

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДОСТОВЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНЕЙНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

© 2011 А.Б. Герасимов, М.Ю. Сундуков

ОАО «Климов», г. Санкт-Петербург

Предложен метод оценки возможного количества вариантов идентификации математической модели газотурбинного двигателя для адекватного описания результатов испытаний в условиях ограниченного количества измеряемых параметров. Исследована зависимость между количеством возможных вариантов идентификации и количеством измеряемых и диагностируемых параметров.

Газотурбинный двигатель, диагностика, идентификация, линейная математическая модель.

Основные условные обозначения:

$\eta_{ок}$ – КПД осевого компрессора (ОК),
 $G_{ок}$ – расход воздуха на входе в ОК,
 $\pi_{ок}$ – степень сжатия в ОК,
 $\eta_{цк}$ – КПД центробежного компрессора (ЦК),
 $G_{цк}$ – расход воздуха на входе в ЦК,
 $\pi_{цк}$ – степень сжатия в ЦК,
 $\bar{G}_{зтк}$ – пропускная способность турбины компрессора (ТК),
 $\eta_{тк}$ – КПД ТК,
 $\bar{G}_{зтс}$ – пропускная способность свободной турбины (ТС),
 $\eta_{тс}$ – КПД ТС,
 $\sigma_{кс}$ – коэффициент восстановления полного давления в камере сгорания (КС),
 $\eta_{кс}$ – полнота сгорания топлива в КС,
 i – порядковый номер отклика,
 j – порядковый номер фактора,
 d – степень дискретизации диапазона изменения факторов,
 m – масштаб вариации факторами,
 $n_{тк}$ – обороты турбокомпрессора,
 N_b – мощность на выводном валу,
 $G_{топ}$ – физический расход топлива,
 $T_{зтс}^*$ – температура торможения перед ТС,
 π_k^* – суммарная степень сжатия воздуха в осецентробежном компрессоре,
 $G_{вх}$ – расход воздуха на входе в двигатель,
 $P_{ок}^*$ – полное давление за ОК,
 $T_{вых}^*$ – температура торможения в выходном устройстве,
 $T_{ок}^*$ – температура торможения за ОК,
 $T_{цк}^*$ – температура торможения за ЦК,
 $P_{тк-тс}^*$ – полное давление в межтурбинном канале,
 $P_{вых тс}^*$ – полное давление на выходе из ТС,

Δ – среднеквадратическое отклонение рассчитанных по линейной модели откликов от экспериментально измеренных параметров.

На существующих газотурбинных двигателях существует проблема однозначной и достоверной диагностики их технического состояния по замеренным газодинамическим параметрам. Сложность диагностируемости ГТД состоит в том, что относительно узкому набору измеряемых экспериментально параметров может соответствовать множество комбинаций диагностируемых параметров.

Для абсолютно точной оценки необходимо просчитать все возможные комбинации диагностируемых параметров по максимально подробной нелинейной математической модели. Каждый диагностируемый параметр должен варьироваться непрерывно в некоторых «разумных» пределах. После расчета всех возможных комбинаций оценивается их количество, соответствующее минимальному среднеквадратическому отклонению расчетных данных от экспериментальных. На практике данный метод не может быть реализован, поскольку возможное количество комбинаций диагностируемых параметров бесконечно, а значит расчет также займет бесконечное время.

Чтобы свести время расчета к конечной и адекватной величине, предлагается заменить нелинейную математическую модель ГТД линейной, а диагностируемые параметры варьировать в «разумном» диапазоне дискретно. Таким образом, время расчета

всех возможных комбинаций будет определяться в первую очередь их количеством, которое определяется по формуле:

$$N = d^n, \quad (1)$$

где n – количество диагностируемых параметров; d – величина дискретности.

Численное исследование необходимо начать с вычисления массива коэффициентов влияния $A_{i,j}$ с использованием нелинейной математической модели ГТД. Коэффициенты рассчитываются методом однофакторного эксперимента для какого-либо установленного режима работы двигателя:

$$A_{i,j} = \frac{r1_{i,j} - r2_{i,j}}{2 \cdot m \cdot r0_i}, \quad (2)$$

где i – номер параметра, получаемого в результате расчета априорной нелинейной модели ГТД, соответствующий экспериментально измеряемому параметру (далее по тексту – отклик); j – номер диагностируемого параметра (далее по тексту – фактор); m – масштаб вариации фактором; $r0_i$ – i -й отклик; $r1_{i,j}$ – отклик при изменении j -го фактора на величину « $+m$ »; $r2_{i,j}$ – отклик при изменении j -го фактора на величину « $-m$ ».

Получаемый массив коэффициентов влияния используется в системе линейных уравнений:

$$\begin{cases} \Delta r_i = \sum_j A_{1,j} \cdot \Delta f_j \\ \dots \\ \Delta r_i = \sum_j A_{i,j} \cdot \Delta f_j \end{cases}, \quad (3)$$

где Δr_i – относительная поправка к отклику, Δf_j – изменение фактора. Для оценки разницы откликов, получаемых по системе линейных уравнений, от экспериментальных данных используется формула среднеквадратического отклонения:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_i \left(\frac{r_i + \Delta r_i \cdot r_i - r_{i \text{ эксп}}}{D_i} \right)^2}{i}}, \quad (4)$$

где r_i – i -й отклик, получаемый по расчету нелинейной математической модели; Δr_i – относительная поправка к i -му отклику, получаемая по системе линейных уравнений; $r_{i \text{ эксп}}$ – соответствующее i -му отклику экспериментальное значение; D_i – диапазон изменения значения i -го отклика на режимах

работы двигателя от «малого газа» до «чрезвычайного», рассчитываемый по нелинейной математической модели.

Для численного исследования возможности достоверной диагностики в дальнейшем необходимо определиться с количеством диагностируемых параметров (факторов) и их дискретностью при варьировании.

С точки зрения получения максимально достоверного результата количество факторов должно полностью охватывать все возможные причины изменения параметров ГТД в ходе эксплуатации. Но, учитывая (1), нужно помнить, что большое число факторов значительно увеличивает время расчета. При выборе величины дискретности стоит руководствоваться теми же соображениями. Например, при минимальном количестве факторов, которое можно считать достаточным для турбовального двигателя $n = 10$ и величине дискретности $d = 3$, количество всех возможных комбинаций факторов $N \approx 60000$. Для $n = 15$ и $d = 5$ количество комбинаций $N \approx 30$ млрд. Для более сложных схем двигателей, например двухконтурных, количество факторов будет больше.

Дальнейшее численное исследование проведено на математической модели двигателя ТВ7-117В на мощности взлетного режима 2800 л.с. Двигатель ТВ7-117В – турбовальный, с осецентрированным компрессором, кольцевой противоточной камерой сгорания, турбиной привода осецентрированного компрессора и свободной турбиной. Большая часть исследования была проведена при количестве факторов $n = 12$ (в их число вошли наиболее значимые с точки зрения описания возможных неисправностей: $\eta_{ок}$, $G_{ок}$, $\pi_{ок}$, $\eta_{цк}$, $G_{цк}$, $\pi_{цк}$, $\bar{G}_{зтк}$, $\eta_{тк}$, $\bar{G}_{зтс}$, $\eta_{тс}$, $\sigma_{кс}$, $\eta_{кк}$) и величине дискретности $d = 3$. Количество возможных сочетаний факторов при этом составило $N \approx 530$ тыс., расчет на машине с процессором Xeon 3,2 ГГц и 4 Гб ОЗУ длился 2-3 минуты. Цель исследования – установить возможности предложенной выше методики по выявлению одного или нескольких дефектов в зависимости от разных параметров.

Расчет проводится путем перебора всех возможных комбинаций факторов. Каждый фактор дискретно (в соответствии с параметром d) варьируется в пределах $[-m; +m]$. В качестве экспериментальных данных ис-

пользуются данные расчета априорной нелинейной математической модели с заведомо введенным в неё дефектом.

Расчет при отсутствии дефекта

На рис.1 показано получаемое распределение значений среднеквадратического отклонения Δ , упорядоченных по возрастанию (в данном случае все точки сливаются в одну кривую). Видно, что минимальному значению Δ соответствует узкий набор комбинаций факторов. В увеличенном виде этот участок показан на рис.2. В данном случае одна из точек соответствует $\Delta = 0$, т.к. при

расчете этого распределения в данные априорной модели не был введен дефект. В случае введения дефекта в модель или в случае диагностирования реального двигателя точки со значением $\Delta = 0$ почти наверняка не будет. Поэтому необходимо исследовать область распределения, соответствующую минимальным значениям Δ . Результаты такого исследования представлены на рис.3 - показана гистограмма, полученная при обработке 150 комбинаций, соответствующих минимальному Δ . Каждый столбец гистограммы соответствует определенному фактору.

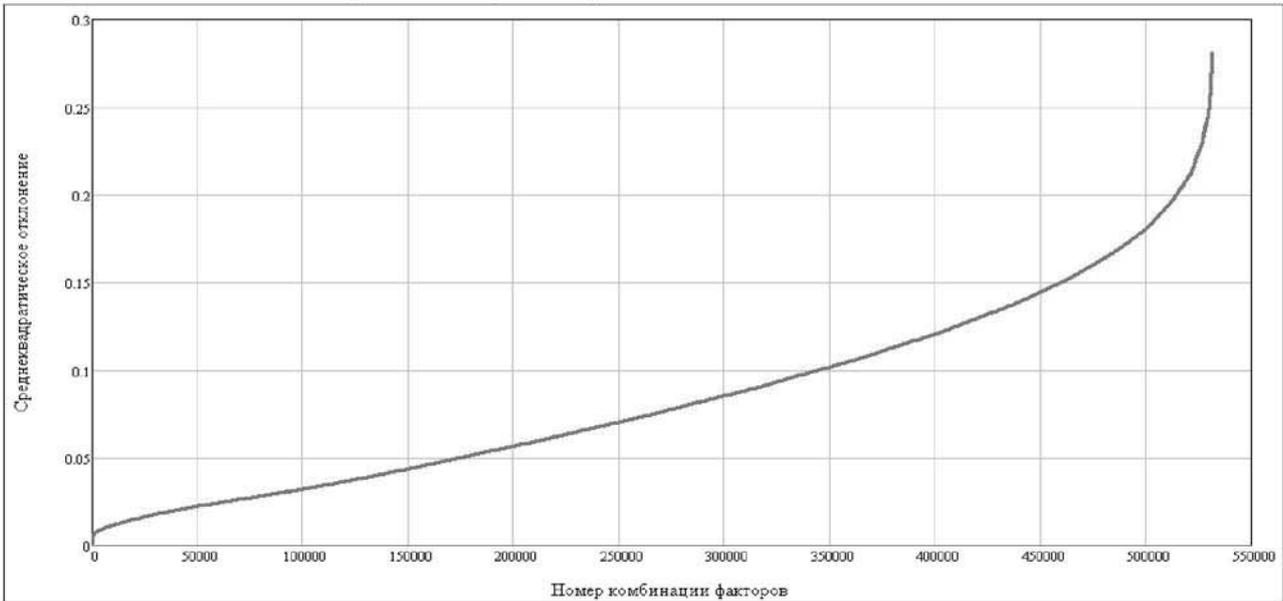


Рис. 1. Среднеквадратическое отклонение в зависимости от номера комбинации факторов (диагностируемых параметров)

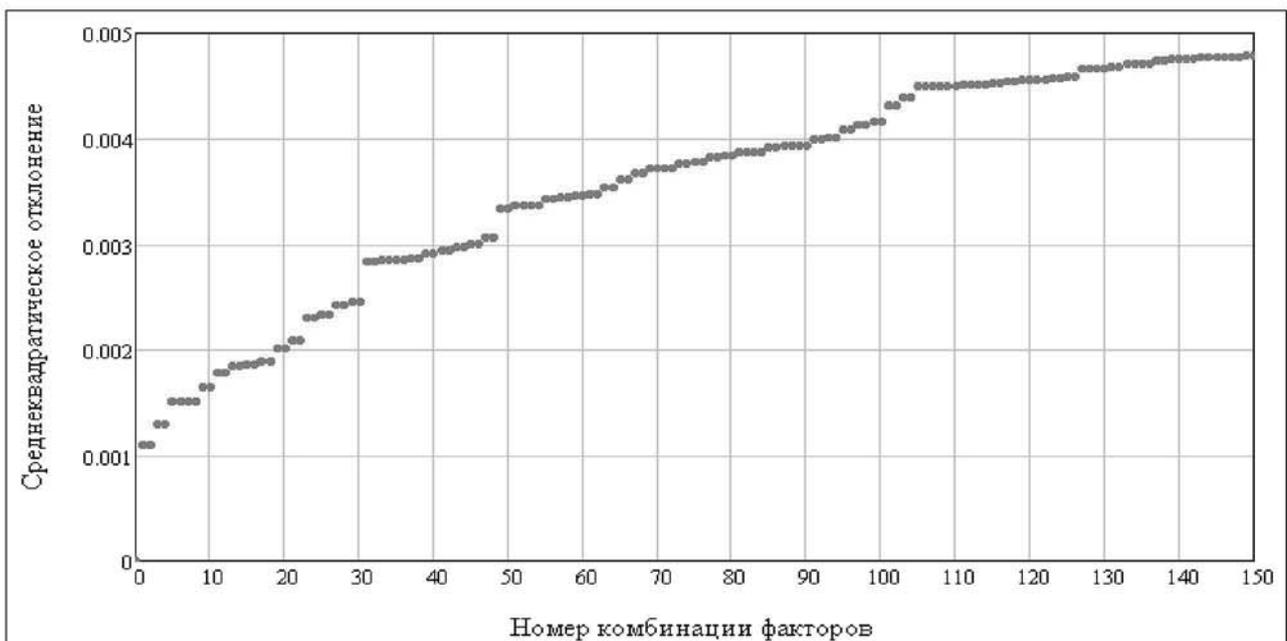


Рис. 2. Комбинации факторов, соответствующие наименьшему значению среднеквадратического отклонения

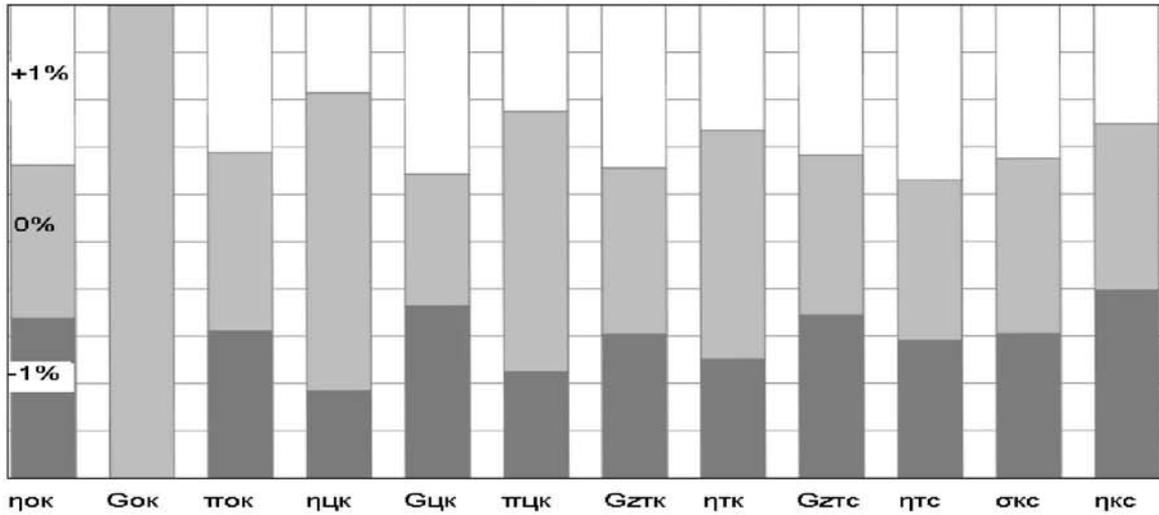


Рис. 3. Результаты анализа комбинаций с минимальными среднеквадратическими отклонениями

Высота всех столбцов одинакова и соответствует количеству выбранных комбинаций факторов с минимальным Δ . Каждый столбец делится на количество частей, равное параметру дискретизации. Отношение высоты любой такой части к высоте всего столбца отображает «вес» определенного изменения фактора в общем количестве выбранных комбинаций.

В данном случае видно, что области белого и черного цветов, соответствующие изменению фактора на +1% и -1%, для всех столбцов почти равны друг другу, что говорит об отсутствии влияния фактора на величину Δ . Преобладание области серого цвета, соответствующей изменению фактора на 0%, т.е. отсутствию его изменения, также говорит об отсутствии влияния фактора на величину Δ .

Для удобства полученные результаты можно также представить в табличном виде (табл. 1).

Таблица 1. Результаты диагностики

Фактор	"Вероятный диагноз, %"
"кпд ок"	0
"G ок"	0
"π ок"	0
"кпд цк"	0
"G цк"	-0.007
"π цк"	0
"G зтк"	0.04
"кпд тк"	0.013
"G зтс"	-0.026
"кпд тс"	0.079
"сигма кс"	0.02
"кпд кс"	-0.146

Значение «вероятного диагноза» в таблице рассчитывается по формуле:

$$F_j = \sum_d \Delta f_{d,j} \cdot \varphi_{d,j}, \quad (5)$$

где d – дискретность; j – порядковый номер рассматриваемого фактора; $\Delta f_{d,j}$ - изменение значения фактора (в данном случае может принимать значение -1%, 0% или +1% - в зависимости от выбранного масштаба вариации и дискретности); $\varphi_{d,j}$ - «вес» данного изменения фактора в общем количестве рассматриваемых комбинаций. Из таблицы видно, что диагноз по всем факторам близок к нулю.

Таким образом, можно сделать вывод, что в рассматриваемом случае нет дефектов, поскольку ни один из факторов почти не влияет на величину Δ . Данные результаты соответствуют ожидаемым, поскольку в модель двигателя не было введено ни одного дефекта.

Диагностика развивающегося дефекта

Далее по указанному методу исследуется возможность обнаружения и локализации развивающегося дефекта. Дефект смоделирован за счет введения в априорную модель двигателя поправки на КПД турбины компрессора $\eta_{тк}$ -0,2%, -0,4% ... -2%. Полученные при этом результаты расчета используются в качестве экспериментальных.

В расчете было использовано 12 факторов (см. выше), 8 откликов ($n_{тк}$, $N_{в}$, $G_{топ}$, $T_{зтс}^*$, $\pi_{к}^*$, $G_{вх}$, $P_{ок}^*$, $T_{вых}^*$), дискретность $d =$

3. Была проведена серия расчетов с разными масштабами вариации $m = 1\%$, $1,5\%$, 2% , $2,5\%$.

При обработке полученных результатов видно, что все факторы можно условно разделить на три группы. В первую попадают факторы, знак изменения которых сильно зависит от выбранного масштаба вариации, помимо этого по мере роста величины дефекта изменение фактора не имеет строгой закономерности (пример $\eta_{цк}$ - рис.4). Во вторую группу попадают факторы, изменение которых, независимо от масштаба вариации и уровня развития дефекта, остаётся примерно постоянным и равным 0% (пример $\eta_{кк}$ - рис.5). В третью группу попадают в данном случае 3 фактора: $\eta_{ок}$, $\pi_{цк}$ и $\eta_{тк}$ (рис.6-8). Знак их изменения практически не зависит от масштаба вариации, величина изменения по мере роста дефекта возрастает.

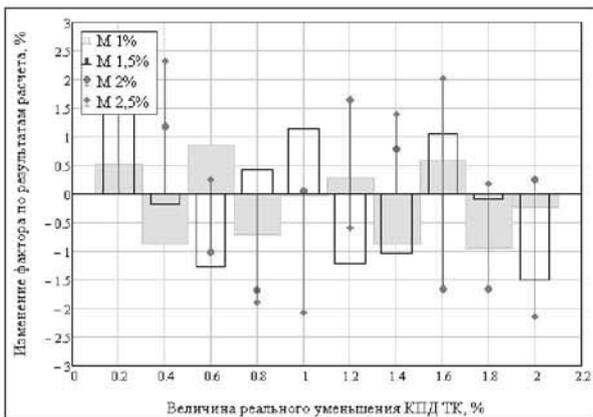


Рис. 4. Изменение $\eta_{цк}$ по результатам диагностики в зависимости от масштаба вариации и величины дефекта $\eta_{тк}$

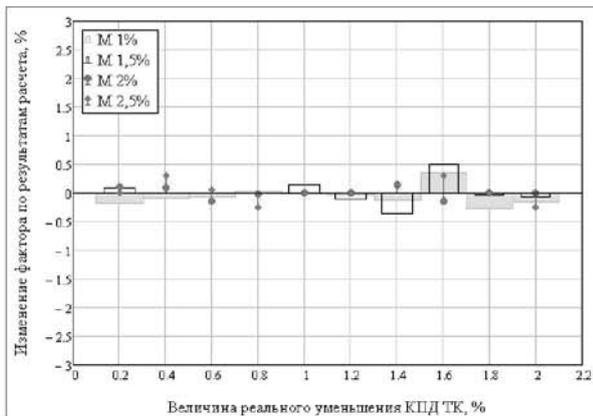


Рис. 5. Изменение $\eta_{кк}$ по результатам диагностики в зависимости от масштаба вариации и величины дефекта $\eta_{тк}$

Очевидно, что ценность результатов из первой группы равна нулю, т.к. получаемое хаотическое колебание параметров противоречит физическому смыслу. Можно предположить, что вошедшие в эту группу факторы слабо меняются в процессе эксплуатации двигателя. Результаты из второй группы подтверждают, что вошедшие в нее параметры также почти не меняются. Наибольшее подозрение на наличие дефекта вызывают параметры из третьей группы $\eta_{ок}$, $\pi_{цк}$ и $\eta_{тк}$. Из рис. 6-8 видно, что в процессе эксплуатации по результатам диагностики $\eta_{ок}$ уменьшился на $0,5-0,7\%$, $\pi_{цк}$ увеличился на $0,3\%$ и $\eta_{тк}$ уменьшился на 1% .

То есть предложенная методика позволяет после серии испытаний обнаружить и частично локализовать дефект. При этом могут появиться «паразитные» диагнозы.

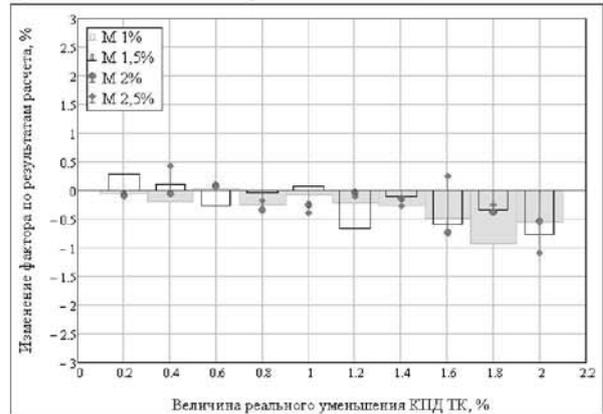


Рис. 6. Изменение $\eta_{ок}$ по результатам диагностики в зависимости от масштаба вариации и величины дефекта $\eta_{тк}$

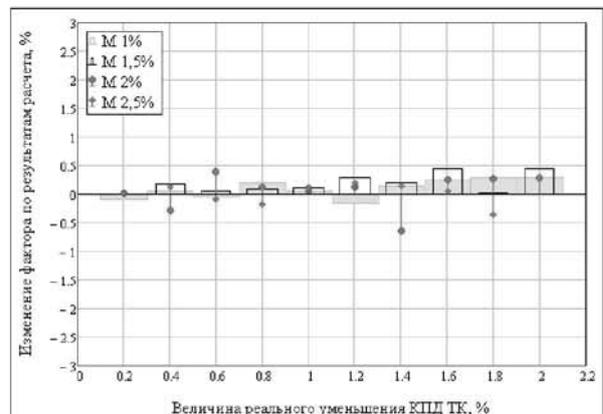


Рис. 7. Изменение $\pi_{цк}$ по результатам диагностики в зависимости от масштаба вариации и величины дефекта $\eta_{тк}$

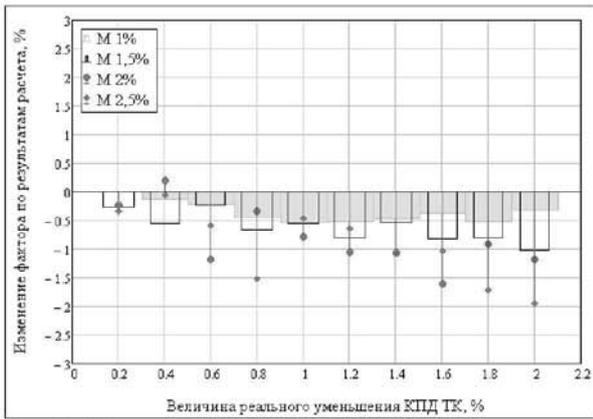


Рис. 8. Изменение η_{mk} по результатам диагностики в зависимости от масштаба вариации и величины дефекта η_{mk}

В данном случае это $\eta_{ок}$, $\pi_{цк}$. Точную величину дефекта, т.е. в данном случае $\eta_{тк}$, методика выявить не позволяет, что объясняется относительно большими погрешностями вычисления по линейной математической модели и выбранным масштабом вариации.

Диагностика по однократному замеру параметров

Далее приводится пример обнаружения дефекта при однократном замере. В модель искусственно введен дефект – полнота сгорания топлива $\eta_{кс}$ уменьшена на 0,8%. Расчет проводится при тех же условиях (см. выше) с масштабом вариации $m = 1\%$. Результаты расчета показаны в табличном виде – табл.2.

Таблица 2. Поиск неисправности КС по результатам диагностики

	0	1
0	0	"Вероятный диагноз, %"
1	"kpd_ok"	0.039
2	"Gok"	0
3	"Pick"	-0.02
4	"kpd_ck"	0
5	"Gck"	-0.02
6	"Pick"	-0.02
7	"Gtk"	0
8	"kpd_tk"	-0.039
9	"Gts"	0.039
10	"kpd_ts"	0.039
11	"sigma_ks"	0
12	"kpd_ks"	-1

Из таблицы видно, что падение полноты сгорания обнаруживается явным образом. Однако аналогичные расчеты в других узлах показывают, что поиск неисправности в не-

которых случаях при однократном замере может представлять собой более сложную задачу. Наиболее точные результаты в этом случае способна дать серия расчетов при различных значениях масштабов вариации, например в диапазоне 0,5-2,5% с шагом 0,1%. Из полученных результатов необходимо исключить те факторы, изменение знака и величины которых сильно зависит от масштаба. Оставшиеся факторы наиболее вероятно определяют дефект.

Зависимость точности диагностирования от количества измеряемых параметров

На практике количество измеряемых параметров сильно ограничено по конструктивным соображениям. Это создает дополнительные сложности при выявлении дефекта. Так например выше было показано, что при наличии 8 замеров (n_{mk} , N_b , $G_{топ}$, T_{ztc}^* , π_k^* , $G_{вх}$, $P_{ок}^*$, $T_{вых}^*$) и при появлении дефекта в турбине компрессора данные диагностики можно трактовать как дополнительные дефекты в компрессоре. Ниже приведены результаты исследования возможности точной локализации дефектов в зависимости от количества измеряемых параметров.

В расчете было использовано 12 факторов, дискретность $d = 3$, масштаб вариации $m = 1\%$. Была проведена серия расчетов с разным количеством откликов от 5 до 12, в их число по порядку включения в расчет вошли: n_{mk} , N_b , $G_{топ}$, T_{ztc}^* , π_k^* , ($G_{вх}$, $P_{ок}^*$, $T_{вых}^*$, $T_{ок}^*$, $T_{цк}^*$, $P_{тк-тс}^*$, $P_{вых\ тс}^*$). В экспериментальные данные было введено два дефекта: уменьшение $\eta_{цк}$ на 1,5% и увеличение $\bar{G}_{zтк}$ на 1%.

В данном случае, как и в случае исследования развивающегося дефекта, по результатам все факторы можно разделить на три группы. К первой группе относятся факторы, изменение которых независимо от количества откликов показывает стабильное, близкое к 0% значение. К данной группе относятся $\eta_{ок}$, $G_{ок}$, $\bar{G}_{zтс}$, $\eta_{тс}$, $\sigma_{кс}$, $\eta_{кс}$. Ко второй группе – факторы, изменение которых существенно меняется в зависимости от количества откликов, используемых при диагностике. К их числу в данном случае относятся $\pi_{ок}$, $\eta_{цк}$ (рис.9), $G_{цк}$, $\pi_{цк}$, $\bar{G}_{zтк}$ (рис.10). К третьей группе в данном случае относится только один параметр - η_{mk} (рис.11), характеризующийся

тем, что его изменение почти не зависит от количества откликов, показывая стабильный результат.

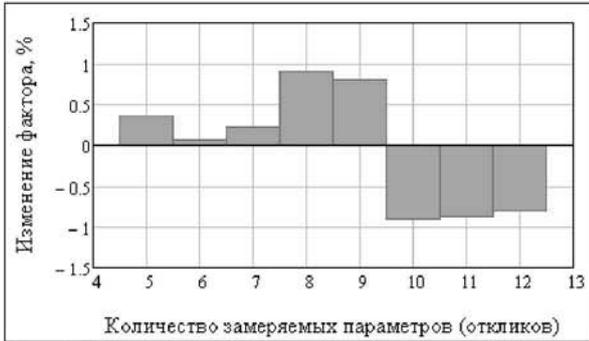


Рис. 9. Изменение КПД центробежного компрессора по результатам диагностики в зависимости от количества откликов

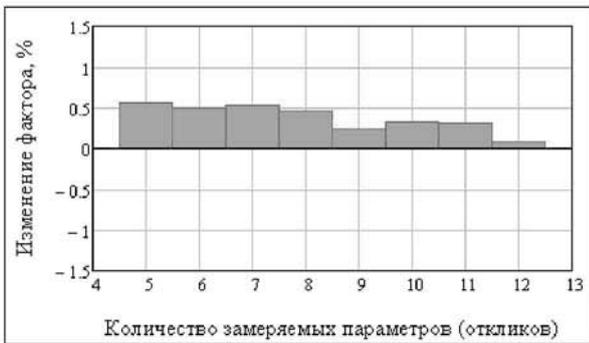


Рис. 10. Изменение пропускной способности турбины компрессора по результатам диагностики в зависимости от количества откликов

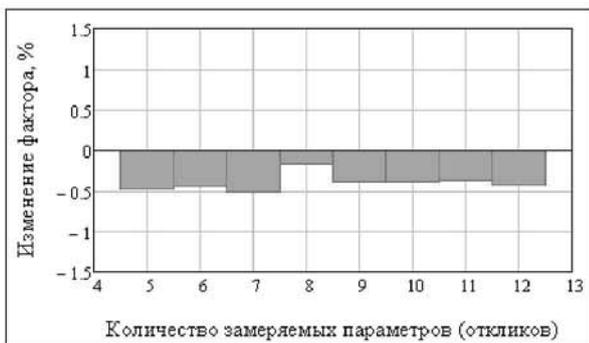


Рис. 11. Изменение КПД турбины компрессора по результатам диагностики в зависимости от количества откликов

Из рис.9 видно, что дефект $\eta_{цк}$ (-1,5%) удастся выявить только после включения в число замеров температуры за центробежным компрессором $T_{цк}^*$. При отсутствии этого замера результаты диагностики противоречат истине, показывая наличие дефектов в других узлах.

В противовес этому из рис.10 видно, что дефект $\bar{G}_{зтк}$ (+1%) обнаруживается тем

хуже, чем больше откликов. При наличии всех 12 замеров дефект почти перестает обнаруживаться.

Помимо этого «паразитный» диагноз – падение $\eta_{тк}$ на 0,4-0,5%, обнаруживается независимо от количества откликов (рис.11).

Выводы

Объем проведенных численных исследований и полученные при этом результаты позволяют говорить о частичности успеха предложенного метода. В большинстве случаев по результатам диагностики можно полностью или частично локализовать дефект, сузив круг узлов подозреваемых на наличие неисправности. При этом численное значение величины дефекта, как правило, занижается относительно реального. Достоверность результатов диагностики растет в процессе эксплуатации с ростом числа экспериментальных данных, позволяя выявить развитие неисправности.

В некоторых случаях результаты диагностики могут оказаться ложными. Для преодоления этой проблемы необходимо провести более подробные исследования касательно зависимости достоверности диагностики от числа измеряемых параметров и степени дискретизации возможных значений диагностируемых параметров (при этом стоит помнить о скорости проведения расчета). Стоит также учитывать результаты диагностики по разным режимам работы двигателя и сопоставлять их друг с другом.

При анализе результатов необходимо помнить, что линейная модель имеет допустимую, заранее заданную погрешность. В данном исследовании при вычислении откликов по системе уравнений (3) погрешность получаемого отклика может достигать 0,3%, при этом допустимый диапазон масштаба вариации факторами составляет $\pm 2,5\%$. Уменьшение погрешности вынудит сократить допустимый диапазон масштаба вариации. Пределы применимости линеаризации можно расширить, если при расчете относительного приращения откликов по системе уравнений (3) учесть второй член разложения функций в ряд Тейлора [2].

В более широком смысле результаты проведенных исследований говорят о том, что любые другие методы диагностирования

не всегда могут однозначно и достоверно выявить причину отклонения параметров двигателя от расчетных значений. Это объясняется возможностью наличия таких сочетаний диагностируемых параметров, с учетом которых результаты расчета математической модели двигателя дают хорошее совпадение с результатами эксперимента, но при этом такие сочетания диагностируемых параметров являются не соответствующими истине.

Библиографический список

1. Ахмедзянов, А.М. Диагностика состояния ВРД по термодинамическим параметрам [Текст] / А.М. Ахмедзянов, Н.Г. Дубравский, А.П. Тунаков. – М.: Машиностроение, 1983. – 206с.
2. Погодин, С.И. Применение метода малых отклонений для расчета и анализа рабочего процесса транспортных газотурбинных двигателей [Текст] / С.И. Погодин. - М.: ЦНИИ информации, 1977.

NUMERICAL STUDY OF POSSIBILITY OF RELIABLE DIAGNOSTICS OF GAS TURBINE ENGINE BY GASDYNAMIC PARAMETERS USING A LINEAR MATHEMATICAL MODEL

© 2011 A.B. Gerasimov, M.Y. Sundukov

JSC «Klimov», St.Petersburg

Article offers a method for evaluating possible quantity of cases the identification of gas turbine engine to adequately describe test data with limited number of measured parameters. The dependence of the possible quantity of identifications on the number of identifiable and measured parameters is researched.

Gas turbine engine, diagnostics, identification, linear mathematical model.

Информация об авторах

Герасимов Андрей Борисович, кандидат технических наук, ведущий конструктор по расчетам бригады термодинамических расчетов, ОАО «Климов», г.Санкт-Петербург. Тел.: (812) 295-01-01 (доб.186). Область научных интересов: диагностика газотурбинных двигателей.

Сундуков Михаил Юрьевич, инженер-конструктор ОАО «Климов», г.Санкт-Петербург. Тел.: (812) 295-01-01 (доб.163). E-mail: msunduk@mail.ru. Область научных интересов: диагностика газотурбинных двигателей, термодинамика.

Gerasimov Andrey Borisovich, candidate of technical science, chief designer of department of thermodynamic calculations of JSC“Klimov”, St.Petersburg. Phone: (812) 295-01-01, (add. 186). Area of research: diagnostics of gas turbine engine.

Sundukov Mikhail Yurievich, postgraduate, development engineer of JSC “Klimov”. St.Petersburg. Phone: (812) 295-01-01 (add.163). E-mail: msunduk@mail.ru. Area of research: diagnostics of gas turbine engine, thermodynamics.