

УДК 621.438.003

В.Т. ШЕПЕЛЬ¹, Б.И. КОМАРОВ¹, Т.П. ГРЫЗЛОВА²¹ *ОАО «НПО «САТУРН», Россия*² *РГАТА им. П.А.Соловьева, Россия*

ВЫБОР ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ ПОДШИПНИКОВ ГТД

Задача диагностики состояния межвальных подшипников решена как задача распознавания образов двух классов. Рассмотрена проблема формирования признакового пространства для диагностики состояния межвальных подшипников ГТД. Исследованы различные варианты признаковых пространств, как со статистическими, так и с динамическими признаками. Разработан ряд моделей (образов) сигналов, пригодных для классификации подшипников. Предложено эффективное признаковое пространство, построенное на основе нормированной информационной меры сигнала, соответствующего последнему обороту ротора высокого давления. Реализован метод потенциальных функций и разработано специальное программное обеспечение для автоматической классификации технического состояния подшипников трансмиссии ГТД.

авиационный двигатель, подшипник трансмиссионный, межвальный подшипник, Wavelet-анализ, нестационарный сигнал, сигнал вибродиагностики, распознавание, классификатор, признаковое пространство, статистические признаки, динамические признаки, информационные меры

Введение

Техническое состояние роторов и трансмиссии газотурбинных двигателей (ГТД) во многом определяет ресурс и надежность силовой установки и безопасность полетов летательного аппарата (ЛА). Контроль и диагностирование состояния по вибрационным параметрам представляет собой одно из важнейших направлений в общей системе технической диагностики. Вибрационный анализ имеет по сравнению с другими диагностическими методами ряд характерных особенностей, которые связаны с тем, что с помощью вибрационных методов осуществляется непосредственный контроль динамического силового взаимодействия в трансмиссии [1]. Например, перекосы в шлицевых соединениях могут быть выявлены по изменению характера динамических нагрузок в виде изменения вибрации значительно раньше, чем появятся следы износа.

Отсюда следует принципиальная возможность более раннего, по сравнению с другими, способами обнаружения и даже предупреждения неисправно-

стей подшипников и трансмиссии.

Положительными факторами, способствующими распространению методов и средств виброконтроля ГТД, являются высокая информативность виброакустических сигналов, простота их преобразования в электрические сигналы и, следовательно, возможность автоматизации всего процесса контроля и диагностирования.

Вместе с тем, следует отметить трудности, связанные с выявлением информативных признаков в такой сложной системе, как ГТД и большой объем предварительных экспериментальных исследований, необходимых для решения задач вибродиагностики.

1. Формализация задачи диагностики

Формализуем задачу для построения автоматического классификатора и обоснованного отбора диагностических признаков. Классы данных:

- 1) подшипник кондиционный (**C**);
- 2) подшипник некондиционный (**B**);
- 3) подшипник кондиционный, но его характеристики не типичны (**N**).

Причинами возникновения таких ситуаций бывают помехи, случайные манипуляции и силовые воздействия при прокрутке ротора высокого давления и пр. В сложных механических диагностических системах подобные факторы неизбежны.

Классы технического состояния:

- 1) подшипник кондиционный (С);
- 2) подшипник некондиционный или в нем развивается дефект (В).

Необходимо, чтобы необоснованно снятые подшипники классифицировались как кондиционные (объединение при классификации кондиционных подшипников с типичными и нетипичными характеристиками). Не допускается попадание плохих подшипников в класс кондиционных или необоснованно снятых. Можно было разбить ситуации на три класса в соответствии с классами данных, или на несколько, выделив подклассы со сходными характеристиками.

Диагностика состояния может выполняться как автоматически, с помощью классификатора, так и оператором. Оператор может делать заключение либо на основе показаний специальных приборов, либо по визуальным образам подшипников в выбранном признаковом пространстве, вычисленным при цифровой обработке вибросигналов. В последнем случае при большой размерности признакового пространства на оператора возлагается большой объем логической работы.

В любом случае, как при автоматической классификации образа, так и при классификации образа оператором, важно, чтобы признаковое пространство было сформировано эффективно. Опытные специалисты технической диагностики обычно надеются построить оптимальное, или хотя бы достаточно эффективное признаковое пространство эвристическим методом на основе опыта и интуиции. Менее опытные ориентируются на стандартные или известные решения для аналогичных задач или пользуются методом подбора при случайном поиске

удачных алгоритмов обработки первичных данных. Известны формальные методы формирования признакового пространства на основе разложения Карунена-Лоэва; минимизации энтропии образов, относящихся к одному классу; максимизации дивергенции образов, относящихся к разным классам. Их использование на первичных данных большого объема, каковыми являются сигналы вибродиагностики, в настоящее время нереально, поскольку соответствующее методическое и программное обеспечение пригодно только для задач с матрицами образов небольшой размерности.

2. Эффективность диагностических признаков

Эффективность диагностических признаков определяется как механизм получения вибросигнала, так и методами их обработки. Методы обработки, использовавшиеся на практике:

- 1) Оценка эффективного значения сигнала на аналоговом выходе прибора ИВУ-1М. Диагностика состояния подшипника по превышению заданного порога СКО.
- 2) Визуализация результатов обработки оцифрованных сигналов в комплексе МИС-200 (ВДК-44). Обработка включала в себя преобразование Фурье, вычисление корреляционных функций, фильтрацию и сглаживание. Распознавание состояния подшипника выполняется оператором.
- 3) Формирование признакового пространства методом главных компонент, в качестве первичных признаков выбраны статистические характеристики оцифрованных сигналов: среднее квадратичное значение, эксцесс, асимметрия. Диагностика по близости предьявленного образа к кластерам кондиционных и некондиционных подшипников, расстояние оценивается оператором визуально.

- 4) Формирование признакового пространства для диагностики методом главных компонент, в качестве первичных признаков выбраны динамические характеристики сигналов: среднеквадратичные значения в заданных частотных диапазонах [2]. Диагностика по близости предъявленного образа к кластерам кондиционных и некондиционных подшипников, расстояние оценивается оператором визуально.

Таблица 1
Среднеквадратичные отклонения

№	С	Н	В
1	0,2	1,51	0,99
2	0,34	0,4	0,15
3	0,35	0,9	0,55
4	0,25	0,79	3,8
5	0,24	1,38	1,07
6	0,21	0,39	2,17

Таблица 2

Средние значения

№	С	Н	В
1	0,07	0,004	-0,4
2	-0,08	-0,12	-0,00004
3	-0,08	0,37	-0,38
4	0,071	-0,08	-0,19
5	-0,08	0,02	-0,41
6	-0,08	-0,16	-0,4

Абсолютное значение среднего по некондиционным подшипникам велико, кроме подшипника В2, знак среднего – отрицательный. Необоснованно снятые подшипники по этому параметру однозначно не классифицируются, но по СКО (соответствует эффективному напряжению сигнала ИВУ-1М) разделимость еще хуже.

Сигналы разделимы в среднем, но этого недостаточно. На практике вероятности ошибок пропуска плохого подшипника или неправильной классификации кондиционного подшипника как плохого

должны быть сведены к нулю или минимизированы. Задача затруднена тем, что:

- 1) В некоторых случаях внутримножественные расстояния в первичном пространстве данных и в пространстве образов на основе статистики больше, чем расстояния между классами.
- 2) Статистика самих сигналов не учитывает динамических характеристик сигналов.
- 3) Статистика Фурье-образов не учитывает нестационарности сигналов, спектры необоснованно снятых подшипников ближе к спектрам плохих подшипников, чем кондиционных.

Требуется определить оптимальное или достаточно эффективное преобразование: $T: S \rightarrow X$ элементов множества сигналов в элементы пространства образов $s_1^t \mapsto x$. Образы должны обеспечивать полную разделимость классов подшипников и, если это возможно, их компактность в признаковом пространстве (относительно малое расстояние между образами одного класса при большом расстоянии между классами).

3. Модели (образы) сигналов для диагностики

Были разработаны алгоритмы анализа сигналов вибродиагностики (Wavelet-анализ) и ряд моделей (образов) сигналов, пригодных для классификации подшипников.

Общий вывод заключается в том, что формирование выборок и данных должно быть согласовано с моделью сигнала. Физическая модель должна учитывать затухание сигнала, корреляцию данных, соответствующих циклам вращения, замедление вращения, снижение угловой скорости, модуляцию частоты. Наиболее эффективным оказалось формирование выборок $S(t, об)$ по циклам вращения, наиболее эффективные характеристики – регрессия по циклам вращения как самих данных, так и Wavelet-коэффициентов.

Регрессия по оборотам определялась в постановках: 1) фактор – данные первого оборота s_1^{5000} , отклики – данные остальных 5 оборотов $s_{5001}^{10000}, s_{10000}^{15000}, s_{15001}^{20000}, s_{20001}^{25000}, s_{25001}^{30000}$; 2) фактор – данные одного оборота, отклик – следующего. При авторегрессии фактором являются данные, сдвинутые на заданное число отсчетов.

Типичные графики остатков при авторегрессии вибросигналов показаны на рис. 1 – 3.

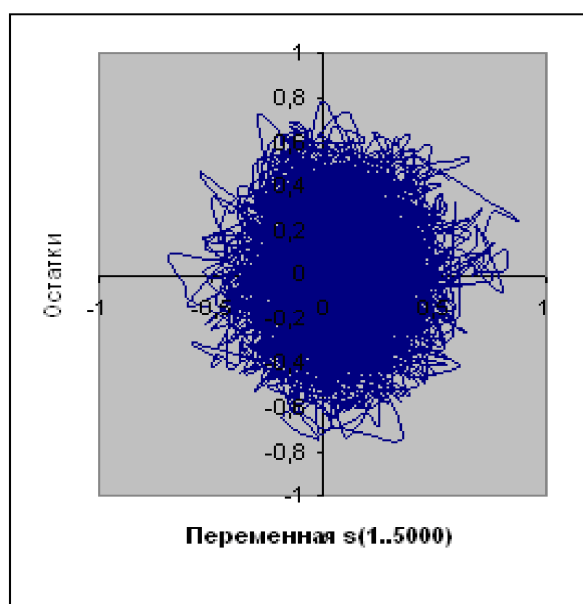


Рис. 1. Типичный вид графиков остатков при авторегрессии сигналов кондиционных подшипников

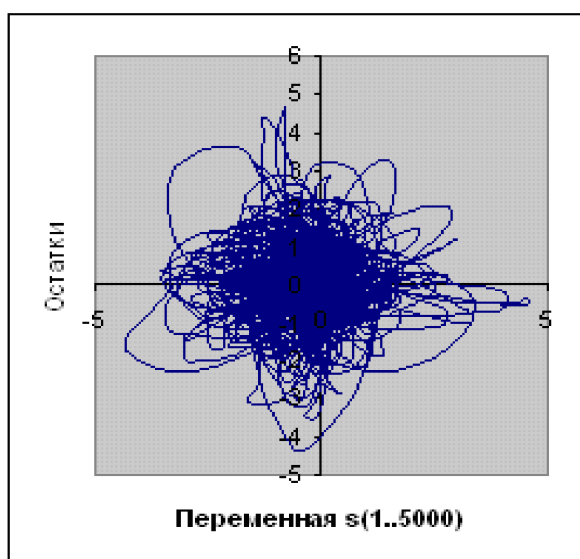


Рис. 2. Типичный вид остатков при авторегрессии сигналов плохих подшипников

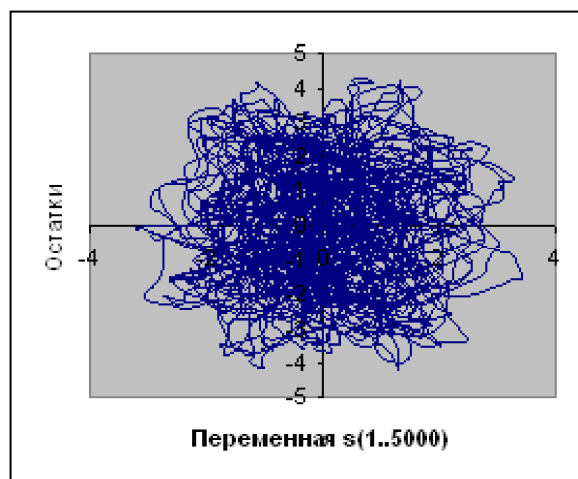


Рис. 3. Типичный вид остатков при авторегрессии сигналов необоснованно снятых подшипников

Кроме того, при формировании образов учитывалась динамика изменения статистических характеристик по оборотам, она явилась наиболее показательной для формирования логических образов типа «возрастающая функция».

4. Принципы классификации

В настоящее время компоненты диагностического вектора

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \sigma_{1..250\text{Гц}} \\ \sigma_{1..500\text{Гц}} \\ \sigma_{250..300\text{Гц}} \\ \sigma_{500..700\text{Гц}} \\ \sigma_{800..1200\text{Гц}} \\ A_{1..400\text{Гц}} \end{pmatrix}$$

взвешиваются на основе подобранных коэффициентов или коэффициентов, полученных методом главных компонент [2].

Предлагаются регулярные процедуры взвешивания образов или логических образов по методу потенциальных функций в детерминированном и стохастическом варианте, т.е. процедуры обучения классификатора [3].

Каждый класс задан перечислением своих элементов, которые можно рассматривать как точки n -мерного пространства. С – класс кондиционных

подшипников, для его описания использовались как сигналы типичных кондиционных подшипников, так и сигналы необоснованно снятых подшипников; **B** – класс некондиционных, «плохих» подшипников.

Используется предположение, что образы, принадлежащие разным классам, образуют в обучающей выборке непересекающиеся множества. Результаты наблюдений могут относиться только к одному из классов $\{C, B\}$. Это означает, что в признаковом пространстве можно построить разделяющую (дискриминантную) функцию или не очень вычурную границу.

5. Детерминированный вариант метода потенциальных функций

Для диагностики можно пользоваться не расстояниями между сигналами в пространстве образов, а некоторыми функциями, обратно пропорциональными квадратам расстояний, их называют потенциальными функциями. Например:

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) = \exp\left\{-\alpha \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_k\|^2\right\}.$$

Могут быть определены гиперболические функции или функции типа $\sin \rho / \rho$. В общем виде потенциальная функция для любой точки \mathbf{x}_k , соответствующей выборочному образу, может быть представлена в некоторой системе ортонормированных функций $\{\varphi_i(\mathbf{x})\}$, $i = 1, 2, \dots$ выражением

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) = \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i^2 \varphi_i(\mathbf{x}) \varphi_i(\mathbf{x}_k).$$

Образы предъявляются системе последовательно, вычисляются потенциальные функции. Совокупность значений отдельных потенциальных функций образует кумулятивный потенциал. Этот кумулятивный потенциал определяют так, чтобы при неправильной классификации образа обучающей выборки выполнялась его коррекция.

На начальном шаге он полагается равным нулю: $K_0(\mathbf{x}) = 0$. При предъявлении первого образа \mathbf{x}_1

обучающей выборки значение кумулятивного потенциала корректируется в соответствии с соотношением:

$$K_1(\mathbf{x}) = \begin{cases} K_0(\mathbf{x}) + K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_1), & \text{если } \mathbf{x}_1 \in C; \\ K_0(\mathbf{x}) - K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_1), & \text{если } \mathbf{x}_1 \notin C, \text{ т.е. } \mathbf{x}_1 \in B. \end{cases}$$

Поскольку начальные потенциалы равны нулю, то на первом шаге кумулятивный потенциал просто приравнивается потенциальной функции:

$$K_1(\mathbf{x}) = \begin{cases} K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_1), & \text{если } \mathbf{x}_1 \in C; \\ -K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_1), & \text{если } \mathbf{x}_1 \notin C, \text{ т.е. } \mathbf{x}_1 \in B. \end{cases}$$

Кумулятивный потенциал представляет начальный вариант границы, разделяющей хорошие подшипники от некондиционных.

При предъявлении второго образа \mathbf{x}_2 обучающей выборки значение кумулятивного потенциала:

1. Не меняется, если выборочный образ лежит с правильной стороны разделяющей границы, определенной кумулятивным потенциалом $K_1(\mathbf{x})$. Формально, если $\mathbf{x}_2 \in C$ и потенциал $K_1(\mathbf{x}_2) > 0$ или $\mathbf{x}_2 \in B$, а $K_1(\mathbf{x}_2) < 0$, то $K_2(\mathbf{x}) = K_1(\mathbf{x})$.

2. Корректируется ошибка первого рода, т.е. подшипник хороший, а он отнесен к классу плохих. Формально, если $\mathbf{x}_2 \in C$, а потенциал $K_1(\mathbf{x}_2) \leq 0$, то

$$K_2(\mathbf{x}) = K_1(\mathbf{x}) + K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_2) = \pm K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_1) + K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_2).$$

3. Корректируется ошибка второго рода, т.е. подшипник некондиционный, а он отнесен к классу хороших подшипников. Это значит, что $\mathbf{x}_2 \in B$, а $K_1(\mathbf{x}_2) \geq 0$. Тогда

$$K_2(\mathbf{x}) = K_1(\mathbf{x}) - K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_2) = \pm K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_1) - K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_2).$$

Аналогично строится общий алгоритм для $K_k(\mathbf{x})$ – значения кумулятивного потенциала, полученного после предъявления k образов обучающей выборки $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_k$.

И еще один алгоритм итеративного вычисления кумулятивного потенциала, который был использован для программирования:

$$K_{k+1}(\mathbf{x}) = K_k(\mathbf{x}) + r_{k+1}K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{k+1}),$$

где корректирующие коэффициенты при потенциальной функции определяются соотношениями:

$$r_{k+1} = \begin{cases} 0 & \text{при } \mathbf{x}_{k+1} \in C \text{ и } K_k(\mathbf{x}_{k+1}) > 0; \\ 0 & \text{при } \mathbf{x}_{k+1} \in B \text{ и } K_k(\mathbf{x}_{k+1}) < 0; \\ 1 & \text{при } \mathbf{x}_{k+1} \in C \text{ и } K_k(\mathbf{x}_{k+1}) \leq 0; \\ -1 & \text{при } \mathbf{x}_{k+1} \in B \text{ и } K_k(\mathbf{x}_{k+1}) \geq 0. \end{cases}$$

Если алгоритм классифицирует образ правильно, то корректирующий коэффициент равен нулю. Если хороший подшипник классифицируется как плохой, то корректирующий коэффициент при потенциальной функции от этого образа равен 1. Если плохой подшипник классифицируется как хороший, то корректирующий коэффициент равен -1.

По среднестатистическим характеристикам сигналов подшипники не разделимы полностью, в то время как использование информационных характеристик, особенно последнего оборота, а не в среднем по сигналу, обеспечивает полную разделимость подшипников в предлагаемом признаковом пространстве. Традиционные статистические характеристики (СКО, эксцесс и пр.), рассчитанные не по всему сигналу, а по данным 6-го оборота, также более пригодны для формирования признакового пространства, чем существующий подход.

Заключение

Задача диагностики состояния межвальных подшипников решена как задача распознавания образов двух классов: кондиционный и некондиционный. Однако прежде чем приступить к синтезу искомой системы распознавания образов, необходимо было решить задачу выделения признаков. Эта задача решена методами обработки сигналов и логическим анализом их результатов.

Результаты обработки данных позволили выбрать наиболее эффективные характеристики (признаки) сигналов и Wavelet-коэффициентов, обеспечивающие разделимость сигналов в выбранном признаковом пространстве, т.е. классификацию.

Логический анализ данных позволяет сформулировать условия отнесения подшипника к классу кондиционных или некондиционных, а результаты анализа сигналов используются для обучения классификаторов. Классификаторы могут быть обучены на различных наборах сигналов, например, сигналов вибродиагностики подшипников с одним и тем же дефектом. Результаты обучения можно сохранить в файлах, а затем по выбору использовать при диагностике состояния конкретного подшипника.

Литература

1. Сидоренко М.К. Виброметрия газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1973. – 143 с.
3. Шишкин В.Н., Комаров Б.И., Гайдай М.С., Шепель В.Т. Диагностика технического состояния трансмиссионных подшипников ГТД методом структурного анализа их вибросигналов // Контроль и диагностика. – № 4. – 2000. – С. 32 – 34.
3. Фор А. Восприятие и распознавание образов / пер. с фр. А.В. Серединского; под ред. Г.П. Катуса. – М.: Машиностроение, 1989. – 272 с.
4. Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. – М.: Физматгиз, 1960. – 884 с.

Поступила в редакцию 30.05.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Букатый, РГАТА, Рыбинск