

УДК 621.452.3

С.И. СУХОВЕЙ, С.В. ЕПИФАНОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОЙ ТУРБИНЫ ГТД

Предложена методика разработки алгоритма автоматической защиты силовой турбины (АЗСТ) ГТД по измерениям частоты вращения ротора для случая, когда датчик частоты вращения после обрыва вала остается на валу потребителя. Разработаны математические модели обрыва вала силовой турбины и канала измерения частоты вращения ротора. Рассмотрена функциональная схема программного комплекса для отладки и тестирования алгоритма АЗСТ.

**алгоритм защиты силовой турбины, вспомогательный газотурбинный двигатель, силовая турбина, линеаризованная динамическая математическая модель ГТД, математическая модель обрыва вала силовой турбины**

### Введение

Для обеспечения безопасности полетов и эксплуатации свободные или силовые турбины (СТ) ГТД оснащаются средствами защиты от раскрутки ротора СТ в случае обрыва вала. С целью обеспечения заданного ресурса и высокой вероятности безотказной работы датчик частоты вращения (ДЧВ) ротора СТ размещают в «холодной» части двигателя – на валу потребителя (рис. 1). При этом разрушение ротора, как правило, может произойти в месте соединения валов потребителя и СТ, расположенном между ДЧВ и СТ.

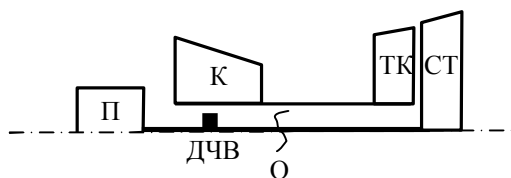


Рис. 1. Схема трансмиссии ГТД: К-компрессор; ТК – турбина компрессора; СТ – силовая турбина; ДЧВ – датчик частоты вращения; П – потребитель; О – место обрыва вала

В двигателях, выполненных по такой схеме, не представляется возможным применить традиционный алгоритм АЗСТ, основанный на прекращении подачи рабочего топлива (РТ) при превышении частотой вращения силовой турбины некоторого заданного порогового значения в случае обрыва вала СТ.

Один из возможных вариантов решения этой за-

дачи состоит в установке за СТ датчиков, которые в случае обрыва вала будут механически разрушены. Сигнал этих датчиков может использоваться в качестве команды на прекращение подачи РТ. Сложность такого решения состоит в том, что датчики должны устанавливаться в «горячей» части двигателя, а на сегодняшний день нет информации о работоспособности и ресурсе датчиков в таких условиях.

Альтернативным вариантом реализации АЗСТ может быть защита, построенная на явлении резкого снижения частоты вращения ротора потребителя при обрыве СТ. Сложность реализации такого варианта защиты состоит в том, что при нормальной работе двигателя также возможно снижение частоты вращения ротора СТ на запуске при выходе на режим, останове и при включении отборов мощности. Необходимо ответить на вопрос, можно ли во всем диапазоне эксплуатационных режимов двигателя с высокой вероятностью выделять явление обрыва вала СТ.

Предложенная методика позволяет выполнить анализ возможности реализации алгоритма АЗСТ в цифровой САУ по результатам математического моделирования и доводки двигателя.

## 1. Математическая модель обрыва вала СТ

Если пренебречь моментами трения в опорах двигателя и сопротивлением агрегатов, динамику инерционного ротора можно описать следующим уравнением [1]:

$$\frac{dn}{d\tau} = \frac{30 \cdot (M_{СТ} - M_{П})}{\pi I_{np}}, \quad (1)$$

где  $I_{np}$  – приведенный момент инерции ротора;

$n$  – частота вращения ротора;

$\tau$  – текущее время;

$M_{СТ}$  – крутящий момент на валу СТ;

$M_{П}$  – момент сопротивления потребителя;

Как видно из уравнения (1), темп изменения частоты вращения ротора  $dn/d\tau$  определяется приведенным моментом инерции ротора  $I_{np}$  и действующим на ротор избыточным моментом.

При обрыве вала СТ ротор разделится на две части. Динамика вращательного движения каждой из них описывается своим уравнением. Для части ротора, примыкающей к потребителю, уравнение (1) примет следующий вид:

$$\frac{dn_{П}}{d\tau} = -\frac{30 \cdot M_{П}}{\pi I_{np \text{ обр } П}}, \quad (2)$$

где  $n_{П}$ ,  $I_{np \text{ обр } П}$  – частота вращения и приведенный момент инерции части ротора с потребителем.

Динамика части ротора с СТ описывается уравнением

$$\frac{dn_{СТ}}{d\tau} = \frac{30 \cdot M_{СТ}}{\pi I_{np \text{ обр } СТ}}, \quad (3)$$

где  $n_{СТ}$ ,  $I_{np \text{ обр } СТ}$  – частота вращения и приведенный момент инерции части ротора с СТ.

Так как моменты инерции частей ротора меньше момента инерции целого ротора, после обрыва вала произойдет увеличение темпа изменения частоты вращения каждой из частей ротора. При этом, как следует из уравнений (2),(3), часть ротора с потребителем будет замедляться ( $dn_{П}/d\tau < 0$ ), а часть ротора с СТ – ускоряться ( $dn_{СТ}/d\tau > 0$ ).

Так как при обрыве вала датчик частоты враще-

ния останется на части ротора потребителя, диагностическим признаком обрыва вала в алгоритме АЗСТ может быть только значение  $dn_{П}/d\tau$ .

Очевидно, что для реализации алгоритма АЗСТ необходимо определить пороговые значения  $dn_{П}/d\tau$ , соответствующие обрыву вала СТ.

## 2. Оценка погрешности определения диагностического признака обрыва вала СТ по результатам стендовых испытаний двигателя

Известно, что при определении производной существенное влияние на результат вычислений оказывают случайные отклонения (шумы) исходной измеряемой величины [2].

Рассеивание рассчитываемого диагностического признака оказывает существенное влияние на достоверность определения состояния объекта. Поэтому на этапе формирования пороговых значений диагностического признака необходимо располагать информацией о величине случайной составляющей в полезном сигнале.

Такая информация может быть получена в результате выполнения предварительной работы по сбору и анализу данных при стендовых и летных испытаниях двигателя. Предпочтение следует отдавать данным, период регистрации  $T_p$  которых меньше. Как правило, это данные, полученные в результате стендовых испытаний.

Для исключения потери информации о рассеивании  $dn_{СТ}/d\tau$ , вызванной большим значением  $T_p$ , ПО блока управления можно дополнить специальным программным кодом для регистрации только максимальных по модулю значений  $dn_{СТ}/d\tau$  за интервал времени  $T_m > T_p$ .

## 3. Формирование пороговых значений диагностического признака обрыва вала СТ

**3.1. Пороговые значения диагностического признака обрыва вала СТ на запуске.** На рис. 2

приведено типичное изменение частоты вращения ротора СТ и ее производной в процессе запуска двигателя. Раскрутка ротора до частоты вращения 100% осуществляется с небольшим перерегулированием – до 2%. При этом в процессе запуска можно выделить три характерных участка изменения  $dn_{СТ}/d\tau$  (рис. 2).

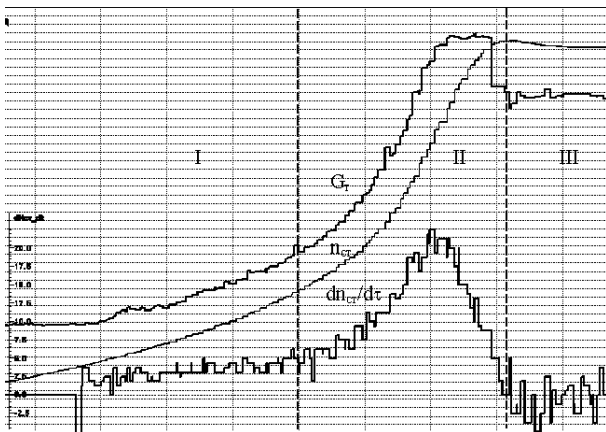


Рис. 2. Изменение частоты вращения ротора СТ  $n_{СТ}$  и производной  $dn_{СТ}/d\tau$  в процессе запуска двигателя

На участке I величина  $dn_{СТ}/d\tau > 0$  принимает относительно небольшие, практически постоянные значения. На участке II  $dn_{СТ}/d\tau > 0$ , монотонно возрастает, затем уменьшается до нуля, а на участке III  $dn_{СТ}/d\tau < 0$ .

При обрыве вала динамика изменения частоты вращения части ротора с потребителем описывается уравнением (2),  $dn_{II}/d\tau < 0$ . Очевидно, что на участках I и II это условие можно было бы использовать в качестве диагностического признака обрыва вала СТ. В этом случае необходимо удостовериться, что к срабатыванию АЗСТ не будут приводить возникшие в силу влияния каких-либо факторов колебательные процессы или случайные составляющие в канале измерения  $n_{cm}$ , усиленные при вычислении производной. Анализ возможных нештатных ситуаций при доводке САУ двигателей показал, что на участках I и II (рис. 2) выполнение условия  $dn_{СТ}/d\tau < 0$  маловероятно для всех ситуаций, кроме обрыва вала СТ. Следовательно, это условие

можно использовать в качестве диагностического признака.

Для формирования порогового значения  $dn_{II}/d\tau$  необходимо построить значение этого параметра при обрыве вала СТ в процессе запуска. Для этого необходимо располагать зависимостью момента сопротивления потребителя от частоты вращения  $M_{II} = f(n_{II})$ . Например, если потребителем является центробежный нагнетатель, эту зависимость можно построить, принимая во внимание ее близость к квадратичной, и, располагая значениями мощности, потребляемой нагнетателем на режиме холостого хода. На рис. 3 приведены значения  $dn_{СТ}/d\tau$  исправного двигателя, теоретически определенного порога срабатывания АЗСТ, а также рабочий вариант  $(dn_{СТ}/d\tau)_{пор}$  для блока управления с учетом запасов на ложное срабатывание и погрешности определения порога срабатывания АЗСТ.

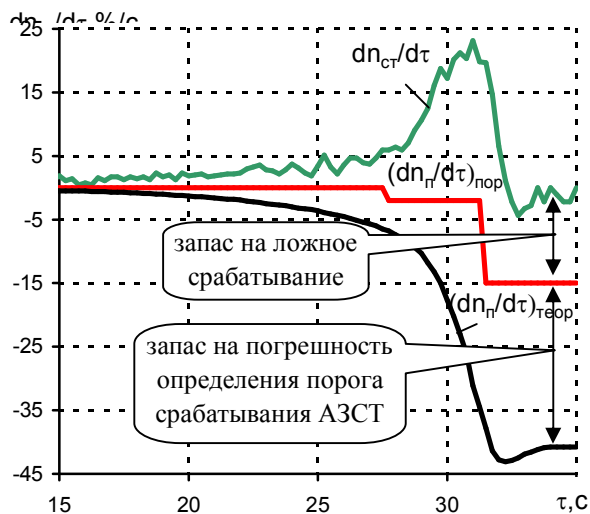


Рис. 3. Изменение  $dn_{СТ}/d\tau$  исправного двигателя, установленного и теоретически определенного порогов срабатывания АЗСТ

Предложенный вариант формирования  $(dn_{СТ}/d\tau)_{пор}$  состоит из трех постоянных значений, переключение между которыми происходит в заданные моменты времени.

**3.2. Пороговые значения диагностического признака обрыва вала СТ на режиме.** Специфика работы двигателя на режиме состоит в том, что, в

отличие от режима запуска, возможны штатные ситуации, когда рассчитываемый диагностический признак обрыва вала  $dn_{CT}/d\tau$  принимает отрицательные значения. Переходные процессы, вызванные увеличением мощности потребителя, приводят к уменьшению частоты вращения ротора СТ, следовательно на соответствующих участках система будет фиксировать значения  $dn_{CT}/d\tau < 0$ . Реализовать надежный алгоритм АЗСТ на режиме можно будет в том случае, если значения диагностического признака  $dn_{CT}/d\tau$  в процессе штатной работы двигателя и при обрыве вала будут отличаться достаточно для того, чтобы исключить ложные срабатывания. Оценить значения  $dn_{CT}/d\tau$  при увеличении мощности потребителя можно с помощью следующей зависимости:

$$\frac{dn_{CT}}{d\tau} = -\frac{900 \cdot \Delta N_{II}}{\pi^2 I_{пр} \text{рот СТ} n_{CT0}}, \quad (4)$$

где  $\Delta N_{II}$  – величина изменения мощности потребителя;

$n_{CT0}$  – частота вращения ротора СТ в момент изменения мощности потребителя.

#### 4. Математическая модель канала измерения частоты вращения ротора СТ

Частота вращения ротора вычисляется с учётом количества зубьев индуктора и передаточного отношения. Таким образом, период обновления измерения частоты вращения СТ будет определяться следующей зависимостью:

$$T_{обн} = 1/F_{обн} = 1/(n_{CT} \cdot C), \quad (5)$$

где  $C$  – константа, учитывающая количество зубьев индуктора, передаточное отношение и количество усреднений.

Вызов алгоритма АЗСТ осуществляется с фиксированным периодом  $T_{АЗСТ}$ . Поэтому при частоте вращения ниже некоторого граничного значения  $n_{CT_{сп}}$  измерения будут выполняться реже, чем вызов модуля АЗСТ. Это будет приводить к искажению

рассчитываемых значений производной  $dn_{CT}/d\tau$ .

Граничное значение частоты вращения по периоду обновления выражается из (5):

$$n_{CT_{сп}} = 1/(T_{АЗСТ} \cdot C). \quad (6)$$

На рис. 4 приведено влияние  $T_{обн}$  на разброс рассчитываемых значений  $dn_{CT}/d\tau$ .

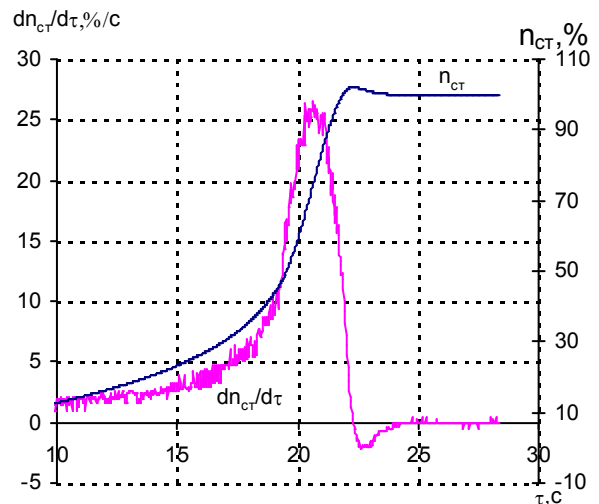


Рис. 4. Характер изменения рассчитываемых значений  $dn_{CT}/d\tau$  при моделировании процесса запуска двигателя с учетом модели канала измерений частоты вращения

Разброс  $dn_{CT}/d\tau$  уменьшается по мере увеличения  $n_{CT}$ . Однако результаты предварительного определения  $dn_{CT}/d\tau$  в процессе испытаний двигателя на стенде свидетельствуют о том, что с увеличением частоты вращения ротора СТ разброс значений производной возрастает. Это объясняется наличием случайной составляющей в канале измерения частоты вращения. К тому же эта составляющая изменяется в процессе работы двигателя с изменением частоты вращения ротора. Предполагая, что случайная составляющая распределена по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением  $\sigma$ , зависящим от частоты вращения ротора СТ, ее можно ввести в математическую модель, аппроксимировав экспериментальные данные полиномом второй степени:

$$\sigma = a_0 + a_1 \cdot n_{CT} + a_2 \cdot n_{CT}^2, \quad (7)$$

где  $a_0, a_1, a_2$  – константы.

## 5. Отладка и тестирование алгоритма АЗСТ

Тестирование разработанного алгоритма автоматической защиты силовой турбины выполнялось с использованием линейной динамической математической модели двигателя (3), дополненной математической моделью обрыва вала и функциями управления.

Функциональная схема соответствующего программного комплекса приведена на рис. 5.



Рис. 5. Функциональная схема программного комплекса для тестирования алгоритма АЗСТ

## Заключение

Таким образом, предложенная методика формирования комплекса диагностических признаков обрыва вала СТ по темпу изменения частоты вращения части вала потребителя включает следующие этапы:

1. Определение моментов инерции частей ротора после обрыва вала.
2. Оценка погрешности определения диагностического признака обрыва вала СТ по результатам стендовых испытаний двигателя.
3. Формирование пороговых значений диагностического признака обрыва вала СТ.
4. Формирование математической модели канала измерения частоты вращения ротора СТ.
5. Отладка и тестирование алгоритма АЗСТ на ПЭВМ с использованием математических моделей двигателя, обрыва вала СТ, а также функций управления.
6. Стендовые и летные испытания алгоритма АЗСТ.

## Литература

1. Добрянский Г.В., Мартынова Т.С. Динамика авиационных ГТД. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
2. Шрюфер Э. Обработка сигналов: цифровая обработка дискретизированных сигналов: Учебник / Под ред. В.П. Бабака. – К.: Либідь, 1995. – 320 с.
3. Разработка пакета программ для моделирования термогазодинамических параметров ГТД: Отчет / ХАИ; Рук. работы С.В. Епифанов, N ГР 01890068850; инв. N 02900031291. – Х., 1990. – 275 с.

Поступила в редакцию 1.06.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.И. Кузнецов, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.