

А. А. КОЕВА, П. В. ПЕТРОВ, В. А. ЦЕЛИЩЕВ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассматриваются вопросы моделирования и исследования гидромеханических систем автоматического регулирования с целью их предконструкторского синтеза. Обсуждаются вопросы рациональности применения численных методов и создания пакета прикладных программ. Приводится математическая модель одного из рассматриваемых в пакете объектов исследования (автомата разгона временного типа). Описывается разрабатываемый пакет прикладных программ. *Математическое моделирование; численный эксперимент; система автоматического регулирования; пакет прикладных программ*

Разработка современных гидромеханических систем автоматического регулирования (САР) двигателей летательных аппаратов (ДЛА) сопровождается устойчивой тенденцией последних лет к сокращению финансирования. Основную долю затрат на создание гидромеханических систем автоматического регулирования составляют затраты на отработку двигательной установки. Это приводит к необходимости частичной замены экспериментальной отработки математическим моделированием. В связи с этим, задачей первоочередной важности становится все более широкое внедрение и совершенствование методов математического моделирования рабочих процессов в системах автоматического регулирования двигателя. Достигнутый на данный момент уровень развития вычислительной техники, как по быстродействию, так и по объему оперативной памяти, и одновременно с этим широкое внедрение многопроцессорных систем позволяют реализовывать более сложные нелинейные математические модели гидромеханических устройств.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Численный эксперимент, несмотря на кажущуюся простоту и существующие преимущества, имеет свои проблемы, обусловленные субъективными и объективными причинами. В результате численного эксперимента получают неструктурированные ряды чисел, не связанные единым аналитическим выражением. Частные аппроксимационные зависимости не отражают внутренних связей, характеризующих исследуемую задачу [1]. Особенно сильно эта

проблема проявляется в случае многопараметрических задач, характерных для анализа технических систем. Поэтому при анализе сложных систем уже на самых ранних этапах стараются разделить (декомпозировать) задачу на ряд более простых подзадач. Наибольшее распространение получили идеализированные линейные методы, основным достоинством которых является возможность получения решения в аналитическом виде, так что из полного решения вытекают различные частные случаи, и на основе найденного результата удобно выполнять анализ влияния различных факторов.

Линейные методы хороши только в случае малых изменений параметров, они обладают рядом достоинств, таких как универсальность, внутренняя непротиворечивость, наглядность и другие [2]. Систему в данном случае можно рассматривать как стационарную, работающую на установившемся режиме. Однако модели для отдельно взятых современных гидромеханических устройств являются, как правило, нелинейными и нестационарными и, к тому же, стохастическими. При практическом проектировании реальных систем линейные методы декомпозиции оказываются мало применимыми, поскольку характеристики гидромеханических элементов существенно нелинейны; нелинейные элементы взаимодействуют друг с другом, и результат может изменяться даже от простой перестановки элементов; модели, как правило, оказываются неоднородными; многие явления буквально исчезают при малейшей попытке линеаризации их моделей, так что решение их возможно только численными способами; в процессе моделирования, как правило, оказывается, что разработанная модель в данной конкретной ситуации не отражает свойства объекта с достаточной полнотой и ее следует уточнить или перейти к другой, поэтому обычно приходится оперировать комплексом моделей [3].

Контактная информация: (347) 273-09-44

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

Аналитические методы в данном случае будут неприемлемы. Наряду с этим, в настоящее время изменились приоритеты исследования – главной задачей исследователя становится не получение любой ценой решения в виде аналитического выражения, а преобразование исходных уравнений к виду, удобному для ЭВМ, и последующий машинный анализ [1].

Многомерность, нестационарность, «сильная» нелинейность протекающих в устройствах и системах явлений таковы, что численные методы представляют практически единственное средство для их достаточно полного теоретического исследования. По существу, методы математического моделирования с использованием современных вычислительных машин открывают очень широкие возможности для решения нелинейных и многомерных задач, где классические подходы анализа для получения количественной информации в большинстве своем оказываются непригодными.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для решения существующих проблем численного моделирования в учебном научном инновационном центре «Гидропневмоавтоматика» УГАТУ разрабатывается комплекс пакетов прикладных программ (ППП) «НМАР» (HydroMechanical Automatic Regulator), базирующийся на методах объектно-ориентированной технологии и позволяющий создать классификацию, которая характеризует поведение элементов в системе.

Пакет предназначен для расчета и построения статических и динамических характеристик как по линейным, так и по нелинейным моделям различных типов регуляторов. Разработанный комплекс программ обеспечивает выполнение таких функций, как автоматический вывод математических моделей на экран, автоматический вывод принципиальной схемы рассматриваемого регулятора, автоматическое моделирование статики, автоматическое моделирование динамики (рис. 1).

В данном случае мы имеем дело с весьма специфическими гидромеханическими системами на стадии предконструкторского синтеза. Здесь, в первую очередь, повышается уровень требований к адекватности математического описания. Для обеспечения высокого качества проектируемых устройств требуется их более подробное описание, что чаще всего приводит к сложным нелинейным многопараметрическим моделям. Практически приходится применять уравнения сохранения в естественном фундаментальном виде с учетом нелинейностей и, в

том числе, существенных нелинейностей. Аналитическое решение таких уравнений, как правило, невозможно. Поэтому основным методом исследования становится численный.

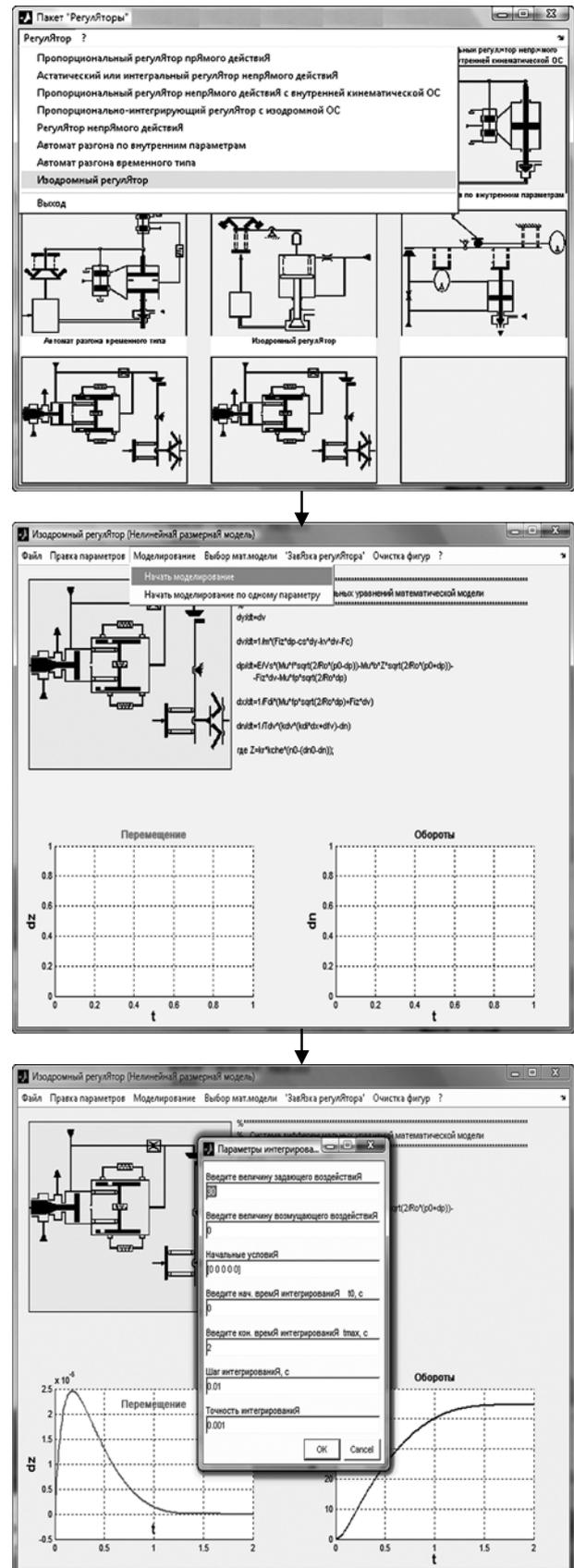


Рис. 1. Выбор типа и расчет регулятора в пакете

Вначале с использованием исходных данных производится оценка средних значений параметров регулятора. Затем задаются серии значений изменяемых величин и в интерактивном режиме просчитываются различные характеристики, а по ним выбираются наиболее рациональные значения параметров.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В пакет заложены линейные модели, позволяющие предварительно оценивать систему, и нелинейные модели, позволяющие наиболее точно рассчитать поведение заложенных структур регуляторов при заданных условиях и подобрать наиболее оптимальную. Например, для автомата разгона временного типа нелинейная динамическая математическая модель состоит из следующих уравнений:

- уравнение движения поршня изодрома:

$$(p_1 - p_2) \cdot F_u - c_{\Sigma} \cdot Y_0(y_p) - k_v \cdot Y_1(y_p) \cdot \frac{dy_p}{dt} - F_c \cdot \text{sign} \frac{dy_p}{dt} = m \cdot \frac{d^2 y_p}{dt^2},$$

где p_1 – давление в нагнетательной полости изодрома; p_2 – давление в сливной полости изодрома; F_u – площадь поршня изодрома; c_{Σ} – суммарная жесткость пружины; $Y_0(y_p)$ – функция пользователя, ограничивающая перемещение поршня изодрома; y_p – перемещение поршня изодрома; k_v – коэффициент вязкого трения; $Y_1(y_p)$ – функция пользователя, ограничивающая скорость поршня изодрома; F_c – сила сухого трения; m – масса поршня изодрома;

- функция пользователя, ограничивающая перемещение поршня изодрома:

$$Y_0(y_p) := \begin{cases} \text{if } y_p < y_m \text{ then } y_p \\ \text{else } y_m \\ \text{end} \end{cases},$$

где y_m – максимальное перемещение поршня изодрома;

- функция пользователя, ограничивающая скорость поршня изодрома:

$$Y_1(y_p) := \begin{cases} \text{if } y_p < y_m \text{ then } 1 \\ \text{else } 0 \\ \text{end} \end{cases};$$

- уравнение баланса расходов:

$$\mu \cdot f \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |p_0 \cdot f_{01}^2 - (p_1 - p_2)|} \cdot \text{sign}(p_0 \cdot f_{01}^2 - (p_1 - p_2)) = \mu \cdot b \cdot Z(z) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |p_0 + (p_1 - p_2)|} \times$$

$$\times \text{sign}(|p_0 + (p_1 - p_2)|) + F_u \cdot Y_1(y_p) \cdot \frac{dy_p}{dt} + \frac{V_{\Sigma} + F_u \cdot y_p}{E} \cdot \frac{dp}{dt} + \mu \cdot f_{II} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |p_1 - p_2|} \times \times \text{sign}(p_1 - p_2) + \mu \cdot F_1(y_p) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |p_1 - p_2|} \times \times \text{sign}(p_1 - p_2),$$

где μ – коэффициент расхода; f – площадь входного дросселя; ρ – плотность рабочей жидкости; p_0 – давление в полостях статического поршня; f_{01} – начальная площадь входного дросселя; b – длина щели маятникового распределителя; $Z(z)$ – функция пользователя, не позволяющая ширине щели маятникового распределителя становиться отрицательной; V_{Σ} – суммарный объем в полостях изодрома; E – модуль объемной упругости жидкости; f_{II} – площадь дроссельного пакета; $F_1(y_p)$ – функция пользователя, определяющая включение обводного дросселя f_1 ;

- функция пользователя, не позволяющая ширине щели маятникового распределителя становиться отрицательной:

$$Z(z) := \begin{cases} \text{if } z_0 - \Delta z_0 + \frac{dz}{dt} > 0 \text{ then } z_0 - \Delta z_0 + \frac{dz}{dt} \\ \text{else } 0 \\ \text{end} \end{cases},$$

где z_0 – начальная ширина щели маятникового распределителя; Δz_0 – изменение ширины щели маятникового распределителя под действием входного воздействия; z – ширина щели маятникового распределителя;

- функция пользователя, определяющая включение обводного дросселя f_1 :

$$F_1(y_p) := \begin{cases} \text{if } y_p < y_m \cdot N \text{ then } 0 \\ \text{else } f_1 \\ \text{end} \end{cases},$$

где N – число, изменяющееся от нуля до единицы и оценивающее положение точки включения дросселя f_1 ;

- уравнение движения поршня дозирующей иглы:

$$F_{\delta} \cdot \frac{dx}{dt} = \mu \cdot f_{II} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |p_1 - p_2|} \cdot \text{sign}(p_1 - p_2) + \mu \cdot F_1(y_p) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |p_1 - p_2|} \cdot \text{sign}(p_1 - p_2),$$

где F_{δ} – площадь поршня дозирующей иглы; x – перемещение поршня дозирующей иглы;

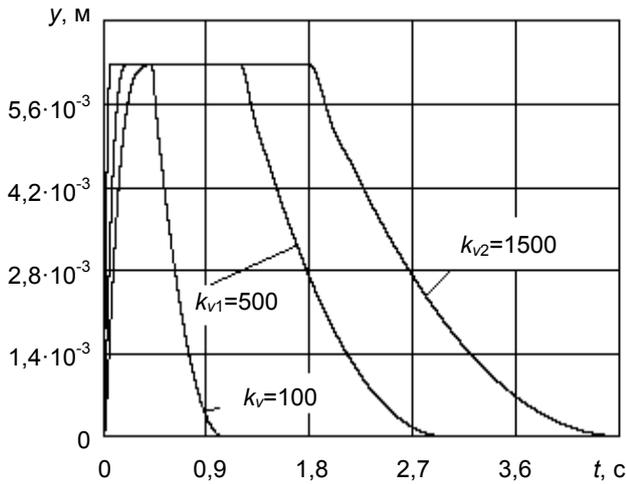


Рис. 2. Перемещение статического поршня при различных значениях k_v

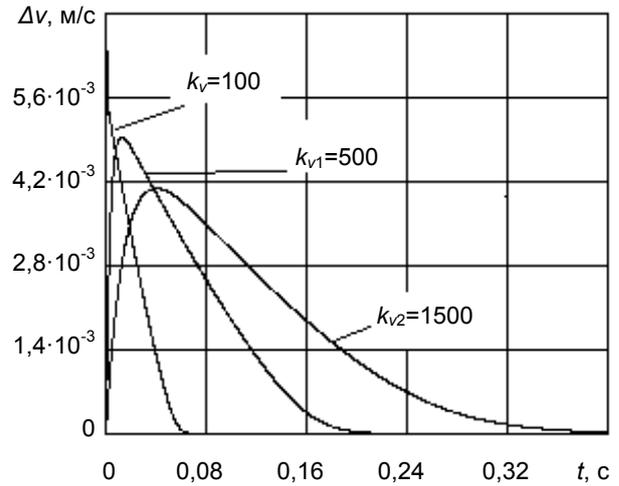


Рис. 3. Скорость статического поршня при различных значениях k_v

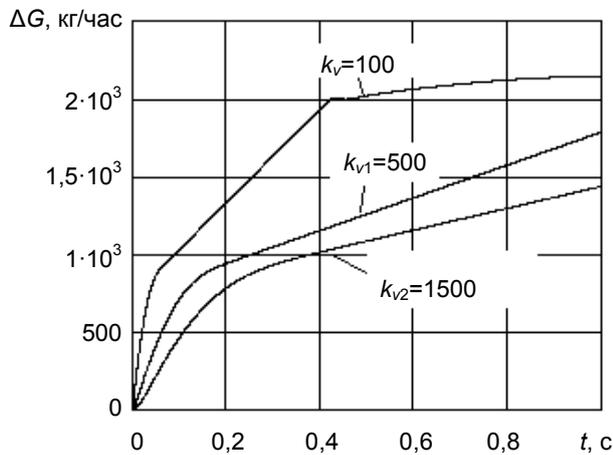


Рис. 4. Расход топлива двигателя при различных значениях k_v

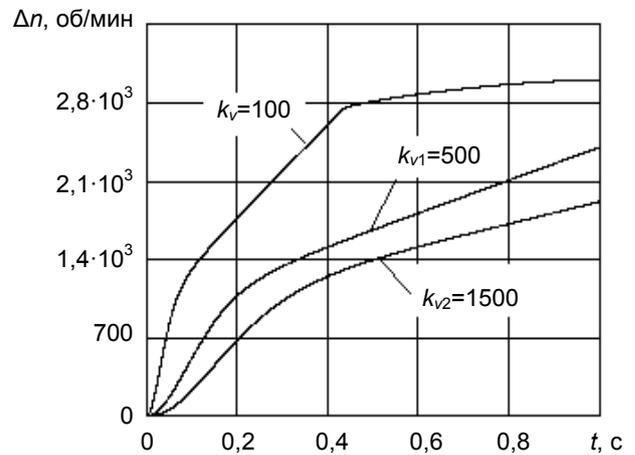


Рис. 5. Частота вращения двигателя при различных значениях k_v

- уравнение разгона ротора двигателя:

$$T_{\text{дв}} \cdot \frac{dn}{dt} = k_{\text{дв}} \cdot k_{\text{дд}} \cdot \frac{dx}{dt} - \Delta n,$$

где $T_{\text{дв}}$ – постоянная времени двигателя; n – частота вращения двигателя; $k_{\text{дв}}$ и $k_{\text{дд}}$ – коэффициенты усиления двигателя и дозирующей иглы; Δn – приращение частоты вращения.

Система включает в себя около двух десятков первоначальных переменных, числовые значения которых изменяются от 10^{-6} до 10^{10} . Аналитические методы здесь исключены, задача может быть решена только с помощью компьютера численными способами.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате расчета системы уравнений автомата разгона временного типа получили переходные характеристики (рис. 2–5). По результатам также видно влияние коэффициента вязкого трения.

С увеличением k_v снижается скорость движения поршня, что сказалось на его перемещении – переходный процесс заметно увеличился по времени.

Из рис. 4 и 5 видно, что расход топлива прямо пропорционален частоте вращения двигателя. При низких значениях k_v расход топлива и частота вращения выше, чем при высоких значениях коэффициента вязкости.

Из полученных данных можно установить, что разработанная математическая модель соответствует необходимому уровню точности для определения динамических характеристик с целью предконструкторского синтеза автомата разгона временного типа. Таким образом, применение пакета прикладных программ является целесообразным.

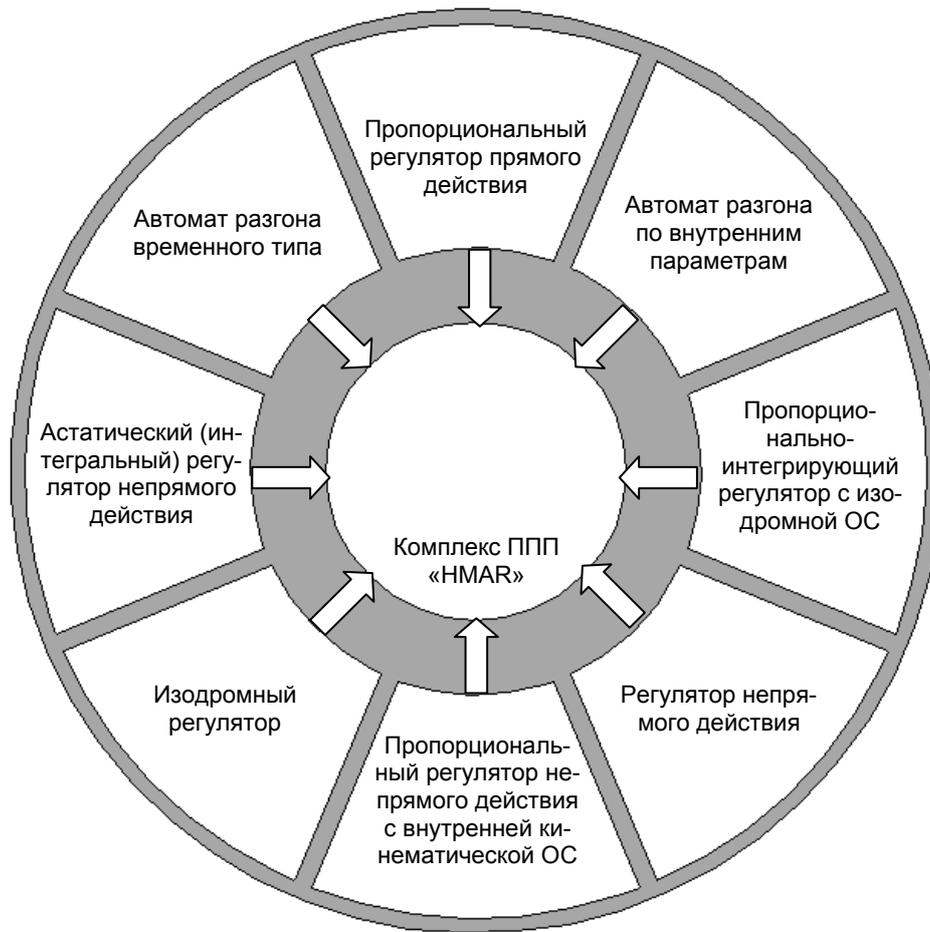


Рис. 6. Структура программного комплекса

5. ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В разрабатываемом пакете комплекс моделей открыт для пополнения, имеются средства оперативного изменения исходных данных. Пакет разработан в интегрированной среде *MATLAB*. Использование мощного математического аппарата *MATLAB* позволяет всецело сосредоточиться на существе задачи: структуре данных, библиотеке реальных моделей различной сложности, процедурах анализа и синтеза и т. п.

Разрабатываемый комплекс ППП позволяет с достаточной достоверностью рассчитывать характеристики и проектировать САР ДЛА, оснащенные системами автоматического управления с учетом конструктивных особенностей их электрогидравлических исполнительных механизмов (рис. 6). Разработанная инженерная методика проведения вычислительного эксперимента позволяет исследовать точность, устойчивость и управляемость сложных гидромеханических устройств с учетом нелинейных явлений. Пакет программ обеспечивает на качественно новом уровне выполнение трудоемких расчетов характеристик гидромеханических

устройств и обобщенный анализ в автоматизированном режиме. Сформированные электронные базы данных в виде обобщенных характеристик позволяют существенно усилить результаты численного моделирования и осуществлять анализ сложных гидромеханических устройств с заданными техническими требованиями. На данном этапе зарегистрирована оболочка пакета и идет пополнение базы данных.

ВЫВОДЫ

1. Разработанные математические модели, входящие в пакет прикладных программ «НМАР», и в частности модель автомата разгона временного типа, являются адекватными, что говорит о возможности дальнейшего безошибочного применения результатов этих моделей при проведении исследований.

2. Использование методов автоматизированного проектирования на базе средств вычислительной техники является одним из перспективных путей повышения эффективности проектирования систем автоматического регулирования, а для обоснованного выбора параметров

необходимо иметь комплекс моделей в виде многоуровневой иерархической структуры, что позволяет «выжать» из рассматриваемой ситуации максимум положительных результатов.

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, аспирант каф. прикладной гидромеханики (ПГМ). 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 автоматики ЛА и двигательных установок.

Целищев Владимир Александрович, проф., зав. каф. ПГМ. Дипл. инж.-механика по гидравл. машинам, гидроприводам и гидропневмоавт-ке (УГАТУ, 1982). Д-р техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. систем автоматики ЛА и двигательных установок; проектир. и модели струйных электрогидравл. рулевых приводов для систем управления ЛА.