

УДК 681.518.54

В.Ф. МИРГОРОД¹, Г.С. РАНЧЕНКО¹, И.Ф. КРАВЧЕНКО²¹ОАО «Элемент», Одесса, Украина²ГП ЗМКБ «Ивченко – Прогресс», Запорожье, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ТРЕНДОВОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Предложены методики и программно-алгоритмические средства диагностирования технического состояния газотурбинных двигателей в составе силовых установок авиационного и наземного применения, основанные на полиномиальной регрессионной аппроксимации модели статичности и сингулярном трендовом анализе. Выполнена компьютерная реализация разработанных алгоритмов на основе сертифицированных программных средств LabVIEW фирмы National Instruments, США. Эффективность предложенных подходов и разработанных алгоритмов подтверждена решением ряда практических задач диагностирования, в частности, газотурбинного привода и авиационных газотурбинных двигателей.

техническая диагностика, регрессионная модель, методы трендового и сингулярного анализа

Введение

Проблемным вопросом продления жизненного цикла газотурбинных двигателей (ГТД) является достоверная оценка технического состояния по данным регистрации термогазодинамических и вибропараметров в течение эксплуатации. Переход к более совершенным стратегиям управления ресурсом ГТД требует разрешения ряда научных и прикладных задач, важнейшими из которых являются задачи построения адекватных диагностических моделей и методов оценки отклонений параметров ГТД в эксплуатации от номинального состояния.

1. Постановка проблемы и цель исследования

Наиболее совершенные диагностические модели ГТД [1 – 3] основаны на нелинейной, как правило, полиномиальной аппроксимации его характеристик и имеют высокий уровень соответствия двигателю-эталону. Предлагаемые и используемые [1, 2] методы оценки отклонений параметров ГТД основаны на разнообразных трендовых статистиках [1], в частности, Хальда-Аббе, кумулятивных сумм и других. Наиболее совершенными являются трендовые ста-

тистики в виде Ф-критерия [4].

В передовых АСД используются методы нелинейного представления характеристик, полиномиальная регрессионная аппроксимация трендов, прогнозирование на основе имитационных моделей [2]. Однако известные диагностические модели недостаточно учитывают индивидуальных различий двигателей, которые могут быть весьма существенными. Наиболее совершенные диагностические модели, предлагаемые в нормативных документах Разработки, в частности, в РЭ, являются, как правило, линейными, что существенно ограничивает область их применения. Предлагаемые трендовые статистики потенциально фиксируют лишь факт возникновения тренда, но не его характеристики. Уровень ложных срабатываний применяемых к выборкам данных трендовых статистик недопустимо высок, что ставит под сомнение достоверность статистических выводов. Таким образом, имеется необходимость усовершенствования известных диагностических моделей и методик их применения, а также разработки более совершенных методов и алгоритмов оценки отклонений параметров ГТД.

Целью настоящего исследования является усо-

вершенствования методик и диагностических моделей ГТД и разработка метода трендового анализа для оценки технического состояния двигателя в процессе эксплуатации.

2. Основные результаты исследований

2.1. Объект исследования и методика диагностирования. Объектом исследования являются базы данных регистрации основных термогазодинамических и вибропараметров ряда ГТД в составе авиационных силовых установок и газоперекачивающих агрегатов.

Применяемая методика диагностирования состоит из последовательно реализуемых следующих этапов:

- приведение термогазодинамических параметров ГТД к стандартным атмосферным условиям;
- построение диагностических моделей ГТД в виде нелинейных регрессионных зависимостей [3, 4];
- выделение трендов отклонений с учетом диагностических моделей [4, 5], а также трендов вибропараметров;
- сингулярный и факторный анализ [3, 5];
- применение трендовых статистик [4 – 6].

Существенными особенностями предлагаемой методики являются следующие отличия:

- нелинейная регрессионная диагностическая модель ГТД является индивидуализированной применительно к конкретному экземпляру двигателя;
- проводится не только трендовый контроль, но и углубленный трендовый анализ применительно к отклонениям параметров ГТД в процессе его эксплуатации от индивидуальной диагностической модели;
- применяется совокупность методов трендового анализа высокой эффективности, позволяющая разделить исследуемый временной ряд на трендовую, периодические и стохастическую компоненты.

Для реализации рассматриваемой методики применительно к конкретным задачам диагностирова-

ния разработано необходимое алгоритмическое и программное обеспечение.

Результативность и эффективность применяемой методики подтверждена успешным решением ряда прикладных задач диагностирования ГТД в составе авиационных силовых установок и газоперекачивающих агрегатов.

2.2. Диагностирование газотурбинного привода по регрессионной модели. Одной из первых задач диагностирования, для которой последовательно реализованы практически все необходимые этапы методики, является задача оценки технического состояния газотурбинного двигателя Д-336 в составе ГТП №336-1-01 в процессе нормальной эксплуатации длительностью ~18 мес. с наработкой 5650 часов [3].

Типовая методика диагностирования согласно РЭ разработчика двигателя заключается в приведении параметров к стандартным атмосферным условиям (с.а.у.) согласно известным формулам:

$$N_{ВДпр} = N_{ВДизм} \cdot \sqrt{288 / (T_{ex}^* + 273)}; \quad (1)$$

$$N_{НДпр} = N_{НДизм} \cdot \sqrt{288 / (T_{ex}^* + 273)}; \quad (2)$$

$$P_{КВДпр} = N_{КВДизм} \cdot \sqrt{760 / (P_{ex} + 101)}; \quad (3)$$

$$T_{ТНДпр}^* = \left[\left(T_{ТНДизм}^* + 273 \right) \cdot \frac{288}{T_{ex}^* + 273} - 273 \right], \quad (4)$$

с последующим приведением параметров к базовому режиму

$$\Delta N_{ВДпр} = N_{ВДк} - N_{ВДпр} \quad ; \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{НДпрк} &= N_{НДпр} - k_{НД} \cdot \Delta N_{ВДпр}; \\ P_{КВДпрк} &= P_{КВДпр} - k_p \cdot \Delta N_{ВДпр}; \\ T_{ТНДпрк}^* &= T_{ТНДпр}^* - k_T \cdot \Delta N_{ВДпр}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

и вычислением отклонений от этого режима

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{НДпр} &= N_{НДпрф} - N_{НДпрк}; \\ \Delta P_{КВДпр} &= P_{КВДпрф} - P_{КВДпрк}; \\ \Delta T_{ТНДпр}^* &= T_{ТНДпрф}^* - T_{ТНДпрк}^*. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Весьма важным положительным моментом РЭ является тот факт, что в формулах (6) коэффициенты крутизны характеристик ГТД и формулярные параметры в (7) индивидуализированы применительно к конкретному экземпляру двигателя. Однако эти данные получены на этапе непродолжительных стендовых испытаний, в то время как в процессе эксплуатации двигателя имеется участок приработки, то есть установления параметров.

Контролю подлежит нахождение отклонений (7) в заданных допусках для $N_{нд}$, $P_{квд}$ и $T_{нд}$.

Результаты обработки БД по типовой методике РЭ и их анализ дали основание предположить параметрический отказ ИК по $P_{квд}$ и ненормальный режим ГТД на интервале (3560...4014) час. Следуя нормативным документам, двигатель подлежал снятию с эксплуатации на осмотр и промывку проточной части.

Несовершенство типовой модели (1) – (7) согласно РЭ заключается в приближенном учете хода дроссельных характеристик реального двигателя, путем их линейной аппроксимации согласно (6), справедливой только при малых отклонениях. Однако это условие не соблюдается для исследуемых данных регистрации.

Реально реализуемая зависимость

$$P_{квднрк} - P_{квднр} = f_P(\Delta N_{вднр}) \quad (8)$$

имеет существенно нелинейный характер. После исключения аномальных отклонений согласно [7] построена полиномиальная регрессионная модель (8) на основе МНК. Аналогичные модели построены для параметров $N_{нд}$ и $T_{нд}$. После замены в (6) постоянных коэффициентов нелинейными функциями получены временные ряды отклонений, причем использование диагностических моделей существенно уменьшает разброс данных [4]. Предположение о ненормальном режиме ГТД, следующее из типовой методики диагностирования по РЭ может быть снято.

Таким образом, использование диагностической регрессионной нелинейной модели позволяет суще-

ственно уменьшить дисперсию остаточных отклонений и тем самым повысить надежность результатов диагностики.

Дальнейшее уменьшение дисперсии остаточных отклонений и идентификация состояния объекта за счет исключения не связанных с его состоянием факторов достигнуто на основе применения к выборке параметров регистрации метода факторного анализа (МФА).

Если полагать, что параметры регистрации образуют вектор

$$x^{(m)} = col(N_{вднр} P_{квднр} N_{нднр} T_{нднр} T_{ex}^* P_{ex}),$$

а их совокупность – матрицу наблюдений X , то строки этой матрицы можно полагать признаками объекта, а столбцы – его состояниями. Сингулярное разложение $m \times n$ матрицы наблюдений имеет вид [3, 5, 8]

$$X = USV^T = \sum_{i=1}^k \sigma_i u_i v_i^T, \quad (9)$$

где U , V – унитарные $m \times n$ матрицы, $S = diag(\sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_n 0 \dots 0)$, причем $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_k$ – собственные числа матрицы XX^T , а матрица U составлена из ортонормированных собственных векторов. Следуя МФА, выполним следующее представление матрицы наблюдений

$$X = BF + N,$$

где F – матрица центрированных, независимых и нормированных факторных компонент; B – матрица факторных нагрузок; N – вектор остаточных несущественных факторов.

Компоненты матрицы F отыскиваются из выражения [9]

$$f^{(l)} = \frac{\sum_{i=1}^m u_i^{(l)} x_i}{\sqrt{\sum_{i,j=1}^m u_i^{(l)} u_j^{(l)} r_{ij}}}, \quad (11)$$

где $r_{ij} = cor(x_i, x_j)$; $u^{(l)} = col(u_1^{(l)} u_2^{(l)} \dots u_m^{(l)})$ – собственный вектор, отвечающий максимальному

собственному значению λ_l .

Результаты применения указанной процедуры МФА к матрице наблюдений, составленной из приведенных согласно (1)...(6) параметров ГТД и параметров T_{ex}^* , P_{ex} , после учета первых двух факторов, имеющих наибольшие дисперсии, дают существенное уменьшение остаточной дисперсии. Распределение остаточного отклонения $\delta P_{КВД}$ по критерию χ^2 полагается нормальным с доверительной вероятностью не менее 0,95. Характерным моментом для наземных силовых установок является наличие в данных регистрации циклических компонент, соответствующих изменениям атмосферных условий и сезонным изменениям.

Следовательно, применение МФА позволяет существенно повысить надежность диагностики состояния ГТД, учесть влияние изменяющихся условий эксплуатации, Отображение данных регистрации в плоскости первых двух факторов позволяет выделить группы аномальных отклонений и тем самым идентифицировать состояние объекта [9]. Вычислительная сложность алгоритмов МФА в настоящее время не является препятствием для их использования в АСД.

2.3. Диагностирование авиационной силовой установки по данным летной регистрации. Следующей задачей диагностирования, для которой последовательно реализованы все необходимые этапы методики, является задача оценки технического состояния ряда двухвальных газотурбинного двигателя тягой 14(16) т в составе авиационных силовых установок в процессе летной эксплуатации.

Такая задача была поставлена И.В. Егоровым (ЦИАМ) и решалась под его методическим руководством.

Наиболее представительные выборки содержат около 30 параметров летной регистрации, включая основные термогазодинамические параметры, обороты турбин и вибропараметры, для 350 полетных

циклов в трех режимах: взлетный, крейсерский и 0.5 номинала. Эксплуатация двигателя прекращена после помпажа на взлетном режиме, а при осмотре обнаружены серьезные механические повреждения лопаток КВД.

Для выделения трендов отклонений от регрессионных моделей использован сингулярный спектральный анализ [5, 10] SSA (Singular Spectrum Analysis), основанный на анализе сингулярного спектра - набора собственных чисел сингулярного разложения траекторной матрицы [10,11]. Под траекторной матрицей понимается матрица Ганкеля, составленная из элементов временного ряда

$$X = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \dots & y_k \\ y_2 & y_3 & \dots & y_{k+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_m & y_{m+1} & \dots & y_n \end{bmatrix} = [X_1, X_2, \dots, X_k], \quad (12)$$

где m – длина окна; n – число членов ряда; $k = n - m$.

Указанное разложение траекторной матрицы (12) позволяет упорядочить ее структуру в виде (9).

На этапе восстановления выполняется группировка составляющих (9) на непересекающиеся подмножества с целью получения представления ряда в виде

$$Y = Y_{trend} + Y_{cycle} + Y_{noise},$$

то есть разложения на трендовую, периодические (циклические) составляющие и шум.

Результаты применения методики диагностирования иллюстрируют рис. 1 и 2, на которых представлены тренды отклонений по основным внутримоторным параметрам, а также рис. 3, характеризующий тренд вибропараметров.

На рис. 2 и 3 обозначены даты и номера полетных циклов, причем последняя точка соответствует аварийной ситуации.

Регрессионные модели построены непосредственно по данным регистрации после процедуры приведения к с.а.у. относительно параметра N_{bd} , по которому осуществляется регулирование двигателя.

Для остаточных отклонений выполнено статистическое оценивание характера распределения.

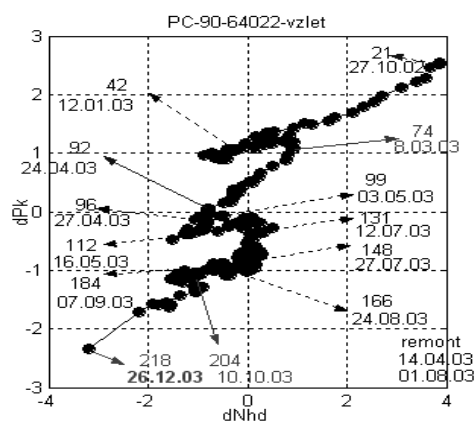


Рис. 1. Тренд отклонения по давлению

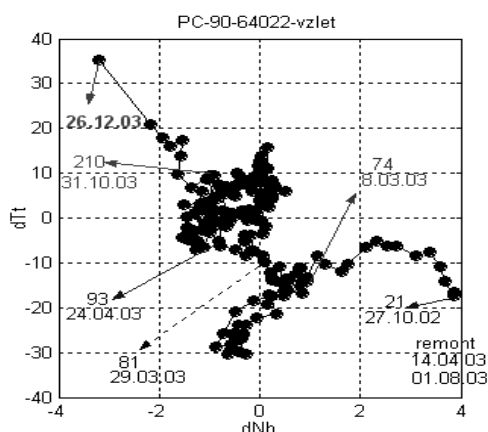


Рис. 2. Тренд отклонения по температуре

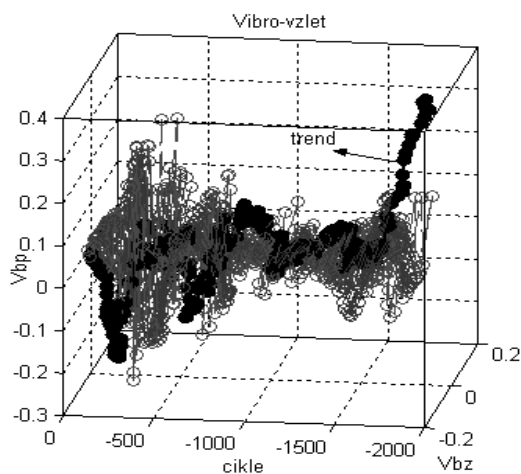


Рис. 3. Тренд по вибропараметрам

Проведенный согласно методике анализ позволил установить, что эксплуатационный период диагностируемого двигателя может быть разделен на ряд последовательных этапов, а именно:

- установление параметров;
- первый этап снижения режимных параметров;
- второй этап снижения режимных параметров с потерей запасов ГДУ;

– излом трендов отклонений параметров относительно диагностической модели и трендов вибропараметров и развитие предаварийной ситуации.

Известные трендовые статистики, в частности, Хальда-Аббе, применяемые непосредственно к выборкам, имеют низкую эффективность из-за большого числа ложных срабатываний, и напротив, их применение к выделенным трендовым компонентам позволяет установить отрыв трендов на 208 полетном цикле по Рквд и Nвен, то есть задолго до аварии. Для нормализованных вибропараметров срабатывание указанной статистики происходит на 211 цикле (за 24 дня) с доверительной вероятностью 0,99.

Тестирование методики диагностирования на данных регистрации двигателей, результат эксплуатации которых известен, не представляется достаточно убедительным. Поэтому весьма важными являются полученные результаты диагностирования трехвального авиационного двигателя тягой 7 т, находящегося в эксплуатации. В порядке авторского надзора и сопровождения в эксплуатации установленной на двигателе системы измерения давления разработки ОАО «Элемент» выполнялся анализ данных полетной регистрации для ряда полетных циклов. В процессе такого анализа, наряду с контролем функционирования собственного изделия, выполнен анализ технического состояния двигателя по приведенной методике. Компьютерная реализация имитационных и диагностических моделей двигателя выполнена на платформе NI и сертифицированных программных продуктов LabVIEW. Результатом такого анализа стало установление факта деградации КВД с образованием S-образного участка на его характеристике и потерей запасов ГДУ. Соответственно, установлен номер полетного цикла, после которого эксплуатацию двигателя следовало бы прекратить, о чем был информирован Разработчик двигателя. Серьезным подтверждением эффективности предложенных подходов и методик является тот факт, что Разработчик двигателя независимо пришел к аналогичным выводам и двигатель был снят с

эксплуатации именно с указанного полетного цикла. Его разборка показала наличие механических повреждений лопаток компрессора.

Заключение

Таким образом, в настоящее время имеются все необходимые предпосылки, методическое, алгоритмическое и программное обеспечение, для решения задачи повышения достоверности оценки технического состояния газотурбинных двигателей в составе авиационных и наземных силовых установок. Указанная цель может быть достигнута путем совершенствования применяемых методик диагностирования, в которых необходимо учитывать диагностические модели ГТД, полученные по данным стендовых испытаний и в процессе эксплуатации, а также современные методы трендового анализа. Технические средства АСД позволяют в настоящее время использовать более совершенное алгоритмическое и программное обеспечение на основе универсальных и сертифицированных программных продуктов. Актуальным вопросом является отработка соответствующих методик на экспериментальных данных достаточного объема и создание прикладного ПО, что и определяет перспективы дальнейших исследований.

Литература

1. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, В.И. Кузнецов, И.И. Богаенко и др. – К.: Техника, 1998. – 312 с.

2. Елисеев Ю.С., Добрянский Г.В., Дема Т.Ф. Статистические методы формирования алгоритмов вычисления в полете тяги и других основных параметров газотурбинного двигателя, критериев и признаков технического состояния его узлов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2003. – Вып. 6 (41). – С. 81-89.

3. Миргород В.Ф., Ранченко Г.С. Сравнительный анализ методов диагностирования технического состояния двигателя газотурбинного привода по данным регистрации // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 2 (28). – С. 70-74.

4. Егоров И.В. Диагностирование технического состояния авиационных двигателей // *Труды ЦИАМ «Научный вклад в создание авиационных двигателей»*. – М.: Машиностроение. – 2000. – С. 651-688.

5. Миргород В.Ф., Ранченко Г.С. Сравнительный анализ эффективности критериев тренда в задачах диагностики ГТД // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 8 (24). – С. 190-194.

6. Миргород В.Ф., Ранченко Г.С. Вероятностные характеристики трендовой статистики Хальда-Аббе при обработке параметров регистрации ГТД // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 5 (21). – С. 38-142.

7. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

8. Марпл мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

9. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.

10. Elsner I.B., Tsonis A.A. Singular Spectrum Analysis: A New Tool in Time Series Analysis. – New York, London: Plenum Press, 1996. – 164 p.

11. Broomhead D., King G. Extracting qualitative from experimental data. // *Physica D*. – 1986. – V. 20 – P. 217-236.

Поступила в редакцию 21.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Н. Крылов, Одесский национальный политехнический университет, Одесса.