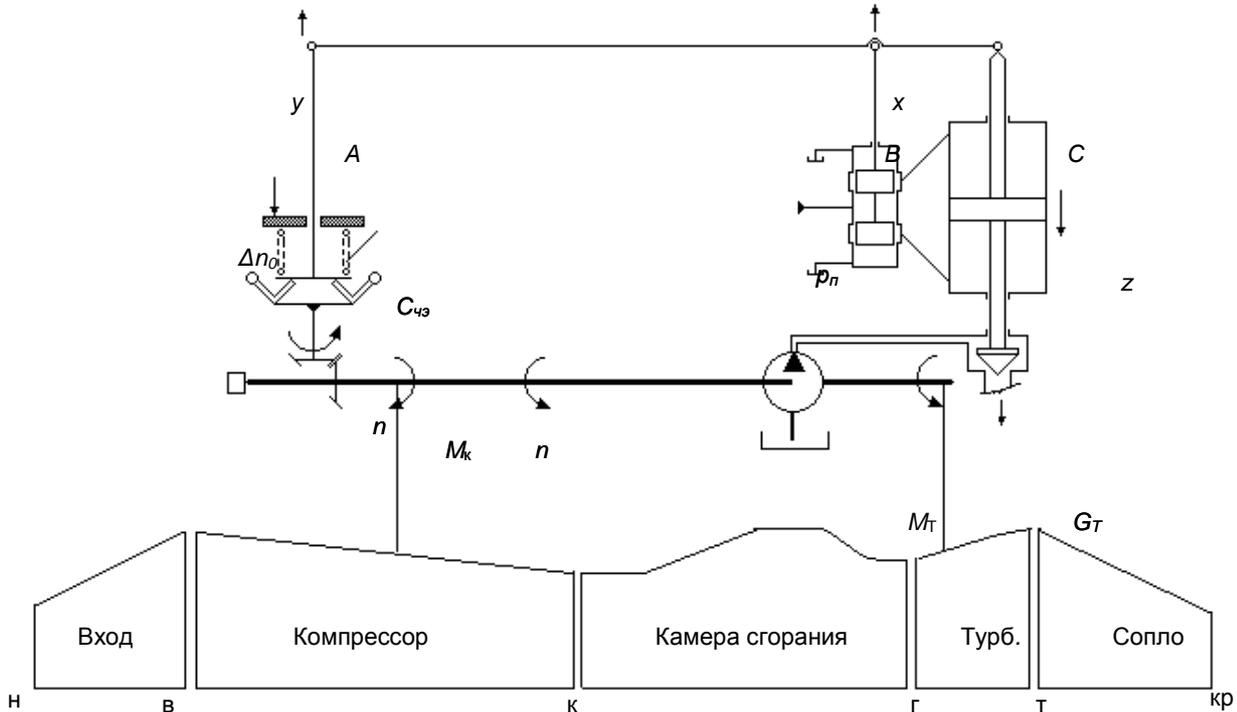


Рис. 1. Принципиальная схема системы регулирования со статическим регулятором

где  $\overline{\tau_{pT}} = \frac{V_{Tц}}{R\sqrt{T_{вх}} F_{крц} m_{крц}}$ ,  $\overline{F_{ca}} = \frac{F_{ca} \sigma_{кc0}}{F_{крц} \sigma_{c0}}$  – безразмерные параметрические комплексы;

$$\frac{1}{\overline{\tau_{Tr}}} \cdot \frac{T_{г0} p_{вх}}{T_{вх} p_{г0}} \cdot \left( \begin{array}{l} (1 - 0,042(1 - \frac{n_{np}}{n_0}) \times \\ (\frac{p_{к0}}{p_{вх}})^x - 1 \\ \times (\frac{p_{к0}}{p_{вх}})^2) (\frac{p_{вх}}{\eta_{к0}} + \\ + 1) + \overline{\Theta}_{T0} (1 + \Delta G_T) - \\ - (1 - 0,042(1 - \frac{n_{np}}{n_0}) \times \\ \times (\frac{p_{к0}}{p_{вх}})^2) \frac{T_{г0}}{T_{вх}} \end{array} \right) = \frac{\dot{T}_{г0}}{\dot{T}_{вх}}$$

где  $\overline{\tau_{Tr}} = \frac{V_{кcг} p_{вх}}{RT_{вх} G_{в0}}$ ,  $\overline{\Theta}_{T0} = \frac{G_{T0} H_u \eta_{кc0}}{C_{рэф} T_{вх} G_{в0}}$  – безразмерные параметрические комплексы.

Таким образом, можно проводить системное исследование, основанное на построении обобщенных характеристик.

Критерии подобия показывают роль той или иной переменной в том или ином процессе. Причем безразмерные функции становятся зависимыми от безразмерного времени, независи-

мых безразмерных переменных и комплексов переменных. Введение в математическую

модель безразмерных переменных позволяет существенно сократить число аргументов модели, сделать ее более обозримой и информативной, вскрыть причинно-следственные связи и, самое главное, обобщить результаты численного решения. В результате, в исследуемом диапазоне изменения параметров численные методы приобретают силу аналитических выражений.

Далее проводим анализ влияния различных параметров на основные переменные, выполненный по модели собственно двигателя (без регулятора) (рис. 6, 7).

Авиационный двигатель характеризуется большой глубиной регулирования и разнообразием внешних условий и режимов работы. Для того чтобы численные значения критериев подобия могли служить основой для общих количественных оценок, необходимо формировать комплексы как средние меры эффективности физических явлений. Другими словами, комплексы должны быть построены из средневзвешенных параметров, соответствующих, например, параметрам исходного стационарного режима и стандартным внешним условиям. Кроме того, в замкнутых системах, к которым относится рассматриваемая система, имеют место дополнительные особенности формирования комплексов, обусловленные обратными связями.

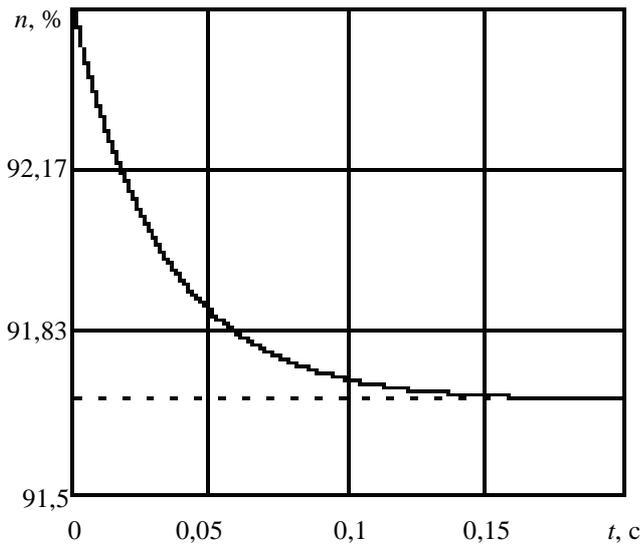


Рис. 2. Частота вращения

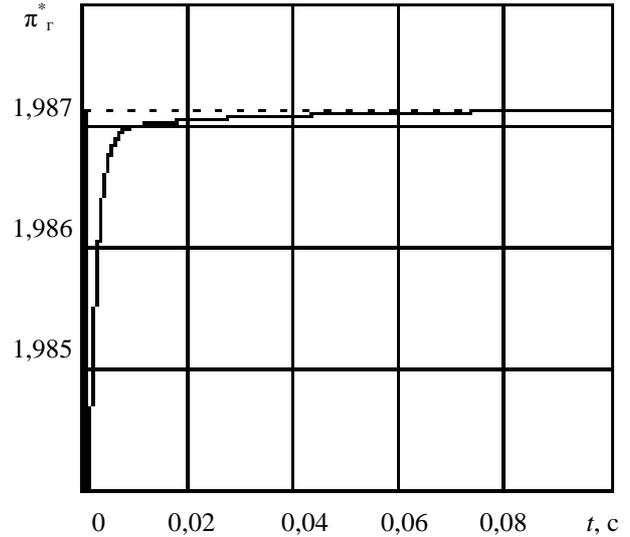


Рис. 5. Отношение давлений на турбине

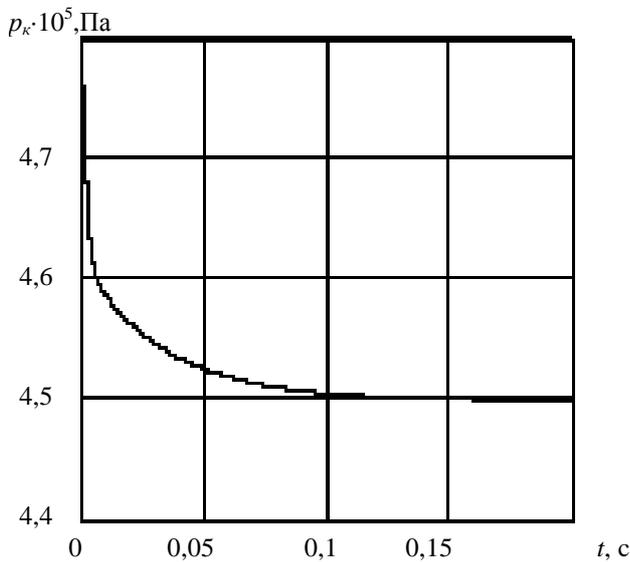


Рис. 3. Давление за компрессором

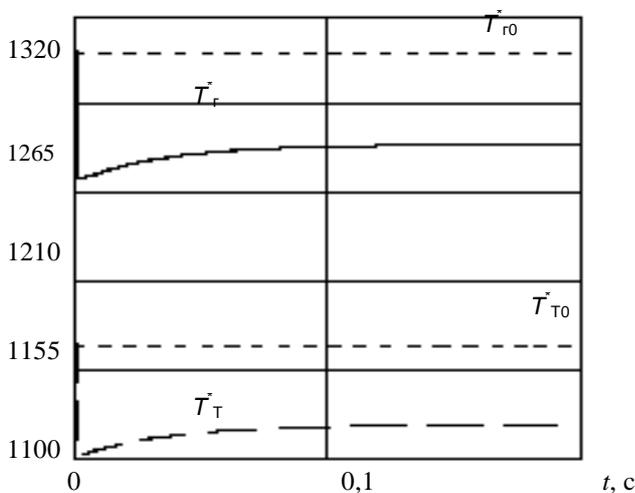


Рис. 4. Температура на входе и выходе турбины

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обратим внимание на переходный процесс по температуре газа (рис. 4). Считается, что этот параметр является квазистационарным, т. е. реагирует на изменение топлива мгновенно. Действительно, в первый момент при ступенчатом уменьшении расхода топлива температура газа за камерой сгорания (и турбиной) практически мгновенно уменьшается, однако затем начинает медленно нарастать с темпом уменьшения расхода воздуха. В переходных характеристиках, представленных на рис. 2–5, можно отметить, что система регулирования за 0,15 секунды точно устраняет внешнее воздействие.

На рис. 6 приведены переходные процессы, протекающие в двигателе в случае ступенчатого уменьшения расхода топлива для различных значений момента инерции ротора. Как и следовало ожидать, с ростом момента инерции увеличивается время выхода двигателя на новое положение равновесия.

Увеличение площади проходного сечения соплового аппарата (рис. 7) приводит как к росту времени переходного процесса, так и к увеличению приращения частоты вращения.

Из полученных данных можно установить, что разработанная математическая модель соответствует необходимому уровню точности для определения динамических характеристик с целью предконструкторского синтеза САУ частоты вращения.

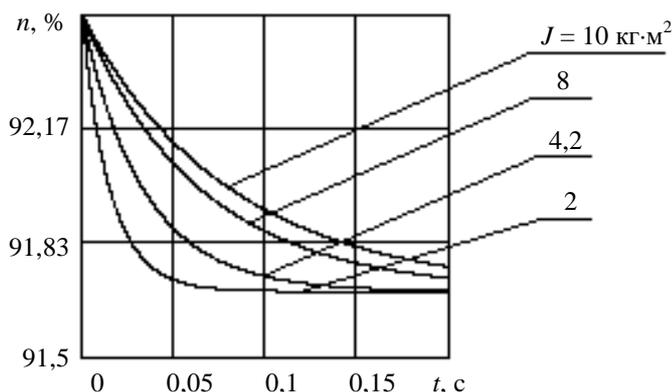


Рис. 6. Влияние момента инерции

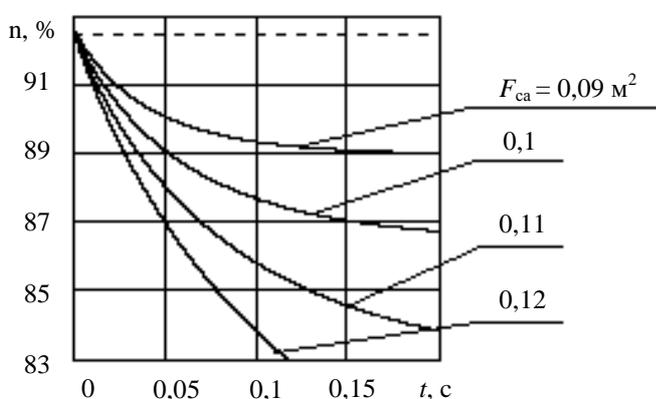


Рис. 7. Влияние площади соплового аппарата

## 5. ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Авиационный двигатель и его система регулирования представляют собой динамические системы со многими степенями свободы и содержат не только постоянные, но и переменные, нелинейные и распределенные параметры. Кроме этого, технические средства системы регулирования авиационного двигателя являются многофункциональными и обладают существенно перестраиваемой структурой. Таким образом, разработанная математическая модель для САР позволяет решить задачу исследования работы как составной части для одного из гидромеханических элементов сложной системы авиационного двигателя.

Полученные теоретические материалы представят интерес для всех организаций, занимающихся проблематикой транспортных авиационных систем. Математические модели, результаты численного моделирования представляют практическую ценность при проектировании как САР в частности, так и в составе систем общего и специального машиностроения, робототехнических комплексов.

## ВЫВОДЫ

Математические модели, используемые при расчете статических и динамических характеристик рассматриваемой системы, могут и должны быть различной степени сложности. Для исследования качественных свойств системы в целом используются простые модели, для выявления же каких-то особенностей поведения должны применяться более сложные.

Комплекс прикладных программ, позволяющий автоматизировать процесс разработки систем и содержащий в своей структуре комплекс моделей различного уровня, обеспечит с достаточной достоверностью расчет характеристик и проектирование САР двигателей летательных аппаратов, оснащенных системами автоматического регулирования с учетом конструктивных особенностей. Методика проведения вычислительного эксперимента позволит исследовать точность, устойчивость и управляемость сложных гидромеханических устройств с учетом нелинейных явлений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сунарчин Р. А. Выбор параметров гидромеханических регуляторов авиационных двигателей. Численные методы исследования: учеб. пособие для вузов. Уфа: УГАТУ, 2005. 120 с.
2. Аксельрод С. Е. Основы регулирования авиационных двигателей: учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1981. 89 с.
3. Попов Д. П., Ермаков С. А., Лобода И. Н. Инженерные исследования гидроприводов летательных аппаратов / под ред. Д. Н. Попова. М.: Машиностроение, 1978. 142 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Коева Анна Александровна**, асп. каф. прикл. гидромеханики. Дипл. магистр техники и технологии по гидравл., вакуум. и компрес. технике (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. моделир. и диагностики устройств гидроавтоматики.

**Петров Павел Валерьевич**, ст. преп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологии по гидравл., вакуум. и компрес. технике (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук по гидравл. машинам и гидропневмоагрег. (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. гидромехан. систем автоматизации ЛА и двигательных установок.