

УДК 621.9

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ И МЕХАНИЗМОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА.

Алексей Андреевич Алексеев

Аспирант 3 года,

кафедра «Резание материалов, металлорежущие станки и инструменты» имени С.С. Силина

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева

Научный руководитель: Д.И. Волков,

доктор технических наук, профессор кафедры «Резание материалов, металлорежущие станки и инструменты» имени С.С. Силина

В статье приведен анализ основных методов диагностики технического состояния динамически нагруженных узлов и механизмов металлорежущего оборудования. Исследован метод определения технического состояния по анализу вибросигнала.

Металлорежущее оборудование составляет большую часть производственного парка предприятий авиадвигателестроительной отрасли. Обеспечение работоспособности данного оборудования является важнейшей задачей ремонтной службы предприятия. Для обеспечения рационального использования средств на приобретение запасных частей и материалов, а также осуществления планирования ремонта возникает острая необходимость в определении фактического состояния узлов и механизмов металлорежущих станков.

Правильная организация и оптимальный выбор методов и средств диагностирования технического состояния металлорежущего оборудования в совокупности со своевременным принятием профилактических мер позволяет существенно снизить затраты на технический обслуживание и ремонт.

Техническая диагностика - установление и изучение признаков, характеризующих наличие дефектов в машинах, устройствах, узлах и т. п., для предсказания возможных отклонений в режимах их работы и для разработки методов и средств их обнаружения [1].

Целью технического диагностирования изделий является поддержание установленного уровня надежности, обеспечение требований безопасности и эффективности использования изделий. Техническое диагностирование изделий должно быть направлено на решение следующих взаимосвязанных задач [2]:

- определение вида технического состояния;
- поиск места отказа или неисправностей;
- прогнозирование технического состояния.

Диагностирование позволяет получить объективную информацию о техническом состоянии каждой единицы оборудования, на основе которой можно обеспечить оптимальность технического обслуживания и ремонта. Диагностирование оборудования включает в себя следующие операции: сбор информации о состоянии объекта диагностики, прием информации и ее обработка, передача результатов

обработанной информации, принятие решения о выполнении последующих операций или о дальнейшем использовании оборудования на основании результатов оценки.

Анализ статистических данных по поломкам металлорежущего оборудования одного из предприятий за период два года показал, что распределение неисправностей в процентном соотношении выглядит следующим образом:

- 43% - неисправность гидро- и пневмосистем станка;
- 21% - неисправность механической части станка;
- 18% - неисправность системы управления и электропитания;
- 11% - прочие незначительные неисправности;
- 7% - неисправность систем принудительного охлаждения и кондиционирования.

Стабильная работа гидро- и пневмосистемы станка является одним из важнейших факторов влияющих на долговечность и безотказность в работе всех узлов оборудования. Наличие достаточной смазки подвижных частей станка позволяет избежать преждевременного износа трущихся поверхностей и, как следствие, предотвращает преждевременный выход из строя оборудования. Течи жидкости и неисправность гидронасоса приводят к чрезмерному или недостаточному их расходу и пульсациям при работе механизмов. Несвоевременная замена фильтров влечет за собой загрязнение всей гидравлической системы, уменьшению протока и поломке оборудования.

Таким образом, большую часть неисправностей составляют первые три группы. С целью определения возможных причин возникновения поломок выполнен более детальный анализ этих групп, результаты которого показали, что большая часть всех неисправностей возникла по причине несвоевременного или проведенного не в полном объеме технического обслуживания, а также отсутствие технической диагностики.

Если проблемы проведения своевременного технического обслуживания являются в большей степени организационного плана, то вопросы диагностики динамически нагруженных узлов и механизмов станка требует детального изучения.

Существует множество методов и средств диагностирования технического состояния механической части станка. Применение всех методов в комплексе потребовало бы больших финансовых затрат на приобретение технических средств и значительное количество людского ресурса, обладающего знаниями в различных областях науки. В связи с этим требуется провести анализ основных методов технической диагностики применимо к динамически нагруженным узлам станка, содержащим, например, такие элементы как подшипники, шарико-винтовые пары, шестерни.

Рассмотрим и проанализируем основные методы диагностирования оборудования:

- *предварительна оценка* технического состояния станка в результате слухового и зрительного восприятия оператором-станочником. В неисправных или имеющих повышенный износ узлах и механизмах станка появляются шумы, вибрации и повышение температуры по которым судят о наличии дефекта;

- *тепловизионное диагностирование*. Тепловизионная диагностика и тепловой контроль представляет собой высокотехнологичную область прикладных исследований, объединяющую достижения не только в создании аппаратуры (тепловизоров), но и в теории теплопередачи, информационных и компьютерных технологиях. Основными преимуществами тепловизионной диагностики являются: проведение тепловизионного контроля без специальных условий и без вывода объекта контроля из эксплуатации, безконтактность, контроль объектов любых форм и размеров, высокая производительность контроля, высокая скорость обработки результатов. Однако данные, получаемые по результатам тепловизионной диагностики

металлорежущих станков, например, температура на поверхности того или иного узла, не дает достаточной информации о фактическом состоянии его механизмов;

- *акустическое диагностирование*. Применение технических стетоскопов, функционирующих в звуковом диапазоне частот, позволяет локализовать дефектный узел машины с повышенными стуками и шумами;

- *трибодиагностика*, является методом диагностирования состояния трущихся деталей на основе анализа продуктов износа в смазочном масле. При анализе проб масла определяют концентрацию в нем составляющего элемента изнашиваемого материала, по величине которой оценивают усредненный износ соответствующей детали. Недостатком данного метода является определение суммарного износа деталей, изготовленных из одних и тех же материалов;

- *метод поверхностной активации*. Он основан на измерении интенсивности излучения радионуклидной метки, установленной на контролируемом участке поверхности объекта. В результате уноса радиоактивного вещества смазочным маслом в оборудовании или транспортируемой средой в трубопроводе, ее излучение уменьшается;

- *измерение геометрических параметров*. Проверка основных геометрических параметров оборудования с целью выявления отклонений от допустимых значений для дальнейшего определения причин данных отклонений. Для станков с ЧПУ применяется специальные современные технические средства проверки геометрических параметров, таких как: проверка согласованности работы приводов, контроль круговой траектории, определение люфтов по каждой координате, неперпендикулярность осей, непараллельность по каждой оси и другие;

- *вибрационное диагностирование*. Метод основан на анализе вибрационного сигнала, получаемого в результате считывания вибрации с поверхности узла и преобразования полученного сигнала с помощью специальных технических средств. Считывание сигнала производится при помощи датчика-акселерометра с последующим сбором и расшифровкой в виброанализаторе. При этом любой дефект какого-либо узла характеризуется индивидуальной вибрационной картиной. Из множества параметров, характеризующих вибрационный процесс, выделяют только те, которые прямо или косвенно характеризуют состояние объекта. По этим параметрам формулируют информативную систему признаков, используемых при диагностировании. Метод позволяет определить различные параметры механического износа узлов и механизмов станка. Определяются дефекты подшипников, в том числе износ наружного и внутреннего кольца, перекос кольца, износ тел качения, определяется износ шестерен, перекос валов, износ шарико-винтовой пары и другие.

Анализируя рассмотренные выше методы диагностики можно сделать вывод, что для определения состояния динамически нагруженных узлов и механизмов металлорежущего оборудования наиболее информативным и точным является вибрационная диагностика.

Вибрационная диагностика — метод диагностирования технических систем и оборудования, основанный на анализе параметров вибрации, либо создаваемой работающим оборудованием, либо являющейся вторичной вибрацией, обусловленной структурой исследуемого объекта [3].

Вибрационная диагностика, как и другие методы технической диагностики, решает задачи поиска неисправностей и оценки технического состояния исследуемого объекта.

Основными преимуществами вибрационной диагностики являются:

- метод позволяет определять наличие скрытых дефектов;

- диагностика, считывание вибросигнала, как правило, не требует разборки оборудования;
- относительно небольшое время считывания необходимого спектра вибросигнала;
- возможность обнаружения неисправностей на этапе их зарождения;
- снижение ожидаемого риска возникновения аварийной ситуации при эксплуатации оборудования.

Вибрационные характеристики являются наиболее информативным инструментом для идентификации технического состояния узлов и механизмов оборудования. В процессе работы станка возникает широкий спектр колебаний, природа которых имеет как стационарный, так и нестационарный характер, могут действовать как вынужденные колебания, так и автоколебания. Автоколебания различаются при резании и при работе на холостых ходах, т.е. при его установочных перемещениях и при функционировании без резания. В процессе обработки динамические составляющие сил резания в большинстве случаев имеют нелинейный характер, определяемый именно процессом резания. В свою очередь для идентификации состояния элементов станка более всего подходит режим его функционирования на холостом ходу, при котором вибрационные характеристики в целом определяются работой его деталей и узлов: подшипниками, шестеренными, ременными передачами, шариково-винтовыми парами, приводными механизмами. При работе на холостом ходу станка в ряде случаев наблюдается незначительный уровень вибрации, что обуславливает применение высокочувствительной аппаратуры, позволяющей фиксировать необходимые частотные характеристики и позволяющей суммировать измеряемые характеристики с целью расчета средних значений, которые наиболее полно характеризуют состояние исследуемых объектов.

Колебания элементов динамически нагруженных узлов станка являются основными источниками вибраций, возникающими при работе, причем их частотные составляющие и величины амплитуд вибраций определяются как дефектами отдельных элементов, установленных на валах, так и погрешностями сборки и эксплуатации. Отличительной особенностью вибраций вращающихся элементов и деталей является то, что наибольшие амплитуды наблюдаются в поперечном направлении, а вибрационный сигнал хорошо передается по корпусным деталям. Таким образом, при установке датчика на корпусе узла можно получить исходную информацию о вибрационном состоянии параметров каждого подшипника и параметров шариково-винтовых пар. Но следует учитывать, что вибрационный сигнал значительно затухает при передаче его через большое количество сопряжений между деталями, особенно корпусными.

При работе оборудования в подшипниках генерируются вибрации в широком частотном диапазоне. Появление вибраций в подшипниках, обусловлено их конструктивными особенностями. Составляющие элементы, совершающие сложное кинематическое движение с различными угловыми скоростями, приводят к возникновению спектра вибраций в диапазоне от низких до высоких частот. Также появлению вибраций способствуют неточности деталей подшипников, образовавшиеся при их изготовлении. К ним относятся разностенность наружного и внутреннего кольца, некруглость и шероховатость тел качения и дорожек колец, погрешности, вызванные дефектами сборки узлов, в том числе перекос наружных и внутренних колец, дисбалансом вращающихся валов.

В процессе эксплуатации подшипников возникают следующие дефекты: износ беговых дорожек колец, образование на них задиров, износ тел качения и сепаратора, некруглость тел вращения, образование трещин в сепараторах. Зарождение и развитие

каждого дефекта характеризуется соответствующими частотами и изменениями амплитуд колебаний.

Подшипник качения является самым распространенным и наиболее уязвимым элементом основных узлов и механизмов металлорежущего станка. Подшипники осуществляют пространственную фиксацию и воспринимают основную часть статических и динамических усилий, возникающих в механизме.

Вибросигнал несет в себе большое количество информации о состоянии как самого подшипника, так и его элементов, но в первоначальном виде вибросигнал не позволяет определить степень развития дефекта. Для получения более полной картины о состоянии подшипника используют различные методы и средства анализа и преобразования вибросигнала.

Рассмотрим основные методы оценки технического состояния подшипников качения, основанные на анализе вибрационного сигнала:

1) *диагностика по спектру вибросигнала или метод прямого спектра.*

Метод основан на анализе вибрационного сигнала с точки зрения периодичности появления амплитудных всплесков (рис. 1). Вибрационный сигнал анализируется узкополосным спектральным анализатором и по частотному составу спектра можно идентифицировать возникновение и развитие дефектов подшипника.

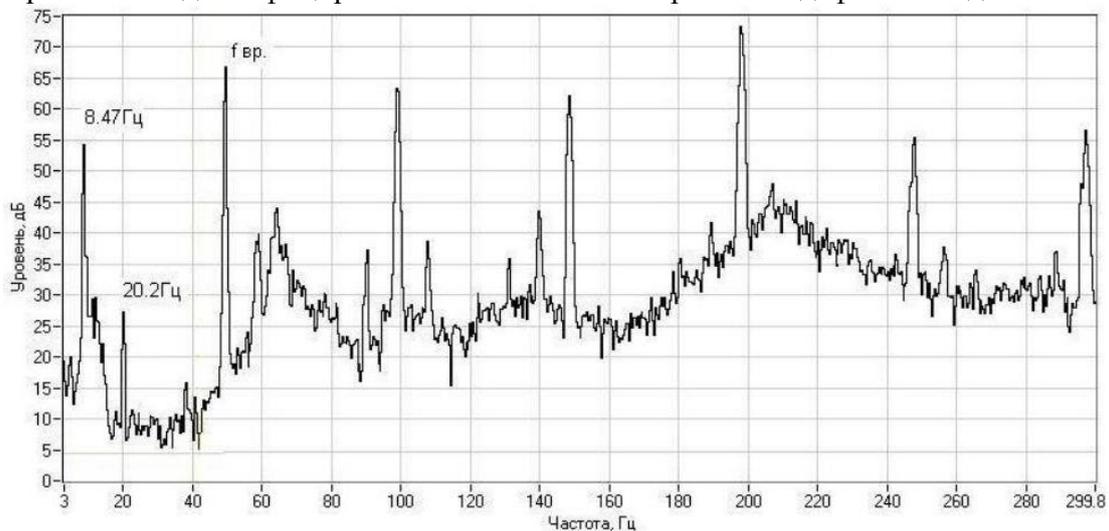


Рис.1. Прямой спектр вибрации

Амплитудные всплески в вибросигнале следуют не хаотично, а с вполне определённой периодичностью или частотой. Причём дефекту на каждом из элементов подшипника будь то тела качения, дорожки или сепаратор соответствуют свои частоты, которые однозначно просчитываются в зависимости от кинематики подшипника и скорости его вращения. Наличие той или иной дискретной составляющей в спектре сигнала говорит о возникновении соответствующего дефекта подшипника, а амплитуда этой составляющей – о глубине дефекта. Это несколько упрощённый подход, поскольку многие дефекты в спектре проявляются в виде не одной частотной составляющей, а нескольких.

Достоинства метода:

- достаточно высокая помехозащищённость (маловероятно наличие в механизме источников, создающих вибрации на тех же точно частотах, что и дефекты подшипника);

- высокая информативность метода. Метод дает возможность получить дифференцированную оценку состояния подшипника отдельно по каждому его кинематическому узлу, поскольку они генерируют разные частотные ряды в спектре.

Недостатки метода:

- метод дорогостоящий, любой самый простой узкополосный спектральный анализатора стоит несоизмеримо дороже любого вибрметра;
- низкая чувствительность к зарождающимся и слабым дефектам. Это связано с тем, что подшипник в большинстве механизмов является очень маломощным источником вибрации. Небольшой скол на шарике или дорожке не в состоянии повлиять на механизм так, чтобы мы увидели эту частотную составляющую в спектре вибрации. И только при достаточно сильных дефектах амплитуды этих частотных составляющих начинают заметно выделяться над общей шумовой частью спектра.

2) диагностика по спектру огибающей вибросигнала.

Высокочастотная, шумовая часть сигнала меняет свою амплитуду во времени, т.е. она модулируется неким более низкочастотным сигналом. Именно в этом модулирующем сигнале содержится и информация о состоянии подшипника. Выделение и обработка этой информации и составляют основу этого метода. Установлено, что наилучшие результаты этот метод даёт в том случае, если анализировать модуляцию не широкополосного сигнала, получаемого от акселерометра, а предварительно осуществить полосовую фильтрацию вибросигнала в диапазоне примерно от 4 до 20 кГц и анализировать модуляцию этого сигнала. Для этого отфильтрованный сигнал детектируется, т.е. выделяется модулирующий сигнал, который подаётся на узкополосный спектроанализатор и мы получаем спектр интересующего нас модулирующего сигнала или спектр огибающей. Что и дало название методу. Метод схематически представлен на рисунке 2

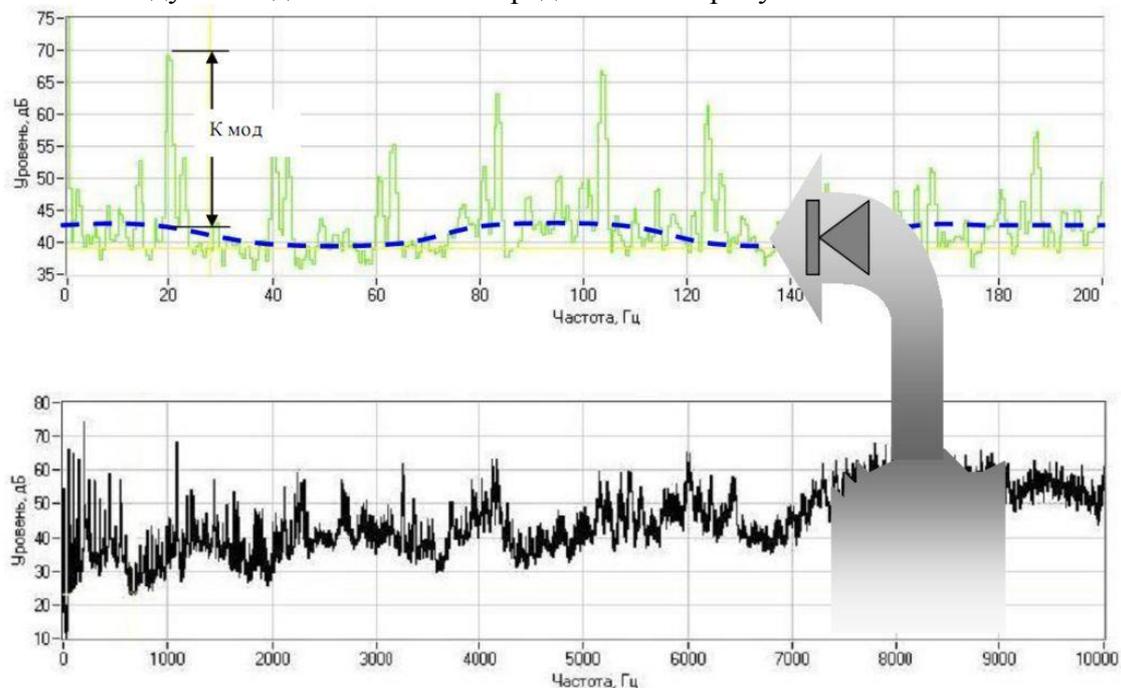


Рис.2. Метод спектра огибающей

Небольшие дефекты подшипника не в состоянии вызвать заметные вибрации в области низких и средних частот, генерируемых подшипником. В тоже время для модуляции высокочастотных вибрационных шумов энергии возникающих ударов

оказывается вполне достаточно, т.е. метод обладает очень высокой чувствительностью. Сам спектр огибающей имеет всегда очень характерный, специфический вид. При отсутствии дефектов он представляет собой почти горизонтальную, слегка волнистую линию. При появлении дефектов, над уровнем этой достаточно гладкой линии сплошного фона начинают возвышаться дискретные составляющие, частоты которых однозначно просчитываются по кинематике и оборотам подшипника. Частотный состав спектра огибающей позволяет идентифицировать наличие дефектов, а превышение соответствующих составляющих над фоном однозначно характеризует глубину каждого дефекта.

Достоинства метода: высокая чувствительность, информативность, помехозащищенность.

Недостатки метода: высокая стоимость, определенная сложность реализации.

Как правило, алгоритм обработки и анализа реализуется с использованием компьютерной техники.

3) метод ПИК-фактора.

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

- среднеквадратичное значение уровня (СКЗ) вибрации, т.е. энергии вибрации;
- пиковую амплитуду (ПИК) вибрации.

Отношение двух этих параметров ПИК/СКЗ называется ПИК-фактор. Осциллограмма вибросигнала нового хорошо смазанного подшипника имеет стационарный двухполярный сигнал шумового характера, симметричный относительно временной оси.

С течением времени, по мере появления дефектов на кинематических узлах подшипника, в вибросигнале начнут появляться отдельные, короткие амплитудные пики, соответствующие моментам соударения дефектов. В дальнейшем, с развитием дефекта, сначала увеличиваются амплитуды пиков, потом постепенно увеличивается и их количество. Появившись вначале, например, на одном из шариков, он создаёт забоину на кольце, с него она переносится на другой шарик, дефекты шариков начинают вырабатывать сепаратор и т.д. до полного разрушения. Зависимости значений ПИК и СКЗ представляют собой монотонные, неубывающие функции одинакового характера, но смещённые друг относительно друга во времени. На рисунке 3 представлены графики показывающие зависимости ПИК, СКЗ и ПИК-фактора по мере развития дефекта.

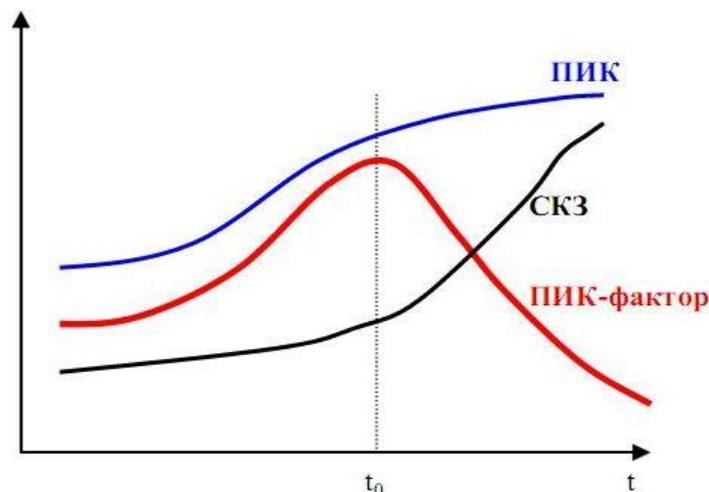


Рис. 3. Метод ПИК-фактора

Сначала, по мере появления и развития дефекта, нарастает функция ПИК, а СКЗ меняется очень мало, поскольку отдельные, очень короткие амплитудные пики практически не меняют энергетические характеристики сигнала. В дальнейшем, по мере увеличения и количества пиков, начинает увеличиваться энергия сигнала, возрастает СКЗ вибрации.

Достоинства метода: низкая стоимость, простота реализации.

Недостатки метода: слабая помехозащищенность, необходимость проводить многократные измерения.

4) *Метод ударных импульсов.*

Метод основан на измерении и регистрации механических ударных волн, вызванных столкновением двух тел. Ускорение частиц материала в точке удара вызывает волну сжатия, которая распределяется в виде ультразвуковых колебаний. Ускорение частиц материала в начальной фазе удара зависит только от скорости столкновения и не зависит от соотношения размеров тел.

Период времени мал, и заметной деформации не происходит. Величина фронта волны является мерой скорости столкновения двух тел. Во второй фазе удара поверхности двух тел деформируются, энергия движения отклонит тело и вызовет в нем колебания. Для измерения ударных импульсов используется пьезоэлектрический датчик, на который не оказывает влияние фон вибрации и шум.

Вызванная механическим ударом фронтальная волна сжатия возбуждает затухающие колебания в датчике (преобразователе). Пиковое значение амплитуды этого затухающего колебания прямо пропорционально скорости удара. Поскольку затухающий переходный процесс очень хорошо определяется и имеет постоянную величину затухания, его можно отфильтровать от других сигналов, т.е. от сигналов вибрации.

Изменение и анализ затухающего переходного процесса — основа метода ударных импульсов. Наблюдаемый процесс аналогичен тому, как отзывается на удары камертон. Как бы вы по нему ни ударили — он звенит на своей собственной частоте. Так и подшипниковые узлы от соударения дефектов «звонят» на своей частоте.

Частота эта практически всегда лежит в диапазоне 28–32 кГц, и, в отличие от камертона, эти колебания очень быстро затухают, поэтому на осциллограммах они выглядят практически как импульсы, что и дало название методу. Результаты измерений очень легко нормировать по скорости соударения, зная геометрию подшипника и его обороты.

Амплитуды ударных импульсов однозначно связаны со скоростью соударения дефектов и глубиной дефектов. Поэтому по амплитудам ударных импульсов можно достоверно диагностировать наличие и глубину дефектов.

Достоинства метода: высокая чувствительность, информативность и помехозащищенность. Метод прост и доступен в реализации, существуют простые, портативные приборы.

Недостатки метода: существует одно ограничение, связанное с конструктивным исполнением механизма. Поскольку речь идет об измерении ультразвуковых волн колебаний, которые очень сильно затухают на границах разъемных соединений, для точности измерений необходимо, чтобы между наружным кольцом подшипника и местом установки датчика существовал сплошной массив металла. В большинстве случаев это не вызывает проблем. Метод широко используется в среде профессионалов, прост и доступен персоналу, обслуживающему оборудование.

Вибрация, создаваемая подшипником качения, характеризуется следующими основными частотами, связанными с элементами подшипников [4]:

- частота вращения сепаратора относительно наружного кольца:

$$f_c = \frac{1}{2} f_{\dot{a}\dot{\delta}} \cdot \left\{ 1 - \frac{d_{\dot{\delta}\dot{\epsilon}}}{d_c \cdot \cos(\alpha)} \right\} \quad (1)$$

где f_{ep} - частота вращения подвижного кольца относительно неподвижного; d_{mk} - диаметр тела качения; α - угол контакта тел и дорожек качения; $d_c = 1/2(d_n - d_в)$ - диаметр сепаратора, d_n - диаметр наружного кольца, $d_в$ - диаметр внутреннего кольца.

- частота перекачивания тел качения по наружному кольцу:

$$f_i = \frac{1}{2} f_{\dot{a}\dot{\delta}} \cdot \left\{ 1 - \frac{d_{\dot{\delta}\dot{\epsilon}}}{d_c \cdot \cos(\alpha)} \right\} \cdot z = f_c \cdot z \quad (2)$$

где z - число тел качения.

- частота перекачивания тел качения по внутреннему кольцу:

$$f_{\dot{a}} = \frac{1}{2} f_{\dot{a}\dot{\delta}} \cdot \left\{ 1 + \frac{d_{\dot{\delta}\dot{\epsilon}}}{d_c \cdot \cos(\alpha)} \right\} \cdot z = (f_{\dot{a}\dot{\delta}} - f_{\dot{n}}) \cdot z \quad (3)$$

- частота вращения тел качения относительно поверхности колец:

$$f_{\dot{\delta}\dot{\epsilon}} = \frac{\frac{1}{2} f_{\dot{a}\dot{\delta}} \cdot d_c}{d_{\dot{\delta}\dot{\epsilon}} \cdot \left\{ 1 - \frac{d_{\dot{\delta}\dot{\epsilon}}^2}{d_c^2 \cdot \cos^2(\alpha)} \right\}} \quad (4)$$

Получив частоты вращения основных элементов подшипника можно проанализировать и «отфильтровать» спектр вибрационного сигнала, определив тем самым пиковые амплитуды колебаний этих элементов, соответствующие моментам соударения в местах дефектов. По полученным данным проводится исследование характера дефекта и степени его развития, позволяющее также выявить зарождающиеся дефекты.

Техническое диагностирование является объективным методом оценки технического состояния динамически нагруженных узлов и механизмов металлорежущего оборудования с целью определения наличия или отсутствия дефектов, степени их развития и сроков проведения ремонта, в том числе прогнозирования технического состояния оборудования. Правильный выбор методов и средств технической диагностики позволит значительно сократить потери времени и денежных средств.

Литература

1. <http://www.slovopedia.com/2/210/267143.html>
2. ГОСТ 27518-87 Диагностирование изделий. Общие требования
3. https://ru.wikipedia.org/wiki/Вибрационная_диагностика
4. Балицкий Ф.Я., Барков А.В., Баркова Н.А. Неразрушаемый контроль: Справочник. – М., «Машиностроение». - 2005 г. - Т. 7 - Книга 2 - 829 с.