

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа природных ресурсов (ИШПР)  
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 «Нефтегазовое дело»  
 Профиль «Надежность и долговечность газонефтепроводов и хранилищ»  
 Отделение нефтегазового дела

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
«Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов»

УДК 621.671-047.44

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ6А	Радченко Д.В.		28.05.2018

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОНД	Рудаченко А.В.	к.т.н., доцент		28.05.2018

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОСГН	Макашева Ю.С.	-		28.05.2018

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Немцова О.А.	-		28.05.2018

Консультант-лингвист

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ	Коротченко Т.В.	к.ф.н., доцент		28.05.2018

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОНД	Зарубин А.Г.	к.х.н., доцент		28.05.2018

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОНД ИШПР	Бурков П.В.	д.т.н, профессор		28.05.2018

Томск – 2018г.

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП**  
**подготовки магистров**  
**по направлению 21.04.01 «Нефтегазовое дело»,**  
**профиль подготовки: «Надежность газонефтепроводов и хранилищ»**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>В соответствии с универсальными, общепрофессиональными и профессиональными компетенциями</i>		
<b>Общие по направлению подготовки 21.04.01 «Нефтегазовое дело»</b>		
P1	Применять естественнонаучные, математические, гуманитарные, экономические, инженерные, технические и глубокие профессиональные знания в области современных нефтегазовых технологий для решения прикладных междисциплинарных задач и инженерных проблем, соответствующих профилю подготовки (в нефтегазовом секторе экономики)	ОК-1; ОК-2; ОК-3, ОПК-1; ОПК-2; ОПК-4; ОПК-5; ОПК-6; ОПК-7, ОПК-8, ПК-1; ПК-2; ПК-3; ПК-4; ПК-6; ПК-7; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-14; ПК-16; ПК-17; ПК-19; ПК-20; ПК-21; ПК-23
P2	Планировать и проводить аналитические и экспериментальные исследования с использованием новейших достижений науки и техники, уметь критически оценивать результаты и делать выводы, полученные в сложных и неопределённых условиях; использовать принципы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности	ОК-1; ОК-2; ОПК-2; ОПК-4; ОПК-6; ПК-1; ПК-2; ПК-3; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-7; ПК-8; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-14; ПК-15; ПК-17; ПК-18; ПК-19; ПК-20; ПК-22; ПК-23
<i>в области производственно-технологической деятельности</i>		
P3	Проявлять профессиональную осведомленность о передовых знаниях и открытиях в области нефтегазовых технологий с учетом передового отечественного и зарубежного опыта; использовать инновационный подход при разработке новых идей и методов проектирования объектов нефтегазового комплекса для решения инженерных задач развития нефтегазовых технологий, модернизации и усовершенствования нефтегазового производства.	ОК-1; ОК-2; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-3; ОПК-6; ОПК-7, ОПК-8, ПК-1; ПК-2; ПК-3; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-7; ПК-8; ПК-9; ПК-11; ПК-13; ПК-14; ПК-15; ПК-18; ПК-20; ПК-21; ПК-22; ПК-23
P4	Внедрять, эксплуатировать и обслуживать современные машины и механизмы для реализации технологических процессов нефтегазовой области, обеспечивать их высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда, выполнять требования по защите окружающей среды.	ОК-2; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-7, ОПК-8, ПК-1; ПК-3; ПК-6; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-14; ПК-16; ПК-17; ПК-18; ПК-19; ПК-21; ПК-22

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>в области экспериментально-исследовательской деятельности</i>		
P5	Быстро ориентироваться и выбирать оптимальные решения в многофакторных ситуациях, владеть методами и средствами математического моделирования технологических процессов и объектов	ОК-2; ОК-3; ОПК-1; ОПК-2; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-7; ПК-8; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-17; ПК-20
<i>в области проектной деятельности</i>		
P6	Эффективно использовать любой имеющийся арсенал технических средств для максимального приближения к поставленным производственным целям при разработке и реализации проектов, проводить экономический анализ затрат, маркетинговые исследования, рассчитывать экономическую эффективность	ОК-2; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-4; ОПК-7, ОПК-8, ПК-1; ПК-3; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-8; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-13; ПК-14; ПК-15; ПК-16; ПК-17; ПК-18; ПК-19; ПК-20; ПК-21; ПК-22; ПК-23; (АВЕТ-3с), (ЕАС-4.2-е)
<i>в области организационно-управленческой деятельности</i>		
P7	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя команды, умение формировать задания и оперативные планы всех видов деятельности, распределять обязанности членов команды, готовность нести ответственность за результаты работы	ОК-1; ОК-2; ОК-3; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-4; ОПК-5; ОПК-6; ПК-6; ПК-11; ПК-12; ПК-13; ПК-14; ПК-15; ПК-23; (АВЕТ-3с), (ЕАС-4.2-е)
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности; активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию и защищать результаты инженерной деятельности	ОК-1; ОК-2; ОК-3; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-4; ОПК-5; ОПК-6; ПК-6; ПК-11; ПК-12; ПК-13; ПК-14; ПК-15; ПК-23; (АВЕТ-3с), (ЕАС-4.2-е)
<b>Профиль «Надежность газонефтепроводов и хранилищ»</b>		
P9	Организация технологического сопровождения планирования и оптимизации потоков углеводородного сырья и режимов работы технологических объектов	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ОПК-6, ОПК-7, ПК-4, ПК-7, ПК-13), требования профессионального стандарта 19.008 Специалист по диспетчерско-технологическому управлению нефтегазовой отрасли
P10	Организация ТОиР, ДО нефте- и газотранспортного оборудования	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ОПК-5, ОПК-6, ПК-9, ПК-11), требования профессионального стандарта 19.013

<b>Код результата</b>	<b>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</b>	<b>Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон</b>
		«Специалист по эксплуатации газотранспортного оборудования»
Р11	Повышение надежности, долговечности, эффективности газотранспортного оборудования	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ОПК-4, ОПК-5, ПК-9, ПК-14), требования профессионального стандарта 19.013 «Специалист по эксплуатации газотранспортного оборудования»

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа природных ресурсов (ИШПР)  
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 «Нефтегазовое дело»  
 Профиль «Надежность газонефтепроводов и хранилищ»  
 Уровень образования магистратура  
 Отделение нефтегазового дела  
 Период выполнения \_\_\_\_\_ (осенний / весенний семестр 2017/2018 учебного года)

Форма представления работы:

магистерская диссертация

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН**  
**выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	28.05.2018г.
--	--------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
05.04.2018	<i>Введение</i>	5
13.04.2018	<i>Обзор литературы</i>	20
20.04.2018	<i>Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers.</i>	10
20.04.2018	<i>Классификация дефектов центробежных насосных агрегатов</i>	10
03.05.2018	<i>Виброизмерительное портативное устройство АДП-3101</i>	10
04.05.2018	<i>Вибрационная диагностика дебаланса в ЦНА с применением лабораторного стенда.</i>	10
10.05.2018	<i>Социальная ответственность</i>	10
14.05.2018	<i>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</i>	10
17.05.2018	<i>Заключение</i>	5
17.05.2018	<i>Презентация</i>	10
	<i>Итого</i>	100

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОНД	Рудаченко А.В.	к.т.н., доцент		28.05.2018

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОНД ИШПР	Бурков П.В.	д.т.н., профессор		28.05.2018

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа природных ресурсов (ИШПР)  
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 «Нефтегазовое дело»  
 Профиль «Надежность газонефтепроводов и хранилищ»  
 Отделение нефтегазового дела

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП ОНД ИШПР  
 \_\_\_\_\_ Бурков П.В.  
 (Подпись)     (Дата)     (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ6А	Радченко Денису Викторовичу

Тема работы:

«Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов»	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	от 12.03.2018г. №1625/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	21.05.2018г.
--	--------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p><i>Объект исследования:</i> Лабораторный центробежный стенд для физического моделирования неисправностей центробежных насосных агрегатов.</p> <p><i>Характеристики центробежного лабораторного стенда:</i>                  Частота вращения.....50,8 Гц                  Протяженность.....3048 об/мин</p>
---	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Произвести литературный обзор по теме определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов.. Выполнить анализ параметров вибрации. Сделать выводы о целесообразности.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Графики зависимости PC1 от PC2 для бездефектного состояния.</li> <li>2. Графики зависимости PC1 от PC2 при дефекте рабочего колеса</li> <li>3. Графики зависимости PC1 от PC2 при дефекте подшипника.</li> <li>4. Графики зависимости PC1 от PC2 при расцентровке валов электродвигателя и центробежной установки.</li> </ol>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»</p>	<p>Макашева Юлия Сергеевна, ассистент ОСГН</p>
<p>«Социальная ответственность»</p>	<p>Немцова Ольга Александровна, ассистент ООД</p>
<p>«Иностранный язык»</p>	<p>Коротченко Татьяна Валериевна, доцент ОИЯ</p>
<p>«расчётная часть»</p>	<p>Зарубин Алексей Геннадьевич</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b> реферат (abstract), зарубежный опыт (foreign experience).</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>19.09.2016г</p>
--	--------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОНД	Рудаченко Александр Валентинович	к.т.н., доцент		19.09.2016

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ6А	Радченко Денис Викторович		19.09.2016

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
2БМ6А	Радченко Денису Викторовичу

<b>Инженерная школа</b>	<b>Природных ресурсов</b>	<b>Отделение</b>	<b>Нефтегазового дела</b>
<b>Уровень образования</b>	магистратура	<b>Направление/специальность</b>	21.04.01 «Нефтегазовое дело» профиль <u>«Надежность газонефтепроводов и хранилищ»</u>

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Расчет сметной стоимости выполняемых работ, согласно применяемой техники и технологии
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Нормы расхода материалов, тарифные ставки заработной платы рабочих, нормы амортизационных отчислений, нормы времени на выполнение операций, нормы расхода материалов, инструмента и др.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений.</i>	Ставка налога на прибыль 20 %; Страховые взносы 30%; Налог на добавленную стоимость 18%

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Технико-экономическое обоснование целесообразности внедрения новой техники или технологии выполнения работ
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Линейный график выполнения работ
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Расчет экономической эффективности внедрения новой техники или технологии

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. <i>Оценка готовности проекта к коммерциализации</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>График проведения НИ</i>
4. <i>Расчет затрат на проведение мероприятий по диагностике технического состояния трубопровода.</i>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	12.03.2018г.
---	--------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ассистент ОГН	Макашева Ю. С.	-		12.03.2018

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
2БМ6А	Радченко Д.В.		12.03.2018

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ6А	Радченко Денису Викторовичу

Инженерная школа	Природных ресурсов	Отделение	Нефтегазового дела
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	21.04.01 «Нефтегазовое дело», профиль <u>«Надежность газонефтепроводов и хранилищ»</u>

<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. 1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона)	Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Производственная безопасность</b> 1.1. Анализ вредных производственных факторов 1.2. Анализ опасных производственных факторов	Вредные факторы 1. Повышенный уровень шума; 2. Повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны; 3. Отклонение показателей микроклимата в помещении; 4. Повышенный уровень электромагнитных излучений; 5. Утечки токсичных и вредных веществ в атмосферу.
<b>2. Экологическая безопасность</b> 2.1 Защита атмосферы 2.2 Защита гидросферы 2.3 Защита литосферы	При исследования вибрационного воздействия оказываются следующие воздействия: Воздействия на почву; Возможны выбросы метана.
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях</b> 3.1 Оценка степени загрязнения земель при аварийном разливе нефти 3.2 Очистка и рекультивация земель после аварийного разлива нефти	Чрезвычайные ситуации могут возникнуть при проведении электромонтажных и слесарных работ в местах с повышенной загазованностью: • пожар или взрыв.
<b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности</b> 4.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства 4.2 Особенности организации работы	ВРД 39-1.10-069-2002 Положение по технической эксплуатации газораспределительных станций магистральных газопроводов. В т.ч. типовая инструкция по охране труда при эксплуатации одоризационных установок ГРС и перевозке одоранта автомобильным транспортом

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	12.03.2018г.
---	--------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Немцова О. А.	-		12.03.2018

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ6А	Радченко Денис Викторович		12.03.2018



## РЕФЕРАТ

*Выпускная квалификационная работа 165 с., 35 рис., 48 табл., 53 источника.*

*Ключевые слова: вибродиагностика, анализ, мониторинг, расчёт, центробежный лабораторный стенд, виброанализ, испытание, динамика изменения, надёжность, методика решения, метод главных компонент, прогнозирование технического состояния агрегатов.*

*Объектом исследования. Лабораторный центробежный стенд для физического моделирования неисправностей, портативный анализатор диагностический АДП-3101.*

*Цель работы – повышение ресурсоэффективности ЦНА, на основе определения текущего технического состояния и планирования технического обслуживания и ремонта с использованием методов комплексной диагностики, путём выделения области признаков текущего состояния ЦНА.*

*В процессе исследования проводились балансировка центробежной машины, измерение вибрации установки при различных дефектах, измерение числа оборотов центробежной машины, определение дебаланса, анализ вибраций при дефекте подшипника, анализ вибрации при расцентровке валов электродвигателя и центробежного лабораторного стенда. Контроль текущего технического состояния возможен на основе анализа диагностических признаков эксплуатационных параметров агрегата. В дополнении к эксплуатационным параметрам (температура узлов, потребляемая мощность, напор, виброскорость, виброускорение, виброперемещение, спектральные данные, СКЗ). Одним из основных диагностических признаков является определение параметров вибрационных характеристик. Большое количество параметрических признаков и диагностических параметров усложняет текущий диагноз, и усложняет аппаратное обеспечение процесса. Решение задач возможно за счёт изменения алгоритмов сбора и обработки диагностической информации, и выделения области комплексных диагностических признаков. Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: технология и организация выполнения работ, подготовительные работы, монтаж центробежной машины, проведение центровки центробежной машины, настройка диагностического виброанализатора.*

*Область применения: Нефтеперекачивающие станции.*

*Экономическая эффективность/значимость работы. Затраты на техническое обслуживание меньше чем при техническом обслуживании центробежных машин без анализа и мониторинга неисправностей.*

*В будущем планируется упрощение технологии анализа и мониторинга центробежных машин, внедрение комплекса программного обеспечения при анализе вибраций и увеличение скорости обработки спектра вибрации.*

## ABSTRACT

The master's thesis includes 191 pages of text material, 29 figures, 25 tables, 88 sources, 3 apps.

Key words: vibrodiagnostics, analysis, monitoring, calculation, centrifugal laboratory stand, vibroanalysis, testing, dynamics of change, reliability, method of solution, method of main components, forecasting of technical condition of aggregates.

The object of the study. Laboratory centrifugal stand for physical modeling of malfunctions, portable diagnostic analyzer ADP-3101.

The aim of the work is to increase the resource efficiency of the TSNA, based on the determination of the current technical condition and planning of maintenance and repair using integrated diagnostic methods, by isolating the area of signs of the current state of the TSNA.

In the course of the research, balancing of the centrifugal machine, measuring the vibration of the apparatus for various defects, measuring the rotational speed of the centrifugal machine, determining the unbalance, analyzing the vibrations in the case of a bearing defect, analyzing the vibration during the alignment of the motor shafts and the centrifugal laboratory stand were carried out. Monitoring of the current technical condition is possible because of an analysis of the diagnostic features of the operational parameters of the unit. In addition to the operational parameters (knot temperature, power consumption, head, vibration velocity, vibration acceleration, vibration displacement, spectral data, RMS). One of the main diagnostic features is the determination of the parameters of vibration characteristics. A large number of parametric signs and diagnostic parameters complicates the current diagnosis, and complicates the hardware support of the process. The solution of problems is possible due to changes in the algorithms for the collection and processing of diagnostic information, and the identification of a region of complex diagnostic features. The main design, technological and technical-operational characteristics: technology and organization of work execution, preparatory works, installation of a centrifugal machine, centrifugal machine alignment, adjustment of a diagnostic vibration analyzer.

Applications: Oil pumping stations.

Economic efficiency / significance of the work. Maintenance costs are less than with maintenance of centrifugal machines without analysis and fault monitoring.

In the future, it is planned to simplify the technology for analyzing and monitoring centrifugal machines, introducing a software package for analyzing vibrations, and increasing the speed of processing the vibration spectrum.

# ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

## Нормативные ссылки

В работе использованы ссылки на следующие нормативные документы:

- ГОСТ Р 53565-2009 Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов.
- ГОСТ 26875-86 Вибрация. Аппаратура переносная балансировочная. Технические требования
- ГОСТ Р 55265.7-2012 Вибрация. Контроль состояния машин по измерениям вибрации на невращающихся частях. Часть 7. Насосы динамические промышленные.
- ГОСТ ИСО 7919-1-2002 Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на вращающихся валах. Общие требования.
- ГОСТ 20815-93 Машины электрические вращающиеся. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотой оси вращения 56 мм и более. Измерение, оценка и допустимые значения
- ГОСТ ИСО 10816-3-2002 Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 об/мин.
- ГОСТ ИСО 10817-1-2002 Вибрация. Системы измерений вибрации вращающихся валов. Часть 1. Устройство для снятия сигналов относительной и абсолютной вибрации
- ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования
- ГОСТ 12.2.011-2012 ССБТ. Машины строительные, дорожные и землеройные. Общие требования безопасности

## Определения

В работе используются следующие термины с соответствующими определениями:

**обслуживание после отказа:** Техническое обслуживание, выполняемое после отказа машины.

**обслуживание по состоянию:** Техническое обслуживание, выполняемое на основе данных о техническом состоянии машины.

**контроль (технического) состояния:** Сбор и обработка данных, характеризующих техническое состояние машины в разные моменты времени.

**диагностирование:** Анализ диагностических признаков или комплексов диагностических признаков с целью определения природы неисправности или отказа (вида, места, степени развития).

**отказ:** Утрата объектом способности выполнять требуемую функцию.

**неисправность:** Состояние объекта, когда один из его элементов или группа элементов проявляют признаки деградации или нарушения работы, что может привести к отказу машины.

**характеристики машины:** Характерные показатели, качества и свойства машины (ее частей/узлов), описывающие конструкцию, эксплуатационные качества и возможности, режимы работы.

**управление (техническим) состоянием:** Процесс принятия решений по техническому обслуживанию на основе диагностической и прогностической информации, имеющихся ресурсов и потребностей производства.

**мониторинг (технического) состояния:** Процесс, обеспечивающий возможность определения текущей эксплуатационной готовности машин и узлов без необходимости их демонтажа или обследования.

**прогнозирование:** Анализ признаков неисправностей с целью оценки изменения состояния машины в будущие моменты времени и минимального периода ее безаварийной эксплуатации.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	7
1. Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers.	11
1.1 Tested pumps and their system	12
1.2 Experimental tests	12
1.3 Description of damages of pump components	14
1.3.1 Shafts	14
1.3.2 Impellers and spiral cases	15
1.4 The gerotor pumps	17
1.5 Experimental layout for vibration measurement	20
1.6 The development of non-invasive methods of monitoring	25
2. Классификация дефектов центробежных насосных агрегатов (ЦНА)	28
2.1 Возникновение вибрации при неисправности крепления агрегатов на фундаменте	31
2.2 Классификация дефектов рабочего колеса центробежных насосных агрегатов	33
2.3 Классификация дефектов подшипников центробежных насосных агрегатов	36
2.4 Классификация дефектов валов насоса и электродвигателя центробежных насосных агрегатов	39
2.5 Проверка вертикальности облей линии валов ЦНА	43
3. Виброизмерительное портативное устройство АДП-3101	47
3.1 Описание прибора АДП-3101	47
3.2 Внешний вид прибора, органы управления и подключения	49
3.3 Сборка рабочей схемы, включение прибора	52
3.4 Описание блок-схемы прибора	57
3.5 Установка программ загрузки	57
3.5.1 Для установки программы "Модуль работы с АДП-3101", необходимо выполнить следующие действия	58
3.5.2 Для установки драйверов прибора необходимо выполнить следующие действия	61
3.6 Работа на промышленных объектах, установка датчиков	61
4. Вибрационная диагностика дебаланса в ЦНА с применением лабораторного стенда	63
4.1 Сравнение результатов исследования. Вибрационная диагностика в центробежной установке при дефекте рабочего колеса	63
4.2 Сравнение результатов исследования. Вибрационная диагностика в центробежной установке при дефекте подшипника	77
4.3 Сравнение результатов исследования. Вибрационная диагностика центробежной установки при потере соосности валов центробежной лабораторной установки (расцентровка валов)	87
4.4 Сравнение результатов исследования вибраций при различных дефектах	97
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	108
5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	108
5.1.1 SWOT- анализ	109
5.2 Планирование научно-исследовательских работ	110
5.2.1 Оценка готовности проекта к коммерциализации	110
5.2.2 Инициация проекта	112
5.2.3 Структура работ в рамках научного исследования	114
5.2.4 Бюджет научно-технического исследования	115
6. Социальная ответственность	120

6.1 Производственная безопасность	120
6.1.1. Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению	121
6.1.1.1 Повышенный уровень шума на рабочем месте	121
6.1.1.2 Повышенная загазованность и запыленность воздуха рабочей зоны.	122
6.1.1.3 Повышенный уровень электромагнитных излучений.	124
6.1.1.4 Утечки токсичных и вредных веществ в атмосферу	125
6.1.1.5 Повышенный уровень вибрации	126
6.1.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению	127
6.1.2.1 Движущиеся машины и механизмы	127
6.1.2.2 Электрический ток.	129
6.1.2.3. Взрывоопасность и пожароопасность	131
6.1.2.4 Повышенная или пониженная температура поверхностей оборудования	135
6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	136
6.3.1 Анализ наиболее вероятной ЧС и причин ее возникновения	136
6.3.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	137
6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	139
6.4.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства	139
6.4.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	141
Заключение	145
Список используемых источников	147
Приложение А Сравнение результатов исследования	153

## Введение

Нефтеперекачивающие станции являются важным элементом магистрального трубопровода. Повышение энергии перекачиваемого продукта осуществляется нагнетательными машинами (центробежными насосными агрегатами). Аварийная остановка центробежных насосных агрегатов (ЦНА) в большинстве случаев связана с разрушением элементов нагнетательных машин. Поэтому для повышения надёжности работы центробежных насосных агрегатов необходим контроль воздействующих сил и оценка технического состояния. Для проведения ремонтно-восстановительных работ необходима оценка технического состояния центробежных машин для снижения действующих сил и замены деталей, которые подверглись износу.

*Цель работы:* повышение ресурсоэффективности ЦНА, на основе определения текущего технического состояния и планирования технического обслуживания и ремонта путём выделения области комплексных диагностических признаков текущего состояния ЦНА.

*Задачи:* разработка методики проведения исследования, исследование основных диагностических признаков при наличии различных дефектов и разработка методов анализа диагностических признаков, методы принятия решения.

*Задачи:*

Разработан лабораторный стенд и методика проведения исследования;

Исследование основных диагностических признаков при наличии различных дефектов и разработка методов анализа диагностических признаков;

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Радченко Д.В.			Введение	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Рвдченко А.В.					7	165
Консульт.						НИ ТПУ гр. 2БМ6А		
Рук-ль ООП		Бурков П.В.						

Методика принятия решения, что является результатом диагноза, и прогноза состояния.

*Новизна:* Контроль текущего технического состояния возможен на основе анализа диагностических признаков эксплуатационных параметров агрегата. В дополнении к эксплуатационным параметрам (температура узлов, потребляемая мощность, напор, виброскорость, виброускорение, виброперемещение, спектральные данные, СКЗ). Одним из основных диагностических признаков является определение параметров вибрационных характеристик. Большое количество параметрических признаков и диагностических параметров усложняет текущий диагноз, и усложняет аппаратное обеспечение процесса. Решение задач возможно за счёт изменения алгоритмов сбора и обработки диагностической информации, и выделения области комплексных диагностических признаков.

В настоящее время межремонтные периоды эксплуатации ЦНА установлены по среднестатистическим нормам. Это в свою очередь приводит к преждевременной остановке ЦНА или недоиспользованию ресурса агрегатов, что приводит к повышенным эксплуатационным расходам. Установленные нормы в полной мере не учитывают индивидуальные конструктивные и технологические особенности используемого оборудования, а также конкретные условия работы ЦНА.

Для снижения действующих сил необходимо выявить причины их роста. То есть, необходим анализ работы машин, основой которого является определение зависимости действующих сил от технического состояния и условий эксплуатации ЦНА. Конструктивным элементом ЦНА, непосредственно является валопровод с рабочим колесом. Поэтому техническое состояние валопровода в основном и определяет соответствие ЦНА к предъявленным требованиям. Валопровод является конструктивным элементом ЦНА и представляет собой сложную техническую систему.

					Введение	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Эта система состоит из ряда элементов (вал с рабочим колесом или колёсами, подшипники, подшипниковые стойки, муфты и электродвигатель), оказывающих различное влияние на надёжность и долговечность работы центробежных насосных агрегатов.

Диагностика позволяет своевременно обнаружить отклонения технического состояния агрегатов от нормы (до появления необратимых процессов), установить причины отклонений и устранить их с минимальными затратами. Оценка технического состояния ЦНА в целом должна основываться на указанных методах технической диагностики.

В данной работе рассматриваются основы диагностики ЦНА как механической системы по внешним параметрам, а именно, методы вибрационной диагностики, основанной на измерении и анализе параметров вибрации. К основным задачам технического диагностирования относятся:

- оценка технического состояния лабораторной центробежной установки путём сравнения значений диагностических параметров с его минимальными рабочими и предельно допустимыми значениями (в нашем случае значений, которые соответствуют рабочему состоянию лабораторного стенда для измерения вибрации);
- выявление зарождающихся дефектов и причин их возникновения;
- прогнозирование остаточного ресурса контролируемых узлов по динамике измерения во времени диагностических параметров и степени приближения к предельным значениям;
- разработка рекомендаций и заключений о возможности дальнейшей эксплуатации лабораторного стенда.

Значения вибрации будут обработаны при помощи Excel, а именно будет применен Метод Главных Компонент (РСА).

					Введение	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

# 1. Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers.

The main goal of research was to explain the reason for occurring fractures in pump shafts. The investigation has shown that the fractures were caused mainly by the resonance between pump shaft torsional natural vibrations and those following from the pressure fluctuations related to the frequency of the shaft rotational speed and the number of impeller blades. The resonance occurred as a result of intense erosion of pump impellers derived mainly from cavitation phenomenon that caused about 20% of the impeller mass decrease. The investigation includes: erosion damage recognition, tests of the investigated pumps operating conditions, spectral analysis of pressure fluctuation generated by the pump blade system as well as strength analysis of the pump shaft and the frequencies of its natural bending and torsional vibrations. The centrifugal pumps supplying the cooling system of two Diesel generator sets in one of the coastal power plants experienced breakdowns caused by their shaft fractures. The failures occurred at four pumps after about 1900, 2100, 2400 and 3000 h of operation, respectively. In each of these cases substantial destruction derived from cavitation of pump impellers and spiral cases was found.

The failures of pumps were not incidental that means that they were not caused by e.g. material defects. It seemed that breakdowns were caused by some other phenomena that occurred during operation of the pumps and because of operation conditions. It should be noted that there were not any signs that pumps of the same type installed on ships and other marine installations experienced similar failures - based on reported cases, pumps of the same type operated at the positive suction head, which seemed to be the main reason for the lack of cavitation erosion threats in such systems. The analysis based on the results of the inspection on site and measurements and tests results as well as appropriate calculations made on the basis of available documentation

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Радченко Д.В.			Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers.	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Рудаченко А.В.					11	191
Консульт.						НИ ТПУ гр. 2БМ6А		
Рук-ль ООП		Бурков П.В.						

of the pumps and the pumping system including conditions for their joint operation made it possible to determine the causes of failures [36].

### 1.1 Tested pumps and their system

Three identical single stage centrifugal pumps with double suction pipes were installed vertically in the seawater cooling system of the power plant equipped with two Diesel generator sets. Each pump was equipped with a separator and a self-priming device [37].

The demand for cooling water volume was covered by two pumps, while the third pump is the reserve one. The pumps were equipped with the shut-off valves of nominal diameter  $D_n = 250$  mm, installed directly.

After switching on the signal to the pump start, the priming device and the valves were controlled automatically according to the adopted sequence. After the start, the pump operating parameters were not regulated - the pump motors kept almost constant rotational speed and the non-return and central shut-off valves were fully open.

### 1.2 Experimental tests

As part of a technical investigation which aimed to identify the causes of shaft fractures of considered seawater pumps, the experimental research of these pumps were conducted on site. The operational performance of the pumps was investigated in different working conditions: for individual and parallel working configurations, under the steady-state conditions and during their- transient runs (i.e. starting and stopping). The tests included, among others, measurement of the pressure in suction and discharge nozzles of the pumps measurement of the absolute radial vibration of the lower bearing housing of pumps and recording position of the non-return valve discs. Furthermore, the visual inspection of the damaged parts of pumps was carried out and the relevant photographic documentation was prepared. The tests of the transient runs of pumps were conducted in order to identify of the water hammer phenomenon and assess its intensity. This phenomenon was induced by the dynamic behavior of the non-return

					<i>Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers</i>	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

valves and the situation when one pump was stopped while the second one was under normal operation was of special consideration.

Pressure changes in the discharge pipe of the stopped pump, caused by decreasing of rotational speed of its impeller were overlapped by violent pressure oscillations originated from the water hammer phenomenon. The main reason for this phenomenon was a very rapid flap slamming of the non-return valve causing almost immediate cut-off- of the water flow through the pump. Pressure changes induced in this process propagated along the discharge pipe to the hydraulic system of the cooperating pump. Maximum pressure rise during the tests measured in the discharge pipe of the pump being stopped was about 0.2 MPa and in the discharge pipe of the pump being during this time in normal operation was about 0.16 MPa. It should be emphasized that during all tests made during the stops of the pumps the dynamic loads caused by pressure changes affected parts of pumps and their piping and equipment very adversely. The effects observed during these tests consisted of a very high noise level caused by slamming flaps of non-return valves and also increased vibration of pumps and pipelines. In contrary to stopping, starting of the pumps ran much more smoothly.

Additionally, the measurements of pressure pulsations on both sides of the pumps tested under steady state conditions of their operation were carried out. These tests were aimed at detecting any resonant phenomena in the flow system. Exemplary frequency spectrum of vibrations of the lower bearing housing of the pump presented for a frequency measuring range up to 5 kHz, showed the effect of strengthening the vibration component with a frequency of about 492 Hz. It was a four times of the harmonic frequency equal ca. 123 Hz that was associated with the rotation speed and the number of blades of the pump impeller. It should be noted that this dominant component and other components being multiples of a 123 Hz frequency component were not observed in the spectra of the- pressure pulsation. This fact pointed to the resonance phenomena within the construction of the pumps. During the conducted tests, in vibration signal as well as in pressure pulsation signal the cavitation effects

					<i>Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers</i>	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

did not become apparent. It is very likely that these effects could be recognized in the investigated cases as broad frequency bump if measurements were made at higher frequencies than 5 kHz. However, the occurrence of cavitation in tested pumps had to be considered as indisputable based on the effects of cavitation erosion of impeller and spiral cases of these pumps presented later in this paper, and based on the sound effects typical for cavitation. Further analysis of the working conditions of pumps also indicated the cavitation phenomenon in these conditions.

### **1.3 Description of damages of pump components**

#### **1.3.1 Shafts**

Three destroyed pump shafts were inspected. Damages of these shafts were mainly as follows: fracture of the shaft at the pump impeller keyed joint section, fracture of the shaft at the coupling hub attachment section, failures of keyway walls. The frequency spectrum of pressure pulsation was identified at the discharge pipe of the pump supplying one Diesel generator set. The frequency spectrum of pressure pulsation was identified at the discharge pipe of the pump while two Diesel generator sets were supplied by pumps. The shaft fractures at shaft-pump impeller keyed joint section occurred in all three cases under investigation. The most of cross-section area of these fractures were characteristic for fatigue failure – these parts of fracture cross-section area were smooth and they covered the major part of the shaft cross-sectional area. A much smaller area was covered by the residual fracture zone showing brittle fracture traces. This indicates high variability of stress at low average level. The shaft fractures at the coupling disc attachment section were identified in two of the analyzed cases. These fractures were of brittle nature. Such fracture is a result of exceeding the plasticity limit that takes place at an almost permanent stress. It may be assumed that these were the secondary fractures that occurred following the primary fractures located at shaft-pump impeller keyed joint section [36].

Damage to keyways was found at shaft-pump impeller joint section as well as at the coupling hub attachment section. Together with keyways the keys were also damaged. Schematic example of destruction character of the key from the coupling hub attachment section is presented. This key had visible large deformation of its side walls and fracture of brittle nature. Significant plastic deformations were found also at both sides of the key located at shaft-pump impeller joint section (transferring torque from the shaft to the impeller) that indicated high variability of the torque during pump operation.

### 1.3.2 Impellers and spiral cases

The pump impellers, made of silicon bronze BK331 (CuSi3Zn3Mn), showed extensive damages caused by cavitation erosion. The extent of these damages were dependent on the number of operation hours of the investigated impellers. Local perforation of the impeller blades, with initial thickness of 6 mm, confirmed high intensity of cavitation and resulted in significant weight losses of the impellers, due to cavitation erosion. The highest loss in weight reached up 23% of the initial weight of the impeller and was observed for the pump operating for 3000 h. According to the pump manufacturer, the weight of each pump impeller after fabrication and balancing was about 30.8 kg, while investigated three destroyed pump impellers had the following weights:

- 26.5 kg - after 2100 h of operation;
- 25.5 kg - after 2400 h of operation;
- 24 kg - after 3000 h of operation.

Two spiral cases of the pumps that were available for investigation were also damaged due to the cavitation phenomenon in similar way as it was observed in pump impellers. The damage area was focused on the inner surface of tongue, in the immediate vicinity of the rotating impeller blades. The inlet and outlet sections of the spiral case were free of significant signs of damage caused by cavitation erosion.

The analysis of the operating conditions of the pumps, both for their individual work with the cooling system supplying one Diesel generator set in the power plant, and for their parallel operation when two Diesel generator sets are supplied, has shown that the working parameters of these pumps were within the acceptable range [38].

The shear stresses caused by the radial forces and the normal stresses resulting from axial forces were omitted in the calculation due to their negligibly small values.

Strength calculations showed that impeller keyed joint section of the shaft was characterized by the highest stresses. This shaft cross-section is the closest to the primary fracture sections located on all three shafts under investigation. The maximum value of stress was about 172 MPa while the yield strength of shaft material (chromium-nickel Cr17Ni2 steel H17N2) was equal to 630 MPa (according to the Polish Standard PN74/H-93,004). It follows that the maximum reduced stresses in the shaft material induced by the normal operation of the pump were relatively low, accounting for about 27% of the yield strength of the material, and the safety factor related to the yield strength was about. It was assumed that for conditions with complete flow cut-off the power on the shaft of the pump was 64 kW.

According to the impeller mass loss of  $\Delta m_{cr} \approx 5.6$  kg the total mass of the pump impeller was close to  $m_i - cr = 25.4$  kg (the new impeller mass was approximately  $m_i = 31$  kg). In this situation the resonant torsional vibration of pump rotating system had increased as a result of the pressure pulsations generated by the impeller blades. This means that even at low pressure pulsations and related small fluctuations of torque, the amplitude of the torsional vibration, at a frequency close to the resonance frequency reached very large value. It resulted in very high amplitude of stresses in the shaft material, which quickly led to shaft fracture.

All three investigated pump shafts fractured at similar cross-sections, in which, according to the analysis, the stresses reached the highest values. Additionally, those fractures were favored by the impeller mass unbalance which was the result of excessive cavitation erosion causing increase in the load exerted to the shaft. The

					<i>Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers</i>	Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

formulated thesis had been confirmed by the cases of fractures of the investigated pump shafts that occurred as a result of significant weight loss of pump impellers (from 31 kg down to 24–26 kg) due to wear of material. These led directly to the destruction of the pump shafts, as well as the keyways and keys clearly showed that fatigue-torsional loads are responsible for the damage.

The plant owner after four accidents of shaft fractures of the studied pumps decided to replace them with new ones with similar performance parameters, but, with much better cavitation properties. This decision was due mainly to severe technical difficulties (that made this practically impossible) in changing the height settings of the originally installed pumps in order to reduce the intensity of cavitation [38].

*Conclusions:* On the basis of a number of studies and analyses, the main cause of fractures of the shafts of pumps installed in the cooling system of two Diesel generator sets in a coastal power plant was identified. The cause revealed was the resonance of torsional vibration of the shafts following from considerable loss of impeller mass due to excessive cavitation erosion during normal operation of the pumps. The mass imbalance of the impellers resulting from the uneven mass distribution caused by cavitation erosion could favor cracks. Detecting the cause of the pump failures in the considered cases was a difficult task which required carrying out comprehensive research and thorough analysis of various aspects of the impeller pumps operation.

#### **1.4 The gerotor pumps**

The gerotor pumps are much subjected to cavitate than expected, especially under particular operating conditions of the engine. Cavitation also correlates to vehicle dynamics particularly with the recent tendency to reduce the mass of oil in the sump. Therefore, the research aimed at avoiding cavitation is crucial nowadays. Consequently, this study has been firstly performed with an experimentation on the pump by monitoring the delivered oil flow-rate and the adsorbed torque on the pump shaft. An accurate analysis of the pressure oscillations in cavitation conditions, has

					<i>Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers</i>	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

been, also, conducted. Then, an accelerometer sensor has been properly located to study the cavitation with a fault diagnosis system based on vibration detection.

The bench allows testing the pump working by varying the shaft speed, the oil temperature, the suction and the delivery pressure. The main measured parameters are shaft torque, oil flow rate, mean suction and delivery pressure and the instantaneous suction and delivery pressure. As expected, tests revealed the high influence of the suction pressure on the delivered oil flow rate, while no significant influence has been noted on the adsorbed torque. Furthermore, the pressure oscillations in the pump delivery are highly influenced by the suction pressure. A nonintrusive accelerometer has been installed during the experimentation on the oil pump. Since the vibration due to cavitation is the main concern of this study, the accelerometer has been mounted at the suction port in the radial direction. The investigation has been made with and without the presence of cavitation varying the pump rotation speeds. Limitations due to the detection of the on line cavitation problems by monitoring the FFT vibration spectra have been overcome by implementing an alternative method based on stochastic approach. This diagnosis method of accelerometer time series analysis based on an Auto Regressive and Moving Average (ARMA) method has been used to determine the pump failure. The diagnosis results have demonstrated the ability of the proposed mathematical technique in the identification of cavitation phenomena proving that the proposed approach is a useful methodology to detect the presence of fault. The approach can predict, with good accuracy, pump failure in real time operation. In addition, a threshold vibration level in decibel scale is also fixed.

The research has demonstrated correct prediction of cavitation when pressure in a specified zone of the fluid domain falls below the saturation- pressure. Vapor bubbles form and then collapse as the pressure rises again. Many physical models for the formation and transport of vapor bubbles in the liquid are available in literature, but only few computational codes offer robust cavitation models. This is due to the difficulty to handle gas/liquid mixtures with very different densities. Even small

					<i>Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers</i>	Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

pressure variations may cause numerical instability if they are not optimally treated. It is well known that cavitation generates typically high frequent vibration from which the existence of cavitation can be recognized. Also noise phenomenon is associated to this occurrence. To ensure the safety of the pump, the vibration must be kept within acceptable limits. High level of vibration means possible mechanical or hydraulic problem. In the research panorama of vibration analysis of fault diagnosis of oil pump a great number of studies have been proposed.

For this purpose and to overcome such problem by using vibration data for real time monitoring condition an Autoregressive and Moving Average (ARMA) mathematical technique is successfully used to predict incipient faults of the pump or other problem like cavitation. The model order is not known a priori and some experiments with different orders are required before the right order can be selected for the given finite record of signal of length  $N$  samples. In the ARMA modelling process, the goal is to determine the order of the ARMA model. In a way, this modeling means finding a transfer function representation, that is, the order and the coefficients of the denominator–numerator polynomials. However, the parameters cannot be found without knowing the order of the numerator and denominator. In most cases, the user assumes the order and then the parameters are estimated according to [36].

This order selection model is fundamental because the value of residual squared error is influenced by order selection so an appropriate number of orders is fundamental to avoid non confident fault diagnosis. Then, the  $m$   $n$  order pair that yields the lowest value of the selected criterion is chosen as the true model order the error variances are used to compute the model order on the signals to carry out information possible fault of the system. Once the right order selection is obtained, the best model is used to evaluate the vibrational signals acquired during the experimental test and to detect if cavitation is present by using the right threshold level. In order to use a proper-threshold the vibration standard deviation coming from the mathematical approach have been reported in vibration level and expressed in dB. So that the threshold can be easily applied.

					<i>Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers</i>	Лист
						19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 1.5 Experimental layout for vibration measurement.

Pressure signal (bar) in time domain in downstream chamber of the test system. By viewing vibration signal vs. time in a limited time trace. Obviously, by monitoring the vibration in time domain is very difficult to understand when a disturbing occurs. A simple way to study the pump behavior is to perform a FFT (Fast Fourier Transform) analysis of the acceleration time history and comparing spectra between the abnormal operation and the normal one to identify possible changes in the spectrum failures. In order to draw up a careful analysis of the pump and to define safe operational levels of vibration the FFT analysis, in all operating conditions in presence and in absence of cavitation, has been performed on the vibration and pressure in downstream signals, as well. The pressure spectrum in downstream the pump in presence and absence of cavitation at 40 rpm shaft speed, is reported. The pressure spectrum downstream the pump at 40 rpm- in the two operations is: no cavitation (blue curve) and cavitation (red curve). The fundamental frequency at 600 Hz is evident in the two conditions and as well as its harmonics. The frequency 600 Hz represents the mesh frequency as the rate at which tooth pairs contact as they pass through mesh, expressed in Hertz.

Vibration measurements for all test conditions are undertaken and their spectra are also visualized. Vibration measurements are carried out for a sample frequency of 102,400 Hz and spectra (by using FFT analysis with hanning window) and plotted for a frequency range up to 51, 200 Hz with a bandwidth resolution of 1. 25 Hz with a cut off frequency of 51, 200 Hz in order to well visualize the cavitation problem associated to high frequency with high intensity of vibration level. The setting of experimental layout allows detecting with high resolution the BPF (Blade Passing Frequency) and its harmonics [39].

As an example, vibration spectra at 40 rpm of shaft speed in cavitation condition in a zoomed frequency region up to 40 Hz and in all investigated frequency range up to 51, 200 Hz, are reported. It is apparent, by viewing the spectra, the presence of fundamental frequency that occurs at 66.67 Hz for this rpm speed (f rg) and the mesh frequency occurring at 600 Hz and their harmonics. The ninth harmonic (600 Hz) high

					<i>Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers</i>	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

corresponds to the impeller vane pass frequency harmonics (corresponding to the 9 teeth of the internal gear) also presents high amplitude. In all investigated frequency range, the frequency region where the vibration signal shows a high amplitude up to 10 KHz corresponding to the cavitation effect is evident. The comparison of vibration spectra in all investigated speed conditions are also reported.

The vibration spectra at 20 to 50 rpm in cavitation and non cavitation condition are identified. From the spectra, it is apparent that the occurrence of cavitation in vibration spectra exhibits high energy signals at high frequencies from 10 Hz to 10. 0 Hz. By viewing the spectra, it is possible to note not only fundamental frequency, but also multiple frequencies and some random noise. The comparison of the spectra also highlights that the vibration signals in non cavitation operation of the pump are lower in amplitude and have predominantly lower frequency components. Another important observation is due: the signals of the sensor in cavitation condition are relatively richer in frequency components compared to the those in non cavitation operation. It is apparent that in the case of cavitation, the pump is filled with liquid and some vapor bubbles (compressible fluid). The rotation of blades disturbs both the liquid and vapor, due to the compressibility of the vapor bubbles, the effect of disturbance is amplified and results is evident in higher levels of vibration exciting the structure resonances of the pump. The results shown up to now and carried out by using the FFT transformation on the vibration time signals have highlighted that the frequency domain analysis method of FFT can effectively transform time domain signal, which results in less information, lower signal to noise ratio and difficult to identify and analyze into frequency domain signal for analysis in diaphragm pump vibration fault detection. Such kind of analysis by using FFT transformation is not valid as prediction tool for pump cavitation because it is very difficult to monitor in real time operation and or on-board any discrete frequency.

Since a proper ARMA (n, m) model should realize the lowest variance with the minimum number of parameters, the AR and MA orders reaching the lowest AIC level

					<i>Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers</i>	Лист
						21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

must be searched. In particular, the order selection is performed as follows: The ranges of the ARMA model orders to be considered are selected (e.g.  $1 \leq n \leq n_{\max}$  and  $1 \leq m \leq m_{\max}$ ); in this case  $n_{\max} = 10$   $m_{\max} = 10$ . For each order pair  $(n, m)$ , the coefficients of the ARMA model, are then estimated. Based on the selected AIC criterion, the prediction error variance is calculated for each pair. Finally, the  $(n, m)$  order pair that yields the lowest value of the selected criterion is chosen as the optimal pair. For this purpose, a Matlab <sup>TM</sup> routine is, then, in house developed in order to identify the best model order. The method has been applied to a complete time series, involving more than 800 cycles in a single operating condition (1000 rpm). Initially, by increasing both  $n$  and  $m$ , the AIC index rapidly reduces, while further increases in both orders only imply negligible improvements. The minimum AIC value is reached at the values:  $n = 4$  and  $m = 8$ , which hence represents the proper orders to be selected. Once set up, the ARMA [4,8] model is applied to all investigated operating conditions also in presence of fault condition. The noise variance values of the damage feature probability densities were used to statistically measure the amount of the deviations in the extracted damage features with respect to the healthy condition of the pump. To achieve this goal, noise variance values were calculated by using Eq. 3 for the sensor location at different damage conditions of the pump. A complete picture of the model outcomes is given at each investigated shaft speed, the cycle-by-cycle noise variance levels resulting from the processing of each individual cycle in non cavitation operation pump mode, similarly, the same behavior in non conventional operation (cavitation condition). Due to the presence of background fluctuations at high speeds, a linearly increasing acceleration level is seen. Its slope at different speeds cannot be fully rigorous and mainly comes out from the analysis of some individual cycles exhibiting high noise variance peaks.

Cycle-by-cycle noise variance for all investigated engine speeds shows no cavitation which excites the vibrating structure. Although a certain amount of noise is to be expected from such kind of pump, unusually high noise levels (in excess of 120

					<i>Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers</i>	Лист
						22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

dB) or particularly high frequencies can be an early indicator of potential mechanical failures or vibration problems in pumps. The occurrence of significant noise levels indicates that sufficient energy exists to be a potential cause of vibrations and possible damage to the pump. It is apparent that by fixing the threshold level of 120 dB as the threshold risk level for human hearing, the overall vibration level achieved in, in a nonconventional pump operation, shows a trend above the level confirming that the pump is operated in a fault condition for all the analyzed cycles and for the all considered shaft speeds. The presented results demonstrate the feasibility of applying vibration-based cavitation detection technique to the pump under investigation. The application of the time series-based ARMA model algorithm on vibration signals and the use of the noise level-vibration in dB allows using a constant threshold level in all operation condition by defining the human perception level as overall limit above which fault diagnosis of the pump can clearly be recognized. In this way, by using a nonintrusive accelerometer and by applying such time based technique on the vibrational signals avoiding the problem due to the recognition of the vibration signatures in frequency range of the pump, very accurate results in identifying possible pump damage and fault operation condition can be obtained [37].

*Conclusion and remarks:* The presented research is focused on the development of the methodology to predict cavitation in Gerotor pumps used in lubrication circuits of internal combustion engines. Cavitating and no cavitating conditions have been induced varying the diameter for the suction duct of the pump with different calibrated orifices. Without restriction, the complete absence of cavitation was demonstrated. Then, by reducing the diameter with calibrated orifices, the effects of cavitation have been detected. Comparison of the (Q, rpm) curves at the same delivery pressure has been demonstrated a clear reduction of the pump efficiency, in particular with the smaller orifice (3 mm) the flow-rate becomes almost constant with rpm. However, the reduction of the efficiency with the reduction of the inlet diameter has no effect on the torque request by the pump. The experimental characterization has allowed comparing the pressure ripple by changing the diameter

of the calibrated orifices. The amplitude of the ripples increases from the no cavitating orifice (15 mm) to the orifice of 3 mm, this is also another important effect due to cavitation.

An overall understanding of cavitation induced vibration characteristic is firstly carried out by using a FFT analysis leading to improvement of detecting and controlling cavitation in the pump under investigation. More in detail, after a deep experimental campaign by acquiring the vibration and as well as suction and discharge pressures in all investigated speeds and pump operation conditions, two kind of approach analyses, are presented. Firstly, a FFT analysis of the vibration signals is presented. The results demonstrate the difficulty in identifying cavitation presence by monitoring vibration energy and in particular in defining a proper threshold level. To this aim, a different approach is here proposed. An ARMA model is, for this purpose, properly designed to predict if pump is working in cavitation condition. The use of the ARMA mathematical implementation on such problem- has demonstrated the higher resolution achievable over the FFT technique especially with a smaller sampling rate. Of course, as in any process of stochastic mathematical procedure the order is not known a priori and has to be determined via order selection criteria. In this study, it has been shown clearly how the true order can be accurately determined in the way as larger orders are less preferable. Once, the right numbers of parameters were selected the ARMA model was then applied to the all investigated pump conditions. In particular, the noise variance values of the damage feature probability densities were used to statistically measure the amount of the deviations in the extracted damage features with respect to the healthy condition of the pump. The results, as expected, have demonstrated that the noise variance strongly depends on the shaft speeds and for this reason a non constant threshold can be selected. For this reason and to fix a priori a constant threshold level for the noise variance of the vibrational signals also in view of pump on-line monitoring, the reference vibration acceleration levels were expressed in decibel (dB)- by fixing the threshold level of 120 dB as the threshold risk level for human hearing. In this way by defining the human perception level as overall limit

					<i>Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers</i>	Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

above which fault diagnosis of the pump can clearly be recognized overcomes the problem of choosing a constant threshold limit of pump operation by monitoring on line vibration data. The presented results demonstrate the feasibility of applying vibration-based cavitation detection technique to the pump under investigation and promising results have been obtained from the experiments.

### **1.6 The development of non-invasive methods of monitoring**

Maintenance and repair of pumping units require a lot of high material costs and time. Therefore, control of vibration and parametric characteristics of pumping units in real time allows identifying defect of pumping units at an early stage. The monitoring of a rotating machine state is efficient, but often it is a difficult and labour-intensive task for maintenance crew to troubleshoot the machine and vibration analysis is a method used for monitoring the machine state.

Measured signals are usually fed into filters or signal decomposers to extract useful features to assist making identification in state monitoring or fault diagnosis. However, what is routinely ignored is that an experienced expert can realize what is happening just by watching the signals presented on the oscilloscope even without- the analyzing report. Vibration-based condition monitoring is an important approach to ensure the reliability of industrial machines. Semi-supervised vibration-based classification and condition monitoring of the reciprocating compressors installed in refrigeration appliances was proposed in paper. The use of wireless sensor networks (WSN) for monitoring of rotating machinery is constantly growing. A process monitoring system which is integrated with virtual machining for a more accurate diagnosis of machining operation without the need for test machining was proposed in article [38].

On-shaft vibration (OSV) measurement has been proposed in study using a tiny Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) accelerometer with a wireless node for the data transmission to the computer and the approach was expected to reduce the number of sensors used currently and may also contain enriched vibration information

about the shaft which may ease the fault diagnosis process. The research presented an approach for machine vibration analysis and health monitoring combining blind source separation (BSS) and change detection in source signals where the problem is transferred from the original space of the measurements to the space of independent sources, which leads to the reduced number of components is going to simplify the monitoring problem while the change detection methods are going to be applied for scalar signals. A large vibration data set makes the diagnosis process complex generally for a large rotating machine supported through a number of bearing pedestals. The Doppler-frequency shift of a laser beam was used in the research to monitor flexural and torsional vibration of the main axle in a numerically controlled machining tool. Development of a system for machine condition monitoring system requires reliable machining data that can reflect machining processes. The research describes an automatic feature construction method which can reveal the inherent relationship between the input vibration signals and the output machining states, including idling moving, stable cutting and chatter, using a reasonable and mathematical way. Since the analyzing of the vibration signals could be highly tedious and nonlinear task, the soft computing method (ANFIS – Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) is applied. The soft computing methodology is based on the acquired input/output data pairs. Therefore, there is no need to know internal knowledge of the system behavior. The basic design idea is to create a measurement and data collection system for vibration monitoring in which the data analyses and decision-making are based on soft computing method. Hydrostatic vibrations of centrifugal pumps are the result of vortex arisen in liquid stream, flow heterogeneousness, turbulent pulsation of speed and pressure, and cavitation phenomenon. Vortexes are generated during the liquid run through circulation channels because of stream segregation from channel surface, hydrodynamic trail and liquid loss through gaps and sealants. Unstable flows with relative high gradation of pressure are noticed at a point where vortexes segregate from streamed object's surface. Intensity of vibrations, caused by vortex sources, is proportional to the sixth grade of stream line peripheral speed. In numerous cases at

					<i>Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers</i>	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

centrifugal pumps, turbulent pulsations are also generated together with vortices. Their mutual activity causes vibrations of pump walls. Field of speed and pressure of liquid flow after the stream line is heterogeneous and non-stationary, causing the pulsation of flow hydrodynamic force on impeller and volute tongue. There are also pulsations- of flow hydrodynamic force because of flow heterogeneousness after entry directional apparatus. Vibrations generated flow heterogeneousness can be avoided by proper selection of radial gap between impeller blade and volute tongue. At centrifugal pumps the flow heterogeneousness produces the highest level of vibrations after the impeller, with its frequency being equal to the BPF. The intensity of these vibrations is proportional to the sixth grade of stream line peripheral speed and does not depend on a pump and casing construction [38-39].

					<i>Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

## 2. Классификация дефектов центробежных насосных агрегатов (ЦНА).

Большую часть машинного оборудования различных предприятий составляют ЦНА, которые различаются разнообразием конструктивного исполнения и технических характеристик, которые служат для перекачивания нефтепродуктов [1].

Предотказное состояние может возникнуть как в результате внутренних процессов, так и внешних воздействий на объект в процессе его функционирования [3]. Аварийная остановка ЦНА всегда связана с разрушением элементов машин. Для повышения надёжности работы необходимо контролировать действующие силы и оценивать техническое состояние. Надёжность – это свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [3].

Диагностика есть отрасль знаний, включающая в себя теорию и методы организации процессов диагноза, а также принципы построения средств диагноза. Когда объектами диагноза являются объекты технической природы, говорят о технической диагностике.

Вибрационная диагностика – техническая диагностика, основанная на анализе вибрации объекта диагностирования [2].

Для снижения действующих сил необходимо выявить причины их роста, необходим анализ работы машин, основой которого является определение зависимости действующих сил от технического состояния ЦНА. Конструктивным элементом ЦНА, взаимодействующим и передающим потоку энергию, является вал ЦНА с рабочим колесом. Поэтому техническое

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Радченко Д.В.			Классификация дефектов центробежных насосных агрегатов (ЦНА).	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Рудаченко А.В.					28	165
Консульт.						НИ ТПУ гр. 2БМ6А		
Рук-ль ООП		Бурков П.В.						

состояние вала и рабочего колеса в основном определяет соответствие ЦНА предъявленным требованиям. Валопровод является конструкционным элементом ЦНА и представляет собой сложную техническую систему, в которую входит (вал с рабочим колесом, подшипники, подшипниковые стойки, вал электродвигателя и соединительная муфта), данные составляющие влияют на надёжность и долговечность его работы.

Рабочее колесо непосредственно действует на поток, так же как и масса, скорость и давление потока оказывает воздействие на рабочее колесо и весь валопровод ЦНА. Поэтому изменение технических параметров ЦНА оказывает влияние на гидрогазодинамические и механические процессы работы ЦНА. В данной главе рассмотрены дефекты, возникающие при работе ЦНА. Большая часть ЦНА работает в различных агрессивных и высококоррозионных средах, а также при высоких температурах. Кроме того, значительно влияет собственная вибрация насоса и вибрация трубопроводов обвязки, которая возникает при перекачке различных нефтепродуктов. Она отрицательно сказывается на техническом состоянии ЦНА, увеличивая вероятность возникновения дефектов [5].

Следует отметить, что процесс диагностирования и прогнозирования изменения технического состояния центробежных насосных агрегатов, связан с распознаванием неисправностей, приводящих к постепенным отказам. Время развития неисправностей до критического уровня достаточно для прогнозирования момента отказа ЦНА. Разделение отказов на постепенные и внезапные в определённой степени условно, так как любому скачкообразному изменению параметров (характеризует внезапный отказ) предшествует процесс постепенного изменения определяющих параметров, формирующих диапазон неисправностей.

Вопрос состоит в том, что метрологические характеристики средств измерения не обеспечивают достаточной чувствительности для выявления

					Объект и методы исследования	Лист
						29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

такого рода процессов. В ряде случаев затруднения дополнительно связаны с недостаточным изучением процессов развития неисправностей, приводящих к отказам. В таблице 2.1 представлены основные неисправности центробежных насосных агрегатов и методы их диагностирования [9].

Таблица 2.1

Основные неисправности ЦНА и методы их диагностирования

Неисправность	Диагностические параметры	Метод диагностирования
Разрушение лопаток	Шум и вибрация, падение частоты вращения вала, рост температуры продуктов сгорания, падение давления	Виброакустический, термогазодинамический
Усталостные трещины	Распределение напряжения по лопаткам, амплитуда и частота колебаний, параметры вибрации и шума.	Бесконтактное измерение колебаний лопаток, виброакустический
Потеря напряжения между antivибрационными полками лопаток	Зазор между лопатками и статором, вибрация и шум, пульсации давления	Виброакустический, термогазодинамический
Эрозионный износ лопаток, Занос проточной части	КПД, расход топлива, воздуха степень сжатия	Термогазодинамический, бесконтактное измерение зазора
Термические усталостные трещины, деформация, коробление, прогар, растрескивание	Шум и вибрация, повышение температуры продуктов	Виброакустический, пирометрический, термогазодинамический
Нагарообразование, и как следствие возбуждение резонансных колебаний лопаток турбины	Шум и вибрация, повышение температуры продуктов	Виброакустический, термогазодинамический
Износ сопрягаемых деталей, следы фриттинга	Параметры шума и вибрации, Перепад температур	Виброакустический, термогазодинамический
Перегрев материала диска	Неравномерное поле температур	Виброакустический, термогазодинамический
Трещины в пазах диска	Параметры вибрации	Вибрационный
Разрушение лопаток	В момент разрушения параметры шума и вибрации, при дальнейшей работе изменение амплитуды и частоты вращения рабочего колеса, рост потребления энергии	Виброакустический, бесконтактное измерение колебаний лопаток, термогазодинамический
Вытяжка лопаток	Надиры на корпусе, зазор между торцом лопатки и корпусом, параметры шума и вибрации, выбег ротора, повышение температуры продуктов перекачки	Виброакустический, термогазодинамический

Обгорание лопаток	Неравномерность температурного поля перед ЦНА, повышенная температура продуктов перекачки	Термогазодинамический
Резонансные колебания лопаток	Амплитуда и частота колебаний, температурное поле перед установкой	Бесконтактное измерение колебаний лопаток, термогазодинамический
Усталостные и термические трещины лопаток	Амплитуда и фаза колебаний	Виброакустический
Перегрев лопаток	Температурное поле перед ЦНА	Термогазодинамический
Износ дорожек качения подшипника, разрыв сепаратора, усталостные выкашивания, проскальзывание	Вибрация и шум, повышенная температура корпуса подшипника, температура масла на выходе из опоры, выбег ротора, радиальный зазор между лопатками и корпусом, Химические и физические параметры масла	Виброакустический, термометрирование, спектральный анализ масла, температура опор подшипников
Износ подшипника скольжения, разрушение, отслаивание баббита, электроэрозия	Вибрация и шум, температура баббита, температура масла на выходе из опоры, частицы в масле, радиальный зазор между лопатками и корпусом ЦНА, радиальный зазор в подшипнике	Виброакустический, термометрирование, спектральный анализ масла, температура опор подшипников

## 2.1 Возникновение вибрации при неисправности крепления агрегатов на фундаменте.

Проблемы диагностики технического состояния фундаментов, на которых устанавливают центробежные насосные агрегаты, необходимо решать специалистам служб по вибрационной диагностике. Причина этого заключается в том, что чаще всего состояние фундаментов определяет вибрацию центробежного насосного оборудования [5]. Из-за неплотного прилегания лап или стояков ЦНА к фундаменту или раме, появления трещин, ослабления крепления, разрыва анкерных болтов происходит уменьшение жёсткости установок, и потеря общих масс, которые колеблются с рамой. При необходимой жесткости системы (фундамента, рамы на которую крепится ЦНА и самого центробежного агрегата), вибрация крышек подшипников в 5-7 раз выше

					Объект и методы исследования	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

вибрации рамы вблизи анкерных болтов. Если жесткость системы нарушается, то соотношение вибрации уменьшается, происходит скачкообразное изменение вибрации в месте где нарушена жесткость. Так, если вибрация на одной из лап подшипниковой опоры составляет 10 мм/с, а на раме 5 мм/с и меньше, то можно сделать вывод, что лапа плохо прикреплена к раме. При резком изменении вибрации в 2 раза и выше в локальной точке системы, то это связано с плохой жесткостью крепления.

Чаще всего плохая жесткость крепления рамы к фундаменту из-за разрушения бетона в период эксплуатации, некачественной подливки бетона, коробления рамы или фундаментной плиты, ослабления анкерного болта от фундамента. Если вибрация на раме рядом с анкером составляет 5 мм/с и на анкере вибрация тоже 5 мм/с, то на бетоне вибрация 0,7-0,9 мм/с, можно предположить, что анкер плохо залит в фундамент. При увеличении вибрации снижается КПД центробежных насосных агрегатов.

Фундаменты включая колодцы для фундаментных болтов, при приёмке под монтаж должны быть полностью освобождены от опалубки и тщательно очищены от остатков бетона, строительного мусора. В процессе приёма фундаментов под монтаж результаты фактических замеров всех осевых и привязочных размеров и отметок фундаментов заносятся в формуляр фундамента. Отклонения указанных размеров и отметок от проектных не должны превышать (в мм) [6]:

- смещение вертикальной оси фундамента под электродвигатель относительно вертикальной оси фундамента под насос – не более 10;
- основным размерам в плане не больше 20;
- основным размерам в плане не более 30;
- высотным отметкам поверхности фундамента (без учёта высоты подливки бетонного раствора) не менее 30;
- по размерам уступов в плене не менее 20;

					Объект и методы исследования	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- размерам колодцев не более 20;
- отметки уступов в выемках и колодцах не менее 20
- по осям колодце для фундаментных болтов не менее 5.

Силы, действующие со стороны центробежных насосных агрегатов на фундамент в стационарном рабочем режиме, известны весьма ориентировочно, и расчёт колебаний фундамента носит оценочный характер. Расчёт динамических податливостей под действием единичных гармоничных сил, приложенных к поперечным стержням (ригелям) верхнего пояса системы, где в подшипниковых узлах установлены подшипники, и к продольным стержням (балки), на которых закреплены лапы статора. Такие динамические податливости являются наиболее точной характеристикой динамических свойств фундаментов, при дальнейшей оценке его пригодности для установки ЦНА [7].

При плохом контакте стойки подшипникового узла с рамой вблизи от центра возрастают вертикальные колебания, так как вместо нормальной деформации стойки от сжимающих сил возникает изгибающее напряжение. Если стойки подшипника не плотно прилегают к раме, то в этом случае ослабляется жесткость установки, в зависимости от этого возрастает горизонтальная вибрация [8].

К фундаментам ЦНА предъявляют жёсткие требования. Это связано с большими динамическими нагрузками на сам фундамент при работающем ЦНА с частотой вращения ротора 3000 об/мин и более. Так как при смещении ротора на сотые доли миллиметра вызывает усиленное биение с последующей остановкой на ремонт.

## **2.2 Классификация дефектов рабочего колеса центробежных насосных агрегатов.**

Возникновение отказов чаще всего связано с первичной неисправностью конструктивного или эксплуатационного характера. Уменьшить множество

					Объект и методы исследования	Лист
						33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

отказов можно путём создания системы контроля и диагностики технического состояния ЦНА на ранней стадии зарождения дефекта. Наиболее частыми дефектами рабочего колеса являются кавитационно-коррозионные разрушения, истирание твёрдыми наносами, трещины. Рабочее колесо не должно иметь люфты в механизмах поворота лопастей [9].

В случае люфта лопасти при разборке рабочего колеса, ее находят и устраняют причину возникновения люфта. Не допускают протечек масла в уплотнениях цапф лопастей колёс и по прокладке между втулкой и обтекателями. Если каверны от кавитационно-коррозионных разрушений и от истирания взвесью на лопастях, втулке и обтекателе не глубже (1-2 мм), то только производят зачистку места повреждения наждачным камнем и шлифовкой. Перед заваркой глубокой каверны ее поверхность вырубается до неповреждённого металла, трещины высверливают по краям и разделяют края зубилом зля сваривания. После наплавки металла поверхность должна быть тщательно отполирована заподлицо со старой поверхностью. В случае наплавки большого количества металла рабочее колесо должно быть тщательно отбалансировано. Если центр масс не совпадает с осью вращения появляется вибрация, которая приведёт к преждевременному выходу из строя. Дисбаланс и вибрация колеса приводит к преждевременному отказу подшипников и других деталей центробежных насосных агрегатов. Неуравновешенность может быть следствием неоднородности материала из которого изготовлена деталь, погрешность заготовки, имеющей чёрные необработанные поверхности, погрешности механической обработки, погрешность сборки узлов из-за перекоса или излома деталей, гидравлического дисбаланса, как следствия разных профилей лопастей, неточности узлов установки в одном колесе, скоса неравномерного потока, поступающей из всасывающего пространства на лопасти рабочего колеса.

При ремонте неуравновешенность является следствием неравномерной наплавки металла, в результате чего центр тяжести колеса сместится

					Объект и методы исследования	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

относительно оси вращения. Различают статистическую и динамическую балансировки. Обычно колесо подвергают статистической балансировке, так как высота колеса меньше его диаметра. Если частота вращения колеса выше 1000 оборотов в минуту, то его подвергают динамической балансировке [6].

Статистически можно балансировать или на оправке, когда ось рабочего колеса горизонтальна, или на шаре, если ось вертикальна. Для балансировки на оправке в горизонтальном положении необходимо иметь параллельные брусья. Во избежание смятия оправки при установке на параллельных брусьях оправку изготавливают из высокоуглеродистой закалённой стали, а поверхность ее шлифуют под диаметр расточки рабочего колеса. Параллельные брусья устанавливают на строганую плиту. Верхняя поверхность плиты должна быть строго горизонтальна, что проверяют по уровню в нескольких местах по взаимно перпендикулярных направлениях. Чугунные стойки двух параллельных брусьев устанавливают на таком расстоянии, чтобы между ними свободно проходило рабочее колесо, и прикрепляют к плите болтами. На стойках и закрепляют две линейки из закалённой стали. После установки и закрепления всего приспособления проверяют по уровню горизонтальность верхней поверхности линеек. При наличии уклона между линейками и стойками или между стойками и плитой ставят прокладки из листового железа. Верхние рабочие кромки линеек для повышения точности балансировки делают по возможности узкими, но так, чтобы при установке оправки не оставались вмятины.

Для балансировки на линейки устанавливают оправку с закреплённым рабочим колесом. Рабочее колесо будет вращаться на линейках пока его наиболее тяжёлая сторона не займёт нижнее положение. Для уравнивания с диаметрально противоположной стороны устанавливают груз так, чтобы рабочее колесо в любом случае оставалось в покое. Находят величину груза и его местоположение, Вращая колесо с оправкой на параллельных брусьях и проверяя его уравновешенность. После этого колесо снимают с оправки, снимают груз и взвешивают его. В соответствии с тяжёлой стороны снимают

					Объект и методы исследования	Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

лишнюю массу или на лёгкой стороне прикрепляют соответствующий груз. Для снятия массы можно применить шлифовальную машинку. При добавлении груза его крепят к внутренней поверхности втулки рабочего колеса.

При балансировке рабочего колеса на шаре в вертикальном положении требуется оправка с шаром из закалённой стали, которую устанавливают во внутреннюю расточку втулки рабочего колеса. Опора шара при балансировке должна быть выше центра тяжести рабочего колеса, иначе оно будет иметь неустойчивое положение. На горизонтальной плите устанавливают стойку с закреплённой на ней стальной закалённой пластиной. Верхняя поверхность пластины должна быть строго горизонтальна, что проверяют при помощи уровня. При правильном уравнивании при отсутствии дебаланса ось рабочего колеса должна быть вертикальна при любом положении колеса.

Вертикальность оси проверяют при помощи стойки с иглой или с индикаторной головкой. Стойку передвигают по плите около неподвижного колеса, установив иглу и стержень индикатора так, чтобы они касались обода. Можно установить стойку неподвижно и поворачивать колесо вокруг оси. Проверку производят лишь после того, как прекратятся колебания, вызванные поворотом колеса. По расстоянию (просвету) между иглой стойки и плоскостью обода в разных точках определяют местоположение уравнивающего дебаланс груза [6].

### **2.3 Классификация дефектов подшипников центробежных насосных агрегатов.**

Основными признаками работоспособности подшипников, характеризующими изменение их динамических параметров, которые постепенно приводят к установленному выкрашиванию, повышенному износу, поломкам деталей, являются изменения момента сопротивления вращению, уровня вибрации, характера электрического сопротивления гидродинамической масляной плёнки в динамике [15].

					Объект и методы исследования	Лист
						36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Работоспособность изменяется из-за нарушения контактной выносливости, износостойкости и общей прочности. Из-за нарушения износостойкости, контактной выносливости и общей прочности происходит изменение геометрических размеров деталей, появляется волнистость гранность беговых дорожек подшипников, увеличивается разноразмерность тел качения, возрастает биение колец. Изменение состояния подшипников в общем случае влечёт за собой структурные изменения материала поверхностей качения, изменения геометрии деталей и влечёт за собой ухудшение качества качения. Перечисленные изменения характеризуют степень ухудшения работоспособности подшипниковых узлов по мере сопротивляемости контактными нагрузкам [26].

Оценку работоспособности можно дать при определении:

1. структурных параметров путём испытания твёрдости и микротвёрдости материала, электрографическими исследованиями, токовихревой проверкой или металлографическим анализом;
2. по геометрическим параметрам, установив зазоры, измерения разноразмерности тел качения, отклонения от геометрических форм;
3. физические параметры, установив момент сопротивления вращению, уровень шумов, уровень вибрации, изменение гидродинамической масляной плёнки. Физические параметры принимают как основные при определении работоспособности подшипниковых узлов без разборки.

*В подшипниках существует трение при качении.* Возникающее трение обусловлено многими факторами, но главный из них это трение, так же на трение подшипников влияет износ и тепловой режим работы подшипника в подшипниковом узле.

*Дифференциальное проскальзывание.* При качении шарика по кольцу с радиусом кривизны  $R$  в плоскости, плоскость перпендикулярна к направлению

					Объект и методы исследования	Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

качения. При этом «чистое» качение будет только на двух линиях, расположенных на эллипсе контакта шарика и двумя желобами будет проскальзывать из-за неодинакового расстояния точек контакта от осей вращения. Момент сил сопротивления, обусловленный дифференциальным проскальзыванием тел качения на площадках контакта.

*Упругий гистерезис в материале контактирующих тел.* Вызываемые энергетические потери при упругом гистерезисе в материале подшипника, можно определить, допуская, что на протяжении цикла нагружений тратится кинетическая энергия. Чаще всего встречается в подшипниках с низким количеством оборотов (низкоскоростные подшипники). Но при работе с подшипниками с высокими скоростями появляются большие центробежные силы, которые создают дополнительные напряжения.

*Геометрические погрешности и действие микрогеометрии контактирующих поверхностей.* Основная причина возникновения изменения момента сопротивления вращению является погрешности геометрической формы деталей, подшипников (гранность колец и шариков, овальность, шероховатость в виде микронеровности).

*Момент, вызванный действием сепаратора.* Внутреннее кольцо подшипника вращается вокруг вертикальной оси и сепаратор под действием собственной массы соприкасается с шариком подшипника в одной точке, при этом вызывается момент сопротивления тел качения с гнездами сепаратора.

*Момент сопротивления, обусловленный сдвигом и сбросом смазки.* Наличие смазки вызывает в подшипнике дополнительные потери энергии, из-за вязкости масла, находящегося между телами качения. Изменяются его физические характеристики, а именно давление, относительная скорость потока смазки, тепловой режим, и конструктивные особенности подшипника. Создаваемая в подшипнике масляная прослойка предотвращает контакт тел

					Объект и методы исследования	Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

качения (уменьшается износ и напряжение металла в месте контакта) и увеличивается площадь соприкосновения.

*Момент сопротивления, при увеличении температуры.* В какой-то степени и температура влияет на момент сопротивления вращению. При увеличении температуры до 100-120° С момент сопротивления качению уменьшается, из-за уменьшения вязкости смазки. При увеличении температуры более 120-140° С увеличивается постоянная составляющая момента сопротивления вращению при изменении геометрических размеров отдельных деталей подшипникового узла [10].

При окончании ремонта подшипников до установки на место их проверяют по находящемуся в горизонтальном положении валу, чтобы определить действительные зазоры и степень касания расточкой вкладыша шейки вала. Подшипники соединяют на валу и, поворачивая его замеряют снизу в четырёх положениях диаметральный зазор по всей длине вкладыша. Если зазоры между валом и вкладышем больше чем на 20% отличаются от проектных, то подшипник исправляют шабрением лигнофоля или установкой прокладок под планки [6].

#### **2.4 Классификация дефектов валов насоса и электродвигателя центробежных насосных агрегатов.**

На валах обычно обнаруживают следующие дефекты, которые устраняют в период ремонта: выработку центрирующих выступов; повышенное торцевое биение фланцев вала; несоосность шеек и центровочных заточек; выработку или отслоение слоя нержавеющей стали на шейках валов; прогиб вала [25].

Центрирующий выступ в валу должен плотно входить в заточку сопрягаемого вала; если выступ входит в заточку слабо (с зазором более 0,1 мм), то необходимо либо уменьшить диаметр заточки, или увеличить диаметр выступа. Существует два способа восстановления посадочного сопряжения. Если сработка по диаметру достигает 0,1–0,2 мм, то сопряжение восстанавливают ударами в торец выточки с последующей проточкой вала на

					Объект и методы исследования	Лист
						39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

станке. При больших зазорах восстанавливают посадочное сопряжение наплавкой буртика или выточки с преследующей проточкой. Для этого наплавляемую поверхность предварительно протачивают, чтобы толщина наплавленного металла после проточки была не более 2 мм. Перед проточкой вал тщательно выверяют на станке по шейкам и центрирующим заточкам. Повышенное торцевое биение исправляют на станке. В таких случаях рекомендуется одновременно протачивать шейки вала, центрирующие буртики или впадины, торцы фланца, где биение не допускается более 0,02 мм. Если биение незначительное, а при проверке обнаружен излом линии валов, то торцевую поверхность рекомендуется шабрить. Качество шабрения проверяют по плите [6].

Технология шабрения следующая. Производят центровку вала насоса с валом электродвигателя. Предварительно с помощью латунных прокладок между фланцем валов электродвигателя и насоса определяют толщину снижаемого слоя на торце вала, для чего используют геометрически подобные треугольники. Далее ослабляют болты фланцевого соединения, выпускают прокладки и измеряют их микрометром наибольшую их суммарную толщину. Центр положения прокладок наносят керном на цилиндрической поверхности вала. Точку центра прокладок переносят на 180° по окружности фланца. Рассоединяют болты фланцевого соединения, опускают ротор насоса на подставку под верхний фланец вала на величину 200 мм. В точке, находящейся на 180° от центра ранее установленных прокладок, на плоскости фланца вала насоса перпендикулярно к плоскости биения наносят равномерную отстоящие одна от другой параллельные линии, вдоль которых вышабривают маяки такой глубины, при которой их вершины будут лежать в одной плоскости, образующей в мете первоначальной нешлифовкой, подлежащей снятию поверхностью клин [6].

Глубину маяков проверяют индикатором. После нанесения маяков поверхность диска шлифуют на клин, ориентируясь на эти маяки. В результате

					Объект и методы исследования	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

должна получиться плоскость, проходящая через вершины маяков. При этом контроль осуществляют проверочной линейкой и проверочной плитой по краске. Учитывая, что шебер снимает стружку толщиной 0,002–0,005 мм, припуск на шепрение при этом оставляют небольшим, порядка 0,1–0,2 мм. Поэтому, если надо снять слой толщиной 0,2–0,3 мм, рекомендуется предварительно машинкой И–54А или напильником снимать грубо клин на плоскости фланца выхода на маяки. С помощью проверочной плиты окончательно прошабривают поверхность.

Дальнейшие работы проводят согласно заводской инструкции по монтажу насоса. После соединения валов, если биения на шейках насоса будет выходить за пределы, указанные в инструкции, шабрение повторяют.

В случае незначительной выработки валов шейки зашлифовывают. При значительной выработке шейки протачивают до полного устранения повреждения. Новые шейки вала восстанавливают электронаплавкой нержавеющей электродами или устанавливают «рубашку» из листов нержавеющей стали [20].

Технология наплавления нержавеющей электродами следующая. Наплавку производят нержавеющей электродами типа ЭА-92 марки А-5 или ОЗЛ-6. Перед наплавкой вал очищают от пыли и грязи, устанавливают на станок и обрабатывают шейки под наварку. Шейки обрабатывают на размер меньший на 2 мм диаметра вала. При этом биение вала не должно быть выше 0,3 мм на сторону. Наплавляют в среде углекислого газа при давлении 0,5 кгс/см<sup>2</sup> и подаче его через отверстие диаметром 2мм. Напряжение дуги при этом 24–26 В. Проволока подаётся со скоростью 172 м/ч при подаче электрода 5,6 мм/об. Частоту вращения вала выбирают в зависимости от его диаметра. После наплавки первого слоя поверхность очищают от крупных брызг (диаметром больше 4 мм) при помощи зубила и молотка. Второй слой наплавляют с соблюдением тех же режимов [11].

					Объект и методы исследования	Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

При наплавке обращают внимание на угол наклона электрода к оси вала, который по фронтальной проекции должен быть 10–15°. Толщина наплавленного слоя должна быть в пределах 2,5 – 3,0 мм. Чешуйчатость наплавленной поверхности должна быть не более 0,5 мм. Раковины, поры и наплавы не допускаются.

В условиях эксплуатации на изношенные валы устанавливают рубашки из листов нержавеющей стали, состоящие из двух половин. Толщина рубашек 15 мм. Размечают четыре половины рубашек в размер. Размечают плоскость разъема под строжку, строгают плоскости разъёма или фрезеруют их. После этого, прихватив две половины на планки, устанавливают их на станок. Выверяют по разъёму и внутреннему диаметру, подрезают торцы на токарном станке в размер, растачивают внутренний диаметр рубашки согласно диаметру шейки по классу и посадке. Сверлят отверстия в рубашке диаметром 10–12 мм под электрозаклёпки через каждые 100 мм в шахматном порядке. Срубуют планки с рубашками.

Устанавливают вал в центры и протачивают шейки под рубашки в размер. Устанавливают рубашки на проточные места и прихватывают. Плотность прилегания рубашки к валу проверяют по звуку при лёгком постукивании молотком. Приваривают рубашки к валу, при этом варят только на постоянном токе при обратной полярности. Каждый проход зачищается от шлака. После электронаплавки на шейках вала или установки рубашек вал протачивают на токарном станке. Чистовую обработку рубашек по наружной поверхности производят совместно с чистовой обработкой всего вала. Во избежание попадания воды в небольшие зазоры между рубашкой и валом насоса торцы рубашки тщательно зачеканивают. Если вал однофланцевый, то целесообразно установить цельную втулку из нержавеющей стали. Насаживают втулки на горячую [6].

					Объект и методы исследования	Лист
						42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Несколько сложнее исправление прогиба вала. Для этой цели применяют термический способ правки валов местным нагревом или наплавкой электрошва, либо механический способ чеканкой. При правке валов местным нагревом необходимо интенсивно нагревать определённый небольшой выпуклый участок вала до высокой температуры, но ниже чем температура нижней критической точки. После остывания волокна металла укорачиваются на выпуклой стороне вала и последний выправляется. Данный способ применяют при правке валов из сталей, имеющих предел текучести ниже  $30 \text{ кгс/мм}^2$  и слабо воспринимающих закалку. Вал свободно укладывается выпуклой стороной (горбом) кверху. Участок максимального нагрева изолируют размоченными в воде кусочками асбеста по всей периферии с оставлением окна, свободного от асбеста, в самой верхней точке вала. Для предохранения от сползания, асбест приматывают проволокой [6].

Правку вала механическим путём проводят в холодном состоянии с чеканкой в местах наибольшего прогиба. Сущность ее заключается том, чтобы растянуть сжатые волокна вала. Последний кладут так, чтобы увеличить растягивающие напряжения, и производят чеканку по вогнутой стороне. При чеканке сжатые волокна растягиваются по направлению к концам вала, удлиняются и вал выпрямляется. При окончании чеканки и выправления вал отжигают. После отжига обычно возникает небольшой изгиб вала, поэтому производят повторную чеканку.

## 2.5 Проверка вертикальности облей линии валов ЦНА.

Общую линию валов проверяют на отсутствие излома на вертикальность. Сначала следует производить проверку отсутствия излома. Для этого на верхний торец вала электродвигателя устанавливают приспособление в виде крестовины, при помощи которого вращают ротор агрегата тросом или краном [27].

В одной вертикальной плоскости по всей длине ротора устанавливают три индикатора: два  $I_2$  и  $I_3$  у шеек подшипников и один  $I_1$  под установленным верхним

					Объект и методы исследования	Лист
						43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

подшипником для определения сдвига ротора по пяте (вследствие зазоров у этого подшипника). Действительное и радиальное биение определяют вычитаний показаний индикатора  $I_1$  из показателей индикаторов  $I_2$  и  $I_3$  при последовательном повороте ротора агрегата на 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 и 360° (восемь точек). Радиальное биение не должно превышать 0,03 мм. Контроль правильности показаний индикаторов производят по показаниям их в первоначальной точке установки 0°.

По результатам замеров строят графики для определения характера биения вала на шейках подшипников. По характеру кривой за один оборот определяют величину биения. Устранение излома осевой линии валов производят перетяжкой болтов фланцевого соединения вал электродвигателя – верхний фланец вала – проставок (если величина излома невелика) или шабрением стыкующихся поверхностей этих фланцев (если величина излома значительна). Параллельное смещение валов ликвидируют опиловкой центрирующего буртика вала на нужную величину и смещением валов по плоскости фланцев.

Вертикальность валов проверяют методом четырёх струн. К верхнему фланцу вала крепят специальную крестовину. С крестовины опускают попарно четыре струны в двух взаимно перпендикулярных плоскостях с грузами на концах. Для удобства ориентации следует принимать плоскости, совпадающие с продольной осью  $X$  канала и поперечной осью  $Y$  стенок канала. С целью уменьшения времени колебания струн грузы погружают в вязкую жидкость (масло), Налитую в ведро. Струны должны быть изолированы от вала резиной или другим изоляционным материалом.

Для струн используют специальную проволоку (колиброванную) без сгибов и узлов диаметром 0,3–0,5 мм. Вес груза  $P$  выбирают расчётом максимально возможного натяжения струны. Точка подвеса груза должна лежать в плоскости симметрии груза. При отсутствии крестовины струны можно крепить к отверстиям в верхнем фланце. В данном случае струны также должны быть надёжно изолированы от вала. Струны соединяют через электролампу или

					Объект и методы исследования	Лист
						44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

чувствительный гальванометр с одним полюсом батареи. Второй полюс соединяют с валом. При одновременном касании микроштихмасом струны и вала электрическая цепь замыкается и стрелка гальванометра отклоняется. Поворачивая разводную головку микроштихмаса, добиваются такого положения, при котором поворот головки на 0,02 мм размыкает и замыкает ток в цепи гальванометра. Это показание и является расстоянием вала от струны с точностью до 0,02 мм. Более высокая точность измерения достигается при наличии в цепи миллиамперметра. При отсутствии гальванометра и миллиамперметра в цепь включают электрическую лампочку, звонок или телефонную трубку. Точность измерения при этом уменьшается.

Для удобства замеров один из концов микроштихмаса ввёртывают в гайку, приваренную к гребню угольника с размером угольника 50x50 или 80x80 мм и длиной 50–60 мм. Плоскость прилегания угольника к валу шабрится на плите. Для более правильной установки микроштихмаса с угольником на вал надевают специальных хомутов в плоскостях замеров, а угольник устанавливают так, чтобы он опирался на верхний торец хомута и прижимается к валу. Хомуты следует устанавливать как можно ближе к фланцам вала. Так как при изготовлении угольника трудно добиться строгой перпендикулярности его опорной плоскости к оси микроштихмаса, то при замере угольник держат одной стороной вверх и наносят на нём ясное клеймение.

Струны не обязательно подвешивать на одинаковом расстоянии от вала, так как разность диаметров вала в плоскостях замера не имеет значения, так же, как и абсолютные значения расстояния вала до струн. Записывают только показания по разводной головке микроштихмаса при обязательном условии, чтобы замеры в одной плоскости (горизонтальном сечении) были в пределах развода головки без смены наборных звеньев штихмаса.

Для определения направления валов по координатам основных осей замеров строится схема векторов с учётом разности направлений и величины уклонов вала электродвигателя и вала насоса. Все замеры при выверке

					Объект и методы исследования	Лист
						45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

вертикальной общей линии спаренных валов производят на свободновисящем роторе агрегата, и при этом ротор не касается неподвижных деталей корпуса. Кроме метода выверки вертикальности валов по четырём струнам-отвесам, существует метод выверки по уровню путём сравнения его показаний при следующих условиях. Последовательно на вал насоса выше нижней шейки под подшипник устанавливают приспособление для установки уровня. Положение площадки в горизонтальной плоскости регулируется и фиксируется установочными винтами. При выверке, изменяя положение площадки, выводят установленный уровень в среднее положение. Не меняя положения уровня, поворачивают свободно висящий ротор агрегата на опорной пяте на  $180^\circ$  и по сравнению показаний уровня устанавливают вертикальное положение вала в обеих перпендикулярных плоскостях путём поджатия сегментов или установкой всего электродвигателя в сборе.

Указанная выверка первоначально осуществляется при регулировании поджатия сегментов опорной пяты электродвигателя, а затем при выверке вертикальности всей линии валов. Для ускорения проведения указанной операции устанавливают два уровня на приспособление, имеющее две площадки. Уровни располагают в радиальном направлении под углом  $90^\circ$ . В этом случае выверка и установка вертикальности проводится сразу в двух перпендикулярных плоскостях [18].

					Объект и методы исследования	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

### 3. Виброизмерительное портативное устройство АДП-3101

#### 3.1 Описание прибора АДП-3101

Прибор предназначен для использования персоналом, обслуживающим энерго-механическое оборудование, проводящим виброналадку и исследование вибрации машин и механизмов. Прибор предназначен для измерения параметров низковольтных сигналов, поэтому попадание на его виброизмерительные входы повышенного напряжения (более 10 В) может привести к повреждению входных цепей. АДП-3101 не предназначен для подключения к высоковольтным источникам питающего напряжения. Не следует подключать прибор к источникам напряжения выше 220В. Для проведения измерений к прибору АДП-3101 можно подключать серийно выпускаемые пьезоакселерометры (высокоимпедансные, с встроенными усилителями заряда, симметричные) общего и промышленного исполнения, датчик оборотов (фазоотметчик), датчики или устройства переменного напряжения до 10 В СКЗ, устройства с плавно меняющимися (постоянными) сигналами на выходе. С прибором также применяется датчик оборотов ДО-01 (ДО.2001М.001ЧТУ), выполненный во взрывозащищенном исполнении и имеющий маркировку по взрывозащите "1ExibIIAT6" [23].

При использовании прибора АДП-3101 для диагностики не требуется применения компьютеров и других измерительных приборов, т.к. все диагностические программы хранятся в памяти самого прибора.

Технические характеристики виброизмерительного прибора АДП-3101:

1. Рабочий диапазон виброизмерительного прибора АДП-3101 при измерении вибрации (используемые каналы для снятия вибрации 1, 2), для переменного напряжения (каналы 1 и 2) - от 0,5 до 20000 Гц с поддиапазонами.

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Радченко Д.В.			Виброизмерительное портативное устройство АДП- 3101	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Рудаченко А.В.					47	165
Консульт.						НИ ТПУ гр. 2БМ6А		
Рук-ль ООП		Бурков П.В.						

2. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики прибора при измерении вибросигналов и переменного напряжения:

- диапазон частот от 0,5 до 20 Гц, не более  $\pm 5\%$ ;
- диапазоне свыше 20 до 20000 Гц, не более  $\pm 3\%$ .

3. При измерении среднеквадратических значений диапазоны прибора вибропараметров при чувствительности используемого вибродатчика, равной 5 пКл/м/с<sup>2</sup> приведено в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Диапазон прибора при измерении среднеквадратических значений

виброускорение	0,063-200 м/с <sup>2</sup> (в диапазоне частот от 0,5 до 20000 Гц);
виброскорость	- 0,126-1000 мм/с (в диапазоне частот от 1 до 25 Гц); - 0,0101-1280 мм/с (в диапазоне частот от 25 до 20000 Гц);
виброперемещение	0,0051- 160000 мкм (в диапазоне частот от 1 до 4000 Гц),

4. При измерении среднеквадратического значения переменного напряжения в диапазоне частот от 0,5 до 20000 Гц от 3,16 мВ до 10 В.

5. Предел основной относительной погрешности АДП- 3101 при измерении среднеквадратического значения вибропараметров и переменного напряжения,  $\pm 4\%$ .

6. Пределы допустимой основной относительной погрешности прибора при измерении среднеквадратического значения вибропараметров и переменного напряжения:

- в диапазоне от 0,5 до 20 Гц включительно, 10 %;
- в диапазоне свыше 20 до 20000 Гц, 6 %.

7. Пределы допустимой дополнительной относительной погрешности прибора при измерении вибропараметров и переменного напряжения:

- от изменения температуры в рабочих условиях,  $\pm 5 \%$ ;
- от воздействия влажности в рабочих условиях,  $\pm 3 \%$ ;
- от воздействия магнитного поля уровнем 80 А/м частотой 50 Гц,  $\pm 3\%$ ;
- от воздействия акустического шума уровнем 100 дБ в полосе частот 125-8000 Гц,  $\pm 2\%$ .

### 3.2 Внешний вид прибора, органы управления и подключения.



Рисунок 1 – Общий вид прибора АДП-3101 с вибродатчиками.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



Рисунок 2 – Фронтальный вид прибора: 1- металлический корпус; 2- жидкокристаллический дисплей; 3- пленочная клавиатура управления; 4- 4-pin разъемы ОНЦ-БС-1-4 для подключения любых пьезоакселерометров и источников сигналов до 10 В; 5- разъемы CP-50 (BNC) для подключения любых пьезоакселерометров (кроме сим-метричных двухпроводных) и источников сигналов до 10 В; 6- 9-pin разъем подключения датчика оборотов, сигнала внешнего запуска, двух параметрических датчиков.



Рисунок 2А – Вид передней торцевой поверхности прибора (разъемы подключения): 4,5,6 - см. рисунок 2; 7- разъем подключения шины USB для связи с компьютером; 8 – разъем подключения зарядного устройства; 9 – верхняя крышка прибора; 10 – нижняя крышка прибора.

Предусмотрено 2 пары разъемов различного типа: два разъема ОНЦ-БС-1-4 и два разъема CP-50 (BNC) для измерения вибросигналов и переменного напряжения, 2 разъема типа CP-50 обеспечивают подключение различных вибродатчиков (за исключением симметричных пьезоакселерометров) и

									Лист
									50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Расчет магистрального нефтепровода				

различных источников (устройств) переменного напряжения до 10 В СКЗ, 2 разъема типа ОНЦ-БС-4-1 также обеспечивают подключение различных вибродатчиков, включая симметричные пьезоакселерометры, и различных источников (устройств) переменного напряжения до 10 В СКЗ. Универсальный разъем 9 pin предназначен для подключения датчиков оборотов, сигналов внешнего запуска и 2-х параметрических датчиков - низкоомного и высокоомного (для сигналов, медленно меняющихся или постоянного тока - температура, давление, уровень радиационного фона).

Предусмотрены также разъем шины USB, предназначенной для связи с компьютером, и разъем подключения внешнего источника питания.



Рисунок 2Б. Вид задней поверхности прибора:

1-тумблер отключения аккумуляторного блока.

Двухпозиционный тумблер на крышке аккумуляторного отсека предназначен для отключения питания внутренних аккумуляторных батарей прибора при хранении свыше 3-4 дней и/или при глубоком разряде аккумуляторов (прибор не включается или выключился после того как на дисплее потух индикатор состояния внутренних аккумуляторов на дисплее прибора (при включении находится в правой верхней части дисплея)).

					Расчет магистрального нефтепровода	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		51

### 3.3 Сборка рабочей схемы, включение прибора

Сборка рабочей схемы прибора АДП-3101 для каждого канала измерения осуществляется в соответствии с рисунком 3 и зависит от типа применяемого датчика.

Установка датчиков на объект исследования осуществляется с помощью магнитов или шпилек, которые прикручиваются к датчикам. Соединение датчиков с прибором осуществляется антивибрационным кабелем (3), длина которого может достигать 100 метров, с использованием микроразъемов и переходника (4) - для высоко- и низкоимпедансных вибродатчиков (рис.3А); или разъема (8-9) - для симметричных датчиков (рис.3Б). Подключение датчика оборотов при проведении балансировке и измерении числа оборотов роторов объектов осуществляется согласно рисунок 5.

Перед включением прибора включите тумблер (см. рисунок 2Б), переводя его в положение и ВКЛЮЧЕНО. Включение питания прибора осуществляется непосредственно перед измерениями клавишей питания- 2.

При включении прибора необходимо следить за состоянием внутренних аккумуляторных батарей, индикатор состояния которых отображается на дисплее в правой верхней части в виде 3-х звездочек. Индикация аккумуляторных батарей соответствует следующим состояниям:

- отображаются три звездочки - напряжение больше или равно 6,2 В (полный заряд аккумуляторов), работа без ограничений;
- отображаются две звездочки - напряжение аккумуляторов 5,9-6,2 В,- работа без ограничений;
- отображается одна звездочка - напряжение аккумуляторов 5,6-5,9 В. В этом состоянии прибор может проработать 10-30 минут в зависимости от режима измерения. Настоятельно рекомендуется выключить и подзарядить прибор;
- не отображается ни одной звездочки - напряжение аккумуляторов 5,4-5,6 В. При этом высвечивается диагностическое сообщение «ВНИМАНИЕ!

					Расчет магистрального нефтепровода	Лист
						52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Аккумуляторы прибора разряжены!!!». Работа прибора в данном режиме НЕ ДОПУСТИМА, т.к. дальнейшее понижение напряжения приводит к автоматическому его выключению с целью сохранения загруженных в память прибора программ.

При хранении прибора более 3-4 дней следует отключить аккумуляторный блок тумблером на задней крышке прибора (смотреть рисунок 2Б).

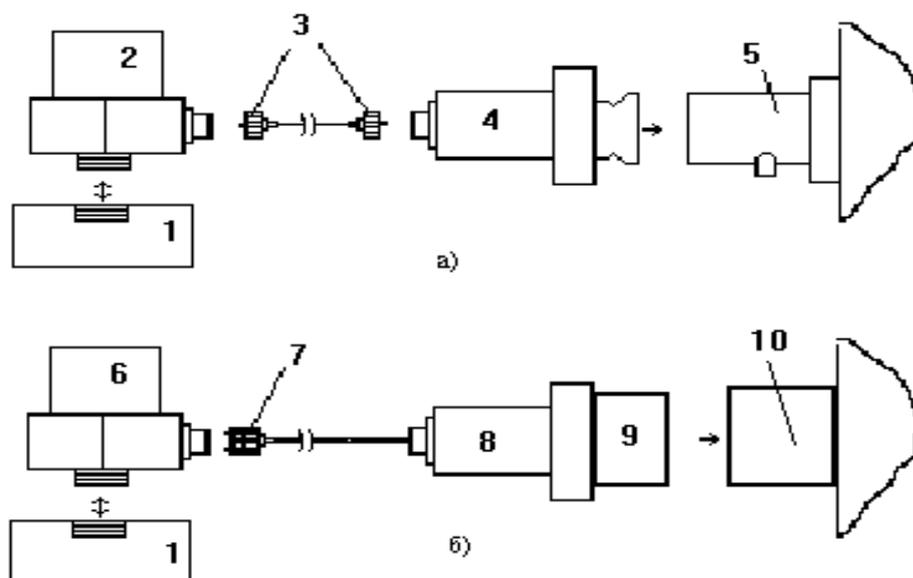


Рисунок 3 – Установка на магнит и подключение вибродатчиков к прибору АДП-3101: а) высокоимпедансных и низкоимпедансных (разъемы СР-50, номера 1, 2) – 1 - магнит со шпилькой М5; 2 - вибродатчик; 3 - кабель антивибрационный с микро-разъемами; 4 - переходник «микро-СР-50»; 5 - разъем СР-50 на панели подключения прибора. б) высокоимпедансных, низкоимпедансных и симметричных (разъемы ОНЦ-БС-1-4, номера 3, 4) – 6 - вибродатчик симметричный (двух выводной), 7 - разъем подключения к датчику; 8-9 – разъем и переходник для подключения к прибору (входит в комплект поставки); разъем ОНЦ-БС-1-4 на панели прибора).

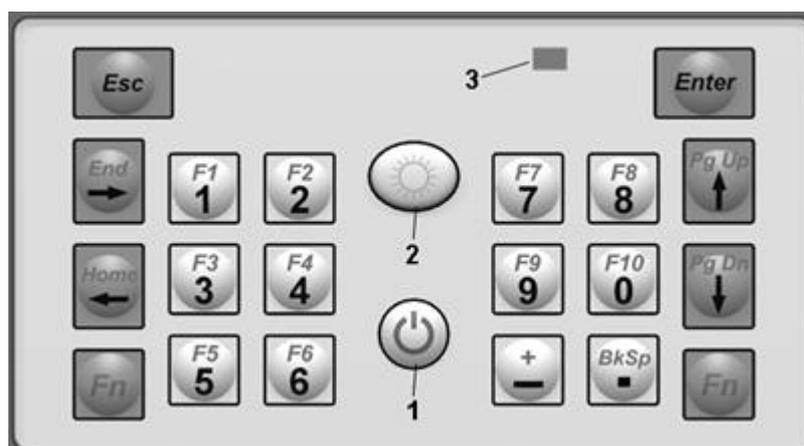
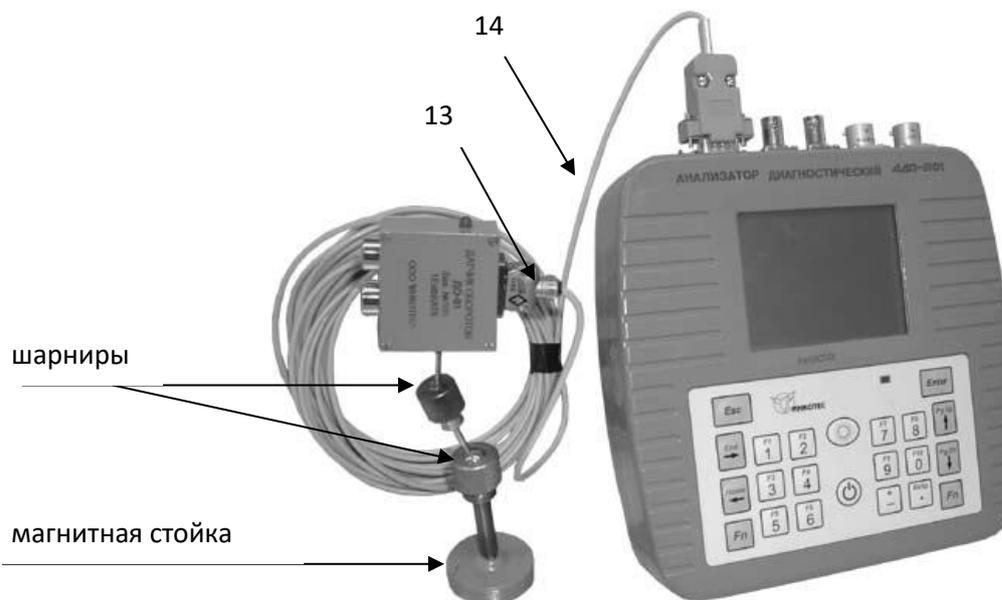


Рисунок 4 – Клавиатура управления прибором АДП-3101:  
 1- кнопка выключения питания; 2- кнопка включения питания; 3- трехцветный индикатор (красный, желтый, зеленый) для сигнализации превышения измеряемыми сигналами предупредительной и аварийной уставок (описание других клавиш см. далее по тексту).



Установка на объект и подключение датчика оборотов ДО-01:  
 13- разъем подключения кабеля к датчику оборотов;  
 14 - кабель для подключения датчика оборотов из комплекта поставки (разъем 6 - рис.2А).

### 3.4 Описание блок-схемы прибора

Блок схема обработки сигнала в приборе АДП-3101 приведена на рисунок 5.

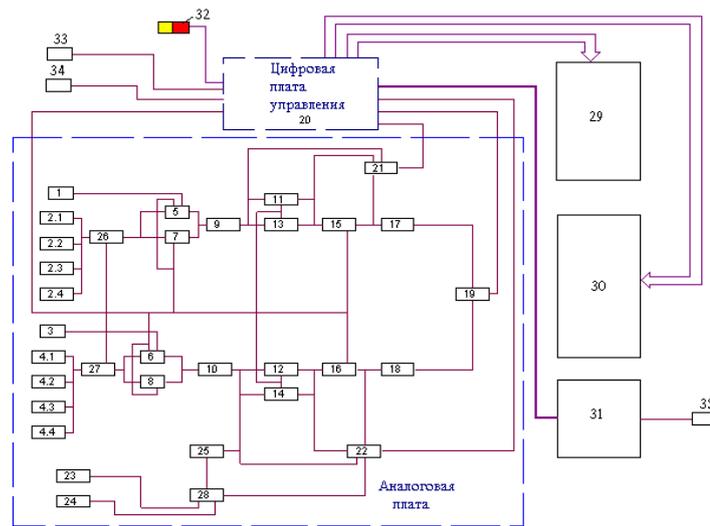


Рисунок 5 – Блок-схема прибора АДП-3101:

1- вход канала; 1;2.1, 2.2, 2.3, 2.4 – вход канала 2; 3- вход канала 3; 4.1, 4.2, 4.3, 4.4- вход канала 4; 5,7,6,8 - усилители заряда каналов 1,2,3,4; 9,10- дифференциальные усилители; 11,12- интеграторы; 13,14- первый каскад ФНЧ; 15,16- программируемый усилитель; 17,18- второй каскад ФНЧ; 19- двухканальный АЦП; 20- аналоговая плата управления прибором; 21,22- индикаторы перегрузки; 23, 24- входы параметрических сигналов; 25- блок выделения огибающей; 26,27- входной коммутатор; 28- коммутатор режимов каналов 3,4; 29- дисплей; 30- клавиатура; 31- аккумуляторный блок питания; 32- двухцветный индикатор предупредительного и аварийного уровня измеряемого сигнала; 33- разъем подключения шины USB; 34- разъем подключения датчика оборотов, сигнала внешнего запуска, параметрических датчиков; 35- разъем подключения зарядного устройства.

Измерительный тракт прибора имеет два канала аналоговой обработки сигнала, каждый из которых включает: входной коммутатор (26,27) усилитель заряда (5,6,7,8), дифференциальный усилитель (9,10) интегратор (11,12), фильтр низших частот (13-17,14-18), программируемый усилитель (15,16). Кроме того, в состав схемы обработки сигналов по обоим каналам входят: двухканальный аналого-цифровой преобразователь (19), индикаторы переполнения (21,22), блок выделения огибающей (25), параметрические входы (23,24), коммутатор режимов каналов 3,4 (28). Управление работой прибора осуществляет цифровая

					Расчет магистрального нефтепровода	Лист
						55
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

плата обработки (20), которая имеет в своем составе DSP- процессор, программируемую микросхему управления (ПЛИС), ОЗУ, флэш-память, контроллеры управления шиной USB, дисплеем (29), клавиатурой (30). Питание прибора осуществляется от аккумуляторного блока питания 5,5...7,5 В (31). В приборе предусмотрен двухцветный светодиод для сигнализации достижения измеряемыми сигналами предупредительной и аварийной уставок. Все элементы прибора расположены на двух платах, жестко закрепленных в корпусе прибора рисунок 6.

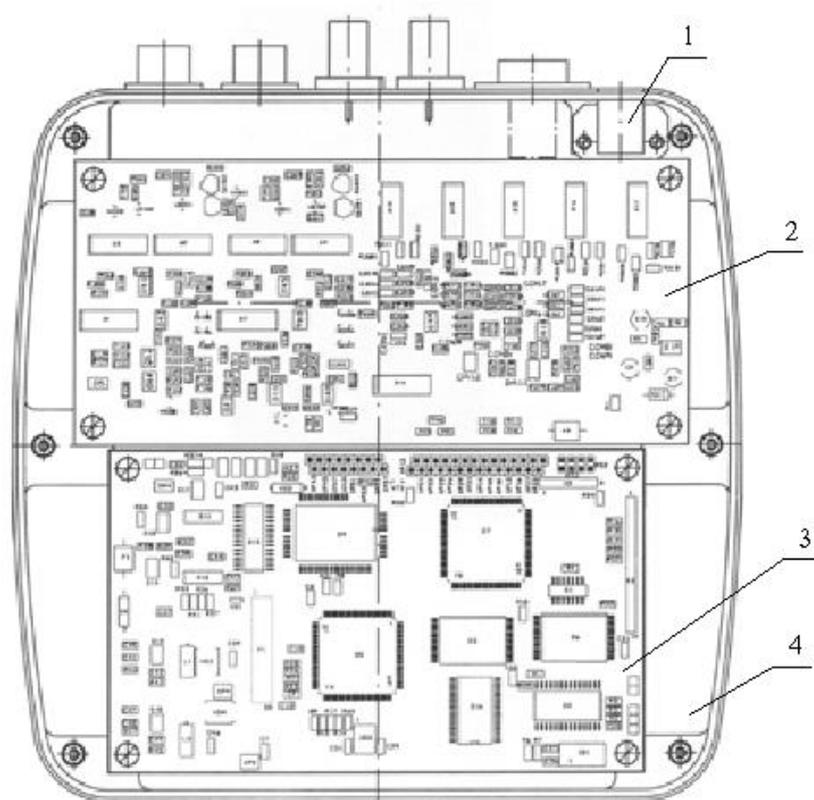


Рисунок 6 – Общий вид расположения плат прибора АДП-3101:

1- плата установки разъема шины USB; 2- аналоговая плата; 3- цифровая плата управления; 4- корпус прибора (внутренняя ограничительная крышка аккумуляторного блока).

Входной коммутатор предназначен для подключения различных типов датчиков к входу усилителя заряда. При этом обеспечивается развязка между сигналами датчиков более 80 дБ во всем диапазоне частот прибора.

						Лист
						56
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

### 3.5 Установка программ загрузки

Программы загрузки (драйверы) прибора требуются для обмена данными между прибором и компьютером. Загрузочные программы необходимы для:

- восстановления рабочих программ, загруженных в прибор при поставке, в случаях их повреждения;
- для выгрузки результатов измерения в компьютер для длительного хранения и вторичного анализа на компьютере;
- для работы прибора с базой данных "АРМИД".

Установку драйверов следует проводить перед первым подключением прибора к компьютеру. Для обмена прибора с компьютером применяется шина USB (кабель USB входит в комплект поставки прибора).

Перед установкой драйверов прибора необходимо установить программу "Модуль работы с АДП-3101", используя специальный установочный диск из комплекта поставки.

#### 3.5.1 Для установки программы "Модуль работы с АДП-3101", необходимо выполнить следующие действия:

1. Вставить установочный диск в дисковод компьютера.
2. После вставки диска откроется главное окно инсталляционной программы "Установка программ ООО "ИНКОТЕС". Из предложенного списка выбрать пункт меню "Модуль работы с АДП-3101", далее следовать указаниям программы.
3. Если после вставки диска окно инсталляционной программы не появляется, то необходимо вручную запустить с CD-диска программу Runsetup.exe.

					Расчет магистрального нефтепровода	Лист
						57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

После установки программы можно перейти к установке драйверов прибора АДП-3101.

### 3.5.2 Для установки драйверов прибора необходимо выполнить следующие действия

1. Включить компьютер, подключить разъем USB прибор к USB-порту компьютера с помощью кабеля USB из комплекта поставки прибора. Внимание! При подключении к компьютеру питание прибора должно быть выключено.

2. Включить питание прибора.

3. После включения питания операционная система компьютера обнаружит новое устройство и появится окно "Мастер обнаружения нового оборудования" рисунок 7.

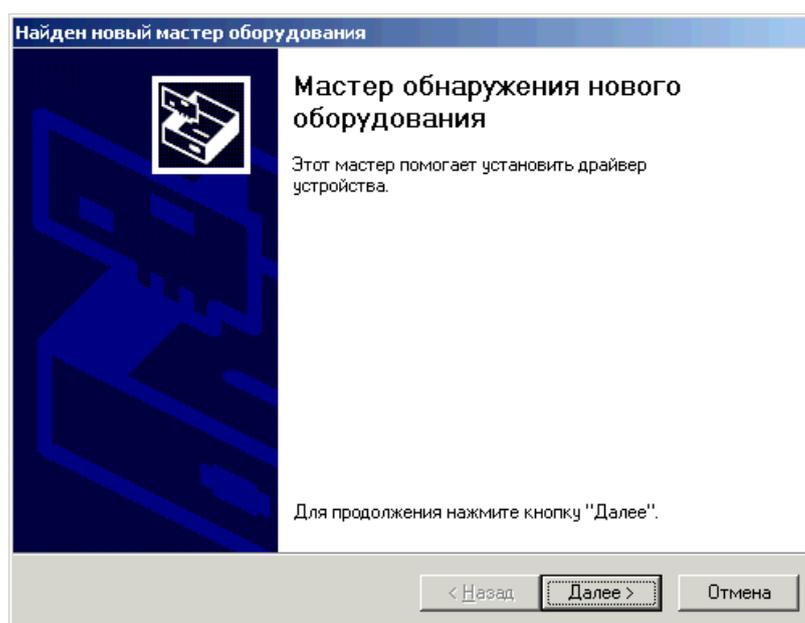


Рисунок 7 – Окно "Мастер обнаружения нового оборудования".

4. Нажать кнопку "Далее", появится окно установки драйверов оборудования. Выбрать обязательно 1-й пункт рисунок 8.

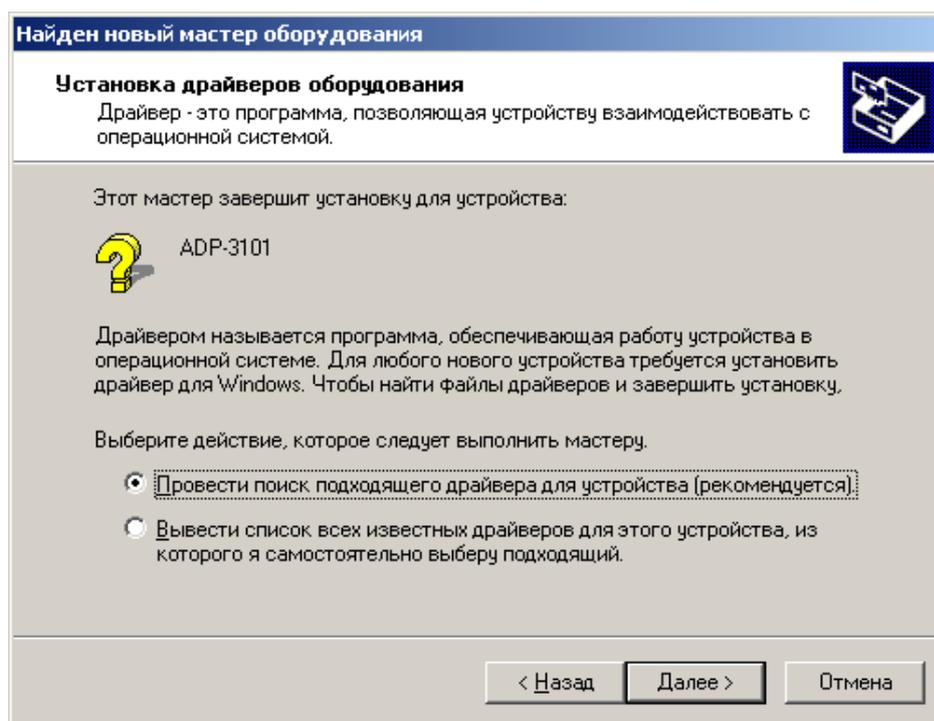


Рисунок 8 – Окно "Установка драйвера оборудования".

5. Нажать кнопку "Далее», появится окно поиска файлов драйвера рисунок 9. Установить флажки в полях поиска дополнительных источников, как показано на рисунок 10.

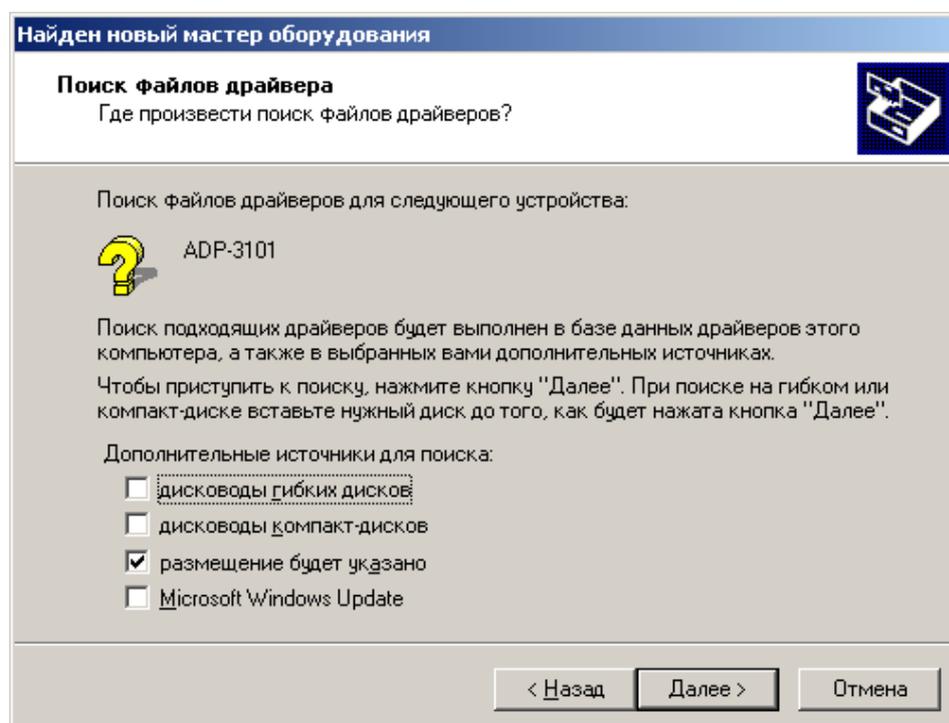


Рисунок 9 – Окно "Поиск файлов драйвера".

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

6. Нажать кнопку "Далее», появится окно (рис.12) выбора inf-файла драйвера (ftd2xx.inf), который расположен в подкаталоге \ADP\_driver\, находящемся в каталоге, где был установлен модуль работы с прибором АДП-3101. Нажать кнопку "Обзор" и выбрать нужный подкаталог.

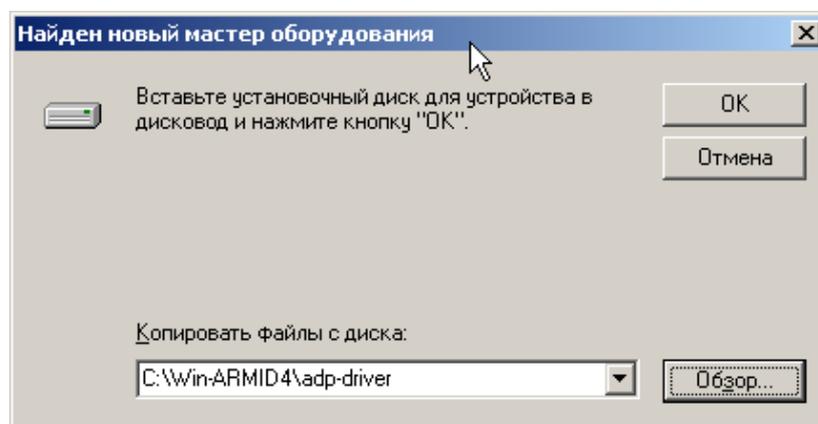


Рисунок 10 – Окно выбора inf-файла драйвера прибора АДП-3101.

7. После выбора файла ftd2xx.inf (кнопка ОК) появится окно результатов поиска файлов драйвера рисунок 11.

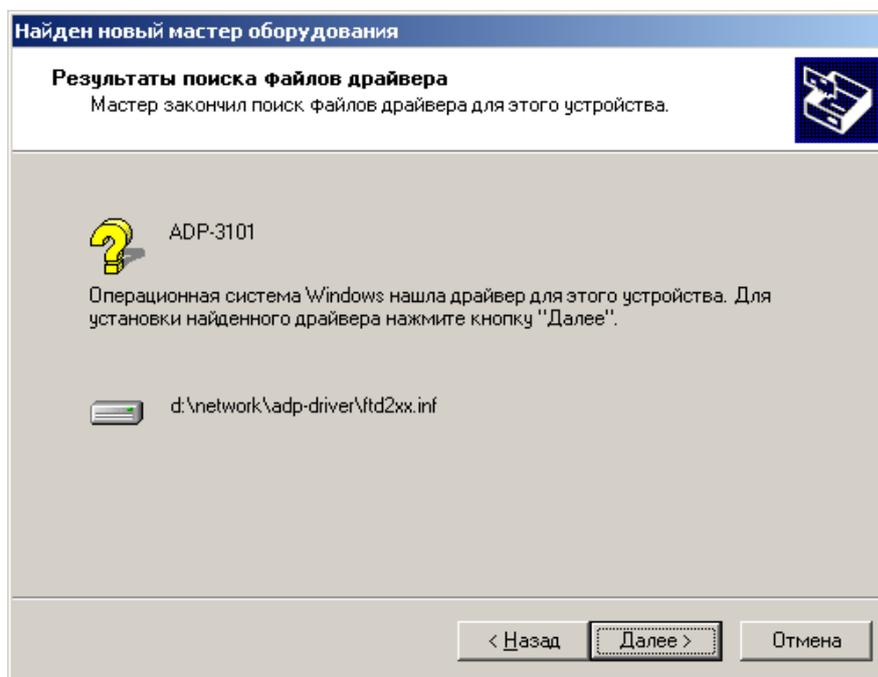


Рисунок 11 – Окно "Результаты поиска файлов драйвера".

8. Нажать кнопку "Далее", появится окно завершения работы мастера обнаружения нового оборудования (рис.12).

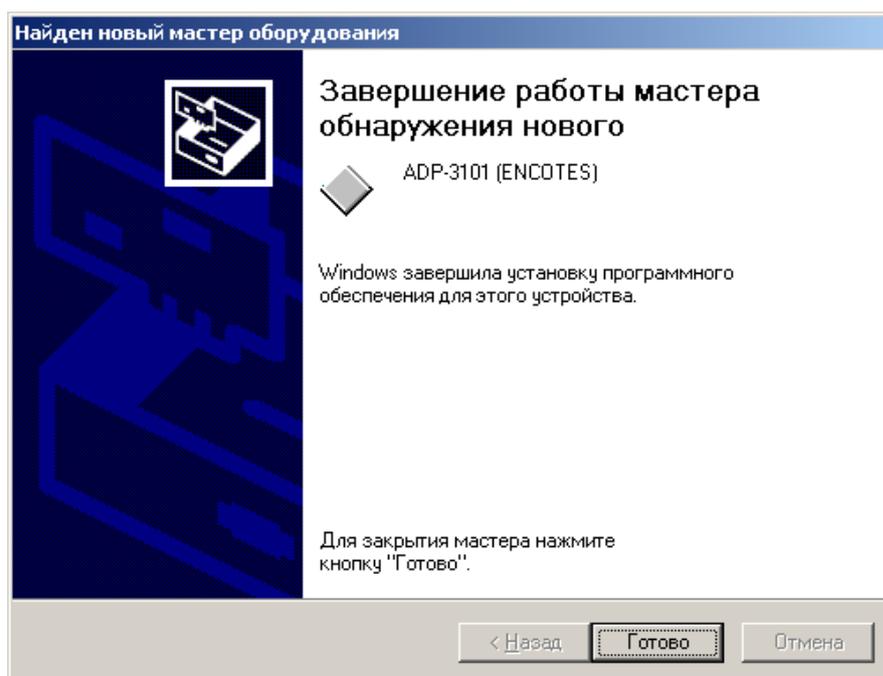


Рисунок 14 – Окно "Завершение работы мастера обнаружения нового оборудования".

9. Для завершения установки нажать кнопку "Готово".

### 3.6 Работа на промышленных объектах, установка датчиков.

Для работы на промышленных объектах необходимо подготовить прибор к работе. Подсоединить кабели от датчиков вибрации к входам вибродатчиков (1,2,3,4) прибора.

Установить вибродатчики в соответствующие точки объекта измерения согласно выбранному маршруту (номера точек выводятся на дисплей прибора) или в требуемые точки при инициативных измерениях вне маршрута.

Установка вибродатчиков производится с помощью магнитов или специального кронштейна ("кубик") на объект. Предварительно необходимо очистить металлическую поверхность места установки от краски, ржавчины, грязи и т.п.; убедиться, что контакт магнита с поверхностью максимально плотный и надежный [22].

					Расчет магистрального нефтепровода	Лист
						61
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

На неметаллических конструктивных элементах для установки датчиков использовать мастику или воск. Если в каком-либо месте установка на мастику невозможна, например, на горячий объект, то установить датчик на клей или с помощью специального крепления. Также предварительно очистить поверхность места установки от краски, ржавчины, грязи и т.п.; проконтролировать, чтобы контакт датчика с объектом был максимально плотным и надежным.

При установке вибродатчиков в зоны с повышенной температурой (горячий обдув и т.п.) следить, чтобы они не перегревались. Перегрев приводит к перегрузке входных каскадов прибора, т.к. при повышенной температуре чувствительность датчиков резко возрастает. Перегрев также приводит к повреждениям кабеля от датчиков. Объекты с температурой поверхности выше 100°C часто являются причиной повреждения длинных кабелей от датчиков, поэтому при установке датчиков необходимо следить за безопасной прокладкой кабеля [19].

					Расчет магистрального нефтепровода	Лист
						62
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

#### **4 Вибрационная диагностика дебаланса в ЦНА с применением лабораторного стенда.**

Дебаланс в центробежных насосных агрегатах является наиболее распространённым дефектом, который приводит к увеличению вибрации. Явление дебаланса связано с процессами, происходящими в механической, тепловой или электромагнитной системах роторов, и именно в результате дебаланса энергия вращения ротора преобразуется в энергию вибрации. Одна из причин возникновения механического дебаланса – это несовпадение центра масс с осью вращения. Вибрация, которая при этом возникает возбуждается центробежной силой. Вибрация, побуждаемая ротором, передается на подшипниковые узлы, подшипники, электродвигатель и центробежная сила, протекающая один раз за один оборот вала центробежной установки, может быть обнаружена в любой точке машины [1].

Для повышения эффективности эксплуатации необходим переход к эксплуатации ЦНА по техническому состоянию и использования средств технической диагностики. Системы диагностики должны разрабатываться не только с учётом получения собственно оценок, но и с учётом использования результатов диагностики в управлении системой транспорта нефти [3].

Механические колебания - колебания значений кинематической или динамической величины, характеризующей механическую систему [2].

#### **4.1 Сравнение результатов исследования. Вибрационная диагностика в центробежной установке при дефекте рабочего колеса.**

Для данного эксперимента необходимо получить данные вибрационной диагностики при дефекте рабочего колеса (импеллера). Для сравнения были измерены данные вибрации в рабочем состоянии центробежной установки в

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Радченко Д.В.			Вибрационная диагностика дебаланса в ЦНА с применением лабораторного стенда.	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Рудаченко А.В.					63	165
Консульт.		Зарубин А.Г.				НИ ТПУ гр. 2БМ6А		
Рук-ль ООП		Бурков П.В.						

трёх точках измерения рисунок 15.

Данные измерения вибрации без дефекта и с дефектом рабочего колеса центробежной установки приведены в таблице 4.1. В каждой из трёх точек измерения было проведено по 36 измерений для дальнейшей обработки в Excel при помощи метода главных компонент. Измерения велись при частоте вращения 50,8 Hz или 3048 оборотов в минуту, температура при часе работы лабораторной центробежной установки составила 39-41° C.



Рисунок 15 – Точки измерения вибрационных данных

Таблица 4.1

Величина вибрации на электродвигателе

№ пп	Без дефекта					Дефект рабочего колеса				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, В	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, В
1	0,0639	0,0623	0,0775	50,9	0,658	0,1539	0,1736	0,0881	50,8	0,628
2	0,0649	0,0623	0,0827	50,9	0,490	0,1823	0,1802	0,0797	50,8	0,961
3	0,0642	0,0652	0,0731	50,9	0,529	0,1566	0,1665	0,0748	50,8	0,844
4	0,0658	0,0638	0,079	50,8	0,530	0,1569	0,1698	0,0791	50,8	0,863
5	0,0671	0,0645	0,0613	50,8	0,658	0,1574	0,1598	0,0812	50,8	1,229
6	0,0664	0,0633	0,0748	50,9	0,588	0,1669	0,1621	0,0779	50,8	1,002
7	0,0689	0,0642	0,0656	50,8	0,636	0,1716	0,1802	0,0675	50,8	1,024
8	0,0668	0,0642	0,0678	50,8	0,621	0,173	0,1549	0,0851	50,8	0,787
9	0,068	0,0631	0,0805	50,8	0,630	0,1657	0,1853	0,0659	50,8	0,872
10	0,068	0,0626	0,0834	50,8	0,639	0,1641	0,1539	0,0837	50,8	0,988
11	0,0671	0,0618	0,0811	50,8	0,426	0,1604	0,1625	0,0733	50,8	1,272
12	0,0687	0,0621	0,0907	50,8	0,387	0,1798	0,164	0,0793	50,8	1,576
13	0,0657	0,0648	0,0788	50,8	0,409	0,1799	0,1651	0,1002	50,8	1,760

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
						64
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

№ пп	Без дефекта					Дефект рабочего колеса				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, В	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, В
14	0,0641	0,0611	0,0833	50,8	0,390	0,1679	0,1929	0,092	50,8	1,587
15	0,0642	0,0622	0,0876	50,8	0,381	0,1622	0,1705	0,0921	50,8	6,697
16	0,0692	0,0672	0,0747	50,8	0,373	0,1634	0,1835	0,087	50,8	2,953
17	0,067	0,0609	0,0816	50,8	0,364	0,184	0,1561	0,0708	50,8	1,773
18	0,0678	0,0636	0,0684	50,8	0,355	0,1866	0,177	0,0851	50,8	3,451
19	0,0656	0,0625	0,0898	50,8	0,346	0,1578	0,1649	0,0725	50,8	1,506
20	0,0658	0,0651	0,0827	50,8	0,337	0,1533	0,1452	0,0749	50,8	1,157
21	0,0679	0,0625	0,0857	50,9	0,328	0,168	0,1676	0,0751	50,8	0,808
22	0,0659	0,0623	0,0815	50,7	0,319	0,1683	0,1999	0,0744	50,8	0,673
23	0,0649	0,0656	0,0864	50,8	0,310	0,1682	0,181	0,0714	50,8	0,589
24	0,0657	0,0653	0,073	50,8	0,301	0,1882	0,1617	0,0842	50,8	0,471
25	0,0663	0,0631	0,0662	50,7	0,292	0,1826	0,165	0,0822	50,8	0,362
26	0,0663	0,0648	0,0962	50,7	0,283	0,1879	0,166	0,0827	50,8	0,307
27	0,0639	0,0646	0,0821	50,7	0,274	0,1668	0,11655	0,0959	50,8	0,262
28	0,0677	0,0637	0,0806	50,7	0,265	0,1677	0,1465	0,0688	50,8	0,106
29	0,0657	0,0618	0,0899	50,8	0,256	0,1514	0,1979	0,0759	50,8	0,108
30	0,0679	0,0658	0,0687	50,7	0,247	0,1632	0,1557	0,0874	50,8	0,110
31	0,0644	0,0656	0,0874	50,7	0,238	0,1697	0,1605	0,0884	50,8	0,112
32	0,0679	0,0622	0,0727	50,7	0,229	0,1566	0,153	0,0656	50,8	0,114
33	0,0677	0,0639	0,0811	50,7	0,220	0,1787	0,1609	0,0798	50,8	0,116
34	0,0665	0,0645	0,0803	50,7	0,211	0,1701	0,1733	0,0768	50,8	0,118
35	0,0686	0,0636	0,0741	50,7	0,202	0,1738	0,1774	0,0765	50,8	0,120
36	0,0678	0,0675	0,0776	50,7	0,193	0,1694	0,1747	0,0902	50,8	0,122

Из данных таблицы можно сделать вывод, что вибрация без дефекта в первой точке измерения меньше в 2,5 – 3 раза чем с дефектом рабочего колеса. При появлении дефекта рабочего колеса также увеличилась токовая нагрузка системы и выросла температура в точках измерения (на подшипниковых узлах) до 45-48° С.

Для наглядности при помощи Excel понижаем размерность используя метод главных компонент и строим график по данным с пониженной размерностью. Понижение размерности производилась про помощи команды ScoresPCA в Microsoft Excel.

Так же можно применять ортогональное преобразование метода главных компонент выполняется для нецентрированных суточных графиков [6].

Режим идентификации дефектов запускается периодически и по событию, при превышении одним из контролируемых параметров вибрации

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
						65
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

пороговых значений или появлении сильного скачка параметра. При запуске режима диагностирования формируется матрица превышений диагностических параметров размером  $M \times N$ , где  $M$  – число диагностических параметров (число строк), а  $N$  – число точек контроля (число столбцов) [7].

Имеется матрица переменных  $X$  размерностью  $(I \times J)$ , где  $I$  – число образцов (строк), а  $J$  – это число независимых переменных (столбцов), которых, как правило, много ( $J \gg 1$ ). В методе главных компонент используются новые, формальные переменные  $t_a$  ( $a=1, \dots, A$ ), являющиеся линейной комбинацией исходных переменных  $x_j$  ( $j=1, \dots, J$ ).

$$t_a = p_{a1}x_1 + \dots + p_{aJ}x_J \quad (1)$$

С помощью этих новых переменных матрица  $X$  разлагается в произведение двух матриц  $T$  и  $P$ . Матрица  $T$  называется матрицей счетов (scores). Ее размерность  $(I \times A)$ . Матрица  $P$  называется матрицей нагрузок (loadings). Ее размерность  $(J \times A)$ .  $E$  – это матрица остатков, размерностью  $(I \times J)$ .

$$X = TP^t + E = \sum_{a=1}^A t_a p_a^t + E \quad (2)$$

Новые переменные  $t_a$  называются главными компонентами (Principal Components), поэтому и сам метод называется методом главных компонент (РСА). Число столбцов –  $t_a$  в матрице  $T$ , и  $p_a$  в матрице  $P$ , равно  $A$ , которое называется числом главных компонент (РС). Эта величина заведомо меньше числа переменных  $J$  и числа образцов  $I$ . Важным свойством РСА является ортогональность (независимость) главных компонент. Поэтому матрица счетов  $T$  не перестраивается при увеличении числа компонент, а к ней просто прибавляется еще один столбец – соответствующий новому направлению. То же происходит и с матрицей нагрузок  $P$ . При исследовании данных методом РСА, особое внимание уделяется графикам счетов. Они несут в себе информацию, полезную для понимания того, как устроены данные. На графике счетов каждый образец изображается в координатах  $(t_i, t_j)$ , чаще всего –  $(t_1, t_2)$ , обозначаемых РС1 и РС2. Близость двух точек означает их схожесть, т.е. положительную

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
						66
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

корреляцию. Точки, расположенные под прямым углом, являются некоррелированными, а расположенные диаметрально противоположно – имеют отрицательную корреляцию.

Для матрицы счетов имеют место следующие соотношения (3):

$$T_t T = \Lambda = \text{diag} \{ \lambda_1, \dots, \lambda_A \} \quad (3)$$

где величины  $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_A \geq 0$  – это собственные значения. Они характеризуют важность каждой компоненты.

$$\lambda_a = \sum_{i=1}^I t_{ia}^2, \quad a = 1, \dots, A \quad (4)$$

Нулевое собственное значение  $\lambda_0$  определяется как сумма всех собственных значений, т.е.

$$\lambda_0 = \sum_{a=1}^A \lambda_a = \text{sp}(X^t X) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij}^2 \quad (5)$$

Для вычисления PCA-счетов в надстройке Chemometrics Add-In используется функция ScoresPCA.

Применяем метод главных компонент к данным вибрации лабораторного исследования без дефекта (таблица 4.2) и дефектом рабочего колеса (таблица 4.3).

Таблица 4.2

Величина вибрации при понижении размерности без дефекта в первой точке

№ пп	Без дефекта				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,0639	0,0623	0,0775	-0,66785	0,091796
2	0,0649	0,0623	0,0827	-0,66407	0,095419
3	0,0642	0,0652	0,0731	-0,66888	0,087118
4	0,0658	0,0638	0,079	-0,66502	0,091505
5	0,0671	0,0645	0,0613	-0,67468	0,076601
6	0,0664	0,0633	0,0748	-0,66747	0,088065
7	0,0689	0,0642	0,0656	-0,67111	0,079226
8	0,0668	0,0642	0,0678	-0,67104	0,082002
9	0,068	0,0631	0,0805	-0,66312	0,09186
10	0,068	0,0626	0,0834	-0,6616	0,094336
11	0,0671	0,0618	0,0811	-0,66396	0,093248
12	0,0687	0,0621	0,0907	-0,65698	0,09995

№ пп	Без дефекта				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
13	0,0657	0,0648	0,0788	-0,66469	0,091035
14	0,0641	0,0611	0,0833	-0,6648	0,096722
15	0,0642	0,0622	0,0876	-0,66155	0,099679
16	0,0692	0,0672	0,0747	-0,66385	0,085197
17	0,067	0,0609	0,0816	-0,66417	0,094018
18	0,0678	0,0636	0,0684	-0,67037	0,082201
19	0,0656	0,0625	0,0898	-0,65921	0,100621
20	0,0658	0,0651	0,0827	-0,6621	0,093964
21	0,0679	0,0625	0,0857	-0,66031	0,096242
22	0,0659	0,0623	0,0815	-0,66419	0,093976
23	0,0649	0,0656	0,0864	-0,66014	0,097156
24	0,0657	0,0653	0,073	-0,66798	0,086263
25	0,0663	0,0631	0,0662	-0,67288	0,08138
26	0,0663	0,0648	0,0962	-0,65371	0,104511
27	0,0639	0,0646	0,0821	-0,66388	0,094606
28	0,0677	0,0637	0,0806	-0,66294	0,091871
29	0,0657	0,0618	0,0899	-0,65944	0,100904
30	0,0679	0,0658	0,0687	-0,66901	0,081594
31	0,0644	0,0656	0,0874	-0,65983	0,098194
32	0,0679	0,0622	0,0727	-0,6684	0,086061
33	0,0677	0,0639	0,0811	-0,66253	0,092194
34	0,0665	0,0645	0,0803	-0,66344	0,091936
35	0,0686	0,0636	0,0741	-0,66641	0,086318
36	0,0678	0,0675	0,0776	-0,66278	0,088074

Таблица 4.3

Величина вибрации при понижении размерности с дефектом рабочего колеса в первой точке

№ пп	Дефект рабочего колеса				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,1539	0,1736	0,0881	-0,55016	0,01562
2	0,1823	0,1802	0,0797	-0,53466	-0,00741
3	0,1566	0,1665	0,0748	-0,56024	0,006325
4	0,1569	0,1698	0,0791	-0,55576	0,008389
5	0,1574	0,1598	0,0812	-0,55925	0,013416
6	0,1669	0,1621	0,0779	-0,55431	0,00529
7	0,1716	0,1802	0,0675	-0,54862	-0,0118
8	0,173	0,1549	0,0851	-0,54986	0,010582
9	0,1657	0,1853	0,0659	-0,5506	-0,01199
10	0,1641	0,1539	0,0837	-0,55664	0,014223
11	0,1604	0,1625	0,0733	-0,56087	0,004709
12	0,1798	0,164	0,0793	-0,54465	-0,00065
13	0,1799	0,1651	0,1002	-0,53127	0,015448
14	0,1679	0,1929	0,092	-0,52947	0,004835
15	0,1622	0,1705	0,0921	-0,54424	0,015813
16	0,1634	0,1835	0,087	-0,54003	0,00649
17	0,184	0,1561	0,0708	-0,55129	-0,00659
18	0,1866	0,177	0,0851	-0,53038	-0,0041
19	0,1578	0,1649	0,0725	-0,56172	0,004491
20	0,1533	0,1452	0,0749	-0,57299	0,015724
21	0,168	0,1676	0,0751	-0,55256	0,000545

№ п/п	Дефект рабочего колеса				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
22	0,1683	0,1999	0,0744	-0,53642	-0,01182
23	0,1682	0,181	0,0714	-0,5479	-0,00732
24	0,1882	0,1617	0,0842	-0,53772	-8E-05
25	0,1826	0,165	0,0822	-0,54067	-9,4E-05
26	0,1879	0,166	0,0827	-0,53663	-0,00267
27	0,1668	0,11655	0,0959	-0,56651	0,036037
28	0,1677	0,1465	0,0688	-0,5673	0,003327
29	0,1514	0,1979	0,0759	-0,54679	-0,00158
30	0,1632	0,1557	0,0874	-0,55401	0,016945
31	0,1697	0,1605	0,0884	-0,54702	0,012798
32	0,1566	0,153	0,0656	-0,5727	0,003919
33	0,1787	0,1609	0,0798	-0,54659	0,00141
34	0,1701	0,1733	0,0768	-0,54736	-0,0012
35	0,1738	0,1774	0,0765	-0,54321	-0,00475
36	0,1694	0,1747	0,0902	-0,53889	0,009243

Далее для сравнения вибрационных данных необходимо построить график в двумерных данных PC1 от PC2 рисунок 16.

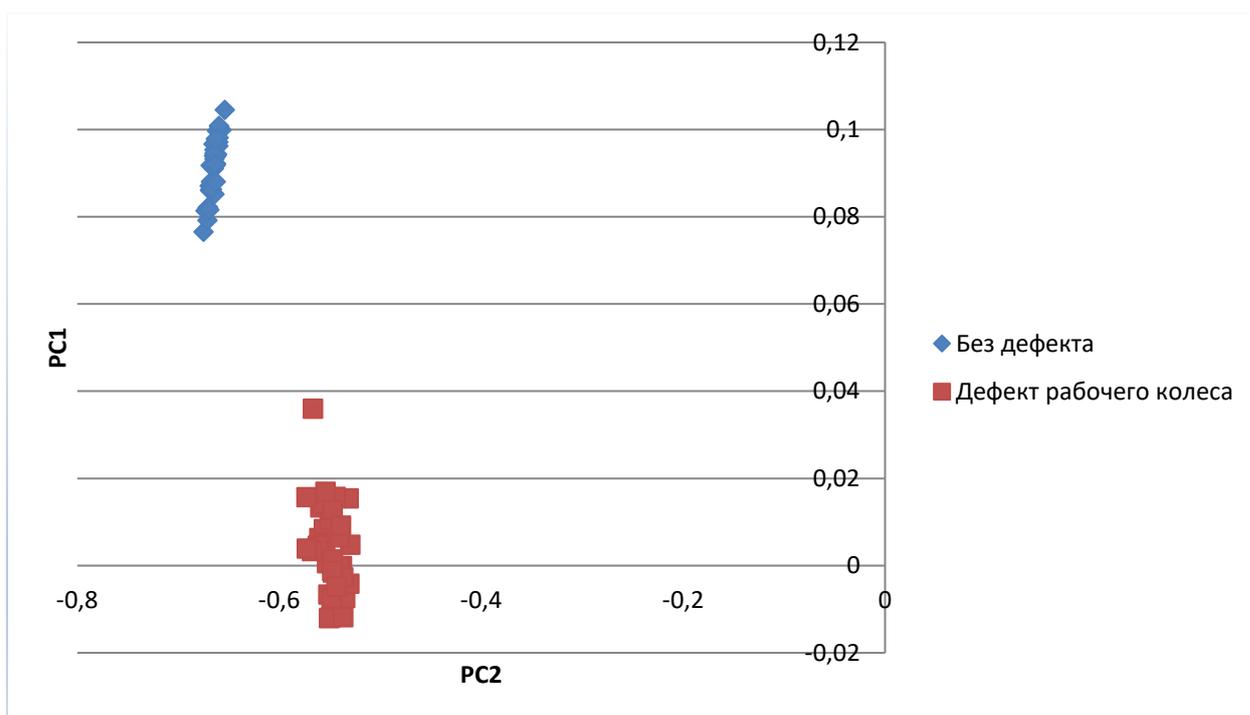


Рисунок 16 - Графическое представление двумерных данных PC1, PC2

По аналогии сделаем те же шаги для второй точки измерения (первый подшипниковый узел и третьей точки измерения (второй подшипниковый узел). Данные измерения вибрации без дефекта и с дефектом рабочего колеса центробежной установки во второй точке измерения приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4

## Величина вибрации на первом подшипниковом узле.

№ пп	Без дефекта					Дефект рабочего колеса				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, В	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, В
1	0,0643	0,0625	0,0855	50,8	0,546	0,1721	0,1588	0,2332	51	0,899
2	0,0638	0,0638	0,0782	50,8	0,480	0,166	0,1611	0,1796	50,8	0,623
3	0,0664	0,0657	0,0852	50,8	0,561	0,1675	0,1851	0,1892	50,8	0,192
4	0,0679	0,0653	0,0922	50,8	0,498	0,1888	0,1627	0,1622	50,8	0,221
5	0,0647	0,0614	0,0854	50,8	0,408	0,1624	0,1634	0,1751	50,8	0,525
6	0,0686	0,0646	0,0824	50,8	0,405	0,1675	0,1629	0,1695	50,8	0,211
7	0,0637	0,0638	0,0879	50,8	0,380	0,1677	0,1622	0,1915	50,8	0,147
8	0,0661	0,0659	0,0784	50,8	0,354	0,1738	0,1839	0,1827	50,8	0,275
9	0,0684	0,0658	0,0846	50,8	0,325	0,1826	0,1422	0,1663	50,8	0,155
10	0,066	0,0648	0,0887	50,8	0,297	0,1842	0,1546	0,1799	50,8	0,219
11	0,0658	0,0644	0,0771	50,8	0,302	0,1733	0,1831	0,189	50,8	0,249
12	0,0678	0,0661	0,0715	50,7	0,307	0,1826	0,1599	0,1767	50,8	0,101
13	0,068	0,0677	0,0721	50,7	0,313	0,1725	0,1648	0,1622	50,8	0,126
14	0,0664	0,0647	0,0726	50,7	0,318	0,1742	0,1679	0,1729	50,8	0,174
15	0,0677	0,0659	0,0879	50,7	0,323	0,165	0,1505	0,1519	50,8	0,162
16	0,065	0,063	0,0825	50,8	0,329	0,1652	0,1532	0,1667	50,8	0,150
17	0,0649	0,0653	0,0779	50,7	0,334	0,1645	0,1656	0,1729	50,8	0,138
18	0,0659	0,0653	0,0742	50,8	0,340	0,1684	0,1533	0,1673	50,8	0,126
19	0,0678	0,0667	0,0902	50,8	0,345	0,1679	0,1847	0,1822	50,8	0,129
20	0,0668	0,0651	0,0895	50,8	0,350	0,1843	0,1828	0,1739	50,8	0,133
21	0,0664	0,0652	0,0813	50,8	0,387	0,1689	0,1775	0,1666	50,8	0,136
22	0,0685	0,0657	0,0763	50,7	0,440	0,172	0,1794	0,1763	50,8	0,140
23	0,069	0,0647	0,0761	50,7	0,482	0,1708	0,1692	0,1621	50,8	0,143
24	0,068	0,0655	0,0837	50,8	0,527	0,1737	0,1843	0,1991	50,8	0,147
25	0,066	0,0646	0,0814	50,8	0,489	0,1952	0,149	0,1853	50,8	0,150
26	0,0649	0,0657	0,0901	50,7	0,450	0,1877	0,1745	0,1859	50,8	0,154
27	0,0669	0,0678	0,079	50,7	0,411	0,1669	0,1708	0,1922	50,8	0,157
28	0,0667	0,0642	0,092	50,8	0,372	0,1866	0,1645	0,1631	50,8	0,161
29	0,066	0,0647	0,0833	50,7	0,333	0,185	0,1506	0,1825	50,8	0,164
30	0,0674	0,0663	0,0724	50,7	0,294	0,1755	0,1887	0,1578	50,8	0,168
31	0,0677	0,0655	0,0817	50,7	0,255	0,1816	0,1531	0,1825	50,8	0,171
32	0,0701	0,0639	0,0845	50,7	0,216	0,1822	0,1641	0,1992	50,8	0,175
33	0,0668	0,0653	0,0668	50,7	0,177	0,1791	0,1666	0,1633	50,8	0,178
34	0,0652	0,0653	0,0671	50,8	0,138	0,1705	0,1605	0,1777	50,8	0,182
35	0,0663	0,066	0,0878	50,7	0,120	0,1624	0,1581	0,1721	50,8	0,185
36	0,0687	0,0667	0,0705	50,8	0,127	0,1654	0,1447	0,1825	50,8	0,189

Из данных таблицы можно сделать вывод, что вибрация без дефекта в первой точке измерения меньше в 3 – 3,5 раза чем с дефектом рабочего колеса.

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист 70
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 4.5

## Величина вибрации на втором подшипниковом узле.

№ пп	Без дефекта					Дефект рабочего колеса				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, B	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, B
1	0,0662	0,0631	0,0721	51	0,680	0,1647	0,1751	0,0818	51	0,349
2	0,0664	0,0626	0,0898	50,9	0,677	0,164	0,1905	0,0774	51	0,473
3	0,0675	0,0643	0,0826	50,8	0,868	0,1595	0,1673	0,0755	50,9	0,537
4	0,0644	0,0634	0,0919	50,8	0,590	0,1909	0,1765	0,0958	50,9	1,302
5	0,0673	0,0636	0,0662	50,8	0,740	0,166	0,1643	0,0789	50,9	1,181
6	0,0674	0,0664	0,0659	50,8	0,670	0,1739	0,1629	0,0766	50,9	0,347
7	0,0672	0,0644	0,0812	50,8	0,630	0,1576	0,1543	0,0808	50,9	0,346
8	0,0665	0,0623	0,0745	50,8	0,546	0,1757	0,1461	0,079	50,9	0,327
9	0,0662	0,0625	0,0812	50,8	0,576	0,1541	0,1713	0,0827	50,8	0,320
10	0,0656	0,0641	0,084	50,8	0,556	0,15	0,1645	0,0771	50,8	0,310
11	0,0688	0,064	0,078	50,8	0,536	0,1652	0,1954	0,0765	50,8	0,300
12	0,0661	0,0666	0,0936	50,8	0,516	0,1727	0,1756	0,0789	50,8	0,290
13	0,0673	0,0605	0,0773	50,8	0,497	0,1789	0,1484	0,0796	50,8	0,280
14	0,0668	0,0635	0,0699	50,8	0,477	0,1759	0,1673	0,0865	50,8	0,270
15	0,0682	0,0627	0,0603	50,8	0,457	0,1848	0,163	0,0803	50,8	0,260
16	0,0676	0,0642	0,0922	50,8	0,437	0,1752	0,1687	0,077	50,8	0,250
17	0,0684	0,0613	0,0952	50,8	0,417	0,1793	0,1554	0,0836	50,8	0,240
18	0,0632	0,0643	0,0795	50,8	0,398	0,1835	0,1636	0,0839	50,8	0,230
19	0,0651	0,0652	0,0823	50,8	0,378	0,1528	0,1716	0,0865	50,8	0,220
20	0,0661	0,0637	0,0866	50,8	0,358	0,1703	0,1662	0,0732	50,8	0,210
21	0,0679	0,0617	0,0686	50,8	0,338	0,1555	0,1651	0,0779	50,8	0,200
22	0,0673	0,0616	0,0812	50,8	0,366	0,174	0,1584	0,0893	50,8	0,190
23	0,064	0,0627	0,0769	50,8	0,372	0,1635	0,1607	0,071	50,8	0,180
24	0,066	0,0626	0,0683	50,8	0,264	0,1628	0,1679	0,0752	50,8	0,170
25	0,0665	0,0622	0,0567	50,8	0,199	0,1861	0,1758	0,0901	50,8	0,160
26	0,0685	0,0624	0,0899	50,8	0,211	0,1802	0,1599	0,0863	50,8	0,194
27	0,0651	0,0629	0,0916	50,8	0,204	0,1653	0,1565	0,0734	50,8	0,155
28	0,0672	0,0625	0,0893	50,8	0,197	0,163	0,166	0,0803	50,8	0,110
29	0,0636	0,0618	0,0792	50,8	0,190	0,1748	0,1646	0,0748	50,8	0,147
30	0,0664	0,0641	0,084	50,8	0,183	0,169	0,189	0,0993	50,8	0,184
31	0,066	0,0647	0,0787	50,8	0,176	0,167	0,1486	0,0795	50,8	0,265
32	0,0682	0,0628	0,0756	50,8	0,169	0,1685	0,18	0,0918	50,8	0,200
33	0,0693	0,065	0,0853	50,8	0,162	0,1747	0,151	0,0967	50,8	0,184
34	0,0678	0,0638	0,0722	50,8	0,155	0,1763	0,1675	0,0792	50,8	0,173
35	0,0639	0,0631	0,0896	50,8	0,148	0,1679	0,1601	0,0728	50,8	0,156
36	0,0689	0,0637	0,0642	50,8	0,141	0,1923	0,1552	0,0928	50,8	0,120

Из данных таблицы можно сделать вывод, что вибрация без дефекта в первой точке измерения меньше в 2,5 – 3,5 раза чем с дефектом рабочего колеса.

Применяем метод главных компонент к данным вибрации лабораторного исследования без дефекта (таблица 4.2) и дефектом импеллера (таблица 4.3) в точке №2.

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист 71
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 4.6

Величина вибрации при понижении размерности без дефекта во второй точке измерения

№ пп	Без дефекта				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,0643	0,0625	0,0855	-0,66262	0,097859
2	0,0638	0,0638	0,0782	-0,66672	0,091858
3	0,0664	0,0657	0,0852	-0,6599	0,09543
4	0,0679	0,0653	0,0922	-0,65492	0,100376
5	0,0647	0,0614	0,0854	-0,663	0,09798
6	0,0686	0,0646	0,0824	-0,66083	0,092527
7	0,0637	0,0638	0,0879	-0,66086	0,099585
8	0,0661	0,0659	0,0784	-0,66414	0,090124
9	0,0684	0,0658	0,0846	-0,659	0,093933
10	0,066	0,0648	0,0887	-0,65847	0,098723
11	0,0658	0,0644	0,0771	-0,66587	0,089784
12	0,0678	0,0661	0,0715	-0,66721	0,083752
13	0,068	0,0677	0,0721	-0,66591	0,08355
14	0,0664	0,0647	0,0726	-0,6681	0,085818
15	0,0677	0,0659	0,0879	-0,65736	0,096854
16	0,065	0,063	0,0825	-0,66377	0,094958
17	0,0649	0,0653	0,0779	-0,66548	0,090536
18	0,0659	0,0653	0,0742	-0,66713	0,087114
19	0,0678	0,0667	0,0902	-0,65549	0,098337
20	0,0668	0,0651	0,0895	-0,65734	0,098853
21	0,0664	0,0652	0,0813	-0,66254	0,092524
22	0,0685	0,0657	0,0763	-0,66406	0,08735
23	0,069	0,0647	0,0761	-0,66439	0,087307
24	0,068	0,0655	0,0837	-0,65995	0,093526
25	0,066	0,0646	0,0814	-0,66303	0,093017
26	0,0649	0,0657	0,0901	-0,65783	0,100048
27	0,0669	0,0678	0,079	-0,66232	0,089518
28	0,0667	0,0642	0,092	-0,65633	0,101206
29	0,066	0,0647	0,0833	-0,66182	0,094485
30	0,0674	0,0663	0,0724	-0,6668	0,084589
31	0,0677	0,0655	0,0817	-0,66135	0,092091
32	0,0701	0,0639	0,0845	-0,659	0,093702
33	0,0668	0,0653	0,0668	-0,6711	0,080813
34	0,0652	0,0653	0,0671	-0,67189	0,08184
35	0,0663	0,066	0,0878	-0,65823	0,097429
36	0,0687	0,0667	0,0705	-0,66697	0,0823

Таблица 4.7

Величина вибрации при понижении размерности с дефектом рабочего колеса во второй точке

№ пп	Дефект рабочего колеса				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,1721	0,1588	0,2332	-0,45804	0,126842

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист 72
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

№ пп	Дефект рабочего колеса				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
2	0,166	0,1611	0,1796	-0,49329	0,086593
3	0,1675	0,1851	0,1892	-0,47434	0,084785
4	0,1888	0,1627	0,1622	-0,48924	0,061002
5	0,1624	0,1634	0,1751	-0,49706	0,083975
6	0,1675	0,1629	0,1695	-0,49763	0,077209
7	0,1677	0,1622	0,1915	-0,48444	0,094777
8	0,1738	0,1839	0,1827	-0,47509	0,076967
9	0,1826	0,1422	0,1663	-0,50091	0,074707
10	0,1842	0,1546	0,1799	-0,48534	0,080205
11	0,1733	0,1831	0,189	-0,47195	0,082489
12	0,1826	0,1599	0,1767	-0,48558	0,076547
13	0,1725	0,1648	0,1622	-0,49808	0,06828
14	0,1742	0,1679	0,1729	-0,48895	0,074791
15	0,165	0,1505	0,1519	-0,51619	0,068989
16	0,1652	0,1532	0,1667	-0,50566	0,07963
17	0,1645	0,1656	0,1729	-0,49601	0,080404
18	0,1684	0,1533	0,1673	-0,5033	0,078491
19	0,1679	0,1847	0,1822	-0,47858	0,079191
20	0,1843	0,1828	0,1739	-0,47463	0,065222
21	0,1689	0,1775	0,1666	-0,49114	0,068951
22	0,172	0,1794	0,1763	-0,48237	0,074414
23	0,1708	0,1692	0,1621	-0,49695	0,06745
24	0,1737	0,1843	0,1991	-0,46494	0,089853
25	0,1952	0,149	0,1853	-0,4782	0,081078
26	0,1877	0,1745	0,1859	-0,46945	0,076042
27	0,1669	0,1708	0,1922	-0,48013	0,09262
28	0,1866	0,1645	0,1631	-0,48911	0,062149
29	0,185	0,1506	0,1825	-0,4853	0,083313
30	0,1755	0,1887	0,1578	-0,48682	0,054687
31	0,1816	0,1531	0,1825	-0,4861	0,084086
32	0,1822	0,1641	0,1992	-0,46996	0,093037
33	0,1791	0,1666	0,1633	-0,49249	0,065246
34	0,1705	0,1605	0,1777	-0,49202	0,083087
35	0,1624	0,1581	0,1721	-0,50158	0,083515
36	0,1654	0,1447	0,1825	-0,50021	0,095107

Далее для сравнения вибрационных данных необходимо построить график в двумерных данных PC1 от PC2 рисунок 17.

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		73

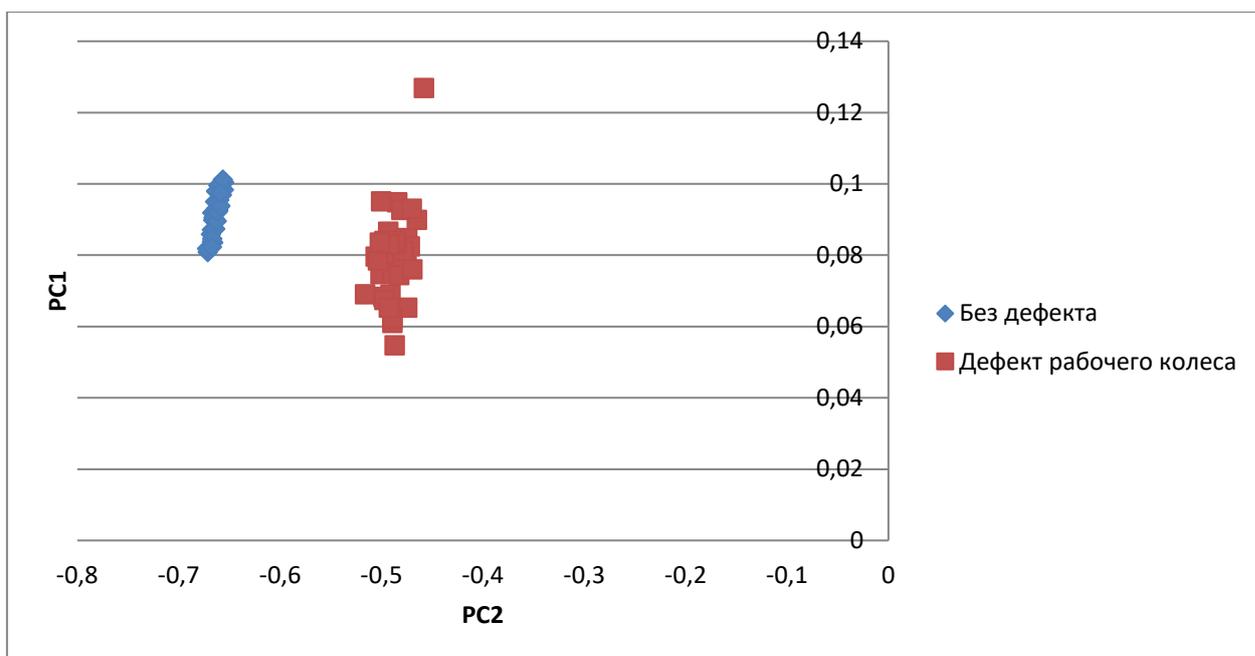


Рисунок 17 - Графическое представление двумерных данных PC1, PC2

Таблица 4.8

Величина вибрации при понижении размерности без дефекта в третьей точке измерения

№ пп	Без дефекта				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,0662	0,0631	0,0721	-0,66934	0,086099
2	0,0664	0,0626	0,0898	-0,65867	0,100191
3	0,0675	0,0643	0,0826	-0,66153	0,093336
4	0,0644	0,0634	0,0919	-0,6582	0,10255
5	0,0673	0,0636	0,0662	-0,67202	0,080706
6	0,0674	0,0664	0,0659	-0,67072	0,079408
7	0,0672	0,0644	0,0812	-0,66252	0,092339
8	0,0665	0,0623	0,0745	-0,6681	0,08814
9	0,0662	0,0625	0,0812	-0,66409	0,093518
10	0,0656	0,0641	0,084	-0,66194	0,095453
11	0,0688	0,064	0,078	-0,6637	0,089162
12	0,0661	0,0666	0,0936	-0,6545	0,101902
13	0,0673	0,0605	0,0773	-0,66682	0,090611
14	0,0668	0,0635	0,0699	-0,67012	0,083917
15	0,0682	0,0627	0,0603	-0,67553	0,075917
16	0,0676	0,0642	0,0922	-0,65566	0,100921
17	0,0684	0,0613	0,0952	-0,65482	0,103949
18	0,0632	0,0643	0,0795	-0,66604	0,093002
19	0,0651	0,0652	0,0823	-0,66272	0,093956
20	0,0661	0,0637	0,0866	-0,66025	0,097409
21	0,0679	0,0617	0,0686	-0,67115	0,082996
22	0,0673	0,0616	0,0812	-0,66388	0,093301
23	0,064	0,0627	0,0769	-0,66795	0,091127
24	0,066	0,0626	0,0683	-0,67204	0,08337
25	0,0665	0,0622	0,0567	-0,67902	0,074087
26	0,0685	0,0624	0,0899	-0,65743	0,099307

№ п/п	Без дефекта				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
27	0,0651	0,0629	0,0916	-0,65821	0,102148
28	0,0672	0,0625	0,0893	-0,65854	0,099437
29	0,0636	0,0618	0,0792	-0,66725	0,09347
30	0,0664	0,0641	0,084	-0,66145	0,095058
31	0,066	0,0647	0,0787	-0,66462	0,090844
32	0,0682	0,0628	0,0756	-0,66614	0,087992
33	0,0693	0,065	0,0853	-0,65844	0,094332
34	0,0678	0,0638	0,0722	-0,66795	0,085136
35	0,0639	0,0631	0,0896	-0,66006	0,101085
36	0,0689	0,0637	0,0642	-0,67222	0,078298

Таблица 4.9

Величина вибрации при понижении размерности с дефектом рабочего колеса в третьей точке

№ п/п	Дефект рабочего колеса				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,1647	0,1751	0,0818	-0,54667	0,004767
2	0,164	0,1905	0,0774	-0,54197	-0,00393
3	0,1595	0,1673	0,0755	-0,55764	0,005161
4	0,1909	0,1765	0,0958	-0,52148	0,002426
5	0,166	0,1643	0,0789	-0,55314	0,005731
6	0,1739	0,1629	0,0766	-0,55045	0,000521
7	0,1576	0,1543	0,0808	-0,56216	0,014987
8	0,1757	0,1461	0,079	-0,55641	0,0076
9	0,1541	0,1713	0,0827	-0,5545	0,012078
10	0,15	0,1645	0,0771	-0,56386	0,012122
11	0,1652	0,1954	0,0765	-0,5393	-0,00701
12	0,1727	0,1756	0,0789	-0,54333	-0,00165
13	0,1789	0,1484	0,0796	-0,55293	0,005667
14	0,1759	0,1673	0,0865	-0,54095	0,005782
15	0,1848	0,163	0,0803	-0,54151	-0,00196
16	0,1752	0,1687	0,077	-0,54647	-0,0019
17	0,1793	0,1554	0,0836	-0,54669	0,006108
18	0,1835	0,1636	0,0839	-0,5398	0,001313
19	0,1528	0,1716	0,0865	-0,55282	0,015618
20	0,1703	0,1662	0,0732	-0,55304	-0,00159
21	0,1555	0,1651	0,0779	-0,55973	0,009827
22	0,174	0,1584	0,0893	-0,54492	0,012149
23	0,1635	0,1607	0,071	-0,5613	0,00201
24	0,1628	0,1679	0,0752	-0,55551	0,00308
25	0,1861	0,1758	0,0901	-0,52824	0,000533
26	0,1802	0,1599	0,0863	-0,54222	0,006176
27	0,1653	0,1565	0,0734	-0,56088	0,004539
28	0,163	0,166	0,0803	-0,55324	0,007704
29	0,1748	0,1646	0,0748	-0,55013	-0,00196
30	0,169	0,189	0,0993	-0,52632	0,011479
31	0,167	0,1486	0,0795	-0,56013	0,011383
32	0,1685	0,18	0,0918	-0,53577	0,009039
33	0,1747	0,151	0,0967	-0,54373	0,020334
34	0,1763	0,1675	0,0792	-0,54506	-0,00027
35	0,1679	0,1601	0,0728	-0,55783	0,001483
36	0,1923	0,1552	0,0928	-0,53327	0,007053

Далее для сравнения вибрационных данных необходимо построить график в двумерных данных PC1 от PC2 рисунок 18.

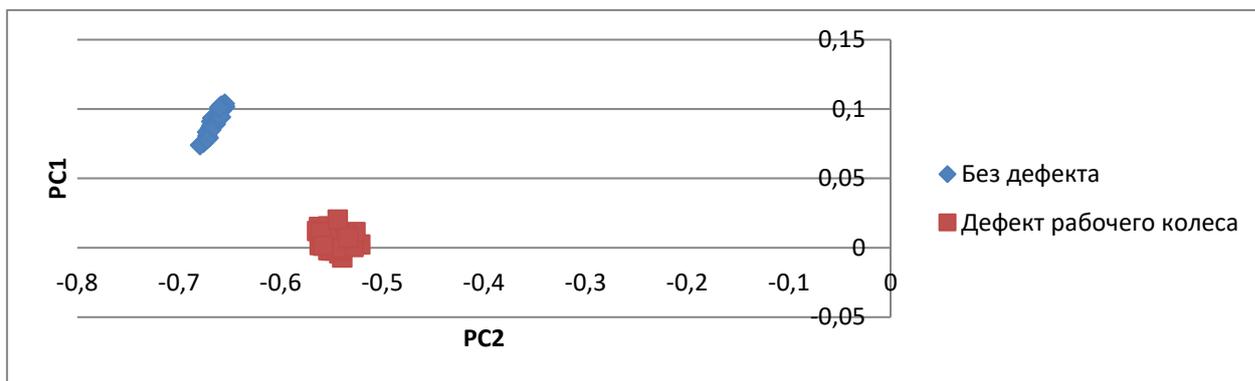
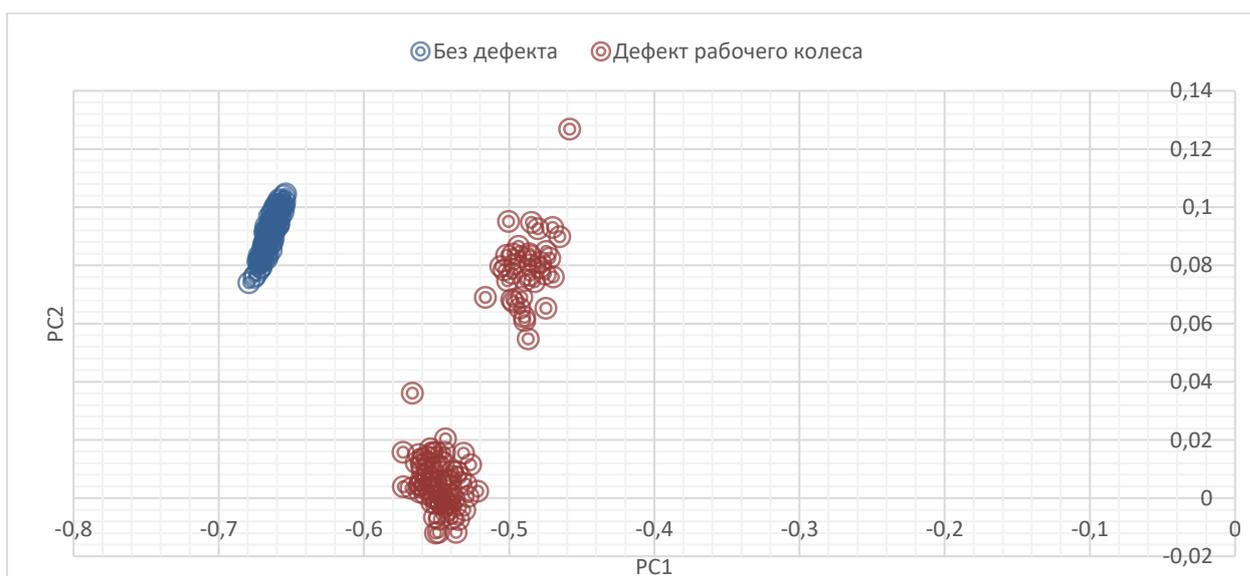


Рисунок 18 - Графическое представление двумерных данных PC1, PC2

Далее построим график вибрационных данных для трёх точек измерения рисунок 19.



Вывод: по данным области диаграммы видна аналогия, вибрация лабораторного стенда без дефекта находится в одной области. При дефекте рабочего колеса точки находятся в другой области, при этом вибрация в сравнении отличается в 2-3 порядка. При появлении дебаланса установки происходит повышение динамических нагрузок. При этом температура в точках измерения увеличивается с 39-41° С до 45-48° С. Также повышается токовая нагрузка, в конечном итоге это приводит к дополнительным затратам энергии, повышению вибрации и понижению энергетического эффекта.

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
						76
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Рекомендации: Устранить дефект рабочего колеса (заменить рабочее колесо или отремонтировать дефектное) и сбалансировать центробежную установку.

### **3.2 Сравнение результатов исследования. Вибрационная диагностика в центробежной установке при дефекте подшипника.**

Долговечность, надежность и диагностика – взаимосвязанные параметры, определяющие техническое состояние машин и механизмов в целом. Различные параметры подшипников, подшипниковых узлов и роторных систем можно оценивать различными методами и проверять как стандартными, так и специализированными устройствами, и приборами. В нашем случае был использован прибор АДП – 3101. Методами диагностирования подшипниковых узлов, как и других систем, являются: визуальный контроль; статистическая диагностика; динамическая диагностика; система тестовой диагностики [4]. На данный момент существуют подшипники, которые по сложности не уступают целым узлам.

На данном лабораторном стенде установлены подшипники марки 6204Z. Направление воспринимаемых нагрузок – радиальное и осевое в обе стороны. Осевое – до 70% неиспользованной допустимой радиальной нагрузки. Защитная шайба предохраняет подшипник от утечки смазки и проникновения пыли и грязи в полость подшипника, с одной стороны. Количество шариков 8, внутренний диаметр подшипника 20 мм, наружный диаметр 47 мм, ширина 14 мм.

Рассмотрен случай дефекта подшипника на первом подшипниковом узле. Подшипник был деформирован при помощи давления на стенку. Для данного эксперимента необходимо получить данные вибрационной диагностики при дефекте подшипника (первый подшипниковый узел). Для сравнения были измерены данные вибрации в рабочем состоянии центробежной установки в трёх точках измерения. Данные измерения вибрации без дефекта центробежной установки и с дефектом подшипника приведены в таблице 4.10.

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
						77
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 4.10

## Величина вибрации на электродвигателе

№ пп	Без дефекта					Дефект подшипника				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, В	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, В
1	0,0639	0,0623	0,0775	50,9	0,658	0,7262	0,6527	1,7591	50,8	0,7262
2	0,0649	0,0623	0,0827	50,9	0,490	0,7198	0,6631	1,7684	50,8	0,7198
3	0,0642	0,0652	0,0731	50,9	0,529	0,7242	0,6694	1,7638	50,8	0,7242
4	0,0658	0,0638	0,079	50,8	0,530	0,7266	0,6765	1,7783	50,8	0,7266
5	0,0671	0,0645	0,0613	50,8	0,658	0,7185	0,6791	1,7784	50,8	0,7185
6	0,0664	0,0633	0,0748	50,9	0,588	0,7146	0,6775	1,7907	50,8	0,7146
7	0,0689	0,0642	0,0656	50,8	0,636	0,7311	0,678	1,8132	50,8	0,7311
8	0,0668	0,0642	0,0678	50,8	0,621	0,7266	0,6723	1,8071	50,8	0,7266
9	0,068	0,0631	0,0805	50,8	0,630	0,7266	0,6764	1,8267	50,8	0,7266
10	0,068	0,0626	0,0834	50,8	0,639	0,7275	0,6778	1,8261	50,8	0,7275
11	0,0671	0,0618	0,0811	50,8	0,426	0,6984	0,7104	1,8442	50,8	0,6984
12	0,0687	0,0621	0,0907	50,8	0,387	0,7361	0,7184	1,838	50,8	0,7361
13	0,0657	0,0648	0,0788	50,8	0,409	0,7448	0,7215	1,8193	50,8	0,7448
14	0,0641	0,0611	0,0833	50,8	0,390	0,743	0,7077	1,832	50,8	0,743
15	0,0642	0,0622	0,0876	50,8	0,381	0,743	0,7053	1,8537	50,8	0,743
16	0,0692	0,0672	0,0747	50,8	0,373	0,7306	0,7044	1,8783	50,8	0,7306
17	0,067	0,0609	0,0816	50,8	0,364	0,7479	0,7067	1,8959	50,8	0,7479
18	0,0678	0,0636	0,0684	50,8	0,355	0,7426	0,7116	1,8945	50,8	0,7426
19	0,0656	0,0625	0,0898	50,8	0,346	0,7325	0,712	1,8901	50,8	0,7325
20	0,0658	0,0651	0,0827	50,8	0,337	0,7346	0,7077	1,8715	50,8	0,7346
21	0,0679	0,0625	0,0857	50,9	0,328	0,7356	0,7089	1,8985	50,8	0,7356
22	0,0659	0,0623	0,0815	50,7	0,319	0,7365	0,7068	1,893	50,8	0,7365
23	0,0649	0,0656	0,0864	50,8	0,310	0,7376	0,7119	1,899	50,8	0,7376
24	0,0657	0,0653	0,073	50,8	0,301	0,7299	0,7073	1,9226	50,8	0,7299
25	0,0663	0,0631	0,0662	50,7	0,292	0,7276	0,7098	1,9082	50,8	0,7276
26	0,0663	0,0648	0,0962	50,7	0,283	0,7329	0,7064	1,9089	50,8	0,7329
27	0,0639	0,0646	0,0821	50,7	0,274	0,7383	0,7082	1,9016	50,8	0,7383
28	0,0677	0,0637	0,0806	50,7	0,265	0,7436	0,7115	1,9165	50,8	0,7436
29	0,0657	0,0618	0,0899	50,8	0,256	0,7477	0,6974	1,9027	50,8	0,7477
30	0,0679	0,0658	0,0687	50,7	0,247	0,7437	0,7099	1,9887	50,8	0,7437
31	0,0644	0,0656	0,0874	50,7	0,238	0,7384	0,7055	1,8871	50,8	0,7384
32	0,0679	0,0622	0,0727	50,7	0,229	0,7501	0,6961	1,8976	50,8	0,7501
33	0,0677	0,0639	0,0811	50,7	0,220	0,7425	0,7034	1,8813	50,8	0,7425
34	0,0665	0,0645	0,0803	50,7	0,211	0,7424	0,6931	1,8735	50,8	0,7424
35	0,0686	0,0636	0,0741	50,7	0,202	0,7412	0,7018	1,8771	50,8	0,7412
36	0,0678	0,0675	0,0776	50,7	0,193	0,7434	0,7045	1,8857	50,8	0,7434

Из данных таблицы можно сделать вывод, что вибрация с дефектом в первой точке измерения выше в 10 – 11 раз по оси X и Y чем с дефектом подшипника, а осевая вибрация возрастает на 24 порядка.

Применяем метод главных компонент к данным вибрации лабораторного исследования без дефекта (таблица 4.11) и дефектом импеллера (таблица 4.12).

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
						78
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 4.11

Величина вибрации при понижении размерности без дефекта в первой точке

№ пп	Без дефекта				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,0639	0,0623	0,0775	-0,66785	0,091796
2	0,0649	0,0623	0,0827	-0,66407	0,095419
3	0,0642	0,0652	0,0731	-0,66888	0,087118
4	0,0658	0,0638	0,079	-0,66502	0,091505
5	0,0671	0,0645	0,0613	-0,67468	0,076601
6	0,0664	0,0633	0,0748	-0,66747	0,088065
7	0,0689	0,0642	0,0656	-0,67111	0,079226
8	0,0668	0,0642	0,0678	-0,67104	0,082002
9	0,068	0,0631	0,0805	-0,66312	0,09186
10	0,068	0,0626	0,0834	-0,6616	0,094336
11	0,0671	0,0618	0,0811	-0,66396	0,093248
12	0,0687	0,0621	0,0907	-0,65698	0,09995
13	0,0657	0,0648	0,0788	-0,66469	0,091035
14	0,0641	0,0611	0,0833	-0,6648	0,096722
15	0,0642	0,0622	0,0876	-0,66155	0,099679
16	0,0692	0,0672	0,0747	-0,66385	0,085197
17	0,067	0,0609	0,0816	-0,66417	0,094018
18	0,0678	0,0636	0,0684	-0,67037	0,082201
19	0,0656	0,0625	0,0898	-0,65921	0,100621
20	0,0658	0,0651	0,0827	-0,6621	0,093964
21	0,0679	0,0625	0,0857	-0,66031	0,096242
22	0,0659	0,0623	0,0815	-0,66419	0,093976
23	0,0649	0,0656	0,0864	-0,66014	0,097156
24	0,0657	0,0653	0,073	-0,66798	0,086263
25	0,0663	0,0631	0,0662	-0,67288	0,08138
26	0,0663	0,0648	0,0962	-0,65371	0,104511
27	0,0639	0,0646	0,0821	-0,66388	0,094606
28	0,0677	0,0637	0,0806	-0,66294	0,091871
29	0,0657	0,0618	0,0899	-0,65944	0,100904
30	0,0679	0,0658	0,0687	-0,66901	0,081594
31	0,0644	0,0656	0,0874	-0,65983	0,098194
32	0,0679	0,0622	0,0727	-0,6684	0,086061
33	0,0677	0,0639	0,0811	-0,66253	0,092194
34	0,0665	0,0645	0,0803	-0,66344	0,091936
35	0,0686	0,0636	0,0741	-0,66641	0,086318
36	0,0678	0,0675	0,0776	-0,66278	0,088074

Таблица 4.12

Величина вибрации при понижении размерности с дефектным подшипником в первой точке

№ пп	Дефект подшипника				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,7262	0,6527	1,7591	1,06098	0,883083
2	0,7198	0,6631	1,7684	1,068042	0,889843
3	0,7242	0,6694	1,7638	1,071108	0,881758
4	0,7266	0,6765	1,7783	1,085021	0,889488
5	0,7185	0,6791	1,7784	1,081475	0,892621
6	0,7146	0,6775	1,7907	1,085799	0,904858

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист 79
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

№ пп	Дефект подшипника				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
7	0,7311	0,678	1,8132	1,109821	0,914351
8	0,7266	0,6723	1,8071	1,100468	0,9138
9	0,7266	0,6764	1,8267	1,114512	0,927833
10	0,7275	0,6778	1,8261	1,115404	0,926409
11	0,6984	0,7104	1,8442	1,125298	0,94331
12	0,7361	0,7184	1,838	1,148502	0,916926
13	0,7448	0,7215	1,8193	1,143953	0,896716
14	0,743	0,7077	1,832	1,143606	0,912639
15	0,743	0,7053	1,8537	1,155633	0,930682
16	0,7306	0,7044	1,8783	1,16265	0,956592
17	0,7479	0,7067	1,8959	1,185081	0,961163
18	0,7426	0,7116	1,8945	1,18349	0,960899
19	0,7325	0,712	1,8901	1,174865	0,962251
20	0,7346	0,7077	1,8715	1,162607	0,948046
21	0,7356	0,7089	1,8985	1,180304	0,968491
22	0,7365	0,7068	1,893	1,176429	0,964452
23	0,7376	0,7119	1,899	1,183348	0,966817
24	0,7299	0,7073	1,9226	1,190736	0,990955
25	0,7276	0,7098	1,9082	1,181816	0,979788
26	0,7329	0,7064	1,9089	1,183741	0,978957
27	0,7383	0,7082	1,9016	1,183483	0,969866
28	0,7436	0,7115	1,9165	1,197476	0,977855
29	0,7477	0,6974	1,9027	1,184391	0,970003
30	0,7437	0,7099	1,9887	1,240794	1,035532
31	0,7384	0,7055	1,8871	1,173323	0,959315
32	0,7501	0,6961	1,8976	1,182078	0,965252
33	0,7425	0,7034	1,8813	1,171211	0,953461
34	0,7424	0,6931	1,8735	1,161162	0,951056
35	0,7412	0,7018	1,8771	1,167045	0,951355
36	0,7434	0,7045	1,8857	1,175002	0,956103

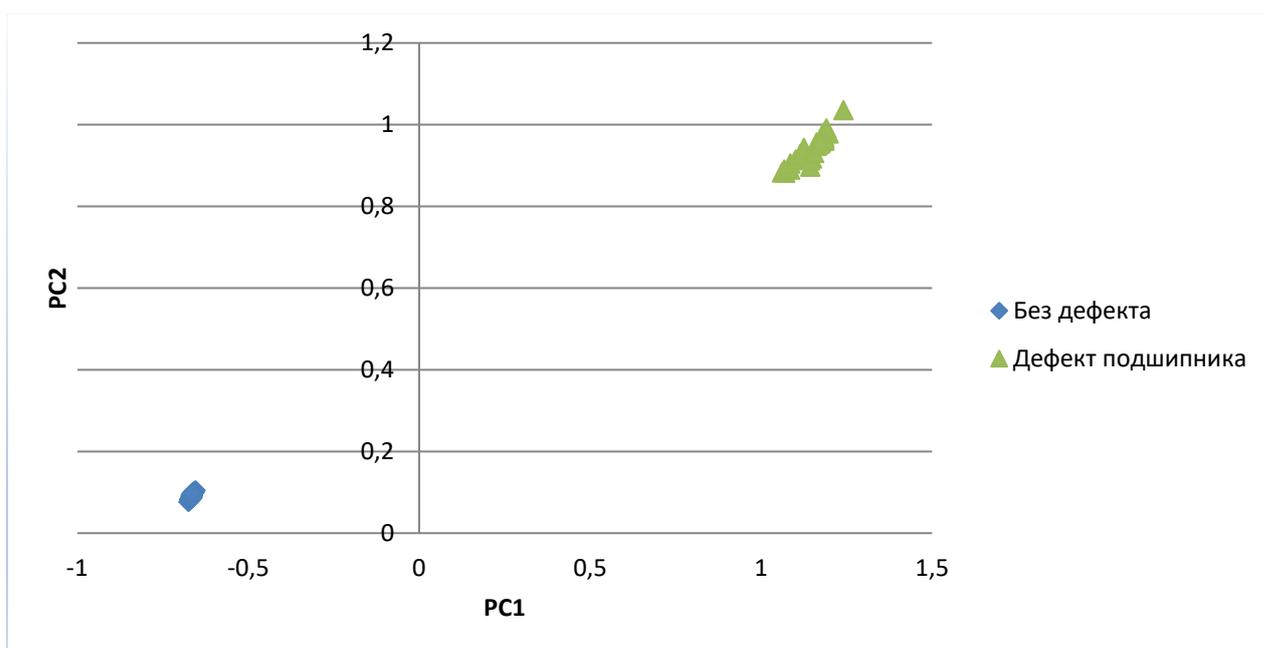


Рисунок 19 - Графическое представление двумерных данных PC1, PC2

					Определение совокупности диагностических признаков	Лист
					технического состояния центробежных насосных агрегатов	80
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

По аналогии сделаем те же шаги для второй точки измерения (первый подшипниковый узел и третьей точки измерения (второй подшипниковый узел). Данные измерения вибрации без дефекта и с дефектом подшипника центробежной установки во второй точке измерения приведены в таблице 3.13.

Таблица 4.13

Величина вибрации на первом подшипниковом узле

№ пп	Без дефекта					Дефект подшипника				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, B	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, B
1	0,0643	0,0625	0,0855	50,8	0,546	0,6178	0,4094	0,581	50,8	1,057
2	0,0638	0,0638	0,0782	50,8	0,480	0,5919	0,4116	0,5773	50,8	1,601
3	0,0664	0,0657	0,0852	50,8	0,561	0,5801	0,4005	0,59	50,8	2,387
4	0,0679	0,0653	0,0922	50,8	0,498	0,5854	0,3986	0,594	50,8	1,547
5	0,0647	0,0614	0,0854	50,8	0,408	0,5888	0,4027	0,5898	50,8	1,095
6	0,0686	0,0646	0,0824	50,8	0,405	0,5759	0,3901	0,5886	50,8	0,876
7	0,0637	0,0638	0,0879	50,8	0,380	0,5914	0,4076	0,5871	50,8	1,159
8	0,0661	0,0659	0,0784	50,8	0,354	0,5759	0,3976	0,5995	50,8	1,953
9	0,0684	0,0658	0,0846	50,8	0,325	0,5816	0,412	0,6056	50,8	1,380
10	0,066	0,0648	0,0887	50,8	0,297	0,6057	0,3993	0,5993	50,8	0,703
11	0,0658	0,0644	0,0771	50,8	0,302	0,6067	0,4032	0,5984	50,8	0,965
12	0,0678	0,0661	0,0715	50,7	0,307	0,605	0,4165	0,5949	50,8	0,837
13	0,068	0,0677	0,0721	50,7	0,313	0,6224	0,4178	0,5965	50,8	0,781
14	0,0664	0,0647	0,0726	50,7	0,318	0,6214	0,4129	0,5942	50,8	0,970
15	0,0677	0,0659	0,0879	50,7	0,323	0,6057	0,4032	0,5921	50,8	1,108
16	0,065	0,063	0,0825	50,8	0,329	0,5804	0,4092	0,5967	50,8	1,280
17	0,0649	0,0653	0,0779	50,7	0,334	0,5945	0,3996	0,5923	50,8	1,444
18	0,0659	0,0653	0,0742	50,8	0,340	0,5742	0,4	0,5993	50,8	1,607
19	0,0678	0,0667	0,0902	50,8	0,345	0,5816	0,3891	0,6056	50,8	1,771
20	0,0668	0,0651	0,0895	50,8	0,350	0,5782	0,3911	0,6058	50,8	1,934
21	0,0664	0,0652	0,0813	50,8	0,387	0,5868	0,3896	0,6101	50,8	2,098
22	0,0685	0,0657	0,0763	50,7	0,440	0,5802	0,3963	0,6053	50,8	2,261
23	0,069	0,0647	0,0761	50,7	0,482	0,5891	0,392	0,6117	50,8	2,380
24	0,068	0,0655	0,0837	50,8	0,527	0,5933	0,3914	0,6154	50,8	2,559
25	0,066	0,0646	0,0814	50,8	0,489	0,5955	0,3994	0,6155	50,8	0,972
26	0,0649	0,0657	0,0901	50,7	0,450	0,5941	0,3915	0,6025	50,8	0,735
27	0,0669	0,0678	0,079	50,7	0,411	0,6014	0,3914	0,5938	50,8	1,013
28	0,0667	0,0642	0,092	50,8	0,372	0,595	0,3965	0,6034	50,8	1,291
29	0,066	0,0647	0,0833	50,7	0,333	0,5966	0,3945	0,6099	50,8	1,569
30	0,0674	0,0663	0,0724	50,7	0,294	0,6086	0,3868	0,5984	50,8	1,098
31	0,0677	0,0655	0,0817	50,7	0,255	0,6076	0,398	0,6032	50,8	1,020
32	0,0701	0,0639	0,0845	50,7	0,216	0,5659	0,3902	0,6045	50,8	1,103
33	0,0668	0,0653	0,0668	50,7	0,177	0,5649	0,3909	0,6023	50,8	1,186
34	0,0652	0,0653	0,0671	50,8	0,138	0,5785	0,3968	0,6026	50,8	1,269
35	0,0663	0,066	0,0878	50,7	0,120	0,6023	0,3987	0,5971	50,8	1,352
36	0,0687	0,0667	0,0705	50,8	0,127	0,5921	0,4003	0,599	50,8	1,435

Из данных таблицы можно сделать вывод, что вибрация с дефектом в первой точке измерения выше в 8 – 9 раз по оси X. Вибрация возросла 5,5 – 6 раз по оси Y, а осевая вибрация возрастает на 8 - 9 раз, что гораздо меньше чем на электродвигателе.

Применяем метод главных компонент к данным вибрации лабораторного исследования без дефекта (таблица 4.14) и дефектом импеллера (таблица 4.15).

Таблица 4.14

Величина вибрации при понижении размерности без дефекта на первом подшипниковом узле

№ п/п	Без дефекта				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,0643	0,0625	0,0855	-0,66262	0,097859
2	0,0638	0,0638	0,0782	-0,66672	0,091858
3	0,0664	0,0657	0,0852	-0,6599	0,09543
4	0,0679	0,0653	0,0922	-0,65492	0,100376
5	0,0647	0,0614	0,0854	-0,663	0,09798
6	0,0686	0,0646	0,0824	-0,66083	0,092527
7	0,0637	0,0638	0,0879	-0,66086	0,099585
8	0,0661	0,0659	0,0784	-0,66414	0,090124
9	0,0684	0,0658	0,0846	-0,659	0,093933
10	0,066	0,0648	0,0887	-0,65847	0,098723
11	0,0658	0,0644	0,0771	-0,66587	0,089784
12	0,0678	0,0661	0,0715	-0,66721	0,083752
13	0,068	0,0677	0,0721	-0,66591	0,08355
14	0,0664	0,0647	0,0726	-0,6681	0,085818
15	0,0677	0,0659	0,0879	-0,65736	0,096854
16	0,065	0,063	0,0825	-0,66377	0,094958
17	0,0649	0,0653	0,0779	-0,66548	0,090536
18	0,0659	0,0653	0,0742	-0,66713	0,087114
19	0,0678	0,0667	0,0902	-0,65549	0,098337
20	0,0668	0,0651	0,0895	-0,65734	0,098853
21	0,0664	0,0652	0,0813	-0,66254	0,092524
22	0,0685	0,0657	0,0763	-0,66406	0,08735
23	0,069	0,0647	0,0761	-0,66439	0,087307
24	0,068	0,0655	0,0837	-0,65995	0,093526
25	0,066	0,0646	0,0814	-0,66303	0,093017
26	0,0649	0,0657	0,0901	-0,65783	0,100048
27	0,0669	0,0678	0,079	-0,66232	0,089518
28	0,0667	0,0642	0,092	-0,65633	0,101206
29	0,066	0,0647	0,0833	-0,66182	0,094485
30	0,0674	0,0663	0,0724	-0,6668	0,084589
31	0,0677	0,0655	0,0817	-0,66135	0,092091
32	0,0701	0,0639	0,0845	-0,659	0,093702
33	0,0668	0,0653	0,0668	-0,6711	0,080813
34	0,0652	0,0653	0,0671	-0,67189	0,08184
35	0,0663	0,066	0,0878	-0,65823	0,097429
36	0,0687	0,0667	0,0705	-0,66697	0,0823

					Определение совокупности диагностических признаков	Лист
					технического состояния центробежных насосных агрегатов	82
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 4.15

Величина вибрации при понижении размерности с дефектным подшипником на первом подшипниковом узле

№ пп	Дефект подшипника				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,6178	0,4094	0,581	0,152499	0,091895
2	0,5919	0,4116	0,5773	0,135605	0,100941
3	0,5801	0,4005	0,59	0,130547	0,120819
4	0,5854	0,3986	0,594	0,135248	0,122059
5	0,5888	0,4027	0,5898	0,136833	0,115577
6	0,5759	0,3901	0,5886	0,12186	0,125538
7	0,5914	0,4076	0,5871	0,139253	0,110389
8	0,5759	0,3976	0,5995	0,132319	0,131457
9	0,5816	0,412	0,6056	0,146817	0,128275
10	0,6057	0,3993	0,5993	0,151184	0,115993
11	0,6067	0,4032	0,5984	0,153222	0,113379
12	0,605	0,4165	0,5949	0,156802	0,106643
13	0,6224	0,4178	0,5965	0,16902	0,098862
14	0,6214	0,4129	0,5942	0,164522	0,099304
15	0,6057	0,4032	0,5921	0,148768	0,108885
16	0,5804	0,4092	0,5967	0,139234	0,122833
17	0,5945	0,3996	0,5923	0,140252	0,115865
18	0,5742	0,4	0,5993	0,132381	0,13127
19	0,5816	0,3891	0,6056	0,135195	0,136545
20	0,5782	0,3911	0,6058	0,134265	0,137657
21	0,5868	0,3896	0,6101	0,141358	0,137362
22	0,5802	0,3963	0,6053	0,137815	0,134397
23	0,5891	0,392	0,6117	0,144952	0,136628
24	0,5933	0,3914	0,6154	0,14946	0,137703
25	0,5955	0,3994	0,6155	0,154919	0,133808
26	0,5941	0,3915	0,6025	0,142124	0,127061
27	0,6014	0,3914	0,5938	0,141202	0,116612
28	0,595	0,3965	0,6034	0,145758	0,125524
29	0,5966	0,3945	0,6099	0,149683	0,130603
30	0,6086	0,3868	0,5984	0,146055	0,118365
31	0,6076	0,398	0,6032	0,15406	0,118612
32	0,5659	0,3902	0,6045	0,125534	0,143017
33	0,5649	0,3909	0,6023	0,123938	0,141516
34	0,5785	0,3968	0,6026	0,135387	0,132918
35	0,6023	0,3987	0,5971	0,147469	0,116144
36	0,5921	0,4003	0,599	0,143237	0,122099

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		83

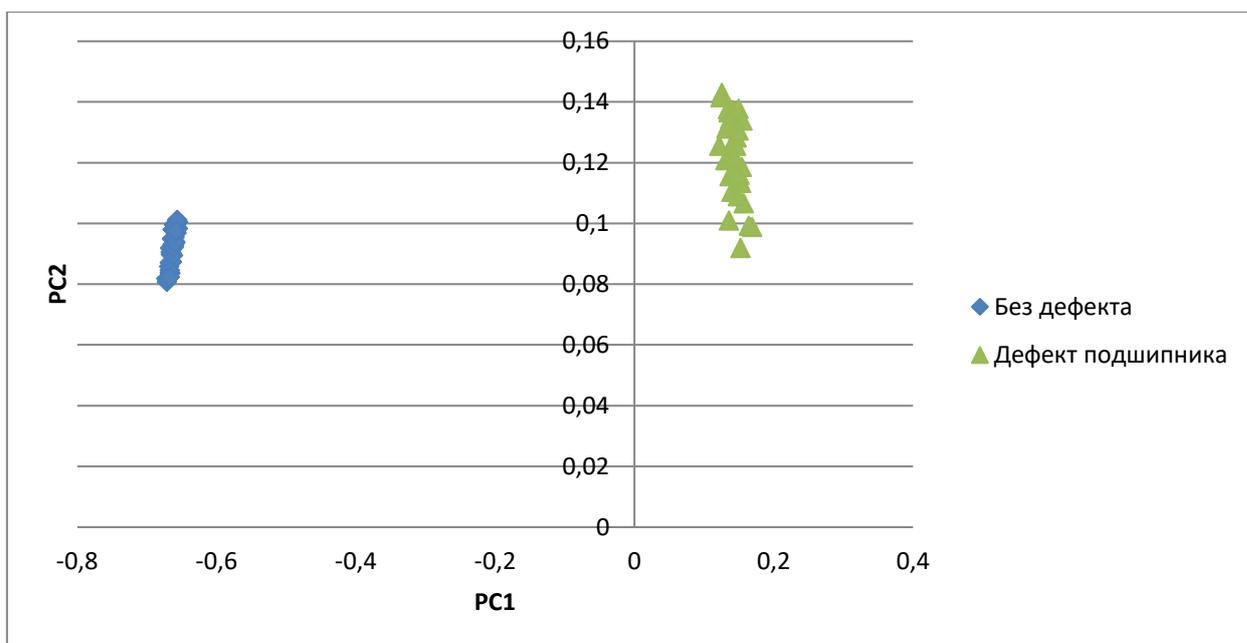


Рисунок 20 - Графическое представление двумерных данных PC1, PC2

Таблица 4.16

Величина вибрации при понижении размерности без дефекта в третьей точке измерения

№ пп	Без дефекта				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,0662	0,0631	0,0721	-0,66934	0,086099
2	0,0664	0,0626	0,0898	-0,65867	0,100191
3	0,0675	0,0643	0,0826	-0,66153	0,093336
4	0,0644	0,0634	0,0919	-0,6582	0,10255
5	0,0673	0,0636	0,0662	-0,67202	0,080706
6	0,0674	0,0664	0,0659	-0,67072	0,079408
7	0,0672	0,0644	0,0812	-0,66252	0,092339
8	0,0665	0,0623	0,0745	-0,6681	0,08814
9	0,0662	0,0625	0,0812	-0,66409	0,093518
10	0,0656	0,0641	0,084	-0,66194	0,095453
11	0,0688	0,064	0,078	-0,6637	0,089162
12	0,0661	0,0666	0,0936	-0,6545	0,101902
13	0,0673	0,0605	0,0773	-0,66682	0,090611
14	0,0668	0,0635	0,0699	-0,67012	0,083917
15	0,0682	0,0627	0,0603	-0,67553	0,075917
16	0,0676	0,0642	0,0922	-0,65566	0,100921
17	0,0684	0,0613	0,0952	-0,65482	0,103949
18	0,0632	0,0643	0,0795	-0,66604	0,093002
19	0,0651	0,0652	0,0823	-0,66272	0,093956
20	0,0661	0,0637	0,0866	-0,66025	0,097409
21	0,0679	0,0617	0,0686	-0,67115	0,082996
22	0,0673	0,0616	0,0812	-0,66388	0,093301
23	0,064	0,0627	0,0769	-0,66795	0,091127
24	0,066	0,0626	0,0683	-0,67204	0,08337
25	0,0665	0,0622	0,0567	-0,67902	0,074087
26	0,0685	0,0624	0,0899	-0,65743	0,099307
27	0,0651	0,0629	0,0916	-0,65821	0,102148

№ пп	Без дефекта				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
28	0,0672	0,0625	0,0893	-0,65854	0,099437
29	0,0636	0,0618	0,0792	-0,66725	0,09347
30	0,0664	0,0641	0,084	-0,66145	0,095058
31	0,066	0,0647	0,0787	-0,66462	0,090844
32	0,0682	0,0628	0,0756	-0,66614	0,087992
33	0,0693	0,065	0,0853	-0,65844	0,094332
34	0,0678	0,0638	0,0722	-0,66795	0,085136
35	0,0639	0,0631	0,0896	-0,66006	0,101085
36	0,0689	0,0637	0,0642	-0,67222	0,078298

Таблица 4.17

Величина вибрации при понижении размерности с дефектом рабочего колеса в третьей точке

№ пп	Дефект подшипника				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	1,15	0,8265	0,4637	0,616257	-0,41397
2	1,2008	0,83	0,4607	0,647098	-0,44265
3	1,238	0,8263	0,4756	0,676939	-0,44786
4	1,2357	0,8399	0,4816	0,686105	-0,44689
5	1,2466	0,8449	0,479	0,693685	-0,45613
6	1,2703	0,8606	0,4972	0,727175	-0,45908
7	1,2507	0,8639	0,4784	0,705454	-0,46548
8	1,2658	0,8593	0,4799	0,713219	-0,47008
9	1,2631	0,8876	0,4874	0,730517	-0,47303
10	1,2869	0,8732	0,4864	0,737073	-0,48036
11	1,2302	0,8477	0,4797	0,685559	-0,4485
12	1,2785	0,858	0,4823	0,721748	-0,47397
13	1,2982	0,863	0,4911	0,741638	-0,47853
14	1,2626	0,8698	0,4925	0,724292	-0,46232
15	1,2824	0,8468	0,4909	0,723685	-0,46504
16	1,2822	0,84	0,4852	0,716634	-0,467
17	1,2537	0,8539	0,4825	0,704706	-0,46011
18	1,3027	0,8606	0,4897	0,742303	-0,48099
19	1,2633	0,8624	0,5067	0,72963	-0,44875
20	1,2941	0,8597	0,512	0,750227	-0,45877
21	1,2619	0,8654	0,5026	0,727798	-0,45239
22	1,2805	0,8629	0,5081	0,741199	-0,45631
23	1,2833	0,8841	0,5139	0,757201	-0,46075
24	1,3465	0,8806	0,5053	0,788613	-0,49745
25	1,2812	0,8813	0,5103	0,752305	-0,46156
26	1,2072	0,7503	0,504	0,636972	-0,38275
27	1,2216	0,7564	0,4965	0,644248	-0,39799
28	1,2864	0,7556	0,5049	0,688379	-0,423
29	1,377	0,8569	0,4925	0,787322	-0,51406
30	1,2526	0,8445	0,4915	0,70476	-0,44905
31	1,2786	0,84	0,4951	0,720487	-0,45739
32	1,2773	0,8521	0,4992	0,728339	-0,45787
33	1,31	0,8384	0,4957	0,739138	-0,47182
34	1,2452	0,8242	0,5094	0,700883	-0,4239
35	1,2624	0,855	0,5038	0,723557	-0,44793
36	1,2795	0,8581	0,5052	0,736385	-0,45638

Далее для сравнения вибрационных данных необходимо построить график в двумерных данных PC1 от PC2 рисунок 21.

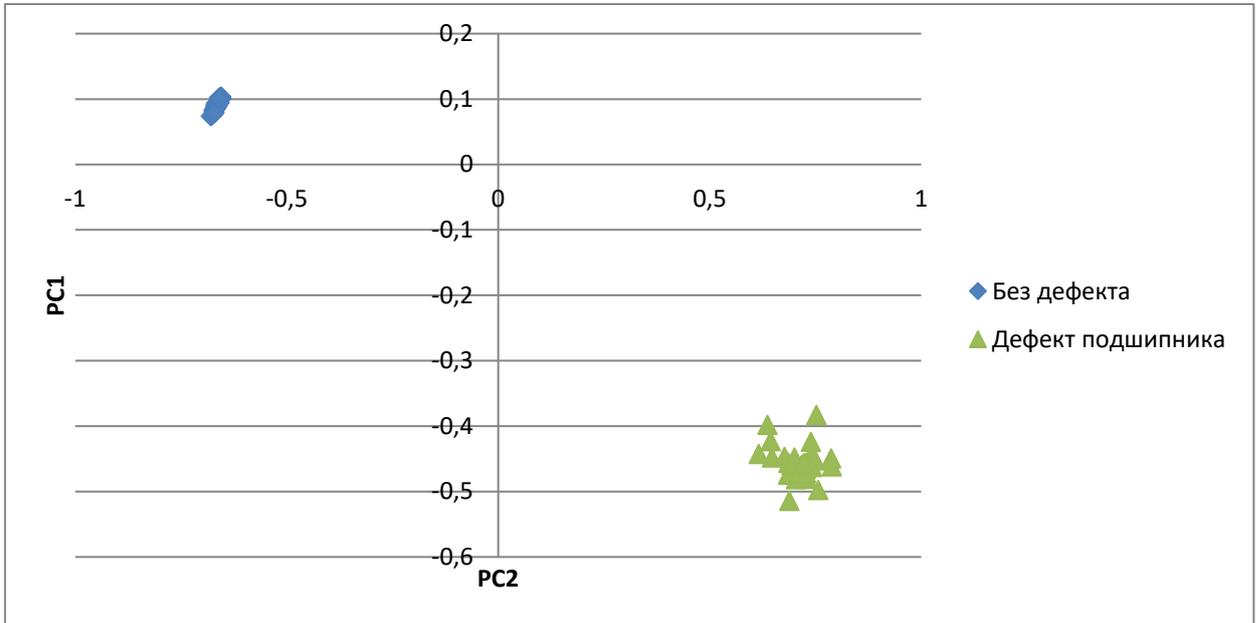


Рисунок 21 - Графическое представление двумерных данных PC1, PC2

Далее построим график вибрационных данных для трёх точек измерения рисунок 22.

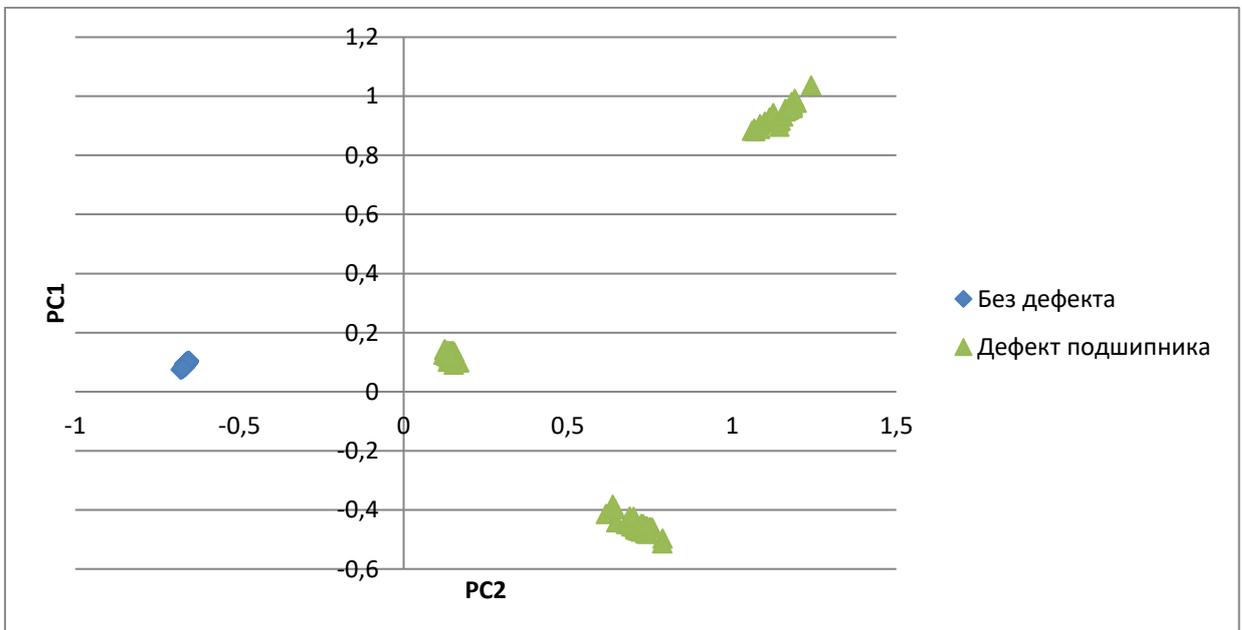


Рисунок 22 - Графическое представление двумерных данных PC1, PC2

Вывод: по данным области диаграммы видна аналогия, вибрация лабораторного стенда без дефекта находится в одной области. При дефекте

рабочего колеса точки находятся в трёх областях, при этом вибрация в сравнении отличается на 8-10 порядков. Вибрационные данные измеренные на первом подшипниковом узле (дефект подшипника был смоделирован на первом подшипниковом узле) более равномерные по трём осям, но в первой точке измерения ярко выражена осевая вибрация, которая может привести к выводу из строя ротора электродвигателя. В третьей же точке ярко больше выражена горизонтальная вибрация, которая может также вывести из строя второй подшипник качения и опорную стойку подшипникового узла. Было замечено что первый подшипниковый узел и стойка данного узла подвергалась обильному нагреванию, что плохо влияет на смазку подшипника. Температура данного узла возросла за час работы установки до 76<sup>0</sup>С. При нагреве подшипника происходил нагрев вала и рабочего колеса. При нагреве металла втулка рабочего колеса может расширится и добавить вибрацию установке. Также возрастает токовое напряжение из-за преодоления динамических нагрузок, действующих на первый подшипник, это приводит к увеличению затрат энергии, повышению вибрации и понижению энергоэффективности.

Рекомендации: Устранить дефект подшипника в первом подшипниковом узле (заменить подшипник качения) с последующей балансировкой центробежной установки.

### **3.3 Сравнение результатов исследования. Вибрационная диагностика центробежной установки при потере соосности валов центробежной лабораторной установки (расцентровка валов).**

Рассмотрен перекося вала (нарушение соосности). Перекося вала смоделирован на центробежной установке путём перемещения платформы вала рабочего колеса относительно платформы электродвигателя. Для данного эксперимента необходимо получить данные вибрационной диагностики при нарушении соосности. Для сравнения были измерены данные вибрации в рабочем состоянии центробежной установки в трёх точках измерения. Данные

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
						87
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

измерения вибрации без дефекта центробежной установки и с нарушением соосности приведены в таблице 4.18.

Таблица 4.18

Величина вибрации на электродвигателе

№ пп	Без дефекта					Расцентровка валов				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, B	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, B
1	0,0639	0,0623	0,0775	50,9	0,658	0,9727	0,6853	0,4913	50,8	0,780
2	0,0649	0,0623	0,0827	50,9	0,490	0,894	0,586	0,5026	50,8	0,811
3	0,0642	0,0652	0,0731	50,9	0,529	1,1728	0,7791	0,512	50,8	0,698
4	0,0658	0,0638	0,079	50,8	0,530	0,9197	0,5623	0,4988	50,8	0,671
5	0,0671	0,0645	0,0613	50,8	0,658	0,9449	0,6023	0,4986	50,8	0,840
6	0,0664	0,0633	0,0748	50,9	0,588	1,0232	0,6858	0,4879	50,8	0,706
7	0,0689	0,0642	0,0656	50,8	0,636	1,0578	0,7247	0,5103	50,8	0,812
8	0,0668	0,0642	0,0678	50,8	0,621	1,0411	0,7242	0,4983	50,8	0,928
9	0,068	0,0631	0,0805	50,8	0,630	0,9636	0,645	0,4994	50,8	0,574
10	0,068	0,0626	0,0834	50,8	0,639	1,0627	0,7489	0,4893	50,8	0,554
11	0,0671	0,0618	0,0811	50,8	0,426	1,0013	0,7003	0,5103	50,8	0,675
12	0,0687	0,0621	0,0907	50,8	0,387	0,9154	0,5859	0,5068	50,8	0,912
13	0,0657	0,0648	0,0788	50,8	0,409	1,0067	0,7125	0,5021	50,8	0,862
14	0,0641	0,0611	0,0833	50,8	0,390	0,9202	0,603	0,4927	50,8	0,869
15	0,0642	0,0622	0,0876	50,8	0,381	0,9735	0,6486	0,4971	50,8	1,356
16	0,0692	0,0672	0,0747	50,8	0,373	0,9932	0,699	0,4891	50,8	1,304
17	0,067	0,0609	0,0816	50,8	0,364	0,9241	0,5982	0,4971	50,8	1,232
18	0,0678	0,0636	0,0684	50,8	0,355	1,0214	0,721	0,5002	50,8	1,265
19	0,0656	0,0625	0,0898	50,8	0,346	0,9232	0,6124	0,4987	50,8	1,271
20	0,0658	0,0651	0,0827	50,8	0,337	1,0068	0,7126	0,4893	50,8	0,841
21	0,0679	0,0625	0,0857	50,9	0,328	0,997	0,7119	0,5103	50,8	0,838
22	0,0659	0,0623	0,0815	50,7	0,319	1,00918	0,8498	0,5009	50,8	0,479
23	0,0649	0,0656	0,0864	50,8	0,310	1,0119	0,7354	0,4877	50,8	0,442
24	0,0657	0,0653	0,073	50,8	0,301	1,0581	0,8425	0,4939	50,8	0,373
25	0,0663	0,0631	0,0662	50,7	0,292	1,0464	0,7656	0,4815	50,8	0,378
26	0,0663	0,0648	0,0962	50,7	0,283	1,089	0,8621	0,5036	50,8	0,298
27	0,0639	0,0646	0,0821	50,7	0,274	1,0355	0,8037	0,4899	50,8	0,342
28	0,0677	0,0637	0,0806	50,7	0,265	1,0126	0,7645	0,502	50,8	0,442
29	0,0657	0,0618	0,0899	50,8	0,256	1,0782	0,8179	0,505	50,8	0,368
30	0,0679	0,0658	0,0687	50,7	0,247	1,0683	0,8326	0,4832	50,8	0,339
31	0,0644	0,0656	0,0874	50,7	0,238	1,0431	0,8197	0,493	50,8	0,389
32	0,0679	0,0622	0,0727	50,7	0,229	1,0158	0,8001	0,4992	50,8	0,320
33	0,0677	0,0639	0,0811	50,7	0,220	1,0264	0,7876	0,5103	50,8	0,237
34	0,0665	0,0645	0,0803	50,7	0,211	1,0484	0,8156	0,4828	50,8	0,234
35	0,0686	0,0636	0,0741	50,7	0,202	1,0944	0,8604	0,4918	50,8	0,184
36	0,0678	0,0675	0,0776	50,7	0,193	1,0994	0,8653	0,5	50,8	0,122

Из данных таблицы можно сделать вывод, что вибрация с дефектом в первой точке измерения выше в 14 – 15 раз по оси X и в 12-13 раз по оси Y, а осевая вибрация возрастает в 6 - 7 раз. Увеличиваются затраты энергии, так же при расцентровке центробежного лабораторного стенда начинает обильно

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист 88
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

нагреваться муфта соединяющая вал электродвигателя и вал центробежного стэнда до 56° С при часе работы установки.

Применяем метод главных компонент к данным вибрации лабораторного исследования без дефекта (таблица 4.19) и дефектом импеллера (таблица 4.20).

Таблица 4.19

Величина вибрации при понижении размерности без дефекта в первой точке

№ пп	Без дефекта				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,0639	0,0623	0,0775	-0,66785	0,091796
2	0,0649	0,0623	0,0827	-0,66407	0,095419
3	0,0642	0,0652	0,0731	-0,66888	0,087118
4	0,0658	0,0638	0,079	-0,66502	0,091505
5	0,0671	0,0645	0,0613	-0,67468	0,076601
6	0,0664	0,0633	0,0748	-0,66747	0,088065
7	0,0689	0,0642	0,0656	-0,67111	0,079226
8	0,0668	0,0642	0,0678	-0,67104	0,082002
9	0,068	0,0631	0,0805	-0,66312	0,09186
10	0,068	0,0626	0,0834	-0,6616	0,094336
11	0,0671	0,0618	0,0811	-0,66396	0,093248
12	0,0687	0,0621	0,0907	-0,65698	0,09995
13	0,0657	0,0648	0,0788	-0,66469	0,091035
14	0,0641	0,0611	0,0833	-0,6648	0,096722
15	0,0642	0,0622	0,0876	-0,66155	0,099679
16	0,0692	0,0672	0,0747	-0,66385	0,085197
17	0,067	0,0609	0,0816	-0,66417	0,094018
18	0,0678	0,0636	0,0684	-0,67037	0,082201
19	0,0656	0,0625	0,0898	-0,65921	0,100621
20	0,0658	0,0651	0,0827	-0,6621	0,093964
21	0,0679	0,0625	0,0857	-0,66031	0,096242
22	0,0659	0,0623	0,0815	-0,66419	0,093976
23	0,0649	0,0656	0,0864	-0,66014	0,097156
24	0,0657	0,0653	0,073	-0,66798	0,086263
25	0,0663	0,0631	0,0662	-0,67288	0,08138
26	0,0663	0,0648	0,0962	-0,65371	0,104511
27	0,0639	0,0646	0,0821	-0,66388	0,094606
28	0,0677	0,0637	0,0806	-0,66294	0,091871
29	0,0657	0,0618	0,0899	-0,65944	0,100904
30	0,0679	0,0658	0,0687	-0,66901	0,081594
31	0,0644	0,0656	0,0874	-0,65983	0,098194
32	0,0679	0,0622	0,0727	-0,6684	0,086061
33	0,0677	0,0639	0,0811	-0,66253	0,092194
34	0,0665	0,0645	0,0803	-0,66344	0,091936
35	0,0686	0,0636	0,0741	-0,66641	0,086318
36	0,0678	0,0675	0,0776	-0,66278	0,088074

Таблица 4.20

Величина вибрации при понижении размерности с дефектным подшипником в первой точке

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
						89
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

№ пп	Расцентровка валов				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,9727	0,6853	0,4913	0,453613	-0,25372
2	0,894	0,586	0,5026	0,362251	-0,17011
3	1,1728	0,7791	0,512	0,635549	-0,36986
4	0,9197	0,5623	0,4988	0,363534	-0,17723
5	0,9449	0,6023	0,4986	0,399039	-0,20426
6	1,0232	0,6858	0,4879	0,482505	-0,28148
7	1,0578	0,7247	0,5103	0,536962	-0,29486
8	1,0411	0,7242	0,4983	0,519227	-0,29595
9	0,9636	0,645	0,4994	0,43257	-0,22826
10	1,0627	0,7489	0,4893	0,539406	-0,32264
11	1,0013	0,7003	0,5103	0,490217	-0,25819
12	0,9154	0,5859	0,5068	0,377779	-0,1773
13	1,0067	0,7125	0,5021	0,494687	-0,27175
14	0,9202	0,603	0,4927	0,380771	-0,197
15	0,9735	0,6486	0,4971	0,439014	-0,23627
16	0,9932	0,699	0,4891	0,471691	-0,27051
17	0,9241	0,5982	0,4971	0,383392	-0,19371
18	1,0214	0,721	0,5002	0,506782	-0,28357
19	0,9232	0,6124	0,4987	0,391028	-0,19713
20	1,0068	0,7126	0,4893	0,486986	-0,28197
21	0,997	0,7119	0,5103	0,493489	-0,26026
22	1,00918	0,8498	0,5009	0,565143	-0,32351
23	1,0119	0,7354	0,4877	0,500682	-0,29398
24	1,0581	0,8425	0,4939	0,586918	-0,35053
25	1,0464	0,7656	0,4815	0,533207	-0,32681
26	1,089	0,8621	0,5036	0,621579	-0,36517
27	1,0355	0,8037	0,4899	0,551041	-0,32854
28	1,0126	0,7645	0,502	0,524605	-0,29352
29	1,0782	0,8179	0,505	0,593433	-0,34277
30	1,0683	0,8326	0,4832	0,581566	-0,36045
31	1,0431	0,8197	0,493	0,565675	-0,33562
32	1,0158	0,8001	0,4992	0,542909	-0,31017
33	1,0264	0,7876	0,5103	0,549787	-0,3021
34	1,0484	0,8156	0,4828	0,560592	-0,34482
35	1,0944	0,8604	0,4918	0,616798	-0,37656
36	1,0994	0,8653	0,5	0,62733	-0,3743

Строим график зависимости PC1 от PC2 для наглядности рисунок 23. В общем случае сопрягаемые валы имеют сложное взаимное смещение. Различают два основных вида расцентровки: угловая (торцевая) – излом осей; параллельная (радиальная) – параллельное смещение осей. В данном случае была нарушена угловая соосность на 5,3%. Таким образом был образован «излом». В этом случае на опорах подшипников возникает интенсивная вибрация, которая пропорциональна ошибке центровки и массе роторов.

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
						90
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

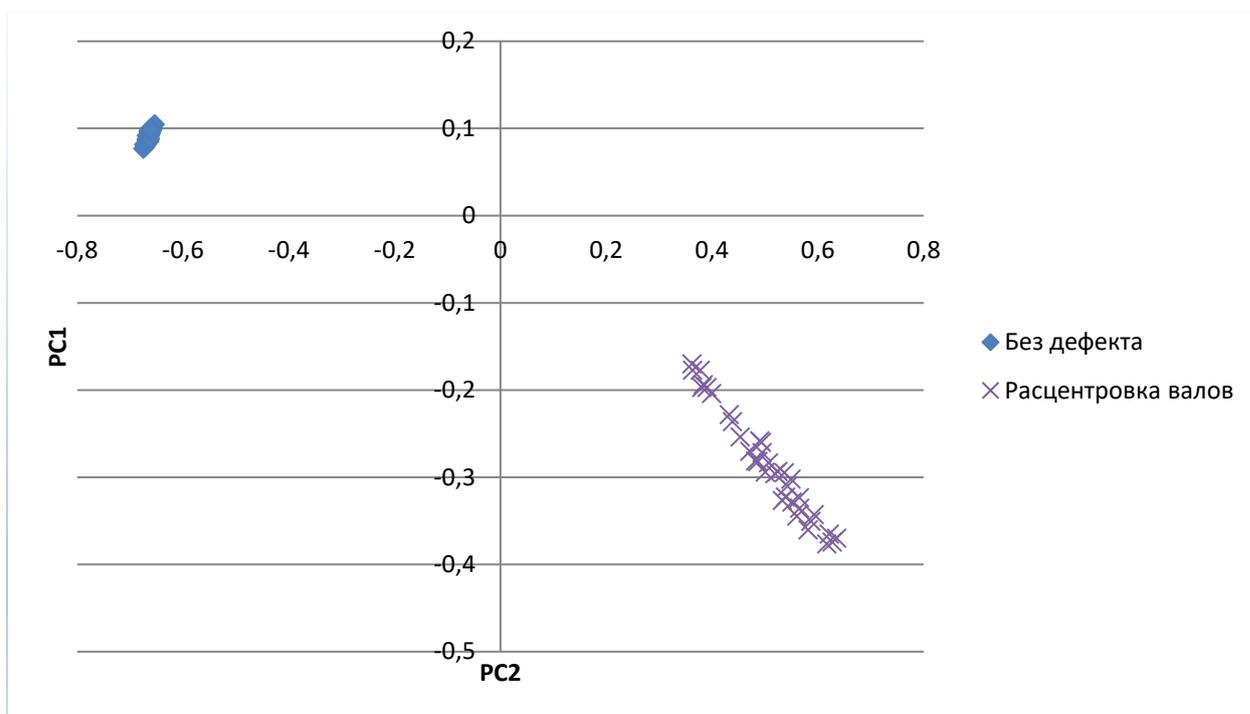


Рисунок 23 - Графическое представление двумерных данных PC1, PC2

По аналогии сделаем те же шаги для второй точки измерения (первый подшипниковый узел и третьей точки измерения (второй подшипниковый узел). Данные измерения вибрации без дефекта и с перекосом вала центробежной установки во второй точке измерения приведены в таблице 4.21.

Таблица 4.21

Величина вибрации на первом подшипниковом узле

№ пп	Без дефекта					Расцентровка валов				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, В	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, В
1	0,0643	0,0625	0,0855	50,8	0,546	0,7712	0,7249	0,5039	50,8	0,730
2	0,0638	0,0638	0,0782	50,8	0,480	0,7393	0,7438	0,4961	50,8	0,965
3	0,0664	0,0657	0,0852	50,8	0,561	0,7333	0,7529	0,4962	50,8	0,837
4	0,0679	0,0653	0,0922	50,8	0,498	0,7329	0,744	0,5061	50,8	0,625
5	0,0647	0,0614	0,0854	50,8	0,408	0,7347	0,7556	0,4981	50,8	0,781
6	0,0686	0,0646	0,0824	50,8	0,405	0,7141	0,7461	0,4936	50,8	0,970
7	0,0637	0,0638	0,0879	50,8	0,380	0,7625	0,7915	0,4877	50,8	1,108
8	0,0661	0,0659	0,0784	50,8	0,354	0,7747	0,7759	0,4891	50,8	0,887
9	0,0684	0,0658	0,0846	50,8	0,325	0,7691	0,7601	0,4922	50,8	0,898
10	0,066	0,0648	0,0887	50,8	0,297	0,8052	0,848	0,4915	50,8	1,483
11	0,0658	0,0644	0,0771	50,8	0,302	0,7826	0,8254	0,4976	50,8	1,259
12	0,0678	0,0661	0,0715	50,7	0,307	0,7487	0,7289	0,4891	50,8	1,311
13	0,068	0,0677	0,0721	50,7	0,313	0,8563	0,7338	0,4986	50,8	1,360
14	0,0664	0,0647	0,0726	50,7	0,318	0,8677	0,721	0,4994	50,8	1,386
15	0,0677	0,0659	0,0879	50,7	0,323	0,8624	0,7444	0,4936	50,8	1,368
16	0,065	0,063	0,0825	50,8	0,329	0,8604	0,7516	0,4979	50,8	1,275

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
						91
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

№ пп	Без дефекта					Расцентровка валов				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, B	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	Hz	V, B
17	0,0649	0,0653	0,0779	50,7	0,334	0,8588	0,7878	0,4878	50,8	1,259
18	0,0659	0,0653	0,0742	50,8	0,340	0,8484	0,7667	0,5021	50,8	2,380
19	0,0678	0,0667	0,0902	50,8	0,345	0,8437	0,7686	0,5013	50,8	2,559
20	0,0668	0,0651	0,0895	50,8	0,350	0,8488	0,7578	0,5143	50,8	0,972
21	0,0664	0,0652	0,0813	50,8	0,387	0,8425	0,7475	0,5271	50,8	0,732
22	0,0685	0,0657	0,0763	50,7	0,440	0,8515	0,7339	0,5485	50,8	1,013
23	0,069	0,0647	0,0761	50,7	0,482	0,841	0,7612	0,5589	50,8	0,655
24	0,068	0,0655	0,0837	50,8	0,527	0,8247	0,8027	0,5318	50,8	0,563
25	0,066	0,0646	0,0814	50,8	0,489	0,8304	0,8689	0,5269	50,8	0,471
26	0,0649	0,0657	0,0901	50,7	0,450	0,8369	0,8304	0,5251	50,8	0,379
27	0,0669	0,0678	0,079	50,7	0,411	0,8568	0,8347	0,5374	50,8	0,576
28	0,0667	0,0642	0,092	50,8	0,372	0,8321	0,8265	0,5261	50,8	0,626
29	0,066	0,0647	0,0833	50,7	0,333	0,8329	0,8163	0,5187	50,8	0,695
30	0,0674	0,0663	0,0724	50,7	0,294	0,8306	0,8064	0,5335	50,8	0,751
31	0,0677	0,0655	0,0817	50,7	0,255	0,8375	0,7724	0,5223	50,8	0,811
32	0,0701	0,0639	0,0845	50,7	0,216	0,848	0,7526	0,5263	50,8	0,870
33	0,0668	0,0653	0,0668	50,7	0,177	0,8569	0,7464	0,5233	50,8	0,930
34	0,0652	0,0653	0,0671	50,8	0,138	0,8725	0,7399	0,518	50,8	0,989
35	0,0663	0,066	0,0878	50,7	0,120	0,8702	0,747	0,5219	50,8	1,049
36	0,0687	0,0667	0,0705	50,8	0,127	0,8749	0,7458	0,5247	50,8	1,108

Из данных таблицы можно сделать вывод, что вибрация с дефектом во второй точке измерения выше в 12,5 – 13 раз по оси X. Вибрация возросла 11 – 11,5 раз по оси Y, а осевая вибрация возрастает на 7 - 8 раз.

Применяем метод главных компонент к данным вибрации лабораторного исследования без дефекта (таблица 4.22) и с изломом вала (таблица 4.23).

Таблица 4.22

Величина вибрации при понижении размерности без дефекта в точке №2

№ пп	Без дефекта				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,0643	0,0625	0,0855	-0,66262	0,097859
2	0,0638	0,0638	0,0782	-0,66672	0,091858
3	0,0664	0,0657	0,0852	-0,6599	0,09543
4	0,0679	0,0653	0,0922	-0,65492	0,100376
5	0,0647	0,0614	0,0854	-0,663	0,09798
6	0,0686	0,0646	0,0824	-0,66083	0,092527
7	0,0637	0,0638	0,0879	-0,66086	0,099585
8	0,0661	0,0659	0,0784	-0,66414	0,090124
9	0,0684	0,0658	0,0846	-0,659	0,093933
10	0,066	0,0648	0,0887	-0,65847	0,098723
11	0,0658	0,0644	0,0771	-0,66587	0,089784
12	0,0678	0,0661	0,0715	-0,66721	0,083752
13	0,068	0,0677	0,0721	-0,66591	0,08355
14	0,0664	0,0647	0,0726	-0,6681	0,085818

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		92

№ пп	Без дефекта				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
15	0,0677	0,0659	0,0879	-0,65736	0,096854
16	0,065	0,063	0,0825	-0,66377	0,094958
17	0,0649	0,0653	0,0779	-0,66548	0,090536
18	0,0659	0,0653	0,0742	-0,66713	0,087114
19	0,0678	0,0667	0,0902	-0,65549	0,098337
20	0,0668	0,0651	0,0895	-0,65734	0,098853
21	0,0664	0,0652	0,0813	-0,66254	0,092524
22	0,0685	0,0657	0,0763	-0,66406	0,08735
23	0,069	0,0647	0,0761	-0,66439	0,087307
24	0,068	0,0655	0,0837	-0,65995	0,093526
25	0,066	0,0646	0,0814	-0,66303	0,093017
26	0,0649	0,0657	0,0901	-0,65783	0,100048
27	0,0669	0,0678	0,079	-0,66232	0,089518
28	0,0667	0,0642	0,092	-0,65633	0,101206
29	0,066	0,0647	0,0833	-0,66182	0,094485
30	0,0674	0,0663	0,0724	-0,6668	0,084589
31	0,0677	0,0655	0,0817	-0,66135	0,092091
32	0,0701	0,0639	0,0845	-0,659	0,093702
33	0,0668	0,0653	0,0668	-0,6711	0,080813
34	0,0652	0,0653	0,0671	-0,67189	0,08184
35	0,0663	0,066	0,0878	-0,65823	0,097429
36	0,0687	0,0667	0,0705	-0,66697	0,0823

Таблица 4.23

Величина вибрации при понижении размерности во второй точке измерения

№ пп	Расцентровка валов				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,7712	0,7249	0,5039	0,358851	-0,1587
2	0,7393	0,7438	0,4961	0,344281	-0,15597
3	0,7333	0,7529	0,4962	0,345311	-0,15622
4	0,7329	0,744	0,5061	0,346594	-0,14497
5	0,7347	0,7556	0,4981	0,348693	-0,15638
6	0,7141	0,7461	0,4936	0,328596	-0,14636
7	0,7625	0,7915	0,4877	0,377472	-0,19128
8	0,7747	0,7759	0,4891	0,377829	-0,19056
9	0,7691	0,7601	0,4922	0,368297	-0,17964
10	0,8052	0,848	0,4915	0,434434	-0,22973
11	0,7826	0,8254	0,4976	0,412943	-0,2056
12	0,7487	0,7289	0,4891	0,338164	-0,16077
13	0,8563	0,7338	0,4986	0,41189	-0,20806
14	0,8677	0,721	0,4994	0,412815	-0,20843
15	0,8624	0,7444	0,4936	0,417927	-0,21886
16	0,8604	0,7516	0,4979	0,422989	-0,21707
17	0,8588	0,7878	0,4878	0,434223	-0,23735
18	0,8484	0,7667	0,5021	0,425918	-0,21328
19	0,8437	0,7686	0,5013	0,423536	-0,21228
20	0,8488	0,7578	0,5143	0,429091	-0,20061
21	0,8425	0,7475	0,5271	0,427845	-0,18365
22	0,8515	0,7339	0,5485	0,439479	-0,16624
23	0,841	0,7612	0,5589	0,453295	-0,16269

№ пп	Расцентровка валов				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
24	0,8247	0,8027	0,5318	0,447902	-0,19109
25	0,8304	0,8689	0,5269	0,481974	-0,22169
26	0,8369	0,8304	0,5251	0,46529	-0,21241
27	0,8568	0,8347	0,5374	0,487083	-0,21404
28	0,8321	0,8265	0,5261	0,461002	-0,20784
29	0,8329	0,8163	0,5187	0,451795	-0,21041
30	0,8306	0,8064	0,5335	0,454406	-0,19399
31	0,8375	0,7724	0,5223	0,434511	-0,19398
32	0,848	0,7526	0,5263	0,43329	-0,18884
33	0,8569	0,7464	0,5233	0,433725	-0,19336
34	0,8725	0,7399	0,518	0,436679	-0,2029
35	0,8702	0,747	0,5219	0,441264	-0,20124
36	0,8749	0,7458	0,5247	0,445223	-0,20091

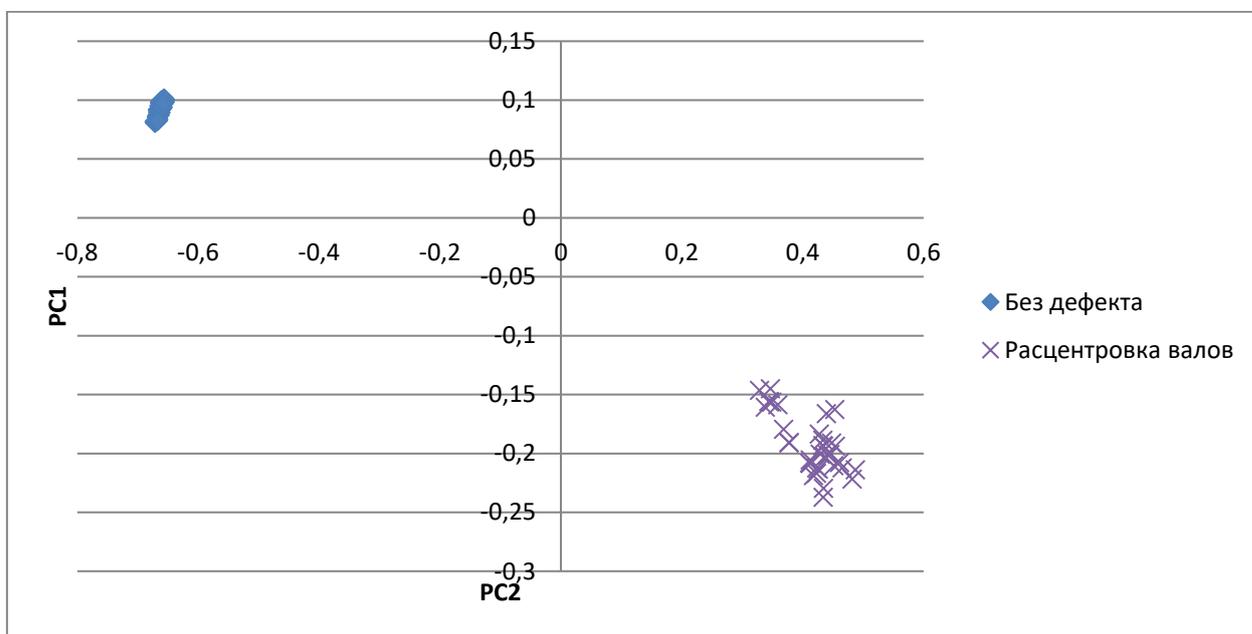


Рисунок 24 - Графическое представление двумерных данных PC1, PC2

Таблица 4.24

Величина вибрации при понижении размерности без дефекта в третьей точке измерения

№ пп	Без дефекта				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,0662	0,0631	0,0721	-0,66934	0,086099
2	0,0664	0,0626	0,0898	-0,65867	0,100191
3	0,0675	0,0643	0,0826	-0,66153	0,093336
4	0,0644	0,0634	0,0919	-0,6582	0,10255
5	0,0673	0,0636	0,0662	-0,67202	0,080706
6	0,0674	0,0664	0,0659	-0,67072	0,079408
7	0,0672	0,0644	0,0812	-0,66252	0,092339
8	0,0665	0,0623	0,0745	-0,6681	0,08814
9	0,0662	0,0625	0,0812	-0,66409	0,093518
10	0,0656	0,0641	0,084	-0,66194	0,095453

№ п/п	Без дефекта				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
11	0,0688	0,064	0,078	-0,6637	0,089162
12	0,0661	0,0666	0,0936	-0,6545	0,101902
13	0,0673	0,0605	0,0773	-0,66682	0,090611
14	0,0668	0,0635	0,0699	-0,67012	0,083917
15	0,0682	0,0627	0,0603	-0,67553	0,075917
16	0,0676	0,0642	0,0922	-0,65566	0,100921
17	0,0684	0,0613	0,0952	-0,65482	0,103949
18	0,0632	0,0643	0,0795	-0,66604	0,093002
19	0,0651	0,0652	0,0823	-0,66272	0,093956
20	0,0661	0,0637	0,0866	-0,66025	0,097409
21	0,0679	0,0617	0,0686	-0,67115	0,082996
22	0,0673	0,0616	0,0812	-0,66388	0,093301
23	0,064	0,0627	0,0769	-0,66795	0,091127
24	0,066	0,0626	0,0683	-0,67204	0,08337
25	0,0665	0,0622	0,0567	-0,67902	0,074087
26	0,0685	0,0624	0,0899	-0,65743	0,099307
27	0,0651	0,0629	0,0916	-0,65821	0,102148
28	0,0672	0,0625	0,0893	-0,65854	0,099437
29	0,0636	0,0618	0,0792	-0,66725	0,09347
30	0,0664	0,0641	0,084	-0,66145	0,095058
31	0,066	0,0647	0,0787	-0,66462	0,090844
32	0,0682	0,0628	0,0756	-0,66614	0,087992
33	0,0693	0,065	0,0853	-0,65844	0,094332
34	0,0678	0,0638	0,0722	-0,66795	0,085136
35	0,0639	0,0631	0,0896	-0,66006	0,101085
36	0,0689	0,0637	0,0642	-0,67222	0,078298

Таблица 4.25

Величина вибрации при понижении размерности с изломом вала в третьей точке

№ п/п	Расцентровка валов				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	1,0307	1,1977	0,4203	0,705595	-0,52356
2	1,0326	1,1875	0,4179	0,700109	-0,52271
3	1,0171	1,1254	0,4119	0,655504	-0,49739
4	1,0142	1,122	0,403	0,646582	-0,50178
5	1,0122	1,125	0,417	0,655434	-0,49079
6	1,0136	1,1263	0,4127	0,65432	-0,49535
7	1,0096	1,1227	0,4155	0,651769	-0,48987
8	1,0098	1,1394	0,4188	0,662381	-0,49338
9	1,007	1,1285	0,412	0,650995	-0,49345
10	1,0123	1,1207	0,4072	0,647331	-0,49705
11	1,0105	1,1134	0,4113	0,645034	-0,49028
12	1,0055	1,1054	0,4047	0,633904	-0,49015
13	1,0014	1,1237	0,4166	0,647961	-0,48531
14	1,0166	1,1793	0,4079	0,680112	-0,51977
15	1,0379	1,0571	0,4113	0,633126	-0,48345
16	1,0365	1,0661	0,4068	0,634095	-0,48957
17	1,0436	1,0942	0,3977	0,647119	-0,51043
18	1,0448	1,0899	0,4185	0,658363	-0,493

№ пп	Расцентровка валов				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
19	1,0454	1,105	0,4137	0,663461	-0,50255
20	1,034	1,0968	0,4245	0,658958	-0,48542
21	1,039	1,1013	0,4213	0,66233	-0,49204
22	1,0457	1,1064	0,4058	0,659532	-0,50946
23	1,109	1,0243	0,4182	0,663933	-0,5012
24	1,0754	1,003	0,4165	0,631651	-0,47829
25	1,0611	1,0066	0,4185	0,626001	-0,47095
26	1,0734	1,0126	0,4153	0,634574	-0,48172
27	1,0626	1,0155	0,4258	0,635886	-0,46913
28	1,0736	1,0171	0,4053	0,630876	-0,49136
29	1,0642	1,0204	0,401	0,624209	-0,49132
30	1,0712	1,0393	0,3957	0,634823	-0,50579
31	1,0622	1,0382	0,3953	0,628547	-0,50127
32	1,0673	1,0499	0,3998	0,640333	-0,50445
33	1,0717	1,048	0,3922	0,637406	-0,51195
34	1,0685	1,0362	0,4019	0,635392	-0,49843
35	1,057	1,0212	0,3948	0,616452	-0,49296
36	1,0594	1,0292	0,3951	0,622154	-0,4968

Далее для сравнения вибрационных данных необходимо построить график в двумерных данных PC1 от PC2 рисунок 25.

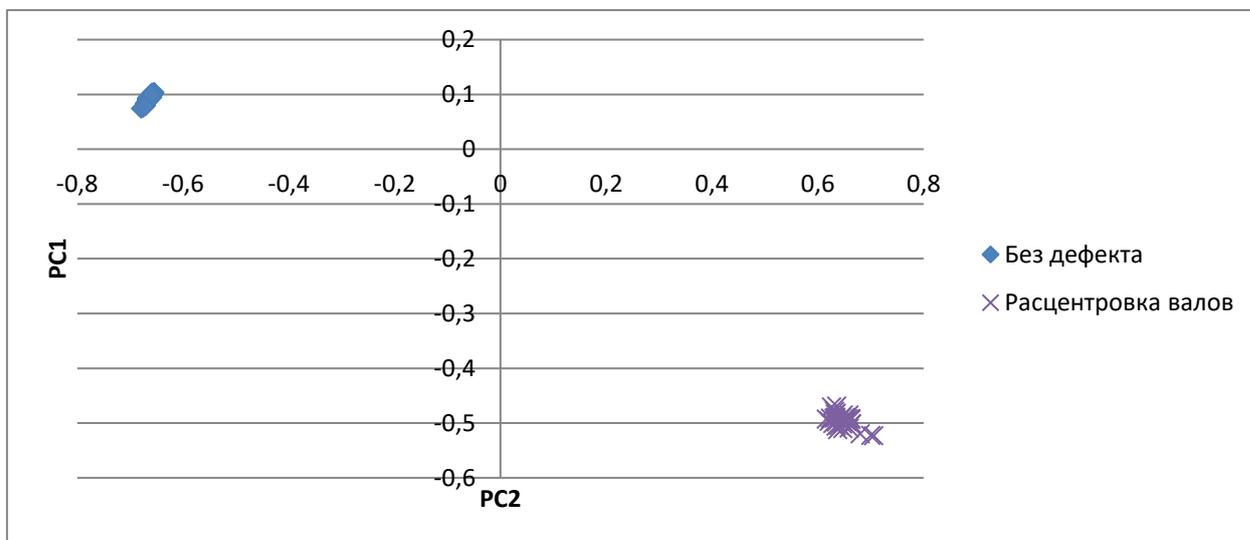


Рисунок 25 - Графическое представление двумерных данных PC1, PC2

Далее построим график вибрационных данных для трёх точек измерения рисунок 26.

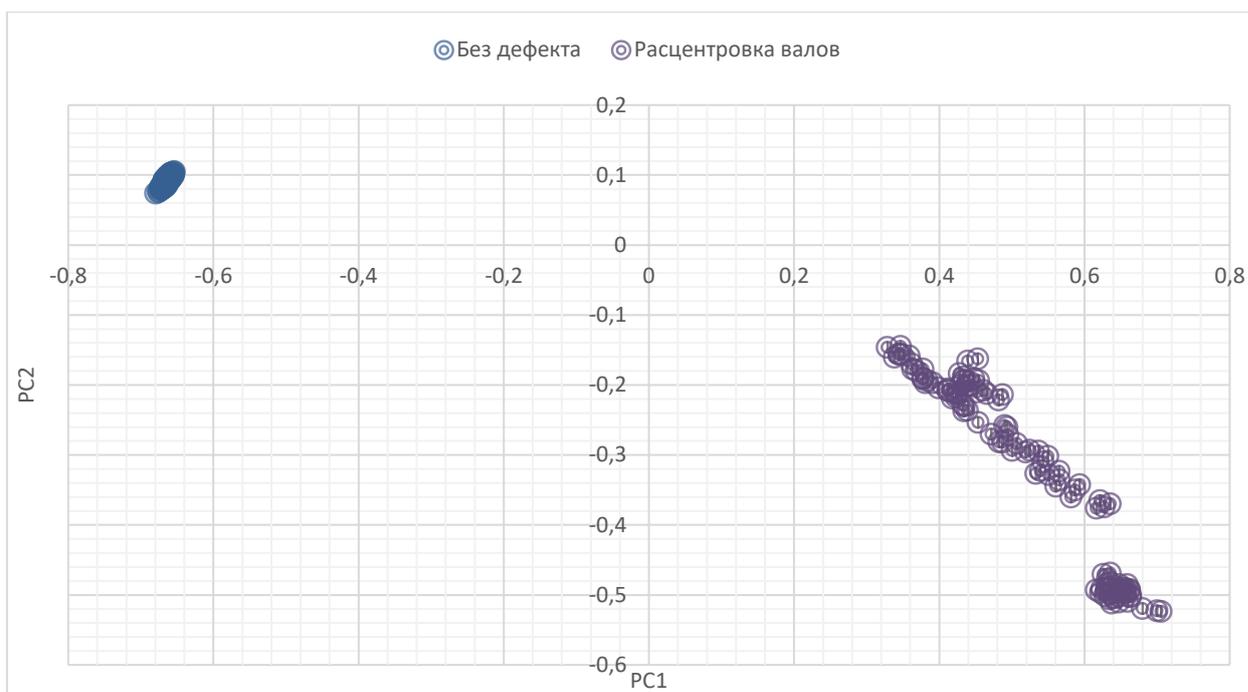


Рисунок 26 - Графическое представление двумерных данных PC1, PC2

Вывод: по данным области диаграммы видна аналогия, вибрация лабораторного стенда без дефекта находится в одной области. При изломе вала точки находятся в двух областях, при этом вибрация в сравнении отличается. Таким образом влияние расцентровки существенно изменяет вибрационное состояние агрегата и нагрузки на вал ротора электродвигателя и вала с рабочим колесом. Также на лабораторном стенде установлена виброгасящая муфта, однако даже с ней вибрация при изломе вала возрастает на несколько порядков.

Рекомендации: Устранить расцентровку вала путём центровки электродвигателя и вала рабочего колеса.

### 3.4 Сравнение результатов исследования вибраций при различных дефектах

Многообразие причин появления дебаланса в ЦНА можно разделить на несколько групп:

- наличие недостаточно прочно закреплённых, дефектных, изношенных деталей узлов;

- неравномерный износ отдельных деталей, появление деформаций после нерасчётных режимов работы, которые приводят к перегреву и ударам;
- искривление ротора, которое возникает из-за нерасчитанного технологического режима;
- появление внутренних дефектов в материалах подшипников и роторов.

Рассмотренные дефекты на лабораторном стенде при должной обработке вибрационных данных позволило скомпоновать дефекты и позволило провести аналогию между измерениями. У каждого дефекта появляется разная вибрация, что при наработке базы данных позволяет определить какой это дефект при меньшем количестве измерений. На рисунке 27 представлены различные дефекты: дефект рабочего колеса центробежной установки (импеллера), дефект подшипника, расцентровка валов.

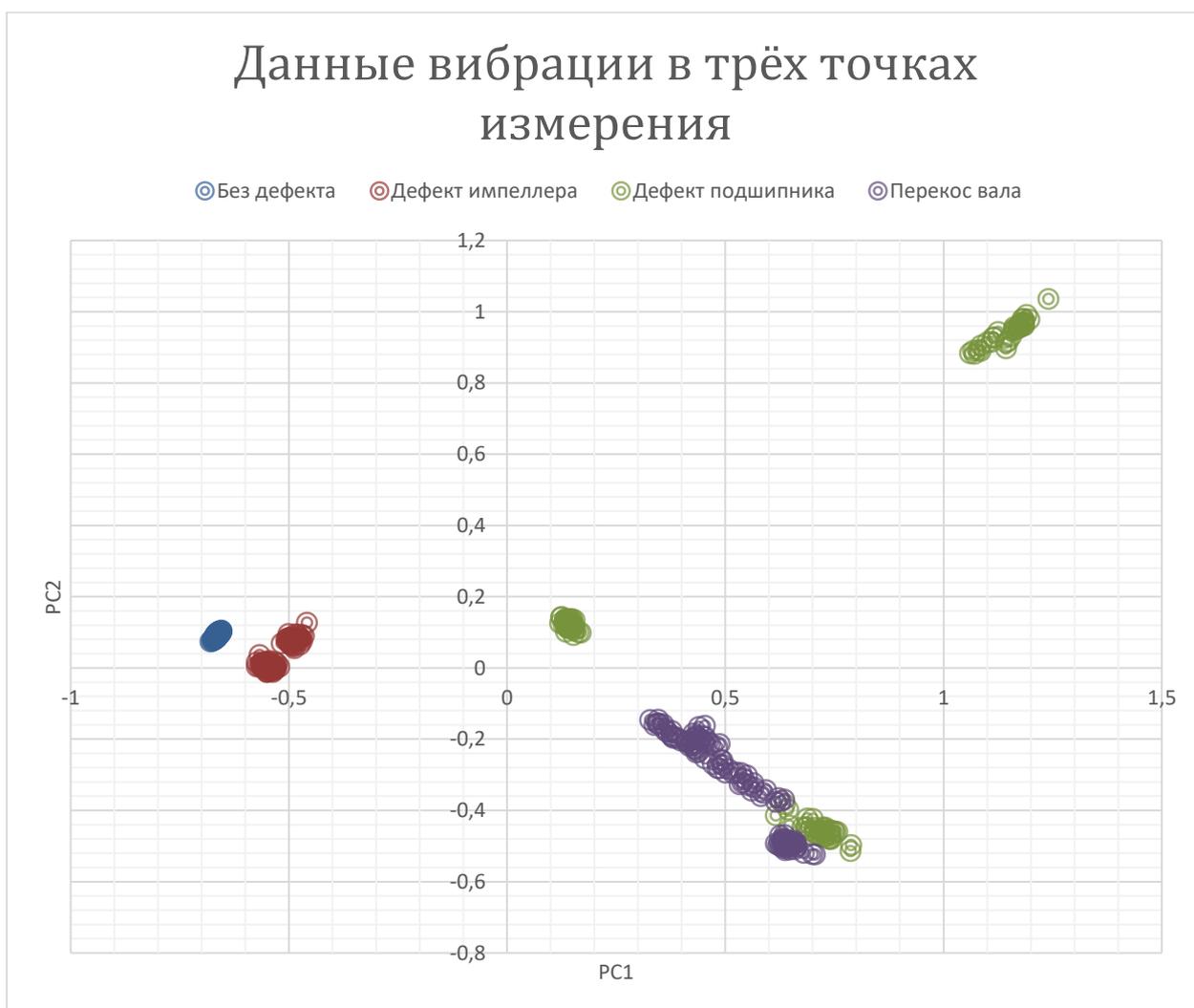


Рисунок 27 - Графическое представление двумерных данных РС1 от РС2 дефектов рабочего колеса, подшипника и перекоса вала (излома)

Из данного графика можно сделать вывод что у разных дефектов своё местонахождение в пространстве. При относительно небольшой длине выборки позволяет нам определить дефект с высокой точностью, что позволит сократить затраты на ремонт оборудования. Если сравнивать данные диаграммы со спектрами частот полученными при анализе вибрации прибором АДП – 3101, то удобней анализировать графики с пониженной размерностью нежели спектральные данные. На рисунке 28 представлен спектр вибрации без дефекта.

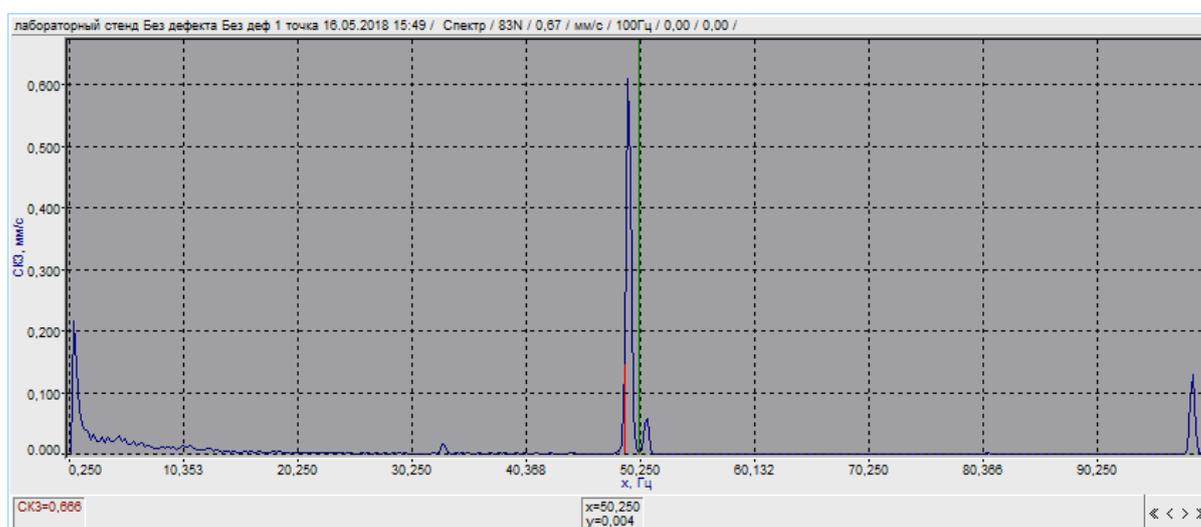


Рисунок 28 – Спектр вибрации без дефекта

На рисунке 15 представлен спектр вибрации в бездефектном состоянии центробежной установки. Первая частотная гармоника, измеренная при 50,8 Гц, имеет незначимый уровень в спектре огибающей. Вибрация незначительна и допускается к эксплуатации центробежной установки без ограничений. На рисунке 29 представлен спектр вибрации с дефектом рабочего колеса, рисунок 30 описывает спектр вибраций при дефекте подшипника, на рисунке 31 представлен спектр вибрации при расцентровке валов.

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
						99
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

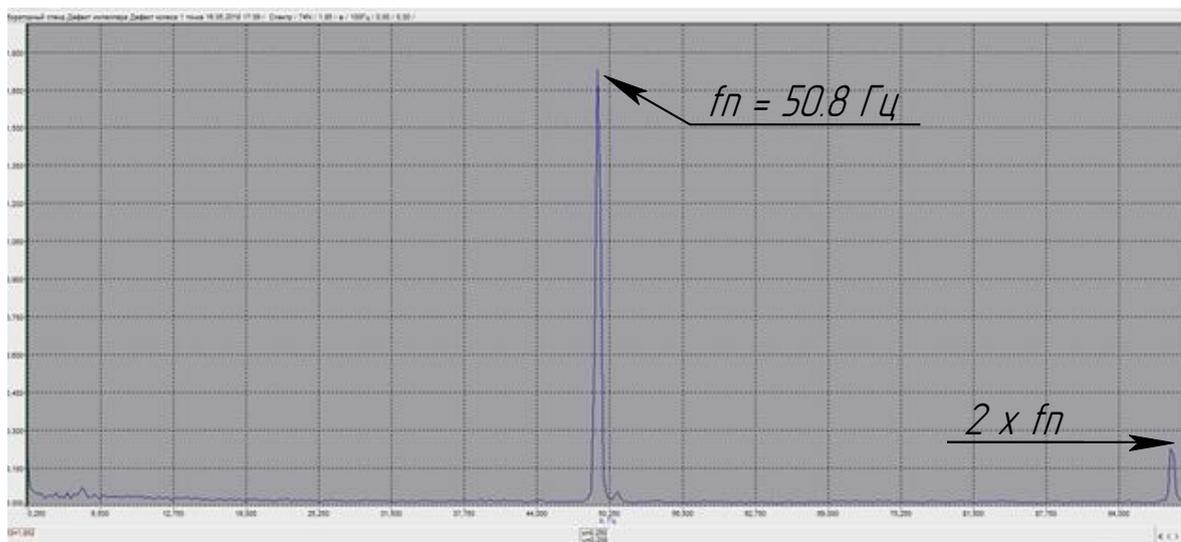


Рисунок 29 – Спектр вибрации при дефекте рабочего колеса

Очень высокий уровень первой гармоники, центр тяжести рабочего колеса смещён относительно его геометрического центра, в результате чего возникает дисбаланс, который проявляется на частоте вращения 50,8 Гц. Необходимо провести балансировку рабочего колеса центробежной установки.

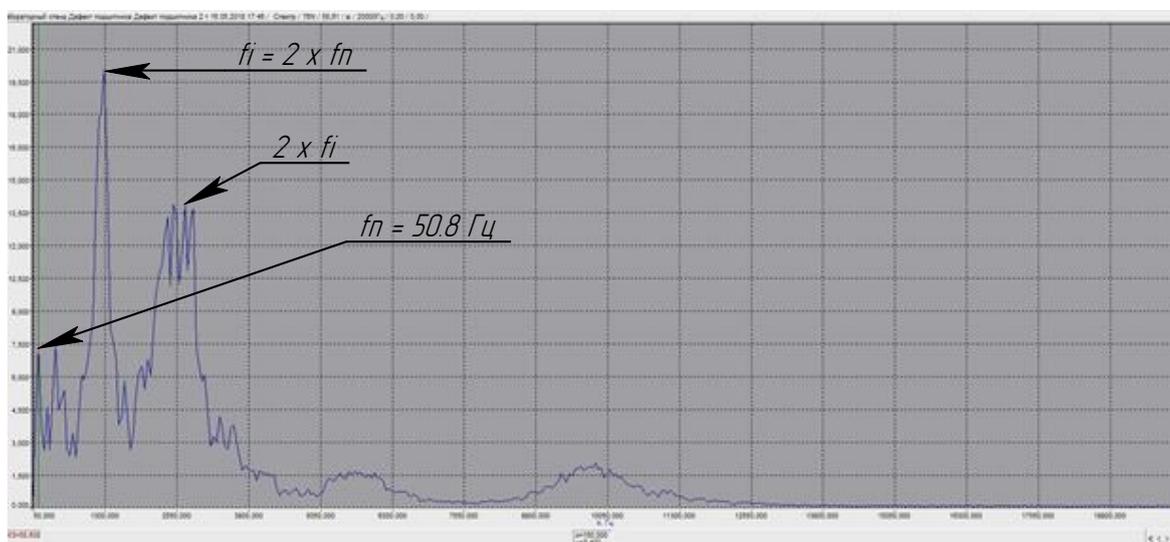


Рисунок 30 – Спектр вибраций при дефекте подшипника

На данном спектре 1 и 2 гармоники имеют значимый уровень в спектре огибающей. На центробежной установке развит дефект нарушения геометрии подшипника, при измерении вибрации подшипник и подшипниковый узел были подвержены обильному нагреванию при трении подшипников о подшипниковую каретку. На спектре боковые полосы вокруг ( $f_i$ ) шагом равным ( $f_n$ ) [ $(f_i - f_n)$  и  $(f_i + f_n)$ ].

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
						100
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Также был развит дефект наружного кольца, который приводил к выдавливанию смазки подшипника. Проявляется бриннелирование дорожек качения, что является следствием пластических деформаций металла в местах выемок, которые возникают вследствие напряжения металла. Необходимо заменить подшипник на первом подшипниковом узле.

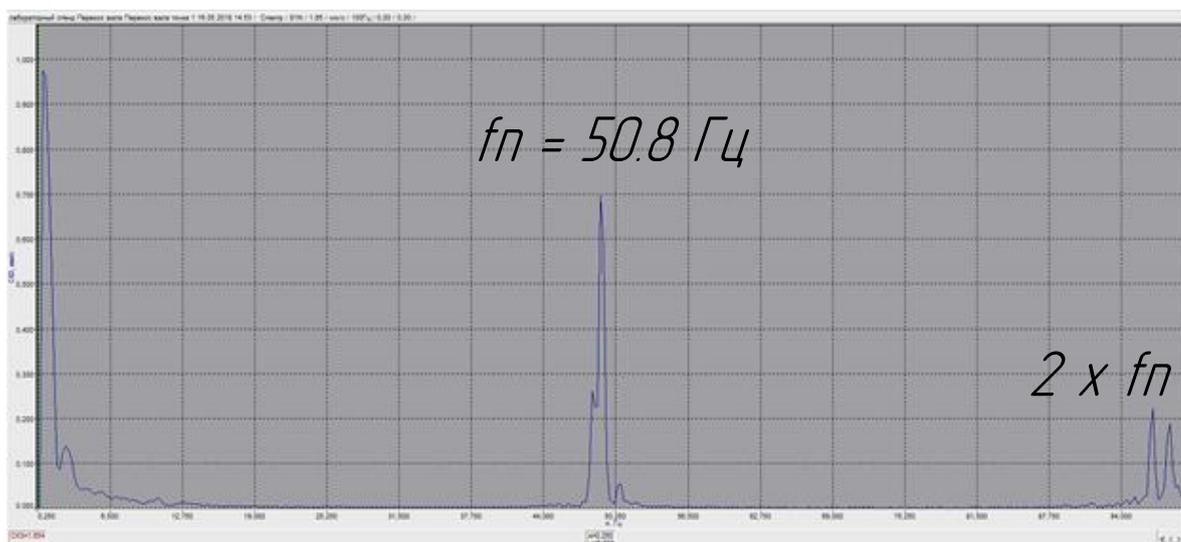


Рисунок 31 – Спектр вибраций при расцентровке валов

Первая и третья гармоники имеют значимый уровень в спектре огибающей. На центробежной установке присутствует расцентровка валов, расцентровка вала электродвигателя и вала центробежной установки. При работе центробежной установки проходил обильный нагрев соединительной муфты. Частота вращения 50,8 Гц, число оборотов 3048 об/мин. Первая и вторая гармоники частоты вращения ( $f_n$ ), причина возникновения вибрации – расцентровка валов электродвигателя и вала лабораторного стенда. При проведении центровки спектр вибрации выглядит как на рисунке 15.

При анализе спектральных данных сложно точно определить какого вида дефект. Необходимость хемометрического анализа трех исследуемых наборов данных вызвана трудностью определения дефекта ЦНА [5]. Набор данных вследствие его представительности удобно использовать для иллюстрации работы алгоритма ICA-by-Blocks.

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
						101
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

На рисунке 19 представлен график зависимости вибрационных данных в двумерных координатах с проекцией точек на ось PC2. Что позволит с лёгкостью определить дефект.

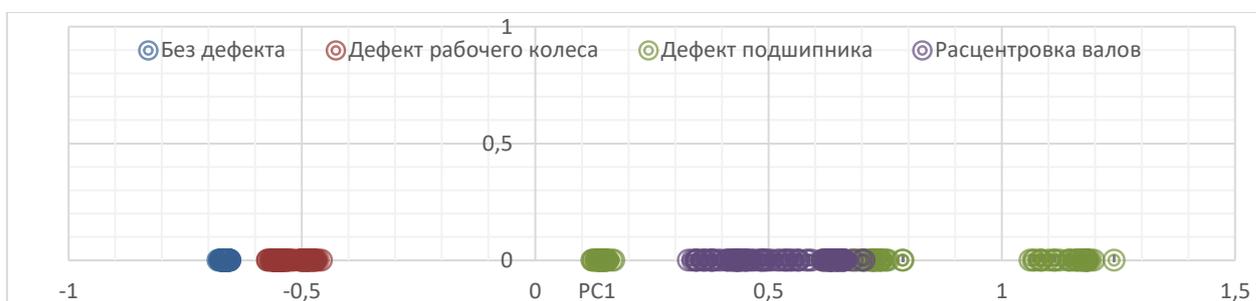


Рисунок 32 - Графическое представление двумерных данных PC1 от PC2 дефектов рабочего колеса, подшипника и перекоса вала (излома) с проецированием точек на ось PC2.

Таким образом, наши расчеты на примере экспериментальных данных показали, что при помощи метода главных компонент можно достаточно эффективно определять тип дефекта ЦНА, что в свою очередь представляет серьёзную альтернативу спектральным данным.

Для определения дефекта необходимо воспользоваться метрическим распознаением дефектов центробежного насосного агрегата. на рисунке 33 представлен график зависимости PC1 от PC2с применением метрического метода определения дефектов ЦНА. Для проверки погрешности определения и прогнозирования дефекта необходимо проанализировать текущее состояние лабораторного стенда для каждого из дефектов при разных частотах вращения рисунок А1 приложение А. Данные по измерению вибрации по 48 точкам с различными дефектами представлены в приложении А. Таблица А1-А3 соответствует бездефектному состоянию лабораторного стенда с применением метода главных компонент, таблица А4-А6 соответствует состоянию центробежной установки с дефектом рабочего колеса, таблица А7-А8 – дефект подшипника, таблица А9-11 – расцентровка валов.

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
						102
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## Данные вибрации в трёх точках измерения

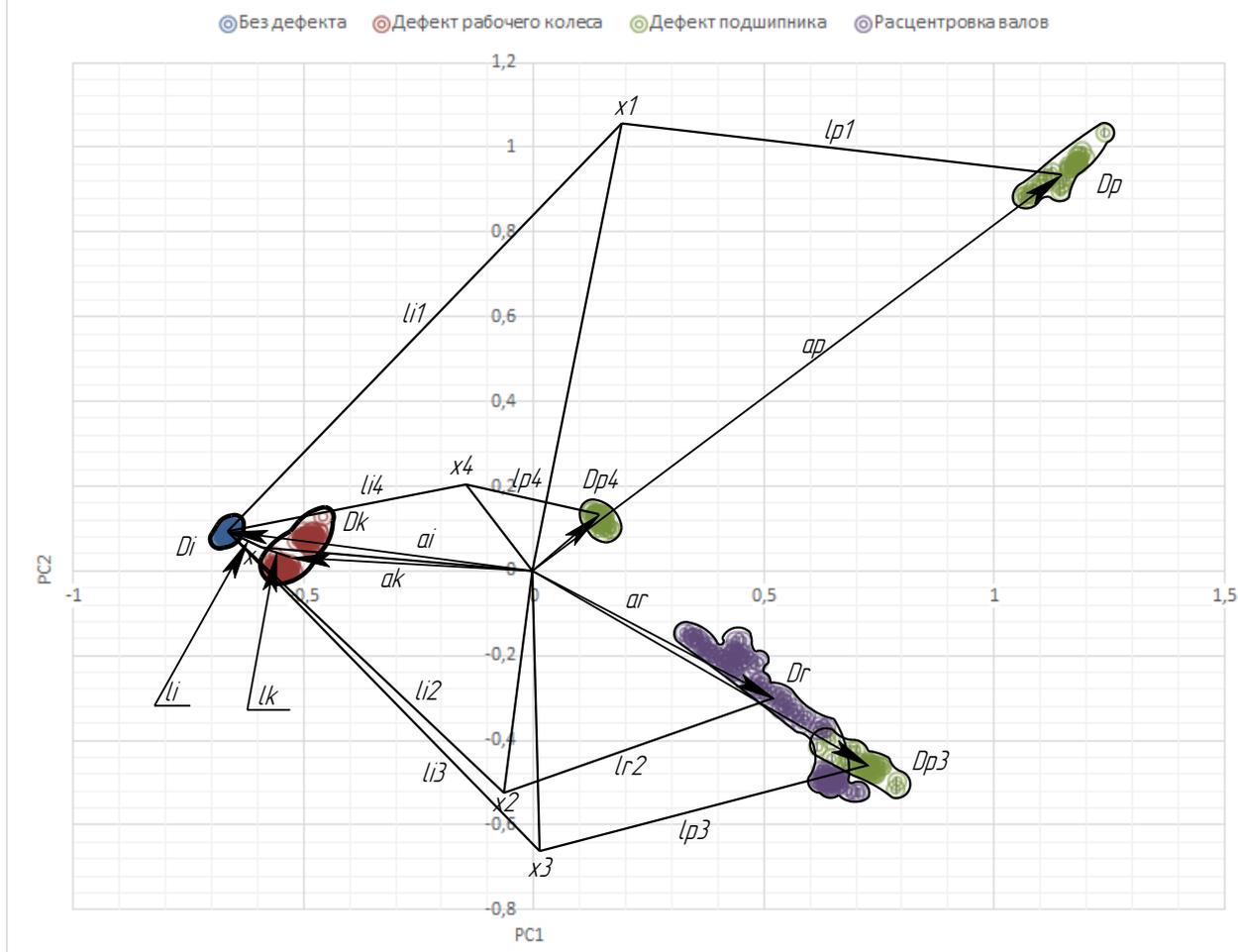


Рисунок 33 - Графическое представление двумерных данных PC1 от PC2 дефектов рабочего колеса, подшипника и расцентровки валов с применением метрического метода распознавания

Известно, что в пространстве признаков объект характеризуется  $N$  мерным вектором. Координаты пространства  $x_i$  могут быть непрерывными или дискретными величинами. В последнем случае  $x_i$  представляет признак  $k_j$ , имеющий несколько диагностических разрядов. Часто используется кодирование признаков в бинарном коде. Тогда координата  $x_j$  выражается двоичным числом и может иметь значения:  $x_{j1} = 0$ ,  $x_{j2} = 1$ . При использовании унитарного (двоичного) кода возможные значения таковы:  $x_{j1} = -1$ ,  $x_{j2} = 1$ .

В дальнейшем для простоты рассматриваются метрические методы в пространстве признаков, но все результаты легко переносятся на диагностическое пространство [35].

					Определение совокупности диагностических признаков	Лист
					технического состояния центробежных насосных агрегатов	103
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

В нашем случае в пространстве признаков используется диагностическая мера расстояния  $l$  и представлен для диагностики объект  $x$ . Для отнесения объекта  $x$  к одному из признаков определяют расстояние до эталонных точек (лабораторный стенд в рабочем состоянии). Сам объект  $x$  относят к диагнозу  $D_i$ , если мера расстояния между точками минимальна: если  $l_i = \min$ , то  $x$  принадлежит  $D_i$ .

- определение дефекта рабочего колеса при помощи метрического определения принадлежности точек к той или иной области. Если  $l_i < l_k$ , то  $l_k = \min$ ,  $x$  принадлежит  $D_k$ , из этого следует что на лабораторной установке есть дефект рабочего колеса.
- определение дефекта подшипника при помощи метрического определения принадлежности точек к той или иной области. Если  $l_{i1} < l_{p1}$ , то  $l_{p1} = \min$ ,  $x_1$  принадлежит  $D_{p1}$ , из этого следует что на лабораторной установке есть дефект подшипника.
- определение дефекта подшипника при помощи метрического определения принадлежности точек к той или иной области. Если  $l_{i4} < l_{p2}$ , то  $l_{p2} = \min$ ,  $x_2$  принадлежит  $D_{p2}$ , из этого следует что на лабораторной установке есть дефект подшипника.
- определение дефекта подшипника при помощи метрического определения принадлежности точек к той или иной области. Если  $l_{i3} < l_{p3}$ , то  $l_{p3} = \min$ ,  $x_3$  принадлежит  $D_{p3}$ , из этого следует что на лабораторной установке есть дефект подшипника.
- определение дефекта расцентровки при помощи метрического определения принадлежности точек к той или иной области. Если  $l_{i2} < l_{r2}$ , то  $l_{r2} = \min$ ,  $x$  принадлежит  $D_r$ , из этого следует что на лабораторной установке есть расцентровка вала электродвигателя и вала и центробежной установки.

При определении дефекта важную роль играет определение температуры. Так как при возникновении дефекта появляются динамические нагрузки,

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
						104
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

которые воздействуют на металл и деформируют его. На рисунке 34 представлена разница температур при различных дефектах.

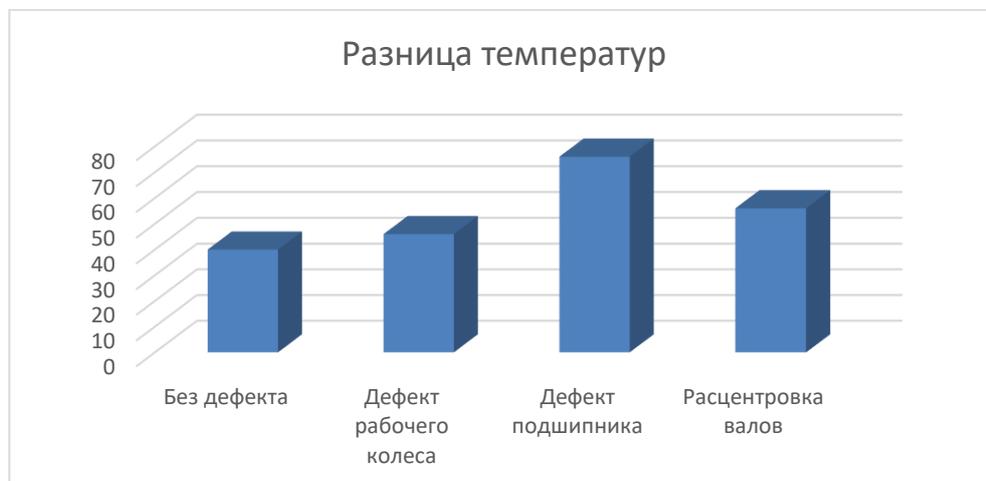


Рисунок 34 – разница температур при различных дефектах лабораторной центробежной установки

Также для сравнения представим данные вибрационной диагностики для ЦНСн 500 – 480. Измеренные значения СКЗ виброскорости на опорах агрегата представлены в таблице 4.27.

Таблица 4.27

Измеренные значения СКЗ виброскорости на опорах агрегата

Направление измерения	Электродвигатель, неприводная сторона	Электродвигатель, приводная сторона	Насос, приводная сторона	Насос, неприводная сторона
Поперечное мм/с	0,5	0,4	0,8	0,8
Вертикальное мм/с	0,6	0,7	0,5	0,8
Осевое мм/с	-	0,7	0,6	0,5

Некоторые измерения выполнить не удалось вследствие конструктивных особенностей агрегата. В спектре огибающей высокочастотной вибрации заднего и переднего подшипников электродвигателя присутствует ряд гармоник с частотой наружного кольца ( $F_o=14dB$  и  $F_o=21dB$  соответственно).

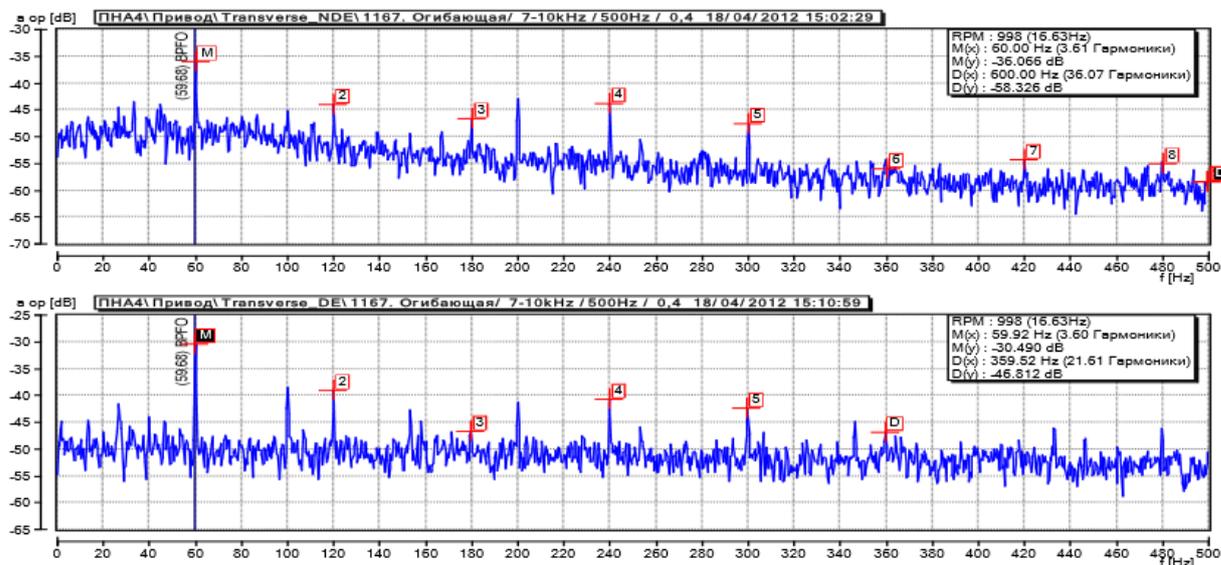


Рисунок 35 – Спектр вибраций при дефекте подшипника.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ:** На переднем и заднем подшипниках электродвигателя, предположительно, имеются дефекты наружного кольца. Уровень развития дефектов слабый. Состояние агрегата соответствует оценке «хорошо».

**РЕКОМЕНДАЦИИ:** Допускается эксплуатация агрегата без ограничений. Провести следующее вибродиагностическое обследование агрегата не позднее чем через 3 месяца.

Метод главных компонент выгодно отличается от поузлового принципа диагностики, при котором дефект узла определяется по его вибрации без учета вибрации соседних узлов. К примеру, некоторые дефекты влияют на определенные параметры преимущественно в одной точке (дефект конкретного подшипника), другие дефекты могут влиять на вибрацию сразу в нескольких точках (дефект проточной части насоса, дефект муфты, дисбаланс), и это необходимо учитывать [7]. Если все данные которые мы учитываем, могут быть выявлены, то вибрация является многокомпонентной, где определяются среднеквадратические значения, скорость, ускорение, спектры вибрации, температура узлов, которые подвергаются воздействию того или иного дефекта. В конечном итоге это приводит к дополнительным затратам энергии, появлению вибрации и понижению энергоэффективности. Необходимо учитывать все

					Определение совокупности диагностических признаков	Лист
					технического состояния центробежных насосных агрегатов	106
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

характеристики установки так, как каждое изменение технического состояния вызывает у центробежных насосных агрегатов повышение динамических нагрузок. Характеристика неисправностей центробежных насосных агрегатов:

- Неисправности рабочего колеса сопровождаются повышению горизонтальной и вертикальной вибрации и увеличению токовой нагрузки.
- Неисправности подшипников приводят к повышению горизонтальной и вертикальной вибрации, ещё большим затратам токового напряжения, повышению температуры узла.
- Неисправности, связанные с расцентровкой – это неисправности в виде повышения осевой вибрации, затраты токового напряжения и повышение температуры соединительной муфты.

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов	Лист
						107
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## **5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Необходимым процессом в достижении поставленной задачи является диагностика технического состояния трубопровода. Посредственное отношение к определению технического состояния, не соблюдения технологий установленной нормативно-технической документацией, а также проведение диагностики, не обладающие достаточным качеством может быть причиной нарушения и остановки производственного процесса, аварий, инцидента и других нежелательных последствий, которые в дальнейшем потребуют больших финансовых затрат. Метод применения анализа и определения неисправностей центробежных насосных агрегатов показывает, что при использовании на практике методы оценивания технического состояния ЦНА путём понижения размерности с применением метода главных компонент в полной мере учитывает все признаки, которые могут влиять на техническое состояние центробежных насосных агрегатов. При мониторинге и анализе вибраций центробежных насосных агрегатов встает вопрос о целесообразности вкладывания средств в проект, поскольку для обслуживания дефектов используется достаточно дорогостоящее оборудование, требующее постоянного контроля и квалифицированных кадров. Центробежные насосные агрегаты должны работать без каких-либо отклонений от нормативных характеристик. При поломке ЦНА мы будем нести материальные потери связанные с остановкой производства на техническое обслуживание и ремонт, что можно избежать при постоянном контроле работоспособности оборудования. В случае неудовлетворения этих требований, определение совокупностей диагностических признаков центробежных насосных агрегатов

					Определение совокупности диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Радченко Д.В.			Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Рудаченко А.В.					108	165
Консульт.		Макашева Ю.С.				НИ ТПУ гр. 2БМ6А		
Рук-ль ООП		Бурков П.В.						

попросту не будет оправдывать затраты, вложенные в его сооружение.

### 5.1.1 SWOT- анализ

Для визуализации качеств проекта, анализа сильных и слабых сторон, возможных угрозах и потенциала научного исследования используется SWOT анализ, как средство для принятия решения.

Из вышеперечисленного можно заключить, что SWOT анализ, представляющий собой матрицу, несет в себе полную информацию о научной работе и применяется для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Для анализа методов диагностики трубопровода актуальна представленная в таблице 5.1 SWOT модель.

Таблица 5.1

#### SWOT-анализ анализа и мониторинга неисправностей центробежных машин

		Сильные стороны:	Слабые стороны:
<p><b>Внутренняя среда</b></p> <p><b>Внешняя среда</b></p>		<p>С1: Долговременные сроки функционирования</p> <p>С2: Выявление дефектов на стадии их зарождения</p> <p>С3: Практически не требует вложений в процессе эксплуатации</p> <p>С4: Постоянное поддержание работоспособности на проектной мощности</p>	<p>Сл1: Требования к наличию нормативных документов</p> <p>Сл2: Сложность определения дефекта</p> <p>Сл3: Требуются квалифицированные специалисты</p> <p>Сл4: Большие первоначальные вложения в проект</p>
<b>Возможности</b>	<p>В1: Обнаружение дефекта на стадии возникновения</p> <p>В2: Возможность перенести обслуживание оборудования на другой срок</p> <p>В3: Точное определение вышедшей из строя детали (механизма)</p> <p>В4: Создает дополнительные рабочие места на предприятии</p>	<p>1. Исследование новых методов определения поломки</p> <p>2. Заблаговременное устранение поломки до аварийного состояния</p> <p>3. Обеспечение бесперебойной работы на требуемых мощностях</p> <p>4. Развитие навыков персонала, повышение показателей производства</p>	<p>1. Приобретение сертифицированного оборудования</p> <p>2. Снабжение оборудования средствами защиты</p> <p>3. Постоянный контроль за техническим состоянием оборудования</p> <p>4. Поиск источника финансирования</p>

Угрозы	У1: Введение дополнительных государственных требований к сертификации оборудования	1. Отслеживание изменений в Российском законодательстве	1. Проведение своевременного технического обслуживания и ремонта
	У2: Необходимость следить за исправностью оборудования	2. Проектирование новых систем обеспечения безопасности	2. Регулярное повышение квалификации персонала
	У4: Для обслуживания требуется высококвалифицированный персонал		

## 5.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 5.2.1 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Перед применением и внедрением проекта на действующие объекты транспортировки углеводорода, необходимо произвести оценку проекта, которая позволит выявить степень готовности к коммерциализации. Для оценки готовности проекта разработана специальная форма (таблица 2), представленная таблицей, содержащей показатель степени проработанности научно-исследовательской работы и показатель имеющихся знаний у разработчика представленного проекта, где каждый пункт оценивается баллом по шкале от 1 до 5.

Анализ и мониторинг технического состояния центробежного оборудования, на текущий период очень широко применяется на производстве. Организации эксплуатирующие центробежные машины (такие как Газпром) давно обладают необходимой базой знаний, и всеми необходимыми средствами, для качественной реализации проектов.

Главным же аргументом, для введения проекта в силу и начала его реализации, является способность обнаружения технического дефекта центробежной машины.

При составлении проекта, так же формируется таблица, в которой путем использования пятибалльной системы помечаются основные моменты, которые необходимо изучить в проекте, и то, насколько они на данный момент изучены.

									Лист
									110
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Финансовый менеджмент				

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i, \quad (1)$$

где  $B_{\text{сум}}$  – суммарное количество баллов по каждому направлению;

$B_i$  – балл по  $i$ -му показателю.

Необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Результаты анализа степени готовности приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2

Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	4
Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	5	5
Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	5	4
Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	4
Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	5	5
Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	4

Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	3
Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	3	3
Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	3	3
Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	3
Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	5
Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	4
Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	<b>55</b>	<b>57</b>

Согласно расчетам по данным из формы для оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации, степень проработанности научного проекта и уровень знаний составляют 55 и 57 баллов соответственно, что позволяет судить о средней перспективности разработки.

### 5.2.2 Инициация проекта

Для конкретизации целей и обозначения направленности научно-исследовательской работы предлагается ознакомиться с информацией, представленной в разделе 4.2.2, таблиц 5.3 и 5.4.

## Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
ПАО «Транснефть»	Разработка системы определения диагностических признаков технического состояния центробежных насосных агрегатов для обеспечения безопасности и надежности транспортировки нефти и нефтепродуктов

Таблица 5.4

## Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Анализ эффективности методов диагностики технического состояния ЦНА; на основе проведенного анализа, алгоритма определения неисправностей для поиска различного рода закономерностей, а так же принятия и обоснования решения по определению технического состояния центробежных насосных агрегатов.
Ожидаемые результаты проекта:	Разрабатываемая на основе анализа эффективности методов диагностики технического состояния вибродиагностика позволит оперативно и при меньших затратах продиагностировать техническое состояние ЦНА, определить эффективные мероприятия по результатам совокупности диагностических параметров технического состояния ЦНА, а также наиболее целесообразную последовательность ремонтно-профилактических мероприятий на эксплуатируемом объекте. Это позволит компании, обслуживающей ЦНА, оперативно реагировать на любые изменения в нём при принятии диагностических решений по диагностике технического состояния и исключить возможные аварийные ситуаций и остановку оборудования на ремонт оборудования нефтеперекачивающих станций.
Критерии приемки результата проекта:	Соответствие регламенту нормативно-технической документации

### 5.2.3 Структура работ в рамках научного исследования

Разработка научного проекта подразумевает формирования различного рода временных графиков, отражающих информацию о видах производимых работ, таблицы 5.5 и 5.6.

Таблица 5.5

Календарный план проекта

Код	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1	Выбор направления для научно-исследовательской работы	10	01.09.16	10.09.16	Радченко Д.В. Рудаченко А.В.
2	Введение в проблемную область	30	11.09.16	11.10.16	Радченко Д.В.
3	Обзор литературы по проблемной области	20	12.10.16	2.11.16	Радченко Д.В.
4	Постановка целей и задач научного-исследования	20	3.11.16	23.11.16	Радченко Д.В. Рудаченко А.В.
5	Теоретическая анализ и научное обоснование	45	15.02.17	30.03.17	Радченко Д.В.
6	Научное исследование	90	01.04.16	30.07.17	Радченко Д.В.
7	Получение результатов проведенного научного исследования	60	01.08.17	30.09.17	Радченко Д.В.
8	Анализ результатов	90	01.10.17	30.12.17	Радченко Д.В.

					Финансовый менеджмент	Лист
						114
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Код	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
9	Оформление результатов научного исследования по заданной теме	60	01.02.18	31.03.18	Радченко Д.В.
10	Подготовка результатов научного исследования по установленным правилам к защите	40	01.04.18	11.05.18	Радченко Д.В.
11	Предзащита научного- исследования	4	14.05.18	18.05.2018	Радченко Д.В.
12	Корректировка и форматирование составленного отчета	10	21.05.18	31.05.18	Радченко Д.В. Рудаченко А.В.
13	Презентация проведенного научного исследования по заданной теме	1	1.06.18	2.06.18	Радченко Д.В. Рудаченко А.В.
Итого:		480			

#### 5.2.4 Бюджет научно-технического исследования

Внедрение и реализация разрабатываемого проекта, как и любого другого нововведения в компании с установленным производственным процессом сопровождается различного рода финансовыми затратами. Для определения основных видов затрат включён раздел «Бюджет научно-технического исследования», целью которого является представление подробного и достоверного отчета о затратах и расходах, необходимых для реализации разрабатываемого проекта.

Затраты на реализацию проекта, включают в себя следующие пункты:

– приобретение необходимого для функционирования оборудования;

									Лист
									115
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Финансовый менеджмент				

– установка и подключение оборудования.

Рассчитаем Затраты на диагностику ЦНА до внедрения разрабатываемого проекта.

Затраты для летнего и зимнего периода будут различны, по причине усложнения производства работ и необходимости использования дополнительного оборудования, что увеличивает материальные затраты. Для большей наглядности разницы расходов, нижеприведенные расчеты произведены с учетом летнего периода производства работ.

Рассчитаем заработную плату (ЗП) на бригаду, в бригаде 3 человека и непосредственный руководитель. Районный коэффициент равен 1,5, премия 5%. Тогда заработная плата бригады составит:

$$3 \text{ чел.} \cdot 40000 \text{ руб/чел} \cdot 1,5 \cdot 1,05 = 189000 \text{ руб/мес.}$$

ЗП руководителя составляет:

$$1 \text{ руководитель} \cdot 90000 \cdot 1,05 \cdot 1,5 = 141750 \text{ руб/мес;}$$

Рассчитаем расход ГСМ для производства осмотра и непосредственной диагностики трубопровода. Затраты на приобретение и (или) аренду автомобиля не включены в расчет, в связи с не достаточной информативностью. Расчет произведен Сузунского месторождения разделенного на два участка с общей длиной 112 км, с возможностью непосредственного подъезда на технике к непосредственному месту работы диагностической группы.

– Осмотр и нахождения дефектов ЦНА;

Таким образом, общее расстояние проезда автомобиля для диагностики ЦНА составляет 112 км.

С расходом в 15 литров топлива на 100км (повышенный расход связан со сложными дорожными условиями, большая часть дорог представлена болотами, приспособленными для езды крупногабаритной техники) затраты на ГСМ:

$$112 \cdot 0,15 \cdot 39 = 655,2$$

– амортизация оборудования

– материалы

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

– затраты на контроль по плану графику

Затраты на непосредственное обследование ЦНА обходится примерно в 40000 рублей на 1 обслуживание центробежного насосного агрегата, когда на компрессорной станции находится 12 рабочих агрегатов и 4 резервных. Тогда:

40000 руб./1 агрегат \*16 об. = 640000 рублей

Постоянный контроль и прогноз позволяет уменьшить затраты, производимые на ремонт, а также составить план график с гораздо большими интервалами выезда рабочих для обследования неисправностей центробежных насосных агрегатов.

Затраты на диагностику с реализованным и внедренным проектом;

17200 руб./1 агрегат \*16 об. = 275200 рублей

Что космически меньше первоначальной. А конкретно на 57%.

Таблица 5.6

Смета затрат при определении технического состояния

№ пп	Наименование оборудования/услуг	Цена, руб
1	Комплектация виброанализатора АДП-3101	Прибор – 1 шт.
		Зарядное устройство – 1 шт.
		Кабель USB - 1 шт.
		пьезоакселерометр однопозиционный в комплекте - 2 шт.
		магнит для крепления пьезоакселерометра- 2 шт.
		кронштейн для установки 2-х пьезоакселерометров - 1 шт.
		датчиков оборотов ДО-01 в комплекте - 1 шт.
		магнитная стойка - 1 шт.
		светоотражающая лента - 1 шт.
		сумка для переноски - 1 шт.
		защитный чехол - 1 шт.
		программное обеспечение - загрузка-выгрузка данных, восстановление данных - 1 шт.
		программное обеспечение АРМИД - База данных

№ пп	Наименование оборудования/услуг		Цена, руб
		эксплуатационная документация - 1 шт.	
		программное обеспечение "АРМИД - Эксперт" - 1 шт.	
2	Алюминиевый лист 1105АМ 2 х 1200 х 3000		6 742 руб.
3	Токарные работы 15 часов		4 267 руб.
4	Подшипник 6204z – 2 шт.		200 руб.
5	Преобразователь частоты FC-51 0,18 кВт с однофазным напряжением 200–240 В перем. тока – 1 шт.		6823 руб.
6	Электродвигатель АИР71А2 IM1081 3ф 0,75 кВт 3000 об/мин – 1 шт.		7116 руб.
7	Болт М6×12 – 30 шт.		240 руб.
8	Соединительная муфта – 1 шт		353 руб.
Итого			383281 руб.

Экономия при обслуживании центробежного оборудования с использованием анализа и мониторинга неисправностей центробежных машин для Омского нефтеперекачивающего завода приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7

#### Показатели экономии

№ пп	Показатели экономии для 30 центробежных машин в год	Результаты
1	Экономия расходов на ремонт оборудования	39.15 млн. руб.
2	Экономия от предупреждения аварий центробежных машин, сокращения продолжительности производственных неполадок и простоев установок	324.4 млн. руб.
3	Экономия за счет ускорения ввода в эксплуатацию новых и модернизированных производств	220.5 млн. руб.
4	Общий экономический эффект	584.05 млн. руб.
5	Срок окупаемости	9 дней

Обеспечение анализа и мониторинга технического состояния центробежного оборудования является выгодным проектом, который оправдывает себя за 9 дней, а после начинает приносить чистую прибыль, не

					Финансовый менеджмент	Лист
						118
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

требуя никаких крупных вложений. Мониторинг технического состояния способен самостоятельно обеспечивать себя после выхода на проектные мощности. Тем не менее для достижения такого результата требуются крупные экономические вложения на начальном этапе обслуживания.

					Финансовый менеджмент	Лист
						119
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

В разделе рассматриваются такие вопросы как:

- Производственная безопасность;
- Экологическая безопасность;
- Безопасность в чрезвычайных ситуациях;
- Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

### 6.1 Производственная безопасность

При возникновении вибрации в процессе редуцировании газа на ГРС, следствием данного процесса может быть, как выход из строя оборудования находящееся на линейной части, так и ускорение планового обслуживания (ТО) которое сопровождается такими работами как: электромонтажные, слесарные и сварочные.

При ремонтных работах на ГРС, основные моменты, которые определяют категорию повышенной опасности показаны в таблице 6.1

Таблица 6.1

Работы, формирующие опасные и вредные факторы.

Наименование видов работ	Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015 г.		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работы в помещении			
1. Технический осмотр центробежных ЦНА 2. Техническое обслуживание при необходимости устранения дефектов ЦНА	1. Повышенный уровень шума на рабочем месте; 2. Повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны; 3. Повышенный уровень вибрации; 4. Повышенный уровень электромагнитных излучений; 5. Утечки токсичных и вредных веществ в атмосферу	1. Движущиеся машины и механизмы; 2. Электрический ток; 3. Повышенная или пониженная температуры поверхностей оборудования, материалов; 4. Пожаро- и взрывоопасность.	СанПиН 2.2.4.548- 96 [48]; ГОСТ 12.1.005-88 [49]; ГОСТ 12.1.003-83 [41]; СП 51.13330.2011 [50]; ГОСТ 12.2.003-91 [51]; ГОСТ 12.1.038-82 [52]; ГОСТ 12.1.07-76 [53]

Анализ путей повышения эффективности сооружения и эксплуатации линейной части магистральных нефтепроводов в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.	Радченко Д.В.			
Руковод.	Рудаченко А.В.			
Консульт.	Немцова О.А.			
Рук-ль ООП	Бурков П.В.			
Социальная ответственность				
			Лит.	Лист
				120
			Листов	
			165	
НИ ТПУ гр. 2БМ6А				

### **6.1.1. Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению**

Вредными производственными факторами называются факторы, воздействие которых приводит в определенных условиях к заболеванию или к снижению работоспособного состояния работающего.

#### **6.1.1.1 Повышенный уровень шума на рабочем месте**

Источниками шума являются звуки, производимые работающими механизмами и агрегатами, такие как болгарка (90 дБА), газовая резка металла (80 дБА), а также шумы от работающего технологического оборудования.

Действие шума на человека определяется влиянием на слуховой аппарат и многие другие органы и системы организма, в том числе и на нервную систему.

Громкость до 80 дБА обычно не влияет на органы слуха.

Длительное действие шума более 85 - 90 дБА в соответствии с нормативными документами СН 2.2.4/2.1.8.562-96 и ГОСТ 12.1.003-83, приводит к снижению, слуховой чувствительности.

Согласно нормативной документации СанПиН 2.2.4.3359-16 [42] эквивалентным уровнем звука на рабочих местах, является 80 дБА, за исключением отраслей экономики допускается эквивалентный уровень шума на рабочих местах от 80 до 85 дБА при условии подтверждения приемлемого риска здоровью работающих по результатам проведения оценки профессионального риска здоровью работающих, а также выполнения комплекса мероприятий, направленных на минимизацию рисков здоровью работающих.

Для оценки соблюдения ПДУ шума необходим производственный контроль (измерения и оценка). В случае превышения уровней необходимы организационно-технические мероприятия по защите от действия шума (защита временем, расстоянием, экранирование источника, либо рабочей зоны, замена оборудования, использование СИЗ).

Основные методы борьбы с шумом:

- снижение шума в источнике (применение звукоизолирующих средств);

					Социальная ответственность	Лист
						121
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- снижение шума на пути распространения звука;
- средства индивидуальной защиты (СИЗ): наушники;
- использование средств автоматики для управления технологическими процессами;
- соблюдение режима труда и отдыха.

### **6.1.1.2 Повышенная загазованность и запыленность воздуха рабочей зоны.**

При работе на ГРС, вероятность появления газа в воздухе очень высока. Нарушение герметичности технологических трубопроводов может спровоцировать утечку.

Метан является самым физиологически безопасным газом в гомологическом ряду парафиновых углеводородов. Физиологическое действие метан не оказывает и не ядовит (из-за малой растворимости метана в воде и плазме крови и присущей парафинам химической инертности). Погибнуть человеку в воздухе, с высокой концентрацией метана можно только от малого количества кислорода необходимого для дыхания при очень высоких концентрациях метана. Так, при содержании в воздухе 25—30 % метана появляются первые признаки асфиксии (учащение пульса, увеличение объёма дыхания, нарушение координации тонких мышечных движений и т. д.). Более высокие концентрации метана в воздухе вызывают у человека кислородное голодание, головную боль, одышку, — симптомы, характерные для горной болезни.

Так как метан легче воздуха, он не скапливается в проветриваемых подземных сооружениях. Поэтому весьма редки случаи гибели людей от вдыхания смеси метана с воздухом от асфиксии.

Первая помощь при тяжелой асфиксии: удаление пострадавшего из вредной атмосферы. При отсутствии дыхания немедленно (до прихода врача) искусственное дыхание изо рта в рот. При отсутствии пульса — непрямой массаж сердца.

Замеры ПДК загазованности помещения, проводится работниками лаборатории ГРС непосредственно на рабочем месте и в местах установки насосного оборудования с периодичностью не реже 1 час, а также по первому требованию рабочего персонала [40].

В случае достижения в помещении концентрации паров газа 0,3 г/м<sup>3</sup> (ПДК) работы немедленно прекращаются, оборудование отключено, людей выводят из зоны производства работ. Работы возобновляются после устранения причин загазованности.

Перед началом работ переносным газоанализатором АНТ–2М проверяется уровень загазованности воздушной среды. При этом содержание газов не должно превышать предельно-допустимой концентрации (ПДК) по санитарным нормам [49] согласно таблице 6.3. Работа разрешается только после устранения опасных условий. В процессе работы следует периодически контролировать загазованность, а при необходимости - обеспечить принудительную вентиляцию.

Таблица 6.3

Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

Вещества	Предельно допустимая концентрация, мг/м <sup>3</sup>
Бензин – растворитель (в пересчете на углерод)	300
Керосин (в пересчете на углерод)	300
Сероводород в смеси с углеводородами C1 – C5	3
Углеводороды C1 – C10	300
Стирол	5
Перексид метилэтилкетона	5
Аэросил	1
Дибутилфталат	0,5
Метилэтилкетон	0,2
Диметиланилин	0,003

Вещества	Предельно допустимая концентрация, мг/м <sup>3</sup>
Перексид изопропилбензола	0,02
Ненасыщенная полиэфирная смола	6
Хлористый бензол	0,005
Амиловый спирт	0,002

### 6.1.1.3 Повышенный уровень электромагнитных излучений.

Электромагнитным излучением называется излучение, прямо или косвенно вызывающее ионизацию среды. Контакт с электромагнитными излучениями представляет серьезную опасность для человека, по сравнению с другими вредными производственными факторами (повышенное зрительное напряжение, психологическая перегрузка, сохранение длительное время неизменной рабочей позы).

Нормы электромагнитных полей, создаваемых ПЭВМ приведены в таблице 30 и таблице 31, в соответствии с СанПиНом 2.2.2/2.4.1340-03 [43].

Таблица 6.5

#### Временные допустимые ЭМП, создаваемых ПЭВМ

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	В диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	В диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана видеомонитора	500 В	

Таблица 6.6

Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		

Для оценки соблюдения уровней необходим производственный контроль (измерения). В случае превышения уровней необходимы организационно-технические мероприятия (защита временем, расстоянием, экранирование источника, либо рабочей зоны, замена оборудования, использование СИЗ).

#### 6.1.1.4 Утечки токсичных и вредных веществ в атмосферу

Защита органов зрения осуществляется с помощью различных предохранительных очков.

Защита органов дыхания обеспечивается применением различного рода респираторов и противогазов.

Респираторы служат для защиты легких человека от воздействия взвешенной в воздухе пыли, противогазы - для защиты от газов и вредных паров.

В зависимости от содержания кислорода в воздухе применяются следующие противогазы:

- Фильтрующие - при содержании кислорода в воздухе свыше 19 %.

Обслуживающий персонал установки обеспечивается противогазами с марками коробок БКФ, возможно применение коробок марки «А».

									Лист
									125
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Социальная ответственность				

- Шланговые - применяются при содержании кислорода в воздухе менее 20 % при наличии в воздухе больших концентраций вредных газов (свыше 0,5 % об.). Применение шланговых противогазов обязательно при проведении работ внутри аппаратов, резервуаров и другой аналогичной закрытой аппаратуры.

### 6.1.1.5 Повышенный уровень вибрации

Вибрация возникает при использовании различного технологического оборудования (насосы, лебедка, вибросита, двигатели, ротор, компрессор). Вибрация вызывает в организме человека реакции, которые являются причиной функциональных расстройств различных органов. Вредные действия вибрации выражаются в виде повышенного утомления, головной боли, боли в суставах, повышенной раздражительности, некоторого нарушения координации движения. Наиболее вредное влияние на организм человека оказывает вибрация, частота которой совпадает с частотой собственных колебаний отдельных органов, примерные значения которых следующие (Гц): желудок – 2...3; почки – 6...8; сердце – 4...6; кишечник – 2...4; вестибулярный аппарат – 0,5. Мероприятия по безопасной работе с инструментами, вызывающими вибрации, следует проводить согласно ГОСТ 12.1.012–2004 ССБТ «Вибрационная безопасность».

Предельная норма виброускорения в течение дня составляет 1,15 м/с<sup>2</sup>. Если виброускорение с вибрацией превышает 0,5 м/с<sup>2</sup>, следует принять меры по сокращению влияния вибрации.

Предельная норма виброускорения работника с местной вибрацией в течение дня составляет 5,0 м/с<sup>2</sup>. Если виброускорение с вибрацией превышает 2,5 м/с<sup>2</sup>, следует принять меры по сокращению влияния вибрации.

Мероприятия по устранению вибрации:

– применение коллективных средств защиты: балансировка, установка амортизаторов, проведение планово-предупредительных ремонтов,

					Социальная ответственность	Лист
						126
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- увеличение массы основания вибрирующих устройств, крепление вибрационных систем;
- применение средств индивидуальной защиты (виброобувь, виброручкавицы, виброгасящие коврики).

### **6.1.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению**

Опасными производственными факторами называются факторы, приводящие при определенных условиях к травматическим повреждениям или резким нарушениям здоровья работника.

#### **6.1.2.1 Движущиеся машины и механизмы**

Вероятность получения травм в процессе монтажа любого оборудования очень велика. Тяжесть повреждений может быть вплоть до летального исхода. Для того что бы не было травм на опасном производстве необходимо выполнять правила техники безопасности.

К средствам защиты работающих от механического травмирования (физического опасного фактора) относятся:

- ограждения (кожухи, козырьки, дверцы, экраны, щиты, барьеры и т. д.);
- предохранительные – блокировочные устройства (механические, электрические, электронные, пневматические, гидравлические и т. д.);
- тормозные устройства (рабочие, стояночные, экстренного торможения);
- сигнальные устройства (звуковые, световые), которые могут встраиваться в оборудование или быть составными элементами.
- сигнальные цвета и сигнальная разметка, знаки производственной безопасности.

Сигнализация является одним из звеньев непосредственной связи между машиной и человеком. Она способствует облегчению труда, рациональной организации рабочего места и безопасности работы. Сигнализация может быть звуковая, световая, цветовая и знаковая. Сигнализация должна быть расположена и выполнена так, чтобы сигналы, предупреждающие об опасности,

					Социальная ответственность	Лист
						127
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

были хорошо различимы и слышны в производственной обстановке всеми лицами, которым может угрожать опасность.

ГОСТ Р 12.4.026-2001 «ССБТ. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная» устанавливает термины с соответствующими определениями, для правильного понимания их назначения, правила применения и характеристики знаков безопасности, сигнальных цветов и сигнальной разметки [44].

Мероприятия по обеспечению охраны труда, техники безопасности описаны в ГОСТ 12.4.011-89.

Организационные и технические меры по обеспечению безопасности, осуществляемые при подготовке объекта к проведению работ, применяемые средства коллективной и индивидуальной защиты, режим проведения работ, а также по оборудованию мест отдыха, приема пищи и санитарно – гигиенических норм.

До начала работ:

1. оформить наряды – допуска на проведение газоопасных, огневых работ и работ повышенной опасности. Перевозка и транспортировка техники в охранной зоне, сварочно-монтажные работы.

2. провести внеочередной инструктаж всем членам бригады по безопасным методам и приёмам ведения газоопасных, огневых работ и работ повышенной опасности, а также по правилам поведения во взрыва- и пожароопасной обстановке и других опасных условиях, и обстоятельствах с росписью в Журнале инструктажей на рабочем месте и наряде-допуске. Ознакомить всех руководителей, специалистов, механизаторов и бригадиров с данным Планом производства работ до начала работ, выборочно опросить персонал по усвоению требований безопасности, отраженных в разделе;

3. до начала работ установить наличие и обозначить знаками расположение всех коммуникаций в радиусе проведения работ;

4. после доставки и расстановки всё электрооборудование, жилые вагоны, электрические аппараты следует заземлить;

					Социальная ответственность	Лист
						128
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5. проверить взрывозащиту и изоляцию применяемого оборудования.

На весь период работ:

1. в зоне производства работ организовать места для приема пищи, отдыха и санитарно – гигиенические зоны. Жилой городок расположить на расстоянии не менее 100 м от места производства работ;

2. при сильном притоке грунтовых вод стенки ремонтного котлована должны крепиться металлическими или деревянными шпунтами, а при их отсутствии – деревянными сваями;

3. всю гусеничную технику, используемую при производстве работ, оборудовать устройствами, предохраняющими от бокового скольжения;

4. проверить наличие спецодежды, спец обуви и СИЗ у исполнителей по видам работ (костюм х/б, костюм сварщика, противогаз шланговый, страховочный пояс, страховочная веревка, защитная каска и т.д.).

#### **6.1.2.2 Электрический ток.**

Поражение человека электрическим током или электрической дугой может произойти в следующих случаях:

- при прикосновении человеком, неизолированного от земли, к нетоковедущим металлическим частям электроустановок, оказавшимся под напряжением из-за замыкания на корпусе;
- при однофазном (однополюсном) прикосновении неизолированного от земли человека к неизолированным токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением.

Степень опасного воздействия на человека электрического тока зависит от:

- рода и величины напряжения и тока;
- частоты электрического тока;
- пути прохождения тока через тело человека;
- продолжительности воздействия на организм человека;
- условий внешней среды.

					Социальная ответственность	Лист
						129
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Согласно ПУЭ рабочее место по степени опасности поражения электрическим током можно отнести к классу помещений без повышенной опасности.

Защита от электрического тока делится на два типа:

1. коллективная,
2. индивидуальная.

С целью предупреждения рабочих об опасности поражения электрическим током широко используются плакаты и знаки безопасности.

Мероприятия по созданию безопасных условий:

- инструктаж персонала;
- аттестация оборудования;
- соблюдение правил безопасности и требований при работе с электротехникой.

Согласно ГОСТ 12.1.030-81 г. мероприятиями по защите от электропоражения являются:

- обеспечение недоступности токоведущих частей путем использования изоляции в корпусах оборудования;
- применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;
- защитного заземления;
- защитного зануления;
- защитного отключения;
- использование устройств бесперебойного питания.

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

Контроль выполнения требований электробезопасности должен проходить на следующих этапах:

- проектирование;
- реализация;
- эксплуатация.

					Социальная ответственность	Лист
						130
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 6.7

Напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном режиме электроустановки.

Род тока	U, В	I, mA
	не более	
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Переменный, 400 Гц	3,0	0,4
Постоянный	8,0	1,0

Таблица 6.8

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийном режиме бытовых электроустановок напряжением до 1000 В и частотой 50 Гц

Продолжительность воздействия t, с	Нормируемая величина		Продолжительность воздействия t, с	Нормируемая величина	
	U, В	I, mA		U, В	I, mA
От 0,01 до 0,08	220	220	0,6	40	40
0,1	200	200	0,7	35	35
0,2	100	100	0,8	30	30
0,3	70	70	0,9	27	27
0,4	55	55	1,0	25	25
0,5	50	50	Св. 1,0	12	2

### 6.1.2.3. Взрывоопасность и пожароопасность

ГРС должна быть оснащена средствами пожаротушения, в том числе противопожарным инвентарём согласно «Норм положенности первичных средств пожаротушения на объектах газовой промышленности». Для поддержания пожаробезопасного режима эксплуатации ГРС здание, помещения и сооружения классифицируются по взрыво- и пожаробезопасности. Согласно классификации по взрыво- и пожароопасности на дверях (воротах) здания,

									Лист
									131
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Социальная ответственность				

помещений, сооружений должны быть металлические знаки с надписями соответствующей классификации. Ответственность за противопожарное состояние ГРС, а также за своевременное выполнение противопожарных мероприятий возлагается персонально на начальника службы ГРС. Для непосредственного надзора за противопожарным состоянием в помещениях и на территории ГРС начальник службы назначает ответственного за противопожарные мероприятия – инженера ГРС и его назначение оформляется приказом.

К самостоятельной работе специалисты, рабочие и служащие могут быть допущены только после прохождения подготовки по изучению правил и инструкций по пожарной безопасности для Организации, цеха, производственного участка, установки, здания или сооружения. Противопожарная подготовка персонала, занятого обслуживанием и эксплуатацией ГРС, должна проводиться в соответствии с требованиями ППБ 01-03 и ВППБ 01-04-98. Вводный противопожарный инструктаж следует проводить в специальных помещениях, оборудованных необходимыми наглядными пособиями и плакатами, инструкциями и макетами, образцами первичных средств пожаротушения, схемами стационарных установок пожаротушения и связи, имеющихся на ГРС. По окончании инструктажа следует провести проверку знаний и навыков, полученных инструктируемым. После проведения вводного инструктажа проводивший его руководитель должен сделать отметку в сопроводительной записке или приёмном листе о проведении инструктажа, а лицо, прошедшее инструктаж расписаться в специальном журнале, а также в карточке регистрации инструктажей по охране труда, пожарной безопасности и охране окружающей среды. Первичный противопожарный инструктаж дополняет вводный и его надлежит проводить непосредственно на рабочем месте после ознакомления инструктируемого с основами технологического процесса производства на своём рабочем месте, усвоении терминологии и изучения своего участка работы, изучения устройства первичных средств пожаротушения и правила их применения. Инструктажи по пожарной безопасности проходят все

					Социальная ответственность	Лист
						132
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

рабочие независимо от квалификации, образования, стажа выполняемой работы, но не реже 1 раза в полугодие. Последующие инструктажи могут проводиться одновременно с проведением инструктажей по охране труда. Занятия по пожарно-техническому минимуму проводятся ежегодно непосредственно на станции, порядок и категорию специалистов для проведения занятий определяет приказ руководителя подразделения. По окончании прохождения программы пожарно-технического минимума работающие должны сдать экзамен постоянно действующей комиссии. Проверку знаний по пожарно-техническому минимуму допускается проводить совместно с проверкой знаний норм и правил охраны труда. Для ГРС должна быть разработана инструкция о мерах пожарной безопасности, которая согласовывается с Государственной противопожарной службой и утверждается главным инженером. Инструкция о мерах пожарной безопасности должна разрабатываться в соответствии с ППБ 01-03 «Требования к инструкциям о мерах пожарной безопасности».

Наиболее характерными причинами пожаров на НПС являются:

- нарушения правил ведения газоопасных и огневых работ;
- нарушения требований пожаробезопасности при эксплуатации технологического оборудования и систем (загазованность, пирофорные отложения, конденсат);
- неисправность отопительных приборов;
- неисправность и нарушение правил эксплуатации электрооборудования, электросетей;
- разряды статического электричества и грозовые разряды;
- нарушение требований пожарной безопасности при эксплуатации (ремонте) водогрейных отопительных котлов;
- несоблюдение правил пожарной безопасности обслуживающим персоналом;
- самовозгорание горючих веществ.

В местах подъезда к коммуникациям, находящимся под давлением газа, следует установить соответствующие знаки безопасности: «Газоопасно»,

					Социальная ответственность	Лист
						133
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

«Взрывоопасно», «Проезд закрыт» и др. Огнетушители необходимо обслуживать в соответствии с НПБ «Пожарная техника, огнетушители. Требования к эксплуатации» и паспортом на огнетушитель.

На промплощадке ГРС запрещается:

- самовольно монтировать электропроводку;
- прокладывать временные электросети, а также применять некалиброванные предохранители;
- пользоваться кустарными электронагревательными приборами и бытовыми электронагревательными приборами, не имеющими устройств тепловой защиты и без подставок из негорючих материалов, исключающих опасность возникновения пожара;
- использовать корпуса оборудования, трубопроводы и металлоконструкции зданий в качестве заземления электросварочного аппарата и свариваемых изделий;
- сушить спецодежду на приборах отопления и газовых коммуникациях;
- работать в обуви со стальными гвоздями и подковками;
- применять открытый огонь для отогревания замёрзших замерных трубопроводов, импульсных линий, запорных устройств и частей оборудования;
- проводить огневые и газоопасные работы с нарушением НТД и наряда допуска;
- эксплуатировать неисправное оборудование;
- курить и пользоваться открытым огнём, проводить работы, при которых могут возникнуть искры, нагрев оборудования, инструмента, конструкций до температур воспламенения;
- взрывоопасных смесей, ЛВВ, (ЛВЖ);
- загромождать проходы и выходы из помещений, а также доступ к первичным средствам пожаротушения и к наружным стационарным лестницам;
- стравливать газ из газовых коммуникаций через свечи во время грозы;

					Социальная ответственность	Лист
						134
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- устанавливать в помещениях операторной и водогрейных котлов, электронагревательные приборы без письменного разрешения начальника или его заместителя и без соблюдения требований пожарной безопасности.

При возникновении загорания (пожара) производственный персонал обязан:

- немедленно перекрыть доступ газа к месту горения;
- отключить вытяжную вентиляцию до прекращения огня;
- приступить к тушению пожара имеющимися средствами пожаротушения;
- сообщить руководству, диспетчеру и в пожарную часть.

#### **6.1.2.4 Повышенная или пониженная температура поверхностей оборудования**

Повышенная температура поверхностей оборудования, изделий. Действие фактора - контакт с горячей (свыше 45 град. С) поверхностью может вызвать ожоги незащищенных участков тела.

Пониженная температура поверхностей холодильного оборудования, товаров. Действия фактора - может служить причиной сосудистых заболеваний, особенно пальцев рук.

Для предотвращения данного фактора необходимо использовать средства индивидуальной защиты от повышенных и (или) пониженных температур.

Одежда специальная защитная и средства индивидуальной защиты рук от конвективной теплоты, теплового излучения, искр и брызг расплавленного металла, кроме продукции для пожарных:

- Костюмы мужские для защиты от повышенных температур;
- Костюмы женские для защиты от повышенных температур;
- Костюмы мужские для защиты от искр и брызг расплавленного металла;
- Перчатки и рукавицы для защиты от повышенных температур из различных материалов;

					Социальная ответственность	Лист
						135
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- Одежда специальная защитная и средства индивидуальной защиты рук от воздействия пониженной температуры;
- Костюмы мужские для защиты от пониженных температур (в том числе отдельными предметами: куртка, брюки, полукомбинезон);
- Комбинезоны мужские для защиты от пониженных температур;
- Костюмы женские для защиты от пониженных температур (в том числе отдельными предметами: куртка, брюки, полукомбинезон);
- Комбинезоны женские для защиты от пониженных температур;
- Перчатки и рукавицы для защиты от пониженных температур из различных материалов;
- Средства индивидуальной защиты ног (обувь) от высоких и (или) низких температур, тепловых излучений, искр и брызг расплавленного металла;
- Обувь специальная кожаная и из других материалов для защиты от повышенных температур, кроме обуви для пожарных;
- Обувь специальная кожаная и из других материалов для защиты от пониженных температур;
- Средства индивидуальной защиты головы от высоких и (или) низких температур, тепловых излучений;
- Каски защитные и защитные каскетки;
- Средства индивидуальной защиты глаз и лица от брызг расплавленного металла и горячих частиц;
- Щитки защитные лицевые.

### **6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

#### **6.3.1 Анализ наиболее вероятной ЧС и причин ее возникновения**

Аварии технологического оборудования могут привести к чрезвычайным ситуациям. На ГРС наиболее вероятная чрезвычайная ситуация — это пожар и/или взрыв при проведении работ в газоопасных местах. Как известно для возникновения пожара необходимо одновременное выполнение трех условий, а именно:

						Лист
					Социальная ответственность	136
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1. Наличие горючего материала. Метан - при утечках из технологических трубопроводов природного газа.

2. Наличие окислителя. Отсеки и блоки ГРС имеют непосредственный контакт с окружающей средой, следовательно, содержание кислорода в воздухе рабочей зоны 21%.

3. Наличие источника воспламенения. Источником воспламенения может быть искра при производстве слесарных, сварочных работ, проведении ТО и прочих строительно-монтажных работ.

### **6.3.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС**

Помещения ГРС в которых проводит работы оператор имеют категории по взрывопожарной и пожарной опасности, согласно СТО Газпром 2-1.1-321- 2009:

Таблица 6.9

Категории по взрывопожарной и пожарной опасности блок-бокса оператора

Помещение операторной	Твердые горючие материалы – карболит, ПВХ, ДСП, полистирол	В4
Помещение аппаратной	Твердые горючие материалы – карболит, ПВХ, ДСП, полистирол	В3
Помещение аппаратной КИПиА	Твердые горючие материалы – ПВХ, текстолит, полистирол	В3
Помещение пункта распределения метанола	ЛВЖ – метанол	А
Помещение насосной ДЭГ	ГЖ - ДЭГ	В2
Помещение одоризации газа ГРС	ЛВЖ – одорант	А
Помещение ГРП	ГГ – природный газ	А

Превентивными мерами, содействующим уменьшению масштабов ЧС, будут являться: создание и использование систем своевременного оповещения населения, персонала объекта и органов управления, которое позволяет принять

своевременные необходимые меры по защите населения и тем самым снизить риски при возникновении ЧС.

Так же для предотвращения ЧС на объекте необходимо усилить контроль над текущим состоянием объекта, уделить особое внимание техническому обслуживанию и обучению персонала. Регулярное проведение инструктажей и учебно-тренировочных мероприятий позволит так же повысить оперативность реагирования на ЧС и снизить риски связанные с ликвидацией ЧС. В перспективе необходимо доукомплектовать территорию ГРС, в местах возможного появления углеводородов, датчиками присутствия газа.

Необходимо своевременно проверять комплектность и состояние первичных средств пожаротушения на территории ГРС.

Необходимо передвигаться по территории ГРС с персональным портативным газоанализатором, вне зависимости от того планируется ли производство работ или нет.

Для тушения пожаров на участке производства необходимо применять углекислотные (ОУ-5 или ОУ-10) и порошковые огнетушители (например, типа ОП-10), которые обладают высокой скоростью тушения, большим временем действия, возможностью тушения электроустановок, высокой эффективностью борьбы с огнем.

Помещения оборудованы пожарными извещателями, которые позволяют оповестить персонал о пожаре.

Действия персонала ГРС при ЧС:

- Сообщить оператору ГРС о возникшей ситуации с описанием деталей;
- Доложить руководству о чрезвычайной ситуации на ГРС и/или газопроводе прилегающему к ГРС;
- Локализовать место аварии (закрыть запорную арматуру в аварийной части газопровода);
- Сообщить в местное управление ГО и ЧС.
- При угрозе жизни покинуть место ЧС.

					Социальная ответственность	Лист
						138
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Дальнейшие действия персонала регламентируются внутренней нормативной документацией эксплуатирующей ГРС организацией, а именно «планом ликвидации аварийных ситуаций».

Согласно Правилам пожарной безопасности, в Российской Федерации ФЗ - №123 от 2008г., в зданиях и сооружениях (кроме жилых домов) при одновременном нахождении на этаже более 10 человек должны быть разработаны и на видных местах вывешены планы (схемы) эвакуации людей в случае пожара. Поскольку в помещениях ГРС находится только лишь оператор, планы эвакуации не разрабатываются.

## **6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

### **6.4.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства**

Нормы трудового права – это правила трудовых отношений, установленные или санкционированные государством посредством законодательных актов.

Нормы трудового права регулируют любые отношения, связанные с использованием личного труда.

- Формы их реализации разнообразны:
- собственно, трудовые отношения;
- организация труда и управление им;
- трудоустройство работников;
- социальное партнерство, коллективные отношения;
- содействие занятости безработных лиц;
- организация профессиональной подготовки и повышения квалификации;
- обеспечение мер по охране труда граждан;
- осуществление контроля и надзора за соблюдением законодательства;
- социальная и правовая защита работников, решение трудовых споров;
- деятельность профессиональных союзов;
- отношения взаимной материальной ответственности работника и работодателя;

						Социальная ответственность	Лист
							139
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			

– защита прав и интересов работодателей.

Рассмотрим регулирование коллективных отношений.

Настоящий коллективный договор является правовым актом, регулирующим социально-трудовые отношения работников ГРС непосредственным работодателем.

Основной задачей коллективного договора является создание необходимых организационно-правовых условий для достижения оптимального согласования интересов сторон трудовых отношений. Согласно коллективному договору Работодатель обязуется:

2.2.1. Обеспечивать Работникам нормальные условия для производительного и качественного труда в соответствии с их профессией, специальностью и квалификацией.

2.2.3. Проводить подготовку и дополнительное профессиональное образование Работников в соответствии с действующими в организации локальными нормативными актами.

2.2.4. Обеспечивать предоставление Работникам прав, социальных и трудовых гарантий и льгот, установленных законодательством Российской Федерации и ее субъектов, Генеральным коллективным договором и настоящим Договором.

2.2.5. Формировать Планово-контрольные показатели организации в части определения расходов Работодателя на социальные выплаты, льготы и компенсации с учетом мнения ОППО организации.

2.2.6. Обеспечивать финансирование выполнения обязательств настоящего Договора в пределах бюджета доходов и расходов Общества.

2.2.7. Обеспечивать участие ОППО организации в разработке и принятии социальных программ.

2.2.8. Обеспечивать участие ОППО организации в управлении организацией в соответствии со статьей 53 Кодекса.

2.2.9. Обеспечивать участие Работников в управлении Обществом в соответствии с главой 8 Кодекса.

					Социальная ответственность	Лист
						140
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2.2.10. Поощрять Работников за заслуги и высокие результаты в труде, профессиональное мастерство и многолетний добросовестный труд в соответствии с законодательством, порядком поощрения наградами организации, утверждаемым локальными нормативными актами Общества.

Порядок обеспечения работников спецодеждой, спецобувью и средствами индивидуальной защиты, стирки и дезинфекции устанавливается локальными нормативными актами работодателя, принимаемыми по согласованию с профкомом.

Перечень изменений и дополнений к нормативам, утвержденным законодательством РФ выдачи спецодежды, спецобуви и средств индивидуальной защиты определяется приложением к коллективному договору.

#### **6.4.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны**

Проектирование рабочих мест, снабженных видеотерминалами, относится к числу важных проблем эргономического проектирования в области вычислительной техники.

Организация рабочего места оператора регламентируется следующими нормативными документами:

ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ, ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ, СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и рядом других.

Эргономическими аспектами проектирования видеотерминальных рабочих мест, в частности, являются: высота рабочей поверхности, размеры пространства для ног, требования к расположению документов на рабочем месте (наличие и размеры подставки для документов, возможность различного размещения документов, расстояние от глаз пользователя до экрана, документа, клавиатуры и т.д.), характеристики рабочего кресла, требования к поверхности рабочего стола, регулируемость элементов рабочего места.

Главными элементами рабочего места программиста или оператора являются стол и кресло. Основным рабочим положением является положение сидя.

					Социальная ответственность	Лист
						141
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще, расположено в зоне легкой досягаемости рабочего пространства.

Моторное поле - пространство рабочего места, в котором могут осуществляться двигательные действия человека.

Максимальная зона досягаемости рук — это часть моторного поля рабочего места, ограниченного дугами, описываемыми максимально вытянутыми руками при движении их в плечевом суставе.

Оптимальная зона - часть моторного поля рабочего места, ограниченного дугами, описываемыми предплечьями при движении в локтевых суставах с опорой в точке локтя и с относительно неподвижным плечом.

Для комфортной работы стол должен удовлетворять следующим условиям:

- высота стола должна быть выбрана с учетом возможности сидеть свободно, в удобной позе, при необходимости опираясь на подлокотники;
- нижняя часть стола должна быть сконструирована так, чтобы программист мог удобно сидеть, не был вынужден поджимать ноги;
- поверхность стола должна обладать свойствами, исключающими появление бликов в поле зрения программиста;
- конструкция стола должна предусматривать наличие выдвижных ящиков (не менее 3 для хранения документации, листингов, канцелярских принадлежностей).
- высота рабочей поверхности рекомендуется в пределах 680 – 760 мм. Высота поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть около 650 мм.

Большое значение придается характеристикам рабочего стула (кресла). Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также регулируемым по расстоянию спинки от переднего края сиденья. Конструкция стула должна обеспечивать:

					Социальная ответственность	Лист
						142
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм;
- поверхность сиденья с закругленным передним краем;
- регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400 - 550 мм и углов наклона вперед до 15° и назад до 5°;
- высоту опорной поверхности спинки  $300 \pm 20$  мм, ширину - не менее 380 мм и радиус кривизны горизонтальной плоскости - 400 мм;
- угол наклона спинки в вертикальной плоскости в пределах  $0 \pm 30^\circ$ ;
- регулировку расстояния спинки от переднего края сиденья в пределах 260-400 мм;
- стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250 мм и шириной - 50-70 мм;
- регулировку подлокотников по высоте над сиденьем в пределах  $230 \pm 30$  мм и внутреннего расстояния между подлокотниками в пределах 350 - 500 мм.

Поверхность сиденья, спинки и других элементов стула (кресла) должна быть полумягкой с нескользящим, не электризующимся и воздухопроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнения.

Кресло следует устанавливать на такой высоте, чтобы не чувствовалось давления на копчик (это может быть при низком расположении кресла) или на бедра (при слишком высоком).

Оператор должен сидеть прямо, опираясь в области нижнего края лопаток на спинку кресла, не сутулясь, с небольшим наклоном головы вперед (до 5-7°). Предплечья должны опираться на поверхность стола, снимая тем самым статическое напряжение плечевого пояса и рук.

Рабочее место должно быть оборудовано подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по высоте в пределах до 150 мм и по углу наклона опорной поверхности подставки до 20°. Поверхность подставки должна быть рифленой и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм.

					Социальная ответственность	Лист
						143
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Необходимо предусматривать при проектировании возможность различного размещения документов: сбоку от видеотерминала, между монитором и клавиатурой и т.п. Кроме того, в случаях, когда видеотерминал имеет низкое качество изображения, например, заметны мелькания, расстояние от глаз до экрана делают больше (около 700мм), чем расстояние от глаза до документа (300 - 450мм). Вообще при высоком качестве изображения на видеотерминале расстояние от глаз пользователя до экрана, документа и клавиатуры может быть равным.

Положение экрана определяется:

- расстоянием считывания (0,6...0,7м);
- углом считывания, направлением взгляда на  $20^\circ$  ниже горизонтали к центру экрана, причем экран перпендикулярен этому направлению.

Должна также предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от  $-10^\circ$  до  $+20^\circ$  относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Причина неправильной позы пользователей обусловлена следующими факторами:

- нет хорошей подставки для документов;
- клавиатура находится слишком высоко, а документы – низко;
- некуда положить руки и кисти;
- недостаточно пространство для ног.

Создание благоприятных условий труда и правильное эстетическое оформление рабочих мест на производстве имеет большое значение, как для облегчения труда, так и для повышения его привлекательности, положительно влияющей на производительность труда.

					Социальная ответственность	Лист
						144
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной работы, было проведено определение совокупности неисправностей технического состояния центробежных насосных агрегатов. В теоретической части разобрано центробежное оборудование и какие факторы влияют на появление вибрации в узлах данной машины. Описан анализатор диагностический АДП-3101, а именно его составные части и параметры при которых возможно вести анализ вибраций. Выявлены частоты, при которых наиболее эффективно вести измерения вибраций и измерять количество оборотов для центробежных машин разной мощности.

Лабораторное исследование показало, что при появлении дебаланса центробежной установки повышается уровень вибрации и повышение токовых нагрузок, повышение рабочей температуры. Большую важность при эксперименте играет настройка датчиков, которые измеряют вибрации и количество оборотов. При максимальной частоте вращения установки в 51,4 Гц (3084 об/мин), датчик оборотов ДО-01 лучше настраивать на диапазон 100 и 20 кГц. Так же для настройки пьезоэлектрического датчика необходимо устанавливать диапазон 1 кГц так, как если при настройке установить диапазон 20 кГц возникает проблема чувствительности датчика и невозможно определить точную вибрацию установки.

Так же исследование показало, что при определённой частоте вращения без дефекта подшипника на графине не будет появляться дополнительная гармоника т.к. центробежная машина работает устойчиво и не возникает вибраций, а также не возникает повышение токовой нагрузки на систему.

Но при деформации подшипника на графике появляется гармоника на частоте вращения умноженной на 8 т.к. в подшипнике 6204z по ГОСТ 7242-81

					Анализ путей повышения эффективности сооружения и эксплуатации линейной части магистральных нефтепроводов в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Радчено Д.В.			Заключение	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Рудаченко А.В.					145	165
Консульт.						НИ ТПУ гр. 2БМ6А		
Рук-ль ООП		Бурков П.В.						

находится 8 шариков. По появлению гармоники можно определить, что подшипник деформирован и требуется замена. Также необходимо настроить пьезоэлектрический датчик на диапазон 1 кГц, нижняя частота при этом должна быть 10 Гц для более точного измерения. При деформации подшипника возникает вибрация, которая ухудшает работоспособность центробежной машины, что может привести к аварийной остановке и финансовым потерям если вовремя не заменить подшипник.

Путем лабораторного исследования было определено, что вибрация меньше, если вал находится на одной оси с электрической машиной и не происходит расцентровки валов электродвигателя и центробежной установки. Датчики настраивались в диапазоне 1 кГц. При вибрации данного типа большая нагрузка ложится на подшипники и муфту, что может привести к выходу их из строя. Для уменьшения данных вибраций необходимо лучше центровать двигатель и вал, не допуская перекоса или смещения. При определении дефектов важно учитывать совокупность диагностических признаков, так как температура и напряжение влияют на возникновение вибрации, которая в свою очередь может привести к разрушению элементов центробежных насосных агрегатов.

Был проведён экономический анализ при использовании данной технологии измерения вибраций центробежных машин. Данная установка окупает себя за 9 дней, а в дальнейшем несёт стабильную прибыль практически без вложений денежных средств.

Проведена оценка социальной ответственности для анализа и мониторинга неисправностей центробежных машин. При этом выявлено что аварии при использовании данной технологии уменьшатся так, как анализ и мониторинг неисправностей центробежных машин позволяет на стадии зарождения определить дефект и устранить его, не доводя центробежную машину до аварийного состояния.

					Заключение	Лист
						146
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пинчук А.К. Оценка долговечности рабочих колес центробежного насоса, 2003. – 217
2. ГОСТ 24346-80. Вибрация. Термины и определения
3. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения
4. Закирничная М.М., Сулейманов М.Р., Нафиков А.Ф. Использование результатов службы технической диагностики при проведении ремонта насосного оборудования. (Уфимский государственный нефтяной технический университет)
5. Русов В.А. "Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам" 2012 г.
6. А.Л. Герман, И.И. Киселёв, Л.М. Лебедев, В.В. Васильев, Крупные осевые и центробежные насосы, 1977. – 80-81.
7. В.Н. Челомей, Вибрации в технике, 1980. – 532.
8. А.Г. Гумеров, Р.С. Гумеров, А.М. Акбердин, Диагностика оборудования нефтеперекачивающих станций, 2003. – 74.
9. В.И. Иванова, Справочник мастера строительно-монтажных работ, 2007. – 359-361
10. К.М.Рагульскис, А.Ю.Юркаускас, Вибрация подшипников, Машиностроение, 1985. – 15-27.
11. Шубов И.Г., Шум и вибрация электрических машин, 1974. – 138-139
12. В.М.Писаревский, В.А.Поляков, А.Д.Прохоров Основы технической диагностики. Часть 2. Основы вибрационной диагностики роторных машин. Учебное пособие, 2000. – 90

					Анализ путей повышения эффективности сооружения и эксплуатации линейной части магистральных нефтепроводов в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Чехлов А.Н.			Список используемых источников	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Чухарева Н.В.					147	165
Консульт.								
Рук-ль ООП		Бурков П.В.				НИ ТПУ гр. 2БМ6А		

13. ГОСТ 24346-80. Вибрация. Термины и определения
  14. А.А. Козобков, А.Г. Толстов Вибрационная диагностика газоперекачивающих агрегатов. Учебное пособие, 2001. – 34
  15. К.М.Рагульскис, А.Ю.Юркаускас, Вибрация подшипников, Машиностроение, 1985. – 5-6.
  16. Ю. Б. Монахова, А. М. Цикин, С. П. Муштакова Журнал аналитической химии, 2015, том 70, № 9, с. 925–932 метод независимых компонент как альтернатива методу главных компонент и дискриминантным алгоритмам в обработке спектрометрических данных. 2015
  17. Надтока И.И., Велигура С.А., Махмадджонов Ф.Д. Прогнозирование максимальных суточных графиков мощности энергосистемы по методу главных компонент
  18. Д. В. Грищенко Система непрерывного мониторинга состояния и оперативной диагностики судового роторного оборудования.
- 
19. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения - М.: ИПК Издательство стандартов, 1990.
  20. Костюков В.Н. Мониторинг безопасности производства. - М.: Машиностроение, 2002. - 204 с.
  21. Диагностика безопасности. – учебное пособие Г.В. Зусман, А.В. Барков, 2011. – 95 с.
  22. Костюков В.Н. Науменко А.Н. Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования. Учебное пособие. - Омск, Издательство ОмГТУ, 2002. - 106 с.
  23. Руководство по эксплуатации АДП.3101. 000.001 РЭ
  24. Бойченко С. Н. Контроль и мониторинг технического состояния центробежного насосного агрегата по спектральным параметрам вибрации
  25. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин: - 2-е изд, 2000. - 344 с.
  26. Бейзельман Р.Д., Цыпкин Б.В. Подшипники качения. Справочник - Машиностроение, 1975. -362с.

					Список используемых источников	Лист
						148
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

27. Болотин В.В. Прогнозирование ресурсов машин и конструкций. - Машиностроение, 1984. -312с.
28. Вибрации в технике: Справочник. - т. 31/ Под ред. Ф.М.Дименейберга и К.С.Колесникова. Машиностроение, 1980. -544с.
29. Ф.Я.Балийкий, М.А.Иванова, А.Г.Соколова, Е.И.Хомяков. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов, 1984. -120с.
30. Дайерд, Стюарт Р. Обнаружение повреждений подшипников качения путем статистического анализа вибраций: Пер. с англ. Конструирование и технология машиностроения, 1978. - с.23-31
31. ГОСТ ИСО 10816-3-2002 Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 об/мин
32. ГОСТ ИСО 10817-1-2002 Вибрация. Системы измерений вибрации вращающихся валов. Часть 1. Устройство для снятия сигналов относительной и абсолютной вибрации
33. ГОСТ ИСО 10846-1-2002 Вибрация. Измерения виброакустических передаточных характеристик упругих элементов конструкций в лабораторных условиях. Часть 1. Общие принципы измерений и руководство по их проведению
34. Карл Шенк Измерение, контроль, диагноз и устранение колебаний машин
35. И.А. Биргер, Техническая диагностика, 1978. – 83-92
36. Dario Buonoa, Daniela Siano, Emma Frosinaa, Adolfo Senatorea. Gerotor pump cavitation monitoring and fault diagnosis using vibration analysis through the employment of auto-regressive-moving-average technique, Simulation Modelling Practice and Theory. – 2016. – №71. – P. 116-121.
37. Qiang Fu, Bo He, Rongsheng Zhua. Annals of Nuclear Energy: A systematic investigation on flow characteristics of impeller passage in a nuclear centrifugal pump under cavitation state. – November 2016. – №97. – P. 190-197.

					Список используемых источников	Лист
						149
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

38. Adam Adamkowski, Adam Henke, Mariusz Lewandowski. Engineering Failure Analysis: Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers. – June 2016. – №70. – P. 56-72.

39. Dario Buono, Fulvio Domenico Schiano di Cola, Adolfo Senatore, Emma Frosina, Giorgio Buccilli, Jonathan Harrison. Energy Procedia: Modelling Approach on a Gerotor Pump Working in Cavitation Conditions. – 2016. – №101. – P. 701-709.

40. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*;

41. ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны;

42. СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах»;

43. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы

44. ГОСТ Р 12.4.026-2001 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний (с Изменением N 1)

45. ГОСТ 12.4.011-89 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты работающих. Общие требования и классификация

46. СТО Газпром 2-1.1-321-2009. Перечень помещений, зданий и наружных установок с категориями по взрывопожарной и пожарной опасности для объектов транспортировки газа ОАО «Газпром»;

47. ФЗ - №123 от 2008 г. «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»;

48. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»;

					Список используемых источников	Лист
						150
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

49. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1)

50. СП 51.13330.2011 «Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменением N 1)»;

51. ГОСТ 12.2.003-91 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие требования безопасности»;

52. ГОСТ 12.1.038-82 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1)»;

53. ГОСТ 12.1.007-76 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности (с Изменениями N 1, 2)»

					Список используемых источников	Лист
						151
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**Сравнение результатов исследования**



Рисунок 1А - Графическое представление двумерных данных PC1 от PC2 с использованием метрического метода распознавания дефектов рабочего колеса, подшипника и расцентровки валов с применением метрического метода распознавания при 45,2 Гц и 50,8 Гц.

Таблица А1

Величина вибрации с использованием метода главных компонент без дефекта в первой точке

№ пп	Без дефекта				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,0639	0,0623	0,0775	-0,6718	0,0925
2	0,0649	0,0623	0,0827	-0,6680	0,0961
3	0,0642	0,0652	0,0731	-0,6728	0,0878
4	0,0658	0,0638	0,0790	-0,6690	0,0922
5	0,0671	0,0645	0,0613	-0,6786	0,0772
6	0,0664	0,0633	0,0748	-0,6714	0,0887
7	0,0689	0,0642	0,0656	-0,6750	0,0799
8	0,0668	0,0642	0,0678	-0,6749	0,0827
9	0,0680	0,0631	0,0805	-0,6671	0,0925
10	0,0680	0,0626	0,0834	-0,6655	0,0950
11	0,0671	0,0618	0,0811	-0,6679	0,0939
12	0,0687	0,0621	0,0907	-0,6609	0,1006
13	0,0657	0,0648	0,0788	-0,6686	0,0917
14	0,0641	0,0611	0,0833	-0,6687	0,0974
15	0,0642	0,0622	0,0876	-0,6655	0,1004
16	0,0692	0,0672	0,0747	-0,6678	0,0859
17	0,0670	0,0609	0,0816	-0,6681	0,0947
18	0,0678	0,0636	0,0684	-0,6743	0,0829
19	0,0656	0,0625	0,0898	-0,6632	0,1013
20	0,0658	0,0651	0,0827	-0,6660	0,0947
21	0,0679	0,0625	0,0857	-0,6643	0,0969
22	0,0659	0,0623	0,0815	-0,6681	0,0946
23	0,0649	0,0656	0,0864	-0,6641	0,0979
24	0,0657	0,0653	0,0730	-0,6719	0,0869
25	0,0663	0,0631	0,0662	-0,6768	0,0820
26	0,0663	0,0648	0,0962	-0,6577	0,1052
27	0,0639	0,0646	0,0821	-0,6678	0,0953
28	0,0677	0,0637	0,0806	-0,6669	0,0925
29	0,0657	0,0618	0,0899	-0,6634	0,1016
30	0,0679	0,0658	0,0687	-0,6729	0,0823
31	0,0644	0,0656	0,0874	-0,6638	0,0989
32	0,0679	0,0622	0,0727	-0,6723	0,0867
33	0,0677	0,0639	0,0811	-0,6665	0,0929
34	0,0665	0,0645	0,0803	-0,6674	0,0926
35	0,0686	0,0636	0,0741	-0,6703	0,0870
36	0,0678	0,0675	0,0776	-0,6667	0,0887
37	0,0692	0,0701	0,0782	-0,6642	0,0876
38	0,0701	0,0692	0,0755	-0,6657	0,0853
39	0,0711	0,0688	0,0803	-0,6624	0,0888
40	0,0693	0,0679	0,0798	-0,6643	0,0896
41	0,0712	0,0694	0,0791	-0,6628	0,0876
42	0,0725	0,0712	0,0823	-0,6591	0,0888
43	0,0703	0,0683	0,0856	-0,6599	0,0935
44	0,0695	0,0708	0,0796	-0,6628	0,0883
45	0,0699	0,0697	0,0804	-0,6626	0,0891
46	0,0715	0,0677	0,0789	-0,6636	0,08790
47	0,0729	0,0695	0,0799	-0,6612	0,08736
48	0,0705	0,0703	0,0802	-0,6621	0,08850

## Величина вибрации с использованием метода главных компонент без дефекта во второй точке

№ пп	Без дефекта				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,0643	0,0625	0,0855	-0,666630522	0,098544482
2	0,0638	0,0638	0,0782	-0,670714688	0,092540136
3	0,0664	0,0657	0,0852	-0,663907871	0,096133959
4	0,0679	0,0653	0,0922	-0,658938534	0,101086533
5	0,0647	0,0614	0,0854	-0,667003483	0,098656355
6	0,0686	0,0646	0,0824	-0,664820413	0,093212223
7	0,0637	0,0638	0,0879	-0,664880889	0,100285708
8	0,0661	0,0659	0,0784	-0,668122726	0,090816576
9	0,0684	0,0658	0,0846	-0,662998223	0,094632068
10	0,0660	0,0648	0,0887	-0,662481209	0,099427497
11	0,0658	0,0644	0,0771	-0,66985576	0,090464585
12	0,0678	0,0661	0,0715	-0,671174697	0,084429397
13	0,0680	0,0677	0,0721	-0,669877628	0,084240134
14	0,0664	0,0647	0,0726	-0,672071561	0,086490942
15	0,0677	0,0659	0,0879	-0,661370365	0,097561579
16	0,0650	0,0630	0,0825	-0,667772287	0,095640644
17	0,0649	0,0653	0,0779	-0,669464559	0,091226493
18	0,0659	0,0653	0,0742	-0,671101332	0,08779566
19	0,0678	0,0667	0,0902	-0,65950637	0,099053762
20	0,0668	0,0651	0,0895	-0,661353675	0,099559866
21	0,0664	0,0652	0,0813	-0,666531164	0,093216628
22	0,0685	0,0657	0,0763	-0,668031829	0,088032657
23	0,0690	0,0647	0,0761	-0,668353752	0,087980276
24	0,0680	0,0655	0,0837	-0,663941799	0,094222267
25	0,0660	0,0646	0,0814	-0,667018896	0,093706407
26	0,0649	0,0657	0,0901	-0,661847736	0,100764495
27	0,0669	0,0678	0,0790	-0,666306673	0,090224002
28	0,0667	0,0642	0,0920	-0,660351194	0,101911429
29	0,0660	0,0647	0,0833	-0,66581358	0,09517849
30	0,0674	0,0663	0,0724	-0,670771213	0,085270772
31	0,0677	0,0655	0,0817	-0,665340808	0,092784021
32	0,0701	0,0639	0,0845	-0,662980841	0,094383276
33	0,0668	0,0653	0,0668	-0,67504789	0,081478742
34	0,0652	0,0653	0,0671	-0,675844496	0,082509128
35	0,0663	0,0660	0,0878	-0,662237069	0,098140166
36	0,0687	0,0667	0,0705	-0,670928007	0,082977937
37	0,0692	0,0701	0,0782	-0,664221183	0,087636252
38	0,0701	0,0692	0,0755	-0,665767071	0,08536687
39	0,0711	0,0688	0,0803	-0,662440654	0,088821562
40	0,0693	0,0679	0,0798	-0,664301472	0,08963479
41	0,0712	0,0694	0,0791	-0,662804973	0,087607603
42	0,0725	0,0712	0,0823	-0,659153537	0,088865665
43	0,0703	0,0683	0,0856	-0,659962293	0,093599759
44	0,0695	0,0708	0,0796	-0,662832409	0,088350714
45	0,0699	0,0697	0,0804	-0,662658414	0,089176654
46	0,0715	0,0677	0,0789	-0,663603665	0,087902006
47	0,0729	0,0695	0,0799	-0,661228052	0,08736505
48	0,0705	0,0703	0,0802	-0,662109088	0,088508488

## Величина вибрации с использованием метода главных компонент без дефекта в третьей точке

№ пп	Без дефекта				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,0662	0,0631	0,0721	-0,67331	0,0867595
2	0,0664	0,0626	0,0898	-0,66268	0,1008808
3	0,0675	0,0643	0,0826	-0,66552	0,0940218
4	0,0644	0,0634	0,0919	-0,66222	0,1032542
5	0,0673	0,0636	0,0662	-0,67597	0,0813567
6	0,0674	0,0664	0,0659	-0,67467	0,0800782
7	0,0672	0,0644	0,0812	-0,66651	0,0930242
8	0,0665	0,0623	0,0745	-0,67207	0,0887983
9	0,0662	0,0625	0,0812	-0,66808	0,0941919
10	0,0656	0,0641	0,0840	-0,66594	0,0961443
11	0,0688	0,0640	0,0780	-0,66768	0,0898345
12	0,0661	0,0666	0,0936	-0,65853	0,1026286
13	0,0673	0,0605	0,0773	-0,67079	0,0912607
14	0,0668	0,0635	0,0699	-0,67408	0,0845753
15	0,0682	0,0627	0,0603	-0,67946	0,0765485
16	0,0676	0,0642	0,0922	-0,65968	0,1016244
17	0,0684	0,0613	0,0952	-0,65883	0,1046348
18	0,0632	0,0643	0,0795	-0,67004	0,0936917
19	0,0651	0,0652	0,0823	-0,66672	0,0946538
20	0,0661	0,0637	0,0866	-0,66425	0,0981011
21	0,0679	0,0617	0,0686	-0,6751	0,0836362
22	0,0673	0,0616	0,0812	-0,66786	0,0939657
23	0,0640	0,0627	0,0769	-0,67194	0,091799
24	0,0660	0,0626	0,0683	-0,67599	0,0840206
25	0,0665	0,0622	0,0567	-0,68294	0,074711
26	0,0685	0,0624	0,0899	-0,66144	0,0999909
27	0,0651	0,0629	0,0916	-0,66223	0,1028465
28	0,0672	0,0625	0,0893	-0,66255	0,1001233
29	0,0636	0,0618	0,0792	-0,67124	0,0941404
30	0,0664	0,0641	0,0840	-0,66545	0,0957481
31	0,0660	0,0647	0,0787	-0,66861	0,0915288
32	0,0682	0,0628	0,0756	-0,67011	0,0886522
33	0,0693	0,0650	0,0853	-0,66243	0,0950249
34	0,0678	0,0638	0,0722	-0,67191	0,0857988
35	0,0639	0,0631	0,0896	-0,66408	0,1017832
36	0,0689	0,0637	0,0642	-0,67615	0,0789422
37	0,0692	0,0701	0,0782	-0,66422	0,0876363
38	0,0701	0,0692	0,0755	-0,66577	0,0853669
39	0,0711	0,0688	0,0803	-0,66244	0,0888216
40	0,0693	0,0679	0,0798	-0,6643	0,0896348
41	0,0712	0,0694	0,0791	-0,6628	0,0876076
42	0,0725	0,0712	0,0823	-0,65915	0,0888657
43	0,0703	0,0683	0,0856	-0,65996	0,0935998
44	0,0695	0,0708	0,0796	-0,66283	0,0883507
45	0,0699	0,0697	0,0804	-0,66266	0,0891767
46	0,0715	0,0677	0,0789	-0,6636	0,087902
47	0,0729	0,0695	0,0799	-0,66123	0,0873651
48	0,0705	0,0703	0,0802	-0,66211	0,0885085

Величина вибрации с использованием метода главных компонент дефекта рабочего колеса в первой точке

№ пп	Дефект рабочего колеса				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,1539	0,1736	0,0881	-0,55398171	0,016915159
2	0,1823	0,1802	0,0797	-0,538369201	-0,006149754
3	0,1566	0,1665	0,0748	-0,564007248	0,007538515
4	0,1569	0,1698	0,0791	-0,559539701	0,009633683
5	0,1574	0,1598	0,0812	-0,563020461	0,014591359
6	0,1669	0,1621	0,0779	-0,558049132	0,006454452
7	0,1716	0,1802	0,0675	-0,55233007	-0,010530385
8	0,1730	0,1549	0,0851	-0,553586616	0,011694272
9	0,1657	0,1853	0,0659	-0,554330143	-0,010682953
10	0,1641	0,1539	0,0837	-0,560389001	0,015344942
11	0,1604	0,1625	0,0733	-0,564619058	0,005882194
12	0,1798	0,1640	0,0793	-0,548343773	0,000504351
13	0,1799	0,1651	0,1002	-0,535024111	0,016647732
14	0,1679	0,1929	0,0920	-0,533274556	0,00624573
15	0,1622	0,1705	0,0921	-0,548042116	0,01707553
16	0,1634	0,1835	0,0870	-0,543825567	0,007834005
17	0,1840	0,1561	0,0708	-0,554939496	-0,005523649
18	0,1866	0,1770	0,0851	-0,534076727	-0,002862311
19	0,1578	0,1649	0,0725	-0,565480898	0,005685667
20	0,1533	0,1452	0,0749	-0,5767495	0,016790464
21	0,1680	0,1676	0,0751	-0,556293167	0,001741638
22	0,1683	0,1999	0,0744	-0,540181839	-0,010393721
23	0,1682	0,1810	0,0714	-0,551635107	-0,006035455
24	0,1882	0,1617	0,0842	-0,541391006	0,001046135
25	0,1826	0,1650	0,0822	-0,544361946	0,00106468
26	0,1879	0,1660	0,0827	-0,5403091	-0,001517236
27	0,1668	0,1166	0,0959	-0,570232715	0,036906062
28	0,1677	0,1465	0,0688	-0,570988148	0,004359316
29	0,1514	0,1979	0,0759	-0,550622724	-0,000126436
30	0,1632	0,1557	0,0874	-0,557779722	0,018089208
31	0,1697	0,1605	0,0884	-0,550764912	0,013964851
32	0,1566	0,1530	0,0656	-0,576433289	0,005017002
33	0,1787	0,1609	0,0798	-0,55028242	0,002542936
34	0,1701	0,1733	0,0768	-0,551089329	3,31452E-05
35	0,1738	0,1774	0,0765	-0,546932091	-0,003488264
36	0,1694	0,1747	0,0902	-0,542665219	0,010515981
37	0,1699	0,1779	0,0759	-0,549429714	-0,002209878
38	0,1700	0,1695	0,0756	-0,553803693	0,000475451
39	0,1770	0,1802	0,0753	-0,544285903	-0,007016039
40	0,1689	0,1706	0,0750	-0,554284422	0,000154852
41	0,1691	0,1745	0,0747	-0,552352965	-0,001574275
42	0,1693	0,1751	0,0744	-0,552134459	-0,002105995
43	0,1733	0,1756	0,0741	-0,549591005	-0,00451958
44	0,1762	0,1762	0,0738	-0,547720562	-0,006388415
45	0,1698	0,1767	0,0735	-0,551540122	-0,003651633
46	0,1689	0,1773	0,0732	-0,551994627	-0,003638603
47	0,1705	0,1778	0,0729	-0,55091956	-0,004863641
48	0,1753	0,1784	0,0726	-0,547886644	-0,007673408

Величина вибрации с использованием метода главных компонент дефекта рабочего колеса во второй точке

№ пп	Дефект рабочего колеса				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,1721	0,1588	0,2332	-0,462157903	0,128263309
2	0,1660	0,1611	0,1796	-0,497299919	0,087943575
3	0,1675	0,1851	0,1892	-0,478396991	0,086323519
4	0,1888	0,1627	0,1622	-0,493114672	0,06228084
5	0,1624	0,1634	0,1751	-0,501072818	0,085342061
6	0,1675	0,1629	0,1695	-0,501608927	0,078550277
7	0,1677	0,1622	0,1915	-0,488470904	0,096153928
8	0,1738	0,1839	0,1827	-0,479100267	0,078471135
9	0,1826	0,1422	0,1663	-0,504795274	0,075859447
10	0,1842	0,1546	0,1799	-0,489273215	0,081468892
11	0,1733	0,1831	0,1890	-0,475982515	0,084000344
12	0,1826	0,1599	0,1767	-0,489513536	0,077846612
13	0,1725	0,1648	0,1622	-0,502024263	0,069609832
14	0,1742	0,1679	0,1729	-0,492911942	0,076160269
15	0,1650	0,1505	0,1519	-0,520112552	0,070212908
16	0,1652	0,1532	0,1667	-0,509628797	0,080900722
17	0,1645	0,1656	0,1729	-0,500011145	0,081777978
18	0,1684	0,1533	0,1673	-0,507255679	0,079756646
19	0,1679	0,1847	0,1822	-0,482608887	0,080713143
20	0,1843	0,1828	0,1739	-0,478581015	0,066678567
21	0,1689	0,1775	0,1666	-0,495122941	0,070388941
22	0,1720	0,1794	0,1763	-0,486369339	0,075877349
23	0,1708	0,1692	0,1621	-0,500897465	0,068815159
24	0,1737	0,1843	0,1991	-0,468992161	0,091390969
25	0,1952	0,1490	0,1853	-0,482096589	0,082287703
26	0,1877	0,1745	0,1859	-0,47341025	0,07745316
27	0,1669	0,1708	0,1922	-0,484180855	0,094061839
28	0,1866	0,1645	0,1631	-0,493002414	0,063447363
29	0,1850	0,1506	0,1825	-0,489228817	0,084551223
30	0,1755	0,1887	0,1578	-0,490762443	0,056174626
31	0,1816	0,1531	0,1825	-0,490043306	0,085350213
32	0,1822	0,1641	0,1992	-0,473957919	0,094409927
33	0,1791	0,1666	0,1633	-0,49640637	0,066577033
34	0,1705	0,1605	0,1777	-0,496005154	0,084419925
35	0,1624	0,1581	0,1721	-0,505579349	0,084837582
36	0,1654	0,1447	0,1825	-0,504207767	0,096345773
37	0,1699	0,1779	0,1822	-0,484807749	0,082155746
38	0,1700	0,1695	0,1846	-0,487540856	0,086983274
39	0,1770	0,1802	0,1870	-0,476382195	0,081633984
40	0,1689	0,1706	0,1894	-0,484739843	0,090947074
41	0,1691	0,1745	0,1918	-0,481167515	0,091360146
42	0,1693	0,1751	0,1853	-0,484737193	0,085882854
43	0,1733	0,1756	0,1859	-0,481646782	0,084183336
44	0,1762	0,1762	0,1922	-0,47576532	0,087550988
45	0,1698	0,1767	0,1631	-0,497087507	0,067437645
46	0,1689	0,1773	0,1777	-0,488486833	0,079272442
47	0,1705	0,1778	0,1721	-0,490632737	0,073842345
48	0,1753	0,1784	0,1825	-0,481097108	0,079522034

Величина вибрации с использованием метода главных компонент дефекта рабочего колеса в третьей точке

№ пп	Дефект рабочего колеса				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,1647	0,1751	0,0818	-0,55044	0,0060374
2	0,1640	0,1905	0,0774	-0,54575	-0,002557
3	0,1595	0,1673	0,0755	-0,5614	0,0063746
4	0,1909	0,1765	0,0958	-0,5252	0,0036746
5	0,1660	0,1643	0,0789	-0,55688	0,006915
6	0,1739	0,1629	0,0766	-0,55415	0,0016733
7	0,1576	0,1543	0,0808	-0,56593	0,0161215
8	0,1757	0,1461	0,0790	-0,5601	0,0086318
9	0,1541	0,1713	0,0827	-0,55831	0,0133457
10	0,1500	0,1645	0,0771	-0,56766	0,0133397
11	0,1652	0,1954	0,0765	-0,54308	-0,0056
12	0,1727	0,1756	0,0789	-0,54706	-0,000402
13	0,1789	0,1484	0,0796	-0,55661	0,0067091
14	0,1759	0,1673	0,0865	-0,54468	0,0069804
15	0,1848	0,1630	0,0803	-0,54518	-0,000824
16	0,1752	0,1687	0,0770	-0,55018	-0,000706
17	0,1793	0,1554	0,0836	-0,55039	0,0072073
18	0,1835	0,1636	0,0839	-0,54349	0,0024632
19	0,1528	0,1716	0,0865	-0,55664	0,0168983
20	0,1703	0,1662	0,0732	-0,55675	-0,000409
21	0,1555	0,1651	0,0779	-0,56351	0,0110383
22	0,1740	0,1584	0,0893	-0,54865	0,0132927
23	0,1635	0,1607	0,0710	-0,56503	0,0031592
24	0,1628	0,1679	0,0752	-0,55926	0,00429
25	0,1861	0,1758	0,0901	-0,53195	0,001777
26	0,1802	0,1599	0,0863	-0,54592	0,0073112
27	0,1653	0,1565	0,0734	-0,5646	0,0056584
28	0,1630	0,1660	0,0803	-0,557	0,0089098
29	0,1748	0,1646	0,0748	-0,55383	-0,000802
30	0,1690	0,1890	0,0993	-0,53014	0,0128731
31	0,1670	0,1486	0,0795	-0,56385	0,0124522
32	0,1685	0,1800	0,0918	-0,53956	0,0103554
33	0,1747	0,1510	0,0967	-0,54747	0,0214362
34	0,1763	0,1675	0,0792	-0,54877	0,0009196
35	0,1679	0,1601	0,0728	-0,56155	0,0026207
36	0,1923	0,1552	0,0928	-0,53695	0,0081394
37	0,1850	0,1598	0,0952	-0,53763	0,0120343
38	0,1879	0,1603	0,0748	-0,54803	-0,005741
39	0,1907	0,1608	0,0993	-0,53114	0,012107
40	0,1935	0,1613	0,0795	-0,54117	-0,005193
41	0,1964	0,1618	0,0918	-0,5317	0,0029762
42	0,1992	0,1624	0,0967	-0,52672	0,0052738
43	0,2021	0,1629	0,0792	-0,53535	-0,010201
44	0,2049	0,1634	0,0901	-0,52673	-0,003143
45	0,2077	0,1639	0,0863	-0,52704	-0,007748
46	0,2106	0,1644	0,0734	-0,53288	-0,019573
47	0,2134	0,1650	0,0803	-0,52668	-0,015689
48	0,2163	0,1655	0,0748	-0,52803	-0,021643

Величина вибрации с использованием метода главных компонент дефекта подшипника в первой точке

№ пп	Дефект подшипника				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,7262	0,6527	1,7591	1,054248	0,8897198
2	0,7198	0,6631	1,7684	1,06125	0,8965872
3	0,7242	0,6694	1,7638	1,064336	0,8885289
4	0,7266	0,6765	1,7783	1,078211	0,8963319
5	0,7185	0,6791	1,7784	1,074633	0,8995024
6	0,7146	0,6775	1,7907	1,078912	0,911759
7	0,7311	0,6780	1,8132	1,102934	0,9212625
8	0,7266	0,6723	1,8071	1,093588	0,9206685
9	0,7266	0,6764	1,8267	1,107575	0,9347682
10	0,7275	0,6778	1,8261	1,10847	0,933351
11	0,6984	0,7104	1,8442	1,11817	0,9505852
12	0,7361	0,7184	1,8380	1,141519	0,9241647
13	0,7448	0,7215	1,8193	1,137047	0,9039224
14	0,7430	0,7077	1,8320	1,136677	0,9197741
15	0,7430	0,7053	1,8537	1,148649	0,9378404
16	0,7306	0,7044	1,8783	1,155557	0,9638176
17	0,7479	0,7067	1,8959	1,178002	0,9684001
18	0,7426	0,7116	1,8945	1,17639	0,9681798
19	0,7325	0,7120	1,8901	1,167739	0,9695491
20	0,7346	0,7077	1,8715	1,155543	0,9552736
21	0,7356	0,7089	1,8985	1,173171	0,9757756
22	0,7365	0,7068	1,8930	1,169316	0,9717094
23	0,7376	0,7119	1,8990	1,176217	0,9741201
24	0,7299	0,7073	1,9226	1,18352	0,9982858
25	0,7276	0,7098	1,9082	1,174627	0,987115
26	0,7329	0,7064	1,9089	1,176573	0,986249
27	0,7383	0,7082	1,9016	1,176352	0,9771458
28	0,7436	0,7115	1,9165	1,190321	0,985175
29	0,7477	0,6974	1,9027	1,177304	0,9771857
30	0,7437	0,7099	1,9887	1,23345	1,0429757
31	0,7384	0,7055	1,8871	1,166234	0,9665475
32	0,7501	0,6961	1,8976	1,175015	0,9724109
33	0,7425	0,7034	1,8813	1,164155	0,9606585
34	0,7424	0,6931	1,8735	1,154139	0,9581647
35	0,7412	0,7018	1,8771	1,159997	0,9585362
36	0,7434	0,7045	1,8857	1,167936	0,9633145
37	0,7428	0,7043	1,8746	1,160736	0,9549179
38	0,7429	0,7059	1,8718	1,159896	0,9520841
39	0,7431	0,7074	1,8690	1,159056	0,9492504
40	0,7432	0,7089	1,8662	1,158215	0,9464166
41	0,7434	0,7104	1,8634	1,157375	0,9435828
42	0,7435	0,7119	1,8606	1,156535	0,940749
43	0,7437	0,7135	1,8578	1,155694	0,9379153
44	0,7438	0,7150	1,8550	1,154854	0,9350815
45	0,7440	0,7165	1,8522	1,154014	0,9322477
46	0,7441	0,7180	1,8494	1,153173	0,9294139
47	0,7443	0,7195	1,8466	1,152333	0,9265802
48	0,7444	0,7211	1,8438	1,151493	0,9237464

Величина вибрации с использованием метода главных компонент дефекта подшипника во второй точке

№ пп	Дефект подшипника				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,6178	0,4094	0,5810	0,148778944	0,094796643
2	0,5919	0,4116	0,5773	0,131797829	0,103908822
3	0,5801	0,4005	0,5900	0,126676601	0,123757218
4	0,5854	0,3986	0,5940	0,131388259	0,124978576
5	0,5888	0,4027	0,5898	0,1329918	0,118511447
6	0,5759	0,3901	0,5886	0,117990676	0,128407104
7	0,5914	0,4076	0,5871	0,135422507	0,113347479
8	0,5759	0,3976	0,5995	0,128412114	0,134400891
9	0,5816	0,4120	0,6056	0,142897275	0,131321522
10	0,6057	0,3993	0,5993	0,147383746	0,118882773
11	0,6067	0,4032	0,5984	0,149423151	0,116293217
12	0,6050	0,4165	0,5949	0,152989654	0,10965113
13	0,6224	0,4178	0,5965	0,165266013	0,101843533
14	0,6214	0,4129	0,5942	0,160775581	0,1022481
15	0,6057	0,4032	0,5921	0,144982623	0,11178998
16	0,5804	0,4092	0,5967	0,13533667	0,12584543
17	0,5945	0,3996	0,5923	0,136429046	0,118769299
18	0,5742	0,4000	0,5993	0,128465558	0,134234704
19	0,5816	0,3891	0,6056	0,131303218	0,139426141
20	0,5782	0,3911	0,6058	0,130357129	0,14056077
21	0,5868	0,3896	0,6101	0,137472656	0,140244333
22	0,5802	0,3963	0,6053	0,133909633	0,137333261
23	0,5891	0,3920	0,6117	0,141067327	0,139525368
24	0,5933	0,3914	0,6154	0,145581833	0,140593367
25	0,5955	0,3994	0,6155	0,151038954	0,136751899
26	0,5941	0,3915	0,6025	0,138282207	0,129926842
27	0,6014	0,3914	0,5938	0,137410672	0,119444429
28	0,5950	0,3965	0,6034	0,141911263	0,128425636
29	0,5966	0,3945	0,6099	0,145827852	0,133498245
30	0,6086	0,3868	0,5984	0,142282457	0,121156465
31	0,6076	0,3980	0,6032	0,150258189	0,121496216
32	0,5659	0,3902	0,6045	0,121585931	0,145939162
33	0,5649	0,3909	0,6023	0,1199915	0,144441155
34	0,5785	0,3968	0,6026	0,131481799	0,135855992
35	0,6023	0,3987	0,5971	0,143662749	0,1190334
36	0,5921	0,4003	0,5990	0,139386853	0,125025933
37	0,5897	0,3981	0,5972	0,135733237	0,125497329
38	0,5910	0,3988	0,5959	0,136123648	0,123643801
39	0,5923	0,3995	0,5947	0,136514059	0,121790274
40	0,5936	0,4002	0,5935	0,13690447	0,119936746
41	0,5949	0,4008	0,5923	0,137294881	0,118083218
42	0,5962	0,4015	0,5910	0,137685292	0,11622969
43	0,5975	0,4022	0,5898	0,138075703	0,114376163
44	0,5988	0,4029	0,5886	0,138466114	0,112522635
45	0,6001	0,4036	0,5874	0,138856525	0,110669107
46	0,6014	0,4042	0,5861	0,139246936	0,108815579
47	0,6027	0,4049	0,5849	0,139637347	0,106962051
48	0,6040	0,4056	0,5837	0,140027758	0,105108524

Величина вибрации с использованием метода главных компонент дефекта подшипника в третьей точке

№ пп	Дефект подшипника				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	1,1500	0,8265	0,4637	0,614281	-0,409447
2	1,2008	0,8300	0,4607	0,645311	-0,438224
3	1,2380	0,8263	0,4756	0,675253	-0,443515
4	1,2357	0,8399	0,4816	0,684377	-0,442429
5	1,2466	0,8449	0,4790	0,691998	-0,451659
6	1,2703	0,8606	0,4972	0,725507	-0,454513
7	1,2507	0,8639	0,4784	0,703761	-0,46089
8	1,2658	0,8593	0,4799	0,711582	-0,46555
9	1,2631	0,8876	0,4874	0,728816	-0,468278
10	1,2869	0,8732	0,4864	0,73548	-0,475762
11	1,2302	0,8477	0,4797	0,683807	-0,443973
12	1,2785	0,8580	0,4823	0,720153	-0,469475
13	1,2982	0,8630	0,4911	0,740085	-0,474019
14	1,2626	0,8698	0,4925	0,722598	-0,457684
15	1,2824	0,8468	0,4909	0,722095	-0,460619
16	1,2822	0,8400	0,4852	0,715066	-0,462636
17	1,2537	0,8539	0,4825	0,703025	-0,455584
18	1,3027	0,8606	0,4897	0,740773	-0,476509
19	1,2633	0,8624	0,5067	0,727909	-0,444146
20	1,2941	0,8597	0,5120	0,748608	-0,454238
21	1,2619	0,8654	0,5026	0,72608	-0,447767
22	1,2805	0,8629	0,5081	0,739537	-0,45173
23	1,2833	0,8841	0,5139	0,755508	-0,456018
24	1,3465	0,8806	0,5053	0,787177	-0,492901
25	1,2812	0,8813	0,5103	0,750618	-0,456843
26	1,2072	0,7503	0,5040	0,63519	-0,378832
27	1,2216	0,7564	0,4965	0,642531	-0,394073
28	1,2864	0,7556	0,5049	0,686877	-0,419216
29	1,3770	0,8569	0,4925	0,78606	-0,509773
30	1,2526	0,8445	0,4915	0,703063	-0,444572
31	1,2786	0,8400	0,4951	0,71888	-0,452999
32	1,2773	0,8521	0,4992	0,726702	-0,453384
33	1,3100	0,8384	0,4957	0,737646	-0,467506
34	1,2452	0,8242	0,5094	0,699136	-0,41952
35	1,2624	0,8550	0,5038	0,72185	-0,443382
36	1,2795	0,8581	0,5052	0,734732	-0,451837
37	1,2746	0,8461	0,5098	0,72845	-0,441508
38	1,2737	0,8461	0,5123	0,729439	-0,439155
39	1,2729	0,8461	0,5147	0,730429	-0,436802
40	1,2721	0,8461	0,5172	0,731418	-0,434449
41	1,2713	0,8461	0,5196	0,732407	-0,432097
42	1,2705	0,8461	0,5221	0,733397	-0,429744
43	1,2697	0,8461	0,5245	0,734386	-0,427391
44	1,2688	0,8461	0,5270	0,735375	-0,425039
45	1,2680	0,8461	0,5294	0,736364	-0,422686
46	1,2672	0,8461	0,5319	0,737354	-0,420333
47	1,2664	0,8461	0,5343	0,738343	-0,41798
48	1,2656	0,8461	0,5368	0,739332	-0,415628

Величина вибрации с использованием метода главных компонент при расцентровке в первой точке

№ пп	Расцентровка валов				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,9727	0,6853	0,4913	0,451089	-0,249773
2	0,8940	0,5860	0,5026	0,359531	-0,166689
3	1,1728	0,7791	0,5120	0,633586	-0,365642
4	0,9197	0,5623	0,4988	0,360946	-0,174044
5	0,9449	0,6023	0,4986	0,396495	-0,200839
6	1,0232	0,6858	0,4879	0,480173	-0,277657
7	1,0578	0,7247	0,5103	0,53465	-0,290786
8	1,0411	0,7242	0,4983	0,516887	-0,29186
9	0,9636	0,6450	0,4994	0,43004	-0,224577
10	1,0627	0,7489	0,4893	0,537138	-0,318439
11	1,0013	0,7003	0,5103	0,487729	-0,25417
12	0,9154	0,5859	0,5068	0,375126	-0,17392
13	1,0067	0,7125	0,5021	0,492226	-0,267668
14	0,9202	0,6030	0,4927	0,378151	-0,193536
15	0,9735	0,6486	0,4971	0,436522	-0,232579
16	0,9932	0,6990	0,4891	0,469231	-0,266519
17	0,9241	0,5982	0,4971	0,380781	-0,190277
18	1,0214	0,7210	0,5002	0,504368	-0,279464
19	0,9232	0,6124	0,4987	0,388392	-0,193588
20	1,0068	0,7126	0,4893	0,484559	-0,277909
21	0,9970	0,7119	0,5103	0,490971	-0,256146
22	1,0092	0,8498	0,5009	0,562528	-0,318441
23	1,0119	0,7354	0,4877	0,49825	-0,289773
24	1,0581	0,8425	0,4939	0,584508	-0,345638
25	1,0464	0,7656	0,4815	0,53088	-0,322466
26	1,0890	0,8621	0,5036	0,619232	-0,360181
27	1,0355	0,8037	0,4899	0,548606	-0,323887
28	1,0126	0,7645	0,5020	0,522102	-0,289073
29	1,0782	0,8179	0,5050	0,591097	-0,338079
30	1,0683	0,8326	0,4832	0,579234	-0,355675
31	1,0431	0,8197	0,4930	0,56324	-0,330854
32	1,0158	0,8001	0,4992	0,540382	-0,305479
33	1,0264	0,7876	0,5103	0,547285	-0,297497
34	1,0484	0,8156	0,4828	0,558208	-0,340121
35	1,0944	0,8604	0,4918	0,614504	-0,371616
36	1,0994	0,8653	0,5000	0,625027	-0,36932
37	1,0679	0,8538	0,4918	0,594921	-0,3562
38	1,0700	0,8607	0,4901	0,598657	-0,361008
39	1,0720	0,8677	0,4884	0,602394	-0,365815
40	1,0740	0,8747	0,4867	0,60613	-0,370622
41	1,0760	0,8816	0,4850	0,609867	-0,37543
42	1,0781	0,8886	0,4833	0,613603	-0,380237
43	1,0801	0,8955	0,4816	0,61734	-0,385044
44	1,0821	0,9025	0,4799	0,621076	-0,389852
45	1,0841	0,9095	0,4782	0,624813	-0,394659
46	1,0861	0,9164	0,4765	0,628549	-0,399466
47	1,0882	0,9234	0,4749	0,632285	-0,404274
48	1,0902	0,9304	0,4732	0,636022	-0,409081

## Величина вибрации с использованием метода главных компонент при расцентровке во второй точке

№ пп	Расцентровка валов				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	0,7712	0,7249	0,5039	0,355512134	-0,154002665
2	0,7393	0,7438	0,4961	0,340823411	-0,151082444
3	0,7333	0,7529	0,4962	0,341820459	-0,15125235
4	0,7329	0,7440	0,5061	0,343086268	-0,140049699
5	0,7347	0,7556	0,4981	0,345198691	-0,151393762
6	0,7141	0,7461	0,4936	0,325050481	-0,141400227
7	0,7625	0,7915	0,4877	0,374062961	-0,186118017
8	0,7747	0,7759	0,4891	0,374479954	-0,185527974
9	0,7691	0,7601	0,4922	0,364938285	-0,174703304
10	0,8052	0,8480	0,4915	0,431102829	-0,224245401
11	0,7826	0,8254	0,4976	0,409540493	-0,200215029
12	0,7487	0,7289	0,4891	0,334776755	-0,156018123
13	0,8563	0,7338	0,4986	0,40886374	-0,203501422
14	0,8677	0,7210	0,4994	0,409844246	-0,203982199
15	0,8624	0,7444	0,4936	0,414923924	-0,214240829
16	0,8604	0,7516	0,4979	0,4199588	-0,2123869
17	0,8588	0,7878	0,4878	0,431169524	-0,232419616
18	0,8484	0,7667	0,5021	0,422814316	-0,208455952
19	0,8437	0,7686	0,5013	0,420414491	-0,207435544
20	0,8488	0,7578	0,5143	0,425967367	-0,195824647
21	0,8425	0,7475	0,5271	0,424677	-0,178903793
22	0,8515	0,7339	0,5485	0,436303325	-0,161568705
23	0,8410	0,7612	0,5589	0,450021256	-0,157779219
24	0,8247	0,8027	0,5318	0,444590034	-0,185895752
25	0,8304	0,8689	0,5269	0,478616022	-0,216035316
26	0,8369	0,8304	0,5251	0,4620068	-0,20705676
27	0,8568	0,8347	0,5374	0,483834314	-0,208674709
28	0,8321	0,8265	0,5261	0,457703221	-0,202505997
29	0,8329	0,8163	0,5187	0,448531316	-0,205163475
30	0,8306	0,8064	0,5335	0,451106238	-0,188778282
31	0,8375	0,7724	0,5223	0,431307392	-0,189048454
32	0,8480	0,7526	0,5263	0,430137954	-0,184067229
33	0,8569	0,7464	0,5233	0,430621033	-0,188660712
34	0,8725	0,7399	0,5180	0,433653696	-0,198290883
35	0,8702	0,7470	0,5219	0,438211302	-0,196570358
36	0,8749	0,7458	0,5247	0,44218099	-0,196251691
37	0,8751	0,7151	0,5219	0,425077069	-0,187748859
38	0,8795	0,7036	0,5215	0,421685137	-0,186133919
39	0,8838	0,6921	0,5211	0,418293205	-0,184518978
40	0,8882	0,6806	0,5207	0,414901273	-0,182904037
41	0,8925	0,6691	0,5204	0,41150934	-0,181289097
42	0,8969	0,6576	0,5200	0,408117408	-0,179674156
43	0,9012	0,6461	0,5196	0,404725476	-0,178059216
44	0,9056	0,6346	0,5192	0,401333544	-0,176444275
45	0,9099	0,6232	0,5188	0,397941611	-0,174829335
46	0,9142	0,6117	0,5185	0,394549679	-0,173214394
47	0,9186	0,6002	0,5181	0,391157747	-0,171599453
48	0,9229	0,5887	0,5177	0,387765814	-0,169984513

## Величина вибрации с использованием метода главных компонент при расцентровке в третьей точке

№ пп	Расцентровка валов				
	X, мм/с	Y, мм/с	Z, мм/с	PC1	PC2
1	1,0307	1,1977	0,4203	0,70285	-0,516173
2	1,0326	1,1875	0,4179	0,697389	-0,515409
3	1,0171	1,1254	0,4119	0,652819	-0,490515
4	1,0142	1,1220	0,4030	0,643914	-0,494937
5	1,0122	1,1250	0,4170	0,652718	-0,4839
6	1,0136	1,1263	0,4127	0,651619	-0,488465
7	1,0096	1,1227	0,4155	0,649051	-0,482989
8	1,0098	1,1394	0,4188	0,659634	-0,48638
9	1,0070	1,1285	0,4120	0,64827	-0,486531
10	1,0123	1,1207	0,4072	0,644646	-0,490203
11	1,0105	1,1134	0,4113	0,642341	-0,483476
12	1,0055	1,1054	0,4047	0,63122	-0,483405
13	1,0014	1,1237	0,4166	0,645209	-0,478409
14	1,0166	1,1793	0,4079	0,677371	-0,512517
15	1,0379	1,0571	0,4113	0,630601	-0,477119
16	1,0365	1,0661	0,4068	0,631566	-0,483182
17	1,0436	1,0942	0,3977	0,644606	-0,503863
18	1,0448	1,0899	0,4185	0,655804	-0,486432
19	1,0454	1,1050	0,4137	0,660899	-0,495882
20	1,0340	1,0968	0,4245	0,656336	-0,478765
21	1,0390	1,1013	0,4213	0,659729	-0,485373
22	1,0457	1,1064	0,4058	0,656991	-0,502794
23	1,1090	1,0243	0,4182	0,661689	-0,495247
24	1,0754	1,0030	0,4165	0,629314	-0,472418
25	1,0611	1,0066	0,4185	0,623603	-0,465024
26	1,0734	1,0126	0,4153	0,632222	-0,475777
27	1,0626	1,0155	0,4258	0,633463	-0,463124
28	1,0736	1,0171	0,4053	0,628545	-0,485403
29	1,0642	1,0204	0,4010	0,621851	-0,485327
30	1,0712	1,0393	0,3957	0,632482	-0,499688
31	1,0622	1,0382	0,3953	0,626176	-0,495159
32	1,0673	1,0499	0,3998	0,637954	-0,498255
33	1,0717	1,0480	0,3922	0,635066	-0,505792
34	1,0685	1,0362	0,4019	0,633029	-0,492335
35	1,0570	1,0212	0,3948	0,614083	-0,486964
36	1,0594	1,0292	0,3951	0,619784	-0,490746
37	1,0594	1,0292	0,3951	0,619784	-0,490746
38	1,0551	1,0181	0,3943	0,611053	-0,485334
39	1,0526	1,0131	0,3937	0,606606	-0,482818
40	1,0501	1,0081	0,3930	0,602159	-0,480302
41	1,0476	1,0031	0,3924	0,597712	-0,477787
42	1,0450	0,9981	0,3918	0,593265	-0,475271
43	1,0425	0,9931	0,3912	0,588819	-0,472755
44	1,0400	0,9881	0,3905	0,584372	-0,470239
45	1,0375	0,9831	0,3899	0,579925	-0,467723
46	1,0350	0,9781	0,3893	0,575478	-0,465207
47	1,0325	0,9732	0,3887	0,571031	-0,462692
48	1,0300	0,9682	0,3880	0,566584	-0,460176