

## **АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ВИБРОСИГНАЛОВ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ПОДШИПНИКАМИ КАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

В настоящее время входной контроль качества свободных подшипников, поступающих на сборку ответственных электромеханических устройств, должен являться обязательной операцией для предприятий космической техники. Известны [1-2] описания практических методов диагностики состояния свободных подшипников (ПК). Однако все они обладают существенными недостатками. Устройство [1] для диагностики подшипников качения, в котором использован метод анализа вибрационных сигналов, является сложным по конструкции и позволяет определять лишь достаточно грубые местные дефекты деталей подшипника, образовавшиеся в результате механических ударов, импульсы которых периодически повторяются на частотах, получивших название частот подшипников. Устройство [2] для вибродиагностики подшипников качения не позволяет быстро и точно определять качество изготовления подшипников без их разборки.

Предлагаемый программный метод, реализованный как составная часть комплексного программируемого стенда, предназначен для определения состояния свободных подшипников качения путем компьютерного анализа их вибрационных характеристик. По этому методу измеряется вибросигнал (ВС) ПК при его вращении под нагрузкой. ВС дискретизируется, преобразовывается в цифровую форму и вводится в рабочий буфер в различных режимах. Программа определяет индивидуальные для каждого ПК частоты вращения ротора, сепаратора с шариками относительно наружного и внутреннего колец, шарика вокруг собственной оси и пиковую частоту. Затем выделяются четыре составляющих вибросигнала, обусловленные качеством изготовления элементов ПК, определяется уровень вибрации и долевого вклада по мощности в вибрацию каждой из составляющих в общую мощность вибросигнала. С учетом заложенных в память ПЭВМ известных свойств вибросигналов программа производит инструментальную оценку состояния элементов ПК. Программа функционирует в системе LabVIEW. Счётно-решающая часть стенда для осуществления этого способа включает вибропреобразователь, усилитель, фильтры, аналого-циф-

ровой преобразователь, преобразователь Фурье, определитель частоты и периодов вращения, разделитель линейчатого и непрерывного спектров, частотомер, формирователи вибросигнала наружного и внутреннего колец, а также шариков.

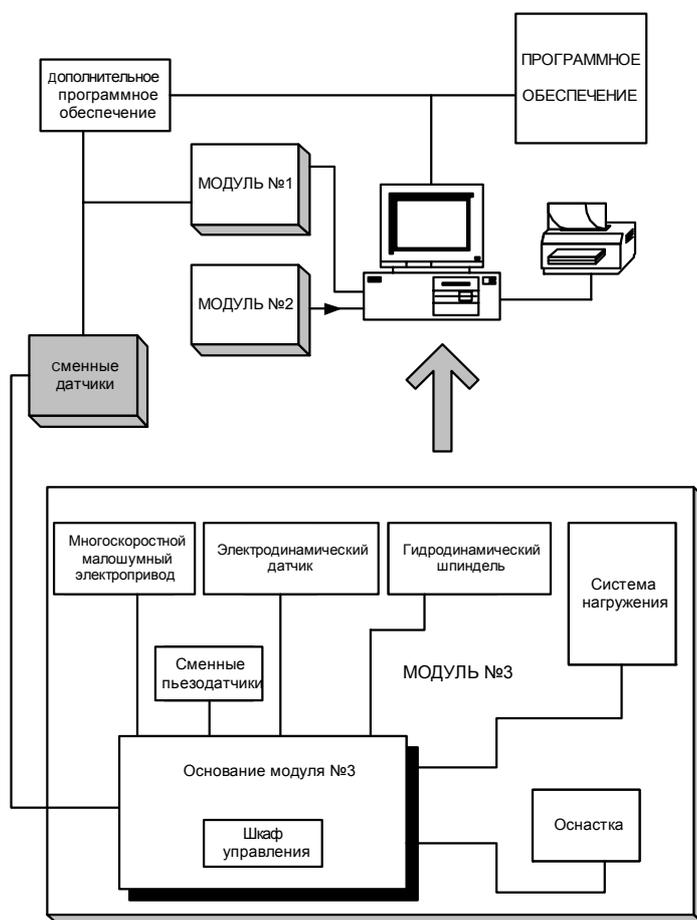
Технический результат разработанного метода заключается в обеспечении оценки качества подшипников с высокой степенью точности за счет учета фазовых изменений вибрационного сигнала во времени. Это достигается тем, что измеряется вибросигнал при вращении ПК под нагрузкой, вибросигнал дискретизируется и преобразуется в цифровую форму, вводится в рабочий буфер, меняя частоту дискретизации, частоту среза фильтра и время ввода. В каждом из режимов подбирается оптимальный коэффициент усиления. Далее в каждом из режимов вибросигнал подвергается преобразованию Фурье, определяются, используя периодичность вибрационного сигнала, связанного с относительными частотами вращения деталей подшипника, индивидуальные для каждого подшипника частоты вращения ротора, сепаратора с шариками относительно наружного и внутреннего колец, шарика вокруг собственной оси и пиковая частота. В итоге можно выделить три составляющие этих сигналов, обусловленные качеством изготовления внутреннего, наружного колец и шариков, и, ориентируясь на заложенные в памяти ПЭВМ известные свойства вибросигналов, определить состояние элементов ПК. Вибросигнал вводится в трех режимах с использованием следующих параметров: частота дискретизации 800, 5000, 25000 Гц, частота среза фильтра НЧ 300, 2000, 10000 Гц, время ввода: первый режим 40 с, второй 10 с, третий 2 с.

Общая схема стенда, на котором осуществлена практическая реализация метода, представлена на рис 1.

Конструктивно стенд разделён на три автономных модуля. Модуль №1 может быть использован для анализа подшипников с внутренним диаметром от 25 мм. Модуль №3 – для анализа подшипников с внутренним диаметром до 25 мм. В стенде предусмотрена возможность анализа состояния подшипников непосредственно в собранных роторных механизмах (модуль №2). Все три модуля работают от одной счётно-решающей части.

Счётно-решающая часть стенда содержит вибропреобразователь, усилитель-корректор, фильтр верхних и нижних частот, аналого-цифровой преобразователь, преобразователь Фурье, определитель частоты и периодов вращения, разделитель линейчатого и непрерывного спектров, частотомер пиковых частот, формирователи вибросигнала наружного кольца, внутреннего кольца и шариков. Выход последнего подключается к дисплею и печатающему уст-

ройству, при этом второй выход и вход определителя частоты и периодов вращения подключаются к частотомеру пиковых частот, вторые выходы и входы формирователей вибросигналов наружного и внутреннего колец и шариков подключаются к блоку включения и исключения из рассмотрения пиков, а третьи выходы и вход формирователей наружного и внутреннего колец подключаются к датчикам частот этих колец.



**Рис.1. Общая схема стенда для определения состояния подшипников качения электромеханических устройств космической техники**

Функционирует измерительная система следующим образом. Механические колебания подшипника, появляющиеся вследствие имеющихся неточностей изготовления и сборки ПК, формируются вибропреобразователем, который преобразует их в пропорциональный электрический сигнал. С усилителя-корректора, предназначенного для согласования выходного сопротивления вибропреобразователя, вибросигнал поступает в трёх режимах на полосовой фильтр и через него на блок подготовки и ввода вибросигнала. Параметры режимов были приведены выше. В каждом из этих режимов снова подбирается оптимальный коэффициент усиления, а затем уже данные вводятся в рабочий буфер. Затем определяется частота вращения внутреннего кольца и комплекта шариков относительно внутреннего и наружного колец с использованием исследованных свойств вибросигнала. Первоначально вибросигнал, записанный в первом режиме, подвергают преобразованию Фурье с использованием 8192 точек. В результате получают вибросигналы подшипника в диапазоне до 400 Гц с разрешением по частоте  $\Delta f = 0,0977$  Гц. Поскольку при вводе сигнала граничная частота фильтра НЧ составляет 300 Гц, то фактически значащие составляющие вибросигнала получаются на частоте не выше граничной. В этом вибросигнале существует определяющая составляющая, соответствующая частоте вращения внутреннего кольца. Она примерно известна из режима вращения приводного шпинделя (около 25 Гц). Поблизости нет других составляющих вибросигнала. На этом обстоятельстве основан алгоритм точного определения частоты вращения внутреннего кольца. Сначала определяют составляющую вибросигнала в диапазоне 24 – 25 Гц, имеющую максимальную амплитуду. Затем берут две предыдущие и две последующие составляющие. Частоту вращения определяют как средневзвешенную частот этих пяти составляющих, где в качестве весов берутся квадраты соответствующих амплитуд. Если номер максимальной гармоники обозначить  $f_{вр}$ , частоты исходных гармоник  $f_{i-2}, f_{i-1}, f_i, f_{i+1}, f_{i+2}$ , амплитуды  $a_{i-2}, a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, a_{i+2}$ , то значение частоты вращения определяют по формуле:

$$f_{вр} = \frac{f_{i-2}a_{i-2}^2 + f_{i-1}a_{i-1}^2 + f_i a_i^2 + f_{i+1}a_{i+1}^2 + f_{i+2}a_{i+2}^2}{a_{i-2}^2 + a_{i-1}^2 + a_i^2 + a_{i+1}^2 + a_{i+2}^2}. \quad (1)$$

Таким образом, частота определяется с точностью лучше, чем 0,05 Гц. Такая точность необходима, чтобы различать гармоники вплоть до конца заданного диапазона контроля вибрации подшипника, т.е. до 10000 Гц. При такой точности ошибка, которая суммируется для последней гармоники (имеющей номер  $10000/25 = 40$ ), составит не более  $40 \times 0,05 = 2$  Гц.

Далее, по тому же вибросигналу, определяется частота вращения комплекта шариков относительно наружного кольца. Гармоника, соответствующая этой частоте, обычно выражена очень слабо, а зачастую и вовсе незаметна на общем фоне. В то же время ярко выражена гармоника, соответствующая частоте прохождения шариков по наружному кольцу, которая равна искомой частоте, умноженной на число шариков в подшипнике. Зная примерно частоту вращения комплекта шариков относительно наружного кольца (9,3 - 10 Гц), умножением границ этого диапазона на количество шариков получаем новый диапазон, в котором, действуя по алгоритму, описанному для определения частоты вращения внутреннего кольца (т.е. определяя в начале максимальную составляющую в полученном диапазоне и заканчивая вычислением по формуле (1)), вычисляется частота прохождения шариков по наружному кольцу с точностью не хуже 0,05 Гц. Деля эту частоту на количество шаров, получаем частоту вращения комплекта шариков относительно наружного кольца с точностью не менее 0,01 Гц (поскольку число шариков в подшипнике не менее 6). После определения частоты вращения комплекта шариков относительно наружного кольца  $f_n$  вычисляется частота вращения комплекта шариков относительно внутреннего кольца:

$$f_b = f_p - f_n . \quad (2)$$

На основе определенных трех из четырех частот возможно построить линейчатую часть спектра вибрации подшипника. Четвертая частота - частота вращения шарика вокруг собственной оси определяется позже. В линейчатой части вибросигнала шарико-подшипника можно выделить три набора гармоник, которые возбуждаются соответственно наружным и внутренним кольцами и комплектом шаров. Обозначим:  $n$  - количество шариков в подшипнике,  $k$  - целое число, диапазон изменения которого будет указан отдельно для каждой из групп гармоник,  $m$  - еще одно целое число в диапазоне от 0 до 5. Тогда частоты гармоник, соответствующие возбуждению от наружного кольца,

$$f_{гн} = knf_n \pm mf_p , \quad (3)$$

где  $k = 1 - 125$ .

Частоты гармоник, соответствующие возбуждению от внутреннего кольца,

$$f_{гв} = knf_b \pm mf_p , \quad (4)$$

где  $k = 1 - 85$ .

Частоты гармоник, соответствующие возбуждению от комплекта шариков,

$$f'_{\text{гш}} = mf_{\text{н}}; \quad (5)$$

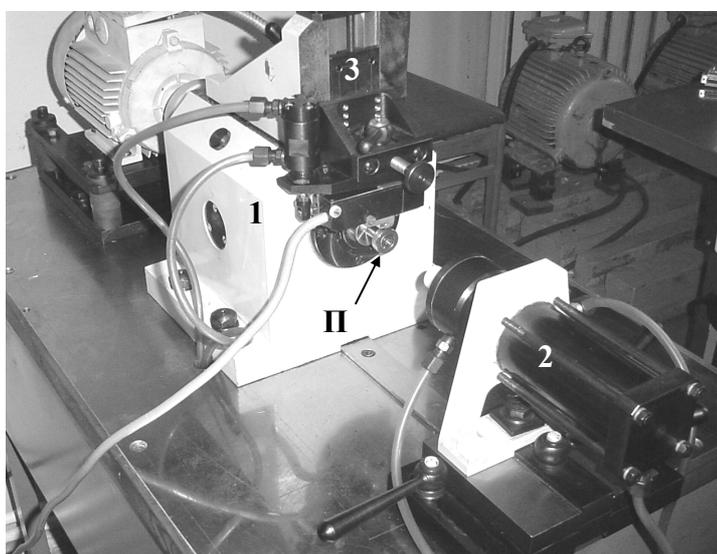
$$f''_{\text{гш}} = knf_{\text{ш}} \pm mf_{\text{н}}, \quad (6)$$

где  $k = 1 - 200$ .

Все указанные составляющие необязательно будут представлены фактически в реальном спектре. Так, например, для наружного кольца в формуле (3), в основном, присутствуют гармоники, соответствующие  $m = 0$ . Для внутреннего кольца в формуле (4) наоборот редко проявляются гармоники, соответствующие  $m = 0$ , а присутствуют боковые частоты. То же и для шариков: гармоники, соответствующие  $m = 0$  в формуле (6), обычно слабо выражены, а присутствуют боковые частоты. Частоты, описываемые формулой (5) и характеризующие разноразмерность шариков, также не всегда проявляются. Однако программа диагностики индивидуально для каждого подшипника анализирует наличие и отсутствие всех указанных гармоник и определяет их амплитуду. Такая структура вибросигнала подтверждается результатами подробных экспериментальных исследований, т. е. полностью соответствует реальному вибросигналу подшипника качения.

Формирование вибросигнала осуществляют следующим образом. Сначала выделяются все пики в вибросигнале. Для этого вычисляют вибросигнал скользящего среднего в диапазоне 20 предшествующих и 20 последующих гармоник. Затем рассматривают последовательно гармоники исходного вибросигнала, и, в случае, если ее амплитуда превосходит соответствующую среднюю в два раза, она считается элементом пика. Идущие последовательно без пропусков элементы пиков считаются элементом одного пика. Для идентификации отдельных пиков в процессе перебора задатчиком 10 и 12-ти пар чисел в специальный массив записываются номера гармоник, являющихся первыми и последними элементами каждого из пиков. Из полученного набора пиков выбирают те, которые соответствуют формулам (3) и (4) в рассматриваемом диапазоне частот. Они одновременно исключаются из исходного спектра и включаются в спектр вибрации наружного кольца. Та же операция повторяется для внутреннего кольца с использованием частот, описываемых формулой (5). Тогда в исходном спектре остаются только пики, соответствующие возбуждению от шариков. Эти пики исключаются из исходного спектра и включаются в спектр вибрации, возбуждаемой шариками. В результате получают четыре вибросигнала, соответствующих возбуждению вибрации от четырех основных источников возбуждения: наружного кольца, внутреннего кольца, шариков и загрязненности. Последний

спектр получается после исключения всех пиков, отвечающих линейчатой части вибросигнала. Параллельно с формированием вибросигналов производят квадратичное суммирование составляющих каждого из сигналов. Причем для каждого из сигналов вычисляют две суммы. Одна определяет ускорение вибрации, а другая - скорость. Для скорости составляющая вибросигнала предварительно делится на круговую частоту этой гармонике. Корни квадратные из восьми полученных величин и являются уровнями виброускорения и виброскорости. Эти данные переводятся в децибелы. Затем осуществляют диагностирование в двух других диапазонах частот. Для диапазона 300 - 1800 Гц используют данные, введенные в режиме 2, а для диапазона 1800 - 10000 Гц - данные, введенные в режиме 3. Для получения исходного вибросигнала сначала проводится быстрое преобразование Фурье, затем проводят остальные операции, описанные выше. Результаты вибродиагностики ПК получаем в вибросигнале, возбуждаемом четырьмя факторами в трех частотных диапазонах по скорости и по ускорению. Уровни вибрации по скорости выводятся на экран дисплея и одновременно на печатающее устройство. При необходимости можно вывести уровни вибрации и по ускорению. На рис.2 показана механическая часть описываемого стенда.



**Рис. 2. Фрагмент стенда для анализа качества свободных подшипников качения электромеханических устройств космической техники**

Привод 1 станда, снабженного узлом осевого нагружения 2 и датчикодержателем 3 приводит во вращение и нагружает подшипник П. Сигнал от датчика, прижатого к не вращающемуся наружному кольцу подшипника, поступает на согласующий усилитель, а затем на программируемый усилитель и фильтр нижних частот, установленные в крейте. Крейт связан с платой ввода-вывода аналоговой информации, установленной в корпусе ПЭВМ.

Работа комплекса осуществляется под управлением специального программного обеспечения для диагностики подшипников. Устройство подготовки и ввода вибросигнала от подшипника в компьютер состоит в общем случае из пьезоакселерометра, находящегося в датчикодержателе приводной установки, согласующего усилителя, программируемого усилителя и фильтра нижних частот, установленных в крейте. Питание всей системы осуществляется от источника питания компьютера. Устройство управления процессом ввода вибросигнала и обработки полученной информации состоит из ПЭВМ со встроенной платой ввода-вывода аналоговой информации. Программное обеспечение осуществляет анализ в соответствии с алгоритмами, изложенными выше, и определяет вклад каждого из источников вибрации в суммарную вибрацию подшипника. Такое распределение по отдельным факторам происходит в каждой из трех полос частот: 50 – 300 Гц; 300 - 1800 Гц; 1800 - 10000 Гц. Для анализа состояния подшипников качения в собранных устройствах применяется программа «Огибающая». Она функционирует следующим образом: из вибросигнала выделяется полуквадратная полоса частот со среднегеометрической частотой, являющейся одной из резонансных частот динамической системы. Далее сигнал подвергается преобразованию Гильберта. Сигналы после предварительной фильтрации и сигнал после преобразования Гильберта возводятся в квадрат и суммируются. Из результата извлекается квадратный корень. Полученный сигнал пропускается через полосовой фильтр 50 – 300 Гц. На частотах, соответствующих дефектам элементов подшипника, появляются резко выраженные гармоники вибраций, идентификацию которых можно произвести, вызывая на графический экран заранее сформированные маски вибрации элементов подшипников.

Стенд также может быть оснащен рядом вспомогательных программ, позволяющих использовать его для расширенной диагностики собранных устройств (например для измерения температуры, частоты вращения роторов, динамических смещений цапф роторов (при использовании подшипников скольжения и пр).

В результате с помощью станда можно объективно оценивать качество подшипников качения, поступающих на сборку электро-

механических устройств космической техники, производя в случае необходимости их соответствующий отбор, а с использованием дополнительных программ, осуществлять безразборную диагностику состояния опорных узлов роторных механизмов широкой номенклатуры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Авт. свид. СССР 540186, кл. О 01 М 13/04, 1977.
2. Авт. свид. СССР 1620881, кл. О 01 М 13/04, 1991.