

**П.В. Петров<sup>1</sup>, В.А. Целищев<sup>1</sup>, Д.А. Кудерко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

<sup>2</sup>АО «Технодинамика», Москва, Россия

## **ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ УСТРОЙСТВ ГИДРОАВТОМАТИКИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

Предлагается новое направление рационализации численного исследования сложных гидромеханических устройств автоматики систем управления, связанное с применением методов объектно-ориентированных технологий.

Как известно, для практического проектирования технических устройств простые линейные методы плохо приспособлены. Статические характеристики здесь нелинейные, форма и даже содержание моделей зависят от параметров режима, звенья могут взаимодействовать друг с другом (в зависимости от перестановки нелинейных звеньев результат может быть разным) и т.п. Идеальным решением синтеза таких систем явилось бы создание полной библиотеки элементов с последующей генерацией систем по определенным правилам. Однако прямой синтез нелинейных систем из начальных структур, по-видимому, не реален.

Учет большого количества факторов и явлений часто приводит к «подстройке» модели к характеристикам конкретного привода, а не к повышению точности моделирования рассматриваемого гидропривода. Для решения конкретных задач допустимо некоторое упрощение модели, позволяющее получить нужный результат с меньшими вычислительными затратами.

По сравнению с традиционными методами, объектно-ориентированная классификация гидромеханических устройств выгодно облегчает процесс проектирования, так как появляется возможность гибкого учета множества факторов и дальнейшего их исследования, а также решения многопараметрических задач. Понятие стандартизации в данном случае размыто: имеется в виду четкая иерархия моделей, одинаковость обозначений, размерности и прочее, что делает модели одинаковыми по форме, оставляя уникальными по существу. Зная свойства и характеристики основных элементов систем гидроавтоматики летательного аппарата, составляющих синтезируемую систему, можно вести проектирование систем с заранее прогнозируемыми свойствами. В общем случае задача выбора сводится к определению по соответствующей модели параметров при условии выполнения на этом этапе требований и ограничений.

**Ключевые слова:** объектно-ориентированные технологии, вычислительный эксперимент, система управления, летательный аппарат, нелинейные явления, устройства гидроавтоматики, математические модели, численное исследование, отказы, методика диагностирования, дроссель, колебательное звено, масса с пружиной, синтез, анализ.

**P.V. Petrov<sup>1</sup>, V.A. Tselischev<sup>1</sup>, D.A. Kudenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

<sup>2</sup>JSC "Technodinamica", Moscow, Russian Federation

## **OBJECT-ORIENTED APPROACH IN THE DESIGN OF AIRCRAFT HYDRAULIC AUTOMATION DEVICES**

The article proposes a new direction of rationalization of the numerical study of complex hydromechanical devices for automation of control systems, associated with the use of methods of object-oriented technologies (OOT).

As is known, simple linear methods are poorly suited for the practical design of technical devices. The static characteristics here are nonlinear, the form and even the content of the models depend on the parameters of the mode, the links can interact with each other (from the permutation of non-linear links – the result can be different), etc. The ideal solution for the synthesis of such systems would be to create complete libraries of elements with the subsequent generation of systems according to certain rules. However, a direct synthesis of nonlinear systems from initial structures is apparently not realistic.

Taking into account a large number of factors and phenomena often leads to "tuning" the model to the characteristics of a particular drive, and not to an increase in the accuracy of modeling the hydraulic drive under consideration. To solve specific problems, a certain simplification of the model is permissible, which makes it possible to obtain the desired result with lower computational costs.

Compared to traditional methods, the object-oriented classification of hydromechanical devices favorably facilitates the design process, since it becomes possible to flexibly take into account many factors and further study them, as well as solve multi-parameter problems. The concept of standardization in this case is vague: we mean a clear hierarchy of models, the same designations, dimensions, etc., which makes the models the same in form, leaving them unique in essence. Knowing the properties and characteristics of the main elements of the aircraft hydroautomatics systems that make up the synthesized system, it is possible to design systems with predictable properties in advance. In the general case, the problem of selection is reduced to

the determination of the parameters according to the corresponding model, provided that the requirements and restrictions are met at this stage.

**Keywords:** object-oriented technologies, computational experiment, control system, aircraft, nonlinear phenomena, hydroautomatics devices, mathematical models, numerical research, failures, diagnostic technique, throttle, oscillatory link, mass with a spring, synthesis, analysis.

## Введение

Гидромеханические устройства включают в себя ограниченный набор основных элементов: гидравлическое сопротивление (дроссель), гидравлическая емкость (объем) и масса с пружиной (механической или гидродинамической) [1]. Эти элементы в различных сочетаниях соединены прямыми и обратными связями, через которые обмениваются массой, энергией и информацией.

Для системного исследования устройств гидроавтоматики приходится создавать комплекс моделей с разветвленной структурой [2]. С целью рационализации исследования необходимо ввести упорядочение всей процедуры моделирования – от замысла задачи до ее численной реализации [3].

Существование подобной классификации гидромеханических устройств выгодно облегчает процесс проектирования, так как возникает возможность учета множества факторов и их исследования, а также решения многопараметрических задач, что позволяет снимать многие допущения и ограничения [4].

Объектно-ориентированные технологии вводят своеобразный концептуальный стандарт не только на процедуру создания машинных программ, но и на само моделирование [5]. Модели, алгоритмы и программы, оставаясь уникальными по содержанию, становятся единообразными по форме и потому лучше приспособлены для автоматизации и более доступны для пользователей [6].

Для создания объекта родительского класса рассматривается гипотетический дроссель, у которого расход  $Q$  полностью определяется значениями проводимости и перепада давления. В этом случае структура объекта класса «Дроссель» может быть определена указанием вещественного числа  $G$  проводимости и вектора значений перепада давления.

Благодаря использованию методов объектно-ориентированной технологии применительно к моделированию устройств гидроав-

томатики появилась возможность их декомпозиции на нелинейные конечные элементы [7]. Такие элементы скрывают под собой совокупность объектов определенного класса. Например, класс «Дроссель» объединяет в себе все множество различных типов и видов дроссельных устройств, класс «Колебательное звено» – всю гамму колебательных устройств от механических до электрических.

Классы объектов в большинстве своем имеют родительские и производные (дочерние) классы. Во главу классификации кладется родительский класс, характеризующийся самым простым и примитивным поведением, например дроссель – отверстие в тонкой стенке. В процессе простого или множественного (от двух и более родителей) наследования классы, наследуя и приобретая новые свойства, становятся более специализированными.

Класс состоит из конструктора объектов и методов их обработки. Методы включают в себя не только аналитические формулы, но и базы данных, графики.

Поскольку производный класс наследует свойства всех своих родителей, он может быть обработан любым из их методов. Его же более специализированные методы для классов-родителей недоступны.

Влияние режима, свойств рабочей жидкости и конструктивных параметров дросселя отражено в дочерних классах. Все дочерние классы имеют методы родительского класса и свои собственные, обусловленные указанными особенностями.

Объекты дочерних классов наследуют поля проводимости и перепада давления и имеют дополнительно собственные. Метод родительского класса для определения расхода применим для всех дочерних классов. Каждый дочерний класс имеет свой индивидуальный метод для определения проводимости.

Зная свойства и характеристики элементов, составляющих синтезируемую систему, можно вести проектирование систем с заранее прогнозируемыми свойствами [8].

### Примеры реализации класса объектов в рамках концепции ООТ

Продemonстрируем концепцию создания дочерних классов. В качестве базовых родительских классов для такой классификации приняты классы «Дроссель», «Объем» и «Масса с пружиной».

В начале рассмотрим класс «Дроссель». Дроссель является основным управляющим устройством гидроавтоматики, с помощью которого осуществляется изменение параметров потока. Простейшее дроссельное устройство представляет собой отверстие в тонкой стенке, где полное давление преобразуется в поток жидкости; математическое описание – расход жидкости равен произведению проводимости и корня квадратного из перепада давления.

Дроссельное устройство имеет два поля данных (поле перепада давления и поле относительной гидравлической проводимости) и записывается как  $f(\Delta p, \bar{G})$ .

Единственный метод класса есть определение расхода жидкости по безразмерным переменным: проводимости и перепаду давления (разность полного давления на входе и статического на выходе).

Класс «Дроссель» включает информацию, не зависящую от частного вида конструктивной реализации (регулируемый или нерегулируемый, отверстие в тонкой стенке или насадок и т.д.) и поэтому по праву может считаться родительским (базовым) классом. Класс «Дроссель» является родителем разветвленной иерархии дросселирующих устройств, как-то: различные насадки и щели, дроссельные пакеты, регулируемые дроссели и тому подобное, комбинации дросселей с другими устройствами, например дроссели с объемом. Эти устройства образуют дочерние классы (подклассы), у которых, с одной стороны, имеются собственные специфические методы, а с другой – им доступен родительский метод.

У объектов класса «Регулируемый дроссель» появляется новая переменная – степень открытия дросселя, равная отноше-

нию текущего  $f$  и максимального  $f_{\max}$  значений площади дросселя  $\bar{f} = \frac{f}{f_{\max}}$ . Проводимость

в этом случае имеет вид  $G = \mu f_{\max} \bar{f} \sqrt{\frac{2}{\rho}}$  или

$$G = G_m \bar{f}, \text{ где } G_m = \mu f_{\max} \sqrt{\frac{2}{\rho}}.$$

Регулируемое дроссельное устройство имеет три поля данных и записывается как  $f(\Delta p, \bar{G}, \Delta f)$ .

Основной метод класса есть определение расхода жидкости по безразмерным переменным: проводимости и перепаду давления (разность полного давления на входе и статического на выходе) с учетом величины проходного сечения (степени открытия дросселя).

Класс «Регулируемый дроссель» включает в себя дроссельные устройства, объединенные регулируемой конструктивной реализацией.

В дочернем классе «Дроссель- $f(Re)$ » учитывается влияние режима течения жидкости на проводимость дросселя. Как известно, коэффициент расхода определяется по соотношению  $\mu = \varepsilon \varphi$ , где коэффициенты сужения  $\varepsilon$  и скорости  $\varphi$  для отверстия в тонкой стенке зависят в основном от числа  $Re$ .

Основной метод обработки объектов данного класса состоит из табличных данных – зависимости коэффициента расхода от характера течения (числа  $Re$ ) и, таким образом, не имеет аналитической формулы.

Тем не менее у объектов класса «Дроссель- $f(Re)$ » существует служебная функция интерполирования данных – пересчета по заданному значению числа  $Re$  значения гидравлической проводимости  $G$ .

Дроссельное устройство имеет три поля данных (два наследованных от класса «Дроссель» и новое) и записывается как  $f(\Delta p, \bar{G}, Re)$ .

Аналогично проводя подобные действия с другими видами дроссельных устройств, получим объектно-ориентированную иерархию дроссельных устройств (рис. 1).

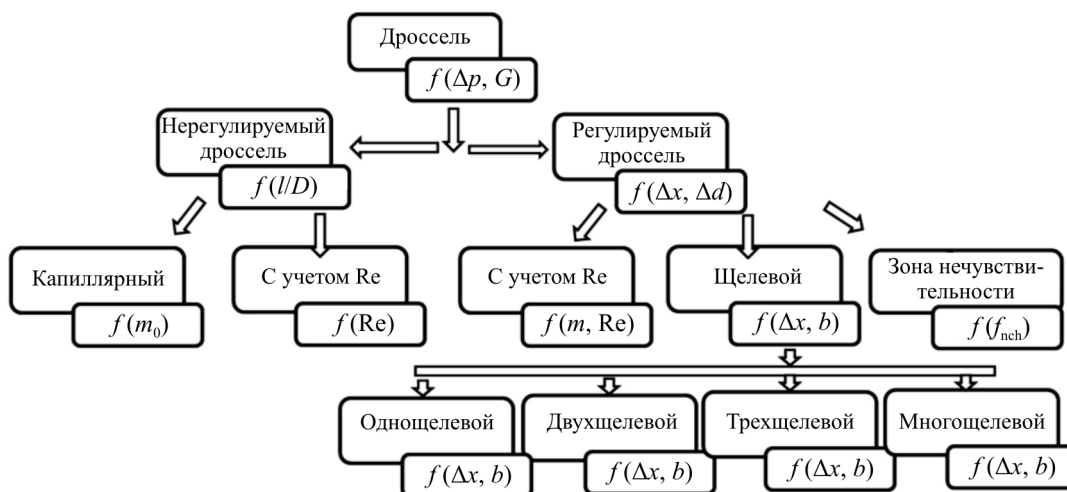


Рис. 1. Пример иерархии дроссельных устройств

Следующий класс «Объем», с целью усложнения задачи и развития концепции, рассмотрим в комплексе с дросселем. Различные комбинации объема с дросселем весьма распространены в регуляторах и оказывают существенное влияние на их динамические характеристики. В электродинамике аналогами объема с дросселем являются RC-цепочки.

Возможны различные сочетания соединения объема и дросселя. Ограничимся рассмотрением двух элементарных схем: постоянный объем с нерегулируемым дросселем, где в качестве источника питания применяется источник постоянного расхода (рис. 2, а); постоянный объем с регулируемым дросселем, где применяется источник постоянного давления с нерегулируемым входным дросселем (рис. 2, б).

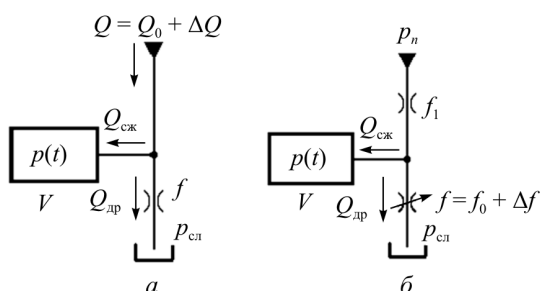


Рис. 2. Соединения объема и дросселя: а – постоянный объем с нерегулируемым дросселем; б – постоянный объем с регулируемым дросселем

В зависимости от конструктивных особенностей дросселя с объемом и источником постоянного расхода, свойств жидкости и па-

раметров режима следует применить тот или иной дочерний класс дросселя. Тогда класс «Дроссель» для класса «Объем + дроссель» будет считаться прародителем.

Если принять, что проводимость постоянна и  $G = \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho}}$ , то наследование является простым, и при постоянном модуле упругости жидкости баланс расходов будет иметь вид

$$Q = \frac{V}{E} \frac{dp(t)}{dt} + \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho}} p(t);$$

$$\mu f_1 \sqrt{\frac{2}{\rho}} (p_n - p(t)) = \frac{V}{E} \frac{dp(t)}{dt} + \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho}} p(t). \quad (1)$$

Если в первом случае расход  $Q_0$ , а во втором – сечение дросселя  $f_0$  получат приращения  $\Delta Q$  и  $\Delta f_0$ , то уравнения примут вид

$$Q_0 + \Delta Q = \frac{V}{E} \frac{dp}{dt} + \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho}} (p_0 + \Delta p); \quad (2)$$

$$\mu f_1 \sqrt{\frac{2}{\rho}} (p_n - p_0 - \Delta p) = \frac{V}{E} \frac{dp}{dt} + \mu (f_0 - \Delta f_0) \sqrt{\frac{2}{\rho}} (p_0 + \Delta p). \quad (3)$$

При введении масштабов преобразования  $p_0$ ,  $Q_0$ ,  $T_0$  уравнения (1), (3) можно привести к безразмерному виду [9]

$$1 + \Delta \bar{Q} = \frac{T_v}{T_0} \frac{dp}{dt} + \sqrt{1 + \Delta p}; \quad (4)$$

$$\frac{1}{f_{01}} \sqrt{f_{01}^2 - \Delta \bar{p}} = \frac{T_v}{T_0} \frac{dp}{dt} + (1 - \Delta f_0) \sqrt{1 + \Delta \bar{p}}, \quad (5)$$

где  $T_v$  – постоянная времени наполнения (емкостная постоянная),  $T_v = \frac{p_0 V}{EQ_0}$ ;  $f_{01}$  – относительная площадь,  $f_{01} = f_0 / f_1$ .

На рис. 3 представлена принципиальная схема комбинации «два дросселя, два объема» с источником постоянного давления.

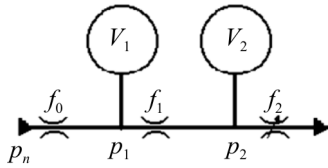


Рис. 3. Принципиальная схема устройства класса «Два дросселя, два объема» с источником постоянного давления

Рассматривается переходный процесс, возникающий при ступенчатом изменении проходного сечения выходного дросселя  $f_2$ . Безразмерная модель в форме Коши имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{p}_1}{dt} &= \frac{1}{T_{v1}} \left( \sqrt{1 - \bar{p}_{10} - \Delta \bar{p}_1} - \bar{f}_{10} \sqrt{\bar{p}_{10} + \Delta \bar{p}_1 - \bar{p}_{20} - \Delta \bar{p}_{20}} \right); \\ \frac{d\bar{p}_2}{dt} &= \frac{1}{T_{v2}} \left( \bar{f}_{10} \sqrt{\bar{p}_{10} + \Delta \bar{p}_1 - \bar{p}_{20} - \Delta \bar{p}_{20}} - \dots \right. \\ &\quad \left. (\bar{f}_{20} - \Delta \bar{f}_2) \sqrt{\bar{p}_{20} + \Delta \bar{p}_2} \right), \end{aligned} \right\} (6)$$

где  $\bar{T}_{v1}, \bar{T}_{v2}$  – относительные постоянные времени наполнения объемов,  $\bar{T}_{v1} = \frac{V_1 p_{11}}{EQ_m T_0}$ ,

$$\bar{T}_{v2} = \frac{V_2 p_{11}}{EQ_m T_0}; \bar{p}_{10}, \bar{p}_{20} - \text{относительные началь-}$$

ные давления в полостях объемов,  $\bar{p}_{10} = \frac{p_{10}}{p_{11}}$ ,

$$\bar{p}_{20} = \frac{p_{20}}{p_{11}}; \bar{f}_{10}, \bar{f}_{20} - \text{относительные площади,}$$

$$\bar{f}_{10} = \frac{f_1}{f_0}, \bar{f}_{20} = \frac{f_2}{f_0}; \Delta \bar{p}_1, \Delta \bar{p}_2 - \text{относительные}$$

приращения давлений в полостях;  $Q_m$  – максимальный расход через устройство,

$$Q_m = \mu f_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}} p_{11}.$$

Типичный переходный процесс показан на рис. 4; пунктирная линия – давление во второй камере, сплошная – в первой. Там же показана методика определения времени  $\bar{T}_b$ , характеризующего быстродействие (чем меньше время – тем выше быстродействие) устройства.

Быстродействие устройства можно определить в виде отношения

$$\bar{T}_b = \frac{\Delta \bar{p}_{2k}}{\max \left( \frac{d\bar{p}_2}{dt} \right)}, \quad (7)$$

где  $\Delta \bar{p}_{2k}$  – конечное значение возмущения давления;  $\max \left( \frac{d\bar{p}_2}{dt} \right)$  – значение максимальной

производной давления во второй камере, которая в данном случае совпадает с производной в начальный момент времени, т.е.  $\frac{d\bar{p}_2(0)}{dt}$ .

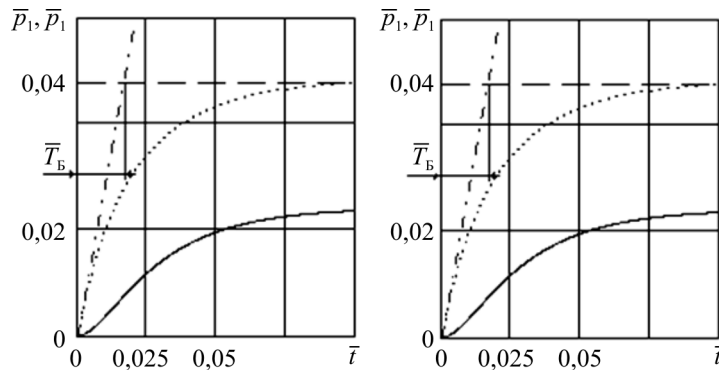


Рис. 4. Типичный переходный процесс устройства класса «Два дросселя, два объема» с источником постоянного давления

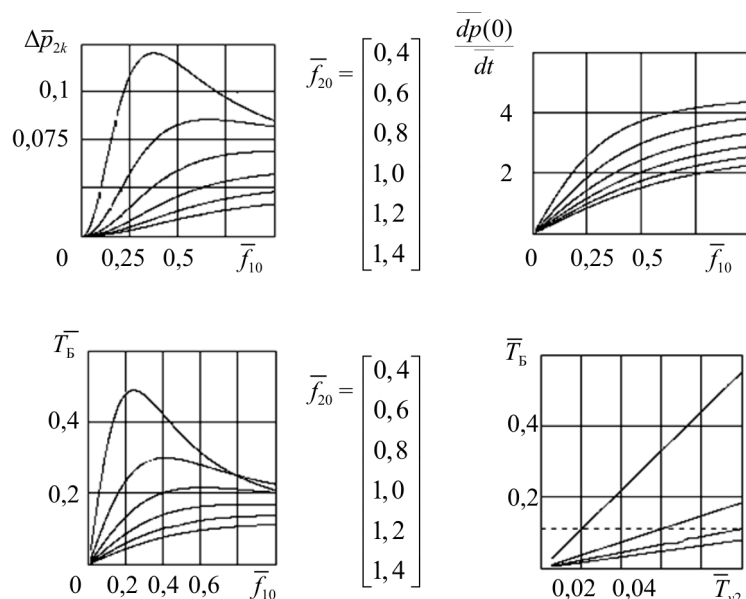


Рис. 5. Обобщенные характеристики «Два дросселя, два объема» с источником постоянного давления

Конечное значение давления определяется из уравнений (6) при условии равенства нулю всех производных в момент времени  $\bar{t} \rightarrow \infty$ :

$$\begin{cases} 1 - \bar{p}_{10} - \Delta \bar{p}_{1k} = \\ = f_{10}^2 (\bar{p}_{10} - \bar{p}_{20} + \Delta \bar{p}_{1k} - \Delta \bar{p}_{2k}); \\ f_{10}^2 (\bar{p}_{10} - \bar{p}_{20} + \Delta \bar{p}_{1k} - \Delta \bar{p}_{2k}) = \\ = (\bar{f}_{20} - \Delta \bar{f}_2) (\bar{p}_{20} + \Delta \bar{p}_{2k}). \end{cases} \quad (8)$$

Производная давления во второй камере в начальный момент времени определяется из второго уравнения (8) при условии равенства нулю всех величин:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{p}_2(0)}{d\bar{t}} &= \frac{1}{T_{v2}} \times \\ &\times (\bar{f}_{10} \sqrt{\bar{p}_{10} - \bar{p}_{20}} - (\bar{f}_{20} - \Delta \bar{f}_2) \sqrt{\bar{p}_{20}}). \end{aligned} \quad (9)$$

На рис. 5 показаны обобщенные характеристики для класса «Два дросселя, два объема» с источником постоянного давления, полученные решением (8) и (9)

Класс «Масса с пружиной – колебательное звено» (рис. 6) является родительским классом для всех остальных механических колебательных звеньев.

Уравнение вынужденного движения массы колебательного звена с учетом сил су-

хого и вязкого трения в отклонениях от равновесного состояния описывается дифференциальным уравнением второго порядка и имеет вид

$$m \frac{d^2 \Delta y}{dt^2} = \Delta F - c \Delta y - k_v \frac{d \Delta y}{dt} - F_c. \quad (10)$$

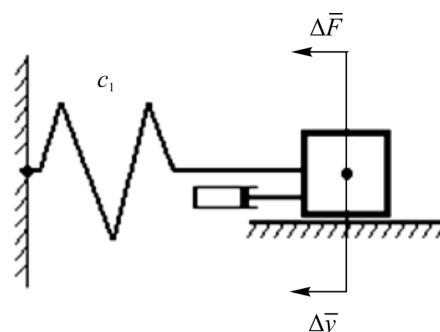


Рис. 6. Класс «Масса с пружиной – колебательное звено»

Далее приводим размерные переменные  $y, t, F$  к их характерным масштабам  $y_m, T, F_m$  соответственно и проводим элементарные преобразования:

$$\begin{aligned} m \frac{y_m}{T^2} \frac{d^2 \bar{\Delta y}}{d\bar{t}^2} &= F_m \bar{\Delta F} - \\ &- c y_m \bar{\Delta y} - k_v \frac{y_m}{T} \frac{d \bar{\Delta y}}{d\bar{t}} - F_c; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{d^2 \bar{\Delta y}}{d\bar{t}^2} = \frac{T^2}{m y_m} \times \left( F_m \Delta \bar{F} - c y_m \bar{\Delta y} - k_v \frac{y_m}{T} \frac{d \bar{\Delta y}}{d\bar{t}} - F_c \right). \quad (12)$$

В общем случае при работе в составе какого-либо устройства, в качестве масштаба времени  $T$  необходимо взять его характерную постоянную [10]. В случае же рассмотрения колебательного звена отдельно от других элементов в качестве масштаба времени  $T$  необходимо взять его механическую постоянную времени, и тогда следует, что  $\bar{T}_m = 1$ . В дальнейшем, однако, рассматриваем общий случай.

$$\frac{d^2 \bar{\Delta y}}{d\bar{t}^2} = \frac{T^2 c}{m} \times \left( \frac{F_m}{c y_m} \Delta \bar{F} - \bar{\Delta y} - \frac{k_v}{T c m} \frac{d \bar{\Delta y}}{d\bar{t}} - \frac{F_c}{c y_m} \right); \quad (13)$$

$$\frac{d^2 \bar{\Delta y}}{d\bar{t}^2} = \frac{T^2}{T_m^2} \left( k_F \Delta \bar{F} - \bar{\Delta y} - \frac{k_v T_m}{T m} \frac{d \bar{\Delta y}}{d\bar{t}} - \frac{F_c}{c y_m} \right). \quad (14)$$

Приводя к форме Коши, окончательно получим уравнение движения колебательного звена в безразмерном виде

$$\frac{d^2 \bar{\Delta y}}{d\bar{t}^2} = \frac{1}{T_m^2} \times \left( k_F \Delta \bar{F} - \bar{\Delta y} - \xi_b \frac{d \bar{\Delta y}}{d\bar{t}} - \xi_c \text{sign} \left( \frac{d \bar{\Delta y}}{d\bar{t}} \right) \right), \quad (15)$$

где безразмерные комплексы и критерии подобия:  $\bar{T}_m$  – механическая постоянная време-

ни,  $\bar{T}_m = \frac{T_m}{T} = \frac{\sqrt{m}}{T}$ ;  $k_F$  – силовой коэффициент – отношение максимального значения движущей силы к максимальному значению упругой силы,  $k_F = \frac{F_m}{c y_m}$ ;  $\xi_b$  – коэффициент относительного демпфирования, обусловленный вязким трением,  $\xi_b = \frac{k_v T_m}{m}$ ;  $\xi_c$  – коэффи-

циент относительного демпфирования, обусловленный сухим трением,  $\xi_c = \frac{F_c}{c y_m}$ .

Типичные переходные процессы движения массы после приложения различных тестовых воздействий показаны на рис. 7. Сплошной линией показаны процессы при значении относительного коэффициента демпфирования  $\xi_b = 0,5$ , пунктиром – при  $\xi_b = 0$ .

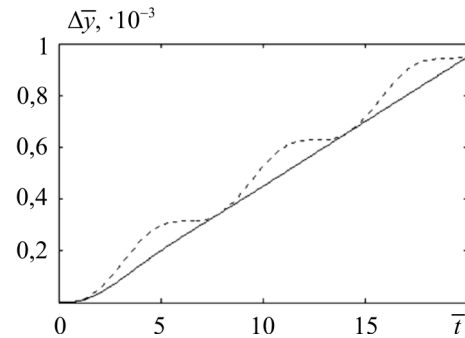


Рис. 7. Переходный процесс движения массы колебательного звена при

$$\Delta \bar{F} = \frac{1}{20} \bar{t} \quad (\bar{T}_m = 1, k_F = 1, \xi_c = 0, \Delta \bar{F} = 0)$$

В объектно-ориентированном представлении колебательное звено имеет семь полей данных и записывается как функция от параметров.

Проводя аналогичные действия над другими колебательными звеньями, получим объектно-ориентированную иерархию колебательных звеньев (рис. 8) [11].

Можно представить более сложные комбинации и классы. К примеру, классы, содержащие дроссели, объемы и массу с пружиной. Добавление массы с пружиной к объёму с дросселем приводит к образованию устройств с полным набором элементов [12]. Аналогичные устройства в электродинамике образуют так называемые  $RCL$ -цепочки. На рис. 9 показаны два примера.

Внешнее воздействие в первом случае организуется за счет изменения расхода, во втором – за счет изменения площади проходного сечения дросселя.

Динамическая модель системы с источником постоянного расхода при принятых в работе допущениях имеет вид

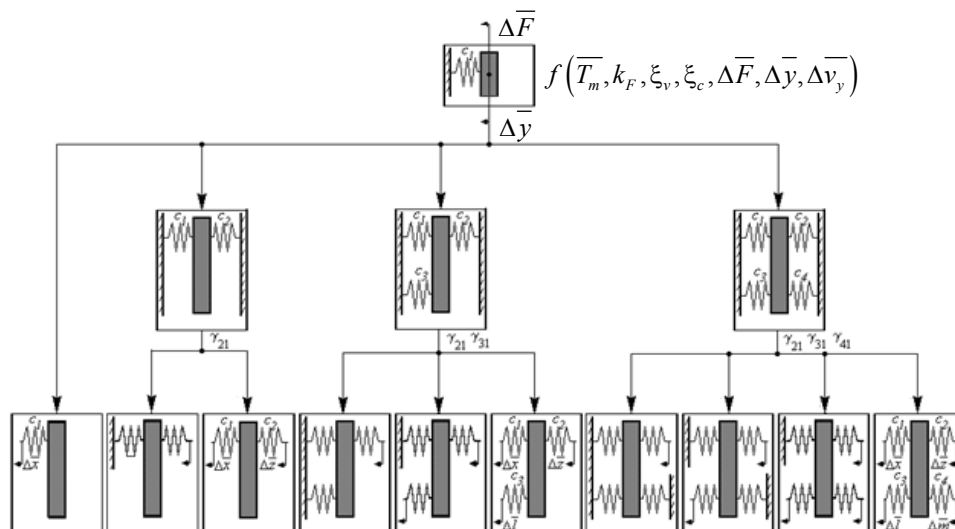


Рис. 8. Пример иерархии колебательных звеньев

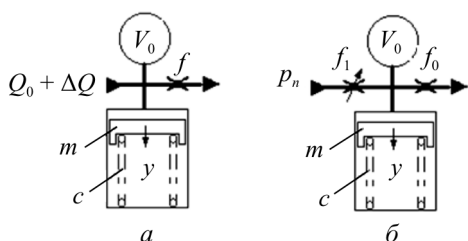


Рис. 9. Схемы, включающие объем, дроссель и массу с пружиной: *a* – система с объемным регулированием; *b* – система дроссельным регулированием

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = (p_0 + \Delta p) - c(y_n + y_0 + \Delta y) - k_v \frac{dy}{dt} - F_c \text{sign} \left( \frac{dy}{dt} \right); \quad (16)$$

$$Q_0 + \Delta Q = \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_0 + \Delta p)} + \frac{V_0}{E} \frac{dp}{dt} + F \frac{dy}{dt}.$$

В качестве масштабов преобразования принимаются значения параметров на стационарном исходном режиме:  $y_0$  и  $p_0$  и некоторое характерное время  $T_0$  [13]. Для удобства численного решения безразмерная модель представлена в форме Коши

$$\frac{d\bar{y}}{d\bar{t}} = \Delta\bar{v}; \quad (17)$$

$$\frac{d\bar{v}}{d\bar{t}} = \frac{1}{T_m} \left( (\bar{y}_n + 1) \Delta\bar{p} - \Delta\bar{y} - 2\xi_v \Delta\bar{v} - \xi_c \right);$$

$$\frac{d\bar{p}}{d\bar{t}} = \frac{1}{T_v} \left( 1 + \Delta\bar{Q} - \sqrt{1 + \Delta\bar{p}} - \bar{\tau} \frac{d\bar{y}}{d\bar{t}} \right),$$

где  $\bar{y}_n$  – относительная начальная затяжка,  $\bar{y}_n = \frac{y_n}{y_0}$ ;  $\bar{\tau}$  – относительная гидравлическая

постоянная времени,  $\bar{\tau} = \frac{\tau}{T_0}$ ;  $\tau$  – гидравли-

ческая постоянная времени,  $\tau = \frac{F y_0}{Q_0}$ .

Переходный процесс данного устройства отличается от устройства, включающего только объем и дроссель. Наличие инерционной нагрузки приводит к нечувствительности и при определенных условиях – к колебательным процессам. Конкретные характеристики переходного процесса определяются тремя критериями гомохронности –  $\bar{T}_m, \bar{T}_v, \bar{\tau}$  и относительной начальной затяжкой [4]. Нелинейный переходный процесс, кроме того, зависит от величины возмущения.

### Заключение

В целом, показана возможность рационализации численного исследования с помощью методов объектно-ориентированного программирования. Приведены примеры создания иерархии, родительского и нескольких производных (дочерних) классов дросселя, а также агрегации классов, включающих объем и массу с пружиной.

Объектно-ориентированная классификация гидромеханических устройств выгодно облегчает процесс проектирования, так как



появляется возможность гибкого учета множества факторов и их исследования, а также решения многопараметрических задач [14].

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

### Библиографический список

1. Молчанов А.Г., Громыко А.Н., Миронов А.А. Электро-, гидро- и пневмопривод: учеб. / Рос. гос. ун-т нефти и газа (Нац. исслед. ун-т) им. И.М. Губкина. – М., 2020. – 293 с.
2. Akhmedzyanov D.A., Kishalov A.E. Computer-aided design and construction development of the main elements of aviation engines // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 641. – P. 693–702.
3. Петров П.В., Целищев В.А. Численное моделирование работы систем автоматического управления авиационного газотурбинного двигателя на установившихся и переходных режимах // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. – 2019. – № 57. – С. 7–16.
4. Сунарчин Р.А. Выбор параметров гидромеханических регуляторов авиационных двигателей: учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по направлению 657400 «Гидравлическая, вакуумная и компрессорная техника», специальность 121100 «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2005. – 87 с.
5. Попов Л.К., Черкасский В.С., Коткин Г.Л. Компьютерное моделирование физических процессов с использованием MATLAB: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2020. (Сер. Высшее образование.)
6. Петров П.В., Целищев В.А. Основы алгоритмического моделирования нелинейных гидромеханических устройств: учеб. пособие / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2012. – 137 с.
7. Съянов С.Ю. Нелинейные и дискретные системы автоматического управления / Брянск. гос. техн. ун-т. – Брянск, 2019. – 203 с.
8. Кишалов А.Е., Власова Е.С. Параметрическая идентификация математической модели ГТД в системе DVIGwr // *Мавлютовские чтения: материалы Всерос. науч. конф.* / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2007. – Т. 1. – С. 56–57.
9. Петров П.В., Чернов Д.Д. Необходимость исследования нелинейных гидромеханических систем в обобщенных параметрах // *Справочник. Инженерный журнал с приложением*. – 2019. – № 4 (265). – С. 28–33.
10. Машков М.А., Матросов А.В., Сунарчин Р.А. Обобщенные характеристики электрогидравлического следящего привода // *Неделя науки СПбПУ: материалы науч. форума с междунар. участием, г. Санкт-Петербург, 30 ноября – 5 декабря 2015 г.* / Институт энергетики и транспортных систем. – СПб., 2015. – С. 91–93.
11. Сунарчин Р.А., Машков М.А., Матросов А.В. Неустойчивость и автоколебания в гидравлических следящих приводах // *Динамика и виброакустика*. – 2018. – Т. 4, № 3. – С. 16–25.
12. Сунарчин Р.А. Проектирование гидромеханических регуляторов авиационных двигателей: учеб. пособие для студ. всех форм обучения, обучающихся по направлению 657400 «Гидравлическая, вакуумная и компрессорная техника», специальность 121100 «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2008. – 155 с.
13. Гимранов Э.Г., Сунарчин Р.А., Хасанова Л.М. Обобщенные динамические характеристики математических моделей гидроагрегатов // *Вестник Пермского государственного технического университета. Аэрокосмическая техника*. – 2000. – № 5. – С. 99–106.
14. 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. Molchanov A.G., Gromyko A.N., Mironov A.A. Electro-, hydro-and pneumatic drive: Textbook. – Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), 2020. 293 p.
2. Akhmedzyanov D.A., Kishalov A.E. Computer-Aided Design and Construction Development of the Main Elements of Aviation Engines. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2020, vol. 641, pp. 693-702.
3. Petrov P.V., Tselishchev V.A. Numerical modeling of the operation of automatic control systems of an aviation gas turbine engine in steady-state and transient modes. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering*. 2019, no. 57, pp. 7-16.

4. Sunarchin R.A. The choice of parameters of hydro-mechanical regulators of aircraft engines: textbook. manual for university students studying in the direction 657400 "Hydraulic, vacuum. and the compressor. technique "specialty 121100" Hydraulic machines, hydraulic drives and hydropneumoautomatics. Ufa: Ufa State University. aviac. tech. un-t, 2005. 87 p.
5. Popov L.K., Cherkassky V.S., Kotkin G.L. Computer modeling of physical processes using MATLAB: A textbook. 2nd ed., ispr. and add. Moscow: Yurayt Publishing House, 2020. (Higher education.)
6. Petrov P.V., Tselishchev V.A. Fundamentals of algorithmic modeling of nonlinear hydromechanical devices: textbook. stipend. Ufa: UGATU, 2012. 137 p.
7. Syanov S.Yu. Nonlinear and discrete automatic control systems. Bryansk: Bryansk state technical University, 2019. 203 p.
8. Kislov A.E., Vlasov E.S. Parametric identification of mathematical model of GTE in the system DVIGwp. *Mavlutova read: materialy vseros. nauch. Conf.* Ufa: UGATU, 2007, vol. 1, pp. 56-57.
9. Petrov P.V., Chernov D.D. The necessity of studying nonlinear hydromechanical systems in generalized parameters. Handbook. Engineering magazine with an appendix. 2019, no. 4 (265), pp. 28-33
10. Mashkov M.A., Matrosov A.V., Sunarchin R.A. Generalized characteristics of an electrohydraulic tracking drive. *SPbPU Science Week: Materials of the scientific forum with international participation.* Institute of Energy and Transport Systems, St. Petersburg, November 30-05, 2015. St. Petersburg, 2015, pp. 91-93.
11. Sunarchin R.A., Mashkov M.A., Matrosov A.V. Instability and self-oscillation in hydraulic tracking drives. *Dynamics and vibroacoustics.* 2018, vol. 4, no. 3, pp. 16-25.
12. Sunarchin R.A. Design of hydro-mechanical regulators of aircraft engines: a textbook for students of all forms of education studying in the direction 657400 «Hydraulic, vacuum and compressor equipment» specialty 121100 "Hydraulic machines, hydraulic drives and hydropneumoautomatics". Ufa State Aviation Technical University. Ufa, 2008. 155 p.
13. Gimranov E.G., Sunarchin R.A., Khasanova L.M. Generalized dynamic characteristics of mathematical models of hydraulic units. *Bulletin of PSTU. Aerospace engineering.* 2000, no. 5, pp. 99-106.
14. Akhmedzyanov D.A., Kishalov A.E., Shabelnik Yu.A., Markina K.V., Polezhaev N.I. Review and analysis of flow parameters in the main nodes of aircraft engines. *Youth Bulletin of UGATU.* 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, зав-кафедрой «Прикладная гидромеханика» ФГБОУ ВО УГАТУ (450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: pgl.ugatu@mail.ru).

**Кудерко Дмитрий Александрович** (Москва, Россия) – кандидат технических наук, директор центра проектирования АО «Технодинамика» (115184, г. Москва, ул. Большая Татарская, д. 35, стр. 5, e-mail: dm\_kuderko@mail.ru).

#### About the authors

**Pavel V. Petrov** (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor of Applied Hydromechanics Department, Ufa State Aviation Technical University (11, K. Marksa st., Ufa, 450008, Russian Federation; e-mail: pgl.petrov@mail.ru).

**Vladimir A. Tselishev** (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).

**Dmitry A. Kuderko** (Moscow, Russian Federation) – Csc in Technical Sciences, Head of R@D center JSC "Technodinamika" (35, p. 5, Bolshaya Tatarskaya st., Moscow, 115184, Russian Federation; e-mail: dm\_kuderko@mail.ru).

Получено 16.09.2021