

УДК 629.7.03

**А.С. КУЛИК¹, В.Ф. СИМОНОВ¹, А.В. КОМКОВ¹, Б.В. ОСТРОУМОВ²,
И.Е. КИТАЙЧУК²**¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского “ХАИ”, Украина*² *НТ СКБ “Полисвет” ГНПО “Коммунар”, Украина*

МАШИННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

В данной статье представлены результаты решения актуальной задачи разработки цифровой системы автоматического управления (САУ) газотурбинным двигателем (ГТД). Приведены машинные модели всех элементов цифровой САУ ГТД: разгонного устройства, задающего устройства, электронного регулятора, дозатора расхода топлива, ГТД, датчиков температуры, давления, углового положения иглы дозатора, частоты вращения вала двигателя и атмосферных параметров. Проведенные машинные, полунатурные и натурные испытания разработанной САУ в режимах начальной установки, предполетного контроля, запуска, разгона, приемистости и регулировки частоты, противопомпажной защиты, сброса частоты и останова двигателя подтвердили высокую эффективность системы.

двухконтурный газотурбинный двигатель, регулятор расхода топлива ГТД, алгоритмы регулирования расхода топлива ГТД, машинное моделирование цифровой системы автоматического регулирования расхода топлива

Введение

Повышенные требования к надежности, быстродействию, точности, маневренности современных летательных аппаратов вызывают необходимость проектирования цифровых САУ их силовыми установками. ГТД является нелинейным, нестационарным, многомерным и многосвязным объектом регулирования, работающим в широком диапазоне изменений параметров атмосферы, управляющих и возмущающих воздействий [1]. Указанные особенности объекта не позволяют в полной мере проанализировать влияние всех факторов на работу ГТД во всех режимах. Поэтому машинное моделирование цифровой САУ является одним из важнейших инструментальных этапов ее проектирования. В работе предложены машинные модели всех элементов, входящих в состав цифровой САУ ГТД (разгонного устройства, задающего устройства, электронного регулятора, дозатора расхода топлива, ГТД, датчиков температуры, давления, углового положения иглы дозатора, частоты вращения вала двигателя и атмосферных параметров), всей системы в целом и

проведено исследование этой системы в широком диапазоне изменения параметров внешних воздействий и для всех режимов работы двигателя.

1. Формулирование проблемы

Одним из этапов проектирования САУ является проверка предлагаемых алгоритмов управления. Натурные испытания занимают большое время, требуют больших материальных и финансовых затрат.

В настоящее время не существует аналитических методов исследования работы цифровой САУ ГТД во всех режимах и в широком диапазоне изменения параметров внешних воздействий [2]. Поэтому возникает проблема машинного моделирования разработанной САУ.

2. Машинное моделирование САУ

2.1. Объект управления

В качестве объекта регулирования рассматривается двухконтурный турбореактивный двигатель со смешением потоков первого и второго контуров [1]. Объект автоматического управления состоит из ис-

полнительного механизма (дозатора), ГТД и датчиков температуры ДТ1 и ДТ2, давления ДД, частоты ДЧ, и углового положения иглы ДУ (рис. 1).

2.2. Алгоритмы регулирования

Для обеспечения работы двигателя во всем диапазоне эксплуатационных режимов и вывода его из нештатных режимов разработаны следующие алгоритмы:

- алгоритм диспетчеризации (АД);
- алгоритм начальной установки (АНУ);
- алгоритм формирования признака аварийного режима (АФПАР);
- алгоритм приемистости и регулирования частоты (АПРЧ);
- алгоритм разгона (АР);
- алгоритм обеспечения противопопальной защиты (АОПЗ);
- алгоритм широтно-импульсной модуляции (АШИМ);
- алгоритм предполетного контроля (АППК).

2.3. Машинная модель замкнутой САУ

Машинная модель замкнутой САУ состоит из следующих блоков (рис. 1):

1. ГТД состоит из следующих моделей:
а) первичная модель ГТД, используемая в нештатных режимах работы и при разгоне (апериодическое звено);

б) основная модель ГТД для штатных режимов работы, реализованная в виде S-функции MATLAB. Ядром основной модели ГТД является машинная модель, разработанная в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» коллективом под руководством д.т.н., профессора С.В. Епифанова. Обе модели по параметрам близки к двигателю и адекватно отражают его поведение на различных этапах полета с требуемой точностью;

в) модель агрегата зажигания, используемая в режиме разгона и нештатной ситуации (помпаж);

г) модель разгонного устройства.

2. Датчики давления (ДД), температуры (ДТ1 и ДТ2), частоты (ДЧ) и угла поворота иглы дозатора (ДУ) представлены апериодическими звеньями первого порядка.

3. Дозатор представлен последовательным соединением апериодического, интегрирующего и звена чистого запаздывания.

4. Задающее устройство (ЗУ) – реализовано с помощью формирователя постоянных, ступенчатых и линейно изменяющихся сигналов.

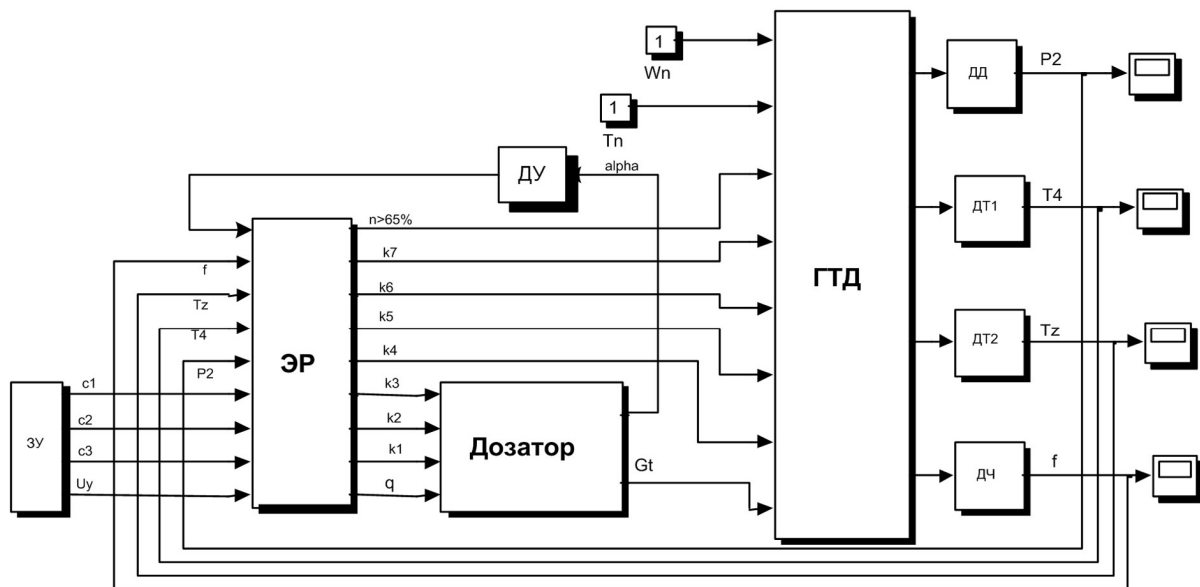


Рис. 1. Функциональная схема машинной модели САУ ГТД

5. Электронный регулятор (ЭР) содержит алгоритмы регулирования ГТД, реализованные в виде S-функций MATLAB.

2.4. Моделирование САУ ГТД в различных режимах работы

Для машинного моделирования САУ ГТД использовался математический программный пакет MATLAB 5.2.1 и пакет визуально-ориентированного программирования Simulink [3].

ГТД как объект управления характеризуется несимметричностью характеристики [4], что требует реализации различных величин коэффициентов закона управления для набора и сброса частоты.

В данном случае можно выделить следующие этапы (рис. 2):

1. Этап предварительной подготовки. Работают АППК и АНУ.
2. Этап сухой прокрутки. Работают разгонное устройство и алгоритм АД.
3. Этап разгона. На данном этапе работает первичная модель ГТД, модель агрегата зажигания и алгоритм разгона АР.

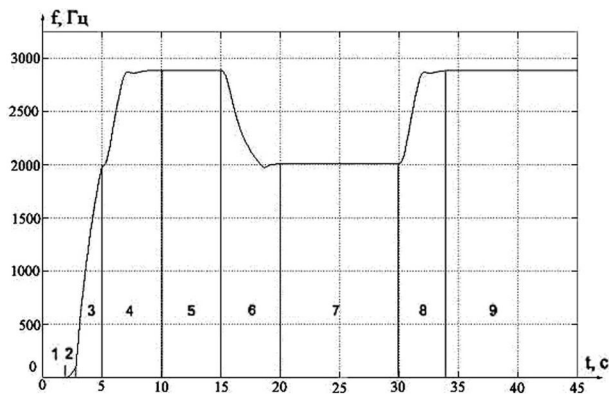


Рис. 2. Изменение частоты вращения ГТД при использовании двухступенчатой модели

4. Этап набора частоты. В начале этапа происходит переключение на основную модель. РУ отключается. Работает алгоритм АПРЧ. Показатели качества управления: время переходного процесса – 2 с; перерегулирование – 0%; статическая ошибка – 0,77%

5. Стабилизация требуемой частоты. Ошибка – 0,1%.

6. Этап сброса частоты. Работает алгоритм АПРЧ. Показатели качества управления: время переходного процесса – 3,5 с; перерегулирование – 3,9%; статическая ошибка – 0,65%

7. Стабилизация требуемой частоты. Ошибка – 0,1%.

8. Этап повторного набора частоты. Перерегулирование – 0%; статическая ошибка – 0,65%

9. Стабилизация достигнутой частоты. Ошибка – 0,1%.

Изменение коэффициента заполнения импульсов, формируемое регулятором и подаваемое на гидравлический дозатор, показано на рис. 3.

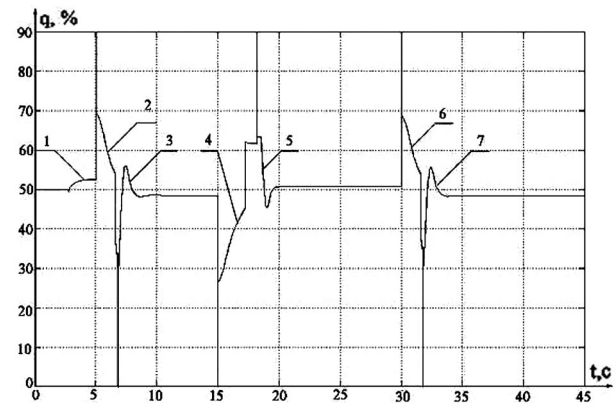


Рис. 3. Изменение величины коэффициента заполнения импульсов

На рис. 3 отмечены следующие этапы:

- 1 – работа АР;
- 2 – регулирование по углу иглы дозатора, алгоритмы АПРЧ и АШИМ;
- 3 – регулирование по частоте, алгоритмы АПРЧ и АШИМ;
- 4 – регулирование по углу иглы дозатора, алгоритмы АПРЧ и АШИМ;
- 5 – регулирование по частоте, алгоритмы АПРЧ и АШИМ;
- 6 – регулирование по углу иглы дозатора, алгоритмы АПРЧ и АШИМ;
- 7 – регулирование по частоте, алгоритмы АПРЧ и АШИМ.

Изменение давления и температуры воздуха за компрессором показаны на рис. 4 и 5 соответственно.

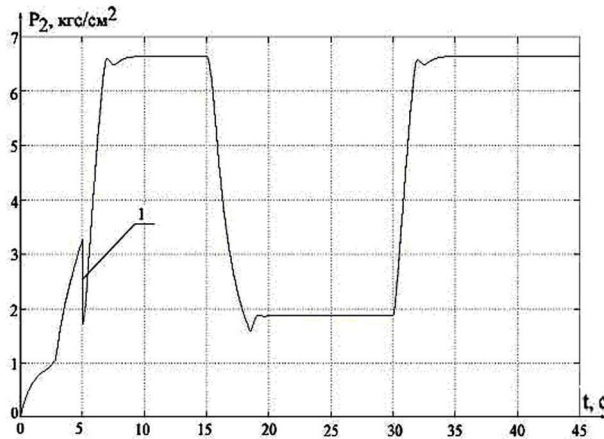


Рис. 4. Изменение давления за компрессором

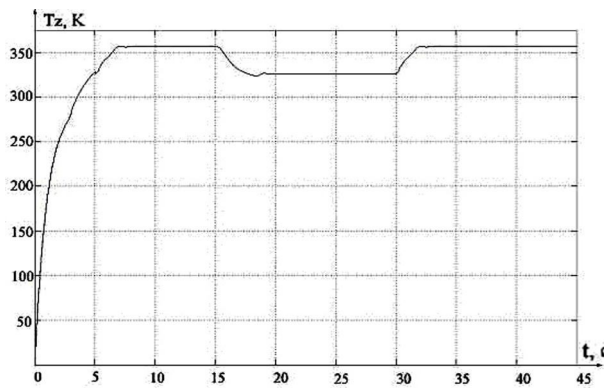


Рис. 5. Изменение температуры воздуха за компрессором в замкнутой системе управления ГТД

В процессе регулирования частоты вращения изменения давления и температуры носят аperiodический характер, что обеспечивает плавность работы двигателя, а пределы их изменения находятся в пределах эксплуатационных допусков.

Если требуемая частота ниже $f_{\min 3}$, определяемой техническим заданием, то процесс регулирования будет иметь колебательный характер, поскольку по сигналам регулятора в работу периодически включается агрегат зажигания ГТД (рис. 6).

При появлении помпажа регулятор вырабатывает сигнал « $q = 0$ ». На рис. 7 показано изменение частоты при запуске двигателя и при появлении помпажа, на рис. 8 – изменение коэффициента заполнения импульсов, подаваемых на дозатор; на рис. 9 – изменение температуры за компрессором; на рис. 10 – из-

менение давления за компрессором в процессе вывода ГТД из помпажа.

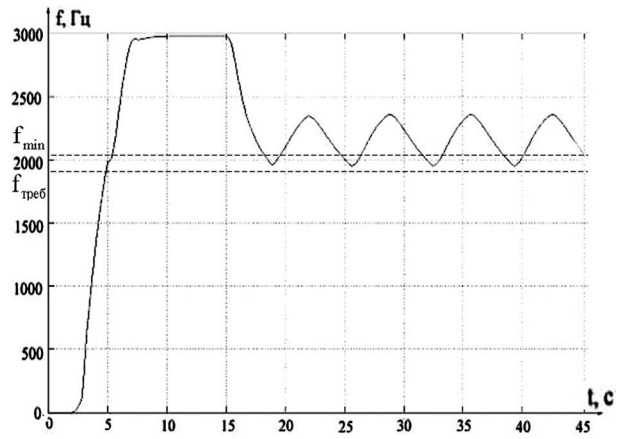


Рис. 6. Изменения частоты при $f_{\text{треб}} < f_{\min 3}$

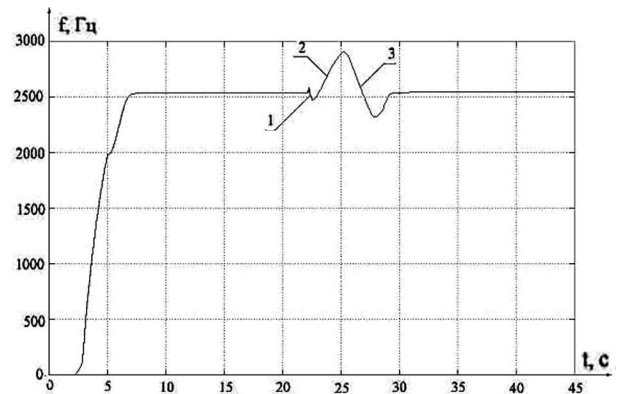


Рис. 7. Изменение частоты вращения вала двигателя в процессе регулирования частоты при наличии помпажа: 1 – спад частоты, вызванный сигналом « $q = 0$ »; 2 – набор частоты, вызванный включением агрегата зажигания; 3 – стабилизация частоты

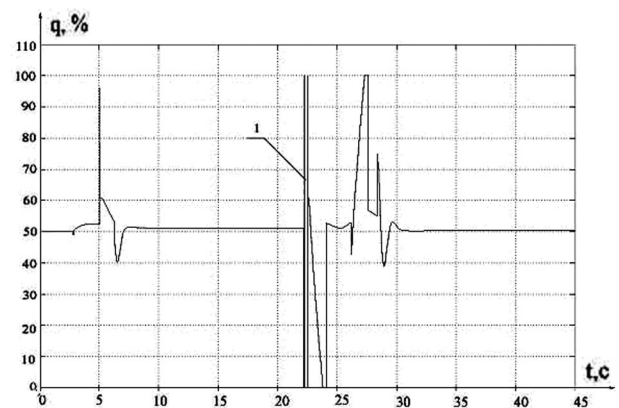


Рис. 8. Изменение скважности импульсов, подаваемых в дозатор: 1 – сигнал « $q = 0$ » в момент начала помпажа

Из рис. 7 видно, что САУ ГТД выводит двигатель из режима помпажа и обеспечивает его работу в пределах эксплуатационных допусков.

На рис. 8 виден участок сигнала « $q = 0$ », который выдает регулятор для парирования помпажа. После выдачи данного сигнала и включения агрегата зажигания возобновляется работа регулятора по алгоритму регулирования частоты.

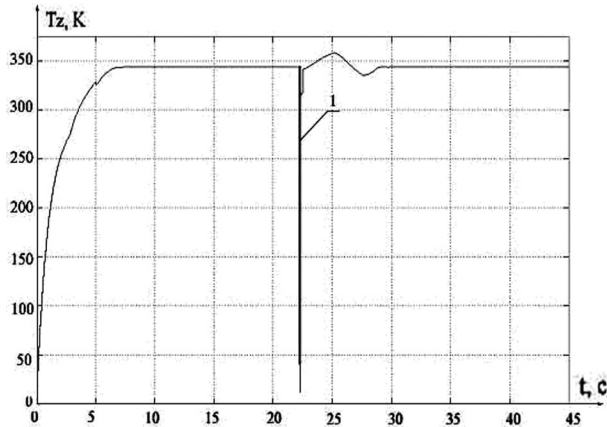


Рис. 9. Изменение температуры за компрессором при наличии помпажа: 1 – момент помпажа

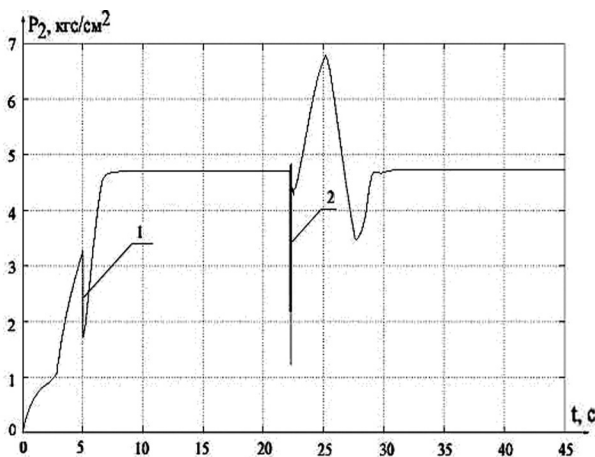


Рис. 10. Изменение давления за компрессором при возникновении помпажа: 1 – скачок давления, вызванный переходом с первичной модели двигателя к основной; 2 – момент помпажа

При появлении помпажа параметры изменяются скачкообразно в широких пределах, что может привести к выходу из строя двигателя. Цифровая САУ ГТД парирует помпаж, при этом изменение температуры и давления за компрессором имеют аperiо-

дический характер и не выходят за пределы эксплуатационных допусков.

Заключение

Машинное моделирование показало, что алгоритмы регулирования позволяют управлять ГТД во всем широком диапазоне эксплуатационных параметров, а также обеспечивать выход из нестационарных режимов работы, например, помпажа, с возвратом в нормальный режим работы. Адекватность машинного моделирования реальным результатам подтверждена длительными стендовыми испытаниями.

Литература

1. Кулик А.С., Свищ В.М., Симонов В.Ф., Пасичник С.Н. Поузловое моделирование переходных режимов ГТД // *Авиационно-космическая техника и технология*: – Х.: НАКУ «ХАИ». – 2002. – Вып. 30. – С. 186 – 190.
2. Автоматический контроль и диагностика систем управления силовыми установками летательных аппаратов / В.И. Васильев, Ю.М. Гусев, А.И. Иванов и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
3. Дьяконов В.П., Абраменкова И.В., Круглов В.В. MATLAB 5.3.1 с пакетом расширений / Под ред. проф. В.П. Дьяконова. – М.: Нолидж, 2001. – 880 с.
4. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С. Елифанов, Б. Кузнецов и др. – К.: Техника, 1998. – 312 с.

Поступила в редакцию 30.04.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Елифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.