

Моржов В.И., д.т.н.  
Срмачков Ю.А.,  
Моржова Л.И.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ - ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИМИТАЦИИ ОТКАЗОВ АВИАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Національний авіаційний університет

*Рассмотрены вопросы имитации отказов при функционировании бортового оборудования воздушного судна на разных режимах эксплуатации. Показано, что имитацию отказов авиационной техники целесообразно осуществлять методами математического моделирования. В работе приведены результаты моделирования отказа газотурбинного двигателя воздушного судна.*

### **Математическое моделирование – эффективная технология для исследования авиационного оборудования.**

Технология моделирования это процесс исследования сложных технических систем на их моделях для определения и уточнения характеристик, а также оптимизации способов их построения.

Сущность этой технологии моделирования выражает системотехническая триада “объект – модель – эксперимент”. Речь идет о замене системы или процесса, то есть исходного объекта, его моделью и о дальнейшем ее исследовании при проведении различных экспериментов.

Математическое моделирование возникло с появлением первых средств электронной вычислительной техники. Следует отметить, что широкое распространение технология математического моделирования получила среди ученых и инженеров-конструкторов только после создания цифровых высокопроизводительных вычислительных машин. Это позволило ученым и специалистам успешно решить целый ряд актуальных задач, которые теоретически методами не решались.

Становление технологии математического моделирования определялось не только потребностью науки и промышленности, но и возможностями средств вычислительной техники и проходило одновременно с развитием промышленности, научного знания, а также актуальности задач, которые ставили авиационные специалисты промышленно развитых стран.

Так, например, для создания бортового оборудования современных ВС необходимы принципиально новые технические решения. Такие разработки невозможны без проведения широкомасштабных экспериментов на базе производственной вычислительной техники и техноло-

гии математического моделирования физических процессов авиационного оборудования.

Использование такой технологии при разработке и проведении сертификационных испытаний новой ВС Ан-148 позволило существенно снизить затраты на экспериментальные реальные полеты, сократить сроки сертификации бортового оборудования, а также существенно уменьшить количество авиационных происшествий и предпосылок к ним.

Эксперимент, который проводится на основе математической модели, позволяет частично или полностью заменить дорогостоящее натурное экспериментирование, существенно сократить сроки, уменьшить стоимость реализации и внедрения новых разработок бортового оборудования.

Следует отметить, что основным достоинством математического моделирования физических процессов по сравнению с натурным моделированием является универсальность математической модели авиационного оборудования. Универсальность математических моделей, состоящих из различных математических описаний систем, алгоритмов и программ, обеспечивает возможность оперативного, и без дополнительных затрат, перехода от решения одной физической задачи к другой.

Как показано на рис. 1., эффективность технологии математического моделирования существенно зависит от большого числа разнообразных факторов: полнота математического описания физического процесса, точность вычислений, которые обеспечивают аппаратные средства используемой ЦВМ, а также программное обеспечение, реализующее алгоритмы функционирования математической модели.

Если главной целью при разработке математического описания физического процесса

является наиболее полное воссоздание информационных потоков, которые адекватны информационным потокам моделируемого объекта, то выбор и обоснование состава и требуемой

производительности аппаратных средств определяется сложностью и режимами функционирования математической модели.



Рис. 1. Факторы, определяющие эффективность технологии математического моделирования.

Программное обеспечение как системное, так и прикладное является неотъемлемой составной частью цифровой математической модели, обеспечивающее статические и динамические свойства моделируемого физического процесса и определяется как сложностью математического авиационного оборудования, так и профессионализмом коллектива программистов, разрабатывающих специальные и прикладные программы модели.

Особую роль программное обеспечение играет в деле создания универсальных математических моделей, которые не зависят от модификации аппаратных средств ЦВМ и обеспечивают надежную работу на различных режимах функционирования модели. Существует неправильное представление о том, что наличие ЦВМ само по себе может решать все проблемы, которые связаны с моделированием сложных авиационных систем. Между тем, в настоящее время программное обеспечение составляет не менее 80% от общей стоимости цифровой математической модели, что объясняется большой трудоемкостью процесса разработки пакета прикладных программ и является ее "интеллектуальным ядром". Между тем, работы по программированию и алгоритмизации различного оборудования можно упростить и унифицировать процедуру программирования если перейти от экстенсивного на интенсивный путь разработки программных средств за счет модуль-

ного принципа построения цифровой модели. Программирование математического описания систем с использованием алгоритмических языков высокого уровня упрощает построение математических моделей по модульному принципу. В этом случае каждый отдельно взятый модуль математической модели может быть многократно использован в составе различных моделей авиационного оборудования.

С целью создания сети специальных отраслевых научно-информационных центров, занятых накоплением и хранением как отдельных модулей, так и полной математической модели конкретного авиационного оборудования, а также информации справочного характера по математическим, моделям авиационной отрасли страны, существенно повысит эффективность использования математических моделей в различных сферах деятельности авиационных специалистов. Отсутствие таких центров в масштабе страны снижает эффективность работ по моделированию, поэтому невелик их размах, низкий их технический уровень и качество. Опыт немногочисленных коллективов, имеющих в различных отраслях промышленности и участвовавших в решении на основе новых информационных технологий крупнейших задач нашего времени (таких как создание современной авиационной техники), не получают широкого распространения из-за ведомственных барьеров.

## Имитация отказов вспомогательной силовой установки воздушного судна

В качестве вспомогательной силовой установки (ВСУ) на самолете, как правило, используется газотурбинный авиационный двигатель АИ9-3Б. Оборудование ВСУ на самолете обеспечивает:

- запуск двигателей на земле до высоты полета 4000м и работу в полете до высоты 7200 м;
- подачу сжатого воздуха для запуска маршевых двигателей;
- подачу сжатого воздуха для системы кондиционирования кабин самолета;
- питание бортовой электросети самолета от генератора переменного тока, установленного на двигателе ВСУ.

Результаты многолетней эксплуатации авиационных двигателей АИ9-3Б показал, что часто встречающимися отказами у этого авиационного оборудования являются:

- зависание оборотов двигателя;
- предельные обороты двигателя;
- самопроизвольный останов двигателя;
- падение давления масла;
- невоспламенение топлива.

При отказе "Зависание оборотов ВСУ" прекращается увеличение частоты вращения ротора на запуске двигателя, что сопровождается ростом температуры газов за турбиной свыше  $880^{\circ}\text{C}$ , при этом происходит автоматическое выключение двигателя ВСУ.

$$dn/dt = S_0 K_n K(H) (-M_{TK} - M_{TR} + S_1 M_{ST} + S_2 M_{TN} + S_3 \Delta M_{OTK});$$

где:

$S_i$ ,  $i=1,2,3\dots$  – логические переменные, принимающие значения 1 при наличии слагаемого и нулевые значения при отсутствии слагаемого;

$K_n$  – величина, обратная моменту инерции ротора: для ВСУ  $K_n=0,2$ ;

$K(H)$  – изменение момента инерции ротора от высоты, задается по данным летных испытаний в табличной форме;

Логические переменные обозначают:

$S_0$  – режим "замораживание" при  $S_0 = 0$ ,

$S_1$  – включение ( $S_1=1$ ) и выключение ( $S_1=0$ ) момента стартера, вводится с модели системы запуска;

$S_2$  – наличие ( $S_2=1$ ) и отсутствие ( $S_2=0$ ) положительного значения момента турбины в процессе запуска, формируется в зависимости от  $n$  и признаков подачи топлива и воспламенения топлива;

Проявления отказа "Предельные обороты ВСУ" сопровождается загоранием (при  $N_{всу}=105\%$ ) светосигнального табло "ПРЕД ПАРАМ" и автоматическим останом двигателя ВСУ.

Отказ "Останов ВСУ" – самопроизвольное выключение двигателя ВСУ проявляется за счет падения оборотов двигателя и температуры газов за турбиной.

Отказ "Падение давления масла" сопровождается загоранием светосигнального табло "МИН ДАВЛ МАСЛА" и происходит автоматическое выключение двигателя ВСУ (отказ "Падение давления масла" проявляется загоранием табло "Тмин давл масла").

Отказ "Невоспламенение топлива" проявляется через отсутствие роста температуры газов за турбиной при запуске.

Моделирование вышеперечисленных отказов целесообразно осуществлять на основе математической модели работы газотурбинного двигателя, математическое описание этого физического процесса представлено в виде следующей системы уравнений:

### Уравнения для моделирования работы газотурбинного двигателя

1. Частота вращения ротора ( $n$ ).

Уравнение для параметра  $n$  (частоты вращения ротора), приведенное к форме, удобной для моделирования, представляется в виде:

$S_3$  – наличие ( $S_3=1$ ) и отсутствие ( $S_3=0$ ) отказов, приводящих к самопроизвольным увеличениям или уменьшениям частоты вращения ротора ВСУ.

Относительные моменты ротора двигателя:

$M_{TK}$  – турбокомпрессора;

$M_{TR}$  – трения;

$M_{CT}$  – стартера;

$M_{TN}$  – турбины на режиме запуска;

$\Delta M_{OTK}$  – изменение момента турбины при отказах регулятора оборотов.

Относительные моменты определяются в соответствии с приведенными зависимостями:

$$M_{TK} = n^2;$$

$n$  – текущее относительное значение частоты вращения ротора;

$$M_{CT} = n^2 \times n \times C - n \times n \times (C-1);$$

где  $n_{xp}$  – установившиеся относительные обороты ротора на режиме холодной прокрутки;  $n_{xp} = 0,236$ ;  $C$  – аналог мощности стартера,  $C=2,5$ ;

$$M_{тн} = 1,14 \text{ пмг птб} + 0,01 \text{ Ктр};$$

где птб – частота вращения ротора (текущая); пмг – частота вращения ротора на рабочем режиме; птб ограничено значением 0,877 пмг;

$$\Delta M_{отк} = \Delta n^2 + 2n \Delta n;$$

где  $\Delta n$  – приращение значения частоты вращения ротора; знак “+” используется для увеличе-

ния оборотов, а знак “-” – для уменьшения оборотов.

2. Температура выходящих газов:

$$T_g = T_g(n,t);$$

где  $t$  – время, с.

3. Давление масла:

$$PM = PM(n);$$

4. Температура масла:

$$TM = TM(GT).$$

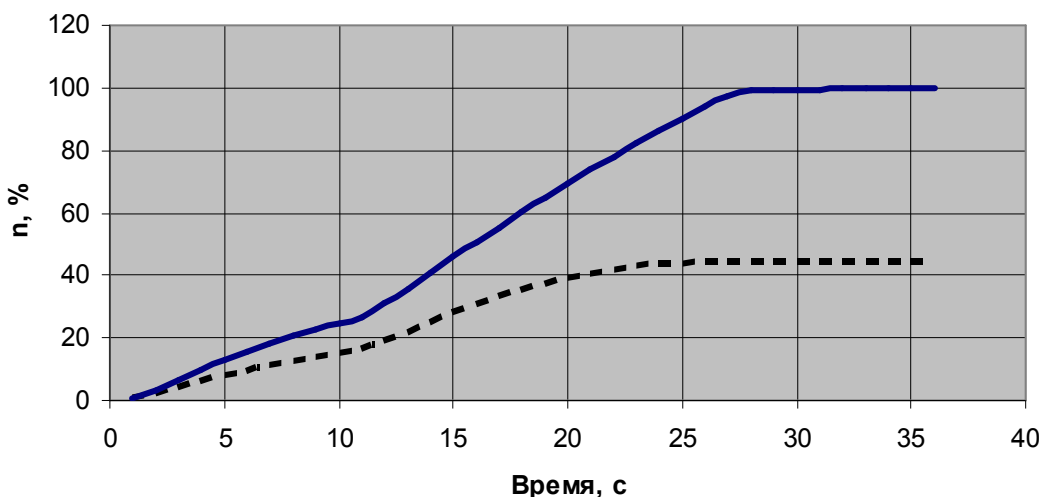


Рис. 2. Частота вращения ротора при МСА

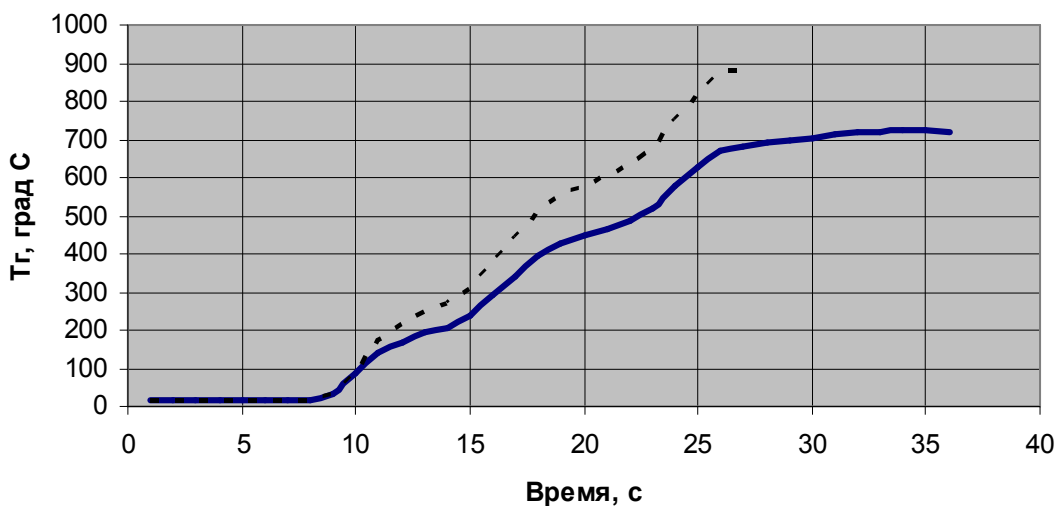


Рис. 3. Температура газов за турбиной при МСА

Логические условия моделирования, отказов работы газотурбинного двигателя имеют следующий вид:

Логическое условие моделирования «зависания» частоты вращения двигателя записывается в виде:

$$[\text{отказ } 1] \rightarrow K1(1) \rightarrow [(MTN(ti) = \text{const})];$$

где  $ti$  – момент введения отказа;  $K1$  – условие введения отказа.

Логическое условие отказа «предельные обороты» двигателя имеет вид:

$$(\text{отказ}2) \rightarrow (\Delta M_{отк} \wedge S3(1)) \rightarrow \text{пвсу} \rightarrow \rightarrow \text{пгран.об} \rightarrow T_{предпар}(1);$$

где  $T_{\text{пред пар}}$  – табло «ПРЕД ПАРАМ»;

Логическое условие отказа «самопроизвольный останав» имеет вид:

$$(\text{отказ 4}) \rightarrow \{[(T_{\text{мин.давл.масл}}(1)] \wedge [S1(0) \wedge S2(0)]\}.$$

Логическое условие отказа «Невоспламенение топлива» имеет вид:

$$(\text{отказ 5}) \rightarrow T_{\text{г}} = t_{\text{нв}},$$

где  $t_{\text{нв}}$  – температура наружного воздуха.

Ниже приведены результаты моделирования отказа «зависание оборотов» газотурбинного двигателя для параметров  $n_{\text{вд}}$  и  $T_{\text{г}}$  (частоты вращения ротора и температуры газов за турбиной соответственно) на режиме нормального запуска и запуска с «зависанием» частоты вращения ротора  $n$  (пунктирная линия).

Таким образом, результаты моделирования отказа «зависание оборотов» газотурбинного двигателя, которые были получены с помощью цифровой модели его функционирования, показывают, что этот отказ проявляется по параметрам  $n$  и  $T_{\text{г}}$ . Как следует из графиков рис. 1., па-

$$(\text{отказ 3}) \rightarrow ((S1(0) \wedge (S2(0))).$$

Логическое условие отказа «Падение давления масла» имеет вид:

раметр  $n$  при наличии отказа не достигает требуемого значения (пунктирная линия). Как следует из графиков (рис. 2), параметр  $T_{\text{г}}$  имеет существенный рост (пунктирная линия), превышающий допустимое значение.

### **Список литературы**

1. Моржов В.І. Призначення і класифікація авіаційних тренажерів та моделювальних комплексів. – К.: КМУЦА, 1997. – 120 с.
2. Красовський А.А. Основы авиационных тренажеров. – М. Машиностроение. 1995. – 303 с.
3. Базилевский А.А., Гузий А.Н. Моделирование поля информации в авиационных тренажерах. – К. Знание, 1975. – 55 с.