

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ВИБРОСОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО ПАРАМЕТРАМ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ СИГНАЛА

В работе представлены результаты исследований в области технической диагностики и связаны с выявлением и обоснованием новых диагностических признаков неисправностей на основе параметров характеристической функции виброакустического сигнала. Полученные признаки являются интегральными оценками статистических характеристик виброакустических сигналов поршневых компрессоров. В работе исследованы граничные значения величин диагностических признаков на основе параметров площади под кривой модуля характеристической функции виброакустических сигналов. Построены кривые риска принятия решений, рассчитаны вероятности пропуска неисправности и ложной тревоги для выбранных величин диагностических признаков. Использование предложенных признаков позволяет повысить достоверность контроля состояния и диагностирования технических устройств.

Ключевые слова: виброакустический сигнал, характеристическая функция, диагностический признак, виброакустическая диагностика, поршневой компрессор.

Введение. Развитие виброакустической (ВА) диагностики различных технических устройств, к которым, в первую очередь, относятся машины и механизмы, неразрывно связано с поиском и выявлением новых диагностических признаков неисправностей. Создание определяющих критериев неисправностей объектов диагностирования на основе статистически независимых параметров характеристик ВА сигнала позволяет повысить достоверность диагностирования. Исследования в этой области являлись и являются актуальными, что обеспечивает развитие теории и практики технического диагностирования.

Диагностирование подшипников качения и поршневых компрессоров основано на анализе параметров различных характеристик ВА сигналов. Для анализа состояния подшипников качения чаще всего используют среднее квадратическое отклонение (в вибродиагностике его называют средним квадратичным значением (СКЗ) [1–5] вибропараметров, реже — эксцесс плотности вероятности мгновенных значений ВА сигнала [3, 4]. Известны примеры применения для контроля состояния подшипников параметров плотности вероятности распределения ВА сигнала [6]. Для диагностирования подшипников чаще всего используют анализ параметров огибающей вибросигнала [3, 4].

В основе контроля состояния поршневых компрессоров лежит анализ СКЗ [7–9], пиковых значений ВА сигнала [7–12], анализ параметров ВА

сигнала по углу поворота коленчатого вала [8–10]. Для выявления различных видов состояний поршневого компрессора применяют и сложные методы анализа параметров ВА сигнала, основанные, например, на методе анализа главных компонент сигнала [13–15], а также взаимно-регрессионных функций, многомерных спектральных и статистических характеристик [16, 17].

Следует отметить, что в работах [11, 12] впервые на основе математического аппарата приведено методическое обоснование возможности и необходимости использования оценки пиковых значений колебательных процессов, включая ВА сигналы, использованное в национальном стандарте РФ [8].

Весьма перспективным способом формирования диагностических признаков подшипников качения и поршневых компрессоров стало использование параметров характеристической функции мгновенных значений виброакустического сигнала [18–21], впервые предложенное авторами в работе [22] и подтверждённое многочисленными исследованиями [18–27].

Обратимся к определению характеристической функции (ХФ) [23], данное Ляпуновым А. М. в 1901 г. Характеристическую функцию случайного процесса $\xi(t)$ определяют как математическое ожидание комплексного случайного процесса $\eta = \exp(iv\xi(t))$, которое выражается функцией вида

$$\theta(v) = m_1 \{ \exp(iv\xi(t)) \} = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) e^{ivx} dx, \quad (1)$$

где v — произвольный, вещественный параметр; m_1 — оператор вычисления математического ожидания; i — мнимая единица; $p(x)$ — плотность вероятности случайной величины x . Применительно к настоящему исследованию, случайный процесс $\xi(t)$ представляет собой виброакустический сигнал, который состоит из мгновенных значений x .

Важным свойством ХФ является непрерывность и ограниченность:

$$\theta(0) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1, \quad |\theta(v)| \leq 1. \quad (2)$$

Ранее авторами в работах [24–27] рассмотрен способ диагностирования технических устройств на основе изменения значений модуля ХФ вибрации в зависимости от изменения состояния. В качестве диагностического признака в указанном способе выступает параметр, определяемый как значение модуля ХФ при постоянном значении параметра [18, 19, 22, 25, 34]. Для наглядности следует обратиться к рис. 1. Из представленных графиков видно, что ХФ ВА сигнала для исправного подшипника имеет наиболее пологий характер по сравнению с графикам ХФ для подшипников в состоянии «Требуется принятия мер» и «Недопустимо» [2]. При этом очевидно, что при заданном параметре ХФ v , например, 0,2, модуль ХФ $|\theta(v)|$ будет существенно отличаться для различных состояний. Однако его интервал изменения лежит в диапазоне от 0 до 1, независимо от абсолютной величины вибрации.

Необходимо отметить, что у приведённого выше способа существует проблема выбора такого значения параметра $v = \text{const}$, при котором с достаточной высокой вероятностью можно определить граничные значения модуля ХФ между состояниями объекта и минимизировать ошибки первого и второго рода [24–27]. Альтернативным вариантом является использование в качестве диагностического признака технического состояния, в частности, узла поршневого компрессора, интегрального параметра вероятностной характеристики процесса, такого как площадь под кривой модуля ХФ ВА сигнала [32].

Известно [28, 29, 30, 31], что ВА сигнал имеет сложную структуру, обусловленную наличием большого числа источников взаимно модулированных квазидетерминированных случайных сигналов, шумовой компоненты и, в общем случае, может быть описан моделью нормального случайного процесса. Для центрированной гауссовой случайной величины ХФ имеет вид [36]:

$$\theta(v) = \exp\left(\frac{-\sigma^2 v^2}{2}\right), \quad (3)$$

где σ , м/с² — среднее квадратическое отклонение реализации ВА процесса; v , с²/м — параметр ХФ. Поскольку процессы, распределённые по нормальному закону, имеют чётную функцию плотности вероятности, то для анализа достаточно рассматривать значения модуля ХФ на интервале от 0 до v . Площадь под кривой модуля ХФ найдём из выражения:

$$S_0 = \int_0^v \exp\left(\frac{-\sigma^2 v^2}{2}\right) dv. \quad (4)$$

Далее воспользуемся интегралом вероятности вида

$$\Phi(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t e^{-t^2} dt \quad (5)$$

и произведём замену переменной:

$$t = \frac{\sigma v}{\sqrt{2}}, \quad dt = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} dv, \quad dv = \frac{\sqrt{2} dt}{\sigma},$$

при $v = 1, \quad t = \frac{\sigma}{\sqrt{2}}.$ (6)

Подставляем (6) в (4) и получим оценку площади кривой модуля ХФ на интервале от 0 до v :

$$S_0 = \frac{\sqrt{2}}{\sigma} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \exp(-t^2) dt,$$

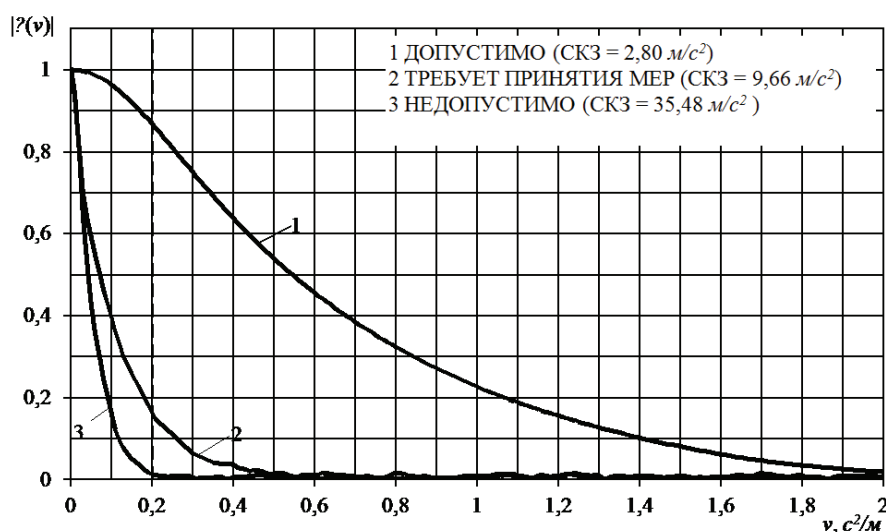


Рис. 1. Модули ХФ ВА сигналов нагнетательных клапанов поршневого компрессора для трёх состояний

где

$$\operatorname{erf}(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \exp(-t^2) dt = 1 - \frac{e^{-t^2}}{t\sqrt{\pi}} \times \left[1 - \frac{1}{2t^2} + \frac{1 \cdot 3}{2^2 t^4} - \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2^3 t^6} + \dots \right] = 1.$$

В итоге получаем выражение для площади на интервале от 0 до v :

$$S_0 = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{\sigma}. \quad (7)$$

Таким образом, величина площади под кривой модуля ХФ обратно пропорциональна СКЗ с коэффициентом $\sqrt{\pi/2}$. Этот замечательный факт, во-первых, показывает взаимосвязь площади под кривой модуля ХФ ВА сигнала и технического состояния объекта контроля, поскольку, как известно [2, 8], вибрационное состояние или, другими словами, техническое состояние машин и механизмов ухудшается с увеличением величины СКЗ параметров виброакустических колебаний. Здесь следует заметить, что в межгосударственном стандарте [2] под параметрами виброакустических колебаний понимается перемещение, скорость и ускорение на корпусах подшипников в радиальном направлении. А в национальном стандарте РФ [8] оценку вибрационного состояния оборудования осуществляют на основе совместных измерений перемещения, скорости и ускорения на корпусах узлов, механизмов компрессора или корпусе компрессора в направлении максимума вектора вибрации. Во-вторых, величина площади под кривой модуля ХФ ВА сигнала устремляется не к бесконечности, а в пределе стремится к значению, близкому к нулю, что значительно ограничивает диапазон нормированных значений, определяющих различные виды вибросостояния объекта контроля.

Одним из подходов к диагностированию поршневых машин, и в частности поршневых компрессоров, является анализ параметров ВА колебаний на определенных интервалах времени по углу поворота вала [8, 24]. Идея диагностирования основывается на простой закономерности механики — в механизмах периодического действия определенные процессы и взаимодействия узлов и деталей происходят в определённые моменты времени, которые привязаны к периодам действия или цикла машины. Последовательность таких взаимодействий и про-

цессов описывают с помощью циклограммы. Таким образом, в двигателях внутреннего сгорания описывают функционирование газораспределительного механизма, процессы сгорания по цилиндрам, процессы топливоподачи в карбюраторных и дизельных двигателях. При этом начало и длительность процессов определяются с точностью до долей и единиц градусов по углу поворота коленчатого вала.

В поршневых компрессорах с самодействующими выпускными и выпускными (нагнетательными) клапанами циклограмма работы компрессора описывается с точностью до единиц градусов по углу поворота вала, а наступления моментов достижения поршня верхней или нижней мёртвых точек — с точностью до долей градуса (рис. 2). Любое отклонение от таких реперных точек свидетельствует о нарушениях в работе механизмов. Естественно привязать и виброактивность отдельных узлов и процессов к таким моментам и интервалам по углу поворота вала. При этом моменты открытия клапанов рассчитываются на этапе проектирования компрессоров и в общем случае могут изменяться в процессе эксплуатации и регулирования их производительности.

Приняты следующие обозначения и последовательность интервалов анализа виброакустического сигнала (рис. 2) [8, 24, 28]:

- *Asv1* — в момент открытия 1-го (ближнего к крышке) впускного клапана (suction valve);
- *Asv2* — в момент открытия 2-го (ближнего к крейцкопфу) впускного клапана;
- *Apv1* — в момент открытия 1-го (ближнего к крышке) нагнетательного клапана (pressure valve);
- *Apv2* — в момент открытия 2-го (ближнего к крейцкопфу) нагнетательного клапана;
- *Atd1* — после верхней мёртвой точки (top dead center);
- *Atd2* — до верхней мёртвой точки;
- *Abd1* — до нижней мёртвой точки (bottom dead center);
- *Abd2* — после нижней мёртвой точки.

Обычно ухудшение вибросостояния характеризуется увеличением величин параметров вибрации [2, 3, 7, 8]. В данном случае распределения величин диагностических признаков таково, что, как показывает формула (7), ухудшение состояния характеризуется уменьшением величины контролируемого параметра виброакустического сигнала.

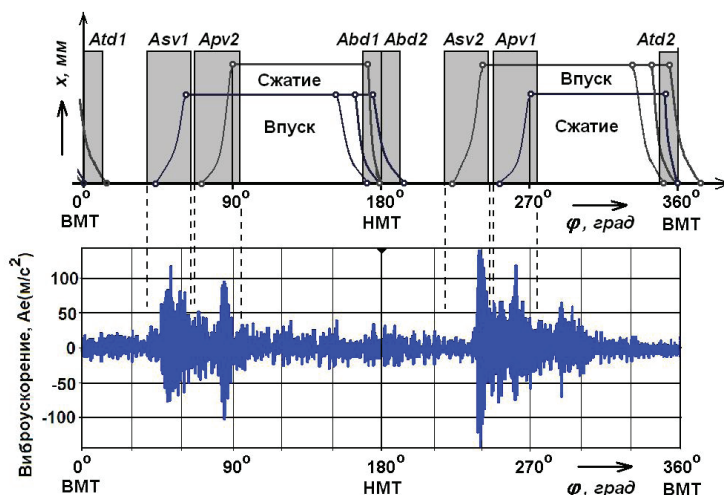


Рис. 2. Циклограмма

Основная задача теории вероятностно-статистических методов принятия решений формулируется следующим образом: необходимо выбрать величину x_0 некоего параметра x , который является диагностическим признаком неисправности и характеризует состояние объекта таким образом, что при $x < x_0$ следует принимать решение о наличии неисправности — параметр x принадлежит области D_2 неисправных состояний, а при $x > x_0$ допускать дальнейшую эксплуатацию и считать объект исправным — параметр x находится в области D_1 исправных состояний. Тогда указанное решающее правило означает:

$$\begin{aligned} x \in D_1 & \text{ при } x > x_0, \\ x \in D_2 & \text{ при } x < x_0. \end{aligned} \quad (8)$$

Области исправного (D_1) и неисправного (D_2) состояний пересекаются, поэтому принципиально невозможно выбрать значение x_0 , при котором не было бы ошибочных решений. Задача состоит в том, чтобы выбор x_0 был в некотором смысле оптимальным, например, давал бы или наименьшую вероятность ошибочного решения, или минимальную вероятность ложной тревоги при заданной вероятности пропуска неисправного состояния, или наоборот.

Возможными ошибками при принятии решений являются: ложная тревога (ошибка первого рода): исправный объект признается неисправным (вместо D_1 считают, что имеет место D_2), и пропуска неисправности (ошибка второго рода): объект, имеющий неисправность, признается исправным (вместо D_2 признается D_1).

Обозначим через H_{ij} ($ij = 1, 2$) возможные решения по правилу (гипотезы), где индекс i соответствует принятому диагнозу, j — действительному диагнозу. Тогда:

- H_{21} — ложная тревога (ошибка первого рода);
- H_{12} — пропуск неисправности (ошибка второго рода);
- H_{11} — правильный диагноз (исправное состояние);
- H_{22} — правильный диагноз (неисправное состояние).

Для нашего случая вероятность ложной тревоги $P(H_{21}) = P_{ЛТ}$ равна вероятности произведения двух событий: наличия исправного состояния и значения $x < x_0$ для исправного состояния и определяется как

$$\begin{aligned} P_{ЛТ} &= P(D_1) \cdot P(x < x_0 | D_1) = \\ &= P_1 \cdot \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_1) dx = P_1 \cdot [1 - F(x_0/D_1)], \end{aligned} \quad (9)$$

а вероятность пропуска неисправности $P(H_{12}) = P_{ПА}$:

$$\begin{aligned} P_{ПА} &= P(D_2) \cdot P(x > x_0 | D_2) = \\ &= P_2 \cdot \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_2) dx = P_2 \cdot F(x_0/D_2). \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь $f(x/D_1)$ и $f(x/D_2)$ — соответственно плотности вероятностей для исправного и неисправного состояний; диагнозы D_1 и D_2 соответствуют исправному и неисправному состояниям объекта; $P_1 = P(D_1)$ и $P_2 = P(D_2)$ — априорные вероятности соответственно диагнозов D_1 и D_2 , которые считаются известными на основании предварительных статистических данных: в данном случае это вероятности

исправного и неисправного состояний при наличии признака x заданной величины [26, 35]; $F(x_0/D_1)$ — вероятность исправного состояния на интервале от $-\infty$ до x_0 ; $F(x_0/D_2)$ — вероятность неисправного состояния на интервале от x_0 до ∞ .

Вероятность принятия ошибочного решения есть сумма вероятностей ложной тревоги и пропуска неисправного состояния. Если приписать «цены» этим ошибкам и принять, что цены правильных решений есть C_{11} и C_{22} , то получим выражение для среднего риска (ожидаемая величина потери) [26, 34, 35] для нашего случая:

$$\begin{aligned} R &= C_{11}P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_1) dx + C_{21}P_1 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_1) dx + \\ &+ C_{12}P_2 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_2) dx + C_{22}P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_2) dx, \end{aligned} \quad (11)$$

где C_{21} — цена ложной тревоги; C_{12} — цена пропуска неисправности (первый индекс — принятое состояние, второе — действительное), обычно $C_{12} \gg C_{21}$.

С учётом «цен» правильных решений $C_{11} = C_{22} = 0$ получается выражение для среднего риска:

$$\begin{aligned} R &= C_{12}P_{ПА} + C_{21}P_{ЛТ} = \\ &= C_{12}P_2[F(x_0/D_2)] + C_{21}P_1[1 - F(x_0/D_1)]. \end{aligned} \quad (12)$$

Методы вероятностно-статистических решений, такие как методы минимального риска, минимального числа ошибочных решений, минимакса, Неймана — Пирсона, наибольшего правдоподобия, позволяют выбрать решающее правило исходя из условий оптимальности, например, из условия минимального риска, минимизация одной из ошибок постановки диагноза при заданном уровне другой.

Отношение

$$\frac{f(x/D_1)}{f(x/D_2)} = \lambda \quad (13)$$

является *отношением правдоподобия* [35, 36]. В теории обнаружения сигналов решение принимается в виде

$$\lambda > \frac{(C_{12} - C_{22})P_2}{(C_{21} - C_{11})P_1} = \lambda_0 \quad (14)$$

и решение задачи обнаружения сигнала (в нашем случае заданного состояния объекта по величине диагностического признака) сводится к нахождению отношения правдоподобия по текущему измерению и сравнению его значения с постоянным пороговым значением λ_0 , зависящим от априорных вероятностей P_1 и P_2 [26, 34, 35].

Метод *минимакса* используется в ситуации, когда предварительные статистические сведения о вероятности диагнозов D_1 и D_2 отсутствуют. Рассматривается «наихудший случай», т.е. наименее благоприятные значения P_1 и P_2 , (при этом $P_2 = 1 - P_1$) приводящие к минимизации максимального риска [26, 35, 36]:

$$x \in D_1, \text{ если } \frac{C_{21}(1 - F(x/D_1))}{C_{12}F(x/D_2)} > 1, \quad (15)$$

$$x \in D_2, \text{ если } \frac{C_{21}(1 - F(x/D_1))}{C_{12}F(x/D_2)} < 1. \quad (16)$$

По методу *Неймана–Пирсона* обычно минимизируется вероятность пропуска неисправного состояния при заданном допустимом уровне вероятности ложной тревоги [26, 35, 36].

Для нашего случая

$$P_{ЛТ} = P_1 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_1) dx \leq A, \quad (17)$$

где $P_{ЛТ}$ — вероятность ложной тревоги; A — заданная допустимая величина вероятности ложной тревоги; P_1 — вероятность исправного состояния; $f(x/D_1)$ — плотность вероятности диагноза D_1 при величине диагностического признака, равной x ; x_0 — величина диагностического признака при минимальной вероятности пропуска состояния.

Практический анализ параметров ХФ основывается на экспериментальных данных, полученных с реальных поршневых компрессоров, компримирующих водородсодержащий газ на одном из нефтеперерабатывающих заводов России. В течение промежутка времени от текущего ремонта до среднего ремонта сохранялись сигналы с виброакселерометров, установленных на впускных и нагнетательных клапанах компрессоров. В процессе эксплуатации при техническом обслуживании некоторые клапаны заменялись на исправные и работоспособные. Для анализа были выбраны сигналы, полученные в моменты времени перед остановкой компрессора для замены клапанов и за некоторое время до этого при увеличении уровня вибрации. В процессе обработки из каждой временной реализации виброакустического сигнала сохранялись оцифрованные значения сигналов на заданных интервалах по углу поворота вала, которые соответствовали $Asv1$, $Asv2$, $Apr1$, $Apr2$. При этом, поскольку каждый сигнал содержал дискретные значения временной реализации, полученные за пять оборотов вала, фактически сохранялось пять интервалов примерно по 1400 отсчётов из каждого сигнала. Всего для анализа было выбрано 128 сигналов. Расчёт ХФ по каждой реализации показал, что вид ХФ изменяется в достаточно широких пределах (рис. 3).

Предыдущие исследования [18–22, 26] позволяют сделать вывод о том, что сигналы принадлежат трём группам состояний: недопустимо (НДП), требует принятия мер (ТПМ), допустимо («Доп») [2, 8]. Для каждого интервала $Asv1$, $Asv2$, $Apr1$, $Apr2$ по-

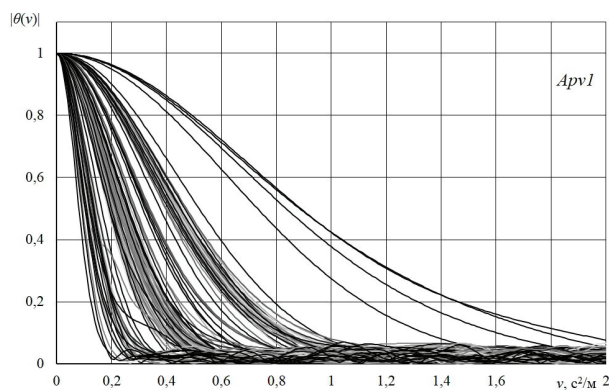


Рис. 3. Модули ХФ виброакустических сигналов на интервале $Apr1$

строены гистограммы распределения мгновенных значений сигнала, анализ которых позволил выделить три группы состояний (НДП, ТПМ, «Доп») контролируемых узлов (рис. 4). На основе полученных экспериментальных данных рассчитаны эмпирические и, путём аппроксимации двухпараметрическим законом Вейбулла–Гнеденко, параметры теоретических функций распределения вероятностей, их плотности вероятности [39].

В частности, функции распределения вероятностей площади S_0 под кривой модуля ХФ для интервала $Apr1$ (нагнетательные клапаны) и плотности вероятности соответственно получены в следующем виде (рис. 5):

для состояния НДП:

$$F(S_0) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{S_0}{0,19}\right)^{11,3}\right],$$

$$p(S_0) = \frac{11,3}{0,19} \left(\frac{S_0}{0,19}\right)^{10,3} \exp\left[-\left(\frac{S_0}{0,19}\right)^{11,3}\right], \quad (18)$$

для состояния ТПМ:

$$F(S_0) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{S_0}{0,3}\right)^{10,7}\right],$$

$$p(S_0) = \frac{10,7}{0,3} \left(\frac{S_0}{0,3}\right)^{9,7} \exp\left[-\left(\frac{S_0}{0,3}\right)^{10,7}\right], \quad (19)$$

для состояния «Доп»:

$$F(S_0) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{S_0}{0,55}\right)^{4,6}\right],$$

$$p(S_0) = \frac{4,6}{0,55} \left(\frac{S_0}{0,55}\right)^{3,6} \exp\left[-\left(\frac{S_0}{0,55}\right)^{4,6}\right]. \quad (20)$$

В процессе аппроксимации мера Линдера лежала в диапазоне от 0,97 до 0,99, что подтверждает достоверность аппроксимации законом Вейбулла–Гнеденко.

Из графиков (рис. 5) видно, что диапазоны признака, соответствующие состояниям НДП и ТПМ, выделяются достаточно явно в виде многомодального набора данных. Это подтверждает существовавшую на тот момент проблему с впускными клапанами, которые работали с перегрузкой и их вибросостояние было весьма далеко от благоприят-

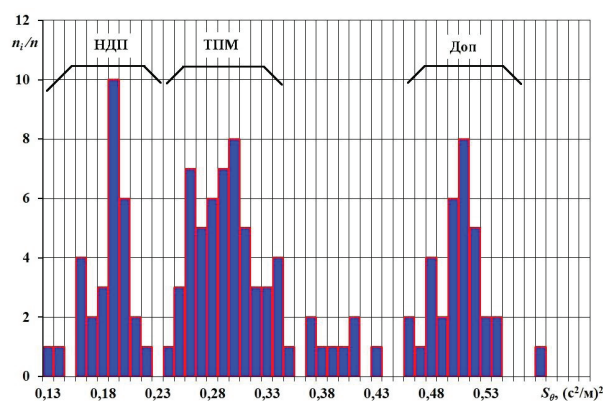


Рис. 4. Гистограмма распределения величин площади ХФ S_0 для интервала $Apr1$

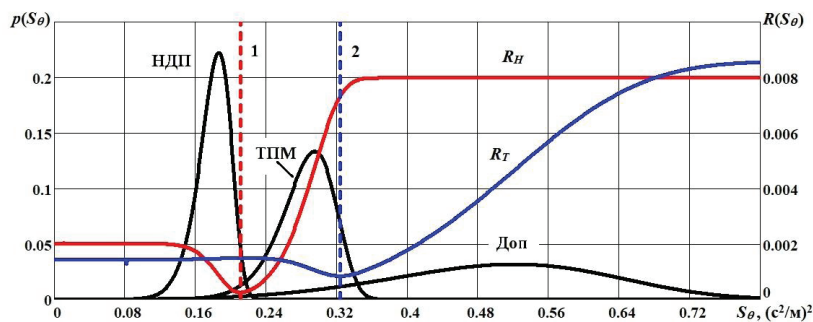


Рис. 5. Плотности вероятности величин площади ХФ S_0 для интервала $Arv1$, функции риска принятия решений для состояний НДП и ТПМ R_H для состояний ТПМ и «Доп» R_T , рассчитанные методом минимакса и соответствующие минимуму риска граничные значения признаков 1 и 2

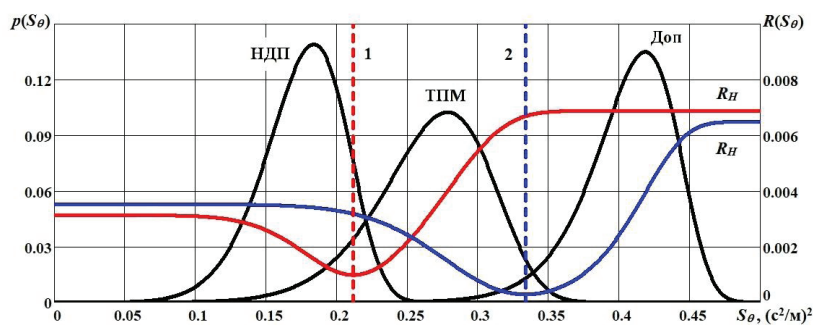


Рис. 6. Плотности вероятности величин площади ХФ S_0 для интервала $Asv2$, функции риска принятия решений для состояний НДП и ТПМ R_H для состояний ТПМ и «Доп» R_T , рассчитанные методом минимакса и соответствующие минимуму риска граничные значения признаков 1 и 2

ного. Количество сигналов, полученных для случая работы клапанов в нормальном режиме («Доп»), оказалось достаточно мало и диапазон состояний клапанов в нормальном режиме эксплуатации оказался достаточно широк. Поэтому график плотностей вероятности имеет весьма плоский вид (рис. 5).

Для нагнетательных клапанов ситуация оказалась аналогичной впускным (рис. 6) — на графиках плотностей вероятности для интервала $Asv2$ явно выделяются признаки для состояний НДП и ТПМ. В то же время диагностический признак имел гораздо более узкий диапазон для нагнетательных клапанов, работающих в состоянии допустимо («Доп») по сравнению с впускными клапанами.

Определение граничных значений признаков методами вероятностно-статистических методов принятия решений [20, 24, 26, 27, 32] позволяет получить величины признаков, которые разделяют состояния объекта контроля. При этом производится оценка вероятностей ложной тревоги и пропуска заданного состояния, а также риски принятия решений. Учитывая, что количественная оценка рисков связана с сутью объекта контроля и фактически зависит от стоимости ремонта и стоимости потерь от его недоиспользования, в данном случае условно стоимости ложной тревоги C_{21} и пропуска неисправности C_{12} равны единице и величина риска численно изменяется от нуля до единицы. По методу минимакса априорные вероятности диагнозов в состоянии ТПМ (P_1) и НДП (P_2) или диагнозов «Доп» (P_1) и ТПМ (P_2) уточняются в процессе расчётов таким образом, чтобы при наименее благоприятных значениях P_1 потери, связанные с ошибочными решениями, были бы минимальными. При

расчётах методом Неймана—Пирсона априорные вероятности приняты равными $P_1=0,97$ и $P_2=0,03$, а заданная допустимая величина вероятности ложной тревоги A принималась менее P_2 .

При использовании минимаксного метода путём анализа отношения правдоподобия (15), (16) и минимизации максимального риска уточнены величины P_1 и P_2 . Затем, согласно (12), рассчитан локальный минимум среднего риска принятия ошибочного решения. Примеры графиков среднего риска R_H определения состояния между ТПМ и НДП приведены на рис. 5 и 6. Там же приведены кривые рисков принятия решения R_T при выборе состояний между «Доп» и ТПМ. На графиках можно выделить локальные минимумы функций, которые и будут соответствовать минимумам вероятностей и рисков принятия ошибочных решений. Величины S_0 , соответствующие минимумам функций риска, являются граничными значениями, которые разделяют состояния ТПМ и НДП или состояния «Доп» и ТПМ.

Аналогичные расчёты по определению граничных значений для интервалов $Asv1$, $Asv2$, $Arv1$, $Arv2$ проведены с использованием метода Неймана—Пирсона. На рис. 7 и 8 приведены примеры результатов расчёта для интервалов $Arv2$ и $Asv1$. Критерием выбора граничной величины, разделяющей состояния объекта контроля, принято минимальное значение риска пропуска неисправности при заданной величине ложной тревоги.

Анализ полученных результатов обработки экспериментальных данных (табл. 1) показывает, что величины граничного значения признака (площади ХФ S_0), которые разделяют состояния ТПМ и НДП, как для различных впускных клапанов, так

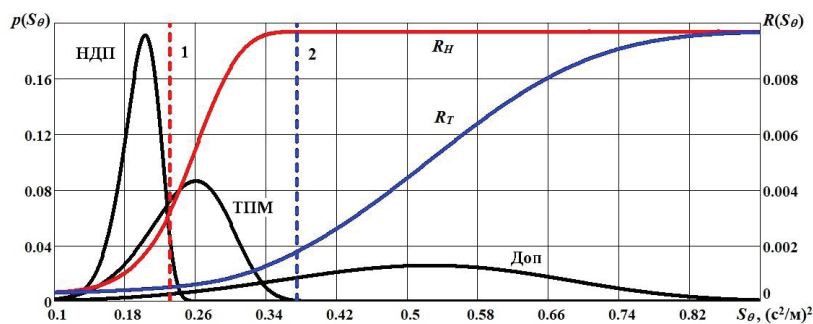


Рис. 7. Плотности вероятности величин площади ХФ S_0 для интервала $Arv2$, функции риска принятия решений для состояний HDI и TPI R_H для состояний TPI и «Доп» R_T , рассчитанные методом Неймана–Пирсона и соответствующие заданному риску пропуска состояния граничные значения признаков 1 и 2

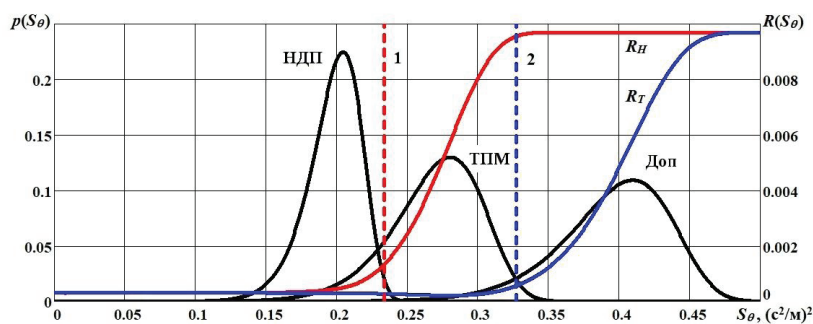


Рис. 8. Плотности вероятности величин площади ХФ S_0 для интервала $Asv1$, функции риска принятия решений для состояний HDI и TPI R_H для состояний TPI и «Доп» R_T , рассчитанные методом Неймана–Пирсона и соответствующие заданному риску пропуска состояния граничные значения признаков 1 и 2

Таблица 1

Результаты расчётов величины граничных значений площади ХФ S_0

Параметр	Метод	TPI и HDI				«Доп» и TPI			
		S_0	$P(H_{21}) \times 10^{-4}$	$P(H_{12}) \times 10^{-4}$	$R \times 10^{-4}$	S_0	$P(H_{21}) \times 10^{-4}$	$P(H_{12}) \times 10^{-4}$	$R \times 10^{-4}$
$Arv1$	Минимакса	0,21	1,9	0,5	2,4	0,32	7,2	1,2	8,4
	Неймана – Пирсона	0,23	7,1	10^{-5}	7,1	0,4	20	10^{-11}	20
$Arv2$	Минимакса	0,21	16	5,5	22	0,31	7,3	1,8	9,1
	Неймана – Пирсона	0,23	32	10^{-2}	32	0,38	19	10^{-3}	18
$Arv1 + Arv2$	Минимакса	0,22	6,8	2,6	9,3	0,29	5,1	0,77	5,9
	Неймана – Пирсона	0,23	13	0,09	13	0,35	14	10^{-10}	14
$Asv1$	Минимакса	0,22	6,4	1,9	8,3	0,32	3,0	1,1	4,1
	Неймана – Пирсона	0,23	13	10^{-2}	13	0,33	5,5	0,05	5,6
$Asv2$	Минимакса	0,21	6,7	3,1	9,8	0,33	1,8	0,98	2,8
	Неймана – Пирсона	0,22	14	0,09	15	0,33	2,6	0,09	2,7
$Asv1 + Asv2$	Минимакса	0,22	5,7	3,0	8,6	0,31	8,3	3,1	11
	Неймана – Пирсона	0,23	13	0,09	13	0,32	16	0,09	16
$Arv + Asv$	Минимакса	0,23	6,8	3,8	11	0,35	3,1	0,12	3,2
	Неймана – Пирсона	0,24	18	0,09	18	0,38	25	10^{-5}	25

и для различных нагнетательных клапанов на одном компрессоре, так и для впускных и нагнетательных клапанов совместно, отличаются менее чем на 10 %. С учётом технологического процесса комприми-

рования водородсодержащего газа, например, на установках гидроочистки бензина, дизельных топлив, такой разброс граничного значения признака является вполне допустимым. Величины граничного

признака, разделяющего состояния ТПМ и «Доп» для совокупности всех данных, отличаются не более чем на 20 %. Для оценки этих видов состояний такой разброс также является приемлемым. Учитывая, что в ГОСТ 56233 граничные величины квантилей виброускорения на интервалах A_{rv} и A_{sv} для одного типоразмера машин, разделяющие состояния ТПМ и НДП, отличаются более чем на 20 %. Полученные данные позволяют установить единую величину граничного значения признака S_0 для всех типов клапанов. Выборочный анализ сигналов, полученных с клапанов различных типоразмеров машин, показал, что полученные граничные значения площади под кривой ХФ совпадают и для различных типов машин.

Выводы. В результате проведенных исследований показано, что величина площади под кривой модуля характеристической функции мгновенных значений виброакустического сигнала обратно пропорциональна среднему квадратическому значению виброакустического сигнала с известным коэффициентом. Вероятностно-статистический анализ величины площади под кривой модуля ХФ ВА сигналов с датчиков, установленных на клапанах поршневого компрессора, на заданных интервалах по углу поворота коленчатого вала показал, что граничное значение может иметь одну величину площади для разделения таких состояний клапанов, как ТПМ и НДП, допустимо и ТПМ, независимо от типа клапанов. Оценка вероятностей пропуска неисправного состояния и вероятности ложной тревоги, полученные методом минимакса и методом Неймана–Пирсона, риск принятия ошибочного решения не превышают единицы 10^{-4} . Следует заметить, что как указанные признаки — площади под кривой модуля характеристической функции мгновенных значений виброакустического сигнала на заданных интервалах по углу поворота коленчатого вала поршневого компрессора, так и оценки вероятностей пропуска неисправного состояния, вероятности ложной тревоги, риска ошибочного принятия решения получены авторами впервые в мировой практике технической диагностики поршневых машин.

Библиографический список

1. ГОСТ 24346–80 (СТ СЭВ 1926-79). Вибрация. Термины и определения. Введ. 1981–01–01. М.: Изд-во стандартов, 1980. 26 с.
2. ГОСТ 32106–2013. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов. Введ. 2014–11–01. М.: Стандартинформ, 2019. 5 с.
3. Randall R. B. *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Automotive and Aerospace Applications*. West Sussex: Wiley, 2011. 308 p. ISBN 0470747854.
4. Goyal D., Pabla B. S. *The Vibration Monitoring Methods and Signal Processing Techniques for Structural Health Monitoring: A Review* // Archives of Computational Methods in Engineering. 2016. Vol. 23 (4). P. 585–594. DOI: 10.1007/s11831-015-9145-0.
5. Juan P. A-S., Hojjat A. *Signal Processing Techniques for Vibration-Based Health Monitoring of Smart Structures* // Archives of Computational Methods in Engineering. 2016. Vol. 23 (1). P. 1–15. DOI: 10.1007/s11831-014-9135-7.
6. Сизарёв В. Д., Соколова А. Г., Балицкий Ф. Я. *Вероятностные методы анализа вибрационных сигналов для оценки технического состояния роторных машин на примере подвижного отражателя исследовательского ядерного реактора ИБР-2* // Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций. 2015. С. 81–90.
7. Cajas M., Franco D., Torres D. [et al.]. *Adquisición de secales acústicas y de vibración para el diagnóstico de fallos en un compresor reciprocante de doble etapa*. Cuenca — Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, 2018. 219 p.
8. ГОСТ Р 56233–2014. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация стационарных поршневых компрессоров. Введ. 2015–12–01. М.: Стандартинформ, 2015. 19 с.
9. Kostyukov V. N., Naumenko A. P. *Standardization in the sphere of vibrodiagnostic monitoring of piston compressors* // Procedia Engineering. 2015, Vol. 113. P. 370–380. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.290.
10. Rossi G. *Vibration analysis for reciprocating compressors* // ORBIT magazine. 2012. Vol. 32 (2). P. 10–15.
11. Костюков В. Н., Науменко А. П., Бойченко С. Н., Кудрявцева И. С. *Методические основы оценки пиковых значений параметров виброакустических сигналов* // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 1. С. 51–58.
12. Науменко А. П., Кудрявцева И. С., Одинец А. И. *Оценка пиковых значений параметров колебательных процессов* // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6, № 4. С. 47–52. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-4-47-52.
13. Tran V. T., Thobiani F. Al., Ball A. D. *An approach to fault diagnosis of reciprocating compressor valves using Teager–Kaiser energy operator and deep belief networks* // Expert Syst. Appl. 2014. Vol. 41 (9). P. 4113–4122. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.12.026.
14. Ahmed M., Baqqar M., Gu F. [et al.]. *Fault detection and diagnosis using Principal Component Analysis of vibration data from a reciprocating compressor* // Proceedings of 2012 UKACC International Conference on Control. 2012. P. 461–466. DOI: 10.1109/CONTROL.2012.6334674.
15. Smith A., Gu F., Ball A. D. *An Approach to Reducing Input Parameter Volume for Fault Classifiers* // International Journal of Automation and Computing. April. 2019. Vol. 16 (2). P. 199–212. DOI: 10.1007/s11633-018-1162-7.
16. Соколова А. Г., Балицкий Ф. Я., Иванова М. А. *Использование взаимно-регрессионных функций и других характеристик стохастической связи вибрационных процессов в диагностике роторных машин* // Вестник научно-технического развития. 2018. № 8 (132). С. 27–42. DOI: 10.18411/vntr2018-132-4.
17. Соколова А. Г., Балицкий Ф. Я., Марков В. В. [и др.]. *Использование полных спектров и других двумерных виброхарактеристик в диагностике компрессорного оборудования* // Контроль. Диагностика. 2016. № 8. С. 4–14. DOI: 10.14489/td.2016.08.pp.004-014.
18. Пат. 2610366 Российская Федерация, МПК F04B 51/00, G01M 15/00. *Способ диагностики технического состояния машин по косвенным признакам* / Костюков В. Н., Науменко А. П., Бойченко С. Н., Костюков А. В. № 2016100461; заявл. 11.01.2016; опубл. 09.02.2017, Бюл. № 4.
19. Kostyukov V. N., Naumenko A. P., Kudryavtseva I. S. *Usage of characteristic function as informative diagnostic feature* // Procedia Engineering. 2016. Vol. 152 (201). P. 521–526. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.649.
20. Kostyukov V. N., Naumenko A. P., Kudryavtseva I. S., Boychenko S. N. *Formation of diagnostic features vector based on characteristic function of vibroacoustic signal* // Proc. in 13th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies (CM2016 / MFPT2016), 10–12 October 2016. France, Charenton-le-Pont. 2016. P. 171–181. DOI: 10.14489/td.2016.08.pp.022-029.
21. Kostyukov V. N., Naumenko A. P., Kudryavtseva I. S. *Assessment of characteristic function modulus of vibroacoustic signal given a limit state parameter of diagnosed equipment* // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. 2017. Vol. 5. P. 239–244. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-4-239-244.

22. Костюков В. Н., Науменко А. П., Кудрявцева И. С., Бойченко С. Н. Формирование вектора диагностических признаков на основе характеристической функции виброакустического сигнала // *Контроль. Диагностика*. 2016. № 8. С. 22–29. DOI: 10.14489/td.2016.08.pp.022-029.
23. Костюков В. Н., Науменко А. П., Сидоренко И. С. Использование характеристической функции для диагностики поршневых машин // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2009. № 2. С. 32–35.
24. Вешкурцев Ю. М. Прикладной анализ характеристической функции случайных процессов: моногр. М.: Радио и связь, 2003. 204 с.
25. Кудрявцева И. С., Науменко А. П., Одинец А. И., Барданов В. Е. Новые диагностические признаки технического состояния поршневых компрессоров на основе характеристической функции виброакустического сигнала // *Проблемы машиноведения: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. В 2-х ч. / науч. ред. П. Д. Балакин*. 2019. Ч. 2. С. 207–214.
26. Костюков В. Н., Науменко А. П., Кудрявцева И. С. Диагностика подшипников качения по параметрам характеристической функции // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2014. № 4. С. 142–145.
27. Костюков В. Н., Науменко А. П., Кудрявцева И. С. Оценка модуля характеристической функции виброакустического сигнала при заданном параметре для предельных состояний объекта диагностирования // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2017. Т. 5, № 4. С. 239–244. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-4-239-244.
28. Кудрявцева И. С., Науменко А. П. Оценка количественных критериев параметров характеристической функции для различных состояний объекта диагностирования // *Наука, образование, бизнес: материалы Междунар. науч.-практ. конф.* 2016. С. 193–209.
29. Пат. 2514119 Российская Федерация, МПК G01M 7/02, G01M 13/04. Способ вибродиагностики механизмов по характеристической функции вибрации / Костюков В. Н., Науменко А. П., Бойченко С. Н., Кудрявцева И. С. № 2012100600/28; заявл. 10.01.2012; опублик. 20.07.2013, Бюл. № 20.
30. Пат. 2517772 Российская Федерация, МПК G01M 7/02. Способ вибродиагностики механизмов по характеристической функции вибрации / Костюков В. Н., Кудрявцева И. С., Науменко А. П., Бойченко С. Н. № 2012143962/28; заявл. 15.10.2012; опублик. 27.05.2014, Бюл. № 15.
31. Костюков В. Н., Науменко А. П. Решения проблем безопасной эксплуатации поршневых машин // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2009. № 3. С. 27–36.
32. Науменко А. П. Виброакустическая модель диагностического сигнала поршневого компрессора // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2009. № 2. С. 39–44.
33. Науменко А. П. Методология виброакустической диагностики поршневых машин // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. выпуск «Двигатели внутреннего сгорания»*. 2007. С. 85–94.
34. Науменко А. П. Исследование виброакустических параметров поршневых машин // *Двигатель — 2007: сб. науч. тр.* 2007. С. 518–525.
35. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.
36. Харкевич А. А. Борьба с помехами. Изд. 3-е. М.: URSS: Либроком, сор, 2008. 274 с. ISBN 978-5-397-00385-8.
37. Биргер И. А. Техническая диагностика. Изд. 2-е. М.: URSS: ЛЕНАНД, сор, 2018. 238 с.
38. Кудрявцева И. С. Методика оценки статистических свойств характеристических функций // *Омский научный вестник*. 2016. № 5 (149). С. 121–124.

КУДРЯВЦЕВА Ирина Сергеевна, аспирантка кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» (РТУ и СД).

SPIN-код: 5117-9041

AuthorID (РИНЦ): 797354

ORCID: 0000-0003-1627-667X

Адрес для переписки: kudryavtseva.irina.omsk@gmail.com

НАУМЕНКО Александр Петрович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры РТУ и СД.

SPIN-код: 2568-5406

AuthorID (SCOPUS) 24071616500

ORCID: 0000-0002-0583-7809

ResearcherID: P-4589-2015

Адрес для переписки: alexpnb1@mail.ru

ДЕМИН Александр Михайлович, старший преподаватель кафедры «Химическая технология».

Адрес для переписки: demin_a_m@mail.ru

Для цитирования

Кудрявцева И. С., Науменко А. П., Демин А. М. Критерии оценки вибросостояния объектов по параметрам характеристической функции сигнала // *Омский научный вестник*. 2019. № 4 (166). С. 97–105. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-97-105.

Статья поступила в редакцию 17.06.2019 г.

© И. С. Кудрявцева, А. П. Науменко, А. М. Демин