

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

В роботі розроблені теоретичні основи методології автоматичного розпізнавання аномальних та передаварійних експлуатаційних режимів ГТД, а також оцінки технічного стану цього складного об'єкта.

В работе разработаны теоретические основы методологии автоматического распознавания аномальных и предаварийных режимов эксплуатации ГТД, а также оценки технического состояния этого сложного объекта.

In work is designed theoretical bases to methodologies of the automatic recognition anomalous and before emergency conditions in usages GTE, as well as estimations of the technical condition this complex object.

C_0 – оптимальная гиперплоскость;
 I – функционал векторного произведения;
 f – частота колебаний;
 P – давление;
 $S(f)$ – спектральная плотность;
 T – температура;
 X, \bar{X} – векторы-реализации обучающей последовательности;

Z – разностный вектор;
 Φ – однопараметрическое множество векторов;
 Φ_0 – вектор направления гиперплоскости;
 Ψ_0 – минимальный по модулю вектор;
ГПА – газоперекачивающий агрегат;
ГТД – газотурбинный двигатель;

Согласно прогнозам Международного газового союза суммарное потребление газа в ведущих странах мира к 2030 году увеличится более чем в два раза. Указанное обстоятельство диктует необходимость существенного повышения надежности газотранспортных систем ряда стран, включая Украину как одну из ведущих стран-транзитеров природного газа. Одним из приоритетов в проблеме повышения надежности действующих и проектируемых газотранспортных систем в настоящее время признана проблемная задача разработки методов автоматического диагностирования реального технического состояния ГПА. В этом контексте указанная задача конкретизируется как требование разработки эффективных методов автоматического обнаружения т.е. распознавания ряда аномальных и предаварийных режимов эксплуатации наиболее часто повреждаемых элементов и систем ГПА, таких, например, как турбокомпрессор и подшипниковые уз-

лы этого агрегата [1,2]. Применительно к такому ответственному элементу ГПА как турбокомпрессор, указанная проблемная задача конкретизируется как требование раннего автоматического обнаружения аварийного эксплуатационного режима помпажа, т.е. вращающегося срыва потока в его лопаточном аппарате, который приводит к разрушению лопаточного аппарата ГТД [3].

Известно, что комплекс эксплуатационных факторов, которые могут привести к возникновению срыва потока, состоит из внешних и внутренних воздействий. Внешние воздействия – неравномерность пульсаций полного давления, температурная неуравновешенность в потоке на входе в двигатель. Внутренние – отклонение параметров двигателя от параметров установившихся режимов.

Известно [3], что характер изменения параметров при помпажном срыве (рис. 1) может быть представлен осциллограммой изменения давле-

ния на выходе из компрессора (кривая 1), изменением давления на входе в него (кривая 2), перепадом давления — пропорционально расходу газа — (кривая 3) и изменением проходного сечения дросселя, который установлен на выходе из компрессора (кривая 4). Из рис.1 видно, что при плавном изменении площади проходного сечения дросселя в момент, который отвечает линии А-А, давление за компрессором и расход газа пульсационно уменьшаются. Это свидетельствует о том, что наступил помпажный срыв. В первый момент (участок АБ) будет наблюдаться пульсационный характер изменения расхода газа, но через короткое время (доли секунды) расход газа перестанет меняться, хотя площадь дросселя будет уменьшаться. После установления устойчивого характера изменения расхода, уменьшение давления будет иметь пульсационный характер с частотой от десятков до сотен герц в зависимости от частоты оборотов компрессора и амплитудой в 5...10 % от среднего значения давления.

Работа компрессора в указанном помпажном режиме недопустима, поскольку на конструкцию будут влиять значительные динамические нагрузки, которые могут привести к разрушению деталей компрессора и соседних с ним элементов ГТД.

В существующих системах контроля для определения параметров турбокомпрессора используются детерминированные подходы к оценке технического состояния ГТД [1,2]. Обычно эти методы предусматривают вычисление производных диагностических сигналов или осуществляют простое сравнение технологических параметров агрегата. Следует подчеркнуть, что вероятностная структура реального стохастического сигнала контролируемого параметра при указанном подходе фактически игнорируется. Указанное обстоятельство не позволяет своевременно обнаружить начальные фазы перехода к аварийному режиму срыва потока, что не дает возможности прогнозировать возникновение этого важнейшего эксплуатационного фактора ГПА.

Эффективным инструментальным средством оценки технического состояния ГТД является спектральный анализ не только вышеуказанных сигналов, но также и сигналов виброакселероме-

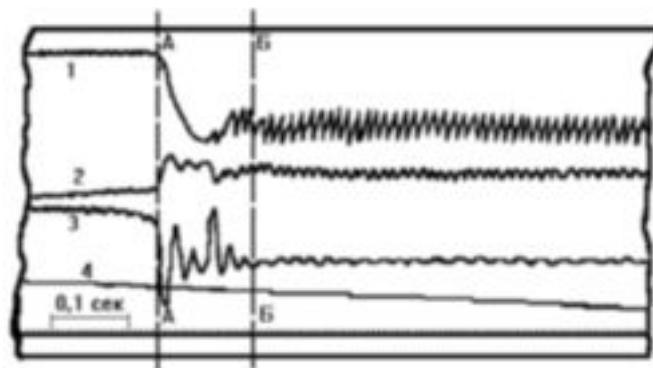


Рис. 1. Характер изменения параметров при помпажном срыве.

тров, которые устанавливаются на элементах и системах диагностируемого агрегата, в частности, на элементах компрессора, а также подшипниковых опор. Известно [1,2], что уровень вибрации определяется характером возбуждающих сил, что зависит от индивидуальных конструктивных особенностей конкретного ГТД.

Характерной особенностью спектрального анализа является возможность раннего обнаружения аварийных режимов эксплуатации не только турбокомпрессора, но и подшипниковых узлов. При этом на основе полученных данных нередко ставится диагноз о наличии повреждения, которое во время ремонта вообще не было обнаружено. Это может быть объяснено не столько ошибкой диагностирования, сколько малой величиной самого повреждения.

Весь процесс зарождения и развития повреждения в любом узле ГПА можно условно разделить на пять этапов: низкая степень развития повреждений; зарождение повреждения; интенсификация процесса развития повреждения; развитое повреждение; критическая стадия развития повреждения.

На рис. 2 показан характер зарождения дефекта подшипника качения ГТД ГПА, который приводит к нарушению нормальной работы элементов системы. В представленном спектре хорошо выделяется один пик, который отсутствует при нормальной эксплуатации подшипникового узла. Это повреждение в дальнейшем будет влиять на работу двигателя.

Спектр на рис. 3 соответствует развитию повреждения, когда система теряет устойчивость

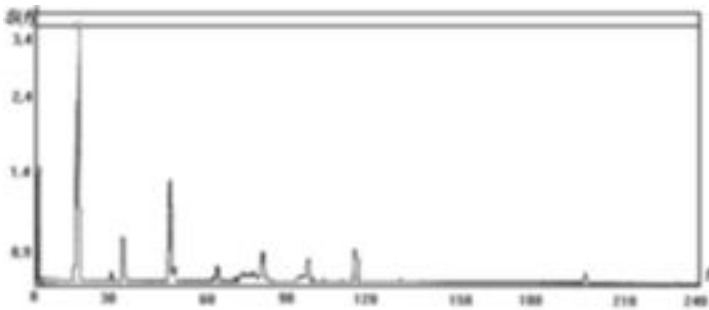


Рис. 2. Спектральная плотность вибросигнала подшипника качения ГТД в фазе зарождения повреждения.

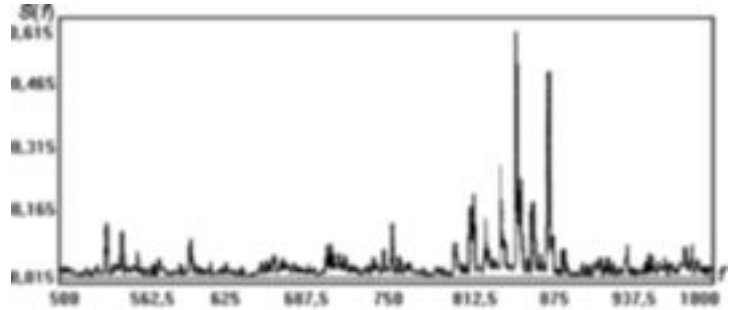


Рис. 3. Спектральная плотность вибросигнала подшипника качения ГТД в фазе развития повреждения.

вследствие износа опор под действием частоты вращения, приводящей к уменьшению их жесткости. Неисправность подшипникового узла уже начинает влиять на работу турбомшины.

При критической стадии развития повреждения (рис.4) возникает вибрационный шум. Это свидетельствует о серьезном нарушении в работе всего агрегата. Общий уровень вибрации в этой критической стадии развития достигает аварийного уровня.

В этой статье разработана диагностическая система для распознавания случайных сигналов которые содержат важную информацию о техническом состоянии объекта.

Предложенная и реализованная в настоящей работе математическая модель автоматического распознавания срыва потока в компрессоре ГТД по технологическим параметрам шумов (режимных параметров потока, сигналов виброакселерометров) предусматривает формирование оптимальной разделяющей гиперплоскости в многомерном признаковом пространстве диагностического сигнала.

Два конечных множества векторов: $\mathbf{X} = \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_a$ – режим нормальной эксплуатации и $\bar{\mathbf{X}} = \bar{\mathbf{x}}_1, \dots, \bar{\mathbf{x}}_b$ – аномальный режим эксплуатации, которые должны быть разделены такой гиперплоскостью, когда для некоторого $k < 1$ должен быть найден такой вектор $\boldsymbol{\varphi}$, что выполняются неравенства $\mathbf{X}_i^T \boldsymbol{\varphi} \geq 1, i = 1, \dots, a; \bar{\mathbf{x}}_j^T \boldsymbol{\varphi} \leq k, j = 1, \dots, b$.

Среди однопараметрического (по параметру $k < 1$) множества векторов $\boldsymbol{\varphi}$ существует вектор $\boldsymbol{\varphi}_0$, определяющий такое направление, на котором проекции множеств \mathbf{X} и $\bar{\mathbf{X}}$ наиболее отстоят друг от

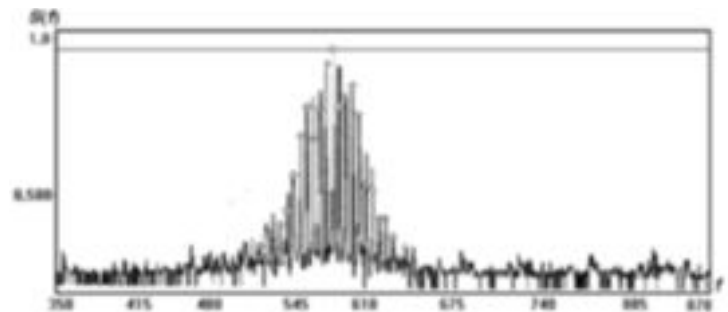


Рис. 4. Спектральная плотность вибросигнала подшипника качения ГТД в фазе критической стадии развития повреждения.

друга: $\boldsymbol{\varphi}_0 = \operatorname{argmax}_{\boldsymbol{\varphi}} [\min_{\mathbf{x}_i \in \mathbf{X}} \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\varphi} - \max_{\bar{\mathbf{x}}_j \in \bar{\mathbf{X}}} \mathbf{x}_j^T \boldsymbol{\varphi}]$.

При этом вектор $\boldsymbol{\varphi}_0$ и определяемая им разделяющая гиперплоскость $\mathbf{x}\boldsymbol{\varphi}_0 = C_0$, где $C_0 = [\min_{\mathbf{x}_j \in \mathbf{X}} \mathbf{x}_j^T \boldsymbol{\varphi}_0 + \max_{\bar{\mathbf{x}}_j \in \bar{\mathbf{X}}} \bar{\mathbf{x}}_j^T \boldsymbol{\varphi}_0]/2$, являются оптимальными. Указанная гиперплоскость отделяет точки множества \mathbf{X} (для этих точек $\mathbf{x}\boldsymbol{\varphi}_0 < C_0$) от этих точек множества $\bar{\mathbf{X}}$ (для этих точек $\mathbf{x}\boldsymbol{\varphi}_0 > C_0$) и наиболее удалена от элементов объединенного множества $\mathbf{X} \cup \bar{\mathbf{X}}$. Для поиска направляющего вектора $\boldsymbol{\varphi}_0$ оптимальной разделяющей гиперплоскости рассматривается конечное множество векторов \mathbf{Z} , сформированное из векторов множеств \mathbf{X} и $\bar{\mathbf{X}}$: $\mathbf{Z} = \{\mathbf{z}_{ij} = \mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}}_j\}$, $i = 1, \dots, a; j = 1, \dots, b$; (всего $a \times b$ элементов). При этом минимальный по модулю вектор $\boldsymbol{\varphi}_0$ удовлетворяет неравенству $\mathbf{z}_{ij}^T \boldsymbol{\varphi}_0 > 1, \mathbf{z}_{ij} \in \mathbf{Z}$.

Принципиальным является тот факт, что вектор $\boldsymbol{\varphi}_0$ совпадает по направлению с оптимальным вектором $\boldsymbol{\varphi}_0$. Величина $1/\|\boldsymbol{\varphi}_0\|$ есть расстояние

между проекциями множеств X и \bar{X} : на направление вектора ψ_0 . В результате поиск вектора ψ_0 и определяемой им разделяющей гиперплоскости сводится к минимизации функционала $I = \psi^T \psi$ при выполнении ограничений, т.е. является известной задачей квадратичного программирования.

Выводы

1. В данной статье предложена концепция автоматической диагностики аномальных и предаварийных эксплуатационных режимов элементов и систем ГПА, позволяющая обеспечить раннее обнаружение потенциальноопасных режимов эксплуатации (начальные фазы помпажа турбокомпрессора, повреждения подшипниковых узлов, ослабление крепления лопаточного аппарата и др.).

2. Разработана и реализована математическая модель автоматического распознавания аномальных и предаварийных режимов эксплуатации на основе спектральных параметров виброакустических сигналов, а также ряда технологических параметров ГТД).

ЛИТЕРАТУРА

1. *В.А. Сидоров, В.М. Кравченко, В.Я. Седуш и др.* Техническая диагностика механического оборудования. – Донецк: Новый мир, 2003. – 125 с.
2. *Герике Б.Л.* Мониторинг и диагностика технического состояния машинных агрегатов: Учеб. пособие. В 2-х ч. 4.1: Кузбас.гос.техн.ун-т. – Кемерово, 1999. – 189 с.
3. *Дорошко С.М.* Контроль и диагностирование технического состояния газотурбинных двигателей по вибрационным параметрам. – М.: Транспорт, 1984. – 129 с.