

# ОСОБЕННОСТИ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО ВЫСОКООБОРОТНОГО РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ



**Д.А. Ткачев,**  
адъюнкт Военной академии  
Республики Беларусь

Вибрационная диагностика — одно из направлений технической диагностики вооружения и военной техники, использующее в качестве диагностических сигналов механические колебания деталей и узлов. Механические колебания обладают высокой информативностью, быстрой реакцией на изменение технического состояния деталей и узлов, высокой чувствительностью к дефектам на ранней стадии развития. Внедрение методов вибрационной диагностики не требует разборки или доработки конструкции изделий, что очень важно при эксплуатации. Быстрое развитие цифровой техники, способной принимать и обрабатывать большие потоки информации, позволяет производить мобильные и недорогие средства диагностики. Перечисленные преимущества способствуют широкому применению вибрационной диагностики при эксплуатации роторного оборудования.

Однако существующие методики диагностики роторного оборудования применимы к диагностике технологического оборудования, имеющего низкие частоты вращения ротора. Роторное оборудование, применяющееся в военной технике, имеет более энергонасыщенную конструкцию и более высокие скорости вращения роторов, в результате чего общие методики диагностики роторного оборудования оказываются неэффективными. Для решения проблемы применения вибрационной диагностики для роторного оборудования военного назначения необходимо:

- определить характерные особенности конструкции и особенностей эксплуатации роторного оборудования;
- найти информативные диагностические признаки дефектов, определить их зависимость от режимов работы оборудования;
- разработать решающие правила, позволяющие специалисту, проводящему диагностику, делать заключение о состоянии оборудования.

Анализ надежности работы роторного оборудования за несколько лет показывает, что значительная доля отказов такого оборудования (от 40 до 50%) происходит по причине разрушения подшипников качения, приводящих к выходу из строя всего оборудования. Поскольку разрушение подшипников происходит внезапно, без каких-либо признаков, указывающих на приближение отказа,

а замена отказавшего оборудования — весьма дорогостоящая операция, проблема диагностирования технического состояния подшипниковых узлов на ранних стадиях развития неисправностей является весьма актуальной.

Методы и способы вибрационного диагностирования подшипников качения базируются как на детерминистских, так и вероятностных подходах. Основной задачей при создании таких методов является построение физической модели подшипника, т. е. определение динамических, кинематических или других параметров, прямо или косвенно описывающих его состояние, с последующим преобразованием ее в диагностическую модель, т. е. в описание этих параметров с помощью вибрационных признаков. В работе [1] предлагается «кинематическая» модель подшипников качения, в соответствии с которой каждой неисправности подшипника соответствует колебание ротора с частотой, кратной частоте вращения ротора и рассчитанной в соответствии с кинематикой движения элементов подшипника, имеющих данную неисправность. Амплитуды колебаний на указанных частотах характеризуют появление и степень развития соответствующих неисправностей. Использование данной модели дает удовлетворительные результаты только при стендовых испытаниях подшипников качения.

Однако особенности роторного оборудования, используемого в военной технике, накладывают ряд ограничений на методы и средства вибрационной диагностики. Рассмотрим подробнее особенности, оказывающих значительное влияние на результаты диагностики оборудования.

1. Отсутствие доступа к местам установки подшипников. Установка датчика вибрации возможна только на корпусе оборудования, что усложняет задачу контроля подшипниковых узлов. При установке подшипников в энергонасыщенное высокоскоростное оборудование, которое само по себе является сложной динамической системой, возникают значительные трудности как в выделении приведенных информативных частот-признаков из общего вибрационного сигнала, так и в их идентификации. Поэтому главной задачей диагностики является поиск каналов связи, который передавал бы наиболее информативный сигнал.

2. В связи с небольшой массой корпуса сигнал вибрации, измеряемый в точках контроля на корпусе, содержит, в основном, информацию о локальных, в том числе аэродинамических, процессах.

3. Диапазон контроля вибрации лежит в диапазоне собственных частот элементов конструкции оборудования. В результате из-за наличия резонансных явлений значительно затрудняется определение эталонных значений контролируемых диагностических параметров.

4. Эксплуатация оборудования зачастую происходит на различных режимах. При этом частота вращения ротора может изменяться в десятки раз. Возникает проблема сопоставления результатов диагностики полученных на различных режимах работы оборудования. Кроме того, в условиях изменения режима работы происходит непропорциональное изменение осевой и радиальной нагрузки. В результате изменяется угол контакта тел качения с дорожками качения, что приводит к изменению диагностических подшипниковых частот.

5. Аэродинамические характеристики воздуха в проточной части имеют повышенную турбулентность и, как следствие, появление нелинейных взаимодействий элементов конструкции, появление шума, искажение диагностической информации.

6. Высокие скорости вращения. В результате в подшипниках качения существенно влияние на вибрационные параметры явлений, не учтенных в «кинематических» моделях подшипников качения. К таким явлениям относятся проскальзывание тел качения по дорожкам качения и отрывное движение ротора в опорах.

7. Высокая стоимость оборудования и сложность оборудования, что ограничивает проведение в условиях эксплуатации натурального эксперимента, позволяющего получить информативные диагностические признаки и собрать достаточную статистическую информацию о влиянии дефектов на диагностические параметры.

Поскольку диагностических признаков, полученных на основе кинематических зависимостей, не достаточно для эффективного диагностирования высокооборотного оборудования, выявление диагностических признаков оборудования с такими особенностями наиболее эффективно при разработке динамических моделей. Создание таких моделей требует детального изучения конструкции

методами конечно-элементного анализа и описания динамики движения элементов конструкции при помощи дифференциальных уравнений. В условиях эксплуатации, когда не всегда можно определить параметры некоторых узлов и деталей или условия их работы, создание адекватной динамической модели такого оборудования весьма затруднительно.

В качестве примера рассмотрим диагностику турбохолодильника систем кондиционирования воздуха летательных аппаратов. Диапазон частот вращения ротора — 200–1100 Гц. Агрегат конструктивно состоит из ротора, подшипникового узла и корпуса. Ротор состоит из компрессора, турбины и вала. Подшипниковый узел включает в себя два радиально-упорных шариковых подшипника и корпус. Контроль вибрации ведется в диапазоне 10 Гц – 16 кГц. Точка контроля вибрации расположена на корпусе турбохолодильника. Диагностируемые состояния: агрегат исправен, дефект подшипника, неуравновешенность ротора, отсутствие смазки подшипника. Исходные данные — результаты испытаний турбохолодильников на стенде авиаремонтного предприятия (63 реализации на 12 режимах работы турбохолодильника). Имеются реализации исправных агрегатов и агрегаты с дисбалансом ротора, сильно развитым дефектом на наружной обойме подшипника качения, разноразмерностью тел качения подшипника.

В ходе эксперимента проводился контроль: среднеквадратичного значения (СКЗ) сигнала во всем частотном диапазоне, СКЗ в диапазоне 75–1100 Гц (контроль роторной составляющей, обусловленный требованием технической документации), пик-фактора, амплитуд роторных и подшипниковых гармоник, рассчитанных по общеизвестным кинематическим соотношениям [1, 2].

Анализ результатов показывает, что наличие дефектов подшипников не оказывает влияния на уровни амплитуд подшипниковых частот. На рис. 1 представлены спектры виброускорения корпуса турбохолодильника с дефектным подшипником и смоделированного сигнала виброускорения дефектного подшипника. Как видно из рисунка в спектре реального сигнала не наблюдается подшип-

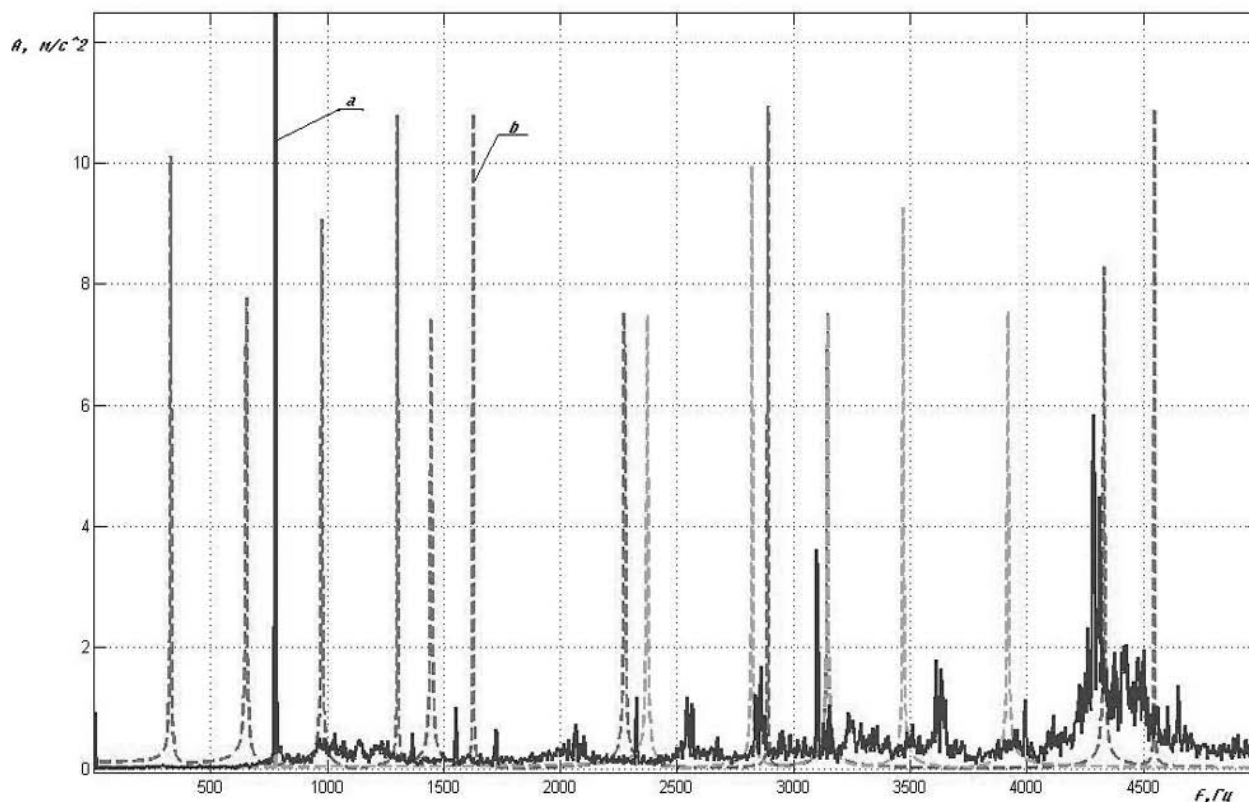


Рис. 1. Спектр виброускорения корпуса турбохолодильника:  
а) спектр виброускорения турбохолодильника, б) спектр смоделированного сигнала

никовых частот, что свидетельствует о низкой эффективности для высокооборотного оборудования метода выявления дефектов подшипников контролем подшипниковых частот.

Для повышения информативности признакового пространства предлагается разбивать частотный диапазон на несколько поддиапазонов шириной 1–3 кГц. Выбор границ поддиапазонов определяется собственными частотами конструкции и опытом специалиста, разрабатывающего методику диагностики оборудования.

Для примера с турбохолодильниками диапазон разбит на поддиапазоны: 1,2–2 кГц, 4–7 кГц, 9–11 кГц. В процессе контроля пяти параметров (амплитуды роторной гармоники, СКЗ во всем частотном диапазоне и СКЗ в диапазонах 1,2–2, 4–7 и 9–11 кГц) получены результаты, позволяющие определять технические состояния, которые предыдущим методом не выделялись. На рис. 2 представлены значения СКЗ в диапазоне 9–11 кГц для различных агрегатов на различных режимах вращения ротора. Из рисунка видно, что агрегаты с дефектными подшипниками имеют более высокое значение данного параметра.

В случае с многорежимным оборудованием значения диагностических параметров, измеренные на различных режимах работы, значительно отличаются. При проведении классификации в таком случае увеличивается число диагностируемых состояний, так как каждое техническое состояние оборудования необходимо разделять на классы соответствующие режимам работы оборудования. С целью уменьшения числа диагностируемых состояний и увеличения обучающей выборки исходные данные должны быть пересчитаны к приведенной частоте вращения ротора. В качестве частоты приведения рекомендуется выбирать: а) в случае диагностики подшипников качения — режим малого газа, холостого хода или режим с меньшей частотой вращения ротора. Такой выбор режима позволит значительно упростить идентификацию дефектов и не скажется на результатах диагностики, так как вибрация дефектного подшипника незначительно зависит от нагрузки; б) в случае диагностики оборудования в целом — крейсерский или номинальный режим. На этих режимах оборудование нагружено в соответствии с расчетными условиями.

Пересчет исходных данных к приведенной частоте вращения ротора проводится в следующей последовательности:

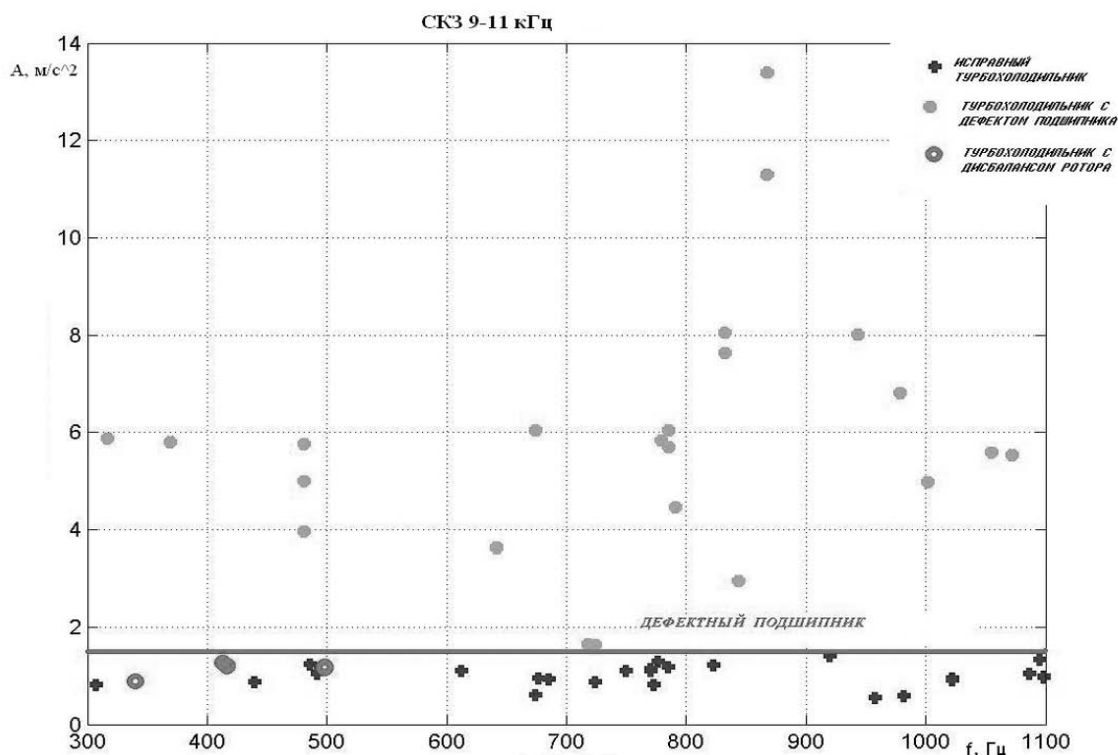


Рис. 2. СКЗ в диапазоне 9–11 кГц

1. По результатам замеров вибрационных параметров нескольких исправных изделий строится зависимость каждого диагностического параметра от режима работы оборудования.

2. Строится аппроксимирующая функция любым известным методом (в нашем случае методом наименьших квадратов). На рис. 3 представлена зависимость диагностического параметра от частоты вращения ротора.

3. Вычисляется приведенное значение диагностического параметра:

$$x_{i0}^t = \frac{\widehat{x}_i^t}{x_{ПП}^t} x_{ПП0}^t$$

где  $\widehat{x}_i^t$  — значение  $t$ -го параметра, измеренное в некоторой шкале, у  $i$ -го объекта;

$x_{ПП}^t$  — значение  $t$ -го параметра, рассчитанное аппроксимирующей функцией для данного режима работы;

$x_{ПП0}^t$  — значение  $t$ -го параметра, рассчитанное аппроксимирующей функцией для приведенного режима работы.

Рассмотрим завершающий этап диагностики — принятие решения о техническом состоянии оборудования. Пусть имеется матрица  $X = \{x_p, \dots, x_n\}$ , представленная  $n$  реализациями  $k$  ( $k < n$ ) агрегатов на всех режимах, предусмотренных технической документацией.

Объектом  $x_i$  называется агрегат с  $i$ -й реализацией, представленный значениями  $m$  диагностических параметров, так что каждый объект представляет собой точку в  $m$ -мерном признаковом пространстве. В таком случае каждый агрегат представлен в выборке совокупностью точек в  $m$ -мерном признаковом пространстве. Каждая точка — отдельная реализация на определенном режиме.

В таком случае исходные данные представляют матрицей «объект-свойство»:

$$X = \begin{pmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_n^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_n^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^m & x_2^m & \dots & x_n^m \end{pmatrix}$$

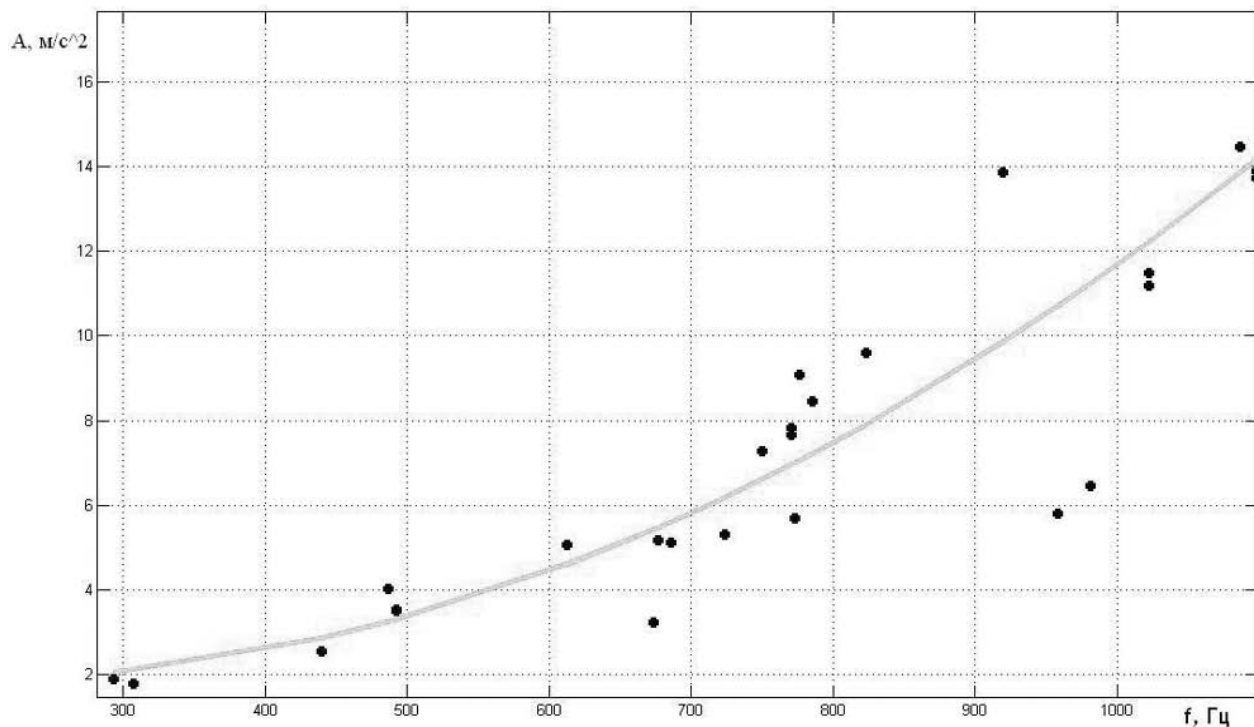


Рис. 3. Зависимость диагностического параметра от режима работы оборудования

Исходные данные могут быть представлены и матрицей «объект-объект»:

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \dots & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \dots & \rho_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \dots & \rho_{nn} \end{pmatrix}$$

Значения  $\rho_{ij}$  представлено взаимным расстоянием между объектами  $x_i$  и  $x_j$ . Переход от матрицы «объект-свойство» к матрице «объект-объект» осуществляется с помощью различных расстояний между объектами. На практике наиболее часто применяют относительное обобщенное расстояние Хемминга, относительное евклидову норму, относительное евклидово расстояние [3].

Такие состояния, как неуравновешенность ротора и дефект подшипника, могут быть представлены различными дефектами или их совокупностью. Поэтому количество классов, которые необходимо распознавать, больше количества диагностируемых технических состояний. На практике при эксплуатации не всегда встречаются все виды дефектов, а проведение натурных экспериментов с испытанием всех типов оборудования с внесением всех возможных дефектов весьма влечет за собой большие трудовые и финансовые затраты и не всегда оправдано. Поэтому исходные данные представлены нерепрезентативной выборкой, а число диагностируемых классов заранее не известно, так как может появиться агрегат с дефектом, который до этого не встречался.

В таком случае задача классификации запишется следующим образом: разбить на заранее не известное число классов исходное множество объектов  $X$ , представленного в виде матрицы «объект свойство» или «объект-объект».

Поскольку значения диагностических параметров измеряются в различных шкалах, возникает необходимость нормировки исходных данных. Для нормировки на практике наиболее часто применяют унитаризацию [4]:

$$x_i^t = \frac{\hat{x}_i^t - \min_i \hat{x}_i^t}{\max_i \hat{x}_i^t - \min_i \hat{x}_i^t}$$

где  $\hat{x}_i^t$  — значение  $t$ -го признака, измеренного в некоторой шкале, у  $i$ -го объекта; или нормализацию [4]:

$$x_i^t = \frac{\hat{x}_i^t}{\max_i \hat{x}_i^t}$$

Для решения задачи диагностики при ограниченности информации и известном числе распознаваемых классов целесообразно применять методы распознавания без учителя. Методы обучения без учителя позволяют выделять новый класс, который ранее не был представлен в исходных данных. Наиболее широкое применение получили нейронные сети (карты Кохонена) и четкие и нечеткие методы кластеризации. Так как применение нейронных сетей с обучением без учителя при появлении нового класса требует контролируемого процесса переобучения сети, для диагностики роторного оборудования в условиях ограниченности информации целесообразно применять нечеткие методы классификации. Методы кластерного анализа (метод  $k$ -ближайших соседей и нечеткие алгоритмы классификации) не требуют предварительного обучения и позволяют выделять новые классы по мере их появления.

Для рассмотренного выше примера диагностики турбохолодильников применялся алгоритм нечеткой кластеризации  $FCM-CV$ , строящий распределение по априори неизвестному числу нечетких  $\alpha$ -кластеров. Алгоритм является модификацией алгоритма  $FCM$ . В качестве функции расстояния, как правило, используется квадрат евклидовой нормы в  $m$ -мерном признаковом пространстве, так что функционал можно представить в виде:

$$Q_1''(P) = \sum_{l=1}^c \sum_{i=1}^n \mu_{li}^\gamma \|x_i - \tau^l\|$$

где  $\gamma$  — показатель нечеткости классификации;  
 $\mu_{li}$  — функция принадлежности  $i$ -го объекта к  $l$ -му классу;  
 $\tau^l$  — центр  $l$ -го класса.

Алгоритм минимизирует функционал  $Q_1''$ , так что решение задачи классификации находится в виде:

$$P^* = \arg \min_P \left\{ \begin{array}{l} Q_1'' : P = (A^1, \dots, A^c), A^l = (\mu_{l1}, \dots, \mu_{ln}), 0 \leq \mu_{li} \leq 1, \\ \sum_{l=1}^c \mu_{li} = 1, \sum_{i=1}^n \mu_{li} = 1, i = 1, \dots, n, l = 1, \dots, c \end{array} \right\}$$

Параметры алгоритма:  $c$  — число классов в искомом разбиении,  $\gamma$  — показатель нечеткости классификации,  $1 < \gamma < \infty$ . Принимаем  $\gamma = 2$ , в этом случае достигается наилучшее разбиение, поскольку при увеличении значения возрастает неопределенность классификации, затрудняющая интерпретацию результатов.

Схема алгоритма следующая [4]:

1. Выбираем начальное разбиение ( $b = 0$ )  $R_{(0)} = (A_{(0)}^1, \dots, A_{(0)}^c)$  на  $c = 2$  нечетких кластеров, описываемыми  $c$  непустыми функциями принадлежности, которое представляет собой массив  $\{\mu_{(0)1}, \dots, \mu_{(0)n}\}$ ,  $\mu_{(0)i} = (\mu_{(0)i1}, \dots, \mu_{(0)ci})$ ,  $\mu_{(0)i} \geq 0$ ,  $\sum_{l=1}^c \mu_{(0)li} = 1$  из  $n$ ,  $c$ -мерных столбцов, для всех  $i = 1, \dots, n$ , так что полученная матрица начального разбиения  $R_{(0)} = [\mu_{(0)li}]$  имеет строк  $c$  и  $n$  столбцов;

2. Пусть построено  $b$ -е разбиение  $R_{(b)}$  в виде массива  $\{\mu_{(b)1}, \dots, \mu_{(b)n}\}$ ,  $\mu_{(b)i} = (\mu_{(b)i1}, \dots, \mu_{(b)ci})$ ,  $\mu_{(b)i} \geq 0$ ,  $\sum_{l=1}^c \mu_{(b)li} = 1$  из  $n$ ,  $c$ -мерных столбцов; вычисляется набор центров  $\tau_{(b)}^1, \dots, \tau_{(b)}^c$ , в соответствии с формулой:

$$\tau_{(b)}^l = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{(b)i}^\gamma x_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{(b)i}^\gamma}, l = 1, \dots, c$$

3. Строится  $b+1$ -е разбиение  $R_{(b+1)}$  в виде массива  $\{\mu_{(b+1)1}, \dots, \mu_{(b+1)n}\}$ ,  $\mu_{(b+1)i} = (\mu_{(b+1)i1}, \dots, \mu_{(b+1)ci})$ ,  $\mu_{(b+1)i} \geq 0$ , из  $n$ ,  $c$ -мерных столбцов, порождаемое набором центров  $\tau_{(b)}^1, \dots, \tau_{(b)}^c$ , где  $\mu_{(b+1)}$  определяется выражением:

$$\mu_{(b+1)l} = \arg \min \left\{ \sum_{l=1}^c \mu_l^\gamma \|x_i - \tau_{(b)}^l\|^2 : \mu = \mu_1, \dots, \mu_c, \mu_l \geq 0, \sum_{l=1}^c \mu_l = 1 \right\}$$

4. Вычисляется пороговое значение  $\epsilon > 0$  и производится сравнение  $R_{(b)}$  и  $R_{(b+1)}$  по правилу:

$$\|R_{(b)} - R_{(b+1)}\| = \max_{li} |\mu_{(b)l} - \mu_{(b+1)l}|$$

если  $\|R_{(b)} - R_{(b+1)}\| < \epsilon$ , то  $R_{(b)} = R^*$  и алгоритм заканчивает работу, в противном случае полагается  $b = b+1$  и осуществляется переход на шаг 2.

5. Проведение процедуры нечеткой классификации по алгоритму FCM (шаги 1–4) для числа классов  $c = 3 \dots 10$ .

6. Вычисление показателей разбиения по нечетким кластерам. Используются наиболее известные показатели коэффициент разбиения [4]:

$$F_c(R) = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^c \sum_{i=1}^n \mu_{li}^2$$

энтропия разбиения:

$$H_c(R) = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^c \sum_{i=1}^n |\mu_{li} \ln \mu_{li}|$$

На вход алгоритма подавалось матрица из 63 объектов, представленных 170 диагностическими параметрами (по десять первых гармоник роторной, подшипниковых и комбинированных частот, пик-фактор, СКЗ в диапазоне 75–1100 Гц, СКЗ во всем частотном диапазоне).

Наилучшие результаты получены при применении алгоритма с показателем энтропии разбиения. При этом разбиение было произведено на четыре класса («исправен», «дисбаланс», «дефект подшипника 1», «дефект подшипника 2»). Достоверность диагноза — 75%. Анализ результатов показывает, что класс «дефект подшипника 2» (объекты с неравномерными телами качения) практически не распознается. Достоверность определения состояния «дефект подшипника 2» составляет 20%.

Когда на вход алгоритма подается матрица с объектами, представленными пятью диагностическими параметрами (амплитуда роторной гармоники, СКЗ во всем частотном диапазоне и СКЗ в диапазонах 1,2–2, 4–7, 9–11 кГц). Достоверность диагноза повышается до 90%. Представление данных в двумерном признаковом пространстве (оборотная частота и уровень вибрации в диапазоне 9–11 кГц) позволяет классифицировать технические состояния с достоверностью 95%.

#### Литература:

1. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. — Пермь: ПВФ «Вибро-Центр», 1996. — 167 с.
2. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. — М., 1996. — 276 с.
3. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: Справ. изд. / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин; под ред. С.А. Айвазяна. — М.: Финансы и статистика, 1989. — 607 с.
4. Вятчин Д.А. Нечеткие методы автоматической классификации. — Мн.: УП «Технопринт», 2004. — 219 с.