

РАСПОЗНАВАНИЕ ЗАРОЖДАЮЩИХСЯ ДЕФЕКТОВ В УЗЛАХ КОРАБЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШАЮЩИХ ПРАВИЛ

© 2019 г. В.С. Давыдов¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ),
Россия 197022 Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, корп. 5
E-mail: reglament-spb@mail.ru

Поступила в редакцию 03.07.2018; после доработки 26.10.2018;
принята к публикации 23.11.2018

Разработан метод диагностики зарождающихся дефектов корабельных механизмов в процессе вибродиагностирования на основе результатов исследования статистических свойств диагностических признаков в виброакустических сигналах корабельных механизмов и принципов теории распознавания образов. Получены следующие прикладные решения задачи: алгоритм построения эталонов многомерных признаков пространств, выделяемых в виброакустических сигналах и характеризующих зарождающиеся дефекты механизмов для различных режимов их работы (состояний), в виде условных многомерных плотностей вероятностей; оптимальное решающее правило распознавания неисправностей — зарождающихся дефектов и исправных состояний механизмов с учетом изменения размерности признаков пространств. Экспериментальная проверка разработанного метода выполнена при проведении стендовых виброакустических и натурных испытаний корабельных механизмов.

Ключевые слова: вибродиагностика, виброакустический сигнал, зарождающиеся дефекты, многомерные признаковые пространства, энергетический спектр, состояние механизмов.

DOI:10.1134/S0130308219030047

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для безопасности мореплавания чрезвычайно важна безаварийная эксплуатация корабельных механизмов. Для ее обеспечения надо повышать надежность основных элементов механического оборудования и степень безаварийности корабельных установок. Вероятность безотказной работы корабельного оборудования (насосов, электродвигателей, электроприводов, аппаратуры с электромагнитным приводом, автоматических регуляторов и др.) находится главным образом в пределах 0,70—0,96 %. Очень важно обнаруживать дефекты на ранней стадии их развития, не дожидаясь выхода из строя корабельного оборудования. Своевременное распознавание зарождающихся и развивающихся дефектов оборудования приобретает особо важное значение для корабельных механизмов. Наибольшая роль в их поиске отводится вибродиагностике.

Зарождающиеся эксплуатационные дефекты проявляются в основном в резонансных зонах механической системы на высоких частотах вибрации (2—20 кГц и выше) [1]. Эти дефекты, как правило, вызывают формирование модулированных виброакустических сигналов. Возникают амплитудная и угловая модуляции. Для использования модулированных сигналов с целью диагностики неисправностей требуется измерять статистические характеристики выше второго порядка, информация о них в более удобной для практики форме может быть получена путем анализа огибающей вибрационных ускорений [2]. С этой целью виброакустический сигнал отфильтровывается, как правило, в третьоктавном фильтре, детектируется для выделения огибающей измеряемого виброакустического сигнала и анализируется его спектральный состав. В энергетическом спектре $G(\omega)$ огибающих модулированных процессов наблюдаются дискретные составляющие G_j , амплитуды которых пропорциональны коэффициентам модуляции m_j (рис. 1) [1, 2].

Возникновение дефектов вызывает изменение коэффициентов модуляции m_j , а, следовательно, и G_j и появ-

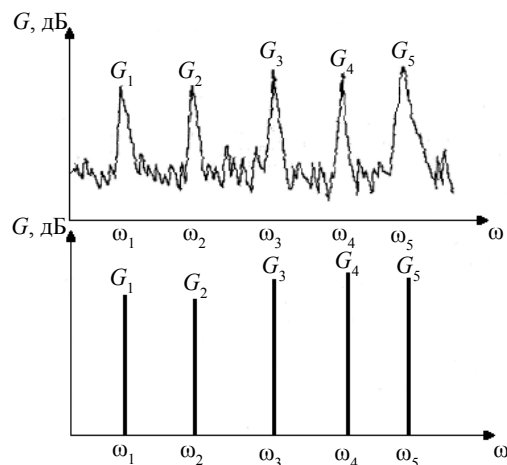


Рис. 1. Усредненный энергетический спектр огибающей виброакустического сигнала (в логарифмическом масштабе). В нижней части рисунка представлены существующие дискретные составляющие, выделенные в этом спектре.

ление новых дискретных составляющих в спектрах $G(\omega)$. Часто одному дефекту нельзя поставить в соответствие одну дискретную составляющую. Поэтому для диагностики энергетического оборудования требуется использовать многомерные признаковые пространства.

В вибродиагностике разработано немало различных методов и способов [7—12], их обзор широко представлен в монографии А.А. Равина [6]. Однако они не решают поставленные задачи вибродиагностирования зарождающихся дефектов механизмов на основе многомерных признаковых пространств по оптимальным решающим правилам.

МЕТОД ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЗАРОЖДАЮЩИХСЯ ДЕФЕКТОВ МЕХАНИЗМОВ НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНЫХ ПРИЗНАКОВЫХ ПРОСТРАНСТВ ПО ОПТИМАЛЬНЫМ РЕШАЮЩИМ ПРАВИЛАМ

Наряду с существенными дискретными составляющими, характеризующими модуляционные процессы в механических системах, наблюдаются небольшие флуктуации, которые не требуется включать в анализируемое признаковое пространство. С этой целью был разработан алгоритм автоматического выделения существенных дискретных составляющих в усредненном энергетическом спектре $G(\omega)$ [3]. Критерием существенности дискретной составляющей является превышение амплитуды $G_{j\max}$ двух ограничивающих ее минимумов пороговой величины A

$$\frac{G_{j\max}}{G_{j-m\min}} > A, \quad \frac{G_{j\max}}{G_{j+n\min}} > A. \quad (1)$$

Анализируются последовательно все экстремумы. В каждой локальной области для выполнения условий (1) ищутся наибольший максимум $G_{j\max}$ (максимум максимум) и ограничивающие его с двух сторон наименьшие минимумы (минимумы минимум) $G_{j-m\min}$, $G_{j+n\min}$. Сравнение экстремумов в виде отношения исключает зависимость принятия решения от изменений коэффициента передачи измерительного тракта. Если энергетический спектр $G(\omega)$ измеряется в децибелах (дБ), то сравнение экстремумов выполняется в виде разности. Точное значение пороговой величины может быть установлено, если известны функции распределения перепадов между существенными максимумами и минимумами.

Тогда априори требуется установить, какие максимумы следует считать существенными, что не всегда возможно в практических случаях. Поэтому часто пороговая величина задается эмпирически и уточняется по результатам правильного диагностирования по оптимальному решающему правилу. С помощью программы на ПЭВМ по данному алгоритму формируется массив выделенных дискретных составляющих в виде их амплитудных значений $\{G_j\}$ и местоположений на оси частот $\{\omega_j\}$.

Для построения оптимальных решающих правил необходимо знать условные плотности вероятностей используемых признаковых пространств для разных состояний диагностируемого оборудования. На основании законов распределения признаков ω_j , G_j с помощью непараметрического критерия Колмогорова — Смирнова установлено, что в общем случае их законы распределения могут иметь любой вид [5]. С помощью критериев ранговой корреляции Спирмэна и коэффициента конкордации доказана взаимная и совместная независимость одномерных значений многомерных величин признаков $\{G_j\}$, $\{\omega_j\}$ [5]. Тогда условные многомерные плотности вероятностей признаковых пространств $\{G_j\}$, $\{\omega_j\}$, построенные для разных i -х состояний (режимов) механизмов, могут быть представлены в виде произведения [5]:

$$f\left(\bigcup_{j=1}^{n_i} \omega_j / \alpha_i\right) = \prod_{j=1}^{n_i} f(\omega_j / \alpha_i); \quad (2)$$

$$f\left(\bigcup_{j=1}^{n_i} G_j / \alpha_i\right) = \prod_{j=1}^{n_i} f(G_j / \alpha_i); \quad (3)$$

$$f\left(\bigcup_{j=1}^{n_i} \omega_j; G_j / \alpha_i\right) = \prod_{j=1}^{n_i} f(\omega_j / \alpha_i) \times f(G_j / \alpha_i). \quad (4)$$

Следовательно, для построения эталонов многомерных признаковых пространств достаточно разделить их на отдельные j -е эталонные области в соответствии с изменяющимися величинами признаков $\{\omega_j\}$ и выполнить аппроксимацию одномерных условных плотностей вероятностей — $f(\omega_j / \alpha_i)$, $f(G_j / \alpha_i)$. При построении эталонов для каждого i -го образа (состояния механизма) объединяются все признаки ω_j на оси ω , полученные в результате многократных измерений усредненных энерге-

тических спектров $G(\omega)$ для данного механизма в i -ом состоянии. На оси ω каждая отдельная j -я область формируется путем объединения близких значений ω_j . Причем число объединенных значений признаков N_j в каждой j -й области не должно превышать размера обучающей выборки $N(N_j \leq N)$.

В результате зарождающихся дефектов появляется неравномерность взаимодействий деталей механизмов, уровень отдельных дискретных составляющих изменяется случайным образом. Это приводит к изменению количества дискретных составляющих, выявляемых в усредненных энергетических спектрах, то есть к изменению размерности признаков пространств $\{\omega_j\}, \{G_j\}$. Поэтому в процессе обучения оцениваются вероятности изменения размерности признаков пространств.

Аппроксимация каждой одномерной плотности вероятностей $f(\omega_j / \alpha_i)$ выполняется по методу Парзена — Розенבלата в пределах своей эталонной области с использованием в качестве ядра аппроксимации кривой Гаусса

$$f(\omega_j / \alpha_i) = \frac{1}{N_{ji} (N_{ji}^{-1/4})} \sum_{k=1}^{N_{ji}} \frac{1}{\delta_{ji} \sqrt{2\pi}} \exp \frac{-1}{2\delta_{ji}^2} \left(\frac{\omega_{ji} - \omega_{jik}}{N_{ji}^{-1/4}} \right)^2, \quad (5)$$

где N_{ji} — число выборочных значений выделенных дискретных составляющих для j -й эталонной области i -го состояния механизма; ω_{jik} — отдельные выборочные значения выделенных дискретных составляющих для j -й области i -го состояния механизма; δ_{ji} — среднеквадратическое отклонение для величин ω_j , оцененное в каждой эталонной области.

Условные многомерные плотности вероятностей $f\left(\bigcup_{j=1}^{n_i} \omega_j / \alpha_i\right)$ определяются с учетом свойства независимости (2) одномерных значений. Эталоны признаков пространств амплитудных значений дискретных составляющих $\{G_j\}$ строятся аналогичным образом в виде условных плотностей вероятностей $f\left(\bigcup_{j=1}^{n_i} G_j / \alpha_i\right)$ после разделения признакового пространства $\{\omega_j\}$ на отдельные j -е эталонные области. С учетом свойства независимости (4) одномерных значений признаков $\{\omega_j\}, \{G_j\}$ строятся их эталоны в виде произведения условных плотностей вероятностей (4).

Располагая информацией об условных плотностях вероятностей признаков пространств, можно создать оптимальные решающие правила для многоальтернативного распознавания исправного и неисправного состояний механизмов. В качестве наиболее простого оптимального правила, использующего лишь информацию об условных плотностях вероятностей признаков пространств, может быть применен критерий максимального правдоподобия, на основании которого решение о соответствии признакового пространства $\{\omega'_j\}$, выделенного во вновь измененном усредненном энергетическом спектре $G(\omega)$, i -му состоянию механизма принимается по максимальному значению из всех функций правдоподобия $\{\Phi_i\}$, вычисленных для $\{\omega'_j\}$ на основе построенных эталонов — условных плотностей вероятностей $f\left(\bigcup_{j=1}^{n_i} \omega_j / \alpha_i\right)$:

$$\begin{aligned} \sup\{\Phi_i\} &= \sup\left\{f\left(\bigcup_{j=1}^{n_i} \omega_j / \alpha_i\right)\right\} \\ \text{или } \bigcup_{j=1}^{n_i} \omega'_j \in \alpha_i, & \text{ если } f\left(\bigcup_{j=1}^{n_i} \omega_j / \alpha_i\right) > f\left(\bigcup_{j=1}^{n_i} \omega_j / \alpha_q\right) \\ & \text{для всех } q \neq i, i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (6)$$

Этот критерий применим в качестве оптимального решающего правила, в первую очередь, при решении задач диагностирования исследовательского характера. При решении практических задач могут быть заданы априорные вероятности нахождения механизмов в i -х состояниях и функция потерь (штрафов) a_{iq} . Тогда для диагностики механизмов используется байесовское решающее правило, устанавливающее принадлежность выделенных в измеренном усредненном энергетическом спектре признаков $\{\omega'_j\}, \{G'_j\}$ к i -му состоянию, при условии [4]

$$\sum_{i=1}^M a_{iq} P(\alpha_i) f\left(\bigcup_{j=1}^{n_i} \omega'_j, G'_j / \alpha_i\right) < \sum_{i=1}^M a_{il} P(\alpha_l) f\left(\bigcup_{j=1}^{n_l} \omega'_j, G'_j / \alpha_l\right) \quad (7)$$

для $l \neq q$, где $f\left(\bigcup_{j=1}^{n_i} \omega'_j, G'_j / \alpha_i\right)$ — значение функции правдоподобия, вычисленной для признаков

$\{\omega'_j\}$, $\{G'_j\}$, выделенных в измеренном усредненном энергетическом спектре на основе условной плотности вероятностей $f\left(\bigcup_{j=1}^{n_i} \omega_j, G_j / \alpha_i\right)$; α_{iq} — штраф за решение о принадлежности признаков $\{\omega'_j\}$, $\{G'_j\}$ к q -му состоянию, если в действительности они соответствуют i -му состоянию механизма; M — количество распознаваемых состояний.

Если функция потерь неизвестна, то байесовское правило сводится к критерию максимума апостериорной вероятности. При вычислении значений функций правдоподобия в каждом оптимальном решающем правиле учитывается вероятность изменения размерности признаков пространств.

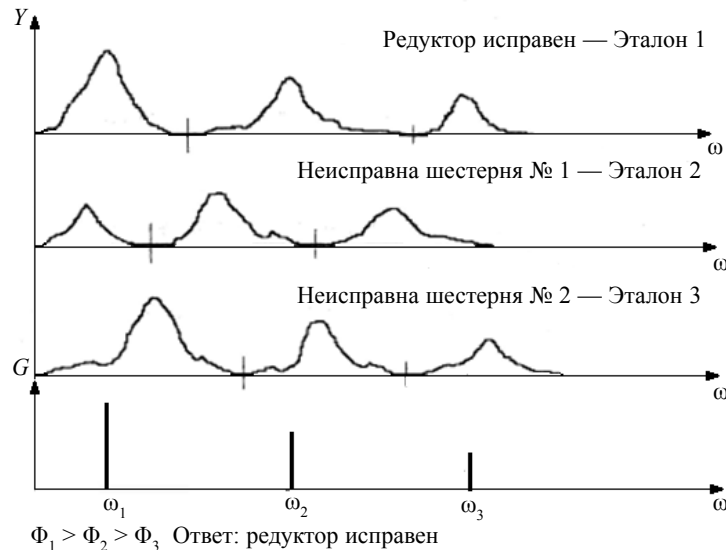


Рис. 2. Пример распознавания состояний механизма на основе признакового пространства — взаимных дискретных составляющих $\{\omega'_j\}$ в усредненном энергетическом спектре виброакустических сигналов.

На рис. 2 приведен пример трехальтернативного распознавания состояний редуктора по методу максимального правдоподобия (6). Эталоны представлены в виде условных плотностей вероятностей $f\left(\bigcup_{j=1}^{n_i} \omega_j / \alpha_i\right)$ для исправного редуктора и при наличии двух неисправных шестерен. Ниже показаны дискретные составляющие, выделенные во вновь измеренном усредненном энергетическом спектре. При сравнении значений функций правдоподобия $\{\Phi_i\}$, вычисленных для $\{\omega'_j\}$, выносится решение об исправности редуктора.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Экспериментальные стендовые исследования проводились на шарикоподшипниках и редукторах с заранее известными неисправностями. Виброакустические сигналы с приемника вибрационных ускорений проходили через третьоктавный фильтр, детектировались, отфильтровывались с помощью фильтра нижних частот, преобразовывались в цифровой код и записывались в память ПЭВМ. Каждая реализация сигнала содержала по 2048 отсчетов. Энергетические спектры усреднялись по 20 реализациям. Эталоны признаков пространств строились при использовании 30 усредненных энергетических спектров. В результате распознавания исправных и неисправных шарикоподшипников по данным $\{\omega'_j\}$ вероятность правильного распознавания составила 70 (55—82) %, а при совместном использовании признаков пространств $\{\omega'_j\}$, $\{G'_j\}$ — 100 (92—100) %. В результате распознавания неисправных шестерен редуктора при совместном использовании $\{\omega'_j\}$, $\{G'_j\}$ также получена вероятность правильного распознавания 100 (92—100) %. В скобках указаны доверительные интервалы с вероятностью нахождения в них 95 % [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Натурные вибродиагностические испытания проводили по результатам записи виброакустических сигналов на корабельных механизмах. Обработывали виброакустические сигналы, записанные при испытаниях следующих механизмов:

главного конденсатного насоса ЭКН-12;

главного циркуляционного насоса ЭЦ-14;

обратимого преобразователя постоянного тока в переменный ПР-503.

При обработке использовались виброакустические сигналы, записанные на двух опорах этих механизмов. Режимы испытаний этих механизмов были пронумерованы в следующей последовательности:

I — ЭКН-12 при 10 123 ч работы после замены смазки и нижнего подшипника;

II — ЭКН-12 при 5198 ч работы до замены смазки;

III — ЭКН-12 при 5218 ч работы после замены смазки;

IV — ЭЦ-14 при 5493 ч работы до замены смазки на малой скорости — 295 об/мин;

V — ЭЦ-14 при 5513 ч работы после замены смазки на малой скорости;

VI — ЭЦ-14 при 10 985 ч работы после замены нижнего подшипника на малой скорости;

VII — ЭЦ-14 при 25 452 ч работы (планово-предупредительный ремонт был выполнен после 20 000 ч работы) на малой скорости;

VIII — ЭЦ-14 при 8900 ч работы, запись на другом главном циркуляционном насосе после замены смазки, на малой скорости;

IX — ПР 503 при 3250 ч работы после замены смазки;

X — ПР 503 при 12 200 ч работы;

XI — ПР 503 при 5100 ч работы;

XII — ПР 503 при 2990 ч работы после замены смазки;

XIII — ЭЦ-14 при 5513 ч работы после замены смазки, на большой скорости — 590 об/мин;

XIV — ЭЦ-14 при 10 995 ч работы после замены нижнего подшипника, на большой скорости — 590 об/мин.

Обработка натуральных экспериментальных данных, как и стендовых, проводилась в соответствии с разработанным методом адаптивной вибродиагностики неисправностей судовых механизмов в два этапа. На этапе обучения измеренные виброакустические сигналы поступали на третьоктавный фильтр спектроанализатора, детектировались, а затем с помощью АЦП преобразовывались в двоичный код и записывались в память ПЭВМ, где выполнялся узкополосный спектральный анализ для каждой выборки огибающей $S(t)$ виброакустического сигнала размером 2048 отсчетов, вычислялись усредненные энергетические спектры $G(\omega)$ по 20 выборочным реализациям. В каждом усредненном спектре выделяли дискретные составляющие в соответствии с (1) и запоминали в виде массивов местоположений на оси частот $\{\omega_j\}$ и амплитудных значений $\{G_j\}$. На основе этих массивов строили эталоны в виде условных многомерных плотностей вероятностей — $f(\bigcup_{j=1}^{n_i} \omega_j, G_j / A_i)$ — для различных i -х режимов ($i = I, II, \dots, XIV$). При построении каждого эталона использовали 30 усредненных спектров.

Распознавание режимов работы указанных механизмов выполняли по методу скользящего контроля. Представленные на распознавание виброакустические сигналы подвергали узкополосному спектральному анализу, детектировали, вычисляли усредненный энергетический спектр $G(\omega)$, в нем выделяли признаковое пространство дискретных составляющих $\{\omega'_j\}$, $\{G'_j\}$, которое сопоставляли с построенными эталонами. На основе этого выделенного признакового пространства вычисляли значения функций правдоподобия $f(\bigcup_{j=1}^{n_i} \omega_j, G_j / A_i)$ для распознаваемых i -х режимов, которые сравнивали между собой по критерию максимального правдоподобия (6). Для полученной вероятностной оценки при принятии решения по каждому $G(\omega)$ использовали формулу Байеса. Определяли оценку вероятностей правильного распознавания P и ее доверительный интервал [4]. Результаты распознавания указанных режимов работы (технических состояний) механизмов приведены в табл. 1.

Видно, что разные режимы работы испытываемых механизмов распознаются с достаточно высокой вероятностью. Так, необходимость замены смазки насосов ЭКН-12 (режимы II и III) и насосов ЭЦ-14 (режимы IV и V) определяется с вероятностью 100 % с доверительным интервалом 92—100 %. Заметно отличаются режимы работы насосов после замены нижнего подшипника. На состояние насосов оказывают влияние время работы и выполнение ремонта. Виброакустические характеристики двух разных насосов одного и того же типа ЭЦ-14 заметно отличаются (режимы VI и VIII), что позволило получить вероятность правильного распознавания 100 % с доверительным интервалом 92—100 %. На виброакустические характеристики обратимого преобразователя ПР 503 также оказывают заметное влияние замена смазки и время его эксплуатации. Вероятность правильного распознавания указанных режимов по совокупности признаковых пространств

Таблица 1

Вероятности правильного распознавания режимов насоса ЭКН-12, %						
$P_{1,2}$ 80 (67—96)	$P_{1,3}$ 88 (77—95)	$P_{2,3}$ 100 (92—100)	$P_{1,2,3}$ 80 (70—88)			
Вероятности правильного распознавания режимов насоса ЭЦ-14, %						
$P_{4,5}$ 100 (92—100)	$P_{6,7}$ 90 (78—97)	$P_{6,8}$ 100 (92—100)	$P_{7,8}$ 92 (80—98)	$P_{6,7,8}$ 77 (68—85)		$P_{13,14}$ 97 (89—100)
Вероятности правильного распознавания режимов преобразователя ПР 503, %						
$P_{9,10}$ 97 (89—100)	$P_{9,11}$ 100 (92—100)	$P_{9,12}$ 93 (82—98)	$P_{10,11}$ 95 (85—99)	$P_{10,12}$ 92 (80—98)	$P_{11,12}$ 100 (92—100)	$P_{9,10,11,12}$ 87,5 (80—93)

Здесь введены следующие обозначения:

$P_{1,2}$ — вероятность правильного распознавания режимов I и II;

$P_{2,3}$ — вероятность правильного распознавания режимов II и III;

$P_{1,2,3}$ — вероятность правильного распознавания режимов I, II, III и т.д.

В скобках указаны доверительные интервалы.

$\{\omega_p, G_i\}$ в большинстве случаев меньше 100 %. Этот результат, во-первых, указывает на некоторую близость статистических характеристик используемых признаков пространств виброакустических сигналов испытываемых механизмов, то есть в процессе эксплуатации механизмы не полностью изменяют свои виброакустические характеристики. Однако этих изменений достаточно, чтобы установить необходимость замены смазки, подшипников или выполнение ремонта. Во-вторых, этот результат подтверждает корректность проведения испытаний в натуральных условиях с помощью одной и той же измерительной техники.

ВЫВОДЫ

Таким образом, рассмотренный метод диагностики оборудования позволяет автоматически выделять многомерные признаковые пространства дискретных составляющих в энергетических спектрах виброакустических сигналов, строить их эталоны в виде условных многомерных плотностей вероятностей и распознавать неисправности по оптимальному решающему правилу. Экспериментально подтверждена возможность распознавания неисправностей корабельных механизмов, нарушения стабильности и правильной их эксплуатации с помощью вышеуказанного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
2. Новиков А.К. Статистические измерения в судовой акустике. Л.: Судостроение, 1985. 272 с.
3. Давыдов В.С. Алгоритм выявления существенных максимумов в огибающей сигнала. Модели, алгоритмы, принятие решений / Тезисы 2-го Всесоюзного акустического семинара. М.: АКИН, 1988. 64 с.
4. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. Пер. с англ. М.: Наука, 1979. 368 с.
5. Давыдов В.С., Стебляко Д.В. Исследование статистических свойств диагностических признаков в виброакустических сигналах корабельных механизмов // Дефектоскопия. 2018. № 3. С. 31—38.
6. Равин А.А. Методы диагностирования судового энергетического оборудования / Монография. СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2013. 268 с.
7. Изобретение СССР № 1787269 А3. МПК G01M 13/04.
8. Изобретение СССР № 1649348 А1. МПК G01M 13/04.
9. Изобретение СССР № 1691702 А1. МПК G01M 13/04.
10. Патент РФ № 2356021. МПК G01M 15/00, G01M 7/02.
11. Патент РФ № 2314508. МПК G01M 15/00, G01M 7/02.
12. Патент РФ. № 2209410. МПК G01M 13/04.