

УДК 621.438.003

А.П. ГОРШКОВ<sup>1</sup>, Т.П. ГРЫЗЛОВА<sup>1</sup>, Б.И. КОМАРОВ<sup>2</sup>, В.Т. ШЕПЕЛЬ<sup>2</sup><sup>1</sup>Рыбинская государственная авиационная технологическая академия  
им. П. А. Соловьева, Рыбинск, Россия<sup>2</sup>ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия

## ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ ТРАНСМИССИИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ПРОСТРАНСТВАХ СТАТИСТИК ХАРАКТЕРНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ВИБРАЦИЙ

Для уменьшения количества ложных съёмов двигателей по оценке состояния подшипников трансмиссии ГТД на основе показаний ИВУ-1М, сформулирована и решена задача диагностики состояния подшипников трансмиссии как задача распознавания образов двух классов. Исходными данными для диагностики являются записи оцифрованных сигналов ИВУ-1М (обучающая выборка). Рассмотрена проблема формирования образов, пригодных для диагностики. Введена модель повторяемости явлений вибрации в виде характерных последовательностей. Разработан алгоритм определения характерных последовательностей. Определены их статистические характеристики. Показана высокая информативность предложенных статистик для диагностики состояния подшипников трансмиссии.

**диагностика, ложный съём ГТД, подшипники трансмиссии, обучающая выборка, характерная последовательность, динамические признаки, формирование образа, признаковое пространство**

### Введение

Вибрационные методы диагностики позволяют непосредственно контролировать динамическое силовое взаимодействие в трансмиссии, поэтому некоторые явления, например, перекосы в шлицевых соединениях, меняющие характер динамических нагрузок, могут быть выявлены по изменениям вибрации значительно раньше, чем появятся следы износа. С другой стороны, велико количество ложных съёмов двигателей по оценке состояния подшипников трансмиссии ГТД на основе показаний прибора ИВУ-1М. Оцифрованные в МПС-200 записи сигналов с выхода ИВУ-1М являются полезной обучающей выборкой для разработки, оптимизации и тестирования разнообразных методов диагностики. Целью исследований является поиск информативных признаков или их наборов, диагностика по которым уменьшила бы количество необоснованных съёмов двигателей – ошибку второго рода, не увеличивая ошибку первого рода.

Известно несколько методик диагностики подшипников трансмиссии ГТД, основанных на спек-

тральном анализе и / или представлении вибросигналов как точек в пространствах статистических признаков. В настоящее время при эксплуатации ГТД для диагностики состояния межвальных подшипников ГТД используется оценка эффективного значения сигнала  $\hat{\sigma}_s^2$  на аналоговом выходе прибора ИВУ-1М, подшипник классифицируется как непригодный при превышении  $\hat{\sigma}_s^2$  заданного порога, т.е. состояние подшипников диагностируется только по мощности вибросигнала. Формально, пространство диагностических признаков  $S_1^1 = R^1 = \sigma_s^2$  одномерно.

Первоначально признаковое пространство определялось системой датчиков, т.е. возможностями измерений характеристик аналоговых сигналов. После перехода к цифровой обработке сигналов в комплексе МПС-200 (ВДК-44) начался поиск эффективных признаков пространств для диагностики, в том числе и формальное построение признаков пространств методом главных компонент [1].

В качестве первичных признаков используются статистические характеристики оцифрованных сиг-

налов, мощности вибросигнала в заданных частотных диапазонах и мощность огибающей в диапазоне 1 – 400 Гц. Например, полезным оказалось первичное пространство  $S_2^6 = R^6$  из мощностей в диапазонах частот (1..250), (1..500), (250..300), (500..700), (800..1200) Гц и амплитуды огибающей в диапазоне (1..400) Гц.

Пространство признаков для диагностики формировалось как линейная комбинация  $L(S_2^6)$ , полученная одним из методов факторного анализа [1]. Диагностика состояния подшипника выполняется по близости предъявленного образа к кластерам кондиционных и некондиционных подшипников, расстояние визуально оценивается оператором, при этом он должен мысленно согласовать несколько проекций  $R^6 \rightarrow R^2$ . Таким образом, задача диагностики даже не была формализована. Это можно объяснить тем, что решение целиком возлагалось на человека, единственной функцией программного обеспечения была визуализация результатов работы алгоритмов вычисления признаков. Задача выбора признаков тоже не была формализована, поскольку признаки субъективно выбираются человеком. Признаковые пространства  $S_1^1$  и  $L(S_2^6)$  не обеспечивают полной делимости образов, даже на обучающей выборке образы смешиваются, причем не вблизи границы.

В результате наших исследований была формализована задача диагностики, для ее решения разработано приложение **Bearing**. Это приложение содержало набор алгоритмов для вычисления признаков и анализа сигналов. Выбор эффективных признаков выполнялся человеком. Некоторые результаты были представлены в [2]. Там же был сделан принципиальный вывод: нельзя пренебрегать нестационарностью сигналов при их обработке, что подтверждается тем, что статистические и информационные характеристики сигнала  $s_0^{T-1}$  и Wavelet-коэффициентов менее эффективны для диагностики, чем те же характеристики, определенные по од-

ному обороту, особенно последнему  $s_{25000}^{29999}$ . Этот вывод определил направления дальнейших исследований: поиск динамических признаков для распознавания.

## 1. Формализация задачи диагностики состояния подшипников трансмиссии

Наблюдается сигнал  $s_i(t) = s_0^{T-1} = s_0 s_1 \dots s_{T-1}$ , относительно которого известно, какому классу состояний диагностируемого объекта он соответствует. Состояния диагностируемого объекта представлены множествами классифицированных сигналов  $\{C_0, B_0\}$ . Классы данных для обучения  $\{C, B, N\}$  содержат сигналы кондиционных подшипников ( $s_0^{T-1} \in C$ ), сигналы кондиционных, но необоснованно снятых подшипников ( $s_0^{T-1} \in N$ ) и сигналы обоснованно снятых дефектных подшипников ( $s_0^{T-1} \in B$ ). Необходимо выбрать признаковое пространство  $S$ , в котором вероятность ошибки второго рода была уменьшена, а вероятность ошибки первого рода была минимально возможной. Ошибке второго рода соответствует ситуация, когда годный подшипник опознается как дефектный и двигатель снимается, а ошибке первого рода – ситуация, когда дефектный подшипник классифицирован как хороший. Классификатор должен распознавать два класса состояний, поэтому для обучения классификатора данные годных подшипников с типичными и нетипичными характеристиками объединяются,  $C_0 = C \cup N$ .

В рабочем режиме обученная система распознавания выносит решение о состоянии подшипника, т.е. выполняет преобразование  $s_0^{T-1} \mapsto r$ , где  $r \in \{0,1\}$  – классифицирующая переменная, равная 1, если подшипник годен и равная 0, если он не пригоден для эксплуатации. Если мы введем характеристическую функцию  $\chi_{C_0}$  множества годных подшипников, то  $r$  – ее оценка:  $r = \hat{\chi}_{C_0}$ .

Эффективность диагностических признаков существенно определяется механизмом получения сигналов и методом их обработки для формирования образа  $\mathbf{s}_0^{T-1} \mapsto \mathbf{X}(\mathbf{s}_0^{T-1})$  или поддержки решения оператора.

Обычно достаточно визуальной оценки распределения образов в признаковом пространстве, но в многомерном пространстве по множеству проекций судить о компактности образов одного класса и возможности провести между ними разделяющую границу очень трудно. Хорошо, если образы хотя бы одного класса лежат плотно. Например, в некоторых пространствах образы годных подшипников как с типичными, так и нетипичными характеристиками лежат плотно и компактно, т.е. энтропия класса  $\mathbf{X}_C$  очень мала. Напротив, образы плохих подшипников могут быть разбросаны.

## 2. Модель повторяемости явлений вибрации

Вибродатчик воспринимает сложную композицию импульсных сигналов и шумовых вибраций тел качения трансмиссионных подшипников: межвального подшипника, роликоподшипника КВД, шарикоподшипника КВД, шарикоподшипника центрального привода, роликоподшипника ТВД (подшипники перечислены в порядке удаления от вибродатчика). Механическая система валов и подшипников трансмиссии при отсутствии неисправностей ритмична, поэтому в сигналах вибродатчика можно обнаружить большое число характерных последовательностей. При появлении дефектов меняется характер связей в механической системе, несимметричность элементов и нерегулярность их вибраций влияет на результирующий вибросигнал и приводит к уменьшению количества характерных последовательностей.

Назовем элементарной последовательностью  $\mathbf{ps}_{t_0}^{t_0+n-1}$  последовательность отсчетов сигнала в

диапазоне  $[t_0, t_0+n-1]$ ;

$t_0$  – номер первого отсчета элементарной последовательности;

$$n = \#\mathbf{ps}_{t_0}^{t_0+n-1} \text{ или } n = \left| \mathbf{ps}_{t_0}^{t_0+n-1} \right| - \text{длина элементарной последовательности.}$$

Характерная последовательность (ХП) – это элементарная последовательность, которая неоднократно встречается в сигнале, т. е. кластер одинаковых элементарных последовательностей.  $\mathbf{cs}$  – префикс перед условным номером характерной последовательности. Очевидно, что надо ввести меру сходства элементарных последовательностей одинаковой длины и допустимый порог расстояния между ними, при котором последовательности считаются одинаковыми. В данной работе расстояние между элементарными последовательностями вычисляется по метрике Чебышева:

$$\rho(\mathbf{ps}_k^{k+n-1}, \mathbf{ps}_l^{l+n-1}) = \max_j |\mathbf{ps}_k(j) - \mathbf{ps}_l(j)|,$$

где  $j$  – номер отсчета в элементарной последовательности, начинающейся с номера  $k$  или  $l$  в сигнале. Частота повторения ХП в  $i$ -ом сигнале –  $v(\mathbf{cs} | \mathbf{s}_0^{T-1})$  или просто  $v_i$ .

*Характеристики* экземпляров ХП: длина; корреляционная функция; спектральная плотность.

*Параметры* серии элементарных последовательностей кластера ХП: начальный момент времени; интервалы времени между ХП.

Распределение расстояний между характерными последовательностями в кластере также является показательным. Заметим, что статистики ХП зависят от выбранной метрики.

## 3. Алгоритм поиска характерных последовательностей

Характерные последовательности ищутся по алгоритму кластеризации, сходному с алгоритмом, изложенным в [3] для точечных образов:

1) выбирается элементарная последовательность длины  $n$  в сигнале – первая эталонная последовательность  $\mathbf{ps}_{t_0}^{t_0+n-1}$ ,  $t_0 = 0$ , она образует первый кластер, число кластеров обозначим  $M$ ;

2) начальный момент для выделения следующей элементарной последовательности длины  $n$  выбирается с заданным шагом  $\tau$  –  $t_0 = \tau \cdot i, i = 1, \dots, m, m \cdot \tau < T - n$ ;

3) сравниваются две элементарные последовательности по метрике Чебышева. Если расстояние между эталонными и проверяемыми последовательностями больше порога, то проверяемая последовательность становится эталоном нового кластера, число кластеров увеличивается  $M = M + 1$ , в противном случае проверяемая элементарная последовательность относится к ближайшему кластеру и число кластеров  $M$  не меняется;

4) повторяются шаги 2 и 3.

Параметры алгоритма поиска – шаг поиска, диапазон поиска, мера сходства, допустимое расстояние (порог) влияют на кластеры ХП.

Из кластеров характерных последовательностей для диагностики выбираются такие, которые позволяют разделить образы кондиционных и некондиционных подшипников в пространствах статистик ХП. В частности, полезной статистикой является частота ХП в сигнале или его части.

#### 4. Статистики характерных последовательностей

В табл. 1 приведены параметры алгоритма поиска и имена найденных ХП, а также указано, обеспечивается ли полная разделяемость образов подшипников в одномерном пространстве статистики этой последовательности, или для полной разделяемости необходима информация о статистиках других ХП.

Частота появления  $\mathbf{cs}_1$  в сигнале может использоваться как единственный признак для диагностики  $\sqrt{\mathbf{cs}_1 | \mathbf{s}_0^{T-1}} = p1 = v_1$ . Тем не менее, образы конди-

ционных и некондиционных подшипников в этом пространстве разделяемы не только по множеству подшипников типа Р12, но и во всей выборке подшипников, что показано на рис. 1 ( $v_1$ ). Единственный кондиционный необоснованно снятый подшипник попадает в кластер плохих. Причиной съема двигателя была неисправность ИВУ-1М, а именно, повышение чувствительности и отсутствие регулировки из-за подогнутой ножки потенциометра.

Таблица 1  
Параметры алгоритма поиска ХП

	N	Шаг	Диап.	Порог	Разделимость
$\mathbf{cs}_1$	200	75	$\mathbf{s}_{24000}^{29999}$	2,8	Полная
$\mathbf{cs}_2$	50	10	$\mathbf{s}_0^{29999}$	1,8	Полная
$\mathbf{cs}_3$	50	10	$\mathbf{s}_0^{29999}$	1,56	p4 или p8
$\mathbf{cs}_4$	50	10	$\mathbf{s}_0^{29999}$	1,56	p3 или p8
$\mathbf{cs}_5$	200	75	$\mathbf{s}_{24000}^{29999}$	2,83	Полная
$\mathbf{cs}_6$	200	75	$\mathbf{s}_{24000}^{29999}$	2,71	Полная
$\mathbf{cs}_7$	200	75	$\mathbf{s}_{24000}^{29999}$	2,59	Полная
$\mathbf{cs}_8$	75	15	$\mathbf{s}_{24000}^{29999}$	0,786	p3 или p4

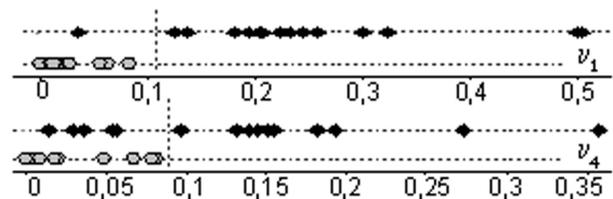


Рис. 1. Распределение образов в пространствах  $X_1$  и  $X_4$  (кружки – плохие, ромбы – кондиционные)

Частоты ХП  $v_3$  и  $v_4$  (рис. 1,  $v_4$ ) по отдельности не являются достаточными статистиками для диагностики подшипников, но пара этих признаков имеет достаточную информативность (рис. 2).

Аналогично распределены образы в пространстве  $X_{3,8} = |p3, p8|$  и других двумерных пространствах, плохие подшипники в них образуют плотный кластер, а кондиционные разбросаны.

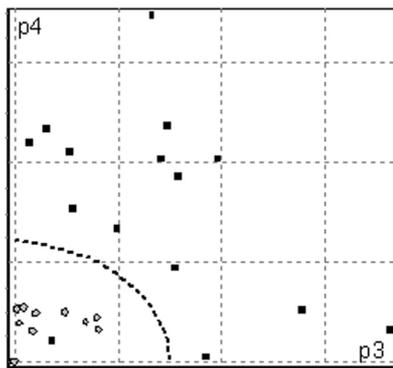
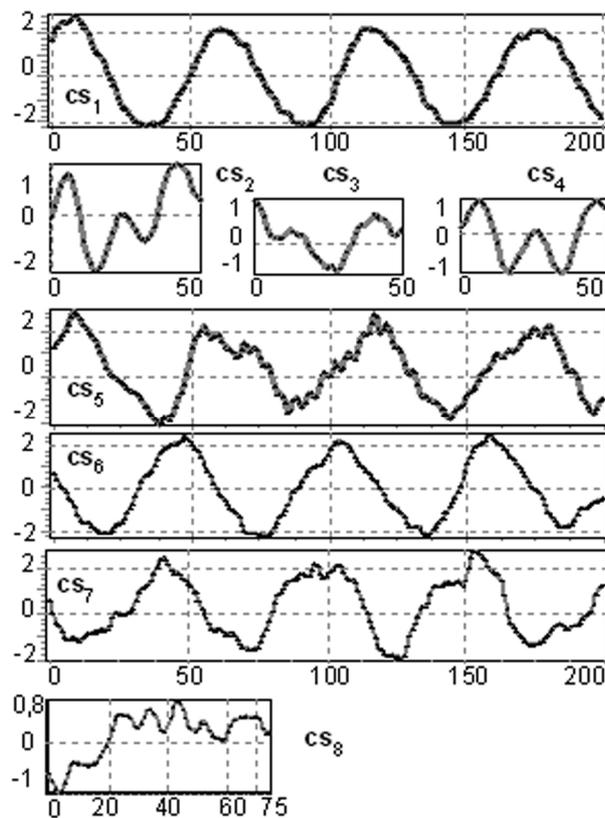
Рис. 2. Распределение образов в пространстве  $X_{3,4}$ 

Рис. 3. Характерные последовательности

Таблица 2

Характеристики серии

№	$\rho_c$	$\rho_b$	$\nu_c$	$\nu_b$	$\sigma_c$	$\sigma_b$
p1	307,9	2345	0,2435	0,0319	0,0158	0,0007
p2	786,9	5069	0,0953	0,0147	0,002	0,0001
p3	559,3	2477	0,134	0,0302	0,0089	0,001
p4	1661	7276	0,0451	0,0103	0,0007	$3 \cdot 10^{-5}$

На рис. 3 показан вид некоторых характерных последовательностей. Спектральный анализ ХП показал, что у всех ХП, кроме  $cs_8$ , частота, на которую приходится максимум спектральной плотности,

равна 200 Гц (у  $cs_8$  она равна 133 Гц). У  $cs_2, cs_4, cs_5$  есть второй максимум на частоте 600 Гц,  $cs_6, cs_7$  имеют второй максимум на частоте 450 Гц и  $cs_8$  - 1066 Гц.

В табл. 2  $\rho_b, \rho_c$  – средние интервалы между ХП в сигнале,  $\nu_b, \nu_c$  – средние частоты появления ХП,  $\sigma_b, \sigma_c$  – отклонения частоты появления ХП в сигналах плохих и кондиционных подшипников, соответственно. Проведенные исследования показывают, что статистики ХП классов **C** и **B** существенно различны.

## Заключение

Введена модель повторяемости явлений вибрации в виде характерных последовательностей. Разработан алгоритм определения характерных последовательностей. Определены их статистические характеристики. Показана высокая информативность предложенных статистик для диагностики состояния подшипников трансмиссии ГТД.

## Литература

1. 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. – 2000. – № 4. – С. 55-59.
2. Шепель В.Т., Комаров Б.И., Грызлова Т.П. Выбор признаков для диагностики технического состояния трансмиссионных подшипников ГТД. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 8 (24). – С. 97-100.
3. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. – М.: Мир, 1978. – 344 с.

Поступила в редакцию 31.05.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ш.А. Пиралишвили, РГАТА, Рыбинск.