

ная калибровка двухволнового фотометра может быть проведена по (5). Для примера рассмотрим процедуру калибровки такого прибора, осуществляющего фотометрические измерения на длинах волн λ_1 и λ_2 . Для вычисления параметра x по (4) по процедуре Ленгли [1] определим $\tau(\lambda_2)$ и $\tau(\lambda_1)$. Далее из (5) найдем

$$C_1^{x-1} = \frac{I_0^x(\lambda_1) I_{1\Phi}(\lambda_2)}{I_0(\lambda_2) I_{1\Phi}^x(\lambda_1)}, \quad C_1 = x^{-1} \sqrt{\frac{I_0^x(\lambda_1) I_{1\Phi}(\lambda_2)}{I_0(\lambda_2) I_{1\Phi}^x(\lambda_1)}}.$$

Покажем, что предлагаемый сравнительный метод калибровки обладает существенно более высокой точностью по сравнению с методом диаграмм Ленгли. Предположим, что при реализации метода Ленгли из-за нестабильности атмосферных условий допущена погрешность Δ измерения в точке m_1 и, как результат, при экстраполяции m до нулевого значения получим

$$\Delta = \ln I_1'(\lambda) - \ln I_1(\lambda) = m_1 \operatorname{ctg} \alpha - m_2 \operatorname{ctg} \alpha'. \quad (6)$$

Согласно (6) для уменьшения Δ до нуля необходимо выполнение условий $m_1 = m_2$, $\operatorname{ctg} \alpha = \operatorname{ctg} \alpha'$, что невозможно.

В предложенном методе, как следует из (3), мультипликативные погрешности определения $\tau(\lambda_2)$ и $\tau(\lambda_1)$ полностью компенсируются. Так, если значение $\tau(\lambda_2)$ определено с мультипликативной погрешностью $k(\lambda_2)$, а $\tau(\lambda_1)$ — с мультипликативной погрешностью $k(\lambda_1)$, то x выражается как

$$x = k(\lambda_2) \tau(\lambda_2) / [k(\lambda_1) \tau(\lambda_1)].$$

При этом устранение мультипликативной погрешности, т. е. достижение условия $k(\lambda_2) = k(\lambda_1)$, вполне реально, если измерения на близких длинах волн λ_1 и λ_2 осуществляются параллельно. Итак, в предложенном методе относительной калибровки происходит почти полная компенсация мультипликативной погрешности, что недостижимо в методе диаграмм Ленгли.

Таким образом, проведенное исследование показало, что используемый метод калибровки солнечных фотометров должен соответствовать методу измерений, используемому в калибруемом приборе. Предложен двухволновый метод относительной калибровки солнечных фотометров, реализующих двухволновый метод измерений, при котором мультипликативная погрешность может быть полностью устранена.

Л и т е р а т у р а

1. Langlay analyses. [Электрон. ресурс]. http://www.agu.org/pubs/toc/g1/g1/g1_1991/1999GL900267/nde3.html (дата обращения: 13.10.2011 г.).

2. Asadov H. H., Chobanzadeh I. G. New method for calibration of Sun photometers // Chinese Opt. Lett. 2009. V. 7. N 9. P. 760—763.

Дата принятия 13.12.2011 г.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

625.1:656.2

Моделирование виртуальных эталонов вибрации дефектных подшипниковых узлов

В. Ю. ТЭТТЕР, Е. Н. СИДОРОВ, Е. А. СИДОРОВА

ООО «Резерв», Омск, Россия, e-mail: tetterv@mail.ru

Предлагается новый класс тестовых сигналов вибрации — виртуальные эталоны дефектных подшипников. Описаны возможные способы реализации таких сигналов. Обосновано получение тестовых сигналов вибрации путем восстановления временного сигнала из трех видов спектров. Приведены результаты математического моделирования.

Ключевые слова: вибродиагностика, виртуальный эталон, моделирование, временной сигнал, спектр, дефект, восстановление.

It is proposed to introduce the use of a new class of test vibration signals — the virtual standards of defective bearings. The possible ways of such signals realization are described. A method of receiving the vibration test signal by recovery of time signal from three kinds of spectra. The results of mathematical modelling are presented.

Key words: vibration diagnostics, virtual standard, modelling, bearings, time signal, spectrum, defect, recovery.

Сигналы вибрации от вращающихся механических узлов, в частности, подшипников качения, являются источником информации об их техническом состоянии. Современное вибродиагностическое оборудование (ВДО) на основе анализа этих сигналов позволяет определять техническое состояние роторных механических узлов. При этом для диагностики

можно иметь как временной сигнал, так и спектральную область. Во многих отраслях промышленности и транспорта ВДО стало неотъемлемой частью технологических процессов производства, ремонта и эксплуатации. В частности, на железных дорогах России наибольшее распространение получили около пяти типов ВДО. Такое оборудование явля-

ется совсем не дешевым: например, стоимость серьезных программно-аппаратных комплексов (экспертных систем) составляет более 20 тыс. долл. По экспертным оценкам на российских железных дорогах используется около 1000 единиц такого оборудования, и его внедрение продолжается. В связи с этим особенно актуальными становятся проблемы оптимального выбора типа ВДО для конкретных задач и объективной проверки его функциональных возможностей.

Разработчики и производители ВДО декларируют возможность определения отдельных видов дефектов и степени их развития. Но при калибровке (поверке) это никак не проверяется. Проверяют такие метрологические характеристики, как динамический диапазон, ширину полосы пропускания частот, разрешение по частоте при спектральном анализе, минимальный уровень входного сигнала и другие. Подтверждение только заявляемых производителем метрологических характеристик ВДО не является для заказчиков убедительным фактом эффективности работы. Это вполне понятно, так как их значения лишь косвенно характеризуют потенциальные возможности ВДО. Сами по себе хорошие метрологические показатели не являются гарантией того, что с его помощью можно будет успешно выявлять и идентифицировать дефекты в диагностируемых узлах. Это только необходимое, но не достаточное условие эффективной работы диагностического оборудования.

Эффективность во многом определяется применяемыми методами обработки и анализа сигналов вибрации и частоты вращения, которые реализуются, в основном, программно. В области программного обеспечения наблюдается наиболее активное соперничество разработчиков и производителей, так как используемые методы, алгоритмы идентификации дефектов являются предметом «ноу-хау» и вносят значимую долю в стоимость ВДО. Потребителя, в конечном счете, мало интересуют численные значения метрологических параметров. Он должен быть уверенным в том, что ВДО будет четко выполнять задачи идентификации дефектов и определения степени их развития в диагностируемых узлах. Регламентированной процедуры проверки заявляемых свойств на настоящий момент не существует.

С целью решения этих проблем было предложено ввести новый вид тестовых сигналов — виртуальные эталоны дефектов (ВЭД) [1]. По новому, развивающемуся направлению — виртуальным эталонам — в России пока еще немного научных работ, например [2, 3], а зарубежных публикаций по этой тематике авторам найти не удалось.

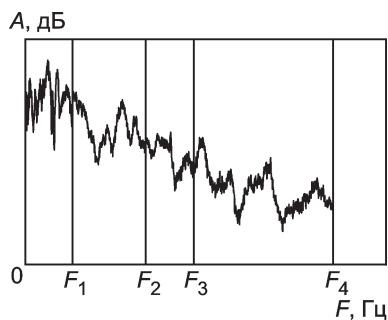


Рис. 1. Схема разделения широкополосного спектра на участки, используемые в процедуре восстановления временного сигнала

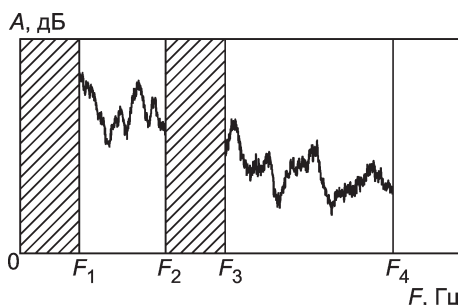


Рис. 2. Широкополосный спектр с обнуленными (вырезанными) участками (0, F_1) и (F_2 , F_3)

Под ВЭД будем понимать модель временного сигнала вибрации (виброускорения, виброскорости или виброперемещения), полученного (записанного) от реального объекта, содержащего подшипник с известным дефектом (или дефектами). Виртуальные эталоны как тестовые сигналы должны обладать обязательным набором свойств [4], основными из которых являются воспроизводимость и повторяемость, малая погрешность воспроизведения, стабильность характеристик, возможность тиражирования.

Для физического воспроизведения колебаний кроме ВЭД потребуется эталонное (прецизионное) оборудование. Полунатурное моделирование (воспроизведение) колебаний предполагает использование блока памяти (цифрового носителя); цифроаналогового преобразователя (ЦАП); регулируемого усилителя; управляемого вибростолика (вибровозбудителя). Блок памяти осуществляет хранение и накопление информации в цифровой форме (здесь не рассматривается вариант, основанный на носителях информации аналогового вида).

Обычно при вибродиагностировании проводится и контроль частоты вращения роторного механизма. В связи с этим полезно было бы воспроизводить (имитировать) сигнал частоты вращения, например, в виде электромагнитных импульсов (для индуктивных датчиков).

Модели сигналов ВЭД могут быть получены несколькими способами. Первый и самый очевидный способ заключается в обработке результатов активных экспериментов, которые предполагают сборку и прокрутку подшипниковых узлов с заранее известными и прошедшими процедуру классификации дефектами. Сигналы вибрации, записанные в результате эксперимента, по сути и будут виртуальными эталонами. Второй способ — это синтез временного сигнала вибрации по заранее выбранным параметрам и свойствам его характеристических составляющих.

Эти способы имеют ряд существенных недостатков, среди которых — высокая (практически неприемлемая) трудоемкость при получении сигнала первым способом и недостаточная информативность синтезированного сигнала при втором.

С учетом указанных обстоятельств был предложен новый оригинальный способ восстановления временного сигнала из множества уже существующих наборов спектров, которые накоплены в базах данных в результате эксплуатации ВДО (файлы временных сигналов не сохраняются из-за большого объема занимаемой памяти). Базы данных содержат также информацию о фактическом техническом состоянии забракованных узлов, которое определяется в результате их разборки.

В комплексах «Вектор-2000», СД-12, «Прогноз-1М», «Прогноз-3», «Эксперт-Д» и др. в результате диагностирования формируются три вида спектров — широкополосный, прямой и огибающей. При формировании из исходного временного сигнала спектров трех видов выполняются определенные математические операции. Как правило, они носят ограничительный характер, связанный с потерей информации, например, выделение из сигнала составляющих в ограниченной полосе частот при использовании аналоговых и цифровых фильтров. Свою долю в искажение сигнала вносят конечная разрядность и частота дискретиза-

ции аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В связи с этим сигнал, восстановленный из спектра какого-то одного вида по свойствам будет сильно отличаться от исходного и не может быть принят в качестве тестового. Этот тезис был подтвержден результатами как экспериментов, так и математического моделирования в среде «MatLab 6.5».

Для получения модели временного сигнала с характеристиками, минимально отличающимися от характеристик исходного сигнала (восстановление с минимальной потерей информации), было предложено использовать в процедуре восстановления спектры всех трех видов. Процедура восстановления сигнала предложенным способом основана на применении к ним обратного преобразования Фурье и последующем микшировании полученных временных зависимостей.

Изначально широкополосный спектр исходного временного сигнала делится на четыре участка (рис. 1): $(0, F_1)$, (F_1, F_2) , (F_2, F_3) , (F_3, F_4) , где F_1 — граничная частота прямого спектра; F_2, F_3 — нижняя и верхняя границы полосового фильтра для спектра огибающей; F_4 — граничная частота широкополосного спектра (25600 Гц).

Прямой спектр в соответствии с характеристиками фильтра, используемого при его получении из исходного временного сигнала, содержит более подробную информацию о низкочастотной области исходного сигнала, так как он имеет гораздо более мелкий шаг по частоте по сравнению с широкополосным спектром. Поэтому восстановленный сигнал будет ближе всего к исходному только в этой низкочастотной области. Из прямого спектра $(0, F_1)$ формируется (восстанавливается) временной сигнал S_1 . Затем из широкополосного спектра выбирается участок, ограниченный частотами F_1 и F_2 . Из выделенного на этом участке спектра формируется временной сигнал S_2 . Спектр огибающей содержит подробную информацию об амплитудной модуляции сигнала, и для его получения используется полосовой фильтр с граничными частотами F_2 и F_3 , что также учитывается в процедуре восстановления. Из спектра огибающей формируются временной сигнал S_3 , затем сигнал S_4 , который является результатом амплитудной модуляции сигнала S_2 сигналом S_3 . Для восстановления сигнала из широкополосного спектра используются участки, не охваченные первыми двумя случаями, т. е. берется широкополосный спектр с вырезанными из него участками в низкочастотной области от 0 до F_1 и в полосе частот от F_2 до F_3 — полосе для выделения спектра

оглавающей (рис. 2). К выделенным участкам спектра применяется процедура обратного преобразования Фурье, в результате чего формируется временной сигнал S_5 . В итоге модель исходного временного сигнала будет представлять собой сигнал, полученный в результате микширования временных зависимостей S_1, S_4 и S_5 :

$$S = S_1 + S_4 + S_5.$$

Важным моментом исследования является оценка «качества» полученных в результате восстановления сигналов. Для этого были определены критерии оценивания и их численные значения. Критериями сравнения исходного и восстановленного сигналов были выбраны [4]:

параметры временного сигнала — среднеквадратическое значение (СКЗ), пик-фактор, фактор Куртозиса;

максимальная разница амплитуд отдельных спектральных составляющих;

степень совпадения диагнозов после автоматического спектрального анализа диагностической программой Vibroinf.

Ниже приведены результаты исследований по моделированию сигналов вибрации. Исходными данными послужила выборка временных сигналов, которые были получены в результате прокрутки дефектных и бездефектных подшипников грузовых вагонов на экспериментальном стенде. Для экспериментов были взяты подшипники с наиболее характерными (часто встречающимися при эксплуатации) дефектами: раковинами и трещиной наружного кольца, трещиной ролика, изломом сепаратора.

В программной среде «MatLab 6.5» были рассчитаны параметры исходного и восстановленного временных сигналов вибраций. Полученные значения параметров приведены в таблице.

Диагностические параметры временных сигналов

Диагностический параметр	Исходный сигнал	Восстановленный сигнал
Среднее значение	-0,0992	0,0575
Минимальное значение	-30,1003	-28,4815
Максимальное значение	30,9601	26,6301
СКЗ	5,2840	5,1992
Пик-фактор	5,8592	5,4780
Фактор Куртозиса	3,1295	3,0456

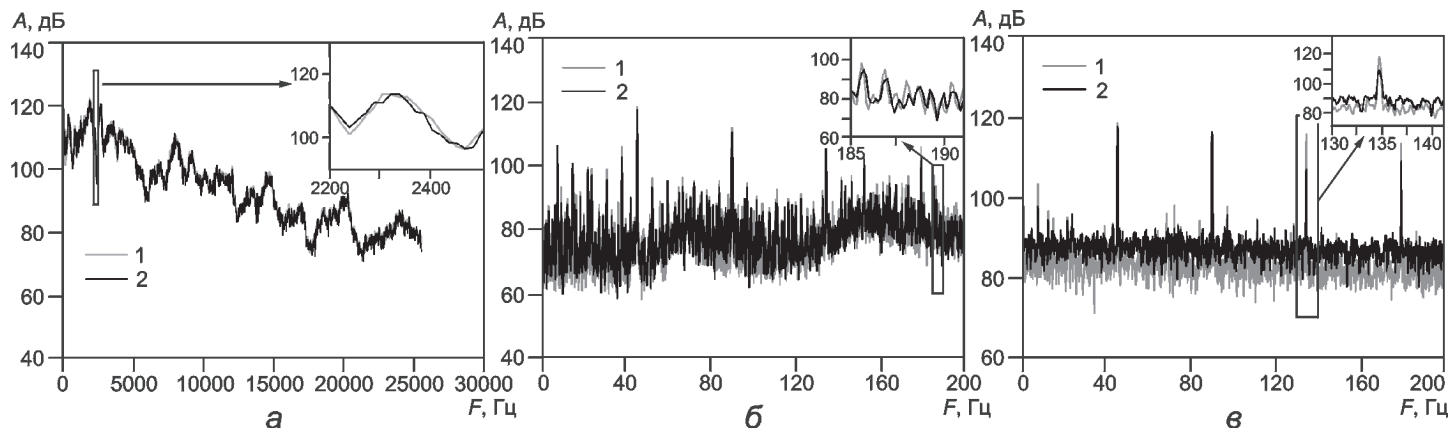


Рис. 3. Спектры широкополосные (а), прямые (б) и огибающей (в) исходного 1 и восстановленного 2 временных сигналов

Как уже было сказано, временной сигнал восстанавливался из спектров трех видов. Для сравнения результатов автоматического спектрального анализа была проведена процедура диагностирования сигнала с использованием модуля Vibroinf, получены наборы спектров к исходным (рис. 3).

Кроме сравнения окончательных заключений о допуске или недопуске подшипника к эксплуатации сравнивали подробные результаты спектрального анализа с указанием диагностических признаков отдельных дефектов (наличие характерных частот и их гармоник, процент глубины модуляции для характеристической частоты).

Проведенные исследования моделирования сигналов вибрации дефектных подшипниковых узлов показали, что процедуру восстановления временных сигналов из спектров трех видов можно использовать для формирования ВЭД подшипников (моделей тестовых временных сигналов). При помощи ВЭД можно проверять функциональные возможности ВДО в процессе выбора, также они могут служить в качестве тестовых сигналов для периодической проверки работоспособности подшипников при эксплуатации. В данном случае был рассмотрен пример использования ВЭД для подшипников качения, но такие виртуальные эталоны могут

быть созданы для любых других роторных механических узлов.

Л и т е р а т у р а

1. Тэттер В. Ю. Эталоны неисправностей для диагностики роторных механических узлов // Мир измерений. 2007. № 10. С. 14—19.
2. Кузнецов А. А. Дополнение теории спектрального анализа материалов элементами оценки физико-механических свойств и использования виртуальных эталонов: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. Омск, 2007.
3. Ермишин С. М. Возможности создания виртуальных эталонов // Измерительная техника. 2002. № 10. С. 10—13; Ermishin S. M. Possibilities for creating virtual standards // Measurement Techniques. 2002. V. 45. N 10. P. 1007—1011.
4. Тэттер В. Ю., Молодова Е. В. Реализация вибрационных эталонов неисправностей подшипников колесно-моторных блоков локомотивов // Энергосберегающие технологии, контроль и управление для предприятий железнодорожного транспорта: Межвуз. тематич. сборник науч. трудов / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2011. С. 31—34.

Дата принятия 25.09.2012 г.

681.121:621.317:537.321

Магнитный расходомер жидких металлов

И. Д. ВЕЛЬТ, Ю. В. МИХАЙЛОВА

НИИ Теплоприбор, Москва, Россия, e-mail: veltivand@gmail.com

Описан магнитный расходомер для жидкого натрия, индуктор которого представляет собой электромагнит, генерирующий импульсное низкочастотное магнитное поле. В результате полностью исключено воздействие внешних помех промышленной частоты, существенно снижено влияние ТЭДС, вихревых токов и т. д. Рассмотрены конструкция расходомера, его технические характеристики и методика поверки.

Ключевые слова: магнитный расходомер, жидкий натрий, импульсное низкочастотное магнитное поле.

The magnetic flowmeter for liquid sodium in which inductor represents an electromagnet creating a pulsed variable low-frequency magnetic field is described. As a result of the alternating magnetic field is completely excluded the influence of external noise power frequency, significantly reduced the influence of thermo-emf, virtually eliminated the influence of eddy currents, etc. The flowmeter design, its technical characteristics and checking technique are considered.

Key words: electromagnetic flowmeter, the liquid metal, pulsed magnetic field.

Жидкие металлы (натрий, калий и их эвтектики, литий, эвтектики свинца и висмута) используют в качестве теплоносителей в атомных энергетических установках. При этом возникает потребность в расходомерах для теплоносителей, способных работать в условиях, близких к экстремальным. Повышенная температура (400—525 °С), сложная радиационная обстановка, а также чрезвычайно высокие требования к надежности существенно ограничивают выбор методов измерений и конструкций приборов.

Наиболее распространенные расходомеры для жидкометаллических теплоносителей основаны на электромагнитном методе измерения. В них обеспечивается прямое преобразование расхода в электрический сигнал в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея. Примени-

тельно к жидким металлам эти приборы принято называть магнитными расходомерами. Они отличаются от других средств измерений расхода жидких металлов прежде всего тем, что информативный сигнал определяется интегральным значением скорости потока по поперечному сечению трубопровода, т. е. расходом. В измерительном канале прибора отсутствуют какие-либо препятствия потоку, искажающие эпюру скоростей. Показания расходомеров мало зависят от изменения физических свойств измеряемой среды: плотности, вязкости, электрической проводимости и распределения скорости потока в канале.

Физические основы измерения расхода. Движение жидкого металла в магнитном поле вызывает появление в нем электрического поля, напряженность E которого равна век-