

УДК 519.8 : [621.452 : 681.5]

О.Д. ЛЯНЦЕВ<sup>1</sup>, И.А.КАРИМОВ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», Россия

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАЗГОНОМ ТРДД АИ-222

Предложен способ синтеза цифровой системы управления разгоном авиационного двухвального двигателя на основе разностного уравнения для ускорения частоты вращения ротора высокого давления, без использования производных выше первого порядка в динамической структуре системы управления. Приведены результаты математического моделирования САУ разгоном газогенератора ТРДД АИ-222.

**приемистость, запуск, газотурбинный двигатель, система автоматического управления**

### Введение

В системах автоматического управления газотурбинными двигателями (САУ ГТД) в соответствии с техническим заданием на разработку, как правило, предусмотрен канал управления переменными режимами работы двигателя – запуском и приемистостью, воздействующий на расход рабочего топлива. Синтез САУ ГТД для переменного режима состоит из двух частей: из определения закона (оптимального) подачи топлива, обеспечивающего наилучшую приемистость и реализации полученного закона подачи топлива с помощью САУ. Выбранный закон изменения расхода топлива должен обеспечить максимально возможный крутящий момент турбокомпрессора и учитывать границы его устойчивой работы, а также ограничения по перегреву турбины и срыву пламени в камере сгорания. Из теории двигателей известно, что выбранную траекторию разгона можно аппроксимировать несколькими аналитическими выражениями (комплексами параметров), определяющими требуемый расход топлива при разгоне в зависимости от параметров рабочего процесса двигателя. Системы разгона, работающие по таким законам, позволяют более полно использовать возможности двигателя. Среди этих комплексов особое место занимают комплексы на базе функциональных зависимостей ускорения час-

тоты вращения ротора турбокомпрессора от различных двигательных параметров, поскольку они позволяют учитывать нестационарный характер характеристик двигателя и разгонять двигатель вдоль границы газодинамической устойчивости.

### 1. Решаемая задача

Пусть закон изменения подачи топлива известен и ставится задача его реализации с помощью имеющейся топливodoзирующей аппаратуры и, подлежащего определению, цифрового регулятора. Задача синтеза регулятора разгона является актуальной, поскольку всегда стремятся провести траекторию разгона как можно ближе к границе помпажа, поэтому неучтенные отклонения от расчетного закона дозирования топлива могут перевести двигатель в неустойчивую область работы, что недопустимо. Известная же структура такого регулятора на основе изодромного звена позволяет обеспечить точность выполнения заданной траектории разгона не превышающей 18% – 25% из-за необходимости с высокой точностью вычислять производные высоких порядков от частот вращения роторов. Так как современные САУ ГТД являются цифровыми, нужно использовать процедуру прямого цифрового синтеза регулятора, а не проводить его на базе аналогового прототипа, что также должно повысить точность

регулирования. Далее рассматривается метод синтеза дискретного регулятора разгона двигателя без использования производных двигательных параметров высокого порядка.

## 2. Модель объекта управления

Исходная математическая модель объекта управления (АИ-222) включает в себя динамическую модель газогенератора и модель топливodoзирующей аппаратуры. Модель газогенератора представляет собой комплекс кусочно-линейных векторно-матричных уравнений, описывающих динамику двигателя в различных рабочих точках – от запуска двигателя до максимального режима.

Поскольку в промежутках между узловыми точками параметры модели газогенератора рассчитываются с помощью линейной интерполяции, то модель газогенератора можно представить в виде следующей системы нелинейных уравнений:

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{n}_1(n_2) \\ \Delta \dot{n}_2(n_2) \\ \Delta \pi_k^*(n_2) \\ \Delta T_2^*(n_2) \end{pmatrix} = A(n_2) \cdot \begin{pmatrix} \Delta n_1(n_2) \\ \Delta n_2(n_2) \\ \Delta G_t(n_2) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$A(n_2) = \begin{pmatrix} a_{11}(n_2) & a_{12}(n_2) & a_{13}(n_2) \\ a_{21}(n_2) & a_{22}(n_2) & a_{23}(n_2) \\ a_{31}(n_2) & a_{32}(n_2) & a_{33}(n_2) \\ a_{41}(n_2) & a_{42}(n_2) & a_{43}(n_2) \end{pmatrix},$$

$$\Delta n_1(n_2) = n_1 - n_1^{pr}(n_2),$$

$$\Delta n_2(n_2) = n_2 - n_2^{pr}(n_2),$$

$$\Delta \pi_k^*(n_2) = \pi_k^* - \pi_k^{*pr}(n_2),$$

$$\Delta T_2^*(n_2) = T_2^* - T_2^{*pr}(n_2),$$

$$\Delta G_t(n_2) = G_t - G_t^{pr}(n_2),$$

где  $n_1$  – частота вращения ротора низкого давления;

$n_2$  – частота вращения ротора высокого давления;

$\pi_k^*$  – степень повышения давления воздуха за компрессором,

$T_2^*$  – температура газов за турбиной низкого давления,

$G_t$  – расход топлива,  $n_1^{pr}, n_2^{pr}, \pi_k^{*pr}, T_2^{*pr}, G_t^{pr}$  – значения соответствующих параметров на статических режимах.

Модель топливodoзирующей аппаратуры представляет собой модель насоса-дозатора, состоящего из сервомотора и дозирующей иглы со следующими передаточными функциями:

$$W_{np}(s) = \frac{\Delta G_t(s)}{\Delta I(s)} = W_{cm}(s) \cdot W_{du}(s),$$

$$W_{cm}(s) = \frac{\Delta \lambda(s)}{\Delta I(s)} = \frac{k_1}{s + \frac{1}{\tau_1}} = \frac{\tau_1 \cdot k_1}{\tau_1 \cdot s + 1}; \quad (2)$$

$$W_{du}(s) = \frac{\Delta G_t(s)}{\Delta \lambda(s)} = \frac{k_2}{\tau_2 \cdot s + 1},$$

где  $s$  – оператор Лапласа;

$W_{np}(s)$  – передаточная функция насоса-регулятора;

$W_{cm}(s)$  – передаточная функция сервомотора;

$W_{du}(s)$  – передаточная функция дозирующей иглы;

$\Delta G_t(s)$  – изменение дозируемого расхода топлива (кг/ч);

$\Delta I(s)$  – изменение тока управления сервомотором (мА);

$\Delta \lambda(s)$  – изменение перемещения дозирующей иглы (мм).

Заданы значения параметров передаточных функций:  $k_1 = (0,32 \pm 0,12)$  – коэффициент усиления сервомотора (мм/мА);  $\tau_1 = (10 \pm 3)$  – постоянная времени сервомотора (с);  $k_2 = (250_{-25}^{+50})$  – коэффициент усиления по расходу топлива (кг/ч·мм);  $\tau_2 \leq 0,1$  – постоянная времени дозирующей иглы (с).

Модель стартера задается добавкой  $M_{cm}$  к параметру модели двигателя  $\dot{n}_2$ , величина которой рассчитывается по соотношению:

$$M_{cm} = 31,0 \cdot (18,2 - 0,0014n_2). \quad (3)$$

Стартер отключается при частоте вращения  $n_2$ , равной 49%.

### 3. Синтез регулятора разгона

Для проведения синтеза цифрового канала разгона необходимо получить, на основе соотношений (1), разностное уравнение для двигательного параметра  $\dot{n}_2$ . Частота выдачи управляющего воздействия в цифровой САУ принята равной 40 Гц, т.е.  $\tau=0,025$  с.

Для разработки цифрового регулятора разгона, по методике, изложенной в [1], была получена дискретная модель двигателя, включающая разностное уравнение для параметра  $\Delta \dot{n}_2$ , подлежащего регулированию:

$$\begin{pmatrix} \Delta n_1(i+1) \\ \Delta n_2(i+1) \\ \Delta \pi_k^*(i+1) \\ \Delta T_2^*(i+1) \\ \Delta \dot{n}_2(i+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}^d(i) & a_{12}^d(i) & a_{13}^d(i) \\ a_{21}^d(i) & a_{22}^d(i) & a_{23}^d(i) \\ a_{31}^d(i) & a_{32}^d(i) & a_{33}^d(i) \\ a_{41}^d(i) & a_{42}^d(i) & a_{43}^d(i) \\ a_{51}^d(i) & a_{52}^d(i) & a_{53}^d(i) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta n_1(i) \\ \Delta n_2(i) \\ \Delta G_t(i) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\Delta n_1(i) = n_1(i) - n_1^{pr}(i),$$

$$\Delta n_2(i) = n_2(i) - n_2^{pr}(i),$$

$$\Delta \pi_k^*(i) = \pi_k^*(i) - \pi_k^{*pr}(i),$$

$$\Delta T_2^*(i) = T_2^*(i) - T_2^{*pr}(i),$$

$$\Delta G_t(i) = G_t(i) - G_t^{pr}(i).$$

Согласно процедуре синтеза дискретной системы управления [1], для получения разностного уравнения регулятора разгона необходимо воспользоваться выражением для параметра  $\Delta \dot{n}_2(i+1)$  из (4).

Расчет текущего значения  $\dot{n}_2(i)$  целесообразно проводить методом простой разности, поскольку при разгоне двигателя значение производной частоты вращения значительно превосходит значение продифференцированных шумов измерения частоты вращения роторов двигателя.

В результате проведенной процедуры синтеза получено следующее разностное уравнение регулятора:

$$\begin{aligned} \delta G_t(i) = & \frac{[\dot{n}_2^{pr}(i) - \dot{n}_2(i)] \cdot h}{a_{53}^d(i)} - \\ & - \frac{a_{51}^d(i) \cdot [n_1(i) - n_1(i-1)]}{a_{53}^d(i)} + \\ & + \frac{a_{52}^d(i) \cdot [n_2(i) - n_2(i-1)]}{a_{53}^d(i)}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$L_{du}^{pr}(i) = L_{du}^{pr}(i-1) + \delta G_t(i) / k_2. \quad (6)$$

Уравнение (5) определяет необходимое изменение расхода топлива  $\delta G_t(i)$  на  $i$ -м такте управления, чтобы ликвидировать возникшее рассогласование  $\dot{n}_2^{pr}(i) - \dot{n}_2(i)$  между заданным значением ускорения вращения ротора высокого давления и его текущим значением. Уравнение (6) определяет новое положение дозирующей иглы, при котором будет обеспечиваться требуемый расход топлива. Параметр  $h$ , включенный в состав уравнения (5), выполняет функцию настраиваемого коэффициента усиления.

Структурная схема регулятора разгона представлена на рис. 1.

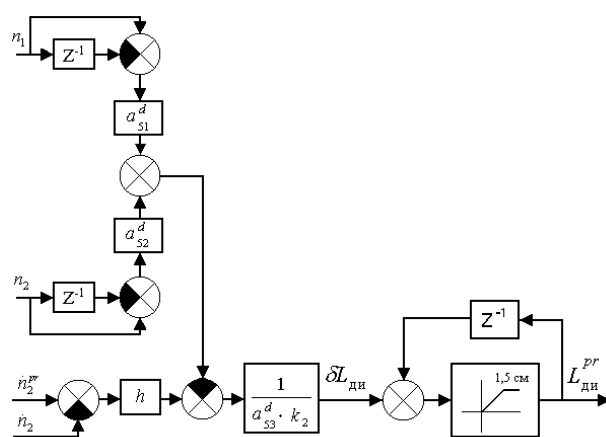


Рис. 1. Структурная схема регулятора разгона

Параметры  $a_{51}^d, a_{52}^d, a_{53}^d$  в (5) являются коэффициентами нелинейной дискретной модели двигателя для параметра  $\Delta \dot{n}_2(i+1)$  и зависят от режима рабо-

ты и внешних условий. Зависимость  $a_{51}^d, a_{52}^d, a_{53}^d$  от внешних условий выражается известными соотношениями газодинамического подобия [2]. Зависимость  $a_{51}^d, a_{52}^d, a_{53}^d$  от режима работы в диапазоне от запуска до максимала была аппроксимирована полиномами третьего порядка.

#### 4. Разработка канала управления сервомотором

Вследствие того, что постоянная времени сервомотора ( $\tau_1 = 10$  с) на два порядка больше по сравнению с постоянной времени дозирующей иглы ( $\tau_2 = 0,1$  с), необходимо ее скомпенсировать, чтобы обеспечить малое значение времени регулирования ( $t_p \leq 1$  с). Кроме того, значительный разброс возможных значений коэффициента передачи  $k_1$  и постоянной времени  $\tau_1$  делают необходимым обеспечить нечувствительность системы к этим факторам, например, путем создания канала управления сервомотором насоса-регулятора.

В структуре канала управления сервомотором расхода топлива целесообразно использовать информацию о положении дозирующей иглы, так как в составе топливоподающего агрегата имеется датчик, измеряющий этот параметр. Использование обратной связи является обычным решением поставленной задачи.

В структуре канала управления в связи с его особенностями реализации в цифровой аппаратуре присутствует задержка 0,052 с при передаче сигнала о положении иглы по информационно-измерительным каналам. Структурный и параметрический синтез проводился по процедуре, изложенной в [1], и состоял из двух этапов. Первый этап заключался в получении дискретной модели сервомотора при временной дискретизации равной величине 0,052 с. Этот этап позволил определить структуру канала и его основные параметры. На втором этапе структура и параметры регулятора были скорректированы та-

ким образом, чтобы обеспечить требуемые запасы устойчивости и отсутствие перерегулирования для всех возможных сочетаний значений параметров модели сервомотора. Для этого используются два форсирующих звена – в прямой цепи и в цепи обратной связи.

В структуру канала также включено функциональное звено, компенсирующее наличие зоны нечувствительности в модели сервомотора (рис. 2).

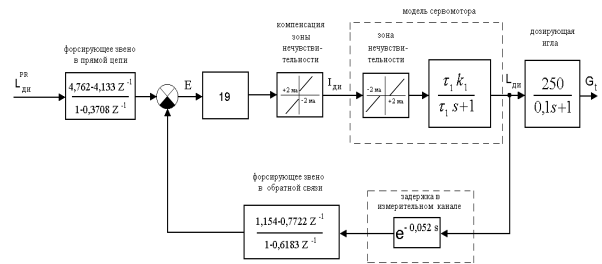


Рис. 2. Структурная схема канала управления сервомотором

Форсирующее звено в прямой цепи компенсирует общую инерционность сервомотора и дозирующей иглы.

Форсирующее звено в цепи обратной связи устраняет перерегулирование переходного процесса при больших значениях коэффициента передачи сервомотора и малых значениях его постоянной времени.

#### 5. Математический эксперимент

Синтезированная система управления разгоном исследовалась с помощью моделирования переходных процессов на цифровых моделях системы управления. Цифровая модель содержала объект управления, описываемый уравнениями (1), разработанный канал управления сервомотором и синтезированный регулятор разгона.

На первом этапе проводились исследования разработанного канала управления сервомотором. Программа исследований включала изучение влияния на качество переходных процессов и запасов устойчивости параметров канала и временного запаздывания в информационно-измерительных каналах.

Основные характеристики разработанной схемы: переходные процессы монотонные без перерегулирования во всем диапазоне изменения параметров сервомотора, их длительность 0,17с – 0,6 с, запасы устойчивости по коэффициенту усиления 10,6 дБ – 16,7 дБ, по фазе 68,6 гр – 80,3 гр, что соответствует требованиям технического задания.

Для дальнейшего повышения нечувствительности характеристик канала управления к изменению параметров сервомотора целесообразно использовать алгоритм пассивной адаптации канала к изменяющимся характеристикам сервомотора.

На втором этапе исследований поводилось моделирование процессов запуска и разгона двигателя до максимального режима для изучения влияния параметров системы на точность выполнения заданной программы регулирования.

На рис. 3 представлен график изменения заданного значения (прерывистая линия) и текущего значения ускорения частоты вращения ротора высокого давления при  $h = 0,25$ . Колебательный характер процесса в конце приемистости вызван возмущениями по производной при переходе с одной кусочно-линейной модели на другую.

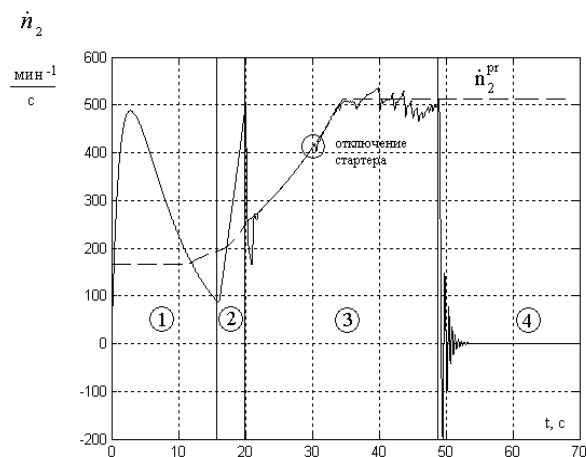


Рис. 3. Переходной процесс по  $\dot{n}_2$  при запуске и разгоне двигателя

На графике выделены четыре основных этапа циклограммы запуска: 1-й – от 0 с до 16 с – раскрут-

ка стартером, 2-й – от 16 с до 20 с – розжиг камеры сгорания, 3-й – с 20 с до 49 с – работа канала разгона, 4-й – с 49 с по 64 с – работа канала повышения степени давления за компрессором  $\pi_k^*$ .

Эксперимент показывает, что погрешность регулирования ускорения частоты вращения ротора высокого давления не превышает 1%.

## Заключение

Разработана структурная схема и определены параметры цифрового регулятора ускорения частоты вращения ротора высокого давления ТРДД АИ-222, в алгоритме функционирования которого отсутствует необходимость вычислять производные высоких порядков для обеспечения высоких динамических характеристик. Из-за особенностей используемой топливodosирующей аппаратуры разработана и исследована структура и определены параметры канала управления сервомотором для применения в канале разгона. Исследованы характеристики канала регулирования ускорения частоты вращения ротора высокого давления. Показано, что погрешность регулирования ускорения частоты вращения не превышает 1%.

## Литература

1. Лянцев О.Д. Синтез цифровых многосвязных систем управления ГТД методами нелинейного программирования. – Уфа: Научное издательство «Башкирская энциклопедия», 2001. – 197 с.
2. Любомудров Ю.В. Применение теории подобия при проектировании систем управления ГТД. – М.: Машиностроение, 1971. – 200 с.

Поступила в редакцию 21.05.2007

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