Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
Кафедра «Информатики и вычислительной техники»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ А.И. Легалов
подпись инициалы, фамилия
« ___ » _____ 20 __ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И РЕАЛИЗАЦИЯ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ПОДШИПНИКОВ

09.04.01 Информатика и вычислительная техника
09.04.01.04 Технология разработки программного обеспечения

Научный руководитель	_____	к.т.н., доцент	Д.А. Швец
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		А.О. Езерский
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	Зав. отд. ССГПиИБ АОДМС Кр.к.	В.В. Качалин
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____	к.т.н., доцент	В.И. Иванов
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Красноярск 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
1 Теоретическая часть 5
1.1 Обзор 5
1.2 Виды вибрации и шума в подшипниках 7
1.3 Структурная вибрация и звук 12
1.3.1 Шум поверхности качения 12
1.3.2 Шум щелчка 14
1.3.3 Шум визга (скрип) 15
1.3.4 Шум сепаратора 16
1.3.5 Колебания перекатывающихся тел качения 18
1.4 Вибрация и звук, относящиеся к производству подшипников 19
1.5 Вибрация и звук из-за неправильного обращения 21
1.5.1 Шум дефекта 21
1.5.2 Шум загрязнения 22
1.5.3 Другая вибрация и звук 23
1.6 Частота вибрации и звука в подшипниках 23
1.6.1 Собственная частота направляющих колец 23
1.6.2 Частота вращения тел качения 26
1.7 Среда распространения вибрационных колебаний 26
1.8 Обзор методов измерения вибрации 27
1.9 Методы диагностики подшипников качения 29
1.9.1 Метод ПИК-фактора 29
1.9.2 По спектру вибросигнала 31
1.9.3 Метод спектра огибающей 32
1.9.4 Метод ударных импульсов 35
2 Раздел проектирования 37
2.1 Постановка задачи 37
2.2 Требования к системе 37
2.3 Обоснование выбранных средств разработки 37
2.4 Средства разработки 38
2.4.1 Библиотека Qt 38
3 Раздел разработки 40

3.1 Описание работы программы 40
3.2 Выбор порогового значения и грануляции 40
3.3 Нахождение частоты вращения подшипника по звуковому сигналу..... 41
3.4 Блок-схема алгоритма поиска кратных экстремумов..... 45
3.5 Интерфейс приложения 46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 51
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 53
ПРИЛОЖЕНИЕ А 54

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день подшипники качения получили широкое распространение, они применяются в опорах современных механизмов и машин. Безотказная работоспособность подшипника является одним из важных аспектов определяющих надежность и долговечность работы самого оборудования. Для их безотказной работы необходимо проводить своевременную диагностику. Одной из задач технической диагностики является не только выявление и предупреждение отказов и неисправностей при функционировании объектов, но и поддержание нормальных условий для эксплуатационных показателей в установленных пределах их регулирования, с прогнозированием технического состояния в целях эффективного использования до ремонтного и межремонтного ресурса его работы.

Для диагностики подшипников качения применяются виброметры различных производителей, но работающие по схожему принципу. Производится измерение вибраций и на основании математической обработки на дисплей экрана выводится либо форма вибрационного сигнала, либо его спектр. Однако данная информация является полезной только для квалифицированных диагностов, которые основываясь на этих замерах, могут достаточно точно идентифицировать большую часть дефектов. Покупка специализированного, дорогостоящего оборудования и обращение к специалистам требует значительных финансовых расходов.

Несмотря на наличие, довольно значительного массива научных исследований и практических решений, по большей части это закрытые зарубежные разработки, а научные статьи в основном не переводятся на русский язык. Вследствие чего появляется необходимость разрабатывать собственные решения.

Целью работы является исследование и реализация методов автоматизированной обработки вибрационных сигналов, для идентификации неисправностей подшипников качения.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

– изучить распространенные методы диагностики подшипников качения;

– проанализировать виды вибрации и шума в подшипниках качения, их влияние на форму вибрационного сигнала;

– разработать алгоритмы, необходимые для автоматизации вибрационной диагностики подшипников;

– выбрать подходящую платформу и язык программирования для реализации разработанных алгоритмов;

– реализовать разработанные алгоритмы на выбранном языке программирования.

1 Теоретическая часть

1.1 Обзор

Подшипник это изделие, являющееся частью опоры, которое поддерживает вал, ось или иную конструкцию, фиксирует положение в пространстве, обеспечивает вращение, качение или линейное перемещение (для линейных подшипников) с наименьшим сопротивлением, воспринимает и передаёт нагрузку на другие части конструкции [1].

Все подшипники можно разделить на две большие группы:

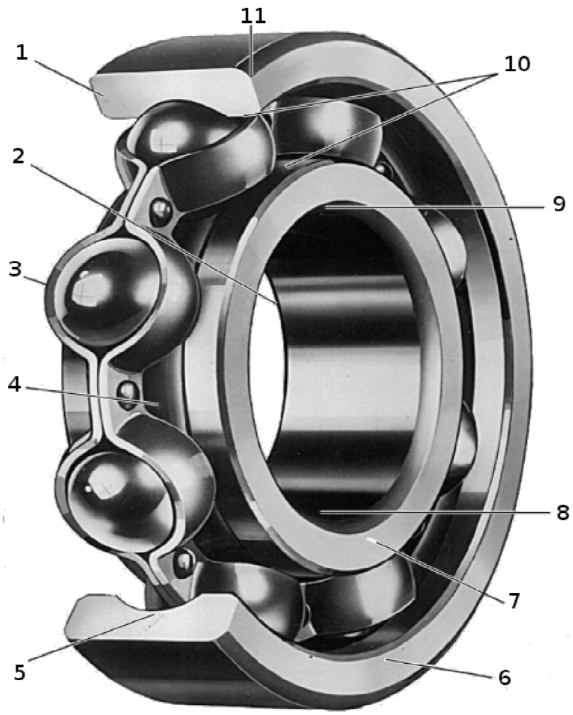
− подшипники качения;

− подшипники скольжения.

Первые «работают» за счет катящихся по дорожке качения тел шариков и роликов, вторые за счет свободного скольжения плоскостей за счет смазки и гладкости материалов относительно друг друга [2].

Наиболее распространенной группой являются подшипники качения, они применяются в стационарных и подвижных машинах многих отраслей машиностроения. Подшипники качения фиксируют положение вала в пространстве, обеспечивая вращение за счет качения (от слова катиться) тел: шаров или роликов с наименьшим сопротивлением, воспринимая и передавая нагрузку от подвижного узла на другие части конструкции. Основными техническими параметрами подшипников качения являются грузоподъемность (динамическая и статическая), размеры (длина, ширина, высота), степень точности, максимальная скорость вращения (которая различна в зависимости от типа применяемой смазки), группа радиального зазора между дорожкой и телами качения, материалы, из которых сделаны детали, дополнительные требования к уровню шума, шероховатости поверхностей, температуре отпуска колец и т.д [2].

Конструктивно подшипник качения, как правило, включает 4 основных элемента: наружное кольцо, обычно устанавливаемое в корпусе, и потому неподвижное; внутреннее кольцо, обычно насаживаемое на цапфу вала, и вращающееся вместе с ней; тела качения (шарики, ролики или другие), обкатывающиеся при работе подшипника по беговым дорожкам наружного и внутреннего колец, и сепаратор, предотвращающий в процессе работы подшипника набегание тел качения друг на друга (рисунок 1) [2].



1– Наружное кольцо; 2 – Внутреннее кольцо; 3 – Сепаратор; 4 – Дорожка качения на внутреннем кольце; 5 – Дорожка качения на наружном кольце; 6– Лицевая сторона наружного кольца, куда наносится маркировка; 7 –Лицевая сторона внутреннего кольца куда наносится маркировка; 8, 9 – Посадочный размер (внутренний диаметр); 10 – Тела качения (шарики); 11 – Фаска на наружном кольце.

Рисунок 1 – Устройство подшипника качения

Однако, иногда используют и подшипники без сепаратора. Внутренняя поверхность наружного кольца и наружная поверхность внутреннего кольца снабжаются желобами – дорожками качения, предназначенными для движения тел качения в процессе работы подшипника [2].

В некоторых машинах и механизмах для увеличения точности работы, жесткости конструкции и снижения ее габаритов используют подшипники совмещенного типа, в которых роль одного из колец подшипника выполняет непосредственно вал (дорожка качения выполняется на валу) или корпусная деталь [2].

Находят применение и подшипники без сепараторов, в которых используется большое количество тел качения. Такие подшипники имеют повышенную грузоподъемность, однако, максимальные частоты их вращения заметно ниже, чем у обычных подшипников с сепараторами из-за повышенных потерь на трение [2].

В подшипниках качения главенствующую роль играет трение качения, т.к. трение скольжения между сепаратором и телами качения, как правило, невелико. Поэтому в подшипниках качения, по сравнению с подшипниками

скольжения, наблюдаются значительно меньшие потери энергии, а также меньший механический износ.

Подшипники качения закрытого типа (с защитными крышками) почти не требуют какого-либо обслуживания, в то время, как открытые чувствительны к инородным телам, которые способны быстро разрушить подшипник [2].

Механические нагрузки, действующие на подшипник, принято разделять на радиальные, действующие перпендикулярно оси подшипника, и осевые, действующие вдоль оси подшипника [2].

Конструкции подшипников

Подшипники качения принято классифицировать по следующим конструктивным признакам:

– форма тел качения: шарики или ролики, причем ролики могут быть короткими цилиндрическими, игольчатыми, бочкообразными, коническими или витыми (пустотелыми);

– направление воспринимаемых нагрузок: радиальные, радиально-упорные или осевые нагрузки;

– рядность движения тел качения: одно-, двух- или четырехрядные;

– чувствительность к перекосам: самоустанавливающиеся (допускают перекос до 3 градусов) или несамоустанавливающиеся;

– форма отверстия внутреннего кольца: цилиндрическое или конусное;

– конструкция корпуса: сдвоенная и другие.

Преимуществами подшипников качения являются:

– небольшие потери на трение;

– взаимозаменяемость, облегчающая монтаж и ремонт подшипниковых узлов;

– малые пусковые моменты;

– нетребовательность к смазке и уходу (за исключением случаев, когда от подшипников, например, роторов авиационных двигателей, необходимо отводить тепло) .

Недостатками подшипников качения являются:

– чувствительность к ударам и вибрациям вследствие большой жесткости подшипника;

– сравнительно большие радиальные габаритные размеры;

– шум при работе с высокой частотой вращения [2].

1.2 Виды вибрации и шума в подшипниках

Различные типы вибрации и звука в подшипниках качения могут быть сгруппированы в четыре категории, перечисленные в таблице 1, в то время как

существуют другие способы классифицировать вибрацию и звук, рассуждения будут основываться на системе классификации этой таблицы. В этой системе классификации, различия между категориями не являются абсолютными [3].

Таблица 1 – Классификация звука и вибрации в подшипниках качения

	Звук		Колебания		Особенности
Структурный	Шум поверхности качения		Свободные колебания дорожки качения или (кольца качения)		Непрерывный шум, основной шум, который производят все подшипники
	Шум щелчка		Свободные колебания качения кольца, свободные колебания сепаратора		Обычный шум в определенном интервале, больших подшипников и горизонтального вала, радиальные нагрузки и низкие обороты
	Скрип		Свободные колебания дорожки качения (кольца)		Неустойчивые или непрерывные, главным образом большие цилиндрические роликовые подшипники, радиальная нагрузка, смазывание на определенной скорости
	Шум сепаратора	«CK» шум	Свободные колебания сепаратора		Регулярный шум на определенном интервале, все типы подшипников генерируют его
		«CG» шум	Вибрация сепаратора		Неустойчивый или непрерывный, смазка консистентной смазкой
		Шум нагрузки	Свободные колебания сепаратора		Определенный интервал, но немного нерегулярный при радиальной нагрузке и во время начальной стадии
	–		Колебания перекатывающихся тел качения		Непрерывные, все подшипники находятся под радиальной нагрузкой
Производственный	Шум волнистости		Вибрация из-за волнистости	Внутреннее кольцо	Непрерывный шум
				Внешнее кольцо	Непрерывный шум
				Тела качения	Непрерывный с роликами, случайный с шариками

Продолжение таблицы 1

	Звук	Колебания		Особенности
Управляющий	Шум дефекта	Вибрация из-за дефекта	Внутреннее кольцо	Регулярный шум на определенном интервале
			Внешнее кольцо	
			Тела качения	
	Шум загрязнения	Вибрация из-за загрязнения		Нерегулярный
Другие	Шум сальника	Свободные колебания сальника		Уплотнение контакта
	Шум смазки			Нерегулярный
	–	Биение	f_r	Непрерывный
			f_c	
			$f_r - 2f_c$	

Например, величина структурного шума или вибрации частично связана с производственным процессом. Когда звук генерируется, в большинстве случаев возникает вибрация, а когда происходит вибрация, обычно генерируется звук. Например, когда вибрация вызвана волнистостью, предполагается, что одновременно генерируется «звук волнистости» [3].

В то время как вибрация и звук почти всегда сопровождают друг друга, проблемы вибрации и звука обычно характеризуются с точки зрения одного или другого. Это происходит потому, что способность или неспособность человека услышать звук или почувствовать вибрацию зависит от частоты. Низкочастотный звук едва слышен, а высокочастотные вибрации не могут быть восприняты людьми [3].

По этой причине, проблемы низкой частоты являются «проблемами вибрации», а проблемы на высокой частоте относятся к «шумовым проблемам». Как показывает опыт граница, разделяющая проблемы вибрации от шумовых проблем, составляет 1 000 Гц. Другими словами, ниже 1 000 Гц принято считать вибрацию и выше 1 000 Гц звук или шум [3].

В таблице 2 будут использованы следующие обозначения:

n – положительное целое число (1, 2, 3 ...);

Z – количество тел качения;

f_{RiN} – собственная частота кольца в режиме радиального изгиба, Гц;

f_{M1} – собственной частоты в режиме угловой вибрации в инерции наружного кольца-пружинной системы, Гц;

f_r – частота вращения вала, Гц;

f_c – орбитальная частота вращения тел качения, Гц;

f_{AiN} – собственная частота кольца в осевом режиме, Гц;

f_{AM} – собственная частота в режиме осевой вибрации в пружине внешнего кольца, Гц;

$f_i = f_r - f_c$, Гц;

f_b – частота вращения тел качения вокруг центра, Гц.

Таблица 2 – Классификация сгенерированных частот

Сгенерированные частоты (частотный анализ)			Источник	Меры противодействия
БПФ исходной волны		БПФ огибающей		
радиальное (угловое) направление	осевое направление			
f_{RiN} , f_{M1}	f_{AiN} , f_{AM}	–	Выборочный резонанс волнистости (трение качения)	Улучшение жесткости подшипников, соответствующий радиальный зазор, смазка высокой вязкости, высококачественные подшипники
f_{RiN} , f_{M1} Собственная частота сепаратора	f_{AiN} ,f_{AM} Собственная частота сепаратора	Zf_c	Столкновение тел качения с внутренним кольцом сепаратора	Сокращение радиального зазора, применение предварительной загрузки, масла высокой вязкости
(≈f_{R2N} , f_{R3N})	–	?	Самоиндуцированная вибрация, вызванная трением скольжения по поверхности качения	Уменьшите радиальный зазор, примените предварительную нагрузку, измените смазку, профилактика замене подшипника.
Собственная частота сепаратора		f_c	Частота столкновения сепаратора с элементами качения или кольца	Применить предварительную нагрузку, смазку высокой вязкости, снижения ошибки монтажа.

Продолжение таблицы 2

Сгенерированные частоты (частотный анализ)			Источник	Меры противодействия
БПФ исходной волны		БПФ огибающей		
радиальное (угловое) направление	осевое направление			
Zf_c	–	–	Перемещение внутреннего кольца при перекатывании тел качения по каналу	Уменьшите радиальный зазор, примените предварительную нагрузку
$nZf_i \pm f_r$ ($nZ \pm 1$ peaks)	nZf_i (nZ peaks)	–	Волнистость внутреннего кольца дорожки качения, неровность внешнего вала	Высококачественные подшипники, повысить точность вала
nZf_c ($nZ \pm 1$ peaks)	nZf_c (nZ peaks)	–	Волнистость внешнего кольца, нерегулярные отверстия корпуса	Высококачественные подшипники, повышения точности вала
$2nf_b \pm f_c$ (2n peaks)	$2nf_b$ (2n peaks)	–	Волнистость тел качения	Высококачественные подшипники
f_{RiN} , f_{M1}	f_{AiN} , f_{AM}	Zf_i	Зарубки, вмятины, ржавчина, шелушение на внутренней дорожки качения кольца	Замена и тщательная обработка подшипника
		Zf_c		
		$2f_b$	Зарубки, вмятины, ржавчина, шелушение на телах качения	
f_{RiN} , f_{M1}	f_{AiN} , f_{AM}	Нерегулярный	Попадание грязи и мусора	Промывка, улучшение изоляции
Собственная частота сепаратора		(f_r)	Самоиндуцированная вибрация из-за трения по области контакта уплотнения	Измените изоляцию, измените смазку
?	?	Нерегулярный	Смазка или пузыри смазки, раздавленные между телами качения и дорожками качения	Измените смазку
f_r	–	–	Неправильное внутреннее кольцевое поперечное сечение	Использование высококачественных подшипников

Окончание таблицы 2

Сгенерированные частоты (частотный анализ)			Источник	Меры противодействия
БПФ исходной волны		БПФ огибающей		
радиальное (угловое) направление	осевое направление			
Собственная частота сепаратора		?	Самоиндуцированная вибрации, вызванные трением по сепаратору направляющей поверхности	Изменение бренда смазки, профилактика (мера противодействия) замене сепаратора
Собственная частота сепаратора		Zf_c	Столкновение сепаратора и тел качения, вызванные резистентностью смазки	Сокращение радиального зазора, применение предварительной нагрузки, с низким уровнем вязкости смазки
f_c	–	–	Разброс (размеров) тел качения, вращающиеся элементы не равноудалены	Использование высококачественных подшипников
$f_r - 2f_c$	–	–	Нелинейная вибрация из-за изменения жесткости шара	Использование высококачественных подшипников

1.3 Структурная вибрация и звук

Даже когда используется самая усовершенствованная производственная технология, вибрация и звук по-прежнему возникают в подшипниках качения. Вибрация как таковая и звук не ухудшают производительность подшипника, они приняты как нормальные характеристики подшипника [3].

1.3.1 Шум поверхности качения

Шум поверхности качения – самый основной звук в роликовых подшипниках. Он генерируется во всех подшипниках и является гладким и непрерывным звуком. Величина этого звука используется, чтобы оценить качество подшипника. Рисунок 2 показывает, как величина шума поверхности качения выдерживает сравнение со знакомыми звуками [3].

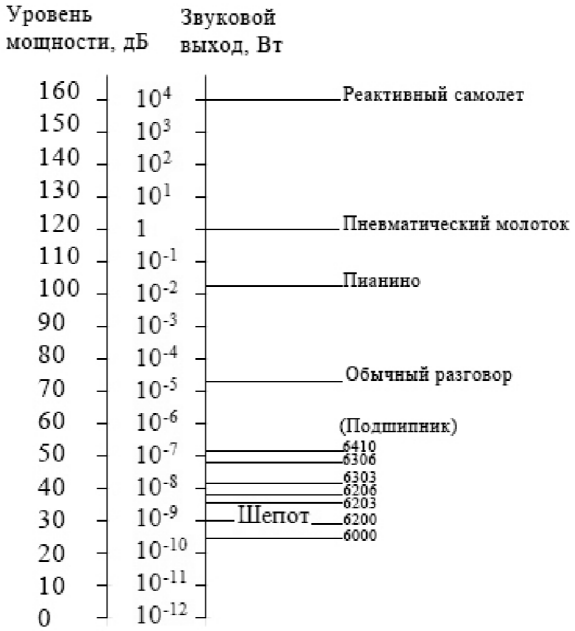


Рисунок 2 – Диапазон громкости шума поверхности качения

На этом рисунке, даже звук, сгенерированный самым громким из подшипников, подшипником №6410, составляет лишь около 1/100 величины нормального разговора. Очевидно, что энергия, связанная с шумом поверхности качения, очень ограничена. Характеристики шума поверхности качения следующие:

– частота звука не изменяется, даже когда скорость вращения изменяется. Его частота равна собственной частоте дорожки качения колец, как показано на рисунке 3;

– чем быстрее скорость движения, тем громче звук;

– если радиальный зазор уменьшается, звук становится громче;

– что касается смазки, когда ее вязкость выше звук уменьшается;

– кроме вязкости консистентной смазки, форма и размер мыльных волокон в нем также влияет на производительность шума.

– чем выше жесткость корпуса, тем ниже величина звука [3].

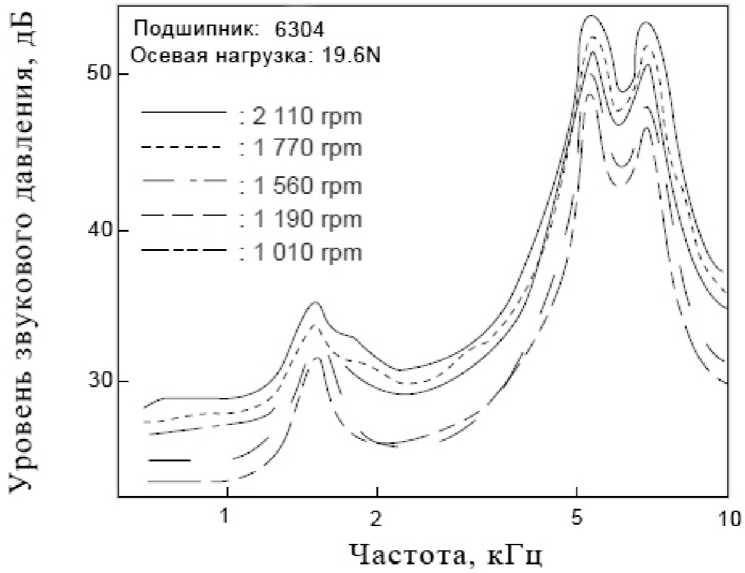


Рисунок 3 – Влияние скорости вращения на шум поверхности качения

Шум поверхности качения, как полагают, вызван ошибкой конфигурации (названный микроволнистостью или волнистостью), который происходит даже тогда, когда самые передовые технологии обработки используются для обработки поверхностей дорожек качения и тел качения в подшипнике. В связи с этим волнистость, контакта между направляющими кольцами и телами качения ведет себя подобно пружине, которая колеблется поминутно во время работы подшипников. Изменение этой так называемой пружины действует в качестве силы возбуждения на дорожке качения колец подшипника. Следовательно, генерируются вибрации и шум поверхности качения [3].

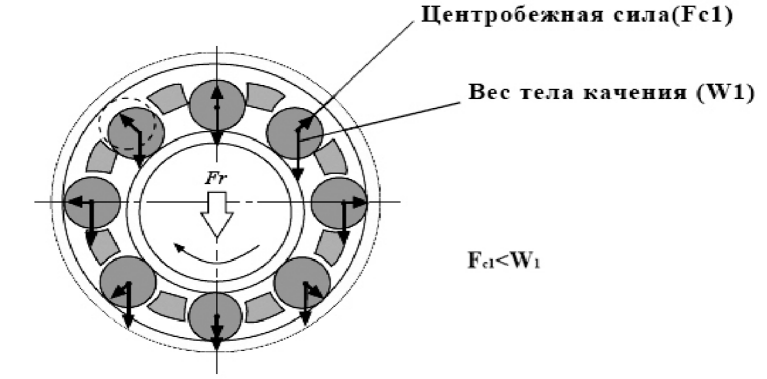
Генерация шума поверхности качения неизбежна, и нет никаких особых контрмер, чтобы устранить его полностью. Тем не менее, это может быть сведено к минимуму за счет улучшения общего качества и точности подшипников [3].

1.3.2 Шум щелчка

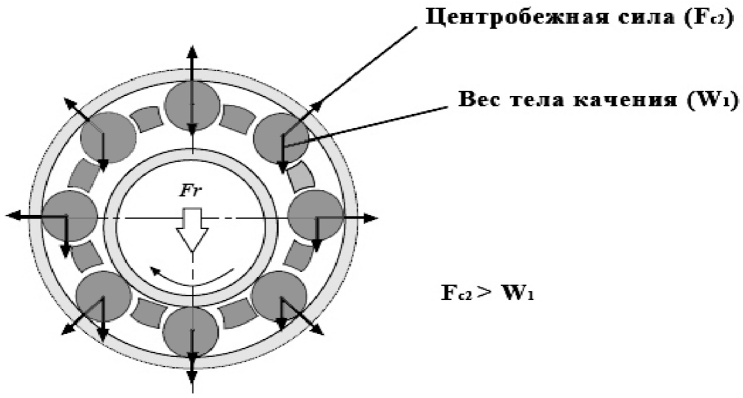
Шум щелчка имеет тенденцию происходить чаще в относительно больших подшипниках под радиальными нагрузками. Он генерируется только на низких скоростях, исчезает, когда скорость превышает определенный уровень. Он немного похож на шум дефекта, который описан в следующем разделе [3].

Генерация шума щелчка, как полагают, действует следующим образом (рисунок 4). Когда подшипник работает при радиальной нагрузке, то существует зона нагрузки и зона без нагрузки внутри подшипника. Подшипник имеет некоторый зазор в зоне прокатки элементов без нагрузки –

прокручивающиеся элементы не касаются внутреннего кольца, но в действительности касаются внешнего кольца из-за центробежной силы (F_{c2}) [3].



(а) При вращении на низкой скорости



(б) При высокой скорости вращения

Рисунок 4 – Механизм шума падения тел качения

Тем не менее, на низких скоростях, когда центробежная сила становится меньше силы тяжести (W1), тела качения падают и сталкиваются со стенкой и/или внутренним кольцом. Это столкновения между тела качения и сепаратором и/или внутренним кольцом, генерируют звук щелчка. Применение предварительной нагрузки эффективная мера противодействия шуму щелчка. Уменьшение радиальной нагрузки приводит только к небольшому улучшению. Другое решение использовать легкие тела качения, например, сделанные из керамики [3].

1.3.3 Шум визга (скрип)

Шум визга – металлический шум, который может быть довольно громким в некоторых случаях. Походит на металлическое скольжение на металле. С шумом визга температура подшипника обычно не повышается и на подшипник и на смазку, не оказывает негативное влияние [3].

Фактически, вне шумовой проблемы (если действительно это – проблема), нет никакого другого препятствия для работы подшипников. Шум визга имеет тенденцию происходить с относительно большими подшипниками используемых при радиальной нагрузке. Это часто происходит в цилиндрических роликовых подшипниках, но может также произойти в шарикоподшипниках. Характеристики шума визга:

– обычно происходит, когда радиальный зазор велик;

– происходит в основном с консистентной смазкой и лишь изредка с масляной смазкой;

– происходит чаще всего в зимнее время;

– происходит в пределах определенного диапазона скорости, который имеет тенденцию стать ниже, а размер подшипника увеличивается;

– генерация противоречива и непредсказуема, и зависит от вида и количества смазки, а также условий эксплуатации работы подшипников [3].

Под влиянием используемой смазки увеличением вибрации наружного кольца трение между наружным кольцом и телами качения считается причиной появления шума визга. Шум визга объясняется самоиндуцированной вибрацией, связанной со смазкой [3].

Однако есть важный вопрос: От чего часть окружности внешнего кольца – издает шум визга? Специалисты все еще затрудняются ответить на этот вопрос, поскольку некоторые эксперты считают, что шум генерируется в зоне нагрузки в то время как другие утверждают, что он генерируется в зоне без нагрузки [3].

Эффективные контрмеры по шуму визга включают: сокращение радиального зазора и использовать меньшую бороздку во внешней дорожке качения кольца подшипника [3].

1.3.4 Шум сепаратора

Есть два вида шума сепаратора: шум сепаратора при столкновении с элементами качения или колец подшипника и низкочастотный шум. Для различия их назвали «CK шум» и «CG шум», соответственно. CK шум может быть сгенерирован в любом типе подшипника и величина его, как правило, не очень высока [3].

Характеристики CK шума:

– происходит с сепаратором из штампованной стали, механически обработанным сепаратором и пластиковым сепаратором;

– происходит с консистентной и масляной смазкой;

– обычно происходит, если нагрузка момента применяется к внешнему кольцу подшипника;

– происходит чаще всего при большом радиальном зазоре.

CK шум приписан вращающемуся сепаратору подшипника, сталкивающемуся с элементами качения или дорожками качения колец. Поскольку существует зазор между обоймой и телами качения и направляющими кольцами, трудно полностью исключить CK шум. Тем не менее, он может быть уменьшен до некоторой степени за счет уменьшения монтажной ошибки [3].

CG шум специальный шум, который связан с самопроизвольной вибрацией сепаратора вызванной трением скольжения между направляющей поверхностью и компонентом подшипника, который ведет сепаратор. Он зачастую становится громким и поэтому проблематичен [3].

По этой причине был разработан подшипник, с целью подавить шум этого типа, рисунок 5 сравнивает производительность стандартного подшипника (рисунок 5, a), к которому никакая контрмера не была применена, с подшипником со специально разработанным сепаратором (рисунок 5, b) [3].

Подшипники были установлены на оси, и поскольку шум CG, как правило, происходит при более низких температурах, температура постепенно снижали в ходе испытания. В подшипнике со специально разработанным сепаратором, шум сепаратора не происходит даже после того как температура окружающей среды опускалась ниже 0 ° C [3].

CG шум генерируется с консистентной смазкой и имеет тенденцию происходить с относительно твердой смазкой. Использование специально разработанного сепаратора является эффективным в снижении шума CG, как и тщательный выбор смазки [3].

Когда используется подшипник с твердой смазкой при радиальной нагрузке, может возникнуть громкий шум сепаратора на начальном этапе вращения. Этот шум вызван телами качения, сталкивающимися с сепаратором, они скоропостижно замедляются за счет сопротивления смазки после выхода из зоны нагрузки. Тем не менее, этот шум становится пренебрежимо малым, и, в конце концов, исчезает со временем [3].

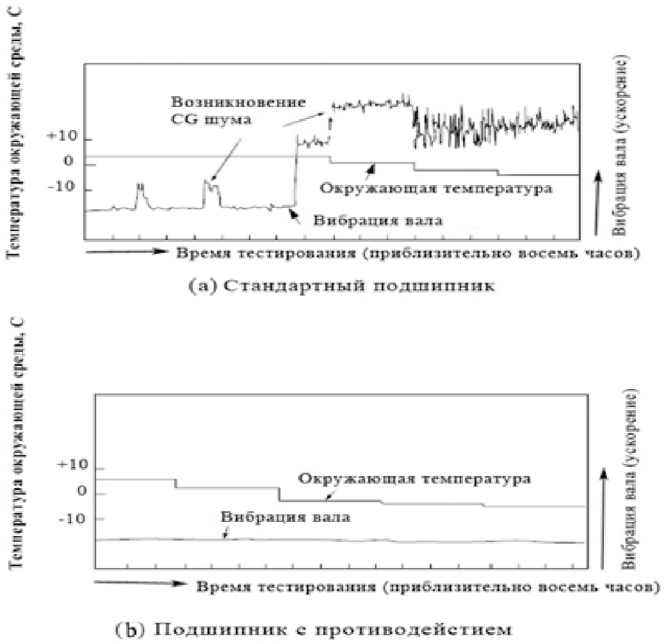


Рисунок 5 – Тест оценки результатов деятельности шума сепаратора (шум CG)

1.3.5 Колебания перекатывающихся тел качения

Колебания перекатывающихся тел качения становятся проблемой главным образом в роликовых подшипниках, работающих под радиальной нагрузкой. Когда этот вид вибрации происходит, центр вращения вала бегает как вертикально так и горизонтально, и может происходить шум [3].

Амплитуда этого колебания зависит от радиального зазора, радиальной нагрузки и числа тел качения. Этот тип вибрации происходит из-за различий в распределении нагрузки, которое зависит как от позиции каждого вращающегося элемента в зоне нагрузки и от незначительного изменения в направлении перемещения вала [3].

Сравнение условий (a) и (b) на рисунке 6, смещение вращающегося вала в вертикальном направлении, немного отличается. Вал также перемещается в поперечном направлении между состояниями, показанными на рисунке [3].

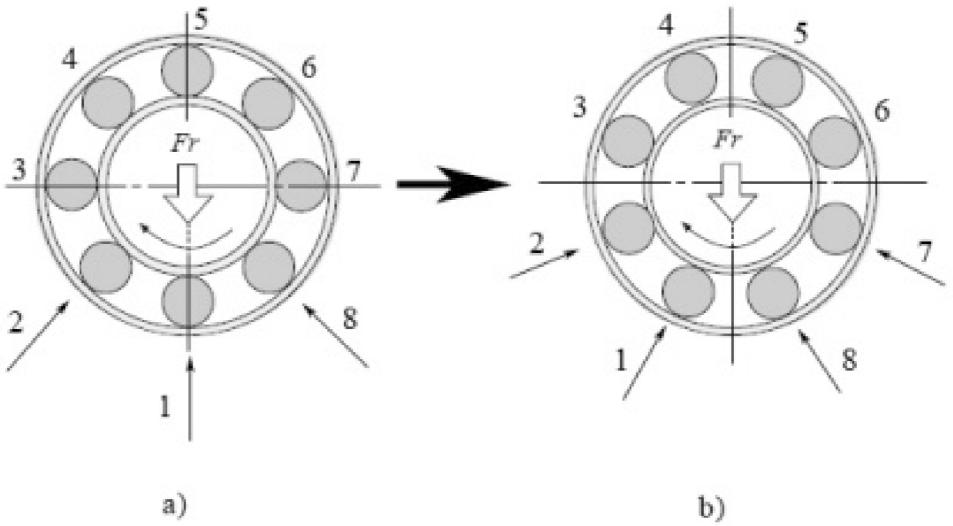


Рисунок 6 – Механизм колебания из-за прокатывания тел качения

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что частота этого колебания может быть выражена как:

$$f = Z*f_c, \quad (1)$$

где Z – количество тел качения;

f_c – орбитальная частота вращения тел качения (Гц).

Поскольку колебания перекатывания тел качения, как правило, малой амплитуды, они редко становятся проблемой. Когда это становится проблемой, уменьшение радиального зазора или применения предварительной нагрузки могут быть эффективным решением проблемы [3].

1.4 Вибрация и звук, относящиеся к производству подшипников

Вибрация и звук, относящиеся к производству подшипников наиболее значимый тип, который вызывает волнистость и не может быть устранен полностью. Даже с точностью современных технологий механической обработки, существует элемент волнистости , который будет генерировать звук и вибрацию хотя и, на незначительном уровне. Только тогда, когда волнистость аномальна (связано с факторами производства или применения конкретного подшипника), шум волнистости становится проблемой [3].

В отличие от большинства других звуков, сгенерированных роликовыми подшипниками, частота шума волнистости зависит от скорости. Это важная характеристика, которой шум волнистости можно отличить от других типов шума [3].

Когда подшипник ускоряется или замедляется, шум волнистости еще более резкий и его частота быстро увеличивается или уменьшается. Шум волнистости становится проблемой, когда вибрация, вызванная волнистостью дорожек качения и/или тел качения, становится чрезмерной [3].

О.Г. Густафсон провел основное исследование вибрации, вызванной волнистостью. Он рассматривал волнистость в круговом направлении на поверхности внутренних и внешних колец дорожек качения и тел качения в качестве группы синусоидальных волн. Он исследовал баланс сил внутри подшипника, когда такая волнистость возникает и вычислил вибрацию подшипника, вызванную ей [3].

В результате он определил число пиков волнистости, которые вызывают вибрацию и частоту этой вибрации. Раздел таблицы 1 относительно частоты шума волнистости отражает эти результаты. Как видно из таблицы 1, волнистость с определенным количеством пиков является причиной этой вибрации. Как показано на рисунке 7, вибрация происходит в радиальном направлении, когда существует волнистость с (nZ−1) пиков на внутреннем кольце [3].

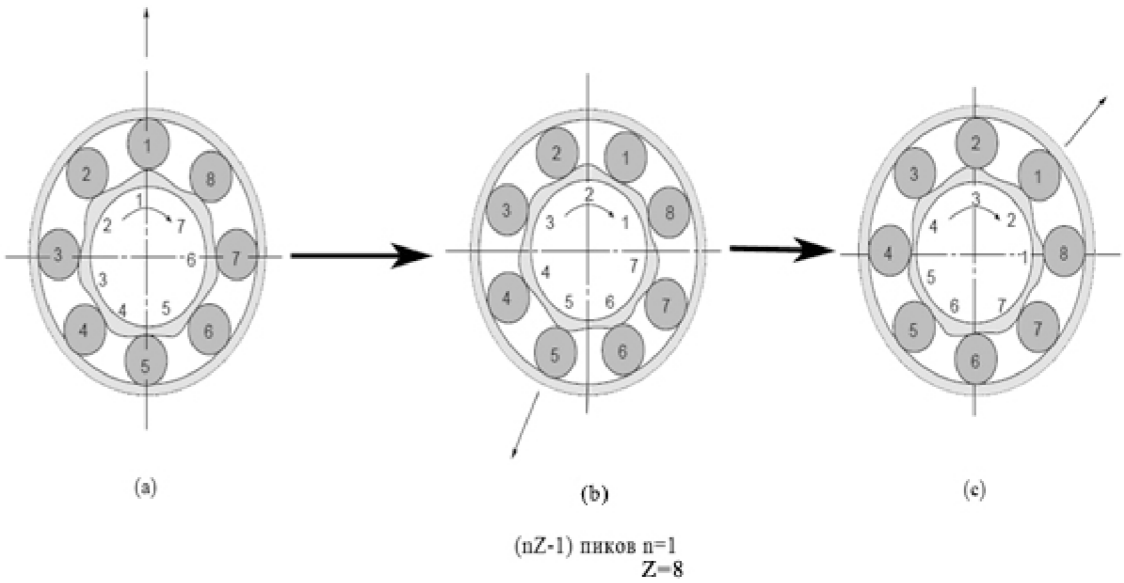


Рисунок 7 – Механизм вибрации из-за волнистости дорожки качения или подвижного элемента поверхности

Анализ вибрации Густафсона основывался на постоянной осевой нагрузке, где применялся только один компонент имеющий волнистость. После его исследования, другие анализировали случаи, где волнистость существовала на двух компонентах, и была применена радиальная нагрузка [3].

Согласно этим исследованиям, вибрация происходит с дополнительным количеством пиков волнистости. В то время как генерация вибрации и шума с количеством пиков, выведенных Густафсоном и показанных в таблице 1, была

подтверждена в многочисленных случаях, однако недостаточно экспериментальных данных которые были собраны, чтобы подтвердить дополнительное число пиков в более поздних исследованиях [3].

Чтобы избежать проблем, эта вибрация (шума волнистости) может быть уменьшена, путем уменьшения волнистости вдоль направления окружности поверхности компонентов подшипника. Кроме того, нужно отметить, что, если волнистость существует на установочной поверхности вала или корпуса, к которой монтируется подшипник, то эта волнистость отражается на поверхности дорожки качения подшипника и генерирует вибрацию. Если шлиц обрезать на валу, подобный эффект можно минимизировать. Поэтому требуется пристальное внимание [3].

1.5 Вибрация и звук из-за неправильного обращения

Основные компоненты подшипника имеют более жесткую поверхность, чем HRC60, таким образом, они, как правило, тяжелы. Но если подшипник уронили или ударили, могут появиться вмятины на готовых поверхностях компонентов подшипника [3].

Даже незначительные дефекты формы могут вызвать вибрацию или звук. В дополнение к вмятинам и дефектам, мелкое загрязнение может вызвать проблемы. Вибрация и звук в этой категории, в основном вызваны неправильным обращением с подшипником [3].

1.5.1 Шум дефекта

Когда на дорожке качения подшипника имеется вмятина или ржавчина, то при вращении, генерируется пульсирующий пулеметный шум [3].

Вызван телами качения, сталкивающимися с изъянами на поверхности дорожки качения, и называется шумом дефекта. Как видно из таблицы 2, его частота совпадает с частотой шума поверхности качения. Когда генерируется шум дефекта, уровень всего спектра частот возрастает. В результате анализа частоты БПФ просто не достаточно, чтобы отличить его от других шумов [3].

У шума дефекта есть уникальные циклы генерации или интервалы по сравнению с другими типами шума (рисунок 8). При постоянной скорости цикл генерации шума является постоянным, но когда скорость уменьшается, шумовой цикл генерации становится более длительным. Этот цикл определен скоростью и внутренними спецификациями подшипника. Как представлено в таблице 2, он также изменяется с позицией дефекта на подшипнике. Благодаря этой характеристике, можно определить, существуют ли дефекты и если так, то где они расположены. Чтобы определить цикл генерации такого шума, применяется метод анализа огибающей [3].

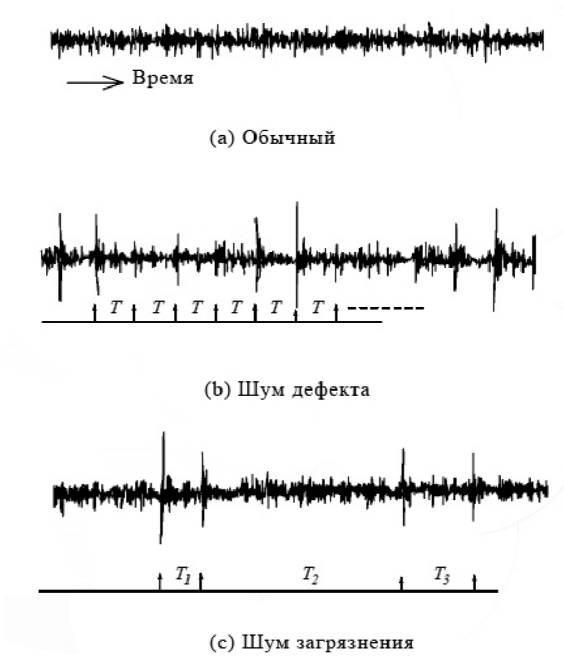


Рисунок 8 – Форма сигнала из-за шума дефекта и загрязнения

В случае шарикоподшипника с дефектом на шаре, но не обязательно на прокручивающейся поверхности шара, шум иногда происходит из-за дефекта, а иногда нет. Когда такой шум генерируется, то он всегда имеет циклическую характеристику [3].

Когда используется смазка высокой вязкости, шум маскируется, и уровень шума снижается. Однако, когда шум происходит из-за дефекта на прокручивающемся элементе, обычно подшипник должен быть заменен [3].

1.5.2 Шум загрязнения

К шуму загрязнения приводит попадание инородных частиц в подшипник при неправильном обращении или тяжелых условий эксплуатации. Это происходит из-за инородных частиц, застрявших между телами качения и дорожками качения поверхностей. Величина шума загрязнения не постоянная, и его генерация неравномерна (рисунок 8) [3].

Как правило, чем меньше подшипник, тем больше влияние инородных частиц. Шум загрязнения часто является проблемой малогабаритных или подшипников экстра-малых размеров. Попадание посторонних частиц не только создает шум, но также может привести к вмятинам на поверхности подшипника качения и тем самым сократить срок службы подшипника. Именно поэтому, должны быть приняты профилактические меры [3].

1.5.3 Другая вибрация и звук

Различные типы звука и вибрации, описанные в таблице 1, в данный момент достаточно хорошо изучены. Тем не менее, типы звука и вибрации в категории под названием «Другие» изучены в меньшей степени. Первым из них является шум уплотнения (изоляции). В смазанном подшипнике с изолированными контактами, может появиться этот шум [3].

Этот шум приписан самопроизвольной вибрации, вызванной трением между изоляциями и изоляцией в точке контакта. Как контрмера, может быть принят различный вид изоляции или смазки [3].

Во время начального вращения подшипника смазанного консистентной смазкой можно услышать шумы. Эти шумы, как полагают, генерируются, когда пузырьки смазки или смазочного материала давятся между телами и дорожками качения. Их генерация непостоянна и прекращается со временем. Этот тип шума, не является значительной проблемой из-за его низкой величины [3].

Далее мы рассмотрим три типа вибрации подшипников качения: f_r , f_c и f_r-$2f_c$ компоненты вибрации. Компонент f_r – биение, которое вызвано несбалансированным валом или неравномерной толщиной внутреннего кольца. Частота этой вибрации является такой же, как частота вращения. Компонент f_c возникает, если существует разница в диаметрах тел качения или если тела качения не равноудалены [3].

Частота этого компонента так же, как орбитальная частоты вращения тел качения. Компонент $f_r–2f_c$ возникает, когда различие в диаметрах тел качения влияет на пружинные характеристики вала и подшипника. Было отмечено, что эта направленная характеристика вращается со скоростью f_c, и частота этой вибрации $f_r–2f_c$. Для всех этих компонентов вибрации, подобно вибрации волнистости, частота изменяется при изменении скорости вращения [3].

1.6 Частота вибрации и звука в подшипниках

1.6.1 Собственная частота направляющих колец

Исходя из таблицы 2, многие вибрации и звук, генерируемые в подшипниках, связаны с собственной частотой колец дорожек качения. Из двух колец дорожек качения собственная частота внешнего кольца становится проблемой чаще, чем внутреннее кольцо из-за зазора между ним и корпусом [3].

Режимы вибрации внешнего кольца примерно разделены на две категории: те, которые рассматривают внешнее кольцо как твердое тело и тех, которые рассматривают его как упругое тело. Помимо них, есть режимы вибрации, связанной с каждым компонентом подшипника, такие как

сепаратор. Однако эти колебания еще не изучались из-за сложности режимов вибрации и ряда факторов включая форму, материал и другие факторы [3].

1.6.1.1 Режим твердого тела

Для твердого тела есть два режима вибрации, которые для ясности мы назовем режим А и режим В. Режим А является угловой вибрацией в инерции пружины внешнего кольца, и режим Б вибрация в пружины внешнего кольца. Режим показан на рисунке 9. Режим В может быть разделена далее на радиальную и осевую вибрацию, но так как радиальная вибрация редко становится проблемой, анализируется только режим осевой вибрации [3].

Так, режим В представляет вибрацию массы в системе внешнего кольца и пружины в осевом направлении подшипника. Это проиллюстрировано на рисунке 10. Чтобы найти собственную частоту, нужно определить пружинный коэффициент подшипника, поиск которого занимает много времени. К счастью для шариковых подшипников к которым применяется чистая осевая нагрузка, существует формула, которая позволяет легко вычислить собственную частоту [3].

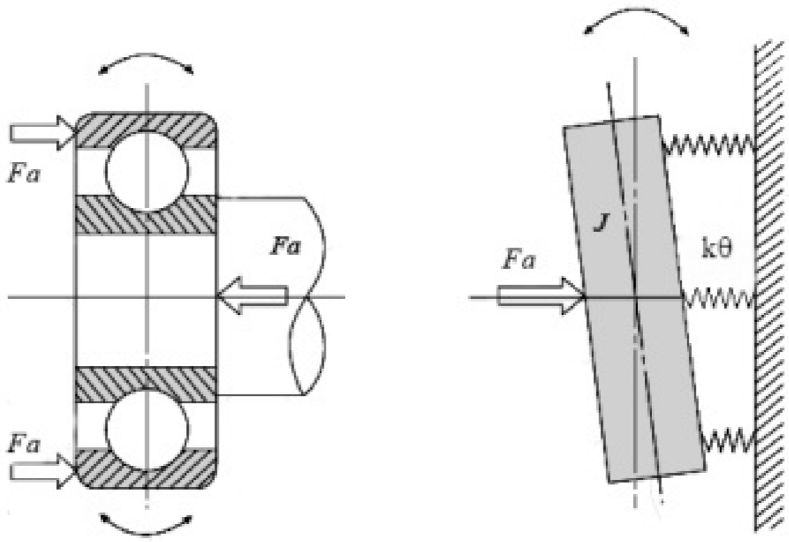


Рисунок 9 – Режим угловой вибрации в инерции пружины внешнего кольца

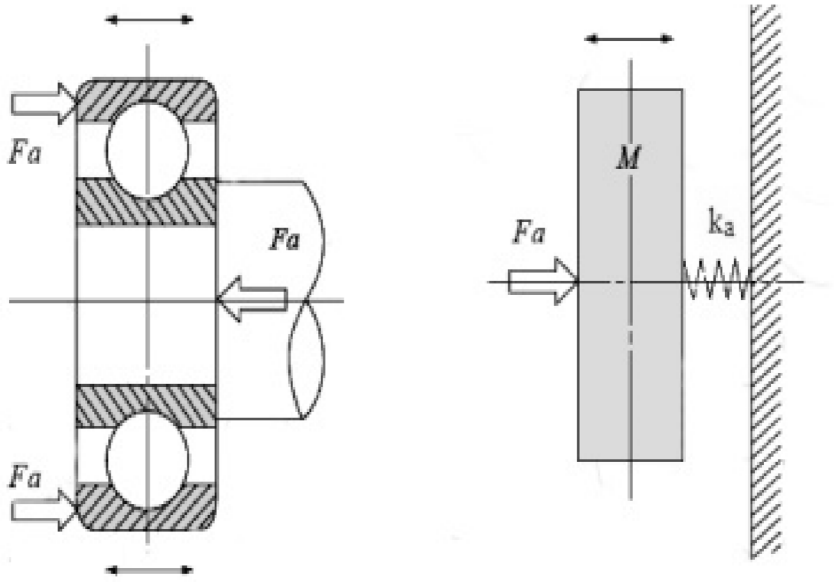


Рисунок 10 – Режим осевой вибрации в пружине внешнего кольца

1.6.1.2 Режим упругого тела

Пример режима вибрации, в котором внешнее кольцо дорожки качения рассматриваемого как упругое тело называется режимом изгиба. Этот режим вибрации разделен на радиальный и осевые режимы, как показано на рисунке 11. В этих режимах вибрации чаще всего внешнее кольцо становится проблемой. Есть несколько формул для вычисления собственной частоты режима изгиба во внешнем кольце шарикоподшипника [3].

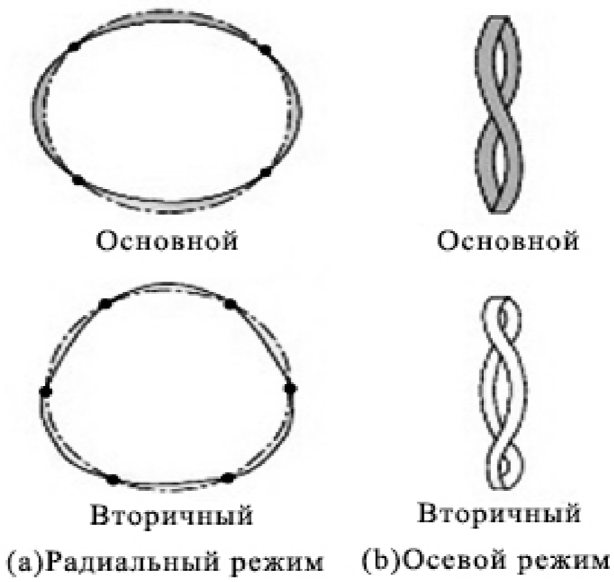


Рисунок 11 – Режим форм для колец подшипника (режим изгиба)

Эти формулы дают значение собственной частоты, когда подшипник свободен, которые для большинства применений является достаточно точными. Когда требуются более высокие степени точности, должны использоваться более сложные способы расчета, учитывающие условия монтажа [3].

1.6.2 Частота вращения тел качения

Как видно из таблицы 2, для того, чтобы рассчитать частоту вибрации, вызванной волнистостью или частоту огибающей шума дефекта, требуется орбитальная частота вращения тел качения (f_c) и частота вращения тел качения по внутренней обойме (f_b). Эти значения определяются внутренними характеристиками подшипника и рабочей скоростью. Они могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$f_c = \frac{1}{60} * \frac{n_i}{2}\left(\frac{d_m - D_a * \cos\alpha}{d_m}\right), \quad (2)$$

$$f_b = \frac{1}{60} * \frac{-n_i}{2}\left(\frac{d_m}{D_a} - \frac{D_a * \cos^2\alpha}{d_m}\right), \quad (3)$$

где f_c – орбитальная частота вращения тел качения (Гц);

f_b – частота вращения тел качения вокруг центра в обратном направлении(Гц);

n_i – скорость вращения внутреннего кольца (об/мин);

D_a – диаметр элемента качения(мм);

d_m – PCD (Pitch Circle Diameter) диаметр окружности осей шариков (мм);

a – угол контакта (°).

1.7 Среда распространения вибрационных колебаний

Вибрационные колебания могут распространяться от источника двумя путями: непосредственно по воздуху и по материалу конструкций, примыкающих к вибрирующему агрегату или к его отдельным узлам. Колебания в зависимости от среды распространения разделяется на:

– структурные (распространяются в твердых телах);

– воздушные (распространяются в воздушной среде).

Структурные колебания, создаваемые разнообразными механическими факторами возмущения, распространяются в различных средах в виде волн, перенос и передача энергии в которых осуществляются частицами среды. При этом каждый участок среды, по которому перемещается волна, совершает

небольшие колебательные смещения, тогда как сама волна распространяется на значительные расстояния. Скорость распространения механических волн в среде определяется молекулярной структурой среды и характером межмолекулярных взаимодействий [4].

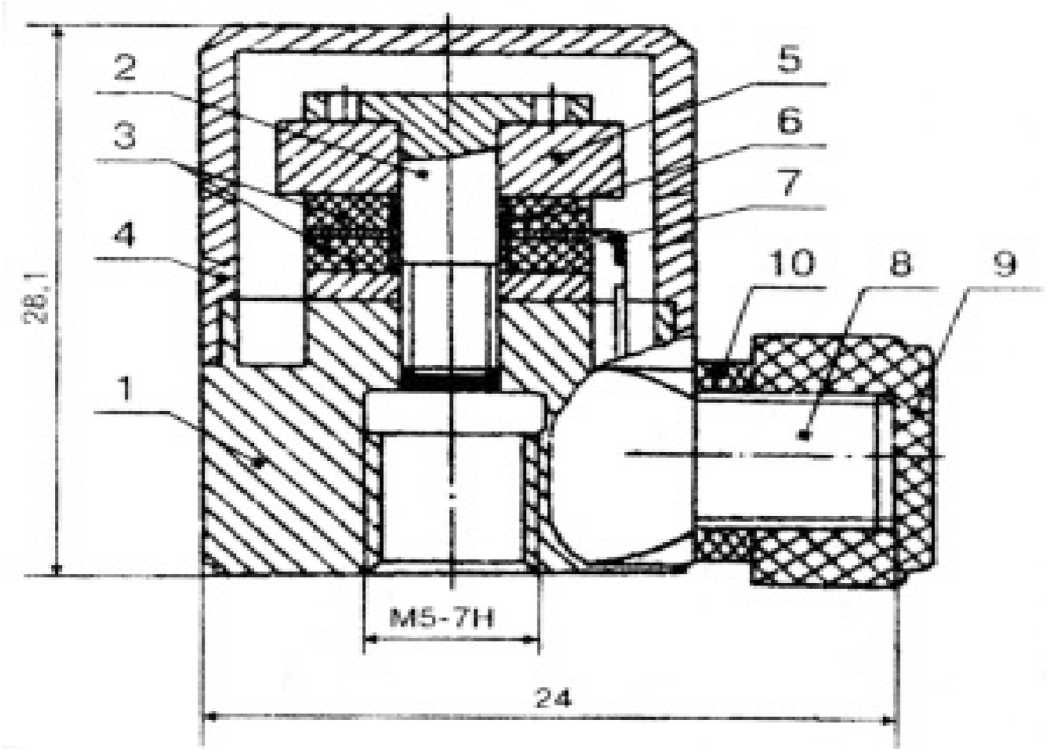
В ***воздушных колебаниях*** колебания источника звука производят попеременное сжатие и разрежение воздуха, образуя волнообразное колебание его, распространяющееся от источника звука во все стороны в виде увеличивающихся в объеме сфер. Это называется, распространением звуковой волны. По мере израсходования, на колебание воздуха сообщенной источником энергии звуковая волна постепенно затухает, поэтому, чем больше энергия источника звука, тем с большей силой происходят колебания воздуха и дальше распространяется звуковая волна. От величины энергии источника звука зависит сила звука, оцениваемая звуковым давлением, которое измеряется в ньютонах на квадратный метр ($Н/м^2$) [4].

Восприятие вибрации зависит от частоты колебаний, их силы и размаха – амплитуды. Частота вибрации, как и частота звука, измеряется в герцах, энергия – в килограммометрах, а амплитуда колебаний – в миллиметрах. За последние годы установлено, что вибрация, как и шум, действует на организм человека энергетически, поэтому ее стали характеризовать спектром по колебательной скорости, измеряемой в сантиметрах в секунду или. как и шум, в децибелах; за пороговую величину вибрации условно принята скорость в 5*10–6 см/сек. [4].

1.8 Обзор методов измерения вибрации

Существует две группы методов измерения параметров вибраций: контактные, подразумевающие механическую связь датчика с исследуемым объектом, и бесконтактные, т.е. не связанные с объектом механической связью[5].

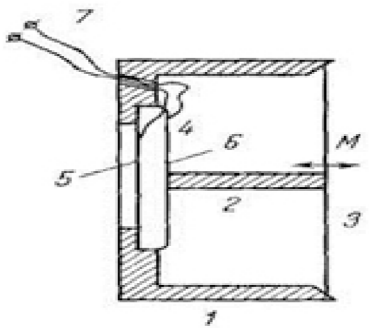
Наиболее простыми являются, контактные методы регистрации вибраций с помощью пьезоэлектрических датчиков (рисунок 12). Они позволяют проводить измерения с высокой точностью в диапазоне низких частот и относительно больших амплитуд вибрации, но вследствие своей высокой инерционности, приводящей к искажению формы сигнала делает невозможным измерение вибраций высокой частоты и малой амплитуды. Кроме того, если масса исследуемого объекта, а, следовательно, и его инерционность не велика, то такой датчик может существенно влиять на характер вибрации, что вносит дополнительную ошибку в измерения[5].



Пьезоэлектрический преобразователь виброизмерительный ДН–3–М1: 1 – основание; 2 – пьезоэлемент ЭП4К–1–3; 3 – винт; 4 – крышка; 5 – масса инерционная; 6 – втулка; 7 – контакт; 8 – втулка; 9 – колпачок; 10 – кольцо.

Рисунок 12 – Схема пьезоэлектрического преобразователя

Для измерения акустического шума в бесконтактном методе применяют так называемые измерительные микрофоны, с помощью которых акустические колебания в воздушной среде преобразуются в электрический сигнал. Наибольшее распространение получили измерительные микрофоны пьезоэлектрической системы, основанные на возникновении переменного электрического потенциала на пьезоэлектрической пластине при воздействии на неё звукового давления (рисунок 13) [5].



1– корпус, 2 – стойка, 3 – мембрана, 4 – пьезоэлемент, 5 и 6 – посеребренные плоскости пьезоэлемента, 7 – отводящие проводники.

Рисунок 13 – Пьезоэлектрический микрофон

1.9 Методы диагностики подшипников качения

Для оценки технического состояния и диагностики подшипников качения в настоящее время широко используются следующие методы: ПИК-фактор, по спектру вибросигнала, по спектру огибающей, по методу ударных импульсов. Подробнее о каждом из них [4].

1.9.1 Метод ПИК-фактора

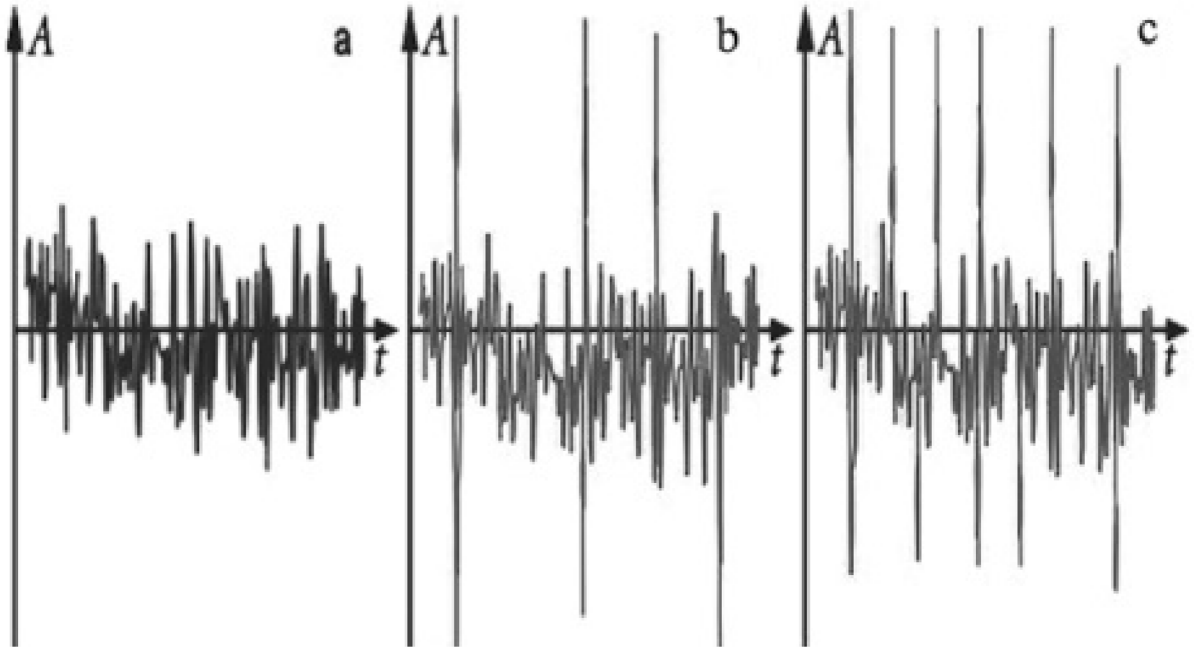
Для контроля за техническим состоянием подшипников по этому методу необходимо иметь простой виброметр, позволяющий измерять два параметра вибросигнала:

– среднеквадратичное значение уровня (СКЗ) вибрации, т.е. энергии вибрации;

– пиковую амплитуду (ПИК) вибрации (положительную, отрицательную или полный размах – значения не имеет).

Отношение двух этих параметров ПИК/СКЗ называется ПИК-фактором. В осциллограмме нового, хорошо смазанного подшипника присутствует стационарный сигнал шумового характера (рисунок 14, a). С течением времени, по мере появления дефектов на деталях подшипника, в сигнале начнут появляться отдельные, короткие амплитудные пики, соответствующие моментам соударения дефектов (рисунок 14, b) [6].

В дальнейшем, с развитием дефекта, сначала увеличиваются амплитуды пиков, потом постепенно увеличивается и их количество (рисунке 14, c). Например, дефект, появившись на одном из шариков, создает впоследствии забоину на кольце, с него она переносится на другой шарик, дефекты шариков начинают вырабатывать сепаратор и т.д. до полного разрушения [6].



Осциллограмма подшипника: a – стационарный сигнал шумового характера; b – появление отдельных амплитудных пиков; c – с развитием дефекта происходит увеличение амплитуды пиков и их количество.

Рисунок 14 – Диагностика подшипника качения методом ПИК-фактора

Если изобразить результаты измерений на графике, мы увидим зависимости, показанные на рисунке 15. 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 [6].

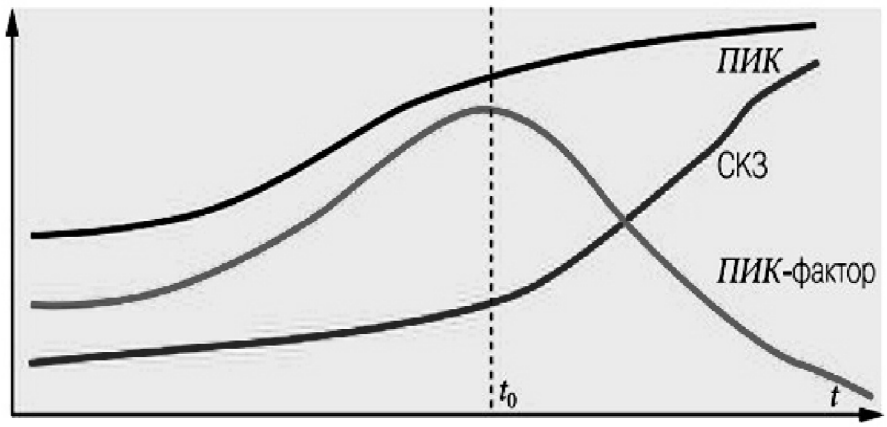


Рисунок 15 – Зависимость пиковой амплитуды и энергии вибрации при методе ПИК-фактора

В дальнейшем, по мере увеличения амплитуд и количества пиков, начинает увеличиваться энергия сигнала, возрастает СКЗ вибрации. Отношение ПИК/СКЗ из-за временного сдвига между ними имеет явно выраженный максимум на временной оси. На этом и основывается метод ПИК-фактора [6].

Экспериментально было установлено, что момент прохода функции ПИК-фактор через максимум соответствует остаточному ресурсу подшипника порядка двух-трех недель. Достоинство метода ПИК-фактора – простота. Для реализации нужен обычный виброметр общего уровня. Недостатки: слабая помехозащищенность метода и необходимость проводить многократные измерения в процессе эксплуатации [6].

Установить датчик непосредственно на наружной обойме подшипника практически невозможно, поэтому сигнал вибрации характеризует не только подшипник, но и другие узлы механизма, что в данном случае рассматривается как помехи. Чем дальше установлен датчик от подшипника и сложнее кинематика самого механизма, тем меньше достоверность метода. Получить оценку состояния по одному замеру невозможно [6].

1.9.2 По спектру вибросигнала

Для контроля за техническим состоянием подшипников по данному методу необходим анализатор спектра вибрации (виброанализатор). Метод базируется на анализе спектра вибрации – выявлении периодичности (частоты) появления амплитудным виброанализатором и по частотному составу спектра (рисунке 16),можно идентифицировать возникновение и развитие дефектов подшипника [6].

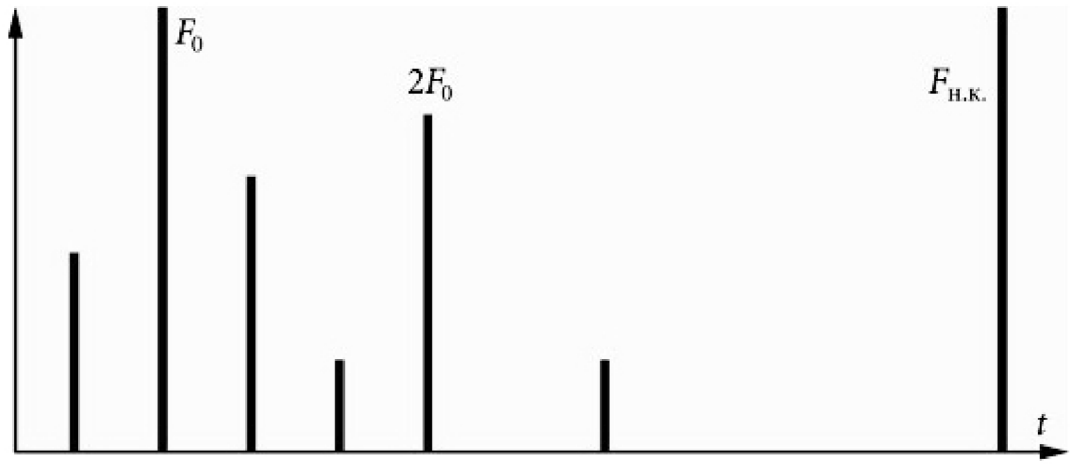


Рисунок 16 – Метод диагностики подшипников качения по спектру вибросигнала

Каждому дефекту на элементах подшипника (тела качения, внутреннее и наружное кольцо, сепаратор) соответствуют свои частоты, которые зависят от кинематики подшипника и скорости его вращения. Наличие той или иной частотной составляющей в спектре сигнала говорит о возникновении соответствующего дефекта, а амплитуда этой составляющей – о глубине дефекта [6].

Достоинства метода:

– высокая помехозащищенность (маловероятно наличие в механизме источников, создающих вибрации на тех же частотах, что и дефекты подшипника);

– высокая информативность. Возможна оценка состояния элементов подшипника (тел качения, внутреннего и наружного кольца, сепаратора), поскольку они генерируют разные частотные ряды в спектре.

Недостатки:

– метод дорогостоящий, если виброанализатор использовать только для контроля подшипников;

– метод малочувствителен к зарождающимся и слабым дефектам в связи с тем, что подшипники в большинстве случаев являются маломощными источниками вибрации. Небольшой скол на шарике или дорожке не в состоянии заметно качнуть механизм, чтобы мы увидели эту частотную составляющую в спектре. И только при достаточно сильных дефектах амплитуды этих частотных составляющих начинают заметно выделяться в спектре [6].

Метод используется достаточно широко, особенно в среде профессиональных специалистов и дает хорошие результаты [6].

1.9.3 Метод спектра огибающей

Для контроля за техническим состоянием подшипников качения по этому методу, необходим анализатор спектра вибрации с функцией анализа спектра огибающей высокочастотной вибрации. Метод базируется на анализе высокочастотной составляющей вибрации и выявлении модулирующих ее низкочастотных сигналов [6].

На рисунке 14 видно, что высокочастотная часть сигнала изменяет свою амплитуду во времени, то есть она модулируется каким-то более низкочастотным сигналом. Выделение и обработка этой информации и составляют основу метода. Рассмотрим подшипник с зарождающимся дефектом (сколом, трещиной и т.д.) на наружной обойме [6].

При ударе тел качения о дефект возникают высокочастотные затухающие колебания, которые будут повторяться (модулироваться) с частотой равной частоте перекатывания тел качения по наружному кольцу.

Именно в этом модулирующем сигнале содержится информация о состоянии подшипника [6].

Установлено, что наилучшие результаты метод дает в том случае, если анализировать модуляцию не широкополосного сигнала, получаемого от акселерометра, а предварительно осуществить узкополосную фильтрацию сигнала, выбрать основную (несущую) частоту в диапазоне от 4 до 32 кГц и анализировать модуляцию этого сигнала [6].

Для этого отфильтрованный сигнал детектируется, то есть выделяется модулирующий сигнал (или еще его называют «огибающая сигнала»), который подается на узкополосный виброанализатор, и мы получаем спектр интересующего нас модулирующего сигнала или спектр огибающей. Что и дало название методу. Обработка сигнала очень сложна, но результат стоит того [6].

Дело в том, что небольшие дефекты подшипника не в состоянии вызвать заметной вибрации в области низких и средних частот. В то же время для модуляции высокочастотных вибрационных шумов энергии возникающих ударов оказывается вполне достаточно, то есть метод обладает очень высокой чувствительностью [6].

По частотам и амплитудам гармонических составляющих спектра огибающей определяются свойства случайной вибрации, которая приобретает из-за дефектов в узлах трения амплитудную модуляцию. Гармонические составляющие в спектре огибающей вибрации бездефектных узлов отсутствуют. Вследствие дефектов в узлах трения вибрация и силы трения приобретают амплитудную модуляцию. При этом частота модуляции определяет вид, а глубина модуляции – величину дефекта. В спектре огибающей они однозначно определяются частотами и амплитудами появившихся гармонических составляющих [6].

Спектр огибающей при отсутствии дефектов представляет собой почти горизонтальную, волнистую линию (рисунок 17, а). При появлении дефектов над уровнем линии сплошного фона начинают возвышаться дискретные составляющие, частоты которых однозначно просчитываются по кинематике и оборотам подшипника (рисунок 17, b). Частотный состав спектра огибающей позволяет идентифицировать наличие дефектов, а превышение соответствующих составляющих над фоном однозначно характеризует глубину каждого дефекта [6].

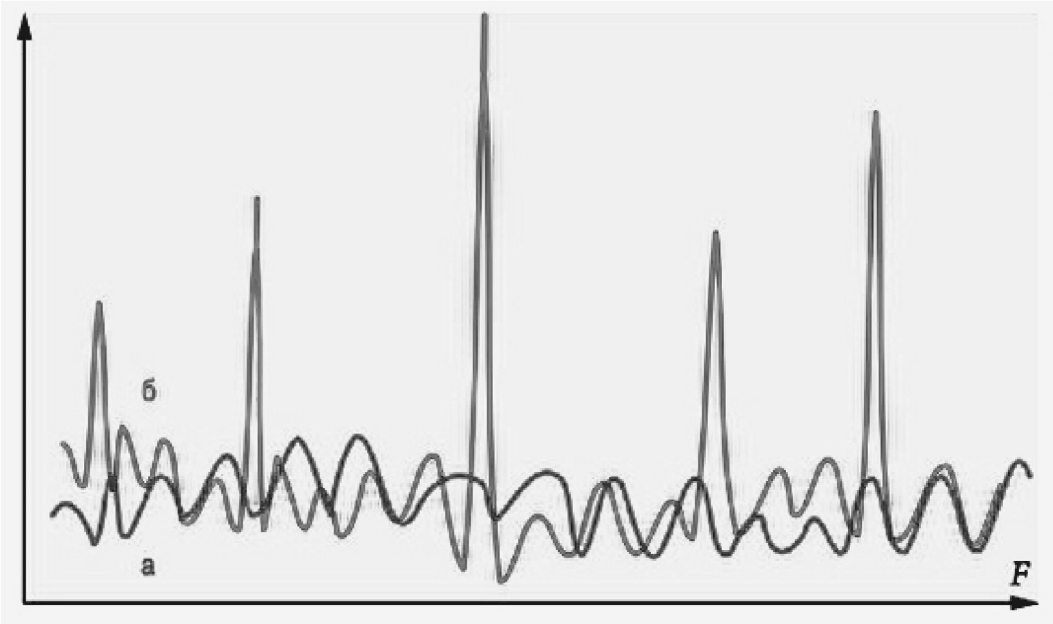


Рисунок 17 – Диагностика подшипника качения методом спектра огибающей

К достоинствам спектрального анализа кривой огибающей вибрации электродвигателей относятся:

– возможность локализации дефекта. Она определяется свойством высокочастотной вибрации быстро затухать при распространении, что позволяет оценивать техническое состояние именно подшипника качения;

– высокая чувствительность. В отличие от спектрального анализа низкочастотной и среднечастотной вибрации, где достоверно обнаружить можно только развитые дефекты, наличие даже зарождающихся дефектов приводит к появлению модуляции высокочастотной вибрации контролируемого узла, а значит и к появлению гармонических составляющих в спектре огибающей этой вибрации;

– достоверность определения вида и величины каждого из дефектов. Высокая достоверность определяется использованием не абсолютных значений составляющих вибрации, как при спектральном анализе, а относительных значений. При изменении уровня вибрации, например, из-за изменения коэффициента усиления или изменения чувствительности датчика, глубина модуляции, обусловленная появлением дефекта, остается неизменной;

– постановки диагноза и прогноза по однократным измерениям вибрации. Она определяется использованием относительных измерений, т.е. измерений глубин модуляции высокочастотной вибрации, и отсутствием гармонических составляющих в спектре огибающей бездефектного узла. Знание предельных глубин модуляции всех возможных сильных дефектов и скоростей развития каждого вида дефекта позволяет не только определять вид и степень развития любого дефекта, но и прогнозировать время безаварийной работы контролируемого узла без предварительного построения эталонов [6].

1.9.4 Метод ударных импульсов

Данный 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 [6].

Период времени мал, и заметной деформации не происходит. Величина фронта волны является мерой скорости столкновения (удара) 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 [6].

Вызванная механическим ударом фронтальная волна сжатия возбуждает затухающие колебания в датчике (преобразователе). Пиковое значение амплитуды этого затухающего колебания прямо пропорционально скорости удара v. Поскольку затухающий переходный процесс очень хорошо определяется и имеет постоянную величину затухания, его можно отфильтровать от других сигналов, т.е. от сигналов вибрации [6].

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 «звенят» на своей частоте (рисунок 18) [6].

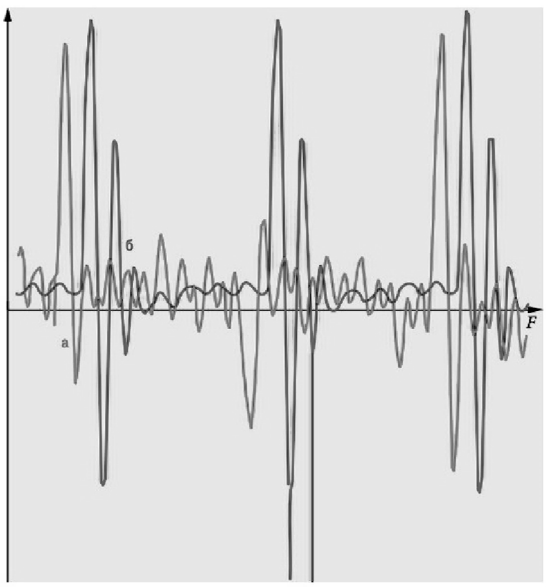


Рисунок 18 – Диагностика подшипника качения методом ударных импульсов

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 [6].

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 – высокая чувствительность, информативность и помехозащищенность. Метод прост и дешев в реализации, существуют простые, портативные приборы [6].

Недостаток – 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 [6].

В большинстве случаев это не вызывает проблем. Метод широко используется в среде профессионалов, прост и доступен персоналу, обслуживающему оборудование [6].

2 Раздел проектирования

2.1 Постановка задачи

Целью данной работы является разработка мобильной системы диагностики состояния подшипника качения на основе анализа вибрационных данных.

В соответствии с целью были поставлены следующие задачи:

– обзор распространенных методов диагностики подшипников качения;

– анализ видов вибрации и шума в подшипниках качения, их влияние на форму вибрационного сигнала;

– изучение методов анализа вибрационного сигнала;

– разработка алгоритмов автоматизации вибрационной диагностики подшипников;

– выбор подходящей платформы и языка программирования для реализации вибрационной диагностики подшипников;

– разработка программного обеспечения, реализующего алгоритм для автоматизации диагностики подшипников;

– тестирование программного обеспечения в реальных условиях.

2.2 Требования к системе

Приложение «Диагностика подшипников качения» имеет следующие характеристики:

– язык разработки программного обеспечения: C++ с использованием библиотеки Qt 5;

– при написании исходного кода был использован Android SDK для работы с устройствами на базе Android OS;

– для полноценной работы необходимо устройство с подключенным (встроенным) микрофоном;

– приложение является кроссплатформенным, что позволяет пользователю не зависеть от операционной системы.

2.3 Обоснование выбранных средств разработки

Для реализации поставленной задачи был использован язык программирования C++ – универсальный язык программирования, в дополнение к которому разработан набор разнообразных библиотек. Строго говоря, таким образом, он позволяет решить практически любую задачу программирования. Тем не менее, по разным причинам (не всегда техническим) для некоторых типов задач он используется чаще, а для каких-то – реже.

2.4 Средства разработки

2.4.1 Библиотека Qt

В наши дни трудно представить себе приложение без графического пользовательского интерфейса. Приложения, обладающие удобным, функциональным, красивым, интерфейсом, имеет гораздо больше шансов запомниться пользователю и стать его повседневным инструментом. Для построения графического интерфейса существует множество библиотек, одной из которых является библиотека Qt [7].

Кросс-платформенная библиотека Qt, разработанная финской компанией Trolltech, ныне принадлежит корпорации Nokia. Qt реализована на языке программирования C++. Возможности C++ в Qt значительно расширенны с помощью макросов и MOC (Meta Object Compiler): добавлены сигналы/слоты, появилось возможность использовать в собственных классах свойства (propperty). Но Qt не ограничена только лишь языком C++. Для программистов Python, Ruby, Php и Perl также реализованы интерфейсы взаимодействия, которые, как правило, используются для построения графического интерфейса пользователя [7].

Позволяет запускать написанное с его помощью ПО в большинстве современных операционных систем путём простой компиляции программы для каждой ОС без изменения исходного кода. Включает в себя все основные классы, которые могут потребоваться при разработке прикладного программного обеспечения, начиная от элементов графического интерфейса и заканчивая классами для работы с сетью, базами данных и XML. Qt является полностью объектно-ориентированным, легко расширяемым и поддерживающим технику компонентного программирования [8].

Существуют версии библиотеки для Microsoft Windows, систем класса UNIX с графической подсистемой X11, iOS, Android, Mac OS X, Microsoft Windows CE, QNX, встраиваемых Linux-систем и платформы S60 [8].

До недавнего времени библиотека Qt также распространялась ещё в одной версии: Qt/Embedded. Теперь эта платформа переименована в Qtopia Core и распространяется как отдельный продукт. Qtopia Core обеспечивает базовую функциональность для всей линейки платформ, предназначенных для разработки приложений для встраиваемых и мобильных устройств (КПК, смартфонов и т. п.) [8].

Начиная с версии 4.5 Qt распространяется по 3 лицензиям (независимо от лицензии, исходный код Qt один и тот же):

Qt Commercial – для разработки ПО с собственнической лицензией, допускающая модификацию самой Qt без раскрытия изменений;

GNU GPL – для разработки ПО с открытыми исходниками, распространяемыми на условиях GNU GPL;

GNU LGPL – для разработки ПО с собственнической лицензией, но без внесения изменений в Qt [8].

До версии 4.0.0 под свободной лицензией распространялись лишь Qt/Mac, Qt/X11, Qt/Embedded, но, начиная с 4.0.0 (выпущенной в конце июня 2005), Qt Software «освободили» и Qt/Windows. Следует отметить, что существовали сторонние свободные версии Qt/Windows < 4.0.0, сделанные на основе Qt/X11.

Со времени своего появления в 1996 году библиотека Qt легла в основу тысяч успешных проектов во всём мире. Кроме того, Qt является фундаментом популярной рабочей среды KDE, входящей в состав многих дистрибутивов Linux [8].

Отличительная особенность Qt (о которой уже упоминалось выше) от других библиотек – использование Meta Object Compiler (MOC) – предварительной системы обработки исходного кода (в общем-то, Qt – это библиотека не для чистого C++, а для его особого наречия, с которого и «переводит» MOC для последующей компиляции любым стандартным C++ компилятором). MOC позволяет во много раз увеличить мощь библиотек, вводя такие понятия, как слоты и сигналы. Кроме того, это позволяет сделать код более лаконичным. Утилита MOC ищет в заголовочных файлах на C++ описания классов, содержащие макрос Q_OBJECT, и создаёт дополнительный исходный файл на C++, содержащий метаобъектный код [8].

Qt позволяет создавать собственные плагины и размещать их непосредственно в панели визуального редактора. Также существует возможность расширения привычной функциональности виджетов, связанной с размещением их на экране, отображением, перерисовкой при изменении размеров окна.

Qt комплектуется визуальной средой разработки графического интерфейса «Qt Designer», позволяющей создавать диалоги и формы в режиме WYSIWYG. В поставке Qt есть «Qt Linguist» – графическая утилита, позволяющая упростить локализацию и перевод программы на многие языки; и «Qt Assistant» – справочная система Qt, упрощающая работу с документацией по библиотеке, а также позволяющая создавать кросс-платформенную справку для разрабатываемого на основе Qt ПО. Начиная с версии 4.5.0 в комплект Qt включена среда разработки «Qt Creator», которая включает в себя редактор кода, справку, графические средства «Qt Designer» и возможность отладки приложений. «Qt Creator» может использовать GCC или Microsoft VC++ в качестве компилятора и GDB в качестве отладчика. Для Windows версий библиотека комплектуется компилятором, заголовочными и объектными файлами MinGW [7].

3 Раздел разработки

3.1 Описание работы программы

Алгоритм работы программы состоит из следующих шагов:

– считывание вибрации. Проводится с помощью подключенного или встроенного считывающего устройства(микрофона). Характеристик звукового устройства с частотой дискретизации 44100 Гц, разрядностью 16 бит для исследуемых подшипников(до 5000 об./с.) более чем достаточно;

– нормирование сигнала. Из сигнала извлекается пиковая амплитуда и на основе этого значения происходит нормирование. Используется для отображения графика звукового сигнала;

– поиск локальных экстремумов. В пределах значений порога чувствительности и грануляции выполняется поиск локальных экстремумов в сигнале. В зависимости от значений границ количество экстремумов меняется;

– поиск расстояний между экстремумами. Между всеми значениями экстремумов вычисляются расстояния. Затем расстояния считаются. Повторяющиеся несколько раз значения сохраняются;

– преобразование Фурье. Используется для просмотра спектра сигнала. В дальнейшем планируется использовать спектр сигнала для более точного расчета подшипниковых частот;

– расчет частоты вращения подшипника. Наиболее часто повторяющиеся значения расстояний, измеренные в секундах, с помощью частоты дискретизации переводятся в значения, измеренные в Гц.

– определение дефекта подшипника. По соответствующим формулам из таблицы 2 вычисляются некоторые значения кратных частот, на которых, возможно, кроются дефекты. Если какие-то из найденных частот совпадают с вычисленными, программа сообщит о дефекте.

3.2 Выбор порогового значения и грануляции

Для корректной работы метода, необходимо указать параметры, а именно значение порога – ограничения сигнала по амплитуде, позволяющего избавиться от бесполезных шумов в звуковом сигнале. А также значения грануляции – ограничения сигнала по времени для отсечения лишних экстремумов. Таким образом, учитывая данные ограничения, появляется возможность управлять размером данных при формировании списка экстремумов сигнала.

Значения порога и грануляции в большинстве случаев выбираются эмпирически, то есть при работе со звуковым сигналом, исходя из громкости сигнала и цикличности звуковых колебаний. В дальнейшем, планируется автоматизировать выбор данных значений.

3.3 Нахождение частоты вращения подшипника по звуковому сигналу

В данном разделе подробнее, на примере, будет разобран метод нахождения частоты вращения подшипника по звуковому сигналу, с помощью алгоритма поиска кратных экстремумов.

Для демонстрации работы метода был записан звук вращения подшипника качения диаметром 21 мм, с 7 телами качения. Для эксперимента была проведена запись в двух режимах:

− вращение подшипника под напряжением 15 В;

− вращение подшипника под напряжением 27 В.

Теоретически, в первом случае частота вращения подшипника должна быть примерно в половину меньше, чем во втором. На рисунке 19 изображены фрагменты звуковых сигналов для данных режимов.

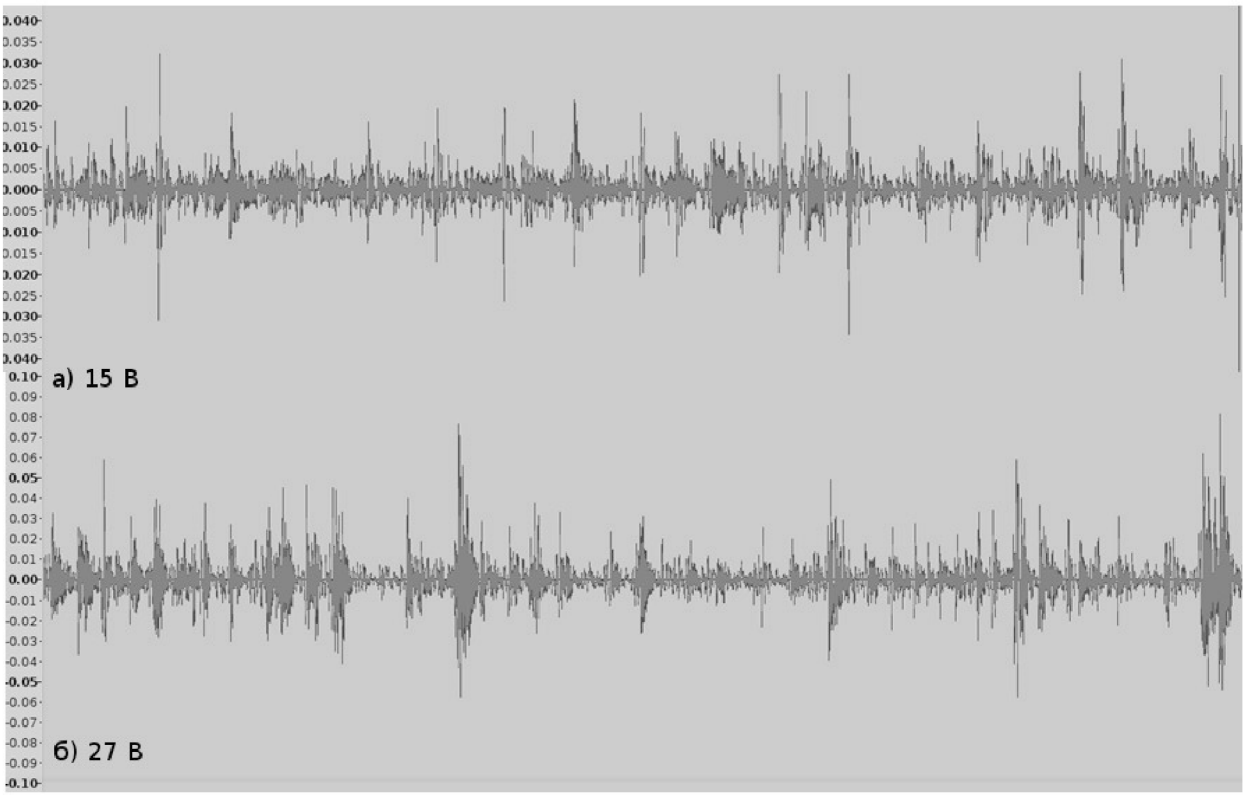


Рисунок 19 – Формы звуковых сигналов при напряжениях 15 В и 27 В

Сразу после отображения данных графиков можно заметить повторяющиеся примерно на одинаковом расстоянии отдельные пики амплитуды. Для выделения соответствующих пиков из сигнала, эксперементальным путем были выведены значения порога и грануляции, равные 80 и 3 соответственно. Метод использует только положительные значения сигнала, поэтому с помощью программного обеспечения Microsoft

Office Excel изобразим модуль сигнала и линию порогового значения (рисунок 20).

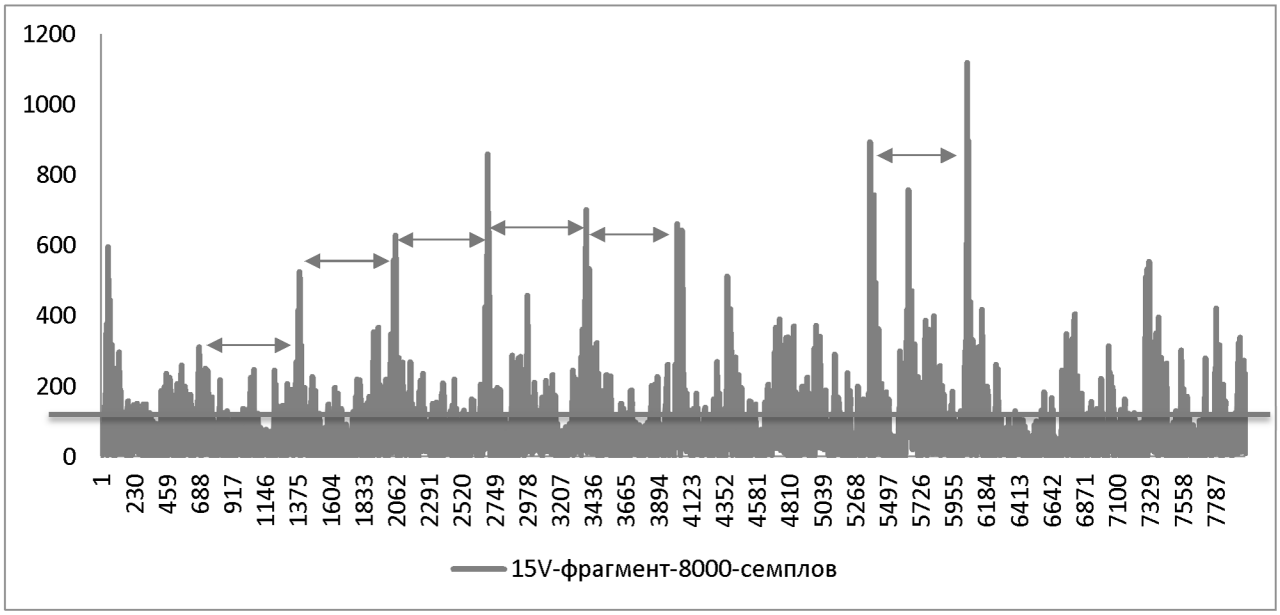


Рисунок 20 – Модуль сигнала первого фрагмента

Для режима, где подшипник вращается под напряжением 27 В подобный график изображен на рисунке 21.

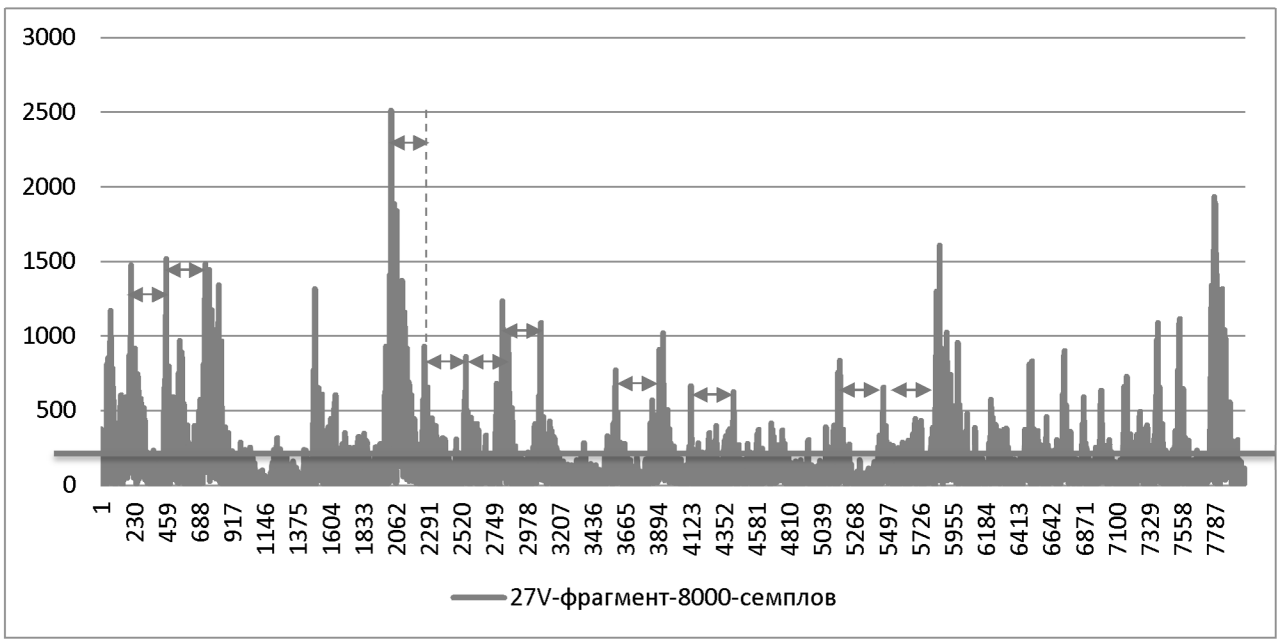


Рисунок 21 – Модуль сигнала второго фрагмента

На данных графиках еще более отчетливо видны пики амплитуд. Расстояния между искомыми данными указаны стрелками.

После поиска и выделения значений экстремумов в сигнале, учитывая установленные значения порога и грануляции, можно наблюдать следующий график (рисунок 22).

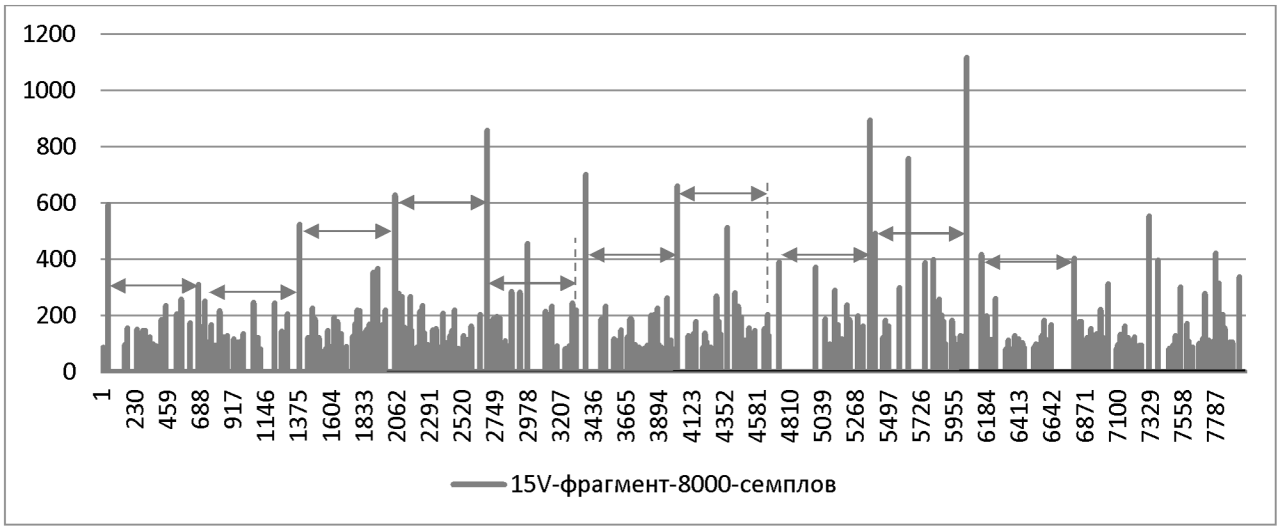


Рисунок 22 – Массив экстремумов для первого фрагмента

На графике заметно уменьшение объема данных, что заметно увеличивает скорость работы алгоритма. Нужные значения экстремумов по-прежнему отображены, но уже более конкретные. На рисунке 23 также изображен подобный график для второго фрагмента.

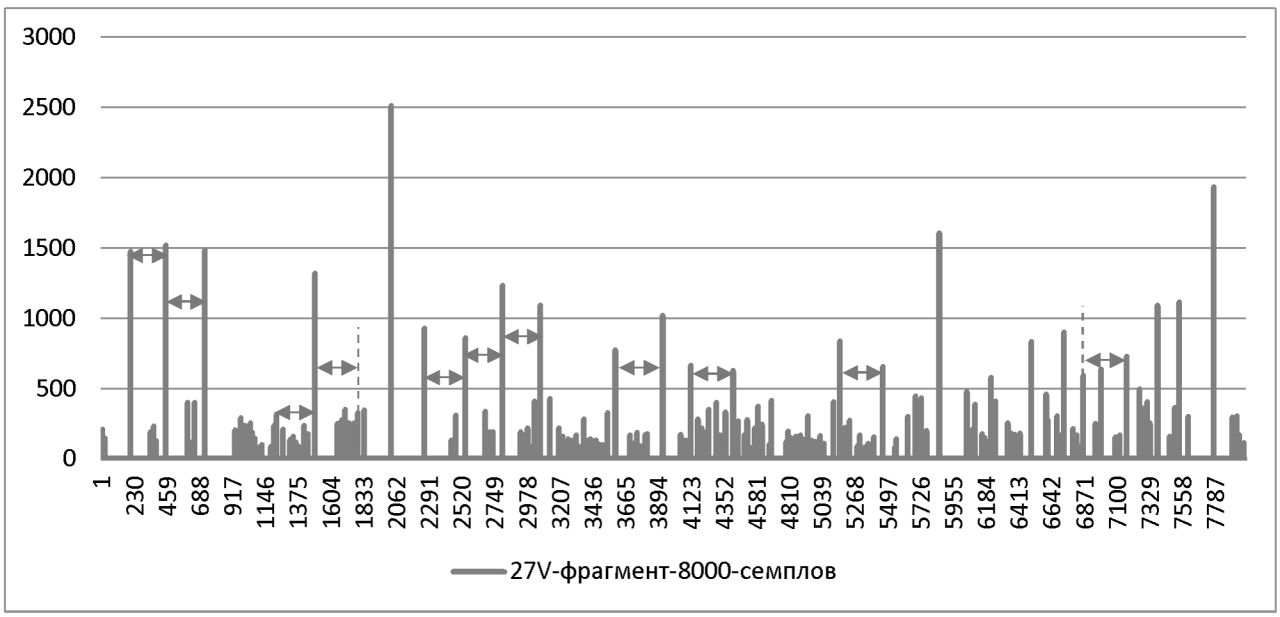


Рисунок 23 – Массив экстремумов для второго фрагмента

Далее, необходимо посчитать расстояния между всеми экстремумами. Так как частота дискретизации записанного сигнала равна 44100 Гц, то не составит труда подсчитать количество времени, пройденное между двумя повторяющимися экстремумами. А затем полученное время перевести в значение частоты.

Таким образом, максимальное количество повторящющихся расстояний между экстремумами является частотой вращения подшипника.

3.4 Блок-схема алгоритма поиска кратных экстремумов

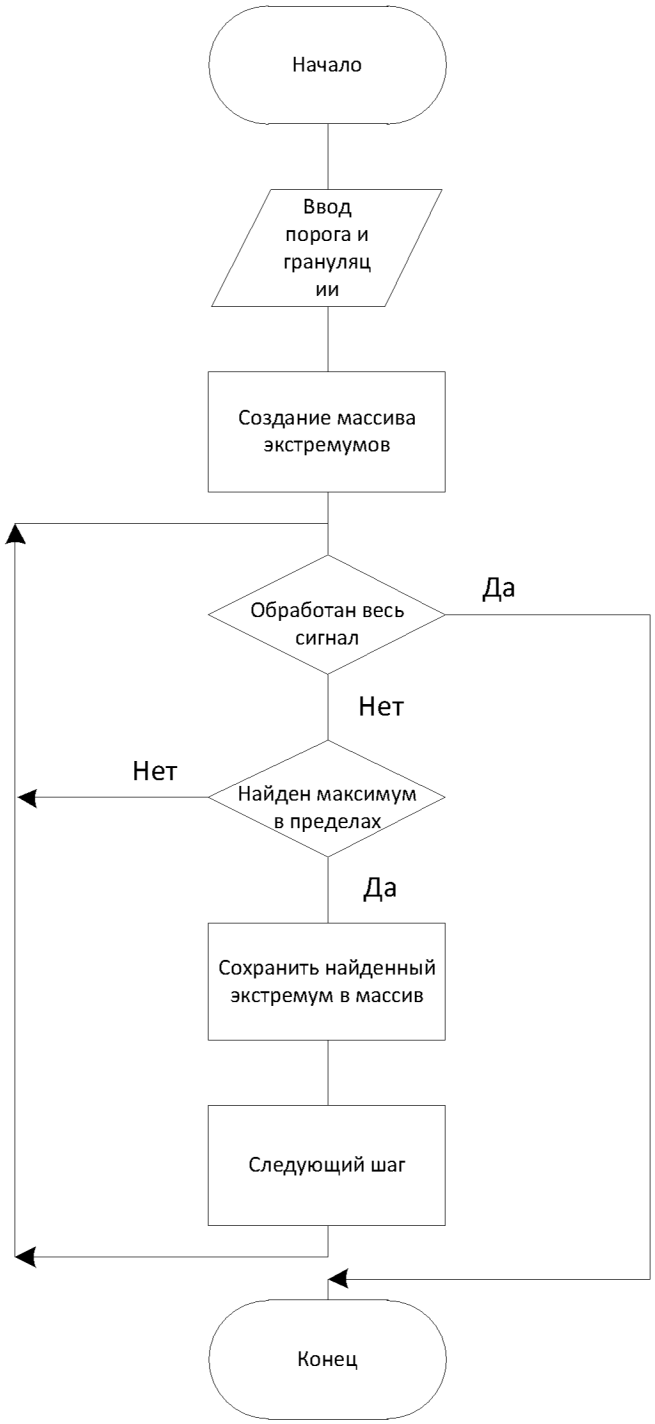


Рисунок 24 – Блок-схема алгоритма поиска кратных экстремумов

На рисунке 19 изображена блок-схема алгоритма поиска кратных экстремумов. Алгоритм представляет собой функцию вычисления максимальных пиков на графике звукового сигнала, на вход которой подаются два значения: порог чувствительности по амплитуде и грануляция по количеству семплов. С помощью данных значений появляется возможность

управлять размером обрабатываемых данных, что значительно уменьшает количество потребляемых ресурсов устройства.

3.5 Интерфейс приложения

Для тестирования приложения было выбрано устройство на базе Android OS версии 5.0.1. Сразу после запуска, пользователю открывается доступ к управляющим элементам главного окна (рисунок 20). Главное окно состоит из области для построения графиков, а также кнопок управления. Изначально пользователю доступен функционал либо записи звука непосредственно с микрофона, либо возможность открывать файл с носителя.

Рисунок 25 – Интерфейс начального экрана

Как только будет нажата кнопка «Записать шум», программа предложит остановить запись. Только после нажатия кнопки «Остановить запись», на основном экране станет виден график сигнала. Запись можно сохранить для дальнейших исследований или позднего открытия ее в данной программе.

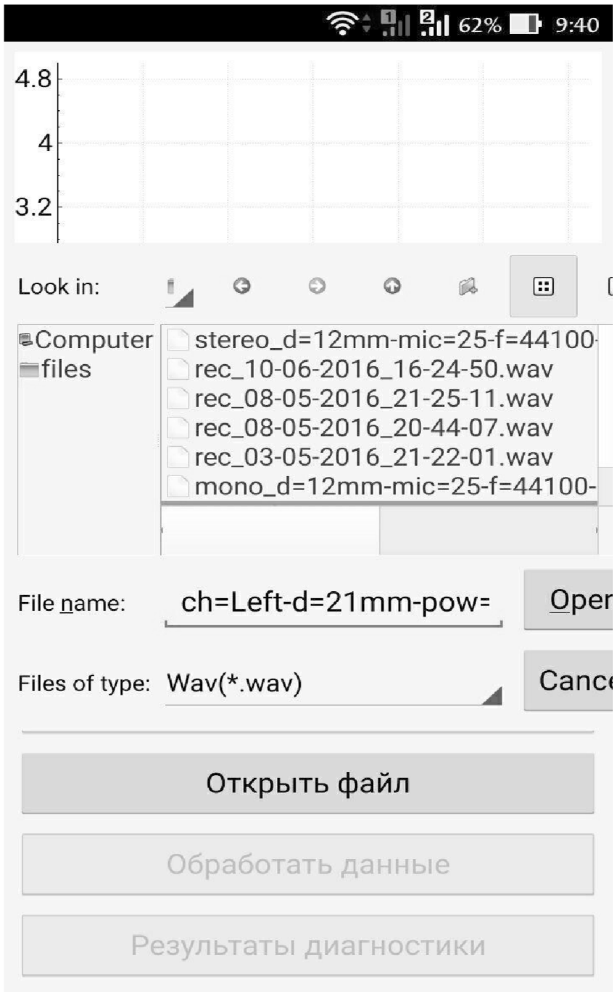


Рисунок 26 – Окно открытия файла

После того, как пользователь нажмет кнопку «Открыть файл», будет вызвано окно диспетчера файлов, где он сможет выбрать соответствующий звуковой файл формата *.Wav (рисунок 21).

На рисунке 22 показано окно информации открытого файла, в случае если он корректный. Если открываемый файл не содержит достоверных данных или он является файлом другого, отличного от *.Wav, формата, программа сообщит об ошибке открытия файла.

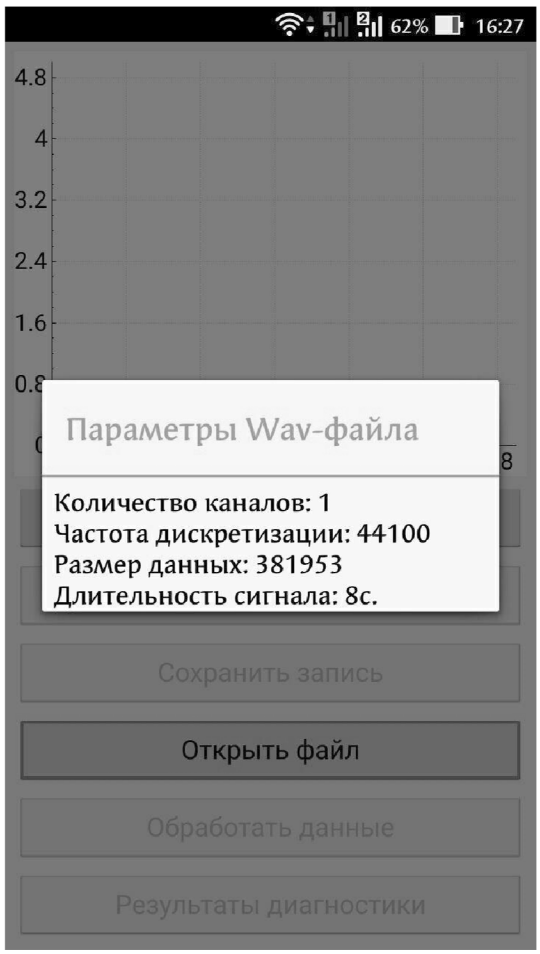


Рисунок 27 – Вывод информации из файла

Ознакомившись с параметрами файла, пользователь может видеть график сигнала (рисунок 23). Как видно из графика, в сигнале присутствует множество кратных пиков.

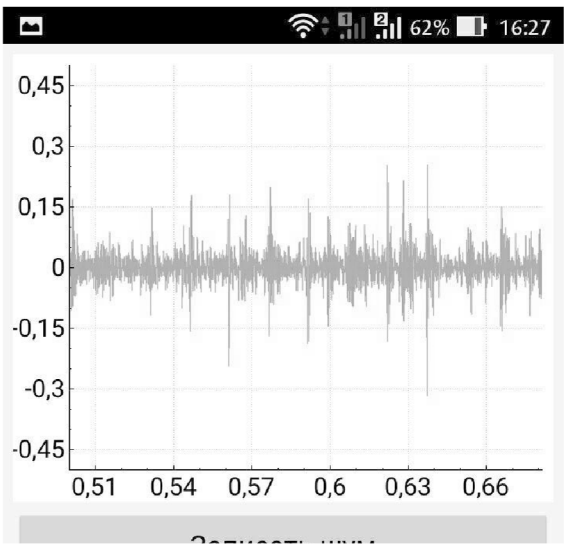


Рисунок 28 – Построение графика сигнала

Если пользователь нажмет на кнопку «Обработать данные», откроется диалоговое окно ввода параметров (рисунок 24), где пользователю необходимо выбрать фрагмент сигнала, с которым в дальнейшем будет проиводиться обработка. Также необходимо ввести порог чувствительности и грануляцию данных для алгоритма поиска кратных экстремумов. Данные значения выбираются экспериментально. В программе по умолчанию установлены наиболее подходящие значения.

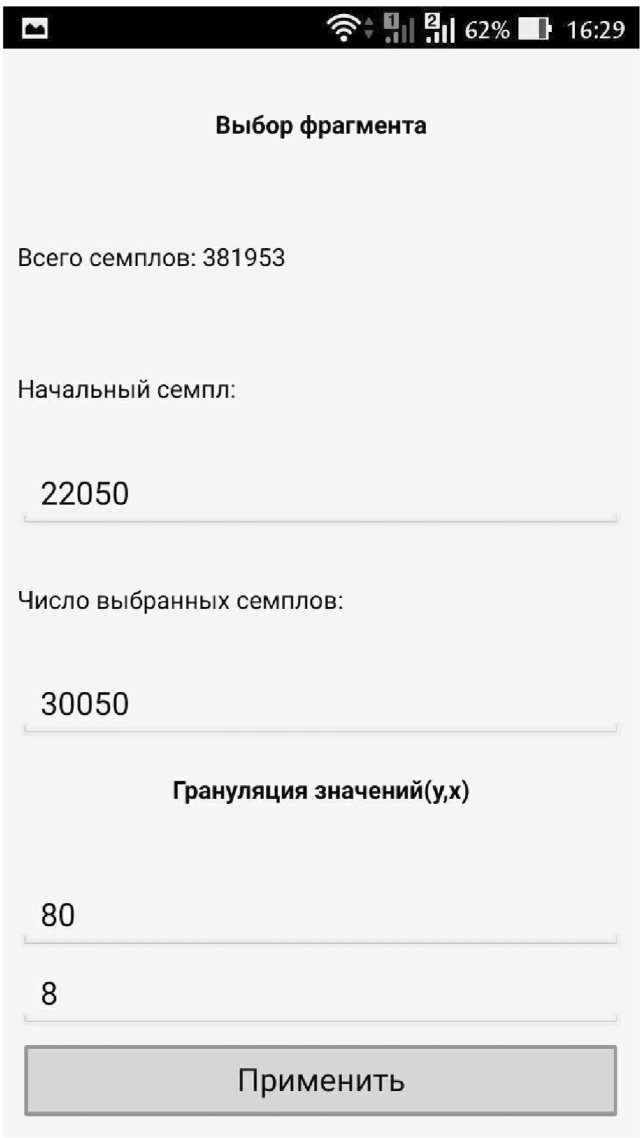


Рисунок 29 – Окно выбора параметров обработки сигнала

После ввода параметров и нажатия кнопки «Применить», программа вернется на главный экран и построит спектр сигнала с помощью Быстрого Преобразования Фурье (рисунок 25).

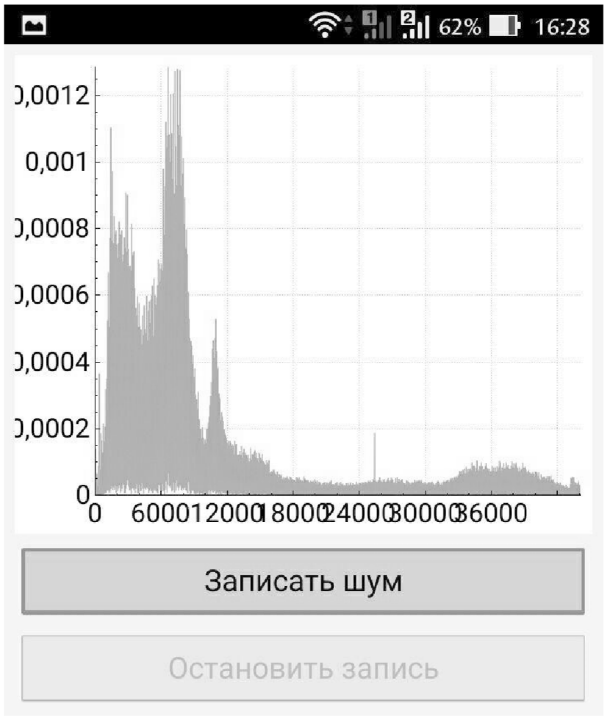


Рисунок 30 – Окончание обработки сигнала. Построение спектра

В качестве результатов программа выводит полученные частоты и выявленный возможный дефект подшипника качения. Из результатов работы программы можно сделать вывод, что частота вращения подшипника найдена и она равна примерно 65 Гц. Исходя из этой частоты, по формулам из таблицы 2 были найдены частоты дефектов, затем сравнены с имеющимися на выбранном фрагменте сигнала.

На рисунке 26 выведен результат работы программы. Исходный код программы приведен в приложении А и на приложенном диске.

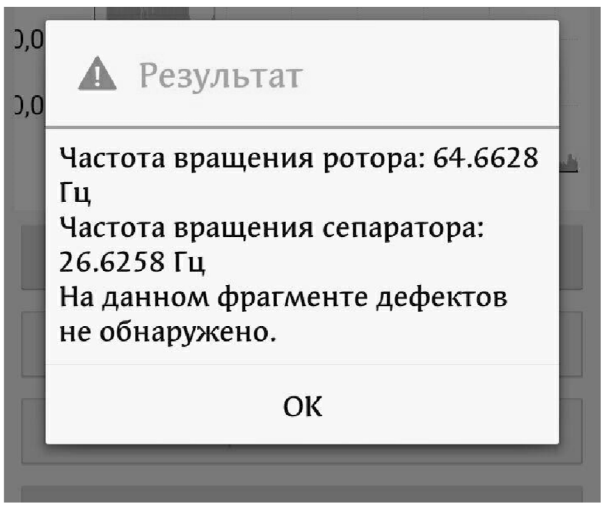


Рисунок 31 – Результат работы программы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы была разработана мобильная система автоматизированного анализа вибрационных данных подшипника качения. На языке программирования C++ с применением программной библиотеки Qt5 реализован предложенный метод анализа вибрационного сигнала. Все поставленные задачи были решены. Готовое программное обеспечение демонстрирует возможность реализации автоматической вибрационной диагностики неисправностей подшипников качения на распространенных мобильных аппаратных платформах, к которым относятся современные смартфоны.

При выполнении работы решены следующие задачи:

– проанализированы виды вибрации и шума в подшипниках качения, их особенности, влияние на форму вибрационного сигнала. Сформирована классификация видов звука и вибрации в подшипниках качения, результаты представлены в таблице 1;

– проведен обзор распространённых методов диагностики подшипников качения: метод ПИК-фактора; анализ спектра вибросигнала; анализ спектра огибающей; метод ударных импульсов. Выявлены отрицательные и положительные свойства методов, на данном основании было отдано предпочтение методу спектра огибающей сигнала, как наиболее чувствительному к зарождающимся дефектам;

– изучены методы анализа вибрационного сигнала, в ходе изучения было выявлено, что для получения наиболее полной информации о характеристиках и параметрах вибрации, необходимо руководствоваться методами анализа вибрации, как во временной, так и частотной областях;

– разработан алгоритм поиска кратных частот в звуковом сигнале;

– в качестве целевой платформы для реализации алгоритма выбрана мобильная система на базе архитектуры ARM под управлением операционной системы Android;

– на языке программирования C++ с применением программной библиотеки Qt5 реализован разработанный алгоритм анализа вибрационного сигнала;

– показана принципиальная возможность нахождения частоты вращения подшипника путем анализа шумового сигнала;

– проведено тестирование метода, реализованного в программе, было проведено на реальных подшипниках. В качестве исходных данных использованы вибросигналы, записанные при работе реальных подшипников качения в различных режимах.

Таким образом, были решены все задачи, необходимые для достижения поставленной цели. В ходе работы была продемонстрирована принципиальная возможность автоматизации диагностики подшипников с помощью данного метода.

Достоинства разработанного программного обеспечения:

– программа является кроссплатформенной, что позволяет работать с ней в различных операционных системах;

– простота использования;

– экономия ресурсов предприятия за счет автоматизации методов диагностики;

– возможность ранней диагностики подшипников качения задолго до выхода их из строя.

Недостатки:

– программа работает с ограниченным набором подшипников (до 5000 об/с., до 20 мм в диаметре).

В дальнейшем проект может быть улучшен путем добавления дополнительных методов анализа спектра вибрационного сигнала, полученного при помощи быстрого преобразования Фурье.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т./ В. И. Анурьев ; под ред. И. Н. Жестковой . – 9-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 2010. – Т. 3 – 928 с.

2. Иванов, М.Н Детали машин: учеб. пособие / М.Н. Иванов, В.А. Финогеев. – Москва: Высшая школа, 2010. – 408 с.

3. Momono,Tatsunobu Sound and Vibration in Rolling Bearing / Tatsunobu Momono, Banda Noda // Motion & Control. – 1999 – №6

4. Гаврилин, А.Н. Диагностика технологических систем: учебное пособие для вузов/ А.Н. Гаврилин, Б.Б. Мойзес.– Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2014. –128 с.

5. Баркова, Н.А. Неразрушающий контроль технического состояния горных машин и оборудования: учеб. пособие / Н.А. Баркова, Ю.С. Дорошев. – Владивосток: Издательство ДВГТУ, 2010. – 157 с.

6. Барков, А.В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: учеб. пособие/ А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев. – Санкт-Петербург: СПБГМТУ, 2012 – 159 с.

7. Библиотека Qt [Электронный ресурс]: сайт «Русское Qt – сообщество. Программирование на Qt». – Электрон. дан. – Режим доступа: http://qt-doc.ru/

8. Qt – Википедия [Электронный ресурс]: Википедия – свободная энциклопедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Qt

9. Экстремумы [Электронный ресурс]: Свободная интернет-энциклопедия. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Экстремум

10. Дасгупта, С. Алгоритмы/ С. Дасгупта Х. Пападимитриу, У. Вазирани; Пер. с англ. под редакцией А. Шеня. М.: МЦНМО, 2014. – 320 с.

11. Сато, Ю. Без паники! Цифровая обработка сигналов/ Ю. Сато; Пер. с япон. Под редакцией Т.Г. Селиной. М.: Додэка-XXI, 2010. – 175 с.

12. О преобразовании Фурье [Электронный ресурс]: ресурс для IT-специалистов. Режим доступа: http://habrahabr.ru/post/196374/

13. Ширман, А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования/ А.Р. Ширман, А.Б. Соловьев. Москва: Издательство Москва, 2010. – 276 с.

14. Русов, В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам/ В.А. Русов. Пермь: Вибро-центр, 2012. – 325 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Листинг программы

А1. Файл main.cpp – основной файл исходного кода, отвечающий за запуск программы

```
#include "mainwindow.h"
#include <QApplication>
#include <QtWidgets>

int main(int argc, char *argv[])
{
    QApplication app(argc, argv);

    app.setApplicationName("Bearing Diagnostic App");
    app.setApplicationDisplayName("Bearing Diagnostic App");
    app.setApplicationVersion("1.0.7a");

    Mainwindow w;
    w.show();

    return app.exec();
}
```

А2. Файл mainwindow.h – заголовочный файл, содержащий в себе описание класса главного окна и основной функционал приложения

```
#ifndef MAINWINDOW_H
#define MAINWINDOW_H

#include <QMainWindow>
#include <QObject>
...
#include <fstream>
#include "qcustomplot.h"

struct Extremum {
    int index;
    double val;
};

class Mainwindow : public QMainWindow
```

```
{
    Q_OBJECT

public:
    Mainwindow();
    ~Mainwindow();

private:
    void initializeWindow();
    void initializeAudio();

    int addWavHeader(char *);

    void drawWavePlot(double *data, int start, int n);
    void drawFreqPlot(int n);

    void dataNormalize(int bufferLength);
    void FFTAnalysis(int Nvl, int Nft);
    void getExtremums(double threshold, int gran);
    void getDeltas();
    void getDefect(int Z);

private slots:
    void onRecordStart();
    void onRecordStop();
    void onRecordSave();
    void onOpenAudio();
    void onProcessData();
    void onShowResults();

private:
    QCustomPlot *m_plot;
    QPushButton *m_recordStart;
    QPushButton *m_recordStop;
    QPushButton *m_recordSave;
    QPushButton *m_openAudio;
    QPushButton *m_processData;
```

```
    QPushButton *m_showResults;

    QAudioFormat mFormatFile;
    QFile *mpOutputFile;

    QAudioInput *mpAudioInputFile;
    QAudioOutput *mpAudioOutputFile;
    qint16 *rawData;
    double *Aval, *FTvl;
    bool isAudioInit; // проверка инициализации аудио
    Extremum *ext;
    int extLength;
    double samplerate;
    int dataSize;
    int pickOffSamples;
    int pickSamples;
    double mul; // коэффициент нормализации
    double Fr; // частота вращения
    double fc; //частота вращения сепаратора
    QString defect; // наименование дефекта
    double *fDefect; // массив найденных частот
    int fDefectLength;
};

#endif
```

А3. Файл mainwindow.cpp – файл исходного кода, содержащий интерфейс главного окна и основной функционал приложения

```
#include "mainwindow.h"
#include "optionswindow.h"
#include <stdlib.h>

#define START_RECORD_BTN_LABEL "Записать шум"
#define STOP_RECORD_BTN_LABEL "Остановить запись"
#define SAVE_RECORD_BTN_LABEL "Сохранить запись"
```

```
#define OPEN_AUDIO_BTN_LABEL "Открыть файл"
#define PROCESSING_START_BTN_LABEL "Обработать данные"
#define PROCESSING_DONE_BTN_LABEL "Данные обработаны!"
#define SHOW_RESULT_BTN_LABEL "Результаты диагностики"

const double TwoPi = 2.0 * M_PI;

// Заголовок WAV
struct HEADER
{
    char RIFFNAME[4];
    unsigned long nRIFFLength;
    char WAVNAME[4];
    char FMTNAME[4];
    unsigned long nFMTLength;
    unsigned short nAudioFormat;
    unsigned short nChannelNumber;
    unsigned long nSampleRate;
    unsigned long nBytesPerSecond;
    unsigned short nBytesPerSample;
    unsigned short    nBitsPerSample;
    char    DATANAME[4];
    unsigned long   nDataLength;
};

Mainwindow::Mainwindow()
    : m_recordStart(0),
      m_recordSave(0),
      m_openAudio(0),
      m_processData(0),
      m_showResults(0),
      rawData(0),
      samplerate(0),
      dataSize(0),
      pickOffSamples(0),
      pickSamples(0),
      mul(1.0),
```

```
      Fr(0)
{
    isAudioInit = false;
    initializeWindow();
}
...
// Событие кнопки Открыть файл
void Mainwindow::onOpenAudio()
{
    int i = 0;
    int* buffer = new int[4];
    int chan, bps, duration;
    dataSize = 0;
    QString fn = QFileDialog::getOpenFileName(
                this,
                tr("Выберите имя файла"),
                QDir::currentPath(),
                "Wav(*.wav)");

    QFile f(fn);
    f.open(QIODevice::ReadOnly);
    QDataStream in(&f);
    in.readRawData((char*)buffer,4);

 ...

        rawData = new qint16[dataSize];
        in.readRawData((char*)rawData,buffer[0]);

        Aval = new double[dataSize];
        FTvl = new double[dataSize];

        for (i = 0; i < dataSize; i++)
        {
            Aval[i] = rawData[i];
            FTvl[i] = 0;
        }
```

```
        dataNormalize(dataSize);
        drawWavePlot(Aval, 22050, 30050);

        m_recordStart->setDisabled(false);
        m_recordStop->setDisabled(true);
        m_openAudio->setDisabled(false);
        m_recordSave->setDisabled(true);
        m_processData->setDisabled(false);
        m_showResults->setDisabled(true);
    }
}

// Событие кнопки Обработка данных
void Mainwindow::onProcessData()
{
    double threshold;
    int gran;

    Options options(dataSize, this);
    pickSamples = options.pow2;
    threshold = options.threshold; // порог
    gran = options.gran; // грануляция

    FFTAnalysis(pickSamples, pickSamples/2);
    drawFreqPlot(pickSamples/2);

    pickOffSamples = options.pickOffSamples;
    pickSamples = options.pickSamples;

    getExtremums(threshold, gran); //80,8
    getDeltas();
    getDefect(7); //7 тел качения

    delete[] Aval;
    delete[] FTvl;
    delete[] rawData;
```

```
    delete[] ext;

    m_processData->setDisabled(true);
    m_showResults->setDisabled(false);
}
// Нормализация сигнала
void Mainwindow::dataNormalize(int bufferLength)
{
    float peakAmplitude(0.0f);
    int idx = 0;

    // поиск пиковой амплитуды
    for (idx = 0; idx < bufferLength; ++idx) {
        if (fabs(Aval[idx]) > peakAmplitude)
            peakAmplitude = fabs(Aval[idx]);
    }

    if (0.0f >= peakAmplitude) {
        qDebug() << "signal is silent\n";
        return;
    }

    // нормализация
    mul = 1.0f / peakAmplitude;
    for (idx = 0; idx < bufferLength; ++idx) {
        Aval[idx] *= mul;
    }
    qDebug() << "peakAmplitude = " << peakAmplitude;
}

// формирование массива экстремумов
void Mainwindow::getExtremums(double threshold, int gran)
{
    int i = 0;
    int iRes,
    currIndex, currGran;
    double currMax;
```

```
    ext = new Extremum[dataSize];
    // подготовка данных
    iRes = 0;
    currMax = fabs(Aval[0]);
    currIndex = 0;
    currGran = 0;
    threshold *= mul;
    // обработка данных
    for (i = pickOffSamples; i < pickSamples-gran; i++)
    {
        // в пределах грануляции ищем один максимум
        if (fabs(Aval[i]) < threshold)
        {
            if (currGran > gran)
            {
                currGran = 0;
                if (currMax >= threshold)
                {
                    ext[iRes].index = currIndex;
                    ext[iRes].val = currMax;
                    iRes++;
                }
                currMax = 0;
            }
            else
                currGran++;
            continue;
        }
        if (fabs(Aval[i]) > currMax)
        {
            currMax = fabs(Aval[i]);
            currIndex = i;
        }
        currGran = 0;
    }
    extLength = iRes;
}
```

```
// формирование массива расстояний между элементами
void Mainwindow::getDeltas()
{
    int i = 0;
    double *deltas = new double[extLength*extLength/2];
    fDefect = new double[500];
    int fdefect_i;
    int j, min_i, k = 0;
    int deltasLength;

    for (i = 0; i < extLength; i++)
    {
        for (j = i + 1; j < extLength - 1; j++)
        {
            deltas[k] = abs(ext[j].index - ext[i].index);
            k++;
        }
    }
    deltasLength = k;

    qDebug() << "Extremums array size: " << extLength;
    qDebug() << "Deltas array size: " << deltasLength;

    // Сортировка дельт
    for (i = 0; i < deltasLength-1; i++)
    {
        min_i = i;
        for (j = i + 1; j < deltasLength; j++)
        {
            if (deltas[j] > deltas[min_i])
            {
                min_i = j;
            }
        }
```

```
            if (min_i != i)
            {
                std::swap(deltas[i], deltas[min_i]);
            }
        }

        // Поиск наиболе повторяющихся дельт
        int maxcount(1), nn(-1);
        fdefect_i = 0;
        for (i = 0; i < deltasLength; i++)
        {
            int count(0);
            for (int j = i; j < deltasLength; j++)
                if (deltas[i] == deltas[j])
                    count++;

            if (maxcount < count)
            {
                maxcount = count;
                nn = i;

                fDefect[fdefect_i] = 1/(deltas[nn]/samplerate);
                fdefect_i++;
            }
        }
        fDefectLength = fdefect_i;

        if (nn >= 2)
            qDebug() << "Наиболее встречающееся: " << deltas[nn]
<< "," << maxcount << "раз";
        else
            qDebug() << "Повторяющихся значений нет!";
        Fr = 1 / (deltas[nn] / samplerate);
        qDebug() << "Fr = " << Fr << "Hz";

        delete[] deltas;
    }
```

```
// выявление дефекта на основе полученной частоты
void Mainwindow::getDefect(int Z)
{
    int i = 0;
    double Da = 3.0, dm = 17.0;
    int cos0 = 1;
    fc = 0.5 * Fr * (1-((Da/dm)*cos0));
    qDebug() << fc;
    for (i = 0; i < fDefectLength; i++)
    {
        if (floor(fDefect[i]) == Z*floor(fc))
        {
            defect = "Столкновение сепаратора и тел качения.
Необходимо смазать подшипник.";
            qDebug() << fDefect[i] << ":" << defect;
            break;
        }
        else if (floor(fDefect[i]) == floor(fc))
        {
            defect = "Износ поверхности тел качения";
            qDebug() << fDefect[i] << ":" << defect;
            break;
        }
        else if (floor(fDefect[i]) == floor(Fr)-2*floor(fc))
        {
            defect = "Нелинейная вибрация из-за изменения
жесткости шара. Используйте высококачественные подшипники.";
            qDebug() << fDefect[i] << ":" << defect;
            break;
        }
        else
        {
            defect = "На данном фрагменте дефектов не
обнаружено.";
            qDebug() << fDefect[i] << ":" << defect;
        }
    }
```

```
    delete[] fDefect;
}
```

А4. Файл optionswindow.h – заголовочный файл, содержащий в себе описание класса окна параметров

```
#ifndef OPTIONSWINDOW_H
#define OPTIONSWINDOW_H

#include <QLineEdit>
#include <QWidget>
#include <QObject>
#include <QPushButton>
#include <QLabel>

class Options : public QWidget
{
    Q_OBJECT

public:
    Options(int dataSize, QWidget *parent);
    ~Options();

private:
    QLabel *lbl_fragment;
    QLabel *lbl_dataSize;
    QLabel *lbl_startSample;
    QLineEdit *edit_startSample;
    QLabel *lbl_finishSample;
    QLineEdit *edit_finishSample;
    QPushButton *btn_pow2;
    QPushButton *btn_all;
    QLabel *lbl_gran;
    QLineEdit *edit_threshold;
    QLineEdit *edit_gran;
    QPushButton *btn_accept, *btn_cancel;
```

```
private slots:
    void onAccept();

private:
    void getClosestPow(int size);
    //void onProcessData();

public:
    int threshold;
    int gran;
    int pow2;
    int pickOffSamples;
    int pickSamples;
};

#endif // OPTIONSWINDOW_H
```

А5. Файл optionswindow.cpp – файл исходного кода, содержащий интерфейс окна параметров и его необходимый функционал

```
#include "optionswindow.h"
#include <QGuiApplication>
#include <QVBoxLayout>
#include <QLayout>
#include <QDebug>
#include <QMainWindow>

Options::Options(int dataSize, QWidget *parent)
    : QWidget(parent),
      pow2(0)
{
    threshold = 80, gran = 8;
    pickOffSamples = 22050, pickSamples = 30050;
    int finish = dataSize;
```

```
        QScopedPointer<QWidget> win(new QWidget);
        QScopedPointer<QVBoxLayout> layout(new QVBoxLayout);

        lbl_fragment = new QLabel(this);
        lbl_fragment->setText(tr(LABEL_FRAGMENT));
        layout->addWidget(lbl_fragment);

        lbl_dataSize = new QLabel(this);
        lbl_dataSize->setText(QString(tr("Всего семплов:
%1")).arg(dataSize));
        layout->addWidget(lbl_dataSize);

        lbl_startSample = new QLabel(this);
        lbl_startSample->setText(tr(LABEL_START));
        layout->addWidget(lbl_startSample);

        edit_startSample = new QLineEdit(this);
        edit_startSample-
>setText(QString(tr("%1")).arg(pickOffSamples));
        layout->addWidget(edit_startSample);

        lbl_finishSample = new QLabel(this);
        lbl_finishSample->setText(tr(LABEL_FINISH));
        layout->addWidget(lbl_finishSample);

        edit_finishSample = new QLineEdit(this);
        edit_finishSample-
>setText(QString(tr("%1")).arg(pickSamples));
        layout->addWidget(edit_finishSample);

        lbl_gran = new QLabel(this);
        lbl_gran->setText(tr(LABEL_GRAN));
        layout->addWidget(lbl_gran);

        edit_threshold = new QLineEdit(this);
        edit_threshold-
>setText(QString(tr("%1")).arg(threshold));
        layout->addWidget(edit_threshold);
```

```
        edit_gran = new QLineEdit(this);
        edit_gran->setText(QString(tr("%1")).arg(gran));
        layout->addWidget(edit_gran);

        //TODO
        btn_accept = new QPushButton(this);
        btn_accept->setText(tr(BUTTON_ACCEPT));
        connect(btn_accept, SIGNAL(clicked()), SLOT(onAccept()));
        //emit btn_accept->clicked();
        layout->addWidget(btn_accept);

        win->setLayout(layout.data());
        layout.take();

        QWidget *const winPtr = win.take();
        winPtr->show();

        getClosestPow(finish);
    }

    void Options::getClosestPow(int size)
    {
        int next = size;
        int result;
        const int BiggestPower2 = 2147483648;

        if (size >= BiggestPower2)
        {
            result = BiggestPower2;
            edit_finishSample-
>setText(QString("%1").arg(result));
        }

        //проверка слишком малого значениея Val
        if (size <= 1)
        {
```

```
            result = 0;
            edit_finishSample-
>setText(QString("%1").arg(result));
            return;
        }
        //подбор степени 2
        result = 2;
        next = 2;
        while (size >= next)
        {
            result = next;
            next = next * 2;
        }
        pow2 = result;
        edit_finishSample->setText(QString("%1").arg(pow2));
    }

    //TODO: Не работает connect()
    void Options::onAccept()
    {
        qDebug() << "edit_finishSample->text()";
        this->close();
    }

    Options::~Options() { }
```