

УДК 681.51

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ВВЕДЕНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ

Денисова Е.В., Черникова М.А.

*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова, Уфимский научный центр РАН,
Уфа, e-mail: denisova.anrb@mail.ru, marishutka@list.ru*

В работе рассматривается система автоматического управления газотурбинным двигателем (САУ ГТД) для подвижного летательного объекта и проводится анализ её функционирования с учетом взаимного влияния динамики агрегата дозирования топлива и динамики двигателя. Приведены результаты моделирования работы САУ ГТД для идеальной системы и для системы с экспериментальными параметрами. Выявлена и обоснована идея разделения объекта управления на две части: агрегат дозирования топлива и двигатель. На основе исследования авторами предлагается использовать в структуре САУ ГТД математические модели разделенных частей системы, а также интеллектуальный подход к введению логического блока в структуру для повышения качества управления. Такой подход к проектированию САУ ГТД позволит учитывать динамику отдельно исполнительной части системы и самого двигателя, а также их взаимное влияние.

Ключевые слова: система автоматического управления, газотурбинный двигатель, подвижный летательный объект, исполнительный механизм, агрегат дозирования топлива, математическая модель

SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF THE GAS-TURBINE ENGINE WITH INTRODUCTION OF MATHEMATICAL MODELS IN THE CONTROL CIRCUIT

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, marishutka@list.ru*

The present article is devoted to research of system of automatic control of the gas-turbine engine (SAC GTE). The analysis of quality of management has shown need of introduction in a contour of management of mathematical models. The method of division of object of management into two parts is for this purpose used: the fuel dispensing unit (FDU) and the gas-turbine engine (GTE), and are entered into structure of SAC GTE their models. For comparison of SAC GTE ideal, with experimental data and with models modeling by means of the graphical environment Simulink has been carried out. It is found out that at introduction of models to structure of SAC GTE it is possible to improve quality of management of the system using experimental data and to approach compliance to requirements to quality of transition process.

Keywords: automatic control system, a gas turbine engine, mobile flying object, the power unit, the fuel dispensing unit, the mathematical model

Известно, что преимущество современных подвижных летательных объектов в том, что большие скорости маневрирования затрудняют перехват аппарата в движении. Имеется также 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 также затрудняет перехват. Существует возможность использования различных маневров на любом участке траектории.

Силовая установка (СУ) сложного летательного аппарата представляет собой короткоресурсный газотурбинный двигатель, а в некоторых случаях – прямоточный воздушно-реактивный двигатель.

К системе автоматического управления (САУ) объектами таких СУ предъявляются, как правило, следующие требования:

- высокая точность поддержания заданных параметров;
- минимальная сложность технического исполнения;
- возможность перехода с одного режима на другой (при совершении маневра) без снижения качества управления.

Для выполнения всех вышеперечисленных требований необходимо разработать новый подход к выбору структуры САУ, к синтезу алгоритмов управления и к их технической реализации. Данное утверждение основано на анализе результатов натурных испытаний и на проведенных ранее теоретических исследованиях.

Поясним на конкретном примере.

Рассмотрим простейшую САУ объектом управления подобного класса (рис. 1, а).

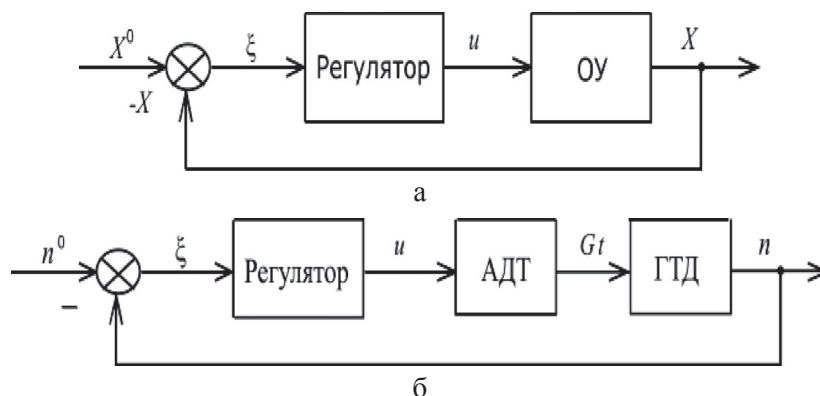


Рис. 1. а – простейшая САУ ГТД (X^0 – заданное значение параметра, X – отработанное значение параметра, ξ – ошибка системы, u – управляющий сигнал); б – предлагаемая структура САУ ГТД с разделенным объектом управления на АДТ и ГТД

Согласно концепции, разработанной ранее [5], исполнительный механизм (ИМ) и двигатель рассматривались как единое целое: неизменяемая часть системы.

Данный подход хорошо зарекомендовал себя при синтезе алгоритмов управления ГТД для гражданских летательных аппаратов или для транспортной авиации. Для таких объектов управления динамические процессы в топливной системе протекают гораздо быстрее, чем в двигателе, поэтому их влиянием на ГТД просто пренебрегали.

Иначе обстоит дело с короткоресурсными ГТД. В них переходные процессы в агрегате топливопитания и двигателе происходят практически одновременно. Данное утверждение неоднократно было подтверждено результатами натурных испытаний [1].

На основании вышесказанного выделим в отдельные звенья непосредственно ГТД и ИМ–агрегат дозирования топлива (АДТ) (рис. 1, б).

При проведении простейшего исследования работы САУ ГТД (рис. 1, б), заключающегося в различных сочетаниях параметров для передаточных функций для ГТД и АДТ, выяснено, что качество управления (точность, наличие перерегулирования, запасы устойчивости) резко изменяется при переходе с режима на режим. Таким образом, задачи анализа качества управления и синтеза алгоритмов управления объектами подобного класса становятся весьма актуальными.

Целью работы является проведение исследования САУ ГТД сложного летательного аппарата с учетом динамики параметров исполнительской части системы и двигателя.

Постановка задачи

Рассмотрим САУ ГТД, показанную на рис. 1, б. Система состоит из элемента

сравнения (ЭС), регулятора, АДТ и ГТД. На вход ЭС поступает начальное значение количества оборотов n^0 и полученное значение количества оборотов n , на выходе формируется рассогласование поступающих параметров и формируется ошибка системы – ξ . Ошибка поступает на вход регулятора, на выходе формируется управляющий сигнал u , который поступает на вход АДТ, на выходе формируется сигнал расхода топлива G_p , который поступает на вход ГТД и соответственно формируется сигнал n , поступающий на вход ЭС.

Передаточные функции АДТ и ГТД представляют собой инерционные звенья первого порядка, где постоянная времени $T = 0,7$ с, коэффициент усиления $k = 1$. Регулятор представляет собой издромное звено, передаточная функция которого

$$w(s) = \frac{k(Ts + 1)}{Ts}, \text{ при этом коэффициент уси-$$

ления $k = 1$, постоянная времени $T = 0,7$ с.

Необходимо исследовать САУ ГТД и провести анализ качества управления с учетом динамики АДТ и ГТД.

Метод решения

Учитывая то, что в предложенной схеме САУ ГТД объект управления был разделен, целесообразно ввести нелинейные модели отдельно для АДТ и ГТД и моделировать работу системы, учитывая динамику работы ее элементов.

Для того, чтобы исследовать вышеописанную САУ ГТД, предлагается также ввести в структуру системы математические модели АДТ и ГТД, чтобы повысить качество управления всей системы в целом. На рис. 2 представлена схема такой САУ ГТД.

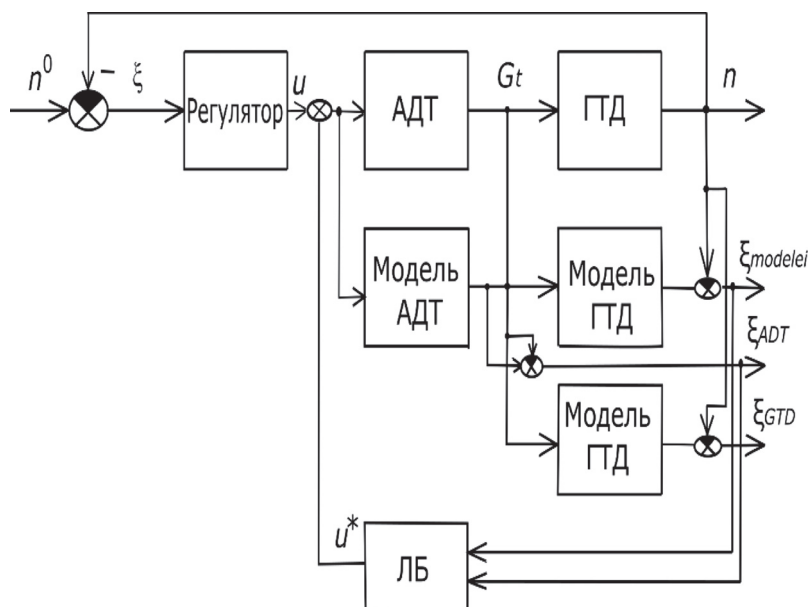


Рис. 2. Предлагаемая САУ ГТД, в которую входит регулятор, АДТ, ГТД, модель АДТ, модель ГТД и ЛБ

В логическом блоке (ЛБ) производится анализ входных сигналов следующим образом: на основе экспериментальных данных и экспертных заключений строится база знаний. Относительно неё формируются функции принадлежности для входных параметров ЛБ, а также для выходных сигналов. Описание этих подходов достаточно хорошо известно [2]. Сформировав необходимое изменение, ЛБ подает соответствующие сигналы на вход элемента сравнения, формируя сигнал управления, поступающий на вход АДТ и его модели. В ЛБ поступают два сигнала: рассогласование моделей АДТ и ГТД с моделями АДТ и ГТД – ошибка моделей ($\xi_{model_{ei}}$) и рассогласование АДТ с моделью АДТ – ошибка АДТ (ξ_{ADT}). Как показывает практика, ошибка ГТД является небольшой и в ходе исследования не учитывается.

Результаты моделирования

Проведем исследование САУ ГТД в графической среде имитационного моделирования Simulink.

Для оценки качества управления САУ ГТД введем следующие требования:

- запас устойчивости по амплитуде: не менее 20 дБ;
- запас устойчивости по фазе: от 35 до 80°;
- перерегулирование: не более 5 %;
- статическая ошибка: не более $\pm 5\%$ ($\pm 0,05$);
- время регулирования: не более 5 с.

При моделировании системы (рис. 1, б) было выяснено, что только при значениях постоянной времени (T) для передаточных функций АДТ и ГТД $T = 0,7$ с, $T = 0,5$ с, $T = 1$ с и коэффициенте передачи $k = 1$ система работает оптимально, соответствуя требованиям качества управления и устойчивости системы. Это говорит о том, что система, изменяет параметры при работе на других режимах, качество управления которой может и не соответствовать требованиям.

Поэтому примем для САУ ГТД значение постоянной времени $T = 0,7$ с и коэффициент усиления $k = 1$ и будем считать систему идеальной, взятой за эталон в предстоящем исследовании.

Используя экспериментальные данные, полученные при различных прохождениях трасс, были выбраны точки, связанные с изменением высоты и скорости полета: за время 50, 200, 500 с.

Согласно известным формулам [4], используя экспериментальные данные в выбранных точках, были получены значения постоянной времени и коэффициента усиления для АДТ и ГТД. При моделировании в схеме САУ ГТД модели АДТ и ГТД менялись попеременно с полученными экспериментальными параметрами АДТ и ГТД, что дало возможность проанализировать систему согласно требованиям, описанными выше. В дальнейшем в работе будем использовать время моделирования 50 с, так как его будет достаточно для проведения исследования.

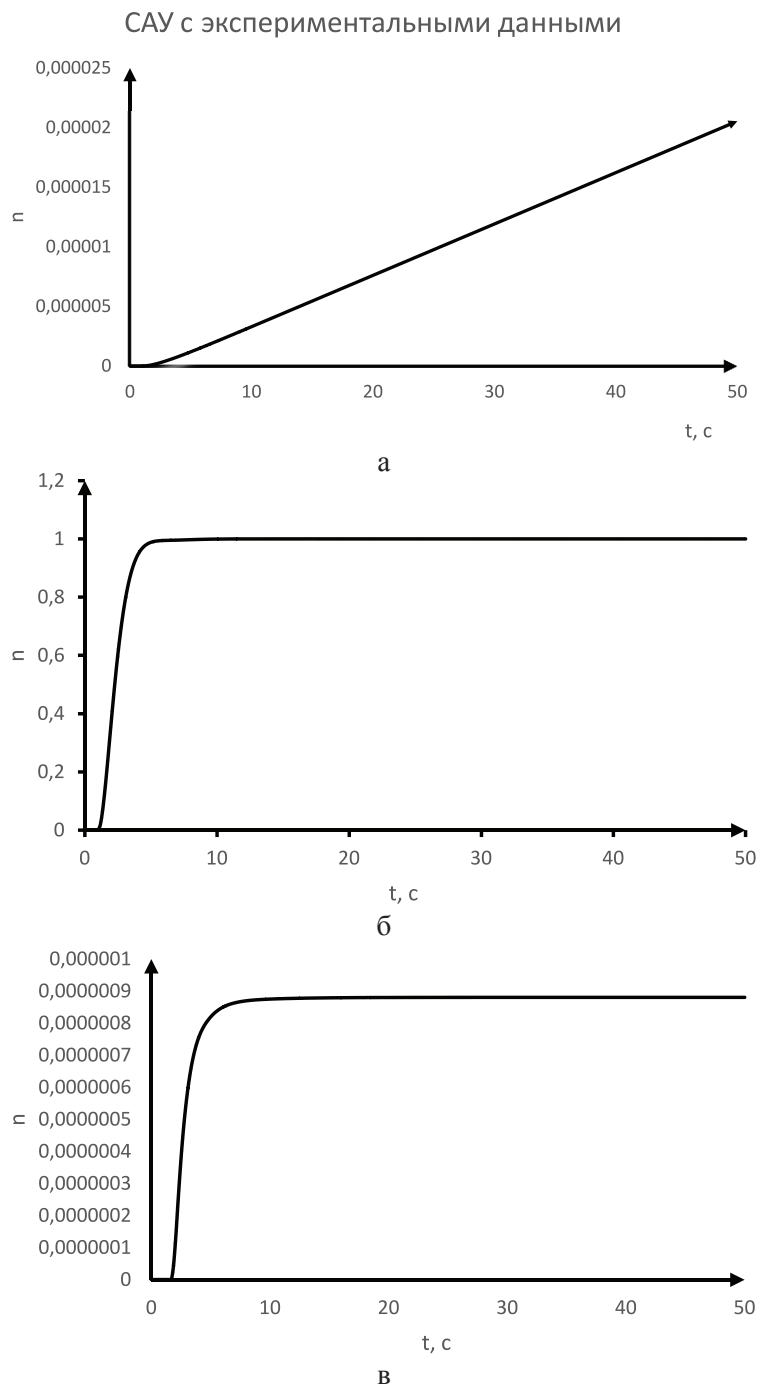


Рис. 3. Результаты моделирования САУ ГТД за время моделирования 50 с:
 а – переходный процесс САУ ГТД с экспериментальными данными (—),
 САУ ГТД с моделями АДТ и ГТД (- -); б – идеальная САУ ГТД; в – САУ ГТД с моделями

Результаты моделирования САУ ГТД за время 50 с представлены на рис. 3. Моделирование системы проводилось в три этапа: для идеальной схемы, с параметрами, используемыми при проектировании САУ ГТД, а также для системы с экспериментальными данными и системы,

использующей вышеописанный подход с математическими моделями АДТ и ГТД для корректировки работы всей системы.

Как видно из рисунка, переходный процесс с идеальными параметрами передаточной функции для АДТ и ГТД устанавливается за время регулирования,

которое составляет 5 с; система же с экспериментальными значениями достаточно инерционна и не соответствует требованиям качества управления и устойчивости, для корректировки САУ ГТД были введены математические модели АДТ и ГТД, которые уменьшили время регулирования и стали соответствовать требованиям.

Как видно из рис. 3, в, переходный процесс предложенной САУ ГТД уступает в качестве: значение не достигает единицы. Тем самым, для увеличения точности переходного процесса, предлагается ввести ЛБ на основе нечеткой логики, база знаний и функции принадлежности которого для входных и выходных параметров будут соответствовать графику зависимости ошибок от управляющего сигнала (рис. 4).

Для обеспечения приемлемого характера переходного процесса предлагаемой САУ ГТД предлагается ввести еще один регулятор: интегрирующее звено. Экспериментальное моделирование показало, что для интегратора значение коэффициента усиления (k) равное 150 стало достаточным, чтобы увеличить качество выходных параметров. На рис. 5 представлен такой переходный процесс, а также на график нанесено несколько точек, характеризующих идеальный процесс.

Такое параметрическое и структурное изменение дало возможность качественно изменить выходные параметры системы с экспериментальными данными и приблизиться к выбранным в статье идеальным параметрам. Идея введения математических моделей АДТ и ГТД в контур управления отражена в патенте [3].

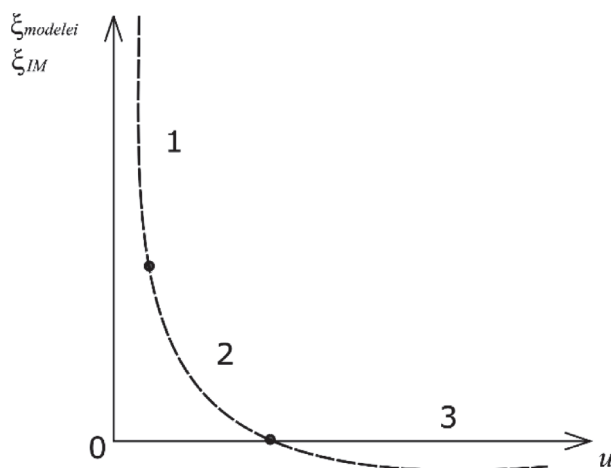


Рис. 4. Зависимость ошибок моделей и АДТ ($\xi_{modelei}, \xi_{ADT}$) от управляющего сигнала и с разделением на зоны: 1 – минимальная, 2 – средняя, 3 – максимальная

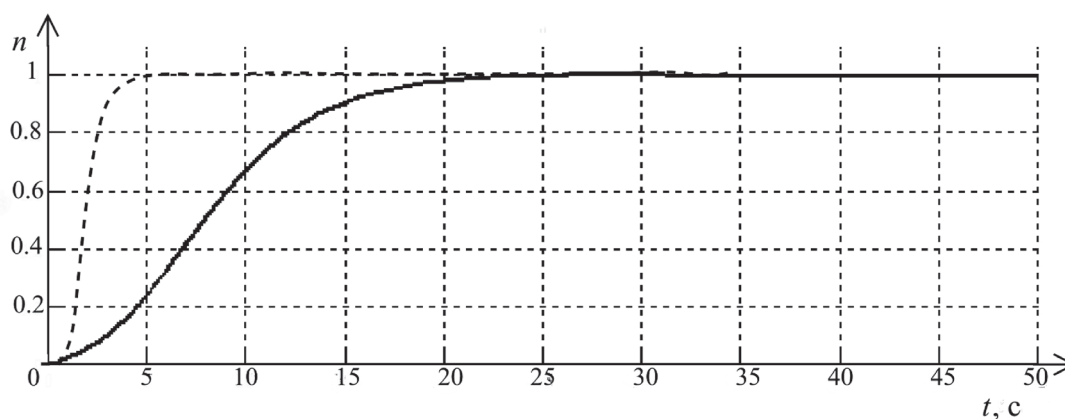


Рис. 5. Переходные процессы САУ ГТД с моделями и введением интегратора в структуру (—), идеальной ГТД (- -)

Выводы

Результаты моделирования исследуемой САУ ГТД показывают правомерность предложенного подхода с целью повышения качества управления. Разделение объекта управления на АДТ и ГТД позволяет учитывать динамику исполнительской части системы и двигателя, появляется возможность использовать рассогласование между частями структурной схемы САУ ГТД, тем самым увеличивать надежность и устойчивость работы системы на различных режимах. Интеллектуальный подход позволил сформировать ЛБ, который качественно улучшил выходные параметры системы и позволил приблизиться к идеальным с достаточной степенью точности.

Список литературы

1. Научный вклад в создание авиационных двигателей. В двух книгах. Книга 1 N34 / голл. авторов; год общ. ред. В.А. Скибина и В.И. Солонина. – М.: Машиностроение, 2000. – 725 с.: ил.
2. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат; пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.: ил. – (Адаптивные и интеллектуальные системы).

3. Патент РФ № 2013152562/06, 26.11.2013 / Насибуллаева Э.Ш., Даринцев О.В., Денисова Е.В., Черникова М.А., RU 237665 C1 Устройство дозирования топлива в газотурбинный двигатель // Патент России № 2537665.2013. Бюл. № 1.

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. Проектирование систем автоматического управления ГТД / под ред. Б.Н. Петрова. – М.: Машиностроение, 1981. – 400 с.

References

1. Nauchnyj vklad v sozdanie aviacionnyh dvigatelej. V dvuh knigah. Kniga 1 N34 / Koll.avtorov; Pod obshej redakciej V.A. Skibina i V.I. Solonina. M.: Mashinostroenie, 2000. 725s.: il.
2. Nечetкое моделирование и управление / A. Pegat; per. s angl. M.: BINOM. Laboratorija znaniy, 2009. 798 p.: il. (Adaptivnye i intellektualnye sistemy).
3. Patent RF no. 2013152562/06, 26.11.2013 / Nasibullaeva Je.Sh., Darincev O.V., Denisova E.V., Chernikova M.A., RU 237665 C1 Ustrojstvo dozirovanija topliva v gazoturbinnij dvigatel // Patent Rossii no. 2537665.2013. Bjul. no. 1.
4. Problemy proektirovanija i razvitija sistem avtomaticheskogo upravlenija i kontrolja GTD / S.T. Kusimov, B.G. Iljasov, V.I. Vasilev i dr. M.: Mashinostroenie, 1999. 609 p.
5. Proektirovanie sistem avtomaticheskogo upravlenija GTD p/r. Petrova B.N. M.: Mashinostroenie, 1981. 400 p.