

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

В статье выполнен обзор основных методов вибродиагностики узлов подвижного состава железных дорог. Рассмотрены направления дальнейшего совершенствования виброакустического метода контроля.

**Ключевые слова:** вибродиагностика, временной сигнал, спектральный анализ.

**Введение.** В настоящее время вибродиагностический метод является наиболее эффективным и технологичным для определения технического состояния роторных механических узлов, в том числе узлов подвижного состава железных дорог. В то же время этот метод является одним из сложнейших методов технической диагностики, что обусловлено кинематической сложностью объектов диагностирования.

Вибродиагностирование вступило в активную фазу развития в середине 60-х годов прошлого века и является одним из самых динамично развивающихся направлений, которое привлекает к себе ученых и практиков.

На железнодорожном транспорте вибродиагностирование стало внедряться с середины 90-х годов и фактически сразу заняло ведущее место среди методов неразрушающего контроля роторных узлов колесно-моторных и колесно-редукторных блоков, а также буксовых узлов колесных пар.

На сегодняшний день можно назвать около десятка методов диагностирования роторных механизмов по вибросигналу.

В соответствии с ГОСТ 20911-89 целями технического диагностирования являются: 1) определение вида технического состояния объекта, 2) поиск места и определение вида неисправности, 3) прогнозирование технического состояния. Каждый из методов имеет свои особенности, преимущества и недостатки, в различной степени ими достигаются и цели диагностирования.

Классификацию методов вибродиагностирования можно производить по нескольким признакам и критериям. Так, в работе [1] приведена классификация по следующим признакам: 1) по способу получения диагностической информации, 2) по виду предварительной обработки, 3) по способу обработки полученных сигналов, 4) по методу анализа и принятию решений. Данная классификация достаточно условна, и в ней мы выделим два направления — способы обработки и методы анализа сигналов.

Выбор метода диагностирования и эффективное его использование применительно к конкретной ситуации — это сложная научно-практическая задача. Ниже приводится краткий обзор основных методов, которые могут быть использованы для обработки и анализа вибросигналов.

**Цель статьи.** Классификация и характеристика существующих методов вибродиагностики.

В методах анализа можно выделить две большие группы: анализ во временной области (анализ временного сигнала) и анализ в частотной области (спектральный анализ).

Ведущие российские производители ВДО для определения технического состояния оборудования используют как спектральный анализ, так и характеристики временного сигнала.

**Методы диагностирования по параметрам временного сигнала.** По среднеквадратическому значению (СКЗ) виброскорости (виброускорения). Среднеквадратическое значение рассчитывается по следующему выражению:

$$X_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [X(t)]^2 dt}$$

Метод СКЗ выявляет дефекты подшипников на самых последних стадиях их развития, когда общий уровень вибрации значительно вырастает. Практическая реализация метода не требует больших материальных затрат и специально обученного персонала. Обычно этот метод реализуется в виброметрах, наиболее дешевых средствах виброконтроля. В отечественных приборах он реализован только в виброметре Vibro Vision производства фирмы «Вибро-Центр» в приборе «ПИОН» производства фирмы «ТИК».

В последнее время предпринимаются попытки использовать в качестве диагностического признака функции моментов четвертого порядка — эксцесс, или фактор Куртозиса (ФК)[2], который рассчитывается по следующей формуле:

$$\Phi_k = \frac{\int_{t_0}^{t_0+T} (X - X_{\text{ср}})^4 P(x) dx}{\sigma^4}$$

где  $X(t)$  — амплитуда сигнала с датчика вибрации (временной сигнал),

$P(x)$  — функция вероятности случайной величины (временного сигнала),

$T$  — период наблюдения,

$t_0$  — время начала наблюдения,

$X_{\text{ср}}$  — среднеквадратическое отклонение временного сигнала.

Фактор Куртозиса показывает, насколько близка по форме к нормальному распределению выборочная плотность распределения. В настоящее время,

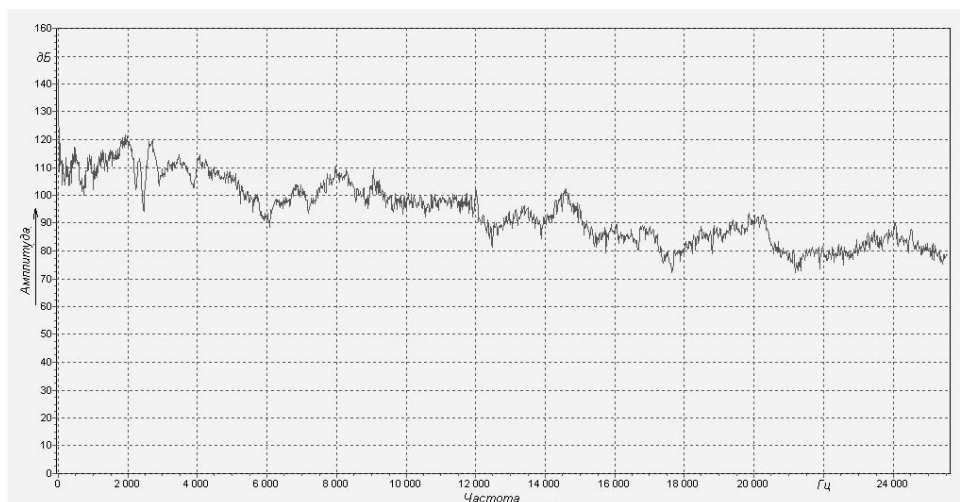


Рис. 1. Широкополосный спектр временного сигнала экспертной системы «Эксперт-Д»

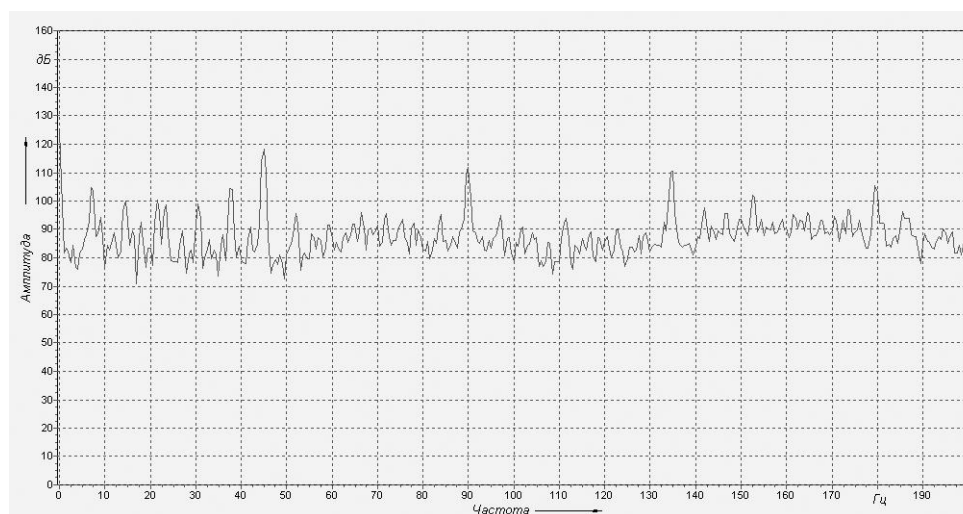


Рис. 2. Прямой спектр временного сигнала экспертной системы «Эксперт-Д»

фактор эксцесса широко применяется в вибродиагностическом оборудовании, например, экспертная вибродиагностическая система «Эксперт-Д» (ООО «Резерв», г. Омск).

Для контроля технического состояния подшипников по методу ПИК-фактора необходимо иметь простой виброметр, позволяющий измерять два параметра вибросигнала:

— среднеквадратичное значение уровня (СКЗ) вибрации, т.е. энергию вибрации;

— пиковую амплитуду вибрации (положительную, отрицательную или полный размах — значения не имеет).

Пикфактор определяется как отношение вышеуказанных величин:

$$K_{\text{пик}} = \frac{X_{\text{макс}}}{X_{\text{ср.кв}}}.$$

Пикфактор является параметром, который реагирует на появление отдельных коротких импульсов. Так, у случайного сигнала без ударных импульсов типовое значение пикфактора лежит в пределах от 3 до 4, а при появлении редких, но сильных импульсов может превышать значения порядка 20–30. Метод прост в реализации, однако имеет малую помехозащищенность.

Методы диагностирования по спектру — спектральный анализ. Спектральный анализ — один из методов обработки сигналов, в основном базиру-

ющийся на преобразовании Фурье, который позволяет охарактеризовать частотный состав измеряемого сигнала.

В основе ПФ лежит представление периодического сигнала в виде суммы гармонических составляющих:

$$S(t) = S_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t,$$

где  $\omega_1 = 2\pi/T$  — круговая частота, соответствующая периоду повторения сигнала;  $\omega_k = k\omega_1$  — гармоники.

Наиболее распространены следующие виды диагностирования по спектральному анализу: широкополосный спектр, прямой спектр, спектр огибающей.

**Диагностирование по широкополосному спектру.** Для реализации данного метода необходим широкополосный спектроанализатор с хорошей разрешающей способностью и подготовленный персонал.

Этот метод применяется на практике достаточно часто, т. к. позволяет выявлять, наряду с дефектами подшипников, большое количество других дефектов оборудования. На рис. 1 представлен широкополосный спектр вибросигнала, диагностируемый с помощью системы «Эксперт-Д». Метод позволяет выявлять дефекты подшипников, когда энергия резонансных колебаний вырастет настолько, что будет заметна в общей картине частотного распределения всей мощности вибросигнала.

Недостатком диагностирования по широкополосному спектру является то, что можно проследить лишь общее состояние диагностируемого оборудования.

**Диагностирование по прямому спектру.** Метод базируется на анализе спектра вибрации — выявлении периодичности (частоты) появления амплитудных всплесков (рис. 2). По частотному составу спектра можно идентифицировать возникновение и развитие дефектов подшипника. Каждому дефекту на элементах подшипника (тела качения, внутреннее и наружное кольцо, сепаратор) соответствуют свои частоты, которые зависят от кинематики подшипника, скорости его вращения, а также геометрии подшипника.

Наличие той или иной частотной составляющей в спектре сигнала говорит о возникновении соответствующего дефекта, а амплитуда этой составляющей — о степени развития дефекта.

**Достоинства:**

— высокая помехозащищенность (маловероятно наличие в механизме источников, создающих вибрации на тех же частотах, что и дефекты подшипника);

— высокая информативность метода. Возможна оценка состояния элементов подшипника (тел качения, внутреннего и наружного кольца, сепаратора), поскольку они генерируют разные частотные ряды в спектре.

**Недостатки:**

— метод дорогостоящий, если виброанализатор использовать только для контроля подшипников.

Метод малочувствителен к зарождающимся и слабым дефектам в связи с тем, что подшипники в большинстве случаев являются маломощными источниками вибрации. Небольшой скол на телах качения или дорожке качения не в состоянии заметно качнуть механизм, чтобы мы увидели эту частотную составляющую в спектре. И только при достаточно крупных дефектах амплитуды этих частотных составляющих начинают заметно выделяться в спектре.

**Спектр огибающей.** Метод базируется на анализе высокочастотной составляющей вибрации и выявлении модулирующих ее низкочастотных сигналов.

Высокочастотная часть сигнала изменяет свою амплитуду во времени, т.е. она модулируется каким-то низкочастотным сигналом. Выделение и обработка этой информации и составляют основу данного метода.

Рассмотрим подшипник с зарождающимся дефектом (скол, трещина и т.п.) на наружной обойме. При ударе тел качения о дефект возникают высокочастотные затухающие колебания, которые будут повторяться (модулироваться) с частотой, равной частоте перекачивания тел качения по наружному кольцу. Именно в этом модулирующем сигнале содержится информация о состоянии подшипника.

Для получения сигнала огибающей отфильтрованный сигнал детектируется, т.е. выделяется модулирующий сигнал (или еще его называют «огибающая сигнала»), и мы получаем спектр интересующего нас модулирующего сигнала, или спектр огибающей, что и дало название методу.

Спектр огибающей при отсутствии дефектов представляет собой почти горизонтальную волнистую линию (рис. 3а). При появлении дефектов над уровнем линии сплошного фона начинают возвышаться дискретные составляющие, частоты которых однозначно просчитываются по кинематике и оборотам подшипника (рис. 3б).

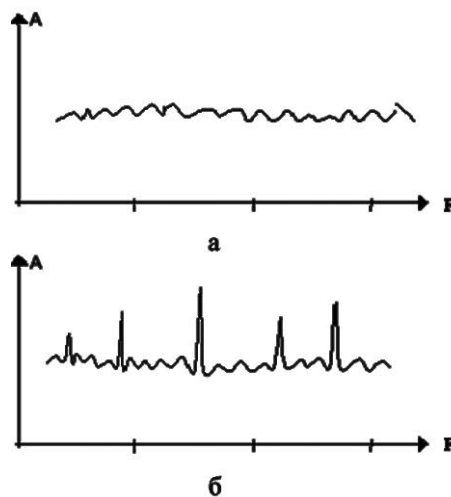


Рис. 3. Спектр огибающей: а — при отсутствии дефектов, б — при появлении дефектов

Частотный состав спектра огибающей позволяет идентифицировать наличие дефектов, а превышение соответствующих составляющих над фоном однозначно характеризует глубину каждого дефекта.

Для реализации диагностики подшипников качения по спектру огибающей может быть применен анализатор вибросигналов, в котором реализованы функции полосовой фильтрации, детектирования и получения спектра огибающей вибросигнала. Таких приборов на нашем рынке представлено достаточно много. Это и приборы «СД-11», «СД-12» фирмы «ВАСТ», приборы «ТОПАЗ» и «АГАТ» фирмы «ДИ-АМЕХ». На рис. 4 показан спектр огибающей временного сигнала, полученный при тестировании на стенде «Эксперт-Д».

В настоящее время метод огибающей широко применим и постепенно заменяет метод ударных импульсов. Достоинствами является высокая чувствительность, информативность и помехозащищенность.

Недостаток — метод применим только для высокочастотного сигнала, мощность которого изменяется значительно медленнее его периода. Для реализации метода необходим дорогостоящий анализатор спектра вибрации с функцией анализа спектра огибающей высокочастотной вибрации, а также оборудование с высокими метрологическими характеристиками.

**Вейвлет-преобразование.** Один из сравнительно новых методов математической обработки вибрационных сигналов, получивший практическое применение в вибрационной диагностике в последнее время.

Вейвлет-преобразование является трехмерным (рис. 5). Оно показывает изменение величины амплитуды каждой гармоники в сигнале с течением времени [3]. Иногда анализ таких трехмерных связей позволяет получить качественно новые диагностические заключения.

Основным отличием вейвлет-преобразования от классического спектрального преобразования является то, что для разных гармоник используется разное количество отсчетов в исходном сигнале. Количество точек определяется исходя из реальной частоты рассчитываемой гармоники. Для низкочастотных гармоник будет использовано меньшее количество отсчетов, а для высокочастотных гармоник будет использоваться большее количество точек в сигнале.

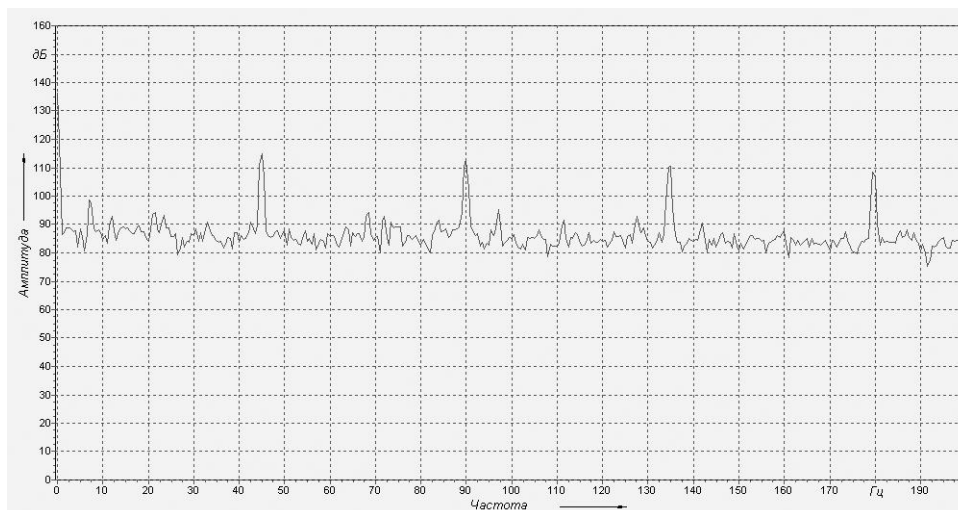


Рис. 4. Спектр огибающей временного сигнала

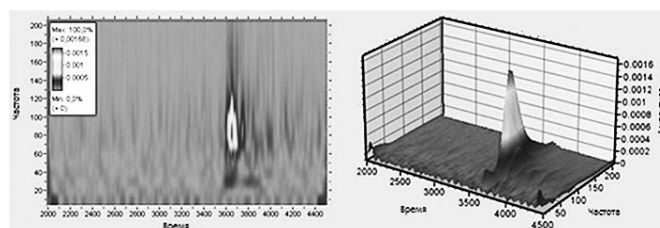


Рис. 5. К определению понятия вейвлет-преобразования

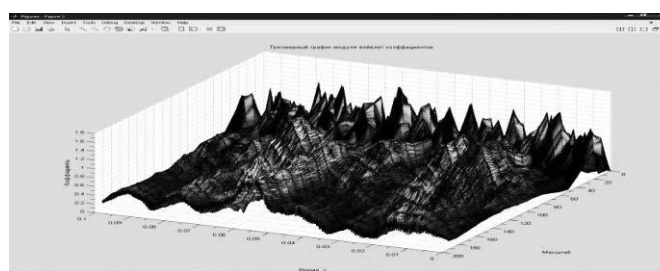


Рис. 6. Графический вид вейвлет-анализа результатов вибрации дефектного подшипника качения ТЭД электровоза ВЛ80т-293

**Вейвлет-преобразование** одномерного сигнала — это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций. Результатом вейвлет-разложения (базис всплесков) сигнала  $S(t)$  является двумерная функция (ортонормальный базис), зависящая от конкретных значений времени  $b$  и масштаба  $a$  (которые несут информацию о частоте и времени) задаются выражением:

$$W_s(a, b) = \langle S(t) | \psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

где  $\psi(t)$  — производящая или материнская функция;  $a$  — параметр масштаба, имеющий косвенное отношение к частоте;  $b$  — параметр сдвига сигнала по оси времени;  $\sqrt{a}$  — нормирующий коэффициент;  $W_s(a, b)$  — коэффициент, соответствующий данному масштабу и сдвигу материнского вейвлета по шкале времени и амплитуды.

В качестве производящей функции можно использовать ее основной вариант, известный как функция Морле:

$$\psi(t) = e^{-i2\pi\nu_0|t|} e^{-\frac{|t|^2}{2}}$$

В работе [4] была разработана модель программного комплекса на базе Matlab, с использованием алгоритма вейвлет-преобразования для идентификации и оценки степени неисправности подшипников качения тяговых электрических двигателей (рис. 6).

Возможно диагностирование с помощью вейвлет-преобразований за счет главного своего достоинства — информативности метода, будет обнаруживать дефекты, ранее не выявлявшиеся с помощью БПФ. Основным недостатком метода является трудоемкость и сложность в интерпретации результатов.

**Кепстральный анализ.** По отношению к спектру кепстр является таким же сжатием данных, как сам спектр по отношению к временной реализации [5]. Согласно исходному определению, кепстр мощности сигнала определен как прямое преобразование Фурье ( $\Phi$ ) спектра мощности:

$$C_{xx}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln |S_{xx}(\omega)|^2 e^{i\omega\tau} d\omega,$$

где  $S_{xx}(f)$  — амплитудный спектр сигнала  $x(t)$ .

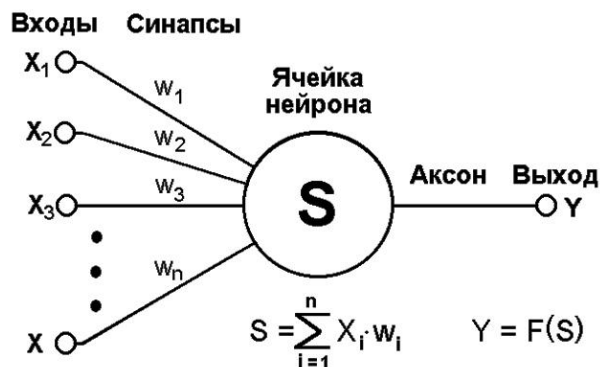


Рис. 7. Вид искусственного нейрона

Кепстр может быть использован в спектральном анализе для исключения из спектра энергии составляющих отраженного сигнала.

Достоинства: кепстральный анализ в значительной степени нечувствителен к изменениям фазы исследуемых сигналов.

Недостаток: сложность интерпретации результатов, и как следствие — наличие экспертной системы либо высококвалифицированных специалистов.

Кепстральный анализ является менее популярным, нежели вейвлет-преобразование и в известных типах оборудования не применяется.

**Фрактальный анализ.** Теория фракталов является одним из перспективных направлений математической обработки вибросигналов. Фракталом называется структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому [6]. В вибродиагностике задача фрактального анализа заключается в том, чтобы сигнал вибрации, полученный с подшипниковых и редукторных узлов колесно-моторного блока (КМБ) локомотива, обработать таким методом, в результате которого полученная фрактальная размерность отражала бы отсутствие или присутствие дефектов, а также степень их развития.

Для установления возможности применения теории фракталов, к задаче идентификации дефектов КМБ, в частности подшипников качения, за основу были взяты фрактальные методы, предназначенные для анализа одномерных временных рядов. К данным методам можно отнести метод Херста, метод эффективной размерности, метод средней крутизны, метод виртуального объема  $V_k$  и  $V_z$  методы. В результате исследований, описанных в работе [7], было установлено, что перечисленные выше методы, за исключением метода виртуального объема, неприменимы для решения задач вибродиагностики подшипников.

**Нейронные сети.** Методы анализа прямого спектра и спектра огибающей могут быть реализованы с применением теории искусственных нейронных сетей. Применение математического аппарата нейронных сетей обеспечивает повышение точности процесса диагностики путем применения имеющихся знаний о работе аналогичных агрегатов.

Искусственные нейронные сети (ИНС) — математические модели, а также их программные или аппаратные реализации, построенные по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей — сетей нервных клеток живого организма [8].

Основу каждой ИНС составляют относительно простые, в большинстве случаев — однотипные, элементы (ячейки), имитирующие работу нейронов

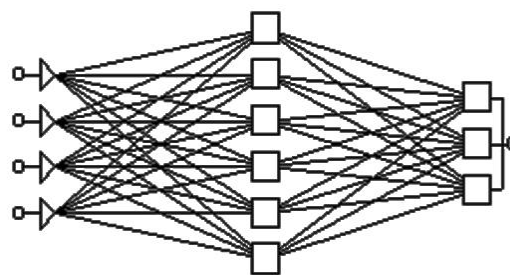


Рис. 8. Структура MLP для диагностики рассматриваемых неисправностей

мозга. Каждый нейрон характеризуется своим текущим состоянием по аналогии с нервными клетками головного мозга, которые могут быть возбуждены или заторможены. Он обладает группой синапсов — однонаправленных входных связей, соединенных с выходами других нейронов, а также имеет аксон — выходную связь данного нейрона, с которой сигнал (возбуждения или торможения) поступает на синапсы следующих нейронов. Общий вид нейрона приведен на рис. 7. Каждый синапс характеризуется величиной синаптической связи или ее весом  $w_i$ , который по физическому смыслу эквивалентен электрической проводимости.

Искусственные нейронные сети состоят из элементов, функциональные возможности которых аналогичны большинству элементарных функций биологического нейрона. Эти элементы затем организуются по способу, который может соответствовать (или не соответствовать) анатомии мозга. Искусственные нейронные сети демонстрируют удивительное число свойств, присущих мозгу. Например, они обучаются на основе опыта, обобщают предыдущие прецеденты на новые случаи и извлекают существенные свойства из поступающей информации, содержащей излишние данные.

Для решения задач вибродиагностики искусственная нейронная сеть обучается таким образом, чтобы соотносить входной вектор значений из пространства параметров определенному классу в пространстве неисправностей, а для этой задачи хорошо подходит многослойный персептрон.

Многослойный персептрон (MLP) — сеть прямого распространения, в которой каждый нейрон текущего слоя связан со всеми нейронами предыдущего. Структура нейронной сети для решения задачи вибродиагностики промышленного оборудования представлена на рис. 8

Достоинствами применения данной технологии является высокая точность определения дефекта, а также высокий уровень автоматизации процесса.

К недостаткам же можно отнести сложность реализации и обучения нейросети, кроме того, стоит выделить низкую степень унификации (для каждого нового узла необходимо создавать новую сеть и ее обучать) [8].

**Выводы.** С целью повышения достоверности и глубины диагностирования наметилась тенденция использования одновременно нескольких методов. Так, например, диагностирование «классических» дефектов, сигнал которых описывается одной-тремя гармониками, все же лучше при помощи обычного спектрального представления вибрационных сигналов. Однако если в полученном спектре вибра-

ционного сигнала присутствует около десятка гармоник, и даже более, то такой сигнал имеет смысл анализировать с помощью вейвлет-преобразования. В настоящее время идет активное опробование нетрадиционных подходов в части обработки и анализа исходной информации.

Основными критериями применимости методов являются: эффективность, оптимальное соотношение цена/качество, технологичность, возможность работы в реальном масштабе времени.

#### Библиографический список

1. Браташ, О. В. Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей / О. В. Браташ, А. П. Калинов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua/2012/etf/iasynskyi/library/vibro.htm> (дата обращения: 10.06.2013).
2. Тэттэр, В. Ю. Разработка технологий и оборудования для вибродиагностики колесно-моторных блоков локомотивов : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / В. Ю. Тэттэр. — Омск, 2005. — 193 с.
3. Руссов, В. А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В. А. Руссов. — Пермь, 2012. — 252 с.
4. Дороничев, А. В. Совершенствование вибродиагностики подшипников качения тяговых электрических машин : дис. ...

канд. техн. наук : 05.22.07 / А. В. Дороничев. — Хабаровск, 2012. — 165 с.

5. Костюков, В. Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин / В. Н. Костюков, А. П. Науменко. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. — 360 с.
6. Федер, Е. Фракталы / Е. Федер ; пер. с англ. — М. : Мир, 1991. — 254 с.
7. Применение теории фракталов для обнаружения дефектов роторных узлов подвижного состава железнодорожного транспорта / В. И. Щедрин [и др.] // Тез. докл. науч.-техн. конф. — Самара, 2005. — С. 17–19.
8. Короткий, С. Нейронные сети: основные положения / С. Короткий [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.shestopaloff.ca/kyriako/Russian/Artificial\\_Intelligence/Some\\_publications/Korotky\\_Neuron\\_network\\_Lectures.pdf](http://www.shestopaloff.ca/kyriako/Russian/Artificial_Intelligence/Some_publications/Korotky_Neuron_network_Lectures.pdf) (дата обращения: 20.07.2013).

**МАТЮШКОВА Ольга Юрьевна**, аспирантка кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство».

**ТЭТТЭР Владимир Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая электротехника».

Адрес для переписки: [olga\\_matyushkova@mail.ru](mailto:olga_matyushkova@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 19.09.2013 г.

© О. Ю. Матюшкова, В. Ю. Тэттэр

УДК 621.373

**Г. С. НИКОНОВА  
А. В. МАРТЫНОВ**

**Омский государственный  
технический университет  
Омский научно-исследовательский  
институт приборостроения**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАВ УСТРОЙСТВ

В статье приведен разработанный алгоритм проектирования ПАВ генераторов. Проведено моделирование схемы ПАВ генератора, приведены результаты некоторых экспериментов.

**Ключевые слова:** ПАВ-фильтры, ПАВ-резонаторы, ПАВ-линии задержки, ПАВ-генераторы.

Характеристики практически любой радиоаппаратуры для систем связи во многом определяют примененными в ней генераторами или синтезаторами частот, которые являются важнейшими функциональными элементами. Традиционными радиокомпонентами для цепей обратных связей генераторов в течение длительного периода времени являлись реактивные элементы для частотного диапазона от  $10^4$  до  $10^9$  Гц, и резонаторы на объемных акустических волнах (ОАВ), для частотного диапазона от  $10^6$  до  $10^8$  Гц при работе на основной частоте или на гармониках. Причем LC генераторы по совокупности характеристик (стабильность частоты, диапазон плавной перестройки частоты) применялись как генераторы, управляемые напряжением, а

генераторы с резонаторами на ОАВ — как опорные генераторы.

В настоящее время перспективными для частотного диапазона  $10^7$  —  $2 \cdot 10^9$  Гц считаются генераторы на поверхностных акустических волнах (ПАВ), которые можно изготавливать современными методами интегральной технологии. Специалисты в области акустоэлектроники пытаются разработать для этого частотного диапазона ПАВ генераторы, имеющие стабильность частоты не хуже, чем у генераторов с резонаторами на ОАВ (при сравнении спектральных характеристик на выбранной частоте сравнения), а также обеспечивающие возможность плавной перестройки частоты в широких пределах (до 10–20 % от полосы пропускания ПАВ фильтра). Хотя имеют-