

ИНДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВУХВАЛЬНОГО ГТД

© 2006 В.С. Габдуллин, Х.С. Гумеров, В.П. Алаторцев

Уфимский государственный авиационный технический университет

В данной работе приведены результаты идентификации математической модели двухвального ГТД, установленного на самолете-штурмовике. Сущность идентификации заключается в минимизации разности между параметрами математической модели и реального двигателя без изменения структуры модели, а только за счёт уточнения ряда параметров. Предлагается повысить достоверность оценки технического состояния ГТД.

Для математических моделей выполненных ГТД, реализуемых на этапах экспериментальных исследований, доводки, производства и эксплуатации двигателей, характерен такой уровень моделирования, при котором физические взаимосвязи считаются качественно установленными и для оценки состояния рабочего процесса в двигателе требуются количественное уточнение параметров, привлекаемых для описания физических явлений. Сущность идентификации заключается в минимизации разности между параметрами математической модели и реального двигателя без изменения структуры модели, а только за счёт уточнения ряда параметров. Другими словами модель двигателя должна соответствовать конкретному экземпляру двигателя. В ГТД параметрами, которые подлежат уточнению, чаще всего, являются различные коэффициенты потерь, КПД узлов, различные утечки и отборы воздуха и т.д.

В данной работе приведены результаты идентификации математической модели двухвального ГТД, установленного на самолете-штурмовике (рис.1).

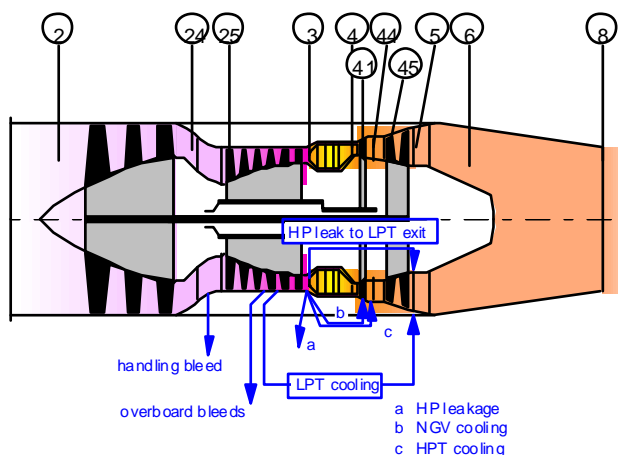


Рис.1. Схема двигателя

За последние десять лет разработано множество программных продуктов, предназначенных для математического моделирования газотурбинных двигателей с помощью ЭВМ (таблица 1):

- “Dwig” (разработан на кафедре АД УГАТУ);
- “ГРАД” (разработан в КГТУ);
- “GECAT” (разработан в университете г. Алабама, США);
- “Gas Turb” (разработан под руководством профессора И. Курцке в университете г. Карлсруэ, Германия).

Таблица 1. Сравнение программных комплексов для математического моделирования ГТД

Наименование возможностей	Наименования программных комплексов			
	Dwig	ГРАД	GECAT	Gas Turb
Высокая скорость расчётов	+	+	±	+
Высокая точность расчётов	+	+	-	+
Удобство работы и расчётов	±	-	+	+
Удобные средства для работы с характеристиками узлов	±	-	-	++
Визуализация и удобная работа с выходными данными	+	-	±	++
Наличие дополнительных модулей и программ, облегчающих работу	-	-	+	+

Примечание: - - качество низкое; ± - качество среднего уровня; + - качество высокого уровня; ++ - качество очень высокого уровня.

Из таблицы 1 видно, что наиболее предпочтительным для моделирования рабочих процессов ГТД является программный комплекс Gas Turb, предназначенный для термогазодинамических расчетов газотурбинных двигателей на установившихся и

переходных режимах работы. Кроме того, в программном комплексе имеются средства для расчета разброса параметров серии двигателей методом Монте Карло, расчета эффекта малых отклонений параметров и оптимизации рабочих процессов двигателя. Весь процесс идентификации рассматриваемой модели двухвального ГТД сводился к минимизации разности между результатами расчёта и результатами испытаний данного двигателя.

Идентификация модели проводилась по данным серии двигателей, полученных в разные годы при испытаниях и эксплуатации. В таблице 2 приведены осреднённые значения по данным 102 двигателей.

Таблица 2. Осредненные значения данных по параметрам двигателей для максимального режима работы при $H=0, M=0, \sigma_{вх}=1, n_1=100,5\%$

Параметр	X_{cp}	S_x	Норма
G_{To}	3334	32,5	—
R_o	4059,5	22,636	4100...100
C_{Ro}	0,821	0,009	<0,86
G_{Bo}	66,5	0,33	65,4...67
t_{3o}	840,8	7,537	—
t_{43AM}	597,2	12,77	<770
F_{CA1}	703,3	0,651	—
F_{CA2}	1219,7	5,9	—
$D_{p,c}$	538,9	0,749	533...541
π_K^*	8,631	0,056	—
P_{Ko}	8,31	0,062	—
P_{K0}	873,88	5,175	—
n_{2o}	95,74	0,393	—
t_{2o}	319,02	2,503	318±6

Примечание: X_{cp} – осреднённое значение параметра для серии двигателей; S_x – среднеквадратичное отклонение параметра; «Норма» – значение параметра, нормируемое технической документацией; G_{To} – расход топлива; R_o – тяга двигателя; C_{Ro} – удельный расход топлива; G_{Bo} – расход воздуха; t_{3o} – температура за камерой сгорания; t_{43AM} – температура за турбиной; F_{CA1} , F_{CA2} – площади сопловых аппаратов турбин высокого и низкого давления; $D_{p,c}$ – диаметр реактивного сопла; π_K^* – степень повышения давления в компрессоре; P_{Ko} – давления за компрессором; n_{2o} – частота вращения ротора высокого давления; t_{2o} – температура за компрессором

По данным дроссельных характеристик было проведено осреднение параметров для режима $n_{1пр}=100,5\%$:

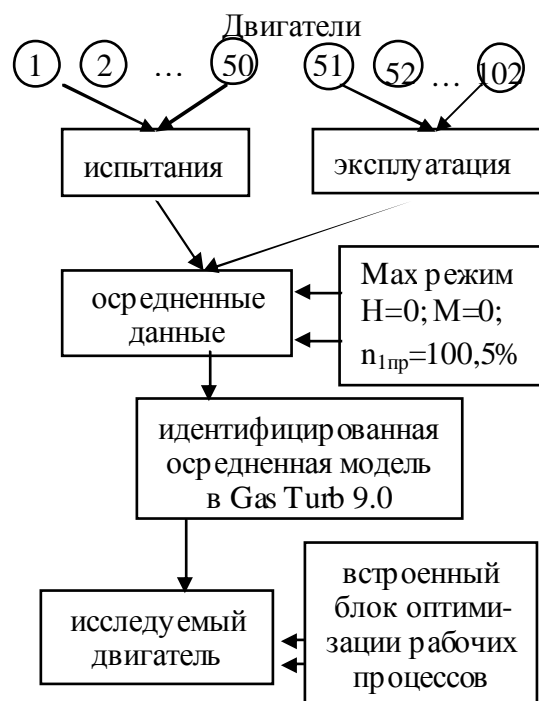


Рис. 2. Схема идентификации модели

$n_{1пр} = 100,5\%$; $R = 4070$ кгс; $G_T = 3430$ кг/ч; $C_R = 0,843$ кг топли/кг тяги·ч; $G_B = 66,4$ кг/с; $n_2 = 96,3\%$; $t_2^* = 319$ °С; $t_3^* = 860$ °С; $t_4^* = 570$ °С; $\pi_K^* = 8,61$.

Сравнивая средние значения параметров (таблица 3) с данными таблицы 2, видно, что все они находятся в пределах среднеквадратичного отклонения. Исключение составляет лишь удельный расход топлива.

Таблица 3. Расчетные значения параметров

Параметр	Значение	Параметр	Значение
G_T	3444	F_{CA1}	699,3
C_{Ro}	0,871	F_{CA2}	1208,9
R	3952	$D_{p,c}$	539
t_{3o}	851	$G_{отб}$	0,05
t_{43AM}	661	η_z	0,97
π_{Ko}^*	8,48	F_K	874
P_{Ko}	8,13	$F_{вх}$	3615
n_{2o}	95,02	$T_{Г, K}^*$	1124

Процесс идентификации заключался в минимизации разности между параметрами математической модели и реального двигателя без изменения структуры модели, а только за счёт уточнения таких параметров, как степень повышения полного давления в КНД, степень повышения полного давления в КВД, механический и адиабатический КПД ротора высокого давления и ротора

низкого давления, коэффициент полного давления в камере сгорания, коэффициент тяги сопла, относительный отбор воздуха на охлаждение соплового аппарата ТНД, рабочей лопатки ТНД и отбор на охлаждение ТВД и др. Также применялся встроенный блок оптимизации рабочих процессов, позволяющий быстро и точно минимизировать разницу между параметрами математической моделью и реальным двигателем.

Результаты идентификации приведены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты идентификации

Параметр	Значение	Параметр	Значение
G _T	3443,9	$\pi_{K_0}^*$	8,48
R _{уд}	0,8715	P _{K₀}	0,871
R, H	3951,4	F _{CA1}	699,2
t ₃₀	851	F _{CA2}	1208,9
t _{43AM}	562,6	D _{P.C}	539

Сравнение таблиц 3 и 4 показывает почти полное совпадение всех параметров, кроме t₃₀, что обусловлено спецификой замера этого параметра на двигателе.

Известно, что оценка технического состояния двигателей в условиях эксплуатации проводится, как правило, по ограниченному объему информации о контролируемых параметрах, что существенно снижает эффективность параметрических методов диагностики и, в частности, основанных на идентификации математических моделей двигателей. Поэтому в дальнейшем предлагается повысить достоверность оценки технического состояния ГТД за счет:

1) обоснования (уточнения) перечня идентифицируемых параметров на основе применения альтернативных методов диаг-

ности двигателя: контроля масла, вибрации, визуального осмотра и др., что позволит исключить из числа идентифицируемых параметры, приводящие к плохой обусловленности матрицы системы нормальных уравнений, решением которой проводится оценка состояния;

2) выбора наиболее информативного режима контроля параметров двигателя, основанного на анализе средних значений коэффициентов влияния;

3) оптимального сочетания различных методов оценки с учетом точности контроля параметров и объема имеющейся информации о ГТД. Например, установлено, что если дефектным является узел, оказывающий большое влияние на контролируемые параметры двигателя, то оптимальным при диагностике является сочетание метода нелинейной оптимизации и метода уравнивания;

4) идентификации состояния двигателя с применением базы данных по дефектам и отказам, включающий как статистические данные по дефектам и отказам, так и данные, полученные моделированием дефектов и отказов по математической модели двигателя, а также дефектов и отказов, описываемых неформализуемыми признаками состояния двигателя. Содержащиеся в базе "портреты" неисправностей позволят уточнить перечень идентифицируемых параметров и тем самым снизить неопределенность при оценке технического состояния двигателя.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ.

IDENTIFICATION OF MATHEMATICAL MODEL TWO SPOOL GAS-TURBINE ENGINE

© 2006 V.S. Gabdullin, H.S. Gumerov, V.P. Alatortsev

USATU

In work the identified mathematical model concrete two spool gas-turbine engine, used is created as a power-plant by planes - battleplane. In the given work for a basis of mathematical modelling program complex Gas Turb is taken.