



УДК 620.179

© В. И. Римлянд, А. И. Кондратьев, А. В. Казарбин, 2005

## МЕТОДЫ АКТИВНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ТЕЛ

*Римлянд В. И.* – проректор по научной работе и информатизации д-р техн. наук, проф. кафедры «Физика» (ТОГУ); *Кондратьев А. И.* – завкафедрой «Прикладная математика» д-р техн. наук, проф. (ДВГУПС); *Казарбин А. В.* – канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры «Физика» (ТОГУ)

Исследована возможность применения методов активной ультразвуковой диагностики к вращающимся телам и узлам трения. Приведены экспериментальные результаты исследования возможности возбуждения и приема ультразвуковых импульсов, а также передачи сигнала на неподвижное основание. Описана методика регистрации ультразвуковых импульсов, проходящих подшипник качения во время его вращения.

The possible application of the active ultrasonic testing for rotating parts and friction units has been analyzed. The experimental data obtained in studying the possibility of excitation-and-reception of ultrasonic pulses and also pulse transmission to a stator supporting structure are shown. Recording technique for ultrasonic pulses going through a bearing during its rotation is also discussed.

### Введение

Современные экономические условия, увеличение удельной мощности агрегатов, снижение материалоемкости, повышение скоростей движения и нагрузок, ужесточение экологических норм предъявляют повышенные требования к точности и оперативности измерений, к качеству контроля и диагностике различных агрегатов на стадии их проектирования, изготовления, испытаний, эксплуатации и ремонта. Традиционные методы неразрушающего контроля (радиационные, акустические, магнитные, капиллярные и другие [1]) широко применяются на стадии изготовления и ремонта, однако, при их применении в условиях работающего оборудования возникают значительные трудности. Ультразвуковая дефектоскопия различных вращающихся деталей (роторы генераторов и электродвигателей, различные турбины, маховики и т.д.) проводится в настоящее время в основном только в статическом режи-

ме. Для контроля состояния объектов в динамическом режиме применяются методы вихревых токов и вибродиагностики [1,2]. Метод вихревых токов позволяет выявлять дефекты, расположенные вблизи поверхности вращающегося тела, и неприменим для деталей сложной формы. Методики, основанные на вибро- и шумодиагностике, также имеют ряд ограничений и применяются фактически только для контроля состояния узлов трения.

Использование активных ультразвуковых методов при дефектоскопии движущихся объектов ограничивается в настоящее время контролем изделий простой формы (трубы, листовой прокат и т.д.) [3]. При этом поступательное или вращательное движение создается для ускорения процесса сканирования всей поверхности детали, а не целью выявления дефектов, которые могут возникнуть под действием динамических нагрузок [6,7].

Для диагностики узлов трения в основном применяют вибродиагностику и температурный контроль, что часто бывает недостаточно, так как позволяет выявлять дефекты только на стадии значительного развития.

Основной целью нашей работы являлось исследование возможности применения методов активной ультразвуковой дефектоскопии для неразрушающего контроля вращающихся деталей и узлов трения (подшипников) в динамическом режиме. Разработка подобных систем позволит в реальном масштабе времени отслеживать развитие дефектов, возникающих под действием вибрации, центробежных сил, трения и других факторов, а также контролировать качество сборки механизмов.

### **Активная ультразвуковая диагностика вращающихся тел**

Методы активной ультразвуковой диагностики основаны на анализе параметров распространяющихся ультразвуковых импульсов. Соответственно при работе измерительной системы, позволяющей применить данные методики к вращающемуся телу, должны сохраняться амплитудные и временные характеристики сигнала. При этом возникает ряд проблем: во-первых, необходимо передать возбуждающий электрический импульс на преобразователь, установленный на вращающейся детали; во-вторых, передать сигнал с приемника ультразвука на неподвижное основание; в-третьих сложность в реализации метода связана с высоким уровнем шумов, возбуждаемых при вращении, основным источником которых являются подшипники и вибрация основания или корпуса в целом.



Для проведения исследований была разработана и создана автоматизированная система ультразвуковой диагностики вращающихся тел [8-10]. Система состоит из излучающего и приемных пьезопреобразователей (ПЭП), закрепляемых непосредственно на диагностируемой детали вблизи мест возможного возникновения дефектов, специального щеточного узла, предварительного усилителя, встроенного внутри вала, оптопары, усилителя, расположенного на неподвижном основании, датчика оборотов, АЦП-контроллера и ЭВМ. На рис. 1 показаны основные блоки системы. В качестве диагностируемого тела использовалась турбина компрессора.

Для излучения и приема УЗ использовались ПЭП, изготовленные на основе пьезокерамики ЦТС-23. Крепление преобразователя к исследуемой детали осуществлялось посредством болтового соединения. Максимум амплитудно-частотной характеристики преобразователей приходится на диапазон частот 2,5÷3 МГц.

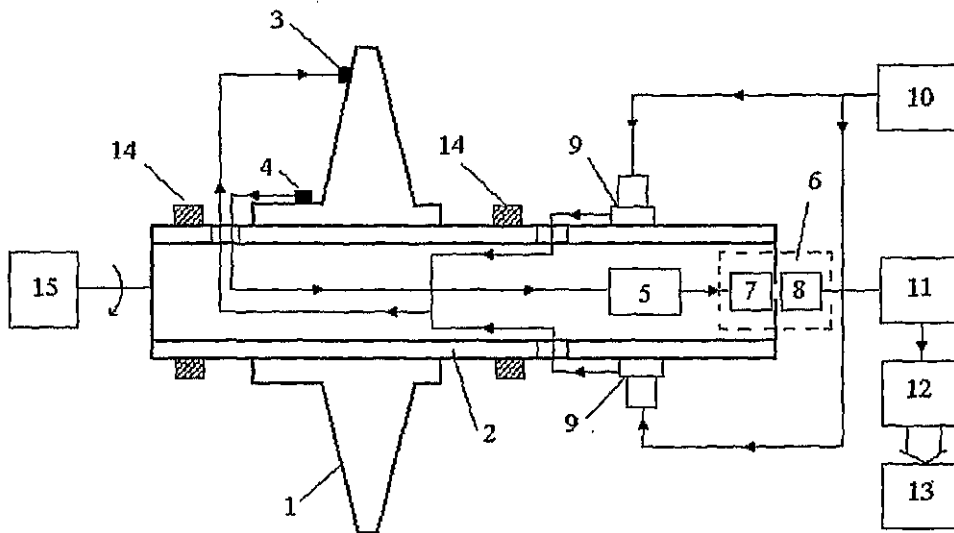


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки:

- 1 - турбина, 2 - вал, 3 - пьезоизлучатель, 4 - пьезоприемник, 5 - предварительный усилитель, 6 - оптопара, 7 - светодиод, 8 - фотодиод, 9 - щеточный узел, 10 - генератор, 11 - усилитель, 12 - АЦП-контроллер, 13 - ЭВМ, 14 - опорные подшипники, 15 - привод стэнда

Приемник УЗ подключался ко входу предусилителя, выход которого был соединен с оптопарой. Питание предусилителя производилось от встроенного внутри вала автономного источника питания. Оптопара была собрана на базе дискретных светодиода и фотодиода и позволяла дистанционно на базах до 50 мм передавать сигнал с вращаю-

щейся детали на неподвижную регистрирующую аппаратуру. Светодиод устанавливался по оси вала на его торце. Все элементы преусилителя предварительно подвергались испытаниям – вращению со скоростью до 500 об/с при радиусе 20 мм. С выхода оптопары сигнал поступал на вход аналогового широкополосного усилителя и далее на вход АЦП-контроллера, а затем в цифровом виде записывался в память ЭВМ. Тактовая частота АЦП составляла 8 МГц. При записи сигнала в память ЭВМ происходило автоматическое синхронное усреднение по заданному числу цифровых реализаций  $N$ .

Для передачи электрического импульса с генератора на излучатель использовался щеточный узел В качестве нулевого провода использовалась линия: основание - подшипники – турбина. Для определения возможностей щеточного узла были проведены дополнительные эксперименты. Прямоугольный импульс с генератора, длительностью 0,1 мкс и амплитудой 70 В, подавался на одну из щеток, подключенную к излучателю.

Вторая щетка подключалась к осциллографу. Проведенные эксперименты показали, что изменение формы импульса не происходит при увеличении скорости вращения до 200 об/с, при более высоких скоростях происходит уменьшение амплитуды и формы отдельных импульсов (примерно на 40-50 % при скорости 500 об/с).

Как указывалось выше, основной проблемой при измерениях по данной схеме является выделение полезного сигнала на фоне высоких уровней шумов. Теоретически частота высших гармоник шумов  $f_m$  может быть оценена как  $f_m = n \times p$ , где  $n$  – частота вращения, а  $p$  – число шариков в подшипниках (при  $n = 500$  об/с и  $p = 10$ ,  $f_m = 5$  кГц). Если допустить возможность возбуждения на порядок более высоких гармоник, то  $f_m = 50$  кГц. Более подробно проблема шумов рассмотрена в следующем разделе, здесь только отметим, что данные оценки вполне согласуются с экспериментальными результатами и реально спад АЧХ шумов происходит при частотах 50-100 кГц. Из этого следует, что полоса рабочих частот системы диагностики должна быть выше 100-150 кГц.

Для подавления низких частот на входе преусилителя был установлен фильтр низких частот. Уровень собственных шумов преусилителя составлял 10 мкВ. Коэффициент усиления в полосе частот 0÷100 кГц изменялся от 1 до 20, а в полосе 200÷1000 кГц составлял около 200. При измерениях в режиме акустической диагностики (смотри ниже) амплитуда полезного сигнала в 10-20 раз превышала уровень шумов.

На рис. 2 приведены «осциллограммы» ультразвуковых импульсов, записанные в память ЭВМ, при различных скоростях вращения



при усреднении по 100 реализациям. Возбуждающий импульс с генератора имел амплитуду 40 В и длительность 1 мкс. На рис. 2 видно, что форма и амплитуда импульса, поступающего с выхода оптопары, в зависимости от скорости вращения изменяется не значительно и фактически совпадает с сигналом, записанным в статическом режиме.

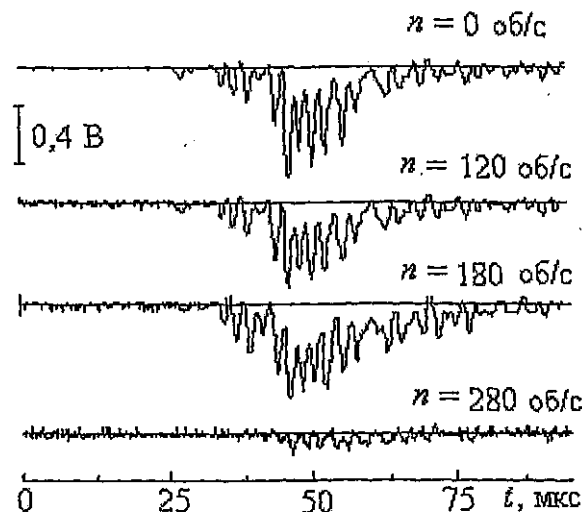


Рис. 2. Осциллограммы сигнала при различных скоростях вращения

Форма сигнала, показанного на рис. 2, определяется свойствами датчиков, передающей и принимающей электроникой и акустическим трактом. Малая толщина корпуса турбины (порядка 5 мм), соизмеримая с длиной волны ультразвуковых колебаний, и значительное расстояние от излучателя до приемника (порядка 120 мм) позволяют интерпретировать принятый сигнал как волны Лэмба. Моды колебаний идентифицировались по скорости распространения волн. Составляющая волнового пакета при времени прихода около 25 мкс соответствует нулевой симметричной моде колебаний, около 37 мкс – первой антисимметричной моде, около 45 мкс – нулевой антисимметричной.

Для проверки возможности обнаружения дефектов, возникающих при вращении детали, был проведен модельный эксперимент по обнаружению трещины. Приемник ультразвука устанавливался на поверхности турбины таким образом, чтобы при вращении за счет центробежных сил происходило нарушение акустического контакта (пьезодатчик прижимался к поверхности турбины через резиновую прокладку толщиной 1,5 мм). При этом ввиду наличия смазки этот процесс происходил постепенно.

Изменение сигнала при наличии «трещины» для различных скоростей вращения показано на рис. 3. При скоростях вращения от 0 до 70 об/с сигнал фактически не изменяется по амплитуде и форме, т.е. нарушения акустического контакта не происходит. При увеличении  $n$  от 70 до 80 об/с начинается уменьшение амплитуды ультразвукового импульса без существенного изменения формы сигнала. При  $n > 80$  об/с уменьшается амплитуда сигнала и изменяется его форма и при  $n > 90$  об/с амплитуда сигнала не превышает уровень фона. Таким образом, можно сделать вывод, что в интервале скоростей от 70 до 90 об/с происходит полное нарушение акустического контакта. Уменьшение скорости от 90 до 70 об/с приводило к полному восстановлению сигнала как по амплитуде, так и по форме.

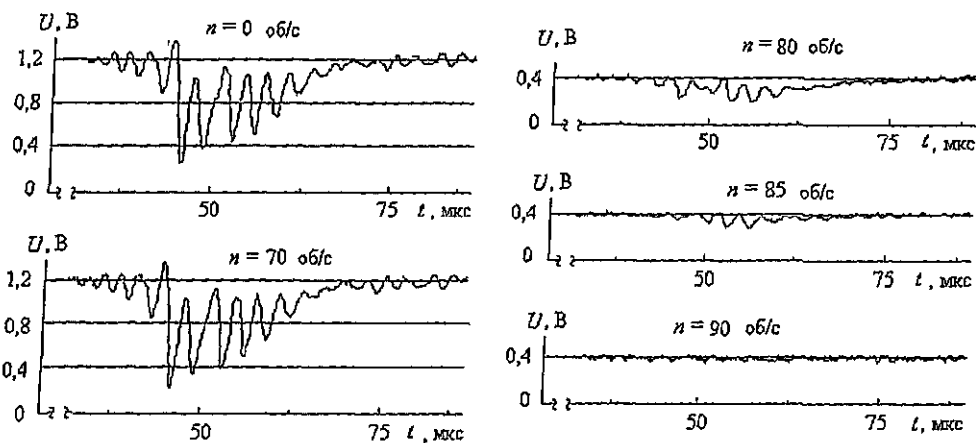


Рис. 3. Изменение ультразвукового сигнала при нарушении акустического контакта

При работе системы активной ультразвуковой диагностики вращающихся тел вследствие влияния центробежных сил могут изменяться передаточные характеристики области контакта ПЭП – поверхность детали, а следовательно, и амплитудно-частотные характеристики принятого сигнала. Расчеты [11] показывают, что используемое болтовое крепление обеспечивает допустимый (10 %) уровень спектральных искажений сигнала. При выборе метода контроля также необходимо учитывать влияние шумов на чувствительность метода. Теоретические оценки для теневого и эхо-методов показывают, что при отношении сигнал-шум больше 3, теневой метод позволяет обнаруживать дефекты с эффективным размером более  $1 \div 1,5$  мм, а эхо-метод – фиксировать изменение размеров дефекта с чувствительностью  $0,5 \div 1$  мм [11].



Таким образом, можно сделать вывод о возможности применения методов активной ультразвуковой диагностики для обнаружения дефектов, возникающих в деталях, вращающихся со скоростью до 200 об/с. При этом возможны различные варианты ультразвукового контроля в зависимости от типа детали и поставленной задачи: постоянный мониторинг особо ответственных деталей стационарно встроенными датчиками; контроль мест возможного возникновения дефектов с целью определения критических скоростей вращения; специальный контроль во время сдаточных испытаний. В некоторых случаях могут проводиться исследования влияния скорости вращения на характер развития дефекта, обнаруженного при статических измерениях. При дефектоскопии в динамическом режиме возможно применение различных методов активного акустического контроля, однако, предпочтение должно быть отдано наиболее чувствительным методам, при использовании которых происходит значительное изменение амплитудно-временных характеристик ультразвуковых импульсов при появлении дефектов. Выбор конкретной методики измерений зависит от вида предполагаемого дефекта, геометрии детали, способа крепления датчиков. Места крепления ультразвуковых датчиков выбираются заранее исходя из конструктивных особенностей детали и технологии ее сборки. Это могут быть области, испытывающие наибольшие нагрузки при вращении. К ним относятся узлы крепления отдельных элементов, сварочные швы, области концентрации наибольших механических напряжений. Для повышения эффективности контроля возможно использование нескольких пар излучатель – приемник, установленных вблизи мест предполагаемых дефектов.

### **Методика диагностики подшипникового узла**

Второй задачей, решаемой при создании системы диагностики вращающихся тел, было исследование возможности активного ультразвукового контроля в динамическом режиме узлов трения, в частности, подшипников качения. Был разработан метод, позволяющий фиксировать ультразвуковой сигнал, возбуждаемый ПЭП и проходящий непосредственно «сквозь» подшипник [12]. При этом необходимо было решить ряд возникающих проблем: 1) значительное ослабление сигнала при прохождении УЗ импульсом контактов внутренней обоймы – шарик – внешняя обойма; 2) значительное увеличение уровня шумов в сравнении с ранее рассмотренной схемой измерений, так как исследуемый узел, к которому закрепляется приемник УЗ, является непосредственным их источником; 3) динамическое изменение сигнала в процессе измерений, связанное с изменением «пути» прохождения

сигнала от излучателя до приемника вследствие изменения положения шариков при вращении.

Блок-схема установки, использованной для изучения возможности диагностики узлов трения в динамическом режиме, приведена на рис. 4. В качестве объекта исследований был выбран шарикоподшипник № 308. Подшипник был плотно надет на вал диаметром 40 мм. На вале был установлен щеточный узел, аналогичный описанному выше. Излучатель УЗ закреплялся на поверхности вала на расстоянии 5 мм от внутренней обоймы подшипника. Для регистрации акустического сигнала использовался приемник специальной конструкции, обладающий повышенной чувствительностью. Предварительный усилитель имел на входе фильтр низких частот (фильтр второго порядка с частотой среза 150 кГц), коэффициент усиления 2000 и уровень собственных шумов – 5 мкВ:

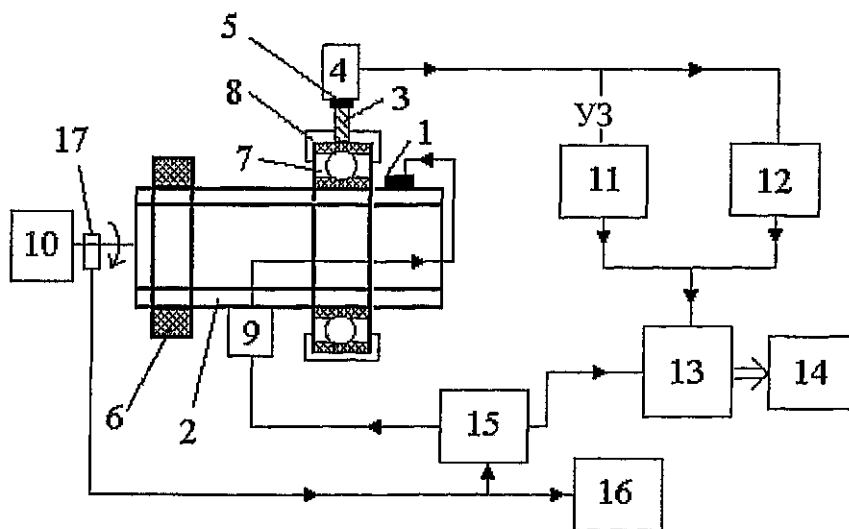


Рис. 4. Блок-схема установки для диагностики подшипникового узла:

1 - излучатель, 2 - вал, 3 - звукопровод, 4 - предварительный усилитель, 5 - пьезокерамика, 6 - опорный подшипник, 7 - диагностируемый подшипник, 8 - корпус подшипника, 9 - щеточный узел, 10 - привод, 11 - анализатор спектра, 12 - усилитель, 13 - АЦП-контроллер, 14 - ЭВМ, 15 - генератор, 16 - частотомер, 17 - датчик оборотов

Высокий уровень шумов, значительное ослабление и нестабильность акустического сигнала потребовали значительного усложнения методов обработки и регистрации сигнала, а также разработки специального способа измерения АЧХ системы. Для регистрации и записи сигнала в динамическом режиме были опробованы два основных варианта.





1. В цифровом виде записывался реальный сигнал в режиме автоматического синхронного усреднения по заданному числу реализаций  $N$ .

2. Сигнал с предусилителя подавался на вход анализатора спектра СК-56, затем с его видеовыхода на вход АЦП-контроллера (тактовая частота АЦП составляла 500 кГц) и последующее синхронное усреднение. В данном случае каждая записанная реализация представляла собой демодулированный сигнал, предварительно прошедший высокочастотный пропускающий фильтр и детектирование, то есть являлась огибающей сигнала в узкой полосе спектра (рис. 5).

Экспериментальные измерения показали, что надежное выделение сигнала даже при малых скоростях вращения в режимах 1 и 2 возможно только, если возбуждение излучателя производится не отдельным видеоимпульсом, а радиоимпульсом с заданной частотой заполнения и длительностью более 100 мкс для режима 1 и более 30 мкс для режима 2. При этом частота заполнения  $\nu$  должна быть равной частоте одного из максимумов АЧХ системы излучатель – подшипник – приемник и значительно превышать частоту максимума АЧХ шумов. В наших экспериментах она составляла 270 и 475 кГц. При высоких  $\nu$  амплитуда сигнала достаточно быстро уменьшалась и при  $\nu = 600$  кГц была примерно на порядок меньше, чем при 475 кГц.

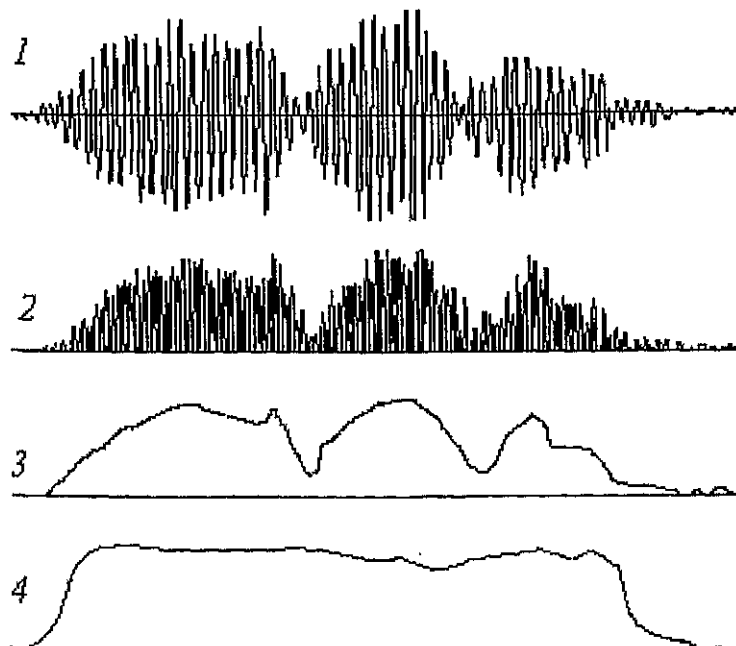


Рис. 5. Преобразование сигнала в режиме 2

На рис. 6 приведены осциллограммы сигналов, записанных в память ЭВМ в режиме 1 при различных скоростях вращения подшипника ( $\nu = 270$  кГц). Первые два графика получены для статического режима и  $N = 1$  при различном расположении шариков в подшипнике и одинаковом взаимном расположении излучателя и приемника. Из рис. 6 видно, что приведенные реализации существенно различаются. Это связано с тем, что каждую из них можно рассматривать как результат интерференции акустических волн, проходящих от излучателя до приемника через различные шарики подшипника. Так как положение последних при повороте изменяется, то меняется и результат интерференции. Подобное отличие каждой реализации при вращении приводит к тому, что уровень случайного шума уже при  $n \geq 30$  об/с значительно превосходит амплитуду полезного сигнала, и синхронное усреднение даже по большому  $N$  не позволяет выделять сигнал уже при скорости более  $50 \div 60$  об/с.

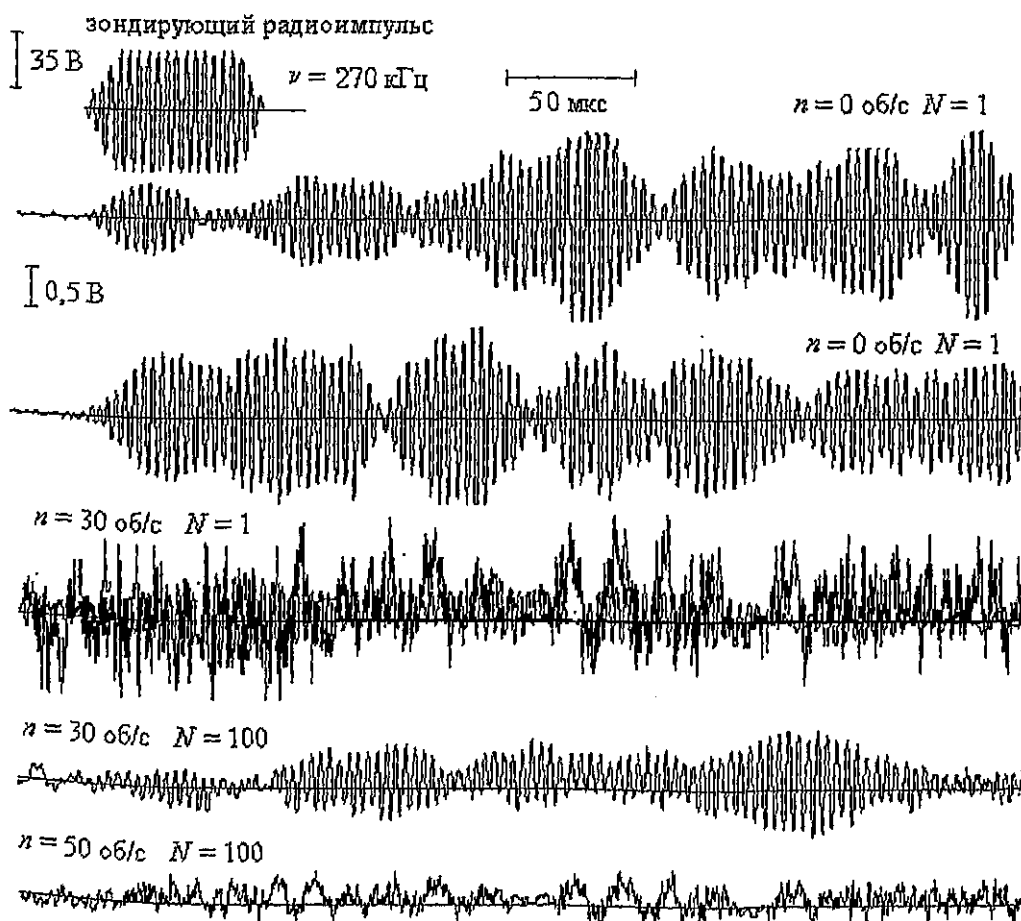


Рис. 6. Осциллограммы сигнала, полученные в режиме 1



Осциллограммы сигнала, полученные в режиме 2, приведены на рис. 7. Сравнение рис. 6 и 7 показывает, что режим 2 позволяет наблюдать акустический сигнал при значительно больших скоростях. При  $n = 50$  об/с амплитуда сигнала только в два раза меньше, чем при  $n = 0$ ; при  $n = 100$  об/с полезный сигнал значительно превышает уровень фона и может быть идентифицирован для данного подшипника при скорости вращения до 120 об/с. «Преимущество» режима 2 связано с тем, что, во-первых, узкополосный фильтр анализатора выделяет сигнал в узкой полосе, совпадающей с частотой заполнения радиоимпульса; во-вторых, после детектирования каждая реализация представляет собой огибающую сигнала и усреднение, равносильное сложению только положительных чисел, и соответственно сдвиг по фазе отдельных реализаций особого значения не имеет.

При осуществлении контроля по данной методике необходимо достаточно точное знание АЧХ системы. Определенная сложность при этом состоит в том, что даже в статическом положении АЧХ характеристики, полученные при одинаковом угловом взаимном расположении излучателя и приемника, но различном положении шариков в подшипнике, существенно различаются. Поэтому нами была разработана специальная методика измерения, позволявшая записывать амплитудно-частотный спектр системы в автоматическом режиме по заданному числу реализаций  $N$  и соответственно получать усредненные АЧХ системы для заданной скорости вращения и определять частоты заполнения радиоимпульса.

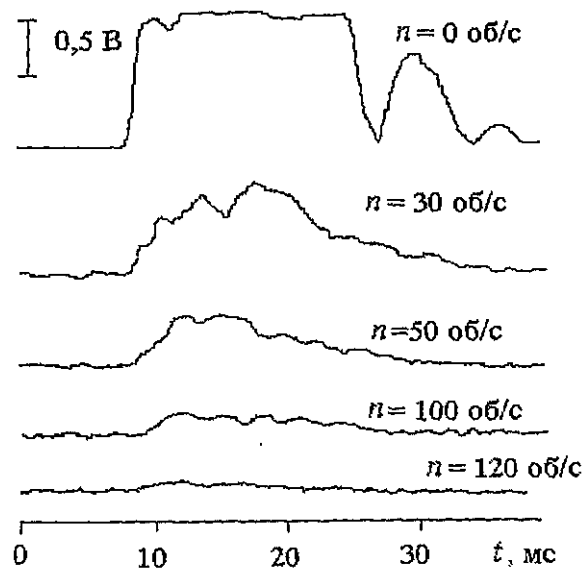


Рис. 7. Осциллограммы сигнала, полученные в режиме 2

После того как были отработаны методы возбуждения, приема и обработки акустического сигнала, проходящего «сквозь работающий» подшипник, данная методика была использована для оценки степени износа подшипника. Степень износа контролировалась по величине радиального зазора. Подшипник с величиной зазора менее 0,05 мм принимался за образцовый с нулевым износом (П-Об), с радиальным зазором 0,1 мм считался изношенным в средней степени (П-Ср) и с зазором 0,2 мм – полностью дефектным (П-Д). Основные измерения были проведены при наличии смазки в подшипниках и отдельно для подшипника П-Об в отсутствие смазки (П-О-с). Результаты, приведенные выше, получены для подшипника П-Об.

Экспериментальные исследования показали, что в качестве параметра, характеризующего степень износа, может быть принята максимальная амплитуда сигнала, измеренного в режиме 2 –  $A_2$ . На рис. 8 приведены зависимости значений  $A_2$  от скорости вращения для различных подшипников при  $\nu = 270$  кГц. Из графиков видно, что увеличение степени износа приводит к уменьшению амплитуды сигнала при всех скоростях вращения. Так, для подшипника П-Об акустический сигнал может быть выделен на фоне шумов при скорости, близкой к 120 об/с, а для П-Д – только при 75 об/с. Это, видимо, связано с двумя факторами. Во-первых, в подшипнике с большим износом при увеличении скорости происходит «зависание» значительной части шариков за счет величины зазора, который уже не успевает «заполняться» смазкой, что и приводит к нарушению акустического контакта. Во-вторых, подшипник с большей степенью износа при вращении «больше шумит», что уменьшает отношение полезный сигнал – шум. Уменьшение амплитуды с ростом  $n$  существенно зависело от частоты заполнения радиоимпульса. При этом степень износа влияла на характер изменения – с ростом  $\nu$  для подшипников с большей степенью дефектности амплитуда быстрее уменьшалась при увеличении скорости вращения.

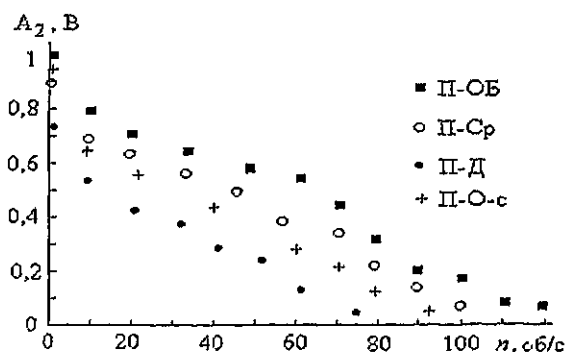


Рис. 8. Зависимости значений  $A_2$  от скорости вращения для различных подшипников



Для определения эффективности разработанного метода для контроля состояния подшипников качения в сравнении с традиционной методикой были произведены измерения вибрационного сигнала подшипников с различной степенью износа. Преобразователь закреплялся на корпусе диагностируемого подшипника. Проведенные измерения показали, что предложенный метод более чувствителен к износу подшипника, а отсутствие смазки влияет примерно одинаково на изменение амплитуды УЗ импульса, проходящего сквозь подшипник, и на вибрационный сигнал. Предложенный метод может быть использован для оценки остаточного ресурса подшипников и выявления дефектов на более ранних стадиях развития в сравнении с используемыми методиками.

### **Заключение**

Проведенные исследования показывают, что методы активной ультразвуковой диагностики могут быть применены для обнаружения дефектов во внутреннем объеме тел, вращающихся с большой скоростью. При дефектоскопии вращающегося тела УЗ преобразователи закрепляются непосредственно на вращающейся детали вблизи мест возможного возникновения дефектов. Разработанная методика позволяет проводить активный ультразвуковой контроль при скорости вращения до 200 об/с. Для уменьшения влияния шумов необходимо «работать» в диапазоне частот, превышающем 100-150 кГц. Эффективное выделение полезной составляющей сигнала необходимо производить с помощью низкочастотной фильтрации, на стадии предварительного усиления, и синхронного усреднения в цифровом виде.

Активная ультразвуковая диагностика подшипников качения возможна путем регистрации УЗ импульсов, проходящих «сквозь» подшипник, вращающийся со скоростью до 120 об/с. Возбуждение УЗ импульсов в этом случае может производиться излучателем, закрепленным на внутренней, вращающейся обойме подшипника, приемник УЗ устанавливается на внешнем неподвижном корпусе. Амплитуда акустического сигнала, прошедшего «сквозь» подшипник, уменьшается при увеличении степени износа подшипника, а также зависит от наличия смазки. Предложенный метод может быть использован для выявления дефектов на ранних стадиях развития и оценки остаточного ресурса подшипников.



### Библиографические ссылки

1. *Неразрушающий* контроль и диагностика: Справочник. М., 1995.
2. *Wang E. J., McFadmm P. D.* Application of wavelets to gearbox vibration signals for fanet detection. *J. Sound and vibr.* 1996, V. 192, N 5.
3. *Thomson W. T.* *Vibration theory and applications* // London. 1971.
4. *Айрапетов Э. Л., Соколова А. Г., Хомяков Е. И.* Виброакустическая диагностика выкрашивания и заедания зубчатых колес на ранней стадии // Точность и надежность механических систем. Стохастическая локализация врожденности. Рига, 1983.
5. *Баршдорф Д.* Методы диагностирования механизмов вращения. Техническая диагностика // III Международный симпозиум ИМЕКО, 1983.
6. *Вибрационная* диагностика зарождающихся дефектов зубчатых механизмов / Э. Л. Айрапетов, Ф. Я. Балицкий, М. А. Иванова и др. // Техническая диагностика. Суздаль, 1982.
7. *Виброакустическая* диагностика зарождающихся дефектов / Ф. Я. Балицкий, М. А. Иванова, А. Г. Соколова, Е. И. Хомяков. М., 1984.
8. Пат. 2123688 РФ Устройство ультразвукового контроля вращающихся изделий / А. В. Казарбин (РФ).
9. Пат. 2085935 РФ Способ ультразвуковой дефектоскопии вращающихся деталей / В. И. Римлянд, А. И. Кондратьев, А. В. Казарбин (РФ).
10. Пат. 2122728 РФ Способ ультразвукового контроля вращающихся изделий / А. И. Кондратьев, В. И. Римлянд, А. В. Казарбин (РФ).
11. *Римлянд В. И.* Разработка акустических методов контроля динамических объектов и процессов: Дис. ... д-ра техн. наук. Хабаровск, 2003.
12. Пат. 2213336 РФ Способ ультразвукового контроля подшипников качения / В. И. Римлянд (РФ).