

УДК 681.5

## НОВЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ УСТАНОВКАМИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Денисова Е.В., Черникова М.А.

*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН, Уфа,  
e-mail: denisova.anrb@mail.ru, chernikovamarina18@gmail.com*

В работе предложен новый подход к проектированию систем автоматического управления силовыми установками беспилотных летательных аппаратов. Показаны недостатки подобных систем управления и проблемы, с которыми приходится сталкиваться при проектировании систем подобного класса. Для усовершенствования системы управления силовой установкой разработаны математические модели объекта управления и агрегата дозирования топлива. Математическую модель двигателя предлагается представить в виде взаимосвязанных матриц, построенных на основе динамической характеристики, а к математической модели исполнительской части предлагается использовать подход совокупности двух уравнений: движение подвижных элементов описываются с помощью уравнения Ньютона, а движение потоков жидкости (топлива) – с помощью уравнения Навье-Стокса. С помощью полученных моделей в дальнейшем будут синтезированы алгоритмы управления силовой установкой беспилотного летательного аппарата.

**Ключевые слова:** система автоматического управления, силовая установка, математическая модель, агрегат дозирования топлива, беспилотный летательный аппарат

## A NEW APPROACH TO THE DESIGN OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Denisova E.V., Chernikova M.A.

*Institute of Mechanics R.R. Mavlyutova Ufa Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Ufa,  
e-mail: denisova.anrb@mail.ru, chernikovamarina18@gmail.com*

In work the new design approach of systems of automatic control of the power plant of an unmanned aerial vehicle is described. This approach is urgent as suggests to consider the dynamic processes happening in the aggregate of dispensing of fuel and the engine. Today their dynamics which influences work of all system of automatic control isn't considered. It is offered to enter mathematical models of the aggregate of dispensing of fuel and the engine into structure of system. The mathematical model of the engine is entered in the form of the matrixes formed of a dynamic characteristics. The model of the aggregate of dispensing of fuel considers Newton and Navier-Stokes's equations. The received results confirm legitimacy of the new design approach of system of automatic control of the power plant.

**Keywords:** automatic control system, power plant, the mathematical model, the fuel metering unit, unmanned aerial vehicles

В общем понимании беспилотный летательный аппарат (БПЛА) – это летательный аппарат без экипажа на борту. Различают беспилотные летательные аппараты: неуправляемые; автоматические; беспилотные дистанционно-пилотируемые летательные аппараты. А также БПЛА принято делить по таким взаимосвязанным параметрам, как масса, время, дальность и высота полёта.

Преимущества БПЛА в том, что имеется возможность использования различных сочетаний высот и скоростей полета: основную часть траектории аппарат летит на большой высоте при малом аэродинамическом сопротивлении, а перед целью выходит на малую высоту с максимально возможной скоростью полета, что затрудняет перехват. Предусмотрена также возможность маневра на любом участке траектории.

В качестве силовой установки (СУ) применяются короткоресурсные или прямоточные воздушно-реактивные двигатели. Системы автоматического управления (САУ) СУ были спроектированы как самые

простые, в классе односвязных САУ, их техническая реализация – электронно-гидравлическая с резервными гидромеханическими каналами. При синтезе алгоритмов управления учитывались только изменения режимов работы и условий применения СУ, динамика агрегатов дозирования топлива (АДТ) не учитывались. Тем не менее, практический опыт и результаты натурных и стендовых испытаний показали, что динамические процессы в системе топливопитания оказывают значительное влияние на динамику СУ. Автономные исследования агрегатов топливопитания на полунатурных стендах подтвердили, что переходные процессы в гидроавтоматике по времени соразмеримы с динамическими процессами в СУ для БПЛА, в отличие от транспортных или пассажирских летательных аппаратов (ЛА) [1]. Тем самым подтверждается актуальность выбранной темы.

Анализ результатов натурных испытаний позволил сделать вывод, что чаще всего проявлялись следующие недостатки

в работе СУ, связанные с функционированием САУ: появление автоколебательных режимов на отдельных участках траектории полета, что недопустимо по условиям эксплуатации любого ЛА; отказы агрегатов топливопитания, связанные с изменением физических свойств топлива (перегревом, кавитацией и т.п.) в процессе эксплуатации изделия.

Появление новых типов ЛА и двигателей для них, введение в контуры управления высокоточных вычислительных машин поставило перед разработчиками систем управления следующую проблему: характеристики управляющей (электронной) и исполнительной (гидромеханической) частей системы должны быть согласованы или хотя бы не противоречить друг другу. При этом в развитии методов проектирования и методов исследования исполнительных гидромеханических механизмов наблюдалось заметное отставание [3].

Целью работы является обоснование нового подхода к проектированию САУ СУ БПЛА, основанного на введении математических моделей СУ и агрегата топливопитания в контур управления частотой вращения ротора турбокомпрессора, при этом алгоритм управления корректируется по комплексу получаемых ошибок, как по расходу топлива, так и по частоте вращения.

Для устранения недостатков в работе САУ предлагается решить следующие задачи:

- разработать математические модели объекта управления, способные адекватно отображать поведение объекта при изменении режима работы и условий применения;
- разработать математические модели АДТ с учетом их конструктивных особенностей и изменения физических свойств рабочей жидкости;
- разработать методы анализа и синтеза САУ предложенного типа.

Рассмотрим последовательно методологию решения каждой из поставленных задач.

### Методы решения

#### *Математические модели объекта управления*

Математическая модель объекта управления – СУ – представляется в виде динамических уравнений, которые записываются в дифференциальной, интегральной и разностной формах [3].

Существующие типы математических моделей силовых установок можно разделить на следующие виды: полная нелинейная модель; линейная математическая модель в физических переменных; кусочно-линейная модель; быстросчетная динамическая

модель с переменными коэффициентами; динамическая модель на базе динамической характеристики (расчетной или экспериментальной) СУ; нейросетевая модель.

Каждая из вышеперечисленных моделей обладает как своими достоинствами, так и конкретными недостатками. Не перечисляя их, отметим тот факт, что для проектирования САУ необходимы только динамические нелинейные модели СУ. В основу таких моделей положена динамическая характеристика (ДХ) СУ, которую получают или расчетным (с помощью полноразмерной модели), или экспериментальным путем.

Как объект управления СУ можно охарактеризовать передаточным звеном, у которого входной координатой является расход топлива ( $\bar{G}_T$ ), а выходной – частота вращения ротора турбокомпрессора ( $\bar{n}$ ), при этом температура газа, давление воздуха за компрессором и другие величины рассматриваются как контролируемые параметры (рис. 1а).

Именно такой подход используется в настоящее время на профильных предприятиях, при этом синтез алгоритмов управления производится для заданной расчетной точки, а на других режимах лишь проверяется качество управления по заранее заданным критериям.

Предлагается использовать новый подход к построению динамической модели СУ для БПЛА. При моделировании предполагается, что динамические кривые будут представлены в виде совокупности трех взаимосвязанных матриц: по частоте вращения ротора турбокомпрессора, по расходу топлива, по ускорению ротора турбокомпрессора.

В зависимости от режима работы и условий применения выбирается та или иная матрица, расчет проводится как в физических, так и в приведенных параметрах. Матрица по расходу топлива представляет собой составную матрицу вида

$$A_{\bar{G}_T} = \begin{pmatrix} \bar{G}_T & \bar{n} & \bar{\dot{n}} \end{pmatrix}.$$

Взяв определенное значение относительного расхода топлива  $\bar{G}_T$ , которое принимается за константу, в матрицу заносятся значения  $\bar{n}$  и  $\bar{\dot{n}}$ , полученные в точках пересечения прямой с кривыми линиями динамической характеристики (рис. 1б). Этот процесс повторяется многократно в зависимости от выбранной точности расчета. Аналогично составляются две другие матрицы по ускорению ротора  $\bar{\dot{n}}$  и по частоте вращения  $\bar{n}$  турбокомпрессора. Они имеют вид

$$A_{\bar{n}} = \begin{pmatrix} \bar{\dot{n}} & \bar{n} & \bar{G}_T \end{pmatrix} \text{ и } A_{\bar{\dot{n}}} = \begin{pmatrix} \bar{n} & \bar{G}_T & \bar{\dot{n}} \end{pmatrix}$$

соответственно. Таким образом, обеспечивается плавный переход с режима на режим

работы СУ, начиная с режима запуска и до выхода на режим стабилизации, а введение как физических, так и приведенных параметров позволяет моделировать и условия эксплуатации СУ. Данный подход положен в основу математической модели СУ для БПЛА.

реализации, тем более что матричный метод используется и для моделирования объекта управления – двигателя [4].

Суть метода в том, что принципиальная (конструкторская) схема АДТ заменяется ориентированным графом, то есть сохраняется связь между реальной конструкци-

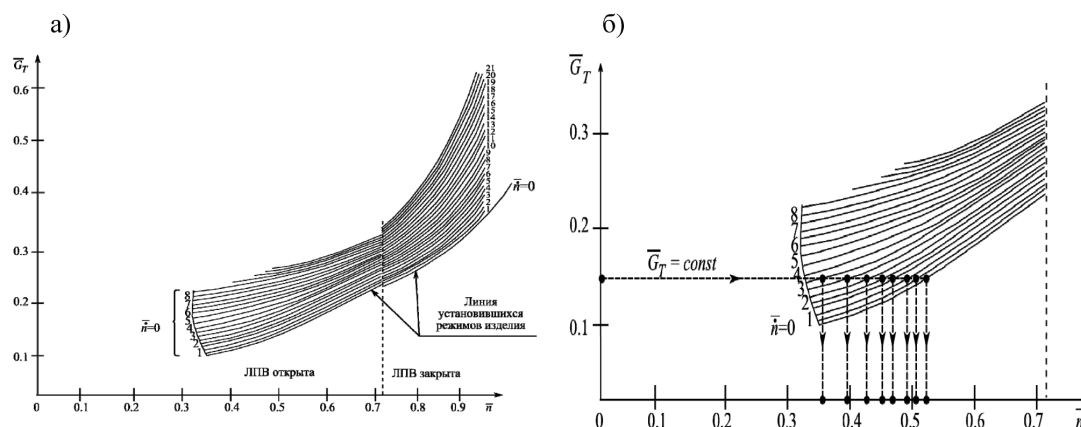


Рис. 1: а – динамическая характеристика силовой установки БПЛА:

$\bar{G}_T$  – относительное значение расхода топлива,  $\bar{n}$  – относительная частота вращения ротора,  $\bar{\ddot{n}}$  – относительное ускорение ротора;

б – матрица значений по расходу топлива ( $A_{\bar{G}_T}$ )

#### Математические модели исполнительных механизмов

Обычно при моделировании агрегата дозирования топлива (АДТ) использовалась нелинейная система дифференциальных уравнений, описывающих баланс сил на сервопоршне дроссельной иглы как основном элементе АДТ, а также баланс расходов в проточных полостях подвижных элементов. Такой подход позволял получить передаточную функцию элемента в виде аperiodического или колебательного звена. При изменении режима работы элемента его параметры менялись, что снижало качество управления двигателем и требовало изменения алгоритмов управления.

Подобный метод дает приближенный результат, не поддается формализации и, следовательно, не может быть автоматизирован. Кроме того, в процессе получения математической формулы теряется связь с реальной конструкцией АДТ. Поэтому значительный интерес представляет сетевой метод расчета АДТ, позволяющий производить расчеты посредством матричных операций, которые относительно легко формализуются и довольно просты в машинной

ей и математическим описанием. Метод хорошо зарекомендовал себя для расчета статических характеристик АДТ как элемента САУ СУ, но динамику просчитать достаточно сложно в силу того, что перемещение любого элемента (поршня) приводит к изменению динамических составляющих потоков жидкости, перетекающих из одной полости в другую.

Для получения динамической модели АДТ предложено использовать следующий подход: во-первых, движение подвижных элементов описывать с помощью уравнения Ньютона; во-вторых, движение потоков жидкости (топлива) описывать с помощью уравнения Навье-Стокса).

Таким образом, учитываются динамические параметры агрегата с учетом его конструкторских особенностей, а также физико-механических свойств жидкости (температуры, вязкости, плотности и т.д.).

Приведем основные результаты, полученные ранее, для достаточно подробной аргументации предлагаемого подхода. Показаны зависимость координаты положения поршня от времени для различных значений силы трения  $F_0$  (рис. 2а) и зависимость установившейся амплитуды колебаний поршня от силы трения (рис. 2б).

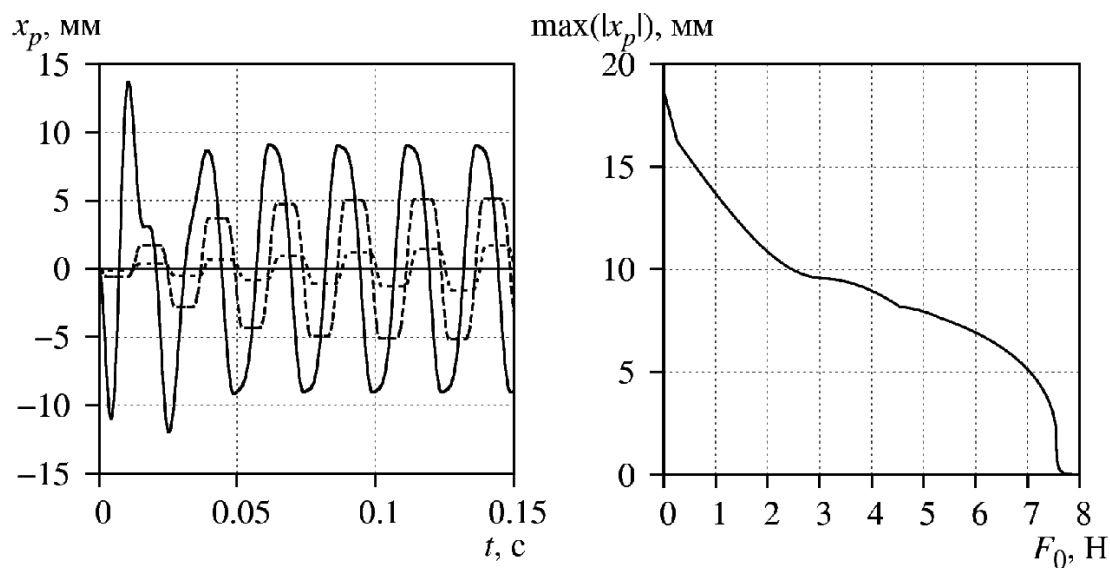


Рис. 2. Зависимость координаты поршня при  $F_0 = 1$  Н (сплошная линия),  $F_0 = 7$  Н (штриховая линия),  $F_0 = 7.5$  Н (пунктирная линия) (а) и силы трения (б) от времени

Заметим, что в процессе работы агрегата возможно появление различных параметрических неопределенностей, в том числе появление так называемой «метелки» – расщепления статических характеристик, что в принципе недопустимо (рис. 3).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что динамические процессы в элементах топливной автоматики должны учитываться при синтезе алгоритмов системы управления, но при этом необходимо отделить динамические процессы в СУ от

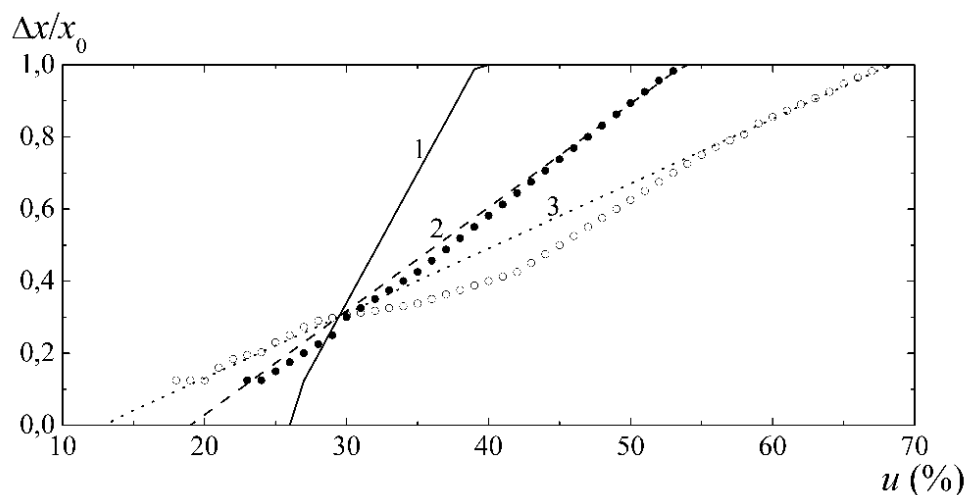


Рис. 3. Отклонение сервопоршня от начального положения  $\Delta x / x_0$  в зависимости от управляющего сигнала  $u$  и для различных значений жиклеров  $s_{ex,i} / a$ ,  $s_{cl,i} / a$  ( $i = 1, 2$ ): 1 –  $a = 1$ ; 2 –  $a = 2.5$ ; 3 –  $a = 4$ , полученные при численных расчетах (линии) и экспериментально (круги)

ется только для стационарного линейного объекта.

Для устранения указанного недостатка, предлагается использовать следующий подход: ввести в структуру САУ многорежимные динамические модели непосредственно самой СУ и АДТ, также сформировать многоканальный адаптивный контур коррекции сигналов, в который вводятся сигналы как с реального устройства (СУ и АДТ), так и с их динамических моделей. Контур коррекции в свою очередь включает в себя логический блок (ЛБ), дифференциатор, демультимплексор, электронный регулятор и программу управления.

Структурная схема предложенной САУ СУ БПЛА приведена на рис. 4.

В многоканальный адаптивный контур коррекции поступают следующие сигналы: рассогласование между реальными и модельными характеристиками СУ и АДТ, а также рассогласование между объединенными реальными и модельными характеристиками СУ и АДТ. Как видно из схемы (рис. 4) модель СУ введена в схему дважды, в первом случае сигнал поступает от модели АДТ для того чтобы получить рассогласование между реальными АДТ, СУ и их моделями; во втором случае – сигнал поступает от реального АДТ, проходя через датчики 1, чтобы получить рассогласование между реальным СУ и его моделью.

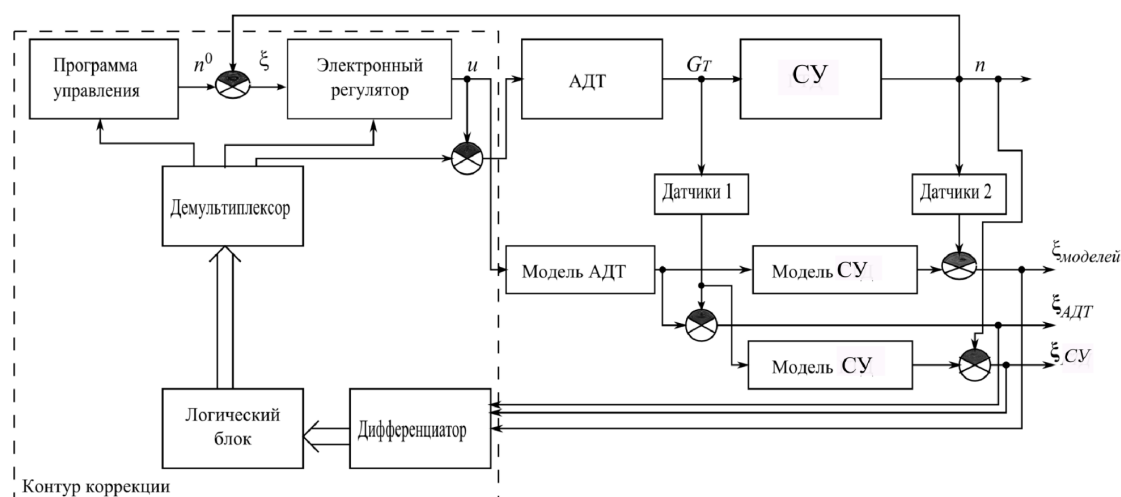


Рис. 4. Предлагаемая САУ СУ БПЛА, в которую входит АДТ, СУ, датчики 1 и датчики 2, модель АДТ, модель СУ, контур коррекции

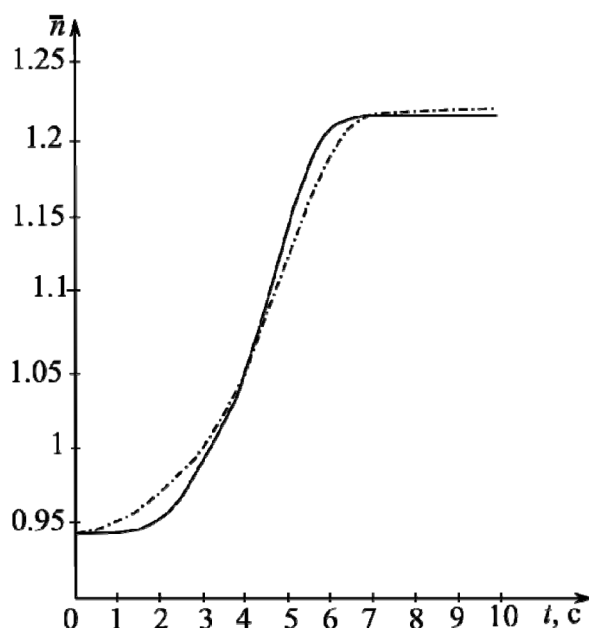


Рис. 5. Результат моделирования предложенной САУ СУ БПЛА:  
(— —) полученная зависимость относительной частоты вращения  $\bar{n}$  от времени  $t$ ;  
(—) заданная зависимость относительной частоты вращения  $\bar{n}$  от времени  $t$

Более подробное описание работы ЛБ рассмотрено в работе [2].

**Результаты.** Используя известные подходы к моделированию САУ в среде MATLAB, была исследована в первом приближении система, представленная на рис. 4. Результаты моделирования САУ (рис. 5), представлены в виде зависимости относительной частоты вращения ротора турбокомпрессора от времени. Одна из них получена с помощью моделирования САУ СУ, а вторая – задана.

Полученные результаты подтверждают правомерность нового подхода к проектированию САУ СУ БПЛА, поскольку погрешность не превышает 2% от текущего значения частоты вращения ротора турбокомпрессора по сравнению с заданной характеристикой. На разработанную структуру САУ получен патент [5].

### Заключение

В статье приведено обоснование нового подхода к проектированию САУ СУ БПЛА, основанного на введении математических моделей СУ и АДТ в контур управ-

ления частотой вращения ротора турбокомпрессора, при этом алгоритм управления корректируется по комплексу получаемых ошибок, как по расходу топлива, так и по частоте вращения.

### Список литературы

1. Денисова Е.В., Насибуллаева Э.Ш., Насибуллаев И.Ш. Исследование динамических процессов в элементах топливной автоматики // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 5(158). – С. 31-36.
2. Денисова Е.В., Черникова М.А. Система автоматического управления газотурбинным двигателем с введением математических моделей в контур управления // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 9-2. – С. 243-248
3. Добрянский Г.В., Мартынова Т.С. Динамика авиационных ГТД. – М.: Машиностроение, 1994. – 304 с.
4. Проблемы проектирования и развития систем автоматического управления и контроля ГТД / С.Т. Кусимов, Б.Г. Ильясов, В.И. Васильев и др. – М.: Машиностроение, 1999. – 609 с.
5. Патент РФ №2009126918/06, 13.07.2009.
6. Денисова Е.В., Даринцев О.В., Насибуллаева Э.Ш., Черникова М.А., Черников А.И. Система автоматического регулирования газотурбинного двигателя // Патент России № 2412366. 2011. Бюл. № 5.
7. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 296 с.