

УДК 681.51

НОВЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ АДАПТИВНЫХ САУ КОРОТКОРЕСУРСНЫМ ГТД¹

Денисова Е. В., Насибуллаева Э. Ш., Черникова М. А.

Институт механики УНЦ РАН, Уфа

Аннотация. В работе представлен новый подход к управлению силовыми установками беспилотными летательными аппаратами, приведена структурная схема предлагаемой САУ ГТД, приведены предварительные результаты моделирования.

1. Введение

Короткоресурсный газотурбинный двигатель для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) относится к классу нестационарных многосвязных и многорежимных объектов управления. Для систем автоматического управления (САУ) объектами подобного класса характерен значительный уровень сложности широкого спектра выполняемых задач, а также требования высокой эффективности управления.

Для обеспечения поставленных противоречивых задач системе автоматического управления целесообразно проектировать в классе адаптивных САУ, при этом следует учитывать, что динамические процессы, протекающие в короткоресурсных ГТД, имеют достаточно высокую скорость (5–7 секунд от момента розжига камеры сгорания до выхода на заданный режим). Параметры,

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований ОЭМПУ РАН (проект № 15) и РФФИ (гранты №№ 11-01-97007, 11-08-00823)

характеризующие режимы работы двигателя и внешние условия применения БПЛА, изменяются в десятки раз, что приводит к таким же изменениям динамических параметров объекта управления. Кроме того, экспериментальные данные показывают, что динамические процессы, происходящие в агрегатах топливопитания, по своей сложности не уступают процессам, протекающим в двигателе [1].

2. Постановка задачи

Известные адаптивные системы автоматического управления ГТД разделяются на два класса: поисковые и беспойсковые системы. В первом случае алгоритм управления задан заранее с точностью до параметров, и требуется определить лишь алгоритм адаптации согласно заданному критерию (широко используется для управления летательными аппаратами общего назначения, т.к. в силу их инерционности время адаптации значительно меньше времени переходного процесса в системе автоматического управления). Во втором случае синтезируются и алгоритм управления, и алгоритм адаптации (беспоисковые самонастраивающиеся системы с эталонной моделью, которая строится на базе уравнений, описывающих неизменяемую часть системы управления) [2].

В рассмотренных в ходе анализа системах достаточно часто используется «обобщенный настраиваемый объект» (ОНО), который представляет собой совокупность собственно объекта управления (двигателя) и исполнительной части системы: агрегата дозирования топлива (АДТ), а также регулятора параметрического управления (РПУ). При этом двигатель и АДТ описываются как единый объект управления уравнениями невысокого порядка (не выше третьего), что приводит к появлению существенных недостатков при работе на предельно допустимых режимах, отличных от расчетной точки.

Структурная схема САУ подобного класса приведена на рис. 1.

Данная САУ обладает следующими недостатками:

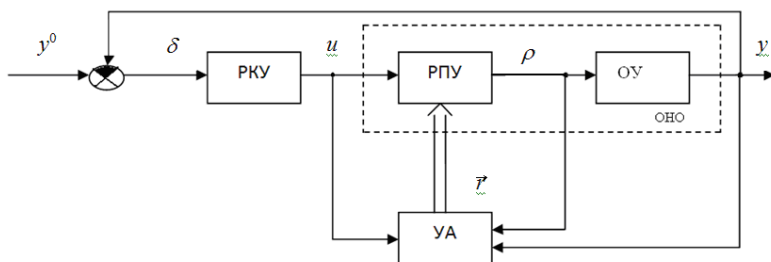


Рис. 1. Схема основных элементов беспереисковой самонастраивающейся системы (БНС), в которую входит регулятор координатного управления (РКУ), ОУ, состоящий из объекта управления (ОУ) и регулятора параметрического управления (РПУ), а также устройства адаптации (УА)

– задача адаптации успешно решается только для стационарного линейного объекта;

– регулятор параметрической адаптации получается физически не реализуемым, поскольку невозможно получить чистые производные от управляющего воздействия.

С целью устранения указанных недостатков предлагается следующий подход: использовать информацию, получаемую за счет сравнения сигналов с многорежимных разделенных моделей двигателя и агрегата дозирования топлива, а также с реальных датчиков. Далее строится многоканальный адаптивный контур коррекции с использованием полученной информации. В контуре коррекции в соответствии с выбранными критериями, задаваемыми на базе аналитических зависимостей, нечеткой логики или нейронных сетей, сигналы рассогласования между реальными и модельными характеристиками ГТД и АДТ, экспериментальные (стендовые) характеристики преобразуются во входные сигналы в логический блок (ЛБ), включающий дифференциатор для получения скорости изменения рассогласований. ЛБ формирует в соответствии с синтезированным законом сигнал коррекции параметров электронного регулятора и, при необходимости, программы управления и подает на вход демульти-

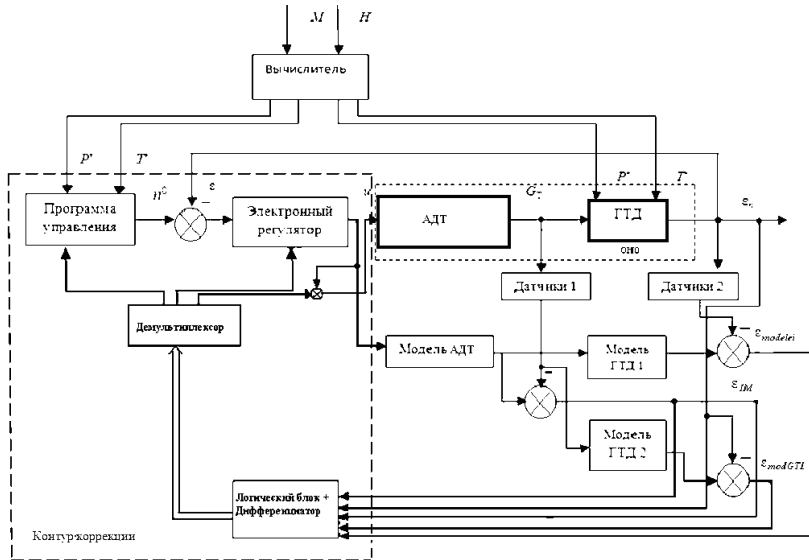


Рис. 2. Структурная схема предлагаемой САУ ГТД

плексора, который распределяет сигналы по элементам управления: программы управления, электронному регулятору.

Структурная схема предлагаемой САУ приведена на рис. 2.

Представленная САУ ГТД также, как в концепции ОНО, содержит электронный регулятор и объект управления (ОУ), но в данном подходе объект управления разделен на агрегат дозирования топлива и ГТД. Для получения искомой ошибки в систему введены модели АДТ и ГТД. Можно получить ошибку АДТ, которая представляет собой рассогласование между АДТ и его моделью, ошибку ГТД — рассогласование между ГТД и его моделью, ошибку моделей АДТ и ГТД — рассогласование между АДТ и ГТД и их моделями. Полученные ошибки поступают в логический блок, в котором присутствует дифференциатор для учета скорости изменения ошибок. В ЛБ происходит процесс выбора способа коррекции для дальнейшего повышения качества функционирования системы.

В зависимости от того, какие сигналы поступают в ЛБ, про-

исходит выбор возможных вариантов изменений в системе:

1. структурный;
2. параметрический;
3. комплексный.

Логический блок анализирует входные данные и выбирает необходимый способ корректировки, например для электронного регулятора, передаточная функция которого задана в виде:

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1},$$
 где k — коэффициент передачи и T — постоянная времени, можно изменять или k , или T , или оба параметра одновременно. Структурные изменения означают, что в САУ подвергаются изменению сами элементы системы, например вводится звено форсирования сигнала с целью улучшения динамики системы. Комплексный подход включает в себя оба предыдущих способа.

На разработанную структуру САУ получен патент, построенная в грубом приближении система автоматического управления частотой вращения ротора газотурбинного двигателя для беспилотного летательного аппарата. В основу всережимной модели ГТД положена его динамическая характеристика, при этом отдельно рассматриваются следующие режимы: холодная прокрутка, розжиг, разгон, стабилизация. В разработанной модели учтены расслоения динамической характеристики по «геометрии» двигателя, скорости полета (M полета), числу Рейнольдса.

На разработанную структуру САУ получен патент, построенная в грубом приближении система автоматического управления частотой вращения ротора газотурбинного двигателя для беспилотного летательного аппарата. В основу всережимной модели ГТД положена его динамическая характеристика, при этом отдельно рассматриваются следующие режимы: холодная прокрутка, розжиг, разгон, стабилизация. В разработанной модели учтены расслоения динамической характеристики по «геометрии» двигателя, скорости полета (M полета), числу Рейнольдса.

Разработаны и исследованы динамические модели функционирования агрегата дозирования топлива, включающего сервопоршень дроссельной иглы и клапан постоянного перепада. Исследовано влияние силы, действующей со стороны дроссельной иглы на сервопоршень, а также проведен анализ ускорения и эффективности параллельного алгоритма для рассмотренных задач.

При исследовании моделей АДТ и ГТД получены следующие результаты:

– характеристики АДТ как элемента САУ носят нелинейный и неоднородный характер, что должно быть учтено при синтезе

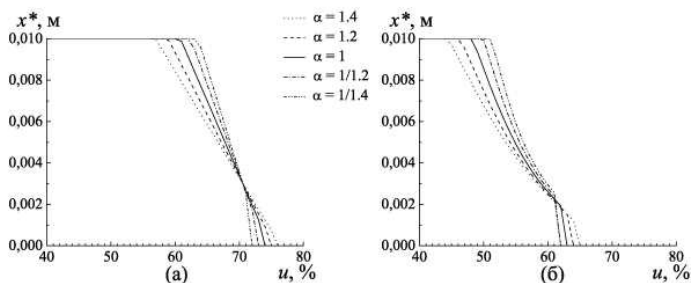


Рис. 3. Зависимость перемещения поршня x^* в момент времени $t = 10T$ от управляющего сигнала u для различных значений жиклеров $s_{вх,i}^{new} = \frac{s_{вх,i}}{\alpha}$, $s_{сл,i}^{new} = \frac{s_{сл,i}}{\alpha}$ ($i = 1, 2$): (а) для модели с одним элементом; (б) для модели с двумя элементами

алгоритмов управления двигательной установкой, а также алгоритмов адаптации;

– возможно возникновение кавитационных режимов в полостях АДТ, что также негативно сказывается на функционировании двигательной установки. Это утверждение подтверждает правомерность выбранного подхода: разделяем сложный нелинейный объект на простые компоненты для того, чтобы можно было подробно изучить их свойства и использовать при выборе алгоритма адаптации.

Разработанные нелинейные модели использованы при синтезе нечеткого регулятора, что будет описано в следующей работе.

3. Требования к математической модели АДТ

Исполнительным механизмом в системе является агрегат дозирования топлива. Ранее его функционирование было подробно изложено в работе [2].

Для соответствия математической модели АДТ его реальным характеристикам необходимо производить моделирование с учетом особенностей протекания реальных процессов (рис. 3), то есть отклонение сервопоршня от начального положения $x^* =$

$x(10T)$ за ~ 10 периодов колебаний управляющей функции в зависимости от управляющего сигнала u при одновременном изменении величин жиклеров $s_{\text{вх},i}$, $s_{\text{сл},i}$ ($i = 1, 2$), где T — период выбранной при ШИМ способе управления АДТ. Также необходимо учесть при моделировании системы, что получается расслоение перемещения от управляющего сигнала. Такое расслоение (так называемая «метелка») недопустимо при функционировании системы управления, так как приводит к неоднородности зависимости перемещения (а, следовательно, и расхода топлива в двигатель) от управляющего сигнала u . В конечном итоге, подобное явление приводит к появлению автоколебательных режимов, что может привести к возникновению аварийной ситуации.

Наиболее важным требованием, предъявляемым к математической модели АДТ, является ее адекватность реальному агрегату.

При моделировании АДТ не все параметры учитываются, в данном случае модель АДТ должна учитывать отклонение сервопоршня от начального положения в зависимости от первоначального положения и изменения величин жиклеров. Такие параметры, как состав материалов, из которых изготовлен АДТ и вязкость рабочей жидкости, на данном этапе не учитывались, поэтому предполагается учет физико-механических свойств подвижных элементов в АДТ, а также свойств топлива в будущем.

4. Требования к математической модели ГТД

Как объект управления короткоресурсный двигатель описывается звеном, у которого входной координатой является расход топлива, а выходной — частота вращения ротора турбокомпрессора, при этом температура газа, давление воздуха за компрессором и другие величины в данном случае не учитываются.

Исходя из выше изложенного, динамическую характеристику ГТД (рис. 4) можно рассматривать как семейство кривых в системе координат (G_T, n, \dot{n}) , где n — приведенная частота вращения ротора турбокомпрессора; G_T — приведенный расход топлива, \dot{n} — ускорения ротора турбокомпрессора.

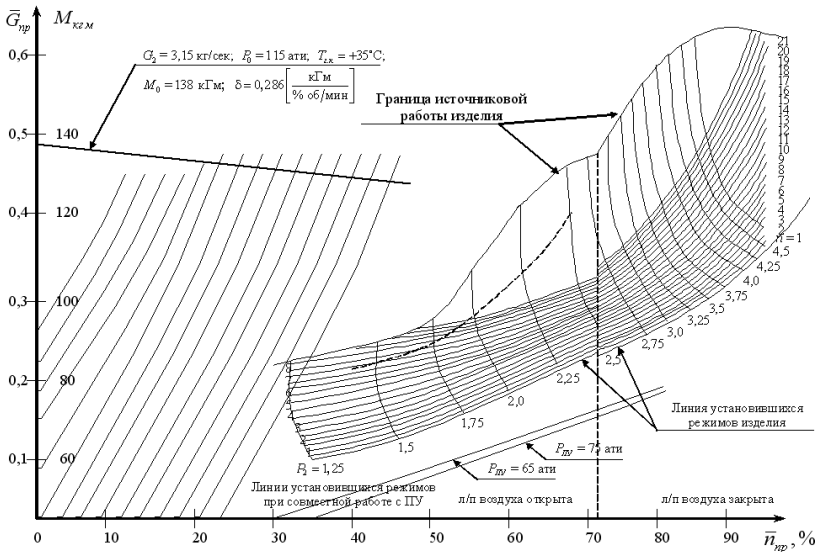


Рис. 4. Динамическая характеристика ГТД

Естественным является использование динамической характеристики (ДХ) для построения нелинейной универсальной модели ГТД, рассматривая каждое семейство кривых как функцию переменных n , G_T , например, для ускорения ротора турбокомпрессора зависимость имеет вид:

$$G_T = \varphi(n, \dot{n}). \quad (1)$$

Идентифицировав функцию (1) и разрешая ее относительно \dot{n} , можно получить дифференциальное уравнение вращения ротора в виде

$$\dot{n} = \psi(n, G_T). \quad (2)$$

Динамическая характеристика ГТД имеет расслоение по ряду факторов: изменению «геометрии» двигателя, числу M полята, числу Рейнольдса и т.д.

Как следствие, отдельные семейства кривых на ДХ имеют разное аналитическое представление в отдельных областях значений n в соответствии с режимами: холодная прокрутка, запуск,

разгон, стабилизация. На каждом из них ДХ имеет характерный вид, зависящий от состояния ленты перепуска воздуха (ЛПВ), и может быть идентифицирована.

Структура ДХ отражает динамику изменения законов, описывающих ГТД, по режимам его применения. Очевидно, что структура полученной модели с делением режимов работы двигателя на несколько участков достаточно универсальна. Моделирование ГТД на этих участках может осуществляться любыми известными методами, при этом методы могут быть различными на различных участках ДХ.

При таком подходе к моделированию возможна корректировка расхода топлива на каждом участке ДХ, что приведет к более качественному функционированию системы автоматического управления ГТД.

При моделировании ГТД учитываются параметры: n — приведенная частота вращения ротора турбокомпрессора; G_T — приведенный расход топлива.

Не учитываются параметры:

- тепломассообмен в элементах конструкции двигателя, поскольку температура не регулируется;
- изменения давления за компрессором также не регулируются.

Предварительные результаты моделирования представлены на рис. 5.

На рис. 5 представлены заданная и расчетная траектории разгона, где можно увидеть, что расчетная траектория максимально приближена к заданной. Этот результат работы системы был получен в ходе работы предлагаемой САУ ГТД, в которой были учтены все особенности системы, описанные выше. Это не окончательный вариант работы системы, но он уже показывает правомерность предложенного подхода.

5. Заключение

В данной работе представлен новый подход к управлению силовыми установками летательных аппаратов, который позво-

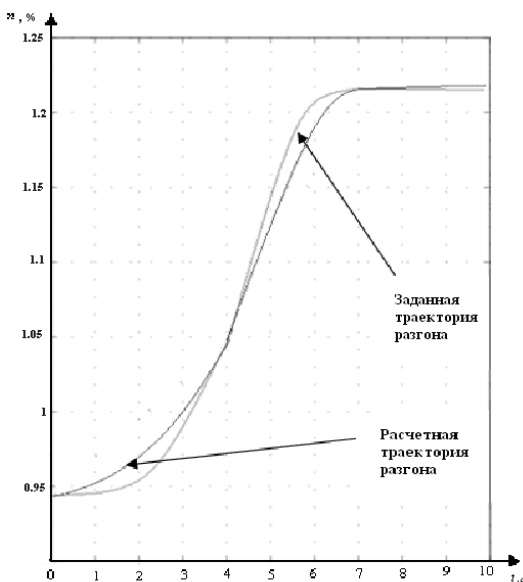


Рис. 5. Заданная и расчетная траектории разгона предлагаемой САУ ГТД

ляет:

- учитывать динамические особенности АДТ и ГТД, что приводит к повышению качества функционирования системы;
- корректировать параметры и структуру системы, в зависимости от конкретных ошибок в ней, что приводит работу к заданному результату на всех режимах функционирования ГТД в составе БПЛА.

Список литературы

- [1] Тюкин И. Ю., Терехов В. А. Адаптация в нелинейных динамических системах / Предисл. Г.Г. Малинецкого. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 384 с. (Синергетика: от прошлого к будущему).
- [2] Денисова Е. В., Насибуллаева Э. Ш. Моделирование задачи функционирования агрегата дозирования топлива // Труды Института механики Уфимского научного центра РАНю Вып. 7 / Под ред. С. Ф. Урманчеева. Уфа: Гилем, 2010. 231 с.