

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТВД PW125B НА ДОСТОВЕРНОСТЬ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ЕГО ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ

Евгений Копытов¹, Владимир Лабендик², Арвидс Осис²

¹ *Институт транспорта и связи*

Ломоносова 1, Рига, LV-1019, Латвия

Тел: +(371)7100590. Факс: +(371)7100660. E-mail: kopitov@tsi.lv

² *Рижский технический университет. Авиационный институт*

Ломоносова 1, Рига, LV-1019, Латвия

Тел: +(371)7089988. Факс: +(371)7089990. E-mail: vladlab@junik.lv

На основе линейной математической модели двигателя PW125B самолёта Fokker-50 сформирована диагностическая (локализирующая) матрица (ДМ), позволяющая путём определения относительных отклонений измеряемых термогазодинамических параметров вычислить отклонения некоторых расчётных параметров. Для проверки работоспособности ДМ произведено моделирование как одинарных, так и двойных дефектов компрессоров и турбин. Оценка достоверности диагностики состояния модулей двигателя проведена путем численного моделирования статистического разброса значений параметров в диапазоне погрешностей измерений.

Ключевые слова: турбовинтовой двигатель, термогазодинамические параметры, линейная математическая модель, диагностическая матрица

1. Введение

Рассматривается задача повышения глубины диагностирования двухвального газогенератора турбовинтового двигателя PW125B самолёта Fokker-50, эксплуатируемого в аэропорту «Рига», путем применения так называемых диагностических матриц (ДМ).

Для разработки линейной математической модели (ЛММ) этого двигателя использованы методы работы [1], но для большего соответствия полученной модели изменению состояния газогенератора в процессе его эксплуатации в уравнения ЛММ введены дополнительные члены, учитывающие смещение характеристик компрессоров и турбин при износе и дефектах проточной части [2].

С целью повышения глубины диагностирования предложено установить в проточной части двигателя дополнительные приёмники давления и температуры. Их необходимое количество теоретически обосновано, исходя из числа переменных, требуемых для решения системы из 16 уравнений модифицированной ЛММ двигателя. Решение системы линеаризованных уравнений описания газового потока в проточной части ТВД (физическая математическая модель) приведено для случая неизменной мощности и крутящем моменте при постоянной частоте вращения ротора турбины винта ($\delta N_e = \delta M_{кр} = \delta n_{ТВ} = 0$), поэтому эти параметры исключены из рассмотрения.

Степень расширения в реактивном сопле ТВД очень мала, поэтому свободная турбина и сопло двигателя PW125B рассматриваются как единый агрегат, в котором происходит расширение газа от полного давления на входе в свободную турбину до статического давления на срезе сопла.

2. Математическая модель

В процессе разработки ЛММ получены следующие 16 уравнений:

- отношение давлений по тракту двигателя:

$$\delta\sigma_{BX}^* + \delta\pi_{КНД}^* + \delta\sigma_1^* + \delta\pi_{КВД}^* + \delta\sigma_{КС}^* = \delta\pi_{ТВД}^* + \delta\pi_{ТНД}^* + \delta\pi_{ТВ}^* \quad (1)$$

- баланс мощностей на роторе КНД:

$$B_1\delta\pi_{КНД}^* - \delta\eta_{КНД}^* = \delta T_{ТВД}^* + B_3\delta\pi_{ТНД}^* + \delta\eta_{ТНД}^* ; \quad (2)$$

- баланс мощностей на роторе КВД:

$$\delta T_{КНД}^* + A_1\delta\pi_{КВД}^* - \delta\eta_{КВД}^* = \delta T_{\Gamma}^* + A_3\delta\pi_{ТВД}^* + \delta\eta_{ТВД}^* ; \quad (3)$$

- уравнение неразрывности между входом в КНД и СА ТВД:

$$\delta G_B = \delta\sigma_{BX}^* + \delta\pi_{КНД}^* + \delta\sigma_1^* + \delta\pi_{КВД}^* + \delta\sigma_{КС}^* + \delta F_{САВД} - 0,5\delta T_{\Gamma}^* ; \quad (4)$$

- уравнение неразрывности между СА ТВД и СА ТНД:

$$(1 - 0,5A_3A_4)\delta\pi_{ТВД}^* = \delta F_{САНД} - \delta F_{САВД} + 0,5A_4\delta\eta_{ТВД}^* ; \quad (5)$$

- уравнение неразрывности между СА ТНД и СА ТВ:

$$(1 - 0,5B_3B_4)\delta\pi_{ТНД}^* = \delta F_{САВ} - \delta F_{САНД} + 0,5B_4\delta\eta_{ТНД}^* ; \quad (6)$$

- уравнение мощности на валу турбины винта:

$$\delta G_B + \delta T_{ТНД}^* + C_3\delta\pi_{ТВ}^* + \delta\eta_{ТВ}^* = 0 ; \quad (7)$$

- уравнение процесса сжатия в КВД:

$$\delta T_{КВД}^* = \delta T_{КНД}^* + A_1A_2\delta\pi_{КВД}^* - A_2\delta\eta_{КВД}^* ; \quad (8)$$

- уравнение процесса сжатия в КНД:

$$\delta T_{КНД}^* = B_1B_2\delta\pi_{КНД}^* - B_2\delta\eta_{КНД}^* ; \quad (9)$$

- уравнение процесса расширения в ТВД:

$$\delta T_{ТВД}^* = \delta T_{\Gamma}^* - A_3A_4\delta\pi_{ТВД}^* - A_4\delta\eta_{ТВД}^* ; \quad (10)$$

- уравнение процесса расширения в ТНД:

$$\delta T_{ТНД}^* = \delta T_{ТВД}^* - B_3B_4\delta\pi_{ТНД}^* - B_4\delta\eta_{ТНД}^* ; \quad (11)$$

- два уравнения описания характеристики КВД:

$$\delta G_B = A_{10}\delta\pi_{КВД}^* + \delta\sigma_1^* + \left(1 - \frac{A_{10}}{A_{10}}\right)\delta\bar{G}_{B\text{ КВД}} + A_m\delta n_{ВД} ; \quad (12)$$

$$\delta\eta_{КВД}^* = A_{11}\delta\pi_{КВД}^* + \delta\eta_{КВД}^* - \frac{A_{11}}{A_{10}}\delta\bar{G}_{B\text{ КВД}} - A_n\delta n_{ВД} ; \quad (13)$$

- два уравнения описания характеристики КНД:

$$\delta G_B = B_{10} \delta \pi_{КНД}^* + \delta \sigma_1^* + \left(1 - \frac{B_{10}}{B_{10}}\right) \delta \bar{G}_{В КНД} + B_m \delta n_{НД}; \quad (14)$$

$$\delta \eta_{КНД} = B_{11} \delta \pi_{КНД}^* + \delta \eta_{КНД}^{-*} - \frac{B_{11}}{B_{10}} \delta \bar{G}_{В КНД} - B_n \delta n_{НД}; \quad (15)$$

- уравнение подвода теплоты в камере сгорания:

$$\delta G_T = \delta G_B + (K_5 + 0,2) \delta T_T^* - (K_5 - 1,05) \delta T_{КВД}^* - \delta \xi_{КС}. \quad (16)$$

Эта система 16 линеаризованных уравнений в малых отклонениях параметров имеет 30 относительных переменных $\left(\frac{\Delta T_H}{T_H} \approx \frac{dT_H}{T_H} = \delta T_H\right)$, из которых 14 – независимые: $\{\delta \sigma_{ВХ}^*, \delta \sigma_1^*, \delta \sigma_{КС}^*, \delta \eta_{ТВД}^*, \delta \eta_{ТНД}^*, \delta \eta_{ТВ}^*, \delta F_{САВД}, \delta F_{САНД}, \delta F_{САВ}, \delta \bar{G}_{В КВД}, \delta \eta_{КВД}^{-*}, \delta \bar{G}_{В КНД}, \delta \eta_{КНД}^{-*}, \delta \xi_{КС}\}$.

Расчёт коэффициентов взаимного влияния (A, B, K) параметров в уравнениях ЛММ произведен на режиме максимальной мощности $N = 1864,25$ кВт (2500 л.с.) при соответствующих значениях газодинамических параметров: $T_H = 288$ К; $T_{КНД}^* = 472$ К; $T_{КВД}^* = 658,6$ К; $T_T^* = 1423$ К; $T_{ТВД}^* = 1230$ К; $T_{ТНД}^* = 1056$ К; $T_{ТВ}^* = 823$ К; $\pi_{ТВД}^* = 1,996$; $\pi_{ТНД}^* = 2,01$; $\pi_{ТВ}^* = 3,09$; $\pi_{ТНД}^* = 5,2$; $\pi_{КВД}^* = 2,75$; $\eta_{КНД}^* = 0,935$; $\eta_{КВД}^* = 0,85$.

При расчёте коэффициентов A_{10} и B_{10} принято допущение, что в случае дефектов компрессоров их характеристики смещаются вдоль линии рабочих режимов.

3. Диагностическая матрица и ее применение

На основе ЛММ двигателя сформирована диагностическая (локализирующая) матрица (ДМ), позволяющая путём определения относительных отклонений измеряемых термогазодинамических параметров вычислить отклонения некоторых расчётных параметров. Некоторые из этих параметров, в частности, дополнительные параметры сдвига характеристик компрессоров являются критериями (диагностическими признаками) появления дефектов в проточной части этих модулей газогенератора. При этом число отклонений измеряемых параметров должно быть равно числу критериев в ДМ. Остальные определяемые с помощью ДМ параметры несут информацию об изменении характеристик двигателя из-за изменения режима его работы.

Для успешной диагностики газогенератора необходимо контролировать все его узлы – каждый компрессор и каждую турбину. Существующее число измеряемых параметров не позволяет проводить качественную диагностику, так как изменения малого числа параметров не указывают на то, какие возможные процессы происходят в проточной части двигателя. Из математической модели двигателя можно видеть, что между параметрами компрессора и турбины есть однозначная связь, но при недостаточном числе измеряемых параметров эту связь не всегда можно выявить – система уравнений ЛММ становится нерешаемой.

Необходимо отметить, что для рассматриваемого двигателя главная цель автоматики регулирования – поддерживать постоянную мощность ($\delta N_e = \delta M_{КР} = \delta n_{ТВ} = 0$) в данных условиях полёта. В этой ситуации параметры газогенератора могут колебаться в определённых границах. В случае развития дефекта в одном из узлов

автоматика на заданном режиме вынуждена компенсировать потерю мощности единственно возможным способом – увеличивая подачу топлива G_T . Это, в свою очередь, приводит к увеличению температуры газов перед турбиной T_G^* и соответственно – к увеличению работы той турбины, на которой нет дефекта. Подобная ситуация возникает при развитии дефектов компрессора – в случае снижения расхода воздуха или КПД вследствие загрязнения или механических повреждений происходит увеличение потребной мощности, которое необходимо компенсировать повышением работы турбины, что, в свою очередь, достигается повышением температуры газов и приводит к увеличению $T_{ТНД}^*$ и G_T и падению $n_{НД}$. Установление границ допустимых отклонений параметров является отдельной важнейшей задачей в диагностике на основе сбора статистики развития дефектов, что обеспечит цель прогноза дальнейшей безопасной работы двигателя.

Опираясь на этот анализ, в качестве дополнительных измеряемых параметров выбраны следующие: $\pi_{КНД}^*$ – степень сжатия КНД; $\pi_{КВД}^*$ – степень сжатия КВД; $T_{КНД}^*$ – температура за КНД; $T_{КВД}^*$ – температура за КВД; $\pi_{ТНД}^*$ – степень расширения в ТНД.

В уравнениях системы члены с измеряемыми параметрами переносятся в правую часть, а из коэффициентов влияния при них составляется таблица (матрица) коэффициентов B , остальные члены переносятся в левую часть, и из их коэффициентов составляется матрица A . После математических операций обращения матрицы A и перемножения матриц получается результирующая так называемая диагностическая матрица $C = [A]^{-1} \times [B]$ (см. табл.1):

Таблица 1

	$\delta n_{ВД}$	$\delta n_{НД}$	$\delta T_{ТНД}^*$	δG_T	$\delta \pi_{КНД}^*$	$\delta \pi_{КВД}^*$	$\delta T_{КНД}^*$	$\delta T_{КВД}^*$	$\delta \pi_{ТНД}^*$
$\delta \bar{G}_{ВКНД}$	0.000	-2.481	-0.878	0.000	0.053	0.000	0.000	0.000	0.000
$\delta \bar{\eta}_{КНД}^*$	0.000	0.190	-0.091	0.000	0.694	0.000	-2.564	0.000	0.000
$\delta \bar{G}_{ВКВД}$	-2.481	0.000	-0.878	0.000	0.000	0.053	0.000	0.000	0.000
$\delta \bar{\eta}_{КВД}^*$	0.19	0.000	-0.091	0.000	0.000	1.068	0.000	-3.533	0.000
$\delta \eta_{ТВД}^*$	0.000	0.000	-1.334	0.000	-1.325	-1.325	-2.504	3.054	1.325
$\delta F_{САВД}$	0.000	0.000	-0.576	0.000	-1.000	-1.000	-0.015	0.239	0.000
$\delta \eta_{ТНД}^*$	0.000	0.000	-0.858	0.000	0.000	0.000	2.200	0.000	-1.310
$\delta F_{САНД}$	0.000	0.000	-0.071	0.000	0.000	0.000	0.182	0.000	-1.000
$\delta \xi_{КС}$	0.000	0.000	0.583	-1.000	0.000	0.000	-0.061	1.799	0.000

Как видно, с помощью этой матрицы возможно диагностировать не только турбокомпрессор, но и камеру сгорания – изменение коэффициента полноты сгорания в ней. Ниже приводятся результаты моделирования дефектов с помощью таблицы коэффициентов влияния и проверка матрицы на локализацию дефекта. Пусть имеется одинарный дефект компрессора низкого давления, характеризуемый отклонениями критериев $\delta \bar{G}_{ВКНД} = -3$ и $\delta \bar{\eta}_{КНД}^* = -2$. Результаты расчётов представлены в табл. 2.

Таблица 2

	$\delta n_{ВД}$	$\delta n_{НД}$	$\delta T_{ТНД}^*$	δG_T	$\delta \pi_{КНД}^*$	$\delta \pi_{КВД}^*$	$\delta T_{КНД}^*$	$\delta T_{КВД}^*$	$\delta \pi_{ТНД}^*$	Локализованный дефект
$\overline{\delta G_{ВКНД}}$	0.000	-2.481	-0.878	0.000	0.053	0.000	0.000	0.000	0.000	-2.997
$\delta \eta_{КНД}^*$	0.000	0.190	-0.091	0.000	0.694	0.000	-2.564	0.000	0.000	-1.999
$\overline{\delta G_{ВКВД}}$	-2.481	0.000	-0.878	0.000	0.000	0.053	0.000	0.000	0.000	-0.007
$\delta \eta_{КВД}^*$	0.19	0	-0.091	0	0.000	1.068	0.000	-3.533	0.000	-0.017
$\delta \eta_{ТВД}^*$	0.000	0.000	-1.334	0.000	-1.325	-1.325	-2.504	3.054	1.325	0.022
$\delta F_{САВД}$	0.000	0.000	-0.576	0.000	-1.000	-1.000	-0.015	0.239	0.000	-0.002
$\delta \eta_{ТНД}^*$	0.000	0.000	-0.858	0.000	0.000	0.000	2.200	0.000	-1.310	0.006
$\delta F_{САНД}$	0.000	0.000	-0.071	0.000	0.000	0.000	0.182	0.000	-1.000	0.000
$\delta \xi_{КС}$	0.000	0.000	0.583	-1.000	0.000	0.000	-0.061	1.799	0.000	0.003
Сдвиг измеряемых параметров по таблице коэффициентов влияния	-0.38	0.78	1.13	1.78	-1.32	0.81	0.44	0.64	0.00	

В эксплуатации необходимо решить прямую задачу – локализовать дефект узла непосредственно по изменениям значений измеряемых параметров. При этом каждому дефекту соответствует характерное только ему сочетание отклонений измеряемых параметров.

Для локализации дефекта узла с помощью диагностической матрицы необходимо воспользоваться диагностическим уравнением, например:

$$\overline{\delta G_{ВКНД}} = a_1 \delta n_{ВД} + a_2 \delta n_{НД} + a_3 \delta T_{ТНД}^* + a_4 \delta G_T + a_5 \delta \pi_{КНД}^* + a_6 \delta \pi_{КВД}^* + a_7 \delta T_{КНД}^* + a_8 \delta T_{КВД}^* + a_9 \delta \pi_{ТНД}^* ,$$

где a_i – коэффициент влияния соответствующего измеряемого параметра на искомый параметр (критерий дефекта). Необходимо отметить, что чем выше точность измерений, тем точнее локализация дефекта.

Для проверки работоспособности ДМ произведено моделирование как одинарных, так и двойных дефектов компрессоров и турбин. Оценка достоверности диагностики состояния модулей двигателя проведена путем численного моделирования статистического разброса значений параметров в диапазоне погрешностей измерений: давлений и частот вращения роторов – 1%, температур и расхода топлива – 1,5%. Далее с помощью генератора случайных чисел (Random Number Generation) в программе MS Excel 2000) задавался комплекс из 20 отклонений измеряемых параметров при условии нормального распределения погрешностей их замеров. Результаты анализа рассматриваемого выше дефекта компрессора низкого давления и вектора его дальнейшего развития приведены на рис. 1.

Как видно, при достаточном числе значений измеряемых параметров, регистрируемых в полете на МСРП, предлагаемая диагностическая матрица позволяет локализовать дефект и контролировать его развитие в допустимых пределах.

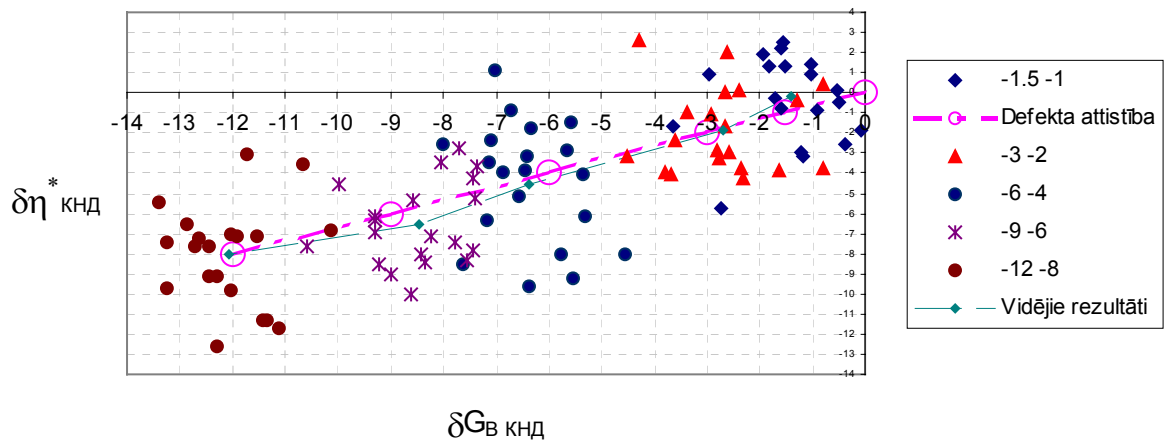


Рис. 1. Результаты диагностики развития дефекта компрессора (изменение критериев $\delta \bar{G}_{вкнд}$ и $\delta \bar{\eta}_{кнд}^*$) с учетом погрешностей замера параметров

4. Выводы

Исследование показало достаточную чувствительность разработанной диагностической матрицы к выявлению и других дефектов узлов турбовинтового двигателя PW125B, что позволит перейти от качественной (выполняемой в настоящее время) к количественной оценке признаков дефектов и накоплению статистики их появления в эксплуатации. Накопленная статистика теоретически обоснованных критериев физического проявления дефектов двигателя позволит эффективно использовать их при разработке нового поколения автоматизированных диагностических систем с элементами искусственного интеллекта типа нейронных сетей [3], при этом с помощью ДМ и моделирования дефектов по ней в дальнейшем исследовании предполагается разработать программу обучения нейронных сетей процедурам распознавания дефектов авиадвигателей.

Литература

1. Черкез А. Я. Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений. – Москва: Машиностроение, 1975. – 380 с.
2. Лабендик В. П., Кузнецов Н. С. Особенности формирования диагностических матриц для контроля состояния проточной части авиационных ГТД / Изв. ВУЗ “Авиационная техника”. – Казань: КАИ, 1993, № 3. – С.21-27.
3. Копытов Е., Лабендик В. Кабелев Н. Особенности диагностических систем с элементами искусственного интеллекта / Computer Modeling & New Technologies, 2001, Volume 5, №1, – Riga: Transport and Telecommunication Institute, pp. 119-123.