

УДК 685.518.5

АЛГОРИТМЫ УТОЧНЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА В ЗАДАЧАХ ВИБРОДИАГНОСТИКИ РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ю.П. АСЛАМОВ, А.П. АСЛАМОВ; канд. тех. наук И.Г. ДАВЫДОВ; А.В. ЦУРКО
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Рассматриваются автоматические системы вибрационной диагностики, позволяющие решать задачи оценки технического состояния роторного оборудования без привлечения экспертов. Показано, что информативные признаки дефектов в частотной области в высокой степени зависят от скорости вращения валов оборудования; в случае недостоверного определения частоты вращения основного вала это приводит к некорректной работе систем диагностики. Для повышения стабильности и точности работы автоматических систем вибродиагностики в частотной области предложены алгоритмы уточнения частоты вращения вала по сигналу вибрации без использования дополнительных устройств.

Ключевые слова: вибродиагностика, цифровая обработка сигналов, частотная область.

Введение. В настоящее время для оценки технического состояния роторного оборудования используются методы обработки вибросигналов в частотной, временной и частотно-временной областях [1–3]. В большинстве случаев конкретному типу неисправности элемента оборудования соответствует определенная дефектная частота. Например, раковины и трещины на внутреннем/наружном кольце подшипника качения будут порождать ударные процессы с частотой повторения, равной частоте перекачивания тел качения по внутреннему/наружному кольцу (*BPFI / BPFO*) [4].

$$BPFI = F1 \cdot \frac{Nb}{2} \left(1 + \frac{Bd}{Pd} \cos(\theta) \right); \quad (1)$$

$$BPFO = F1 \cdot \frac{Nb}{2} \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \cos(\theta) \right), \quad (2)$$

где $F1$ – частота вращения вала; Nb – количество тел качения; Bd – диаметр тела качения; Pd – диаметр делительной окружности; θ – угол контакта.

Как и в случае с подшипниками качения, большинство элементов роторного оборудования имеет дефектные частоты, пропорциональные скоростям вращения валов, на которых данные элементы установлены. Совокупность всех возможных дефектных частот оборудования образует сетку частот. На основе кинематической схемы сетка частот может быть пересчитана относительно скорости вращения первичного вала, по которому к оборудованию передается крутящий момент от мотора.

В процессе эксплуатации оборудования скорость вращения первичного вала не является постоянной величиной, вследствие изменения режима работы, нагрузки, различной степени изношенности элементов и т.д. Таким образом, сетка частот будет постоянно растягиваться или сжиматься вслед за соответствующим увеличением или уменьшением скорости вращения первичного вала. Подобные деформации частотной сетки снижают эффективность использования систем автоматической вибродиагностики вследствие увеличения вероятности ложной тревоги и вероятности пропуска дефекта при анализе во временной и частотной областях.

Авторы представленной работы предлагают использовать методы уточнения частоты вращения валов роторного оборудования на основе анализа вибрационного сигнала в частотной области. Описанные в настоящей работе алгоритмы уточнения на основе спектральной интерференции и валидации информативных признаков дефектов оборудования предполагают наличие кинематической схемы оборудования. В работе кратко излагаются основы предложенных методов и приводятся результаты их применения.

Основная часть. Если допустить, что диагностируемое оборудование описывается простой кинематической схемой, состоящей из одного вала, уточнение частоты вращения вала $F1$ осуществляется в спектре виброускорения посредством поиска одного единственного пика в окрестности номинальной частоты $F1_{ном}$. Отсутствие же искомого спектрального компонента означало бы невозможность уточнения.

Однако в большинстве практических случаев степень неопределенности при уточнении частоты значительно выше вследствие высокой сложности кинематических схем, различной степени изношенности отдельных элементов оборудования, большого расстояния между датчиком вибрации и диагностируемым элементом и т.д. В этом случае сетка частот содержит большое количество дефектных частот, которые могут «размываться», перекрываться с другими, содержать ряды субгармоник, быть слабо выраженными или отсутствовать вовсе.

Зачастую корректному уточнению частоты во временной области препятствуют высокий уровень шума и слабая выраженность ударных процессов сигнала. Для большей части роторного оборудования скорость вращения вала в пределах длительности снимаемого сигнала вибрации есть величина квазипостоянная (с незначительными флуктуациями), поэтому уточнение частоты целесообразно выполнять на основе преобразования Фурье, обладающего высокой разрешающей способностью в частотной области. В данной работе рассматриваются методы на основе спектральной интерференции и валидации информативных признаков.

Дефект элемента оборудования может быть обнаружен в спектре вибрации и спектре огибающей вибрации по так называемому шаблону дефекта – специальному набору дефектных частот. По мере развития дефекта шаблон изменяется. В существующем наборе компонент происходит перераспределение энергии, появляются новые и исчезают ранее наблюдавшиеся спектральные составляющие, модуляции. Например, при дисбалансе центр масс вала не лежит на оси вращения, поэтому неуравновешенная масса, вращаясь вместе с ротором, создает гармонические колебания в опоре. Вибрация неуравновешенного ротора проявляется в виде синусоидальных колебаний с частотой вращения вала, и в спектре колебаний при этом присутствует значительный пик на частоте F_1 [3].

В другом случае наличие несоосности между ведущим и ведомым валами характеризуется набором спектральных компонент в спектре колебаний $1 \cdot F_1 \dots n \cdot F_1$, где $n < 11$, при этом доминирующими будут 1-я и/или 2-я, высокий уровень будут иметь 3-я и 4-я, а низкий $m \cdot F_1$, где $m = 5 \dots 10$.

Спектральные компоненты вала могут присутствовать как в спектре, так и в спектре огибающей виброускорения. Заключение о наличии/отсутствии дефекта вала (дисбаланса, несоосности, изогнутости, эксцентриситета, биений, ослабления креплений и т.д.), а также оценка их степени опасности делается после анализа спектров, так как появление спектральных компонент $n \cdot F_1$ может быть вызвано как самими дефектами вала, так и дефектами элементов, установленных на нем. Например, шаблон дефекта вала, обнаруженный в спектре огибающей виброускорения и не продублированный в спектре виброускорения (виброскорости или виброперемещения), во многих случаях является следствием дефектов других элементов оборудования (подшипников, зубчатых передач и т.д.) [1; 4].

С точки зрения уточнения частоты вращения вала спектр вибрации и спектр огибающей вибрации дополняют друг друга, так как наличие компонент вала в одном из них не означает появление их в другом. Методы уточнения частоты вращения вала в спектральной области основаны на допущении, что в спектре присутствует набор валовых компонент $n \cdot F_1$, $n > 1$ и флуктуации частоты вращения происходят в диапазоне

$$R(F1_{nom}, delta) = F1_{nom} [1 - delta; 1 + delta], \quad (3)$$

где $F1_{nom}$ – номинальная частота вращения вала; $delta < 0,1$ – возможное отклонение частоты вращения вала.

Авторами статьи для уточнения частоты вращения вала выбраны спектр виброперемещения и спектр огибающей виброускорения. Виброперемещение получается путем двойного интегрирования во временной области сигнала виброускорения, поступающего от акселерометра. Спектр виброперемещения обладает узкой полосой частот 0...100 Гц и содержит ярко выраженные валовые составляющие. В свою очередь, спектр огибающей виброускорения позволяет уточнить частоту по валовым компонентам, полученным в результате ударных процессов других дефектных элементов оборудования.

Уточнение частоты на основе спектральной интерференции. Пусть имеется кинематическая схема, устанавливающая взаимосвязь между N валами оборудования, и известна номинальная частота вращения первичного вала $F1_{nom}$. В таком случае может быть рассчитана номинальная частота вращения каждого вала f_i и сформирован вектор $[f_1 \dots f_N]$. Для каждого значения f_i рассчитывается вектор кратных гармоник:

$$\mathbf{f}_i = [f_{i1} \dots f_{iM}], \quad (4)$$

где $f_{ij} = j \cdot f_i$ – j -тая гармоника частоты вращения i -того вала; $M < 10$ – количество гармоник i -того вала.

На основе полученной сетки частот \mathbf{f} для каждого i -того вала в спектре виброперемещения и спектре огибающей виброускорения формируется набор кадров \mathbf{Fr}_i :

$$\mathbf{Fr}_i = [Fr_{i1} \dots Fr_{in}], \quad (5)$$

$$Fr_{ij} = S(R(f_{ij}, delta)), \quad (6)$$

где Fr_{ij} – фрагмент спектра вибрации (кадр) для j -той гармоники i -того вала; $S(f)$ – спектр вибрации.

Как следует из (3) и (6), каждый последующий кадр будет в j раз длиннее оригинала, что позволяет избежать относительного смещения валовых частот от кадра к кадру. Это значит, что если в первом кадре действительная частота f_{real} смещена относительно номинального значения f_{nom} на df , то во втором раз-

ница будет $2df$. Полученные кадры нормируются по амплитуде и длине. Выравнивание по длине осуществляется посредством сплайн-интерполяции, что особенно актуально при низкой частоте дискретизации или низкой скорости вращения вала.

Спектральная интерференция в таком случае есть процедура перемножения набора нормированных кадров i -го вала для получения узкого ярко выраженного пика:

$$SI(f_i) = \prod_{j=1}^M \overline{Fr_{ij}}, \quad (7)$$

где $\overline{Fr_{ij}}$ – нормированный по высоте и длине кадр Fr_{ij} .

При наличии набора спектральных компонент $nF1$ полученная спектральная картина будет содержать ярко выраженный пик на частоте $F1$. Влияние на результат иных спектральных компонент, не равных и не кратных $F1$, будет нивелироваться при $n > 2$. Для предотвращения размытия интерференционной картины была введена дополнительная процедура проверки кадров на количество и выраженность спектральных компонент внутри них. При несоответствии требованиям кадр отбраковывается.

Результаты интерференции для каждого вала представляют собой интерференционные картины с одним или несколькими пиками. Полученные результаты, как и спектральные кадры на предыдущем шаге, подвергаются нормированию и верификации. Спектральная интерференция полученных нормированных результатов дает интерференционную картину в окрестности частоты вращения первичного вала, а позиция максимального пика – действительную частоту вращения первичного вала.

Структурная схема предлагаемого алгоритма уточнения частоты вращения вала на основе спектральной интерференции представлена на рисунке 1.

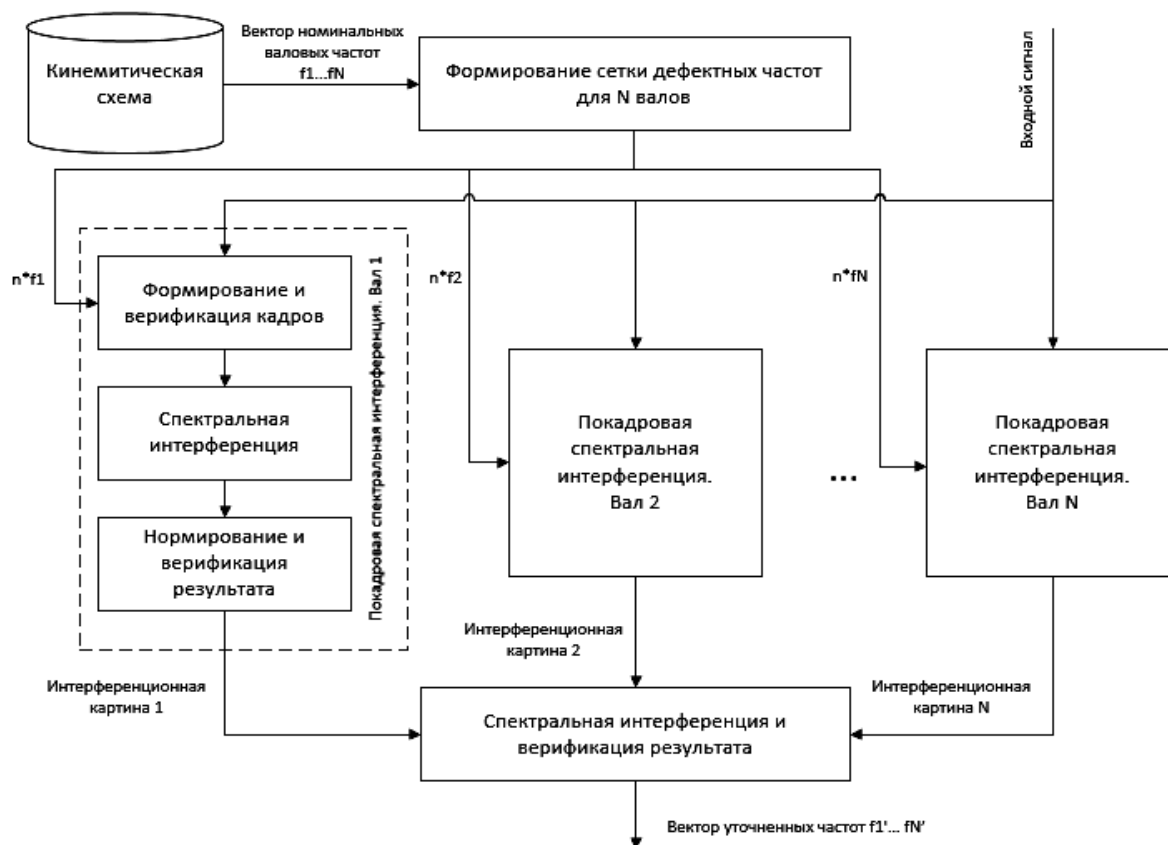


Рисунок 1. – Схема алгоритма уточнения на основе спектральной интерференции

Приведенная на рисунке 1 структурная схема применяется для анализа как спектра виброперемещения, так и спектра огибающей виброускорения. В зависимости от типа оборудования, наличия/отсутствия дефектов, их типов и выраженности, уточнение частоты может производиться в каждом спектре в отдельности и в обоих спектрах одновременно. Последний вариант обладает большей точностью и стабильностью, особенно для кинематических схем с двумя и более валами.

Уточнение частоты на основе валидатора информативных признаков. Как упоминалось выше, повышение точности и стабильности работы метода уточнения на основе спектральной интерференции достигается за счет совместной обработки в спектре виброперемещения и спектре огибающей виброускорения. В этом случае возможны следующие результаты работы алгоритма спектральной интерференции:

- 1) результаты уточнения в обоих спектрах совпадают;
- 2) уточнение возможно только в одном из спектров;
- 3) уточнение в обоих спектрах дает различные результаты;
- 4) уточнение невозможно ни в одном из спектров.

Для устранения неопределенности при принятии решений в случае 2) (при слабой выраженности пика) и случае 3) требуется дополнительный метод. Авторами статьи предложен метод уточнения частоты вращения вала на основе валидатора информативных признаков.

Иногда при наличии в оборудовании дефектных элементов валовые компоненты $n \cdot F1$ в спектре огибающей виброускорения либо полностью отсутствуют, либо имеют слабую выраженность. Это приводит или к некорректному уточнению частоты, или к невозможности уточнения в целом. В таком случае уточнение может быть произведено на основе анализа всей дефектной сетки частот оборудования.

Каждый класс элемента оборудования имеет набор основных дефектных частот. Например, для подшипника качения свойственны следующие частоты: $F1$ – частота вращения вала; BSF – частота вращения тела качения; $BPFO$ – частота перекатывания тел качения по наружному кольцу; $BPMI$ – частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу; FTF – сепараторная частота. Большинство дефектных частот элементов оборудования рассчитываются относительно скорости вращения вала, на котором данные элементы установлены. Таким образом, уточнение частоты можно осуществить, правильно определив дефектные частоты в спектре и переведя их в частоту вращения первичного вала. Однако сетка частот, сформированная только на векторах основных дефектных частот, недостаточна для корректного уточнения в этом случае, что обусловлено следующими факторами:

1) шаблоны дефектов могут содержать два типа спектральных составляющих: одиночные ($F1$, $BPMI$ и т.д.) и модуляционные ($n \cdot F1 - m \cdot FTF$ и т.д.). Количество и тип спектральных составляющих находится в строгом соответствии с шаблоном дефекта, поэтому для корректного составления сетки частот следует использовать базу шаблонов дефектов;

2) сетка частот всего оборудования имеет значительно больший объем составляющих, чем сетка частот валов оборудования. Это приведет к перекрытию большого количества спектральных составляющих, присваиванию неверных меток и т.д. Для верификации найденных спектральных составляющих требуется набор правил на основе нечеткой логики для проверки гипотез;

3) метод на основе спектральной интерференции непригоден для анализа всей сетки частот вследствие высокой неопределенности при принятии решений.

На базе описанных выше факторов авторами разработан алгоритм уточнения частоты вращения вала на основе валидатора информативных признаков. Структурная схема предложенного алгоритма представлена на рисунке 2.

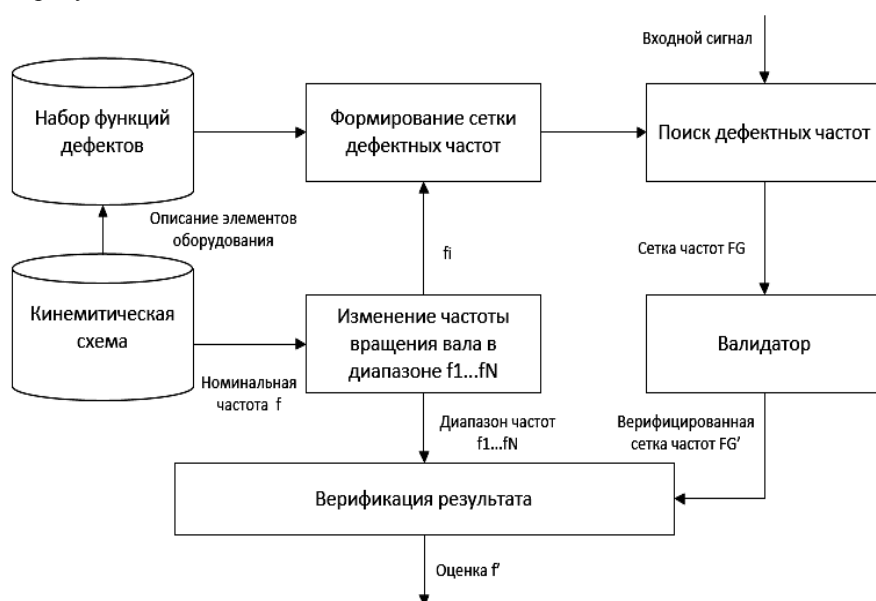


Рисунок 2. – Уточнение частоты вращения вала на основе валидатора информативных признаков

Валидатор – это алгоритм верификации сетки дефектных частот оборудования. Работа валидатора схожа с работой эксперта по вибродиагностике, сопоставляющего найденные спектральные составляющие с возможными дефектными частотами элементов оборудования.

Алгоритм уточнения частоты на основе валидатора информативных признаков базируется на следующем предположении. При наличии исчерпывающей кинематической схемы оборудования и полной корректно сформированной сетки частот (информативных признаков) действительному значению частоты вращения первичного вала будет соответствовать максимальное количество валидных дефектных частот. Под валидными понимаются дефектные частоты, которые хорошо согласуются с шаблоном дефекта, имеют достаточную выраженность, рядность и т.д. Описанные правила реализованы на основе нечеткой логики (fuzzy logic). Формируется три набора дефектных частот для обработки (по трем порогам выраженности в логарифмическом представлении).

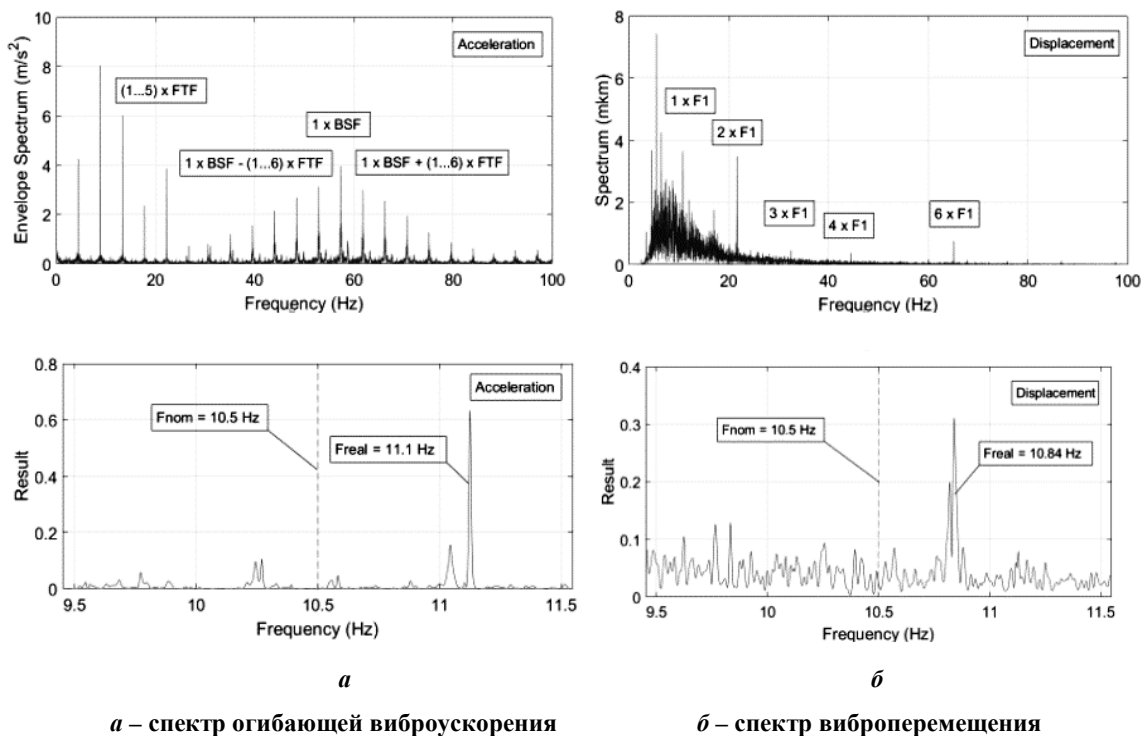
Полученные зависимости количества валидных дефектных частот от значения частоты вращения первичного вала для трех уровней выраженности $C_k(f_i)$ нормируют по амплитуде и перемножают.

$$SI(f_i) = \prod_{k=1}^3 \bar{C}_k(f_i), \quad (8)$$

где $\bar{C}_k(f_i)$ – нормированная зависимость количества валидных дефектных частот от частоты вращения первичного вала f_i для k -го уровня выраженности дефектных частот.

Результат работы валидатора $SI(f_i)$ во многих случаях может иметь вид набора пиков одинаковой высоты или даже целых плато, что не позволяет осуществить уточнение. Для решения данной проблемы применяется процедура верификации результата. Она заключается в выборе нескольких уникальных наборов дефектных частот, которые имеют представителей с высокой выраженностью, последующей спектральной интерференцией. В результате подобной процедуры в качестве результата получается один или два пика, превосходящих остальные на несколько порядков.

На рисунке 3 представлен пример неопределенности при уточнении частоты методом спектральной интерференции. Случай соответствует пункту 3, когда уточнение в обоих спектрах дает различные результаты. Сигнал получен с акселерометра, установленного на подшипнике качения 6213 со сколами на телах качения. Номинальная частота вращения первичного вала $F1_{nom} = 10,5$ Гц, длительность записи $T = 30$ с, частота дискретизации $Fs = 96$ кГц.



a – спектр огибающей виброускорения

б – спектр виброперемещения

Рисунок 3. – Уточнение частоты на основе спектральной интерференции

В спектре огибающей виброускорения отсутствуют валовые компоненты $n \cdot F1$, вместо них присутствуют составляющие $n \cdot FTF$ и $BSF + m \cdot FTF$, где $n = 1..5$, $m = -6..6$, $FTF = 4,45$ Гц, $BSF = 57,35$ Гц.

Данный шаблон указывает на наличие сколов, трещин на телах качения. Значения уточненных частот в спектре виброперемещения $F1_{real}' = 10,84$ Гц (рисунок 3, а) и в спектре огибающей виброускорения $F1_{real}'' = 11,1$ Гц (рисунок 3, б) разнесены на $\Delta = 2,48\%$ относительно номинальной частоты, что порождает неопределенность при принятии решений. Для устранения неопределенности используется метод на основе валидатора информативных признаков, результат работы которого приведен на рисунке 4.

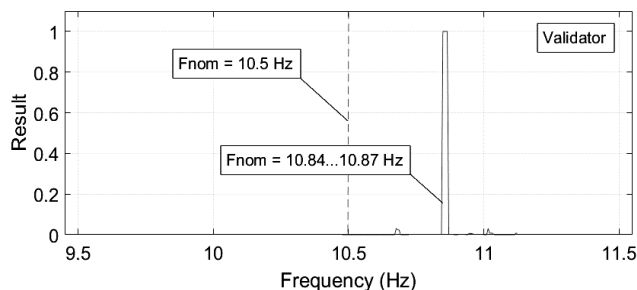


Рисунок 4. – Результаты уточнения частоты на основе валидатора информативных признаков

Метод на основе валидатора указал возможный диапазон частоты первичного вала: $F1_{real}'''$ составляет 10,84...10,87 Гц. Таким образом, по мажоритарному принципу в качестве действительной частоты выбирается результат, полученный в спектре виброперемещения ($F1_{real} = 10,84$ Гц).

Следует отметить, что результат уточнения на основе валидатора информативных признаков в виде диапазона частот объясняется изменением значений основных дефектных частот элементов оборудования под влиянием внешних факторов (температуры, нагрузки и т.д.) [5] и/или некорректно составленной кинематической схемой оборудования.

Результаты и их обсуждение. Ни один из представленных в работе алгоритмов не является самодостаточным и универсальным. Основной недостаток метода уточнения частоты вращения вала на основе спектральной интерференции – сильная зависимость от наличия в спектрах выраженных валовых компонент. При прецизионной балансировке вала или же удаленности точки съема от источника вибрации уточнение может быть некорректным. Однако данный метод обладает наибольшей точностью и малым уровнем грубых ошибок.

В свою очередь, метод на основе валидатора информативных признаков не обладает достаточной точностью, так как указывает лишь диапазон возможных значений частоты первичного вала. Кроме того, данный метод сильно зависит от корректности формирования сетки частот, изменения геометрических размеров элементов оборудования под воздействием внешних факторов, а также от наличия выраженных спектральных компонент. Поэтому авторами предложено использовать данный метод только в модуле принятия решений для разрешения возникающих неопределенностей. Итоговая структурная схема алгоритма уточнения частоты представлена на рисунке 5.

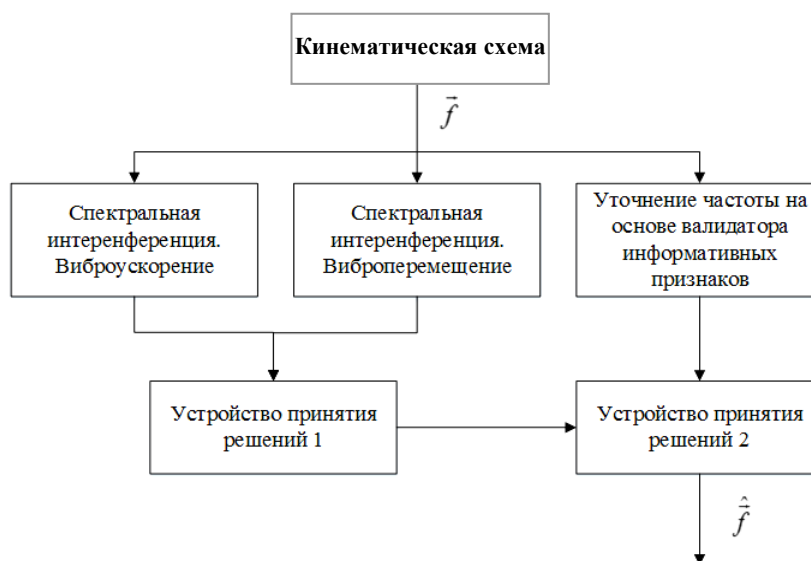


Рисунок 5. – Структурная схема алгоритма уточнения частоты

Для оценки точности и стабильности работы предложенных алгоритмов использовался набор вибро-сигналов, снятых с оборудования с различной степенью выраженности дефектов. Частота дискретизации сигналов $F_s = 96$ кГц (220 кГц). Предварительно частота вращения первичного вала для каждого сигнала определялась экспериментально или указывалась невозможность уточнения.

Сравнивается 4 различных алгоритма:

- *SI* (спектральная интерференция без верификации кадров);
- *SIV* (спектральная интерференция с верификацией кадров);
- *SIV+VAL* (спектральная интерференция с верификацией кадров и валидатор без верификации результатов);
- *SIV+VALV* (спектральная интерференция с верификацией кадров и валидатор с верификацией результатов).

Результаты работы алгоритмов сравниваются в терминах 1) процент грубых ошибок (gross error – *GE*) и 2) процент корректного уточнения (correct refinement – *CR*).

Процент грубых ошибок вычисляется как

$$GE(\%) = \frac{N_{ge}}{N_a} \cdot 100, \quad (9)$$

где N_{ge} – число сигналов с отклонением полученной оценки более чем на $\pm 2\%$ от значения, установленного экспериментально; N_a – общее количество сигналов, для которых уточнение частоты возможно.

Процент корректного уточнения вычисляется как

$$CR(\%) = \left(\frac{N_r}{N_{re}} + \frac{N_{nr}}{N_{rd}} \right) \cdot 100, \quad (10)$$

где N_r – число сигналов с корректно осуществленным уточнением; N_{re} – число сигналов, где возможно экспертное уточнение частоты; N_{nr} – число сигналов, где уточнение не было проведено из-за высокой неопределенности; N_{rd} – число сигналов, где невозможно экспериментальное уточнение частоты.

Проверка проводилась для 2-х типов сигналов:

- 1) с хорошо выраженными дефектными частотами (превышают более чем на 3 дБ уровень шума);
- 2) со слабо выраженными дефектными частотами.

В таблице 1 представлены результаты тестирования представленных в статье алгоритмов.

Таблица 1. – Сравнение алгоритмов уточнения частоты вращения вала

Метод	Хорошо выраженные дефектные частоты		Слабо выраженные дефектные частоты	
	GE	CR	GE	CR
SI	0,8	72,5	0,5	43,1
SIV	0,6	77,1	0,5	68,5
SIV+VAL	0,6	78,3	0,5	70,3
SIV+VALV	0,2	89,1	0,4	75,8

Работа алгоритма *SIV+VALV* на сигналах с хорошо выраженными дефектными частотами показывает точность, близкую к работе эксперта. Процент грубых ошибок в основном связан с эффектом размытия спектра при изменении режимов работы. Применение метода *VAL* без верификации результата лишь незначительно улучшает работу, а в некоторых может приводить к неверному уточнению. Однако, как показано в таблице 1, совместное использование методов на основе *SIV+VALV* демонстрирует наименьший процент грубых ошибок (0,2 и 0,4%) и наилучший процент корректной работы (89,1 и 75,8%) для сигналов с хорошо и слабо выраженными дефектными частотами.

Заключение. В работе предложены алгоритмы уточнения частоты вращения вала для задач вибродиагностики роторного оборудования. Данные алгоритмы позволяют повысить точность работы автоматических систем вибродиагностики в частотной области. Показано, что наилучшие точность и стабильность достигается при совместном использовании алгоритмов уточнения частоты на основе спектральной интерференции и на основе валидатора информативных признаков, имеющих процент корректной работы 89,1 и 75,8% для сигналов с хорошо выраженными и слабо выраженными дефектными

частотами соответственно. Эксперименты на реальных сигналах показали, что предложенные алгоритмы применимы в задачах автоматической вибрационной диагностики. Дальнейшие исследования предполагается направить на повышение эффективности и стабильности работы описанных в статье алгоритмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов, И.Л. Вибродиагностика энергетического оборудования : учеб. пособие / И.Л. Абрамов. – Кемерово, 2011. – 80 с.
2. Барков, А.В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учеб. пособие / А.В. Барков, Н.А. Баркова. – СПб. : СПбГМТУ, 2004. – 156 с.
3. Баркова, Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Расчет основных частей вибрации узлов машин, параметров измерительной аппаратуры и практическая экспертиза : учеб. пособие / Н.А. Баркова, А.А. Борисов. – СПб. : СПбГМТУ, 2004. – 156 с.
4. Костюков, В.Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин : учеб. пособие / В.Н. Костюков, А.П. Науменко. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с.
5. Mbo'o, C. Impact of the load in the detection of bearing faults by using the stator current in PMSM's / C. Mbo'o, T. Herold and K. Hameyer // XXIth International Conference on Electrical Machines, 2–5 September 2014 / Institute of Electrical Machines RWTH Aachen University, Germany, 2014. – P. 1615–1621.

Поступила 15.08.2017

ALGORITHMS FOR REFINEMENT OF THE SHAFT ROTATIONAL SPEED IN PROBLEMS OF VIBRATION-BASE DIAGNOSTICS OF ROTARY EQUIPMENT

Y. ASLAMOV, A. ASLAMOV, I. DAVYDOV, A. TSURKO

Automatic systems of vibration-based diagnostics allow to solve problems of estimation of a technical condition of rotary equipment without involvement of experts. However, informative features of defects in the frequency domain strongly depend on the rotational speed of the equipment shafts, which can lead to incorrect operation of diagnostic systems. To improve the stability and accuracy of automatic vibration-based diagnostics in the frequency domain, algorithms for refinement of the shaft rotational speed without using additional devices are proposed.

Keywords: *vibration-based diagnostics, digital signal processing, frequency domain, frequency refinement.*