

магнитных полей промышленной частоты (50 Гц) : отчет о НИР (№ госрег.01200311814). М.: ГУ НИИ МТ РАМН. 2003. 147 с.

3. Системы нормативных документов в строительстве Нормы (предельно допустимые уровни) магнитных полей промышленной частоты (50 Гц) в помещениях жилых и общественных зданий и на селитебных территориях : дополнение к МГСН 2. 03.-97. (проект). М.: 2003. 13 с.

4. Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станци-

ях и подстанциях. Стандарт организации СО 34.35.311-2004. М.: МЭИ, 2004. 77 с.

5. Аполлонский, С. М., Богаринова А. Н. Напряженности воздушной среды на электрифицированной железной дороге // Сборник докладов Девятой Российской научно – технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности. СПб.: 2006. С. 579-583.

6. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. ун-т. 2005. 273 с.

УДК 629.1.05

*Н.Ю. Лебедева\*, А.В. Лукьянов, А.А. Чиж*

### СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

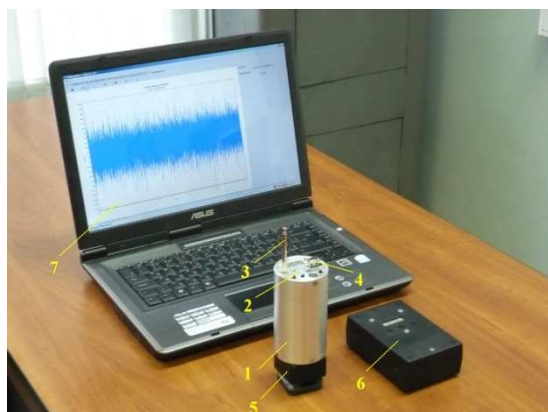
*Создано устройство для измерения вибрации, которое позволяет измерять параметры в опасных зонах с возможностью дистанционного запуска процесса измерения и дистанционного приема данных. Проведены вибрационные испытания изобретенной аппаратуры совместно с СТД-2160, СТД-3300 и СК-1100. Для повышения точности анализа вибрации по спектру создана программа «VibrAn», имеющая удобный интерфейс и алгоритм анализа частотных характеристик вибрации.*

**Ключевые слова:** вибрация, виброизмерительный модуль, метрологические характеристики.

Наличие проводов у виброизмерительной техники доставляет неудобства в процессе измерения параметров, а также ограничивают свободу перемещения оператора. В случае нахождения объекта измерения в опасной зоне измерения делаются невозможными по требованиям техники безопасности. Для решения проблем, связанных с нахождением объекта измерения в опасных зонах, необходимо разработать виброизмерительную аппаратуру, которая могла бы работать дистанционно. В лаборатории «Техническая диагностика» был разработан комплекс «Спектр» для входного виброконтроля

вспомогательных машин (мотор-вентиляторов, мотор-компрессоров, фазорасщепителей). Комплекс включает одноканальные виброизмерительные модули (4-10 шт.) с дистанционным управлением, на основе которых формируется схема одновременного измерения вибрации нескольких вспомогательных машин (2-5 ВМ), и программу автоматизированной вибродиагностики дефектов с использованием технологии вибродиагностики МВ при работе электровоза под контактным проводом. Характеристики виброизмерительных модулей приведены в таблице 1.

\* - автор, с которым следует вести переписку.



**Рис. 1. Виброизмерительный модуль:**  
 1 – виброизмерительный блок; 2 – индикатор измерений и кнопки ручного управления; 3 – антенна; 4 – разъем USB; 5 – магнит крепления блока; 6 – пульт дистанционного управления; 7 – ноутбук с программой вибродиагностики «Вибродефект».

Виброизмерительный модуль обладает следующими преимуществами:

- два автономных виброизмерительных модуля могут одновременно контролировать и регистрировать вибрацию на двух опорах одной вспомогательной машины при их работе под контактной сетью;
- дистанционное управление виброизмерительными модулями, находящимися в высоковольтной зоне;
- несколько виброизмерительных модулей позволяют проводить одновременное измерение вибрации на всех ВМ секции электровоза;
- автоматизированная диагностика дефектов МВ (дисбаланс, расцентровка, люфты, дефекты подшипников, электрические дефекты)
- протоколирование результатов обработки вибросигналов (среднеквадратическое значение виброскорости, виды развивающихся дефектов, рекомендации по ремонту с учетом данных вибродиагностики).

Таблица 1

*Характеристики виброизмерительного модуля*

Характеристика	Значение
1. Габаритные размеры	150 x 53 мм
2. Масса	0,25 кг
3. Линия связи с ПЭВМ	USB
4. Память прибора рассчитана на хранение	До 1000 измерений
5. Длительность сохранения сигнала	5,12 сек
6. Вид сохраняемого сигнала	Виброускорение
7. Количество линий спектра	25600
8. Количество каналов	1
9. Рабочий диапазон частот	10 – 5000 Гц
10. Неравномерность АЧХ в рабочем диапазоне частот	Не более 3 дБ

Устройства для измерения вибрации нуждаются в проверке основных метрологических характеристик рабочего прибора: основной погрешности, коэффициента преобразования датчика, амплитудно-частотной характеристики, амплитудной характеристики, поперечной чувствительности датчика.

К вибростендам как средствам воспроизведения и передачи вибрационных величин предъявляются специфические требования, обеспечивающие соответствующую точность измерений параметров вибрации при передаче их значений от образцовых средств измерения к рабочим. Устанавливаются требования к коэффициенту гармоник и уровню поперечных составляющих воспроизводимых колебаний.

Для обеспечения этих задач, в полном объеме или частично, требуются различные по своим техническим характеристикам установки.

Показаниям виброизмерительной аппаратуры в области нормальных рабочих условий могут быть присущи как случайные, так и не исключенные систематические погрешности. Основная погреш-

ность вибродатчика  $\delta_{o.п.д.}$  рассчитывается при доверительной вероятности 0,95 по формуле [1]

$$\delta_{o.п.д.} = 1.1 \sqrt{\delta_{o.с.и.}^2 + \delta_{п}^2 + \gamma^2 + \delta_a^2 + \delta_g^2}, \quad (1)$$

где  $\delta_{o.п.д.}$  – основная погрешность датчика;  $\delta_{o.с.и.}$  – погрешность основного средства измерения, использованного при проверке;  $\delta_{п}$  – погрешность из-за наличия поперечной составляющей;  $\gamma$  – неравномерность АЧХ датчика в рабочем диапазоне частот;  $\delta_a$  – нелинейность амплитудной характеристики датчика в рабочем динамическом диапазоне;  $\delta_B$  – погрешность вольтметра, используемого для измерения напряжения на выходе датчика.

В соответствии с методическими указаниями МИ 1873-88 основная погрешность виброизмерительного прибора определяется в нормальных условиях в рабочем диапазоне частот и амплитуд и вычисляется по формуле

$$\delta_{o.n.} = \sqrt{\delta_a^2 + \delta_f^2}, \quad (2)$$

где  $\delta_a$  и  $\delta_f$  – амплитудная и частотная относительные погрешности в рабочих диапазонах амплитуд и частот соответственно, определенные при калибровке аппаратуры в нормальных условиях.

Погрешность виброизмерительного прибора за межповерочный интервал определяется при доверительной вероятности 0,95 формулой

$$\delta = \sqrt{\delta_{o.п.}^2 + \delta_{o.с.п.}^2 + v_1^2}, \quad (3)$$

где  $\delta_{o.с.п.}$  – погрешность образцового средства измерения, используемого при проверке;  $v_1 = 0,5\delta_0$  – нестабильность аппаратуры за межповерочный период.

Для ранее разработанных приборов, а также при калибровке и проверке вибродатчика и прибора на одной частоте, основная погрешность  $\delta_0$  оценивается, согласно ГОСТ 13600-68, формулой

$$\delta_0 = \pm \frac{\Delta}{X_N}, \quad (4)$$

где  $\Delta$  – абсолютное значение погрешности.

В этом случае основная погрешность виброизмерительного прибора на одной частоте определяется не менее чем при пяти значениях амплитуд, равномерно распределенных по динамическому диапазону, включая минимальное и максимальное. Кроме того, для многодиапазонных приборов дополнительно нужно провести измерение не менее чем в одной точке каждого диапазона [2].

В качестве характеристик одномерных законов распределения вероятностей мгновенных значений амплитуд сигнала используют его моменты до четвертого включительно:

- математическое ожидание

$MX = \sum x_k P(x_k)$  (соответствующее постоянное составляющей сигнала);

- дисперсию  $DX = \mu_2 = M(X - MX)^2$  (характеризующую разброс значений сигнала относительно среднего) или, чаще, среднеквадратическое значение

$\sigma = \sqrt{MX}$  ;

- коэффициент асимметрии

$As = \mu_3 / \sigma^3 = [M(X - MX)^3] / \sigma^3$  (характеризующий несимметричность сигнала относительно среднего значения);

- эксцесс

$E_k = (\mu_4 / \sigma^4) - 3 = [M(X - MX)^4 / \sigma^4] - 3$  (характеризующий наличие выбросов сигнала).

Среди характеристик двумерных законов распределения наиболее употребительны в диагностике функции регрессии:

$M(y/x) = \sum y_k P(y_r/x)$  – условные математические ожидания. [3]

С использованием приведенной методики проведены метрологические испытания созданных виброизмерительных блоков, причем сравнения проводились с аналогичными данными виброаппаратуры СТД-2160, СТД-3300, по которой имелись паспортные данные (принята за базовую аппаратуру).

На оправку вибростенда устанавливались 2 датчика: контролируемый и базовый. Крепление датчиков осуществлялось шпилькой. На генераторе выставляли значения частоты от 5 до 1800 Гц. Данные обрабатывались с помощью программы «Вибродизайнер». Строилась АЧХ вибростенда, определенная при помощи виброаппаратуры. Определялись метрологические характеристики.

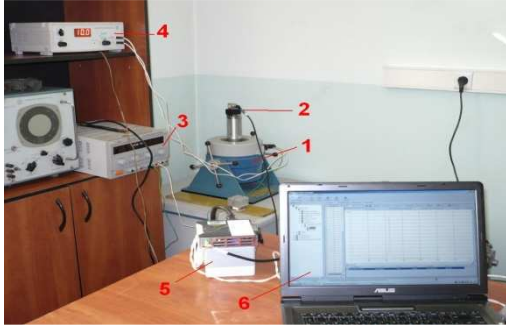


Рис. 2. Вибрационные испытания аппаратуры: 1 – вибростенд; 2 – датчики вибрации; 3 – блок питания; 4 – генератор частоты; 5 – виброаппаратура СТД-2160; 6 – ноутбук с программой «Вибродизайнер».

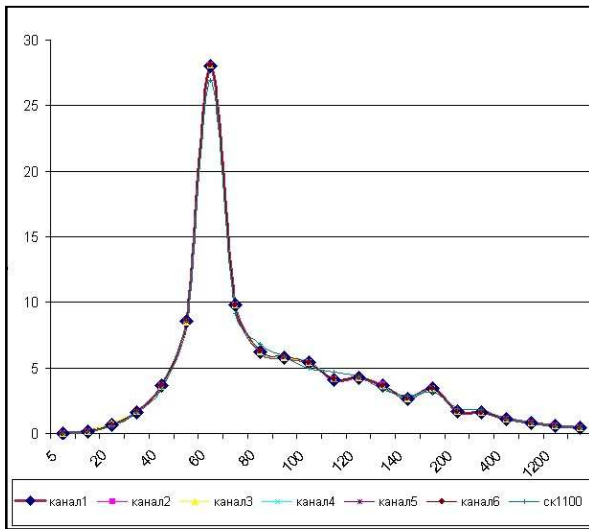


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика стенда, измеренная с помощью СТД-2160.

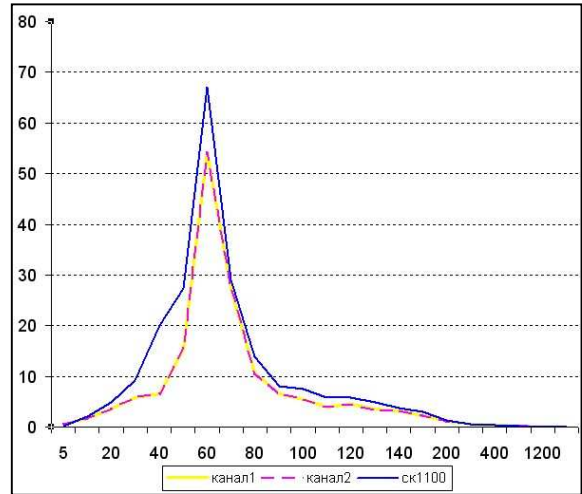


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика стенда, измеренная с помощью СТД-3300.

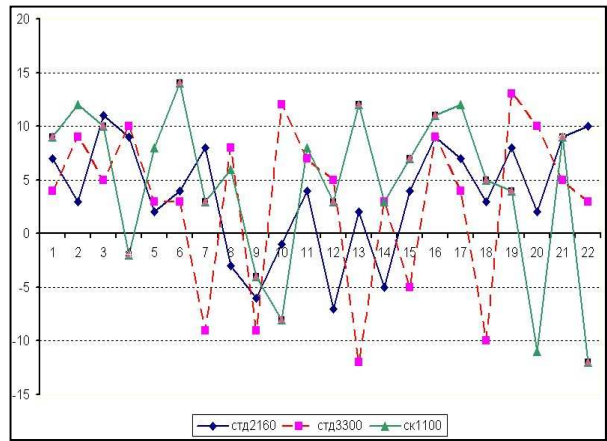


Рис. 5. Относительная погрешность.

Для определения технического состояния и диагностики основных дефектов мотор-вентиляторов электровозов по параметрам вибрации была создана программа «Вибродефект», которая работает с многоканальной аппаратурой «Спектр» для входного контроля.

На рис. 6 показано главное окно программы «Вибродефект».

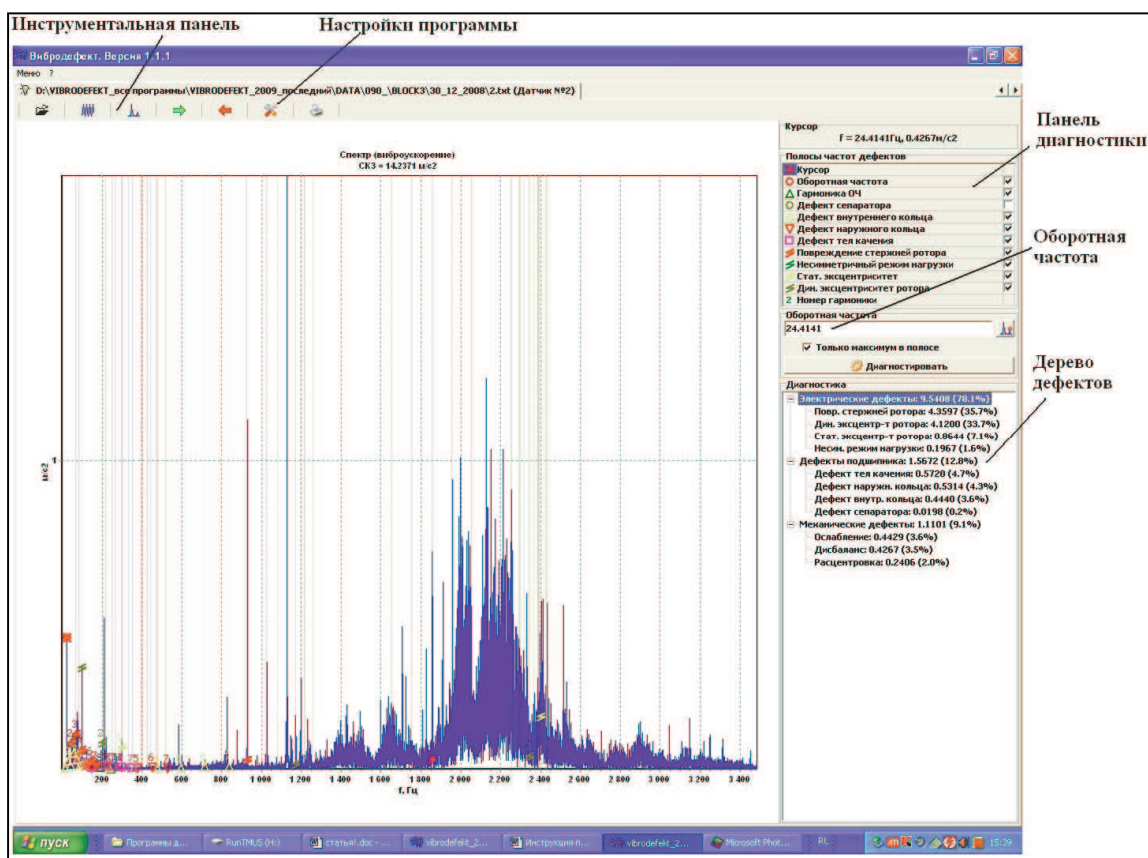


Рис. 6. Главное окно программы «Вибродефект».

Для определения технического состояния и диагностики необходимо загрузить данные датчиков в программу.

Предусмотрена одновременная работа с данными двух датчиков на двух отдельных закладках. Существует возможность отдельной загрузки данных каждого датчика.

После загрузки данных (виброускорений), измеренных каждым виброизмерительным модулем, определяются спектры виброускорения, виброскорости или виброперемещения, на основе которых диагностируются развивающиеся дефекты.

Работа с данными, полученными с датчиков, осуществляется с помощью *инструментальной панели*.

График виброданных занимает большую часть главного окна программы (рис. 6). С помощью левой кнопки мыши можно установить курсор в любую область графика.

Диагностика осуществляется на основе данных о спектральной плотности вибро-

скорости и значения *оборотной частоты*.

После получения спектральной плотности в правой части главного окна программы появляется *панель диагностики*. Панель диагностики находится в правой части главного окна программы (режим отображения спектральной плотности виброданных).

На данной панели можно задать режим визуализации полос частот различных дефектов

Результаты диагностики представляются в виде *дерева дефектов*.

В программе имеется функция генерации протокола вибродиагностики мотор-вентиляторов электровоза.

Протокол вибродиагностики формируется функцией генерации протокола вибродиагностики.

Все графы протокола заполняются автоматически, при условии соблюдения принятого порядка формирования папки

с измерениями МВ контролируемого электровоза.

Алгоритм диагностики заложен в программе.

Рекомендации по ремонту выдаются автоматически, в соответствии с алгоритмом.

Измерения, по которым делается рекомендация о ремонте или балансировке (т. е. имеющие СКЗ виброскорости выше 9 мм/с), а также измерения, отмеченные одной звездочкой (виброускорение выше 25 м/с<sup>2</sup>) или двумя звездочками (ПИК-фактор выше 6), рекомендуется дополнительно обработать вручную.

Высокое значение виброускорения (более 25 м/с<sup>2</sup>) свидетельствует о большой виброн нагруженности подшипника, а значит и высокой степени происходящего износа. При такой виброн нагруженности высока вероятность выхода из строя подшипника.

Высокий ПИК-фактор (более 6) свидетельствует о наличии ударных компонентов вибрации из-за ускоренного износа подшипника в настоящий момент или из-за ударов в люфтах и ослаблении крепления МВ и подшипника. После ускоренного износа и деградации подшипника, перед его выходом из строя СКЗ виброускорения увеличивается, а ПИК-фактор несколько снижается.

Высокое значение СКЗ виброскорости может быть вызвано высоким износом, требующим ремонта, высоким дисбалансом, требующим балансировки, либо из-за резонанса (на частоте 9,3 Гц) с работающим мотор-компрессором (обычно это бывает у мотор-вентиляторов, находящихся рядом с МК).

Высокое значение виброскорости может возникнуть также из-за некачественного крепления датчиков или низкочастотных резонансов.

Однако программа «Вибродефект» имеет ряд недостатков. В частности, данная программа очень чувствительна к точности определения оборотной частоты (в случае неправильного определения

оборотной частоты дает неправильный результат).

Для повышения точности анализа вибрации по спектру была создана программа «VibrAn», имеющая удобный интерфейс, а также алгоритм анализа частотных характеристик вибрации.

Задачи программы:

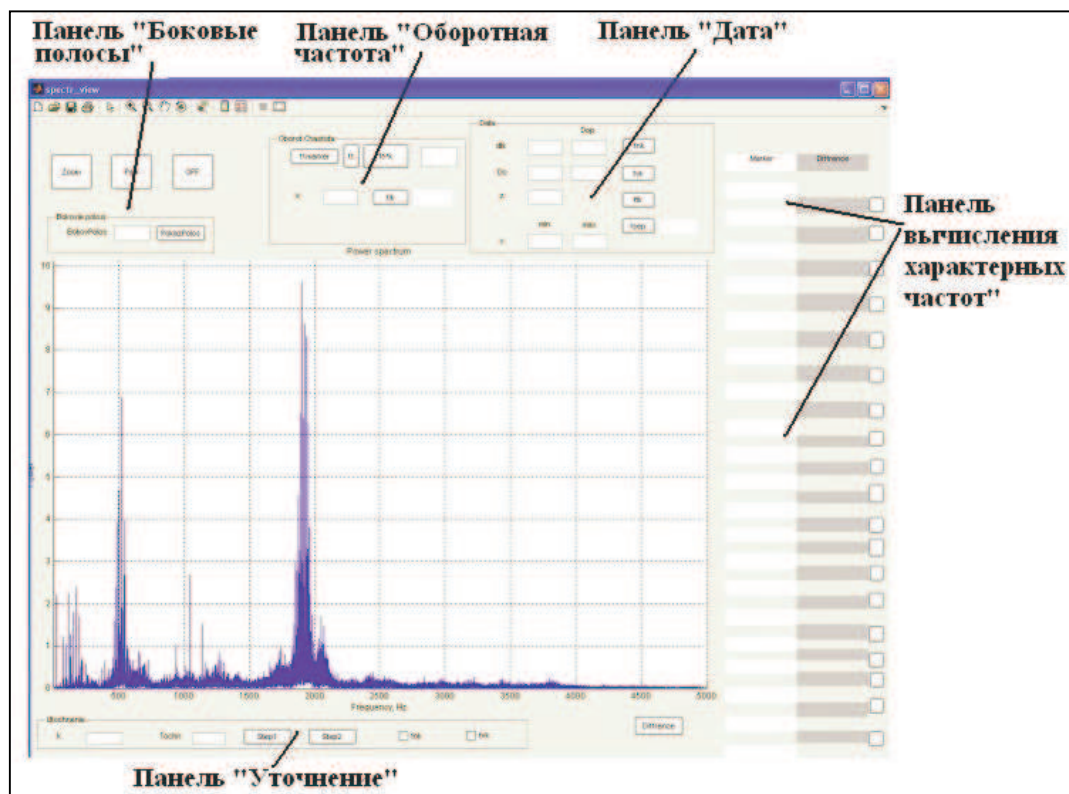
- Производить уточнение оборотной частоты.
- Вычислять характерные частоты дефектов подшипников, в том числе с учетом их износа.
- Визуализировать на спектре полосы характерных частот дефектов подшипников.
- Вычислять разности частот между заданными маркерами пиками.

Программа имеет пользовательский интерфейс, написанный при помощи среды GUIDE.

Графический интерфейс программы состоит из двух файлов `fft_ChAnd.fig` и `spectr_view.fig`, которые являются окнами временного и спектрального представления сигнала соответственно.

Эти файлы содержат всю информацию о графическом интерфейсе окон приложения: о количестве элементов управления (кнопок, списков, переключателей и т. д.), об их положении, размере, подписях, цвете. Программирование событий, связанных с элементами управления, производится в соответствующих `m`-файлах (`fft_ChAnd.m` и `spectr_view.m`), содержащих основные функции и множество подфункций.

Окно «`fft_ChAnd`» служит для загрузки данных о временном сигнале вибрации и визуализации сигнала на координатных осях, а также для проведения над этим сигналом операций дифференцирования и интегрирования, для получения по желанию пользователя временных сигналов виброускорения, виброскорости или вибро смещения. Главным же окном, о котором далее речь пойдет более подробно, является окно `spectr_view`, в котором и содержится основной аппарат анализа вибрации по спектру.



**Рис. 7. Главное окно программы «VibrAn».**

Для загрузки данных о временном сигнале вибрации (значения амплитуды вибрации в зависимости от частоты) для построения графика этого сигнала на координатных осях «WavePlot» в окне «fft\_ChAnd» служит меню File, созданное при помощи Menu Editor. Это меню содержит несколько пунктов: «Open ...», «Print ...», «Close».

Данная программа позволяет проинтегрировать временной сигнал или продифференцировать при помощи выбора соответствующего пункта списка «SpeedPopur» в окне «fft\_ChAnd».

После получения нужного сигнала его можно преобразовать в спектр по нажатию на кнопку «AllRangeBnt», имеющую подпись «All».

При нажатии пользователем кнопки «AllRangeBnt» запускается подфункция «AllRangeBnt\_Callback» обработки события «Callback» (нажатия на клавишу). Эта подфункция запрограммирована на преобразование сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Окно «spectr\_view» содержит весь инструмент для анализа вибрации, в центре окна находится график самого спектра (на осях «SpectrView»). В окне также находятся несколько панелей, содержащих кнопки, области ввода текста, области вывода текста и т. д.

Стандартная панель инструментов MathLab используется для увеличения-уменьшения масштаба выделенной части спектра («Zoom In» – «Zoom Out»), прокрутки спектра («Pan»), вращения спектра («Rotate 3D») и установки курсора («Data Cursor»).

Часто в анализе вибрации нужно знать расстояние между пиками. В программе реализован алгоритм вычисления разности между пиками, выделенными маркерами. В правой части окна «spectr\_view», под заголовками «Marker» и «Difference», вертикально друг под другом расположены два десятка областей вывода текста «Static Text»: значений частот пиков, выделенных маркерами, и разности частот пиков.

Для уточнения оборотной частоты используется панель «Oborot Chastota».

На спектре находится пик оборотной частоты, над ним ставится маркер, и значение оборотной частоты автоматически записывается в область вывода текста «text1» в правой части окна «spectr\_view».

По нажатию на кнопку «pushbutton37», имеющую подпись (свойство «String») «fmarker», находятся синхронные гармоники на спектре (гармоники оборотной частоты).

По нажатию на кнопку «pushbutton25», имеющую подпись «f1\*k», запускается подфункция «pushbutton25\_Callback» обработки события, запрограммированная на построение на спектре вибрации вертикальных линий на частотах, кратных частоте, записанной в область ввода текста «edit1» (линий гармоник теоретически рассчитанной оборотной частоты).

Пики, вершины которых пересекают эти линии, и есть пики гармоник оборотной частоты. На рис. 8 видно, что не все пики пересечены вертикальными линиями, что говорит о погрешности определения оборотной частоты. Ее нужно уточнить.

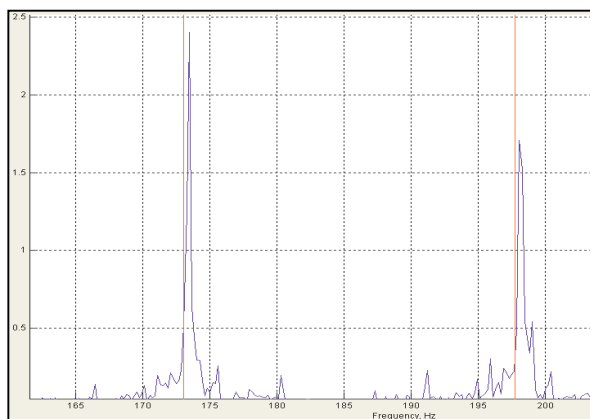


Рис. 8. Часть спектра с нанесенными на него вертикальными линиями (линии гармоник теоретически рассчитанной оборотной частоты).

• Пики, которые пересекаются с вертикальными линиями, как уже было сказано, являются гармониками, кратными

оборотной частоте, т. е., если найти частоту  $n$ -ой гармоники и разделить ее на  $n$ , получится уточненное значение оборотной частоты, причем, уточнение будет тем лучше, чем больше  $n$ . Это объясняется тем, что погрешность определения частоты по пику составляет половину шага по спектру.

• При уточнении значения оборотной частоты (рис. 9) линии гармоник оборотной частоты совпадают с пиками.

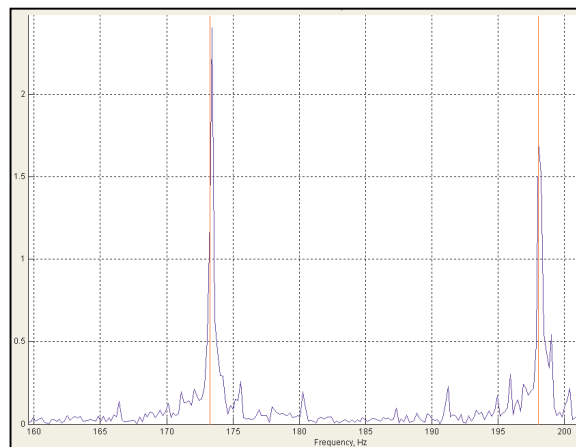


Рис. 9. Часть спектра с нанесенными на него вертикальными линиями гармоник уточненной оборотной частоты.

Панель «Data» служит для анализа подшипниковых дефектов. Она состоит из областей ввода текста (Edit Text), ввода характерных размеров подшипника; кнопок (Push Button) для вычисления и визуализации на спектре характерных частот дефектов подшипников и областей вывода текста (Static Text) для ввода текста комментариев.

Большинство дефектов проявляются на спектре вибрации в виде пиков на частотах, равных характерным частотам этих дефектов, с набором боковых полос. Боковые полосы смещены относительно центрального пика на определенный частотный интервал, который индивидуален для каждого вида дефекта.

К примеру, перекося внутреннего кольца и дефекты (раковины, трещины) внутреннего кольца проявляются на частотах:

$$kf_{вк} \pm n(f_1 - f_{cen}), \quad (5)$$



где  $n(f_1 - f_{cen})$  – частоты боковых полос.

Эта величина и отмечается маркерами на спектре вокруг характерной частоты дефекта. При совпадении маркеров с пиками на спектре они идентифицируются как соответствующие пики боковых полос дефекта. Тем самым идентифицируется дефект. Рассогласование частот дефектов, полученных теоретически и определенных на спектре, может свидетельствовать об изменении характерных размеров деталей (например, при износе колец подшипников) или о неточностях в определении этих размеров.

### *Выводы.*

Было создано устройство для измерения вибрации, которое позволяет измерять параметры в опасных зонах с возможностью дистанционного запуска процесса измерения и дистанционного приема данных.

Были проведены вибрационные испытания виброизмерительных модулей совместно с имеющейся аппаратурой СТД-2160 и СТД-3300 для определения и уточнения метрологических характери-

стик разработанной виброаппаратуры и настройки ее коэффициентов усиления.

Для повышения точности анализа вибрации и диагностики развивающихся дефектов по спектру была создана программа, имеющая удобный интерфейс, разработан алгоритм анализа частотных характеристик вибрации и идентификации некоторых конструктивных параметров диагностируемого оборудования.

### *Литература*

1. Вибрации в технике : справочник / под ред. Ф. М. Дименейберга, К. С. Колесникова. М.: Машиностроение, 1980. Т. 31. 544 с.
2. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов /Ф.Я. Балийкий [и др.]. М.: Наука, 1984. 120 с.
3. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В. В. Клюев [и др.] ; под ред. В.В. Клюева. 3-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2005. 656 с.
4. Ануфриев И. Е., Смирнов А. Б., Смирнова Е. Н. MATLAB 7. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 1104 с.

УДК 620.424.1

*В.А. Алексеев, А.В. Лукьянов\**

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ И ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

*Рассматривается возможность использования алгоритмов нечеткого логического вывода для комплексной оценки технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов, а также генетических алгоритмов для последующего обучения нечеткой модели.*

**Ключевые слова:** техническое состояние силовых трансформаторов, метод нечеткой логики, нечеткие модели, генетические алгоритмы.

**Система обслуживания по фактическому состоянию.** На сегодняшний день

планово-предупредительный ремонт является основным и наиболее методически

\* - автор, с которым следует вести переписку.