

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств
 ООП/ОПОП Конструирование технологического оборудования
 Отделение школы (НОЦ) Отделение машиностроения

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА

Тема работы
Стенд для вибрационного контроля состояния подшипников качения

УДК 621.822.6:620.178.5

Обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ11	Богданов Дмитрий Андреевич		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМШ ИШНПТ	Буханченко Сергей Евгеньевич	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Маланина Вероника Анатольевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМШ ИШНПТ	Бибик Владислав Леонидович	к.т.н.		

РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

по основной образовательной программе подготовки магистров по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»,
профиль подготовки «Конструирование технологического оборудования»
ИШНПТ ТПУ, отделение машиностроения, руководитель ООП Бибик В. Л.

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, выработывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования в области конструкторско-технологической подготовки машиностроительных производств, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки исследований
ОПК(У)-2	Способен разрабатывать современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
ОПК(У)-3	Способен использовать современные информационно-коммуникационные технологии, глобальные информационные ресурсы в научно-исследовательской деятельности
ОПК(У)-4	Способен подготавливать научно-технические отчеты и обзоры по результатам выполненных исследований и проектно-конструкторских работ в области машиностроения
ОПК(У)-5	Способен организовывать и осуществлять профессиональную подготовку по образовательным программам в области машиностроения
ОПК(У)-6	Способен разрабатывать и применять алгоритмы и современные цифровые системы автоматизированного проектирования производственно-технологической документации машиностроительных производств

ОПК(У)-7	Способен организовывать подготовку заявок на изобретения и промышленные образцы в области конструкторско-технологической подготовки машиностроительных производств.
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки по отдельным разделам темы
ПК(У)-2	Способен проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по тематике организации
ПК(У)-3	Способен осуществлять инструментальное обеспечение механосборочного цеха
ПК(У)-4	Способен разрабатывать архитектуры гибких производственных систем в машиностроении
ПК(У)-5	Способен автоматизировать и механизировать производственные процессы механосборочного производства
ПК(У)-6	Способен использовать современные психолого-педагогические теории и методы в профессиональной деятельности

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машино-
 строительных производств
 ООП/ОПОП Конструирование технологического оборудования
 Отделение школы (НОЦ) Отделение машиностроения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП/ОПОП
 _____ Бибик В.Л.
 (Подпись) (Дата) (ФИО)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
4НМ11	Богданов Дмитрий Андреевич

Тема работы:

Стенд для вибрационного контроля состояния подшипников качения	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	06.02.2023 №37-49/с

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	21.05.2023
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Техническое задание на разработку изделия «Стенд для вибрационного контроля состояния подшипников качения» для ООО «ТИК» г. Пермь (Приложение Б)
Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке	<ol style="list-style-type: none"> 1. Аналитический обзор дефектов и средств вибрационной диагностики подшипников качения. 2. Разработка технического предложения исполнений стенда. 3. Проведение кинематических расчетов модулей стенда. 4. Эскизное проектирование конструкции стенда. 5. Моделирование работы модулей стенда.
Перечень графического материала	<ol style="list-style-type: none"> 1. Аналитический обзор дефектов подшипников качения. 2. Обзор средств вибрационной диагностики подшипников качения.

	<ol style="list-style-type: none"> 3. Принципиальные схемы возможных вариантов исполнения стенда. 4. Состав и принципиальная схема разработанного стенда. 5. Кинематические расчеты модулей стенда. 6. Компонировочные схемы и промышленный дизайн стенда. 7. Теоретическое моделирование работы модулей стенда. 8. Проектировочные расчеты. 9. 3D Модель стенда. 10. Инженерные расчеты по разработанной модели стенда.
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Маланина Вероника Анатольевна
Социальная ответственность	Антоневич Ольга Алексеевна
Раздел на иностранном языке	Тайдонова Светлана Сергеевна
	Полякова Наталья Владимировна
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
Обзор литературы	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	06.02.2023
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМШ ИШНПТ	Буханченко Сергей Евгеньевич	к.т.н.		

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ11	Богданов Дмитрий Андреевич		

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машино-
 строительных производств
 ООП/ОПОП Конструирование технологического оборудования
 Уровень образования Магистратура
 Отделение школы (НОЦ) Отделение машиностроения
 Период выполнения с 01.10.2021 по 21.05.2023

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
4НМ11	Богданов Дмитрий Андреевич

Тема работы:

Стенд для вибрационного контроля состояния подшипников качения
--

Срок сдачи обучающимся выполненной работы	21.05.2023
---	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
30.04.2023	Основная часть	60
21.05.2023	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
21.05.2023	Социальная ответственность	20

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМШ ИШНПТ	Буханченко Сергей Евгеньевич	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП/ОПОП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМШ ИШНПТ	Бибик Владислав Леонидович	к.т.н.		

Обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ11	Богданов Дмитрий Андреевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 175 страниц, 185 рисунков, 49 таблиц, 25 источников, 2 приложения.

Ключевые слова: подшипник, подшипник качения, вибрация, вибродиагностика, испытание, испытательный стенд, разработка.

Объектом разработки является стенд для вибрационной диагностики состояния подшипников качения.

Цель работы – разработка автоматизированного малогабаритного испытательного стенда модульной конструкции для диагностики радиальных и радиально-упорных подшипников качения как новых, так и бывших в употреблении, по вибрационным характеристикам.

В ходе работы проводился обзор литературы, разработка технического предложения, проведение кинематических расчетов, эскизное проектирование, моделирование работы стенда.

В результате разработана принципиальная и компоновочная схема, 3D модель, определены колебательные процессы циклограммы работы, выполнен прочностной и частотный анализ конструкции.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: внутренний посадочный диаметр диагностируемого подшипника 30...220 мм, наружный диаметр диагностируемого подшипника 42...420 мм, ширина диагностируемого подшипника до 140 мм, масса диагностируемого подшипника до 65 кг.

Область применения: вибродиагностика.

Минимальная себестоимость стенда – 562 050 руб., максимальная себестоимость стенда – 1 495 322 руб.

В будущем планируется выпуск серийных изделий.

Содержание

Введение	10
Определения, обозначения, сокращения	11
1 Обзор литературы	12
1.1 Обзор подшипников	12
1.2 Анализ дефектов подшипников качения	14
1.3 Анализ стендов для вибрационного контроля состояния подшипников качения	17
1.3.1 Российские разработки	17
1.3.2 Зарубежные разработки	18
1.3.3 Сравнение характеристик аналогов	18
1.4 Описание прототипа	23
1.4.1 Устройство станка	23
1.4.2 Принцип работы станка	26
1.4.3 Анализ достоинств и недостатков	28
2 Расчеты и аналитика	29
2.1 Техническое предложение исполнений стенда	29
2.1.1 Назначение и область применения разрабатываемого стенда	29
2.1.2 Техническая характеристика и состав стенда	29
2.1.3 Разработка принципиальной схемы и описание принципа работы	30
2.1.4 Разработка оптимального варианта компоновки	38
2.2 Кинематические расчеты	61
2.2.1 Расчет пневмопривода модулей радиального и осевого нагружения	61
2.2.2 Расчет мощности электродвигателя для преодоления трения покоя	63
2.2.3 Расчет плоскоременной передачи	66
2.2.4 Расчет гидродинамических подшипников	68
3 Результаты проведенного исследования	71
3.1 Эскизное проектирование	71
3.1.1 Описание итогового варианта исполнения	71
3.1.2 Разработка конструктивного решения	73
3.1.3 Проектировочные расчеты	76
3.2 Моделирование работы стенда	80
3.2.1 Модуль вращения внутреннего кольца подшипника	80
3.2.2 Модуль радиального нагружения подшипника	86
3.2.3 Модуль осевого нагружения подшипника	89

3.2.4 Совместная работа модулей	91
3.3 Расчеты по разработанной модели стенда	96
3.3.1 Расчеты конструкции узлов на прочность	96
3.3.2 Частотный анализ конструкции	121
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и реурсосбережение	146
5 Социальная ответственность	156
Заключение	172
Список используемых источников	173
Приложение А Literature Review	176
Приложение Б Техническое задание на разработку изделия «Стенд для вибрационного контроля состояния подшипников качения» для ООО «ТИК» г. Пермь	191

Введение

Актуальность работы обусловлена, отсутствием на рынке стендов для вибрационного контроля подшипников качения с возможностью испытания широкой номенклатуры подшипников и отвечающих высоким требованиям по эргономике и технической эстетике.

Объектом исследования является подшипник качения.

Предметом исследования является стенд для вибрационного контроля подшипников качения.

Методы исследования: наблюдение, тестирование, измерение, сравнение, моделирование, анализ и синтез.

Научная значимость работы заключается в возможности дальнейшего использования результатов моделирования для модернизации существующего и разработки нового технологического оборудования.

Практическая значимость заключается в создании нового стенда для вибрационного контроля подшипников качения с характеристиками, превосходящими конкурентов.

Цель работы – разработка автоматизированного малогабаритного испытательного стенда модульной конструкции для диагностики радиальных и радиально-упорных подшипников качения как новых, так и бывших в употреблении, по вибрационным характеристикам.

Для достижения цели планируется выполнить обзор литературы, разработать техническое предложение, провести кинематические расчеты, эскизное проектирование, моделирование работы стенда.

Определения, обозначения, сокращения

ДП - датчик положения;

ДС - датчик скорости;

ИП - источник питания;

К - контроллер;

МВВКП - модуль вращения внутреннего кольца подшипника;

МИ - модуль измерительный;

МОНП - модуль осевого нагружения подшипника;

МПСВ - модуль подготовки сжатого воздуха;

МРНП - модуль радиального нагружения подшипника;

МУ - модуль управления;

ПВ - прибор виброизмерительный;

Поз. - позиция;

УП - управление пневматикой;

ФК - форма собственных колебаний;

ЭД – электродвигатель.

1 Обзор литературы

1.1 Обзор подшипников

Подшипником называется опорная деталь, используемая для уменьшения трения между движущимися частями механизмов. По типу тел качения подшипники делятся на подшипники качения, подшипники скольжения и подшипники линейного перемещения.

В данной работе рассматриваются подшипники качения.

Классификация подшипников качения представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Классификация подшипников качения

Подшипники качения работают преимущественно при трении качения и состоят из двух колец, тел качения и сепаратора, отделяющего тела качения друг от друга, удерживающего их на равном расстоянии и направляющего их движение. По наружной поверхности внутреннего кольца и внутренней поверхности

наружного кольца выполняют желоба – дорожки качения, по которым при работе подшипника катятся тела качения. [1]

Также существуют подшипники качения без сепаратора. Такие подшипники имеют большее число тел качения и большую грузоподъемность, однако их применение возможно при меньших частотах вращения.

Подшипники воспринимают радиальные, действующие в направлении, перпендикулярном оси подшипника; и осевые, действующие в направлении, параллельном оси подшипника нагрузки.

Подшипники качения имеют следующие **преимущества** по сравнению с подшипниками скольжения:

- более точное центрирование вала;
- низкий коэффициент трения;
- малая зависимость коэффициента трения от режима работы;
- небольшие моменты сопротивления в пусковые периоды;
- небольшие осевые размеры;
- способность работать при малой подаче масла;
- способность работать в широком температурном диапазоне;
- способность работать в глубоком вакууме.

Недостатками подшипников качения являются:

- большие радиальные размеры и масса;
- жесткость работы, отсутствие демпфирования колебаний нагрузки;
- шум во время работы, обусловленный погрешностями формы;
- сложность установки и монтажа подшипниковых узлов;
- повышенная чувствительность к неточностям установки;
- металлический контакт между телами качения и обоймами. [2]

Область применения подшипников качения: колёса автомобилей, самолётов, кранов, тягачей, ведущие барабаны гусеничной техники, электродвигатели, насосы, коробки передач, шпиндели металлорежущих станков и др.

Подшипники качения являются одним из источников вибрации, возбуждающих широкий спектр частот. Снижение вибраций может достигаться различными конструктивно-технологическими мероприятиями или в результате применения подшипников высокого качества. [3]

Широкая область применения и преимущества по сравнению с подшипниками скольжения позволяет сделать вывод об актуальности данной работы.

1.2 Анализ дефектов подшипников качения

Каждая причина повреждения подшипника находит отражение в характерной картине повреждения. Дефекты можно разделить на первичные и вторичные, которые служат непосредственной причиной выхода подшипника из строя. Первичные дефекты и их причины создают условия для возникновения вторичных дефектов. [4]

Даже первичные повреждения в некоторых случаях могут оказаться причиной потери работоспособности подшипника. Например, износ и, соответственно, чрезмерно большой зазор в подшипнике, могут вызвать недопустимо большие вибрации и шум. На вышедшем из строя подшипнике часто обнаруживают комбинацию первичных и вторичных повреждений.

Классификация дефектов в подшипниках качения представлена на рисунке Рисунок 2.

Согласно [5] вибродиагностика подшипников качения позволяет выявить следующие дефекты:

а) неравномерный износ поверхностей качения колец и тел качения, диагностируемый по росту низкочастотной подшипниковой вибрации (кинематической вибрации ротора) и возбуждению высокочастотной вибрации за счет модуляции сил трения;

б) износ поверхностей скольжения сепаратора и защитных колец, диагностируемый по возбуждению высокочастотной вибрации за счет износа поверхностей скольжения и дополнительной модуляции низкочастотной вибрации ротора за счет износа сепаратора;

в) сколы, раковины, трещины на поверхностях качения диагностируемый по возбуждению ударной вибрации в диапазоне средних и высоких частот;

г) дефекты сборки (увеличенный натяг, перекос сепаратора и колец) диагностируемые по росту кинематической вибрации на средних частотах и возбуждению высокочастотной вибрации за счет модуляции сил трения;

д) проскальзывание колец, диагностируемое по нарушению периодичности кинематической подшипниковой вибрации и возбуждению ударной высокочастотной вибрации;

е) ухудшение качества смазки, диагностируемое по возбуждению ударной ультразвуковой вибрации за счет разрыва смазочного слоя и ударов тел качения о неподвижное кольцо.

Таким образом можно сделать вывод о том, что вибрационная диагностика подшипников качения позволяет выявить значительную часть возможных дефектов. А недопустимость применения подшипников низкого качества позволяет снизить уровень шума во время работы и повысить ресурс промышленного динамического оборудования.

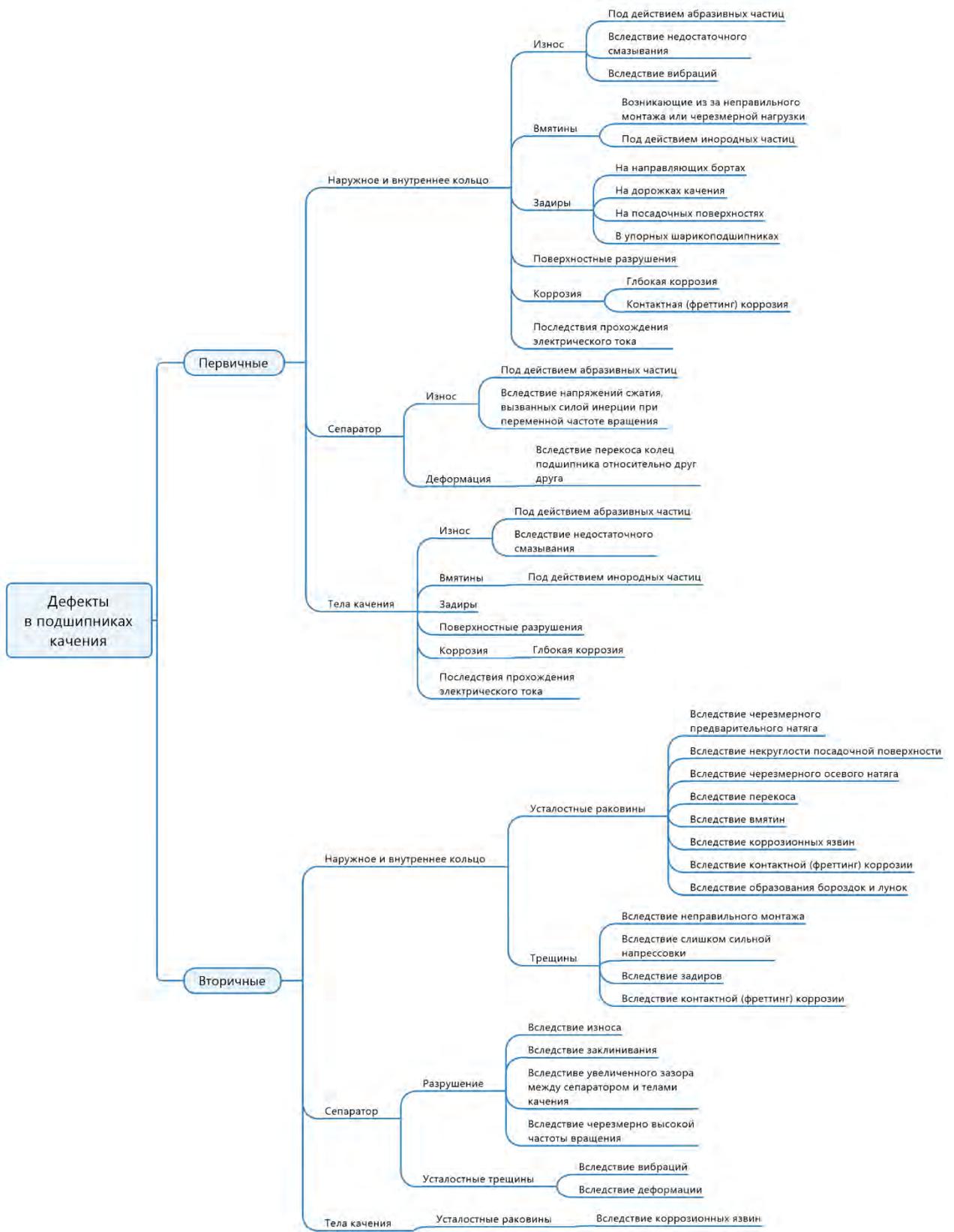


Рисунок 2. Классификация дефектов в подшипниках качения

1.3 Анализ стендов для вибрационного контроля состояния подшипников качения

Испытание подшипников на стендах позволяет испытывать большие партии подшипников и выявлять дефекты в них до установки на оборудование, таким образом сокращаются затраты на обслуживание промышленного динамического оборудования.

1.3.1 Российские разработки

Российскими разработками в области стендов для вибрационного контроля состояния подшипников качения являются НПП ТИК СВК-А, г. Пермь (рисунок 3) [6]; БАЛТЕХ ПРОТОН-СПП-КВК, г. Санкт-Петербург (рисунок 4) [7]; ДИАМЕХ СП-180М, г. Москва (рисунок 5) [8]; НПЦ «Динамика» КОМПАКС-РПП 1602, г. Омск (рисунок 6) [9].



Рисунок 3. СВК-А (НПП ТИК)



Рисунок 4. ПРОТОН-СПП-КВК
(БАЛТЕХ)



Рисунок 5. СП-180М (ДИАМЕХ)



Рисунок 6. КОМПАКС-РПП 1602
(НПЦ «Динамика»)

1.3.2 Зарубежные разработки

Зарубежными разработками в области стендов для вибрационного контроля состояния подшипников качения являются FAG MGL 35-7, Германия (рисунок 7) [10]; SKF MVH 200EL, Швеция (рисунок 8) [11].



Рисунок 7. MGL 35-7 (FAG)



Рисунок 8. MVH 200EL (SKF)

1.3.3 Сравнение характеристик аналогов

Классификация стендов для вибрационного контроля состояния подшипников качения представлена на рисунке 9.

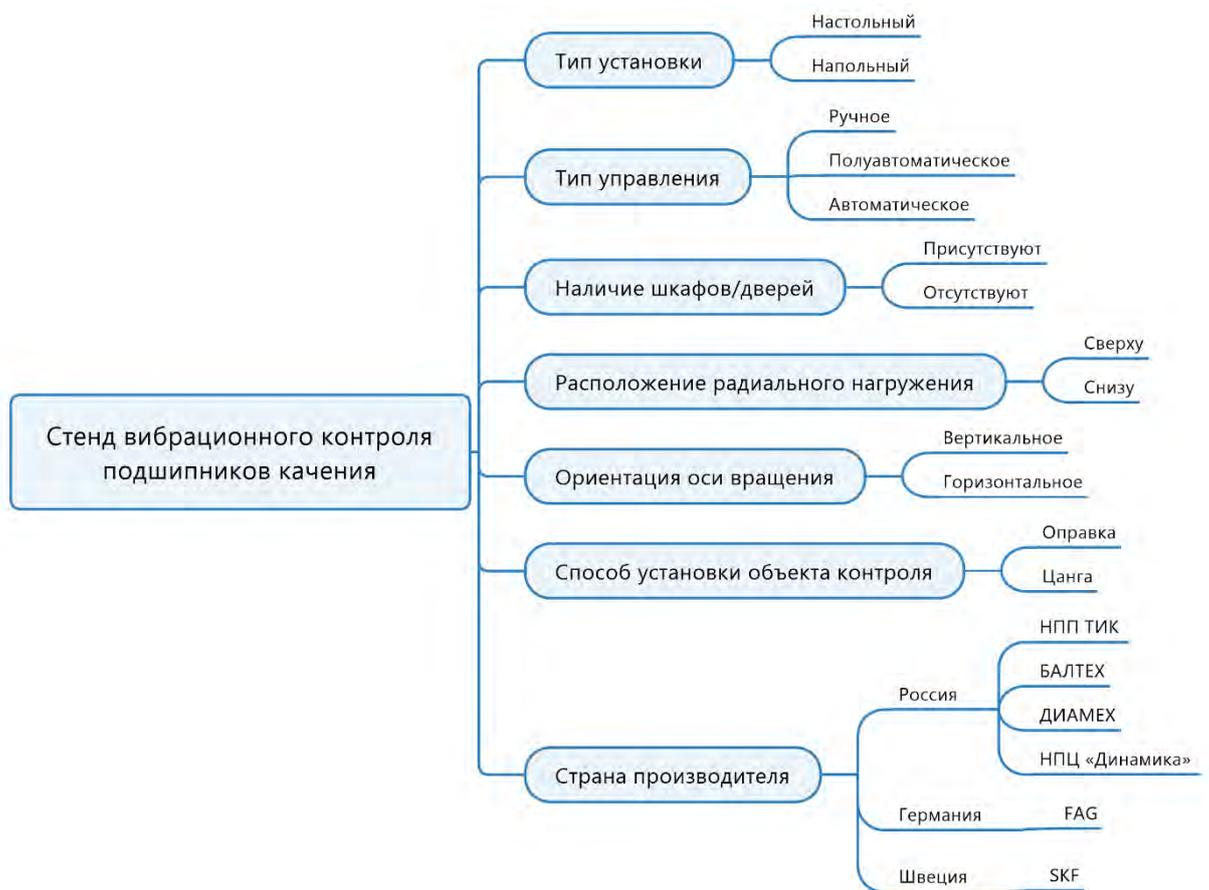


Рисунок 9. Классификация стендов для вибрационного контроля состояния подшипников качения

Ниже представлена сравнительная таблица 1 стендов для вибрационного контроля состояния подшипников качения. Наилучшие характеристики выделены цветом.

Таблица 1 – Сравнение стендов для вибрационного контроля состояния подшипников качения

	НПП ТИК СВК-А	БАЛТЕХ ПРОТОН-СПП-КВК	ДИАМЕХ СП-180М	НПЦ «Динамика» КОМПАС-РПП 1602	FAG MGL 35-7	SKF MVH 200EL
Внутренний посадочный диаметр диагностируемого подшипника, мм	35-150 20-180	7-240	25-220 60-300	40-120	3-120	-
Наружный диаметр диагностируемого подшипника, мм	42-320	30-420	до 420 до 460 до 500	до 310	10-180	80-200
Ширина диагностируемого подшипника, мм	7-106	-	до 145	-	4-60	-
Диапазон осевой нагрузки на подшипник, Н	0-2000	60-600	0-2000 0-2800	0-2000	-	100-900
Диапазон радиальной нагрузки на подшипник, Н	0-2000	10-500	0-2000 0-2800	0-2000	5-100	150-700
Габаритные размеры, мм	830x620x560 (привод стенда СВК-А) 300x450x240 (шкаф управления)	1100x680x1460	1300x690x1450	-	460x650x850	1780x780x1104
Масса, кг	120 (привод стенда, с датчиками) 30 (шкаф управления) 50 (комплект цанг)	400,0±10,0 (без компьютера и оправок)	400	-	100	320
Пневмосеть, кг/см ²	-	0-8	4 - 8	-	3-6	5,5-6
Расход сжатого воздуха, м ³ /час	-	0,05	-	-	0,18	-
Частотный диапазон применяемых вибропреобразователей, Гц	20-10000	-	-	22-11200	-	-
Частота вращения внутреннего кольца контролируемого подшипника, об/мин	1800 900	-	900 1800 0-3000	30-3000	130	700-1800

Продолжение таблицы 1

	НПП ТИК СВК-А	БАЛТЕХ ПРОТОН-СПП-КВК	ДИАМЕХ СП-180М	НПЦ «Динамика» КОМ-ПАКС-РПП 1602	FAG MGL 35-7	SKF MVH 200EL
Погрешность контроля частоты вращения вала шпинделя, %	±0,5	-	-	-	-	-
Время диагностики, с	90 (исключая время прогрева подшипника)	6-15	10 - 120	60	-	-
Напряжение питания, В	~220	-	-	-	230 В, 50/60 Гц	-
Потребляемая мощность, Вт, не более	1600	2000 (в том числе электродвигатель 1500)	1500 2200	1500	-	750
Подключение к компьютеру	USB	-	-	-	-	-
Диапазон рабочих температур, °С	+17...+27	-	-	-	-	-
Средняя наработка на отказ, часов, не менее	10 000	-	-	-	-	-
Гарантийный срок эксплуатации, мес.	18	-	-	-	-	-
Срок службы, лет	10	10	-	-	-	-
Межповерочный интервал	2 года	-	-	-	-	-
Направление вращения шпинделя	-	правое	-	-	-	-
Общий уровень помех по виброускорению, дБ	-	45-50	-	-	-	-
Датчики для регистрации информации с исследуемого подшипника:	-	-	1 датчик вибрации 1 датчик оборотов	-	-	-
Частотный диапазон датчика вибрации, Гц	-	-	5-10000	-	-	-
Диапазон рабочих частот при измерении виброускорения, Гц	-	-	20-20000	22-11200	-	-
Усилие прижатия датчика вибрации, Н	-	-	5-100 (регулируемое)	-	-	-

Исходя из таблицы 1 можно сделать вывод, что стенд ДИАМЕХ СП-180М имеет преимущество над конкурентами по диапазону размеров диагностируемых подшипников, что позволяет снизить количество испытательного оборудования и затраты на его обслуживание.

Вторым критерием оценки является масса стенда, т.к. наибольшая масса позволяет снизить собственные вибрации, и, соответственно, более точно определять класс шумности подшипника. Наибольшей массой обладают стенды ДИАМЕХ СП-180М и БАЛТЕХ ПРОТОН-СПП-КВК.

Так же исходя из таблицы 1 определены оптимальные характеристики будущего стенда. Они представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Оптимальные характеристики будущего стенда

Внутренний посадочный диаметр диагностируемого подшипника, мм	25-220 60-300
Наружный диаметр диагностируемого подшипника, мм	до 420 до 460 до 500
Ширина диагностируемого подшипника, мм	до 145
Диапазон осевой нагрузки на подшипник, Н	0-2000 0-2800
Диапазон радиальной нагрузки на подшипник, Н	0-2000 0-2800
Масса, кг	400
Пневмосеть, кг/см ²	0-8
Расход сжатого воздуха, м ³ /час	0,05
Частотный диапазон применяемых вибропреобразователей, Гц	22-11200
Частота вращения внутреннего кольца контролируемого подшипника, об/мин	900 1800 0-3000
Погрешность контроля частоты вращения вала шпинделя, %	±0,5
Время диагностики, с	6-15
Подключение к компьютеру	USB
Диапазон рабочих температур, °С	+17...+27
Средняя наработка на отказ, часов, не менее	10 000
Гарантийный срок эксплуатации, мес.	18
Срок службы, лет	10
Межповерочный интервал	2 года
Общий уровень помех по виброускорению, дБ	45-50
Частотный диапазон датчика вибрации, Гц	5-10000
Диапазон рабочих частот при измерении виброускорения, Гц	20-20000
Усилие прижатия датчика вибрации, Н	5-100 (регулируемое)

1.4 Описание прототипа

Исходя из п. 1.3 наилучшим прототипом является ДИАМЕХ СП-180М.

1.4.1 Устройство станка

Устройство станка ДИАМЕХ СП-180М представлено на рисунке 10.

Станок состоит из следующих основных узлов:

- основание;
- шпиндельный узел;
- ременный электропривод;
- механизмы подачи радиальной и осевой нагрузки;
- виброизмерительный прибор «ЯШМА»;
- электрооборудование;
- пневматическая система;
- комплект приспособлений для установки диагностируемых подшипников.

КОВ.

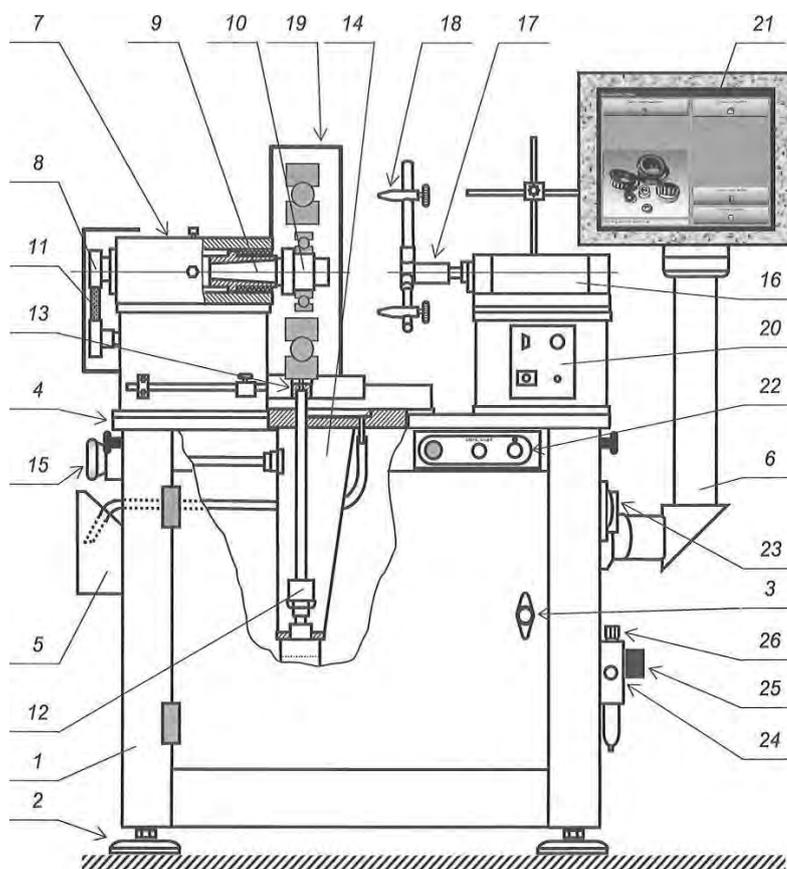


Рисунок 10. Устройство станка СП-180М (ДИАМЕХ)

Основание (поз. 1) представляет собой жесткую сварную конструкцию. Снизу станина имеет 4 регулируемые по высоте опоры (поз. 2), с помощью которых она выравнивается на полу. Внутри основания располагаются элементы пневматической системы и электрооборудования станка, наблюдение за которыми, а также доступ к ним можно осуществить через дверцы на передней и задней боковинах. Дверцы снабжены запирающимися на ключ замками (поз. 3). На основании располагается столешница (поз. 4), на которой установлены основные элементы станка. С левой стороны располагается лоток (поз. 5), служащий для приема смазочного масла, вытекающего из подшипника по желобу из поддона. С правой стороны прикреплена консоль (поз. 6) для системного блока виброизмерительного прибора «ЯШМА».

Конструкция шпиндельного узла выполнена таким образом, чтобы он кроме передачи вращательного движения, представлял собой жесткую базовую систему для оси внутреннего кольца испытываемого подшипника, что согласуется с требованиями ГОСТ Р 52545.1-2006. Это достигается за счёт применения в качестве опор шпинделя двух подшипников скольжения, погружённых в масло, при этом образующаяся при вращении несжимаемая плёнка (т.н. «масляный клин») имеет постоянную твёрдость. Сам шпиндель, расположенный в корпусе (поз. 7), изготовлен из высокопрочной конструкционной стали с термообработкой базовых поверхностей до твёрдости 47...53 HRC.

Ременный электропривод, установленный с задней стороны станка, через ремень (поз. 11) осуществляет вращение шпинделя с регулируемой скоростью.

Механизм подачи радиальной нагрузки располагается внутри станины и представляет собой пневмоцилиндр (поз. 12), шток которого толкает штангу, вверху которой расположена призма (поз. 13), которая в процессе диагностирования призма упирается в наружное кольцо подшипника. Внутри призмы расположен датчик вибрации, крепление которого выполнено таким образом, чтобы на него независимо от величины испытательной нагрузки постоянно действовало усилие, не превышающее 2,5 кг, что необходимо для обеспечения точности измерения вибрации. На призме выполнены два отверстия, в них располагаются

упоры для предотвращения перемещения обойм при испытании подшипников с цилиндрическими роликами. Упоры фиксируются относительно призмы стопорными барашками.

Каретка (поз. 14), на которой крепится механизм, может перемещаться вдоль столешницы для того, чтобы обеспечить нужное местоположения вектора подачи радиальной нагрузки – посередине диагностируемого подшипника. Движение каретки обеспечивает ходовой винт (поз. 15), снабженный механическим счетчиком перемещений.

Механизм подачи осевой нагрузки приводится в действие пневмоцилиндром (поз. 16), на чей шток одевается трехлучевой кронштейн (поз. 17). На каждой штанге осевого упора насаживается бобышка (поз. 18), которая может перемещаться вдоль штанги и фиксироваться в нужном месте винтом. Бобышки при диагностировании подшипников упираются в его наружное кольцо, передавая осевое усилие. Для удобства пользования на поверхность штанг нанесена разметка с шагом 5 мм. Кожух-маслоотбойник (поз. 19) служит для защиты оператора и окружающих от брызг смазочного масла, образующихся при вращении подшипника. Кожух может перемещаться вдоль столешницы влево за ручку, расположенную внизу, при этом обеспечивается свободный доступ к шпинделю сверху и сбоку. На основании механизма подачи осевой нагрузки находится закрытая дверцей с замком панель разъемов (поз. 20):

Виброизмерительный прибор «ЯШМА» является основным элементом измерительной системы станка, которая также включает в себя высокочувствительный датчик вибрации. Системный блок прибора (поз. 21) с сенсорным монитором дает оператору возможность как управлять станком, так и формировать базы данных по диагностируемым подшипникам.

Электрооборудование станка включает в себя электродвигатель привода, контроллеры, соединительные провода, реле, контрольные лампы, автоматы безопасности, кнопки и т.п.

На лицевой стороне станка расположена панель (поз. 22) с кнопками. На правой стенке основания располагается двойная розетка 220 В (поз. 23), предназначены для подключения питания различных внешних устройств, например, передвижного воздушного компрессора, приспособления для измерения зазора и т.п.

Пневматическая система станка, представляет собой совокупность пневмоцилиндров, регуляторов давления, манометров, соединительных шлангов и т.п., которые служат для привода в действие механизмов подачи нагрузки. Технологический воздух для пневмосистемы подается либо от цеховой магистрали, либо от автономного компрессора к фильтру регулятору (поз. 24), с манометром (поз. 25) и отсекается вентилем (поз. 26). Остальные устройства пневмосистемы расположены за передней дверцей основания станка.

1.4.2 Принцип работы станка

Станок моделирует работу подшипника, его механизмы подачи радиальной и осевой нагрузок прикладывают к подшипнику усилия, которые могут возникать в реальном механизме при вращении внутреннего кольца, и при этом датчик измеряет уровень вибрации (шумности) в децибелах, а виброизмерительный прибор «ЯШМА» сравнивает ее со значениями, регламентируемыми нормативными документами. На основе этого сравнения и делается вывод о пригодности того или иного подшипника для использования его по назначению.

Цикл работы станка состоит из следующих основных последовательных стадий:

а) Оператор вставляет оправку соответствующего типоразмера в вал шпинделя, надевает на нее специально спроектированную для конкретного подшипника втулку;

б) На втулку устанавливается диагностируемый подшипник (в необходимых случаях он должен быть закреплен на втулке фиксационной шайбой);

в) Оператор выбирает на мониторе виброизмерительного прибора «ЯШМА» предварительно введенные параметры для идентификации диагностируемого подшипника.

Это могут быть:

- номер (обозначение) по каталогу;
- номер партии;
- номер подшипника в партии (если необходимо).

В программу прибора заложены параметры испытаний подшипника, такие как:

- частота вращения шпинделя;
- вид прикладываемой нагрузки (радиальная, комбинированная).

г) Исходя из этих параметров, оператор настраивает станок и производит диагностирование подшипника, при этом к наружному кольцу подшипника подводится призма механизма подачи радиальной нагрузки и прижим механизма подачи осевой нагрузки.

д) В пневмоцилиндры механизмов подачи нагрузок подается сжатый воздух с давлением, создающим необходимое усилие на штоках цилиндров, после чего подшипник приходит во вращение.

е) Датчик, находящийся внутри призмы механизма подачи радиального усилия измеряет вибрацию подшипника, которая в виде электрического сигнала поступает в измерительный блок прибора «ЯШМА».

ж) на основании сравнения фактических параметров вибрации с нормативными данными делается вывод о степени пригодности подшипника для использования его в тех или иных целях.

Среднее расчетное время диагностирования одного подшипника без учета подготовительных операций составляет до 60 секунд в зависимости от размера и массы изделия. Для диагностирования различных типов подшипников в силу их конструкции требуются приложение либо комбинированной нагрузки (радиальной и осевой одновременно), либо только одного из этих видов нагрузки. [12, 13]

1.4.3 Анализ достоинств и недостатков

Достоинства:

1. Размеры диагностируемого подшипника. Стенд позволяет диагностировать подшипники диаметром до 500 мм, против 180-420 мм у конкурентов.

2. Масса стенда. Стенд обладает массой 400 кг, против 100-320 кг у конкурентов. Большая масса стенда позволяет снизить собственные вибрации стенда и испытывать подшипники большей массы.

3. Диапазон осевой и радиальной нагрузки. Стенд обладает диапазоном осевой и радиальной нагрузки до 2800 Н, против максимума 2000 Н у конкурентов. Это позволяет испытывать подшипники при большей нагрузке.

Недостатки:

1. Дизайн и эргономика. Устройство стенда не имеет цельный вид безопасным; станина оснащена с боковых сторон одной дверцей; экран системы управления статичен, не имеет функции поворота и регулирования положения экран; емкость для масла не имеет крышки.

2. Время диагностики. Максимальное время диагностики на стенде составляет 120 с, против 15-90 у конкурентов.

2 Расчеты и аналитика

2.1 Техническое предложение исполнений стенда

2.1.1 Назначение и область применения разрабатываемого стенда

Стенд предназначен для диагностики радиальных и радиально-упорных подшипников качения как новых, так и бывших в употреблении, по вибрационным характеристикам.

Область применения стенда – техническая диагностика методами вибродиагностики с целью оценки технического состояния подшипников качения.

2.1.2 Техническая характеристика и состав стенда

На основе п. 1.3, 1.4 и технического задания заказчика обозначен состав и технические характеристики стенда. Они представлены на рисунке 11.

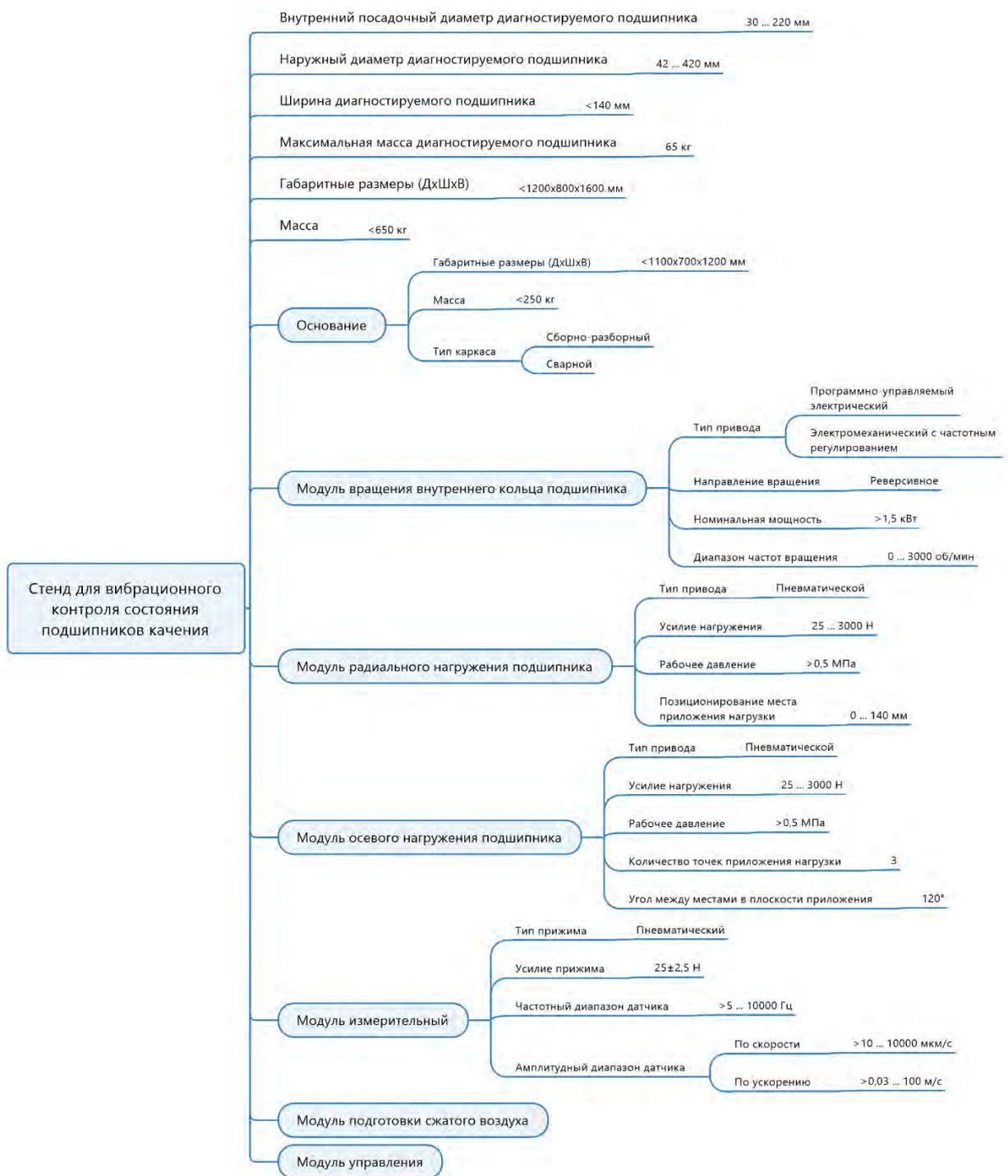


Рисунок 11. Состав и технические характеристики стенда

2.1.3 Разработка принципиальной схемы и описание принципа работы

2.1.3.1 Вариант №1

Согласно рисунку 12 стенд состоит из шести основных частей: основание 1, модуль вращения внутреннего кольца подшипника 2 (МВВКП), модуль радиального нагружения подшипника 3 (МРНП), модуль осевого нагружения

подшипника 4 (МОНП), модуль измерительный 5 (МИ), модуль подготовки сжатого воздуха (МПСАВ – не показан), модуль управления 6 (МУ).

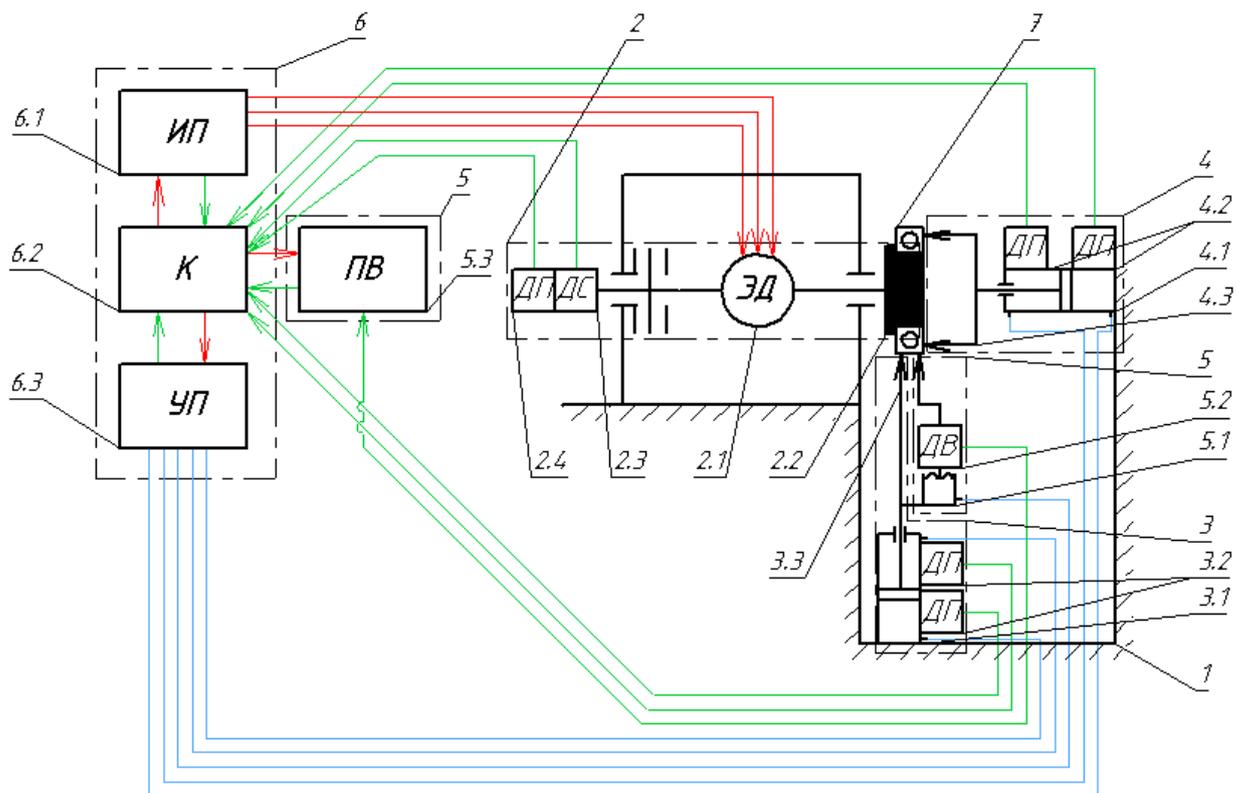


Рисунок 12. Принципиальная схема вариант №1

МВВКП 2 состоит из электродвигателя 2.1, приводящего в движение через оправку 2.2 внутренне кольцо подшипника 7. Частота вращения контролируется датчиком скорости 2.3. Положение контролируется датчиком положения 2.4.

МРНП 3 и МОНП 4 состоят из пневмоцилиндров 3.1 и 4.1, оказывающее радиальное/осевое воздействие через переходник 3.3 и 4.3 (призму/упор) на наружное кольцо подшипника 7. Положение пневмоцилиндров контролируется датчиками положения 3.2 и 4.2.

МИ 5 состоит из пневмоцилиндра 5.1, закрепленного на штоке пневмоцилиндра 3.1, с подвижной мембраной, который прижимает к наружному кольцу подшипника 7 датчик вибрации 5.2. Вибрационный сигнал обрабатывается прибором виброизмерительным 5.3.

Модуль управления 6 состоит из источника питания 6.1 (ИП), контроллера 6.2 (К) и управления пневматикой 6.3 (УП).

В соответствии с этим вариантом принципиальной схемы с стенд работает следующим образом.

Модуль радиального нагружения подшипника 3 располагается внутри станины и представляет собой пневмоцилиндр 3.1, шток которого толкает штангу, вверху которой расположена призма 3.3. Призма 3.3 в процессе контроля упирается в наружное кольцо диагностируемого подшипника 7.

Внутри призмы 3.3 расположен датчик вибрации 5.2, крепление которого выполнено таким образом, чтобы на него, независимо от величины испытательной нагрузки, постоянно действовало усилие, не превышающее 25 Н. Это необходимо для обеспечения точности измерения вибрации диагностируемого подшипника 7.

Модуль осевого нагружения подшипника 4 приводится в действие пневмоцилиндром 4.1, на чей шток одевается трехлучевой кронштейн 4.3. Кронштейн при контроле диагностируемого подшипника 7 упираются в его наружное кольцо, передавая осевое усилие.

Конструкция модуля вращения внутреннего кольца подшипника 2 выполнена таким образом, чтобы он кроме передачи вращательного движения, представлял собой жёсткую базовую систему для оси внутреннего кольца испытуемого подшипника в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52545.1-2006. Это достигается за счёт применения в качестве опор шпинделя двух магнитных подшипников. Шпинделю сообщается вращение от электродвигателя 2.1 напрямую, на вал которого непосредственно установлена оправка 2.2 диагностируемого подшипника 7.

Щуп датчика вибраций 5.2 вставлен в отверстие фигурной резинотканной мембраны и закреплен гайкой. Внешний край мембраны прикреплен к корпусу датчикодержателя, представляющего собой пневматическую камеру 5.1. Датчик вибрации при помощи шпильки жестко соединен с щупом. При подаче сжатого воздуха в камеру датчикодержателя щуп прижимается к поверхности наружного кольца диагностируемого подшипника 7.

Основными достоинствами данной принципиальной схемы являются:

- простота конструкции,
- простота обслуживания;
- соответствие методике проверки подшипников.

Наряду с достоинствами присутствуют следующие недостатки:

- увеличенный осевой размер (осевой размер – размер вдоль оси диагностируемого подшипника, места его установки);
- усложнение установки диагностируемого подшипника.

2.1.3.2 Вариант №2

Согласно рисунку 13 стенд состоит из шести основных частей: основание 1, модуль вращения внутреннего кольца подшипника 2 (МВВКП), модуль радиального нагружения подшипника 3 (МРНП), модуль осевого нагружения подшипника 4 (МОНП), модуль измерительный 5 (МИ), модуль управления 6 (МУ).

МВВКП 2 состоит из электродвигателя 2.1, приводящего в движение через муфту 2.5 (упругая муфта (кулачковая), гидромуфта) и оправку 2.2 внутренне кольцо подшипника 7. Частота вращения контролируется датчиком скорости 2.3. Положение контролируется датчиком положения 2.4.

МРНП 3 и МОНП 4 состоят из пневмоцилиндров 3.1 и 4.1, оказывающее радиальное/осевое воздействие через переходник 3.3 и 4.3 (призму/упор) на наружное кольцо подшипника 7. Положение пневмоцилиндров контролируется датчиками положения 3.2 и 4.2. Взаимное положение МРНП 3 и наружного кольца подшипника 7 настраивается шаговым двигателем 3.4 с датчиком положения 3.5.

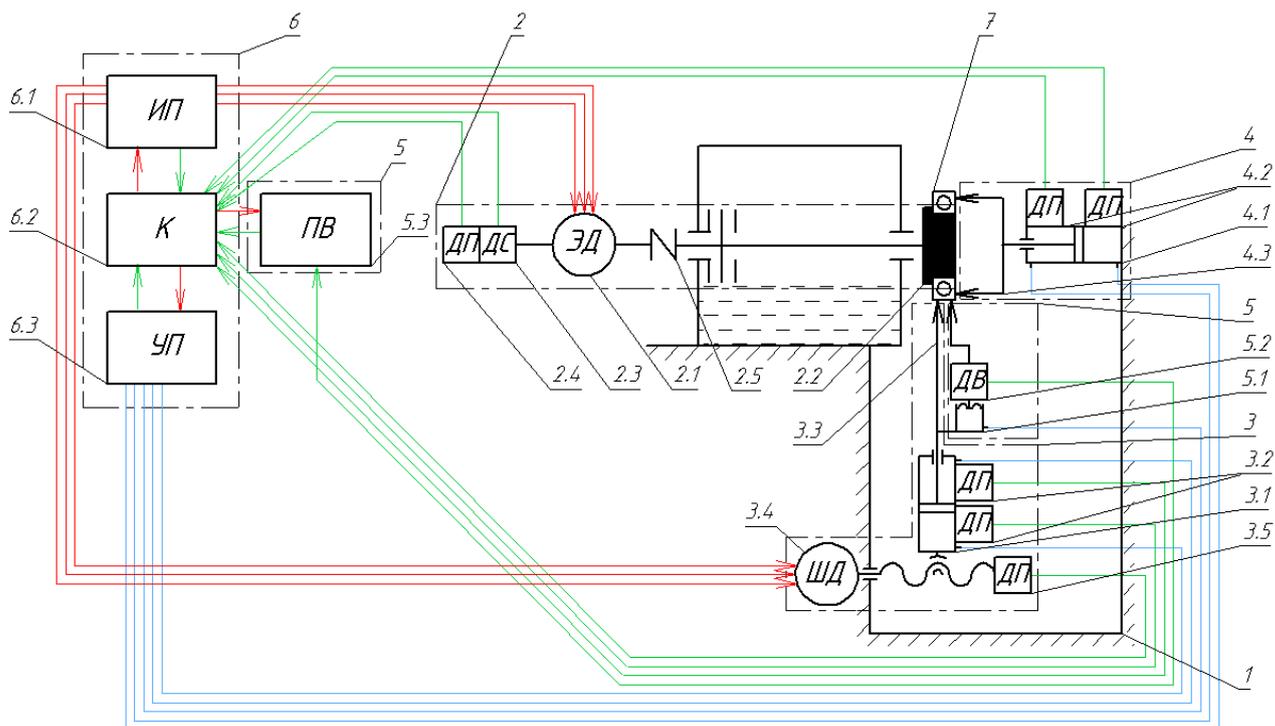


Рисунок 13. Принципиальная схема вариант №2

МИ 5 состоит из пневмоцилиндра 5.1, закрепленного на штоке пневмоцилиндра 3.1, с подвижной мембраной, который прижимает к наружному кольцу подшипника 7 датчик вибрации 5.2. Вибрационный сигнал обрабатывается прибором виброизмерительным 5.3.

Модуль управления 6 состоит из источника питания 6.1 (ИП), контроллера 6.2 (К) и управления пневматикой 6.3 (УП).

В соответствии с этим вариантом принципиальной схемы стенд работает следующим образом.

Модуль радиального нагружения подшипника 3 располагается внутри станины и представляет собой пневмоцилиндр 3.1, шток которого толкает штангу, вверху которой расположена призма 3.3, которая в процессе диагностирования упирается в наружное кольцо подшипника 7. Перед проведением измерения, благодаря шаговому двигателю 3.4 и винтовой передаче, производится автоматическая настройка взаимного положения подшипника 7 и датчика вибрации 5.2, исходя из введенных параметров испытуемого подшипника 7.

Внутри призмы 3.3 расположен датчик вибрации 5.2, крепление которого выполнено таким образом, чтобы на него независимо от величины испытательной нагрузки постоянно действовало усилие, не превышающее 2,5 кг, что необходимо для обеспечения точности измерения вибрации.

Модуль осевого нагружения подшипника 4 приводится в действие пневмоцилиндром 4.1, на чей шток одевается трехлучевой кронштейн 4.3. Кронштейн при диагностировании подшипника 7 упираются в его наружное кольцо, передавая осевое усилие.

Конструкция модуля вращения внутреннего кольца подшипников 2 выполнена таким образом, чтобы он кроме передачи вращательного движения, представлял собой жёсткую базовую систему для оси внутреннего кольца испытуемого подшипника, что согласуется с требованиями ГОСТ Р 52545.1-2006. Это достигается за счёт применения в качестве опор шпинделя двух подшипников скольжения. Шпинделю сообщается вращение от электродвигателя 2.1 через упругую муфту (кулачковую) или гидромфту 2.5.

Щуп акселерометра 5.2 вставлен в отверстие фигурной резинотканной мембраны и закреплен гайкой. Внешний край мембраны прикреплен к корпусу датчикодержателя, представляющего собой пневматическую камеру 5.1. Акселерометр при помощи шпильки жестко соединен с щупом. При подаче сжатого воздуха в камеру датчикодержателя щуп прижимается к поверхности наружного кольца подшипника 7.

Основными достоинствами данной принципиальной схемы являются:

- автоматическая настройка взаимного положения диагностируемого подшипника и датчика вибрации;
- соответствие методике проверки подшипников.

Наряду с достоинствами присутствуют следующие недостатки:

- увеличенный осевой размер (осевой размер – размер вдоль оси диагностируемого подшипника, места его установки);
- усложнение установки диагностируемого подшипника.

2.1.3.3 Вариант №3

Согласно рисунку 14 стенд состоит из шести основных частей: основание 1, модуль вращения внутреннего кольца подшипника 2 (МВВКП), модуль радиального нагружения подшипника 3 (МРНП), модуль осевого нагружения подшипника 4 (МОНП), модуль измерительный 5 (МИ), модуль управления 6 (МУ).

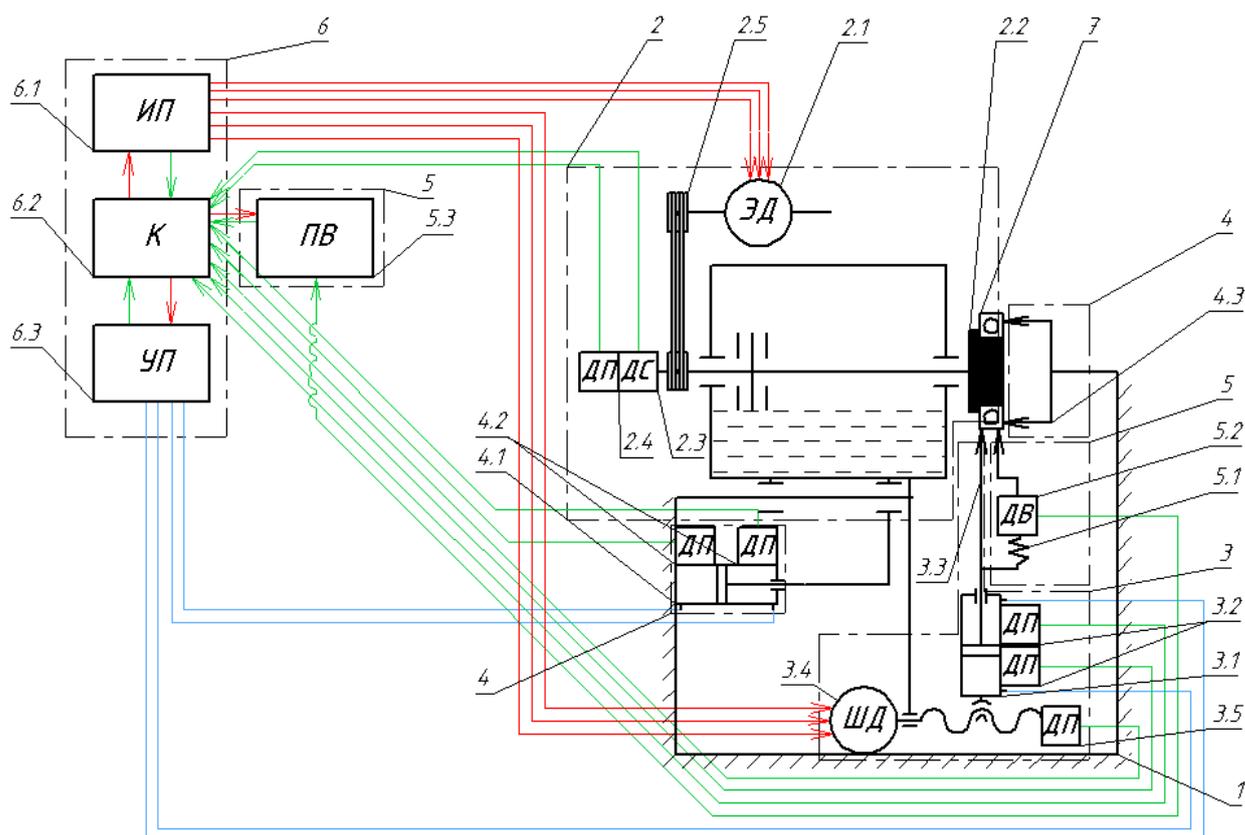


Рисунок 14. Принципиальная схема вариант №3

МВВКП 2 состоит из электродвигателя 2.1, приводящего в движение через ременную передачу 2.5 и оправку 2.2 внутренне кольцо подшипника 7. Частота вращения контролируется датчиком скорости 2.3. Положение контролируется датчиком положения 2.4.

МРНП 3 и МОНП 4 состоят из пневмоцилиндров 3.1 и 4.1, оказывающее радиальное/осевое воздействие через переходник 3.3 и 4.3 (призму/упор) на наружное кольцо подшипника 7. Положение пневмоцилиндров контролируется датчиками положения 3.2 и 4.2. Взаимное положение МРНП 3 и наружного

кольца подшипника 7 настраивается шаговым двигателем 3.4 с датчиком положения 3.5.

МИ 5 состоит из пружины 5.1, закрепленной на штоке пневмоцилиндра 3.1, которая прижимает к наружному кольцу подшипника 7 датчик вибрации 5.2. Вибрационный сигнал обрабатывается прибором виброизмерительным 5.3.

Модуль управления 6 состоит из источника питания 6.1 (ИП), контроллера 6.2 (К) и управления пневматикой 6.3 (УП).

В соответствии с этим вариантом принципиальной схемы стенд работает следующим образом.

Модуль радиального нагружения подшипника 3 располагается внутри станины и представляет собой пневмоцилиндр 3.1, шток которого толкает штангу, вверху которой расположена призма 3.3, которая в процессе диагностирования упирается в наружное кольцо подшипника 7. Перед проведением измерения, благодаря шаговому двигателю 3.4 и винтовой передаче, производится автоматическая настройка взаимного положения подшипника 7 и датчика вибрации 5.2, исходя из введенных параметров испытуемого подшипника 7.

Внутри призмы 3.3 расположен датчик вибрации 5.2, крепление которого выполнено таким образом, чтобы на него независимо от величины испытательной нагрузки постоянно действовало усилие, не превышающее 2,5 кг, что необходимо для обеспечения точности измерения вибрации.

Модуль осевого нагружения подшипника 4 приводится в действие пневмоцилиндром 4.1, приводящий в движение модуль вращения. Сменный комбинированный или настраиваемый трехлучевой кронштейн 4.3 закреплён на основании. Кронштейн, благодаря работе пневмоцилиндра 4.1, упирается в наружное кольцо подшипника, передавая осевое усилие.

Конструкция модуля вращения внутреннего кольца подшипников 2 выполнена таким образом, чтобы он кроме передачи вращательного движения, представлял собой жёсткую базовую систему для оси внутреннего кольца испытуемого подшипника, что согласуется с требованиями ГОСТ Р 52545.1-2006. Это

достигается за счёт применения в качестве опор шпинделя двух подшипников скольжения. Шпинделю сообщается вращение от электродвигателя 2.1 через ременную передачу 2.5.

Щуп акселерометра 5.2 опирается на пружину и закреплен гайкой. Внешний край пружины прикреплен к корпусу датчикодержателя. Акселерометр при помощи шпильки жестко соединен с щупом. При подъеме призмы модуля осевого нагружения подшипника 3 щуп прижимается к поверхности наружного кольца подшипника 7.

Основными достоинствами данной принципиальной схемы являются:

- компактность (уменьшенный осевой размер);
- автоматическая настройка взаимного положения диагностируемого подшипника и датчика вибрации;
- «скрытый» монтаж пневмоцилиндра (улучшенный эстетический вид);
- возможность использовать комбинированные трехкулачковые кронштейны (оправку-упор для определенного диапазона наружных диаметров);
- упрощение конструкции за счет применения пружины вместо мембранного пневмоцилиндра для прижима датчика вибрации.

Наряду с достоинствами присутствуют следующие недостатки:

- «скрытый» монтаж пневмоцилиндра (сложность обслуживания);
- сниженная жесткость базовой системы для оси внутреннего кольца испытуемого подшипника;
- не соответствие методике проверки подшипников.

2.1.4 Разработка оптимального варианта компоновки

Разработка оптимального варианта исполнения проведена на основе анализа возможных исполнений стенда, расположения составляющих его модулей и их элементов исходя из конструктивных особенностей, распространенности комплектующих изделий и расходных материалов, а также, в первую очередь, технологических возможностей Заказчика (рисунок 15).

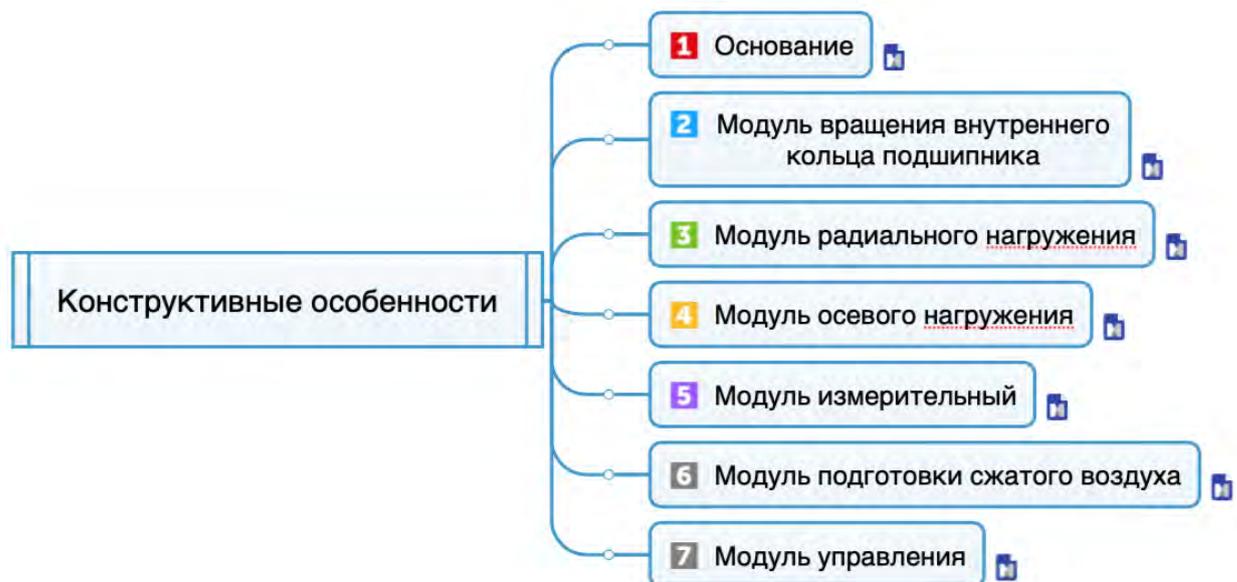


Рисунок 15. Схема рассмотрения конструктивных особенностей стенда

При разработке введена следующая система оценивания технических решений:

1. **Зеленый цвет** – высокий уровень показателя (3 балла);
2. **Желтый цвет** – средний уровень показателя (2 балла);
3. **Красный цвет** – низкий уровень показателя (1 балл).

2.1.4.1 Основание

На рисунке 16 представлена схема вариаций составляющих элементов основания на основе анализа типов, видов и полуфабрикатов, на основе которых оно может быть изготовлено.

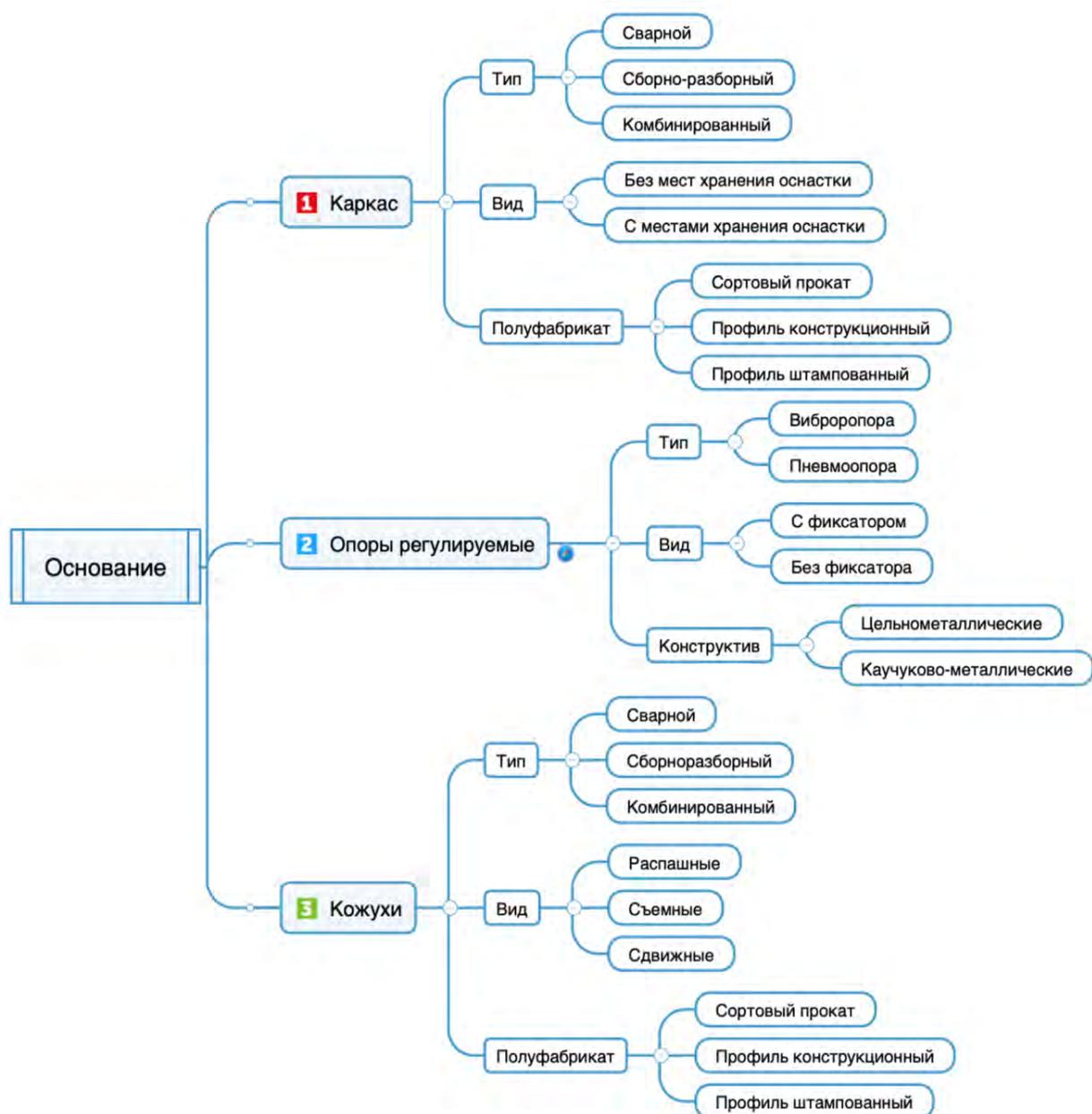


Рисунок 16. Схема вариантов исполнения основания

2.1.4.2 Каркас

Анализ достоинств и недостатков по типу каркаса приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Анализ достоинств и недостатков по типу каркаса

№	Наименование оценочного показателя	Сварной	Сборно-разборный	Комбинированный
1	Жесткость конструкции	3	1	2
2	Точность конструкции	1	3	2
3	Трудоемкость изготовления	2	3	1
4	Гашение вибраций	2	3	1
5	Ремонтопригодность	1	3	2
6	Возможность доработки	1	3	2

Продолжение таблицы 3

№	Наименование оценочного показателя	Сварной	Сборно-разборный	Комбинированный
7	Вариативность дизайна	1	3	2
	Итого:	11	19	12

Анализируя тип каркаса, на данном этапе, оптимальным решением является сборно-разборный каркас, однако обеспечения высокой жесткости конструкции может быть решающим в выборе в пользу сварного или сборно-разборного каркаса. Для полноты картины требуется сопоставить себестоимость изготовления для принятия окончательного решения.

Анализ достоинств и недостатков по виду каркаса приведен в таблице 4.

Таблица 4 – Анализ достоинств и недостатков по виду каркаса

№	Наименование оценочного показателя	Без мест хранения оснастки	С местами хранения оснастки
1	Жесткость конструкции	1	2
2	Простота конструкции	2	1
3	Массогабаритность конструкции	1	2
4	Гашение вибраций	1	2
5	Трудоемкость изготовления	2	1
6	Функциональность	1	2
	Итого:	8	10

Анализируя вид каркаса, на данном этапе, решение в пользу вида «с местами хранения оснастки» является предпочтительным, однако уже сейчас можно с уверенностью предположить, что решение с местами для хранения технологической оснастки будет стоить дороже.

Анализ достоинств и недостатков по возможности применения различных полуфабрикатов приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Анализ достоинств и недостатков по возможности применения различных полуфабрикатов

№	Наименование оценочного показателя	Сортовой прокат	Профиль конструкционный	Профиль штампованный
1	Масса конструкции	3	2	1
2	Гашение вибраций	2	3	1
3	Вариативность решений	1	3	2
	Итого:	6	8	4

Анализируя полуфабрикат, который может быть использован при создании каркаса на данном этапе, оптимальным решением является профиль конструкционный, не смотря на высокую стоимость. В последующем этот недостаток может быть компенсирован низкой трудоемкостью создания каркаса, сочетаемой с низкой стоимостью заготовительных и монтажных работ

2.1.4.3 Опоры регулируемые

Анализ достоинств и недостатков по типу опор приведен в таблице 6.

Таблица 6 – Анализ достоинств и недостатков по типу опор

№	Наименование оценочного показателя	Виброопора	Пневмоопора
1	Максимальная рабочая нагрузка	2	1
2	Собственная частота колебаний	1	2
3	Простота конструкции	2	1
4	Массогабаритность	2	1
5	Виброизоляция	1	2
6	Шумоизоляция	1	2
7	Наличие дополнительного источника энергии	2	1
8	Диапазон нивелирования	2	1
9	Абсорбция ударов	1	2
1	Итого:	14	13

Анализируя тип опоры, на данном этапе, виброопоры являются более предпочтительным решением, поскольку являются простым и надежным решением. Однако в случае возникновения необходимости гашения негативных вибраций с высокой точностью пневмоопора является наилучшим вариантом, поскольку, изменяя давление сжатого воздуха, можно менять ее жесткость. К тому же, к стенду будет подводиться пневматическая энергия.

Анализ достоинств и недостатков по виду опор приведен в таблице 7.

Таблица 7 – Анализ достоинств и недостатков по виду опор

№	Наименование оценочного показателя	С фиксатором	Без фиксатора
1	Простота конструкции	1	2
2	Массогабаритность	2	1
3	Функциональность	2	1
	Итого:	5	4

Анализируя вид опоры, на данном этапе, оба вида опор могут быть применены в конструкции в зависимости от типа и вида основания помещения, на котором они устанавливаются. Предлагается выбрать опоры, которые в стандартном состоянии поставки могут быть как с фиксатором, так и без него. Отличие в стоимости опоры является несущественным.

Анализ достоинств и недостатков по конструктиву опор приведен в таблице 8

Таблица 8 – Анализ достоинств и недостатков по конструктиву опор

№	Наименование оценочного показателя	Цельнометаллические	Каучуково-металлические
1	Простота конструкции	1	2
2	Собственная частота колебаний	2	1
3	Гашение вибраций	1	2
4	Массогабаритность	2	1
	Итого:	6	6

Анализируя конструктив опоры, на данном этапе, оба вида опор могут быть применены в конструкции, однако особое внимание стоит уделить собственной частоте колебаний и стоимости.

2.1.4.3.1 Кожухи

Анализ достоинств и недостатков по типу кожухов приведен в таблице 9.

Таблица 9 – Анализ достоинств и недостатков по типу кожухов

№	Наименование оценочного показателя	Сварной	Сборно-разборный	Комбинированный
1	Жесткость конструкции	3	1	2
2	Точность конструкции	1	3	2
3	Трудоемкость изготовления	2	3	1
4	Гашение вибраций	2	3	1
5	Ремонтопригодность	1	3	2
6	Возможность доработки	1	3	2
7	Вариативность дизайна	1	3	2
	Итого:	11	19	12

Анализируя тип кожухов, на данном этапе, оптимальным решением является сборно-разборный кожух, однако необходимо сопоставить себестоимость изготовления для принятия окончательного решения.

Анализ достоинств и недостатков по виду кожухов приведен в таблице 10.

Таблица 10 – Анализ достоинств и недостатков по виду кожухов

№	Наименование оценочного показателя	Распашные	Съемные	Сдвижные
1	Габариты	1	3	2
2	Простота конструкции	2	3	1
3	Вариативность дизайна	2	1	3
4	Удобство использования	3	2	1
5	Гашение вибраций	2	3	1
	Итого:	10	12	8

Анализируя виды кожухов, на данном этапе, оптимальным решением являются съемные, поскольку показатель «Гашение вибраций» является определяющим даже при меньшей себестоимости других вариантов при условии, что кожух с усилием (без зазора) прижимается к каркасу основания.

Анализ достоинств и недостатков по полуфабрикату является аналогичным описанием каркаса, поэтому здесь не приводится.

2.1.4.4 Модуль вращения внутреннего кольца подшипника

На рисунке 17 представлена схема вариаций, составляющих модуль вращения внутреннего кольца подшипника.

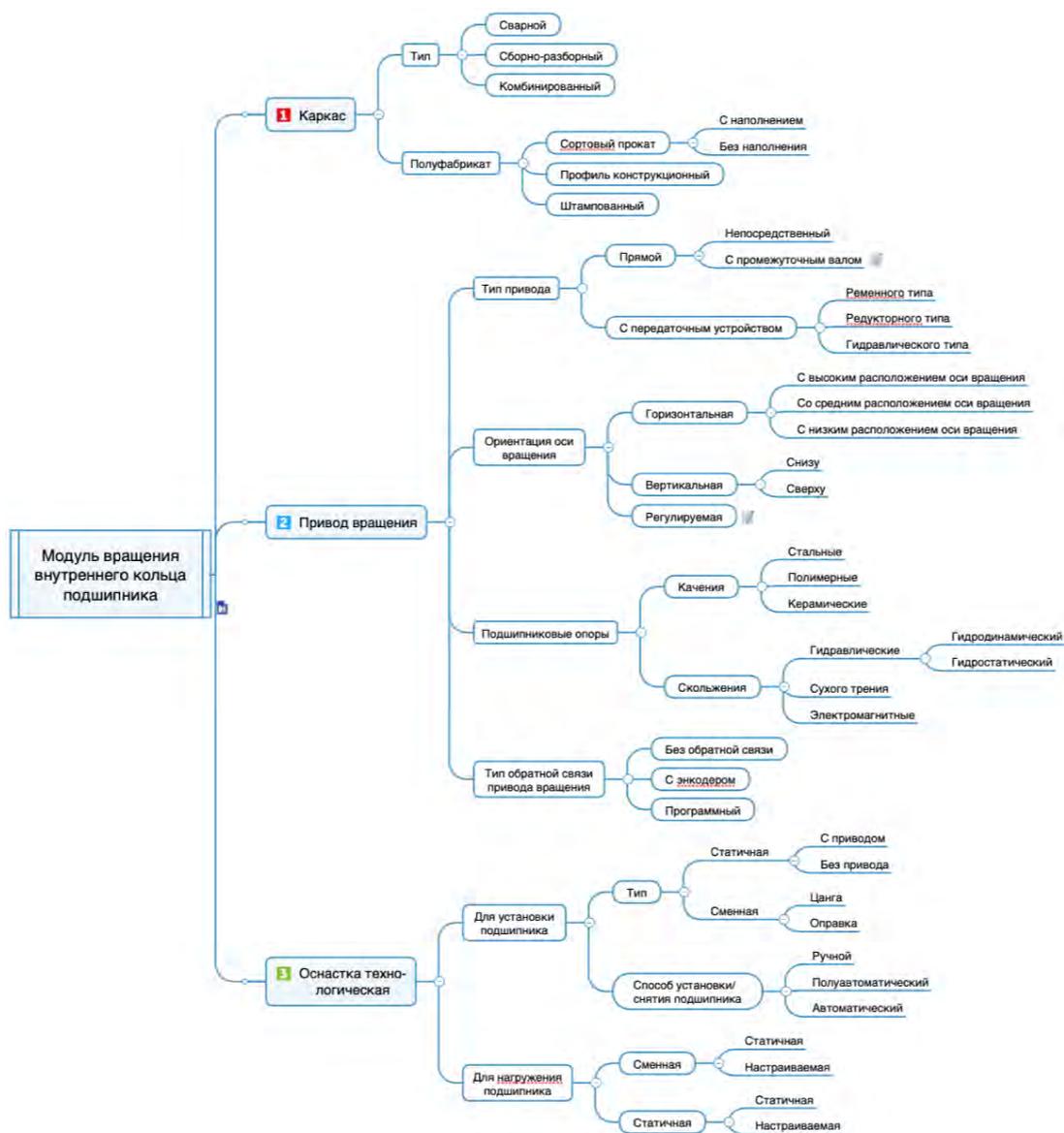


Рисунок 17. Схема вариантов исполнения модуля вращения внутреннего кольца подшипника

2.1.4.4.1 Каркас

Анализ достоинств и недостатков по типу и полуфабрикату является аналогичным описанием в каркасе основания, поэтому здесь не приводится.

2.1.4.4.2 Привод вращения

Анализ достоинств и недостатков по типу привода приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Анализ достоинств и недостатков по типу привода

№	Наименование оценочного показателя	Прямой	С передаточным устройством
1	Простота конструкции	2	1
2	Массогабаритность	2	1

Продолжение таблицы 11

№	Наименование оценочного показателя	Прямой	С передаточным устройством
3	Мощность двигателя	1	2
4	Гашение вибраций	1	2
5	Шумность	2	1
	Итого:	8	7

Анализируя типы приводов вращения, на данном этапе, более предпочтителен прямой привод, однако выбор оптимального решения будет зависеть от себестоимости реализации каждого из рассмотренных вариантов.

Анализ достоинств и недостатков по ориентации оси вращения в таблице 12.

Таблица 12 – Анализ достоинств и недостатков по ориентации оси вращения

№	Наименование оценочного показателя	Горизонтальная	Вертикальная	Регулируемая
1	Эргономичность	1	3	2
2	Масса	1	2	3
3	Простота конструкции	3	2	1
4	Вариативность решений	3	2	1
5	Ремонтопригодность	3	2	1
6	Удобство в эксплуатации	1	3	2
7	Соответствие методике	3	1	2
	Итого:	15	15	12

Анализируя привод вращения по ориентации оси вращения, на данном этапе, наиболее предпочтительным решением является горизонтальная ориентация, поскольку присутствует требование по соответствию методике проведения диагностики подшипников.

Анализ достоинств и недостатков по подшипниковым опорам приведен в таблице 13.

Таблица 13 – Анализ достоинств и недостатков по подшипниковым опорам

№	Наименование оценочного показателя	Качения	Скольжения
1	Частота вращения	1	2
2	КПД	2	1
3	Простота конструкции	1	2
4	Габариты	2	1
5	Вариативность решений	1	2

Продолжение таблицы 13

№	Наименование оценочного показателя	Качения	Скольжения
6	Гашение вибраций	1	2
7	КПД	2	1
8	Шумность	1	2
9	Нагрузочная способность	1	2
	Итого:	12	15

Анализируя привод вращения по подшипниковым опорам, на данном этапе, оптимальным решением являются подшипники скольжения, однако необходимо сопоставить себестоимость изготовления для принятия окончательного решения.

Анализ достоинств и недостатков по типу обратной связи привода вращения в таблице 14.

Таблица 14 – Анализ достоинств и недостатков по типу обратной связи

№	Наименование оценочного показателя	Без обратной связи	С энкодером	Программный
1	Точность частоты вращения	1	3	2
2	Сложность реализации	3	2	1
3	Габаритность	3	1	3
4	Функциональность	1	3	2
	Итого:	8	9	8

Анализируя привода по типу обратной связи, на данном этапе, оптимальным решением является привод с возможность точного контроля частоты вращения внутреннего кольца диагностируемого подшипника и угла его поворота, позволяющие отслеживать месторасположение дефектов на внутреннем кольце диагностируемого подшипника.

2.1.4.4.3 Оснастка технологическая

Анализ достоинств и недостатков по типу оснастки технологической для установки подшипника приведен в таблице 14.

Таблица 15 – Анализ достоинств и недостатков по типу оснастки технологической для установки подшипника

№	Наименование оценочного показателя	Статичная	Сменная
1	Точность установки	2	1
2	Массогабаритность	1	2

Продолжение таблицы 15

№	Наименование оценочного показателя	Статичная	Сменная
3	Удобство использования	2	1
4	Ремонтопригодность	1	2
	Итого:	6	6

Анализируя типы оснастки для установки подшипника, на данном этапе, оптимальным решением может являться любой из вариантов, однако необходимо сопоставить себестоимость изготовления для принятия окончательного решения.

Анализ достоинств и недостатков по способу установки/снятия подшипника приведен в таблице 16.

Таблица 16 – Анализ достоинств и недостатков по способу установки/снятия подшипника

№	Наименование оценочного показателя	Ручной	Полуавтоматический	Автоматический
1	Удобство использования	1	2	3
2	Производительность	1	2	3
3	Простота конструкции	3	2	1
4	Ремонтопригодность	3	2	1
	Итого:	8	8	8

Анализируя оснастки по способу установки/снятия подшипника, на данном этапе, оптимальным решением может являться любой из вариантов, однако необходимо сопоставить себестоимость изготовления для принятия окончательного решения.

Анализ достоинств и недостатков по типу оснастки технологической для нагружения подшипника приведен в таблице 17. Здесь введена следующая система оценивания технических решений:

Таблица 17 – Анализ достоинств и недостатков по типу оснастки технологической для нагружения подшипника

№	Наименование оценочного показателя	Статичная	Сменная
1	Удобство использования	2	1
2	Точность установки	1	2
3	Массогабаритность	1	2
4	Простота конструкции	2	1

Продолжение таблицы 17

№	Наименование оценочного показателя	Статичная	Сменная
5	Ремонтопригодность	1	2
	Итого:	7	8

Анализируя типы оснасток для нагружения подшипника, на данном этапе, более оптимальным решением является вариант со сменной оснасткой, однако решающее значение будет иметь сопоставить себестоимость изготовления.

2.1.4.5 Модуль радиального нагружения

На рисунке 18 представлена схема вариаций, составляющих модуль радиального нагружения.

2.1.4.5.1 Каркас

Анализ достоинств и недостатков по типу и полуфабрикату является аналогичным описанием в каркасе основания, поэтому здесь не приводится.

2.1.4.5.2 Пневмопривод

Анализ достоинств и недостатков по принципу действия пневмопривода приведен в таблице 18.

Таблица 18 – Анализ достоинств и недостатков по принципу действия пневмопривода

№	Наименование оценочного показателя	Односторонний	Двухсторонний
1	Простота конструкции	1	2
2	Энергопотребление	2	1
3	Быстродействие	2	1
4	Безопасность	2	1
5	Функциональность	1	2
	Итого:	8	7

Анализируя пневмоприводы по принципу действия, на данном этапе, оптимальным решением является привод одностороннего действия, однако необходимо сопоставить себестоимость изготовления для принятия окончательного решения.

Анализ достоинств и недостатков по числу положений пневмопривода приведен в таблице 19.

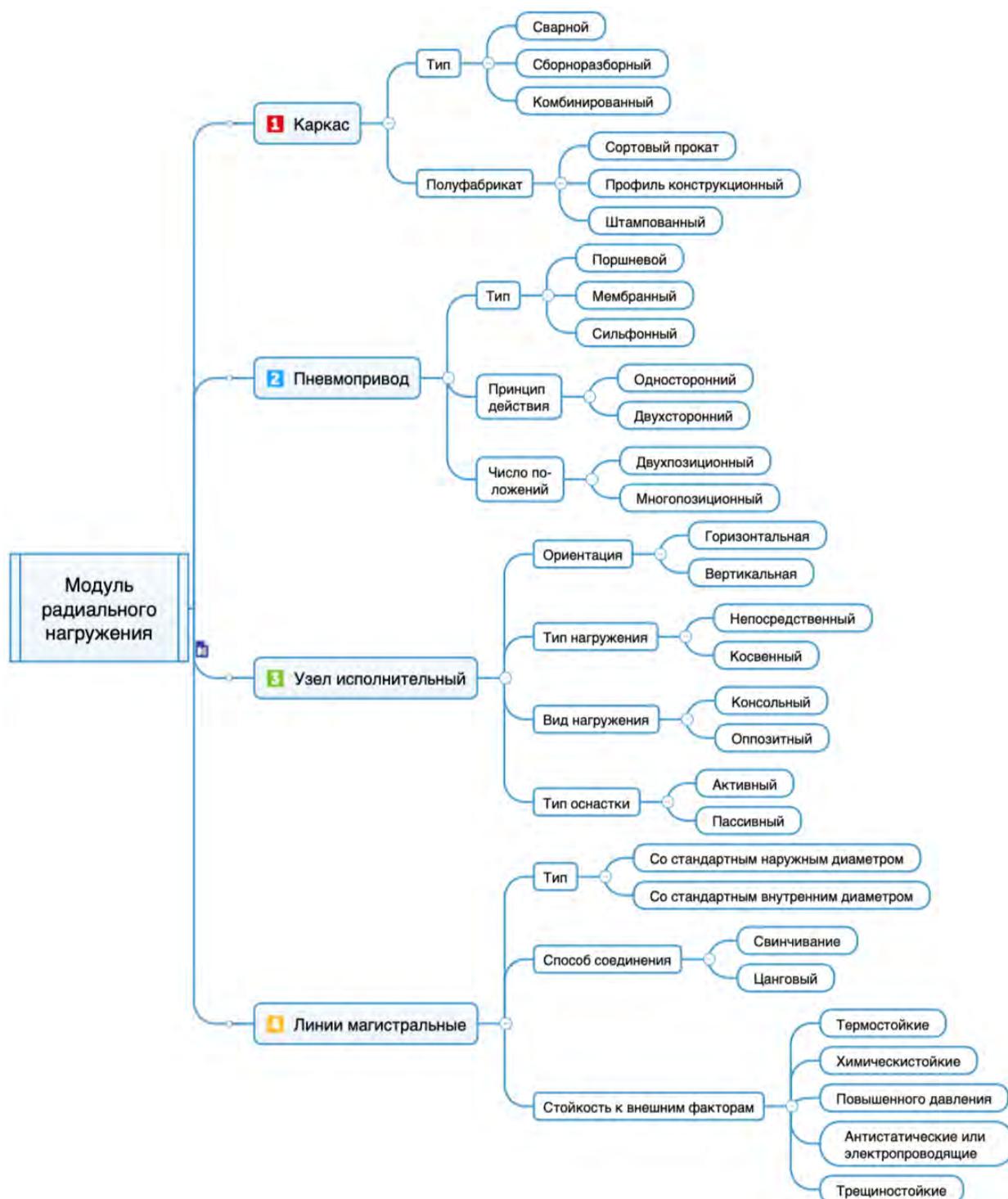


Рисунок 18. Схема вариантов исполнения модуля радиального нагружения

Таблица 19 – Анализ достоинств и недостатков по числу положений пневмопривода

№	Наименование оценочного показателя	Двухпозиционный	Многопозиционный
1	Простота конструкции	2	1
2	Функциональность	1	2
3	Ремонтопригодность	2	1
	Итого:	5	4

Анализируя пневмоприводы по числу положений, на данном этапе, оптимальным решением является двухпозиционный привод, к тому же явной необходимости в использовании многопозиционного пневмопривода нет. Кроме того, с большой вероятностью, стоимость таких пневмоприводов будет значительно выше.

2.1.4.5.3 Узел исполнительный

Анализ достоинств и недостатков по ориентации узла исполнительного приведен в таблице 20.

Таблица 20 – Анализ достоинств и недостатков по ориентации узла исполнительного

№	Наименование оценочного показателя	Горизонтальная	Вертикальная
1	Габаритность	1	2
2	Ремонтопригодность	2	1
3	Жесткость	1	2
4	Простота конструкции	1	2
	Итого:	5	7

Анализируя варианты ориентации модуля радиального нагружения, на данном этапе, оптимальным решением практически по всем показателям является вертикальная ориентация, предположительно и с точки зрения себестоимости исполнения.

Анализ достоинств и недостатков по типу нагружения приведен в таблице 21.

Таблица 21 – Анализ достоинств и недостатков по типу нагружения

№	Наименование оценочного показателя	Непосредственный	Косвенный
1	Габаритность	2	1
2	Простота конструкции	2	1
3	Жесткость	2	1
4	Ремонтопригодность	2	1
	Итого:	8	4

Анализируя варианты ориентации модуля радиального нагружения, на данном этапе, оптимальным решением по всем показателям является вертикальная ориентация, предположительно и с точки зрения себестоимости исполнения.

Анализ достоинств и недостатков по виду нагружения приведен в таблице 22.

Таблица 22 – Анализ достоинств и недостатков по виду нагружения

№	Наименование оценочного показателя	Консольный	Оппозитный
1	Габаритность	2	1
2	Простота конструкции	2	1
3	Жесткость конструкции	1	2
4	Функциональность	1	2
5	Ремонтопригодность	2	1
	Итого:	8	7

Анализируя узлы исполнительные по виду нагружения, на данном этапе, оптимальным решением является консольное нагружение, однако необходимо сопоставить себестоимость изготовления для принятия окончательного решения.

Анализ достоинств и недостатков по типу оснастки приведен в таблице 23.

Таблица 23 – Анализ достоинств и недостатков по типу оснастки

№	Наименование оценочного показателя	Активный	Пассивный
1	Простота конструкции	1	2
2	Функциональность	2	1
3	Ремонтопригодность	1	2
4	Массогабаритность	1	2
5	Стабильность работы во времени	2	1
6	Точность прижима	2	1
	Итого:	9	9

Анализируя тип оснастки, на данном этапе, оба варианта заслуживают внимания, но если рассматривать надежность и стабильность работы станда длительное время, то оптимальным решением является оснастка активного типа. Даже в случае более низкой себестоимости оснастки пассивного типа следует пойти на дополнительные траты, которые окупятся в долгосрочной перспективе.

2.1.4.5.4 Линии магистральные

Анализ достоинств и недостатков по типу магистральных линий приведен в таблице 24.

Таблица 24 – Анализ достоинств и недостатков по типу магистральных линий

№	Наименование оценочного показателя	Со стандартным наружным диаметром	Со стандартным внутренним диаметром
1	Удобство при расчетах	1	2
2	Функциональность	2	1
	Итого:	3	3

Анализируя тип магистральных линий, на данном этапе, оба типа представляют интерес, однако, если при их прокладке будет использоваться много стандартной фурнитуры, то больший интерес представляют собой магистральные линии со стандартным наружным диаметром.

Анализ достоинств и недостатков по способу соединения приведен в таблице 25.

Таблица 25 – Анализ достоинств и недостатков по способу соединения

№	Наименование оценочного показателя	Свинчивание	Цанговый
1	Простота конструкции	2	1
2	Многokrатное использование	1	2
3	Трудоемкость монтажа	1	2
4	Герметичность	2	1
5	Надежность	2	1
6	Наличие инструмента для монтажа	1	2
	Итого:	9	9

Анализируя способы соединения магистральных линий, на данном этапе, нельзя однозначно определить оптимальное решение – требуется сопоставить себестоимость изготовления и монтажа для принятия окончательного решения.

Анализ достоинств и недостатков по стойкости к внешним факторам нецелесообразно производить на данном этапе, поскольку, в зависимости от места прокладки магистральной линии, будут сформированы требования, однозначно определяющие применение того или иного типа магистральной линии.

2.1.4.6 Модуль осевого нагружения

На рисунке 19 представлена схема вариаций, составляющих модуль осевого нагружения.

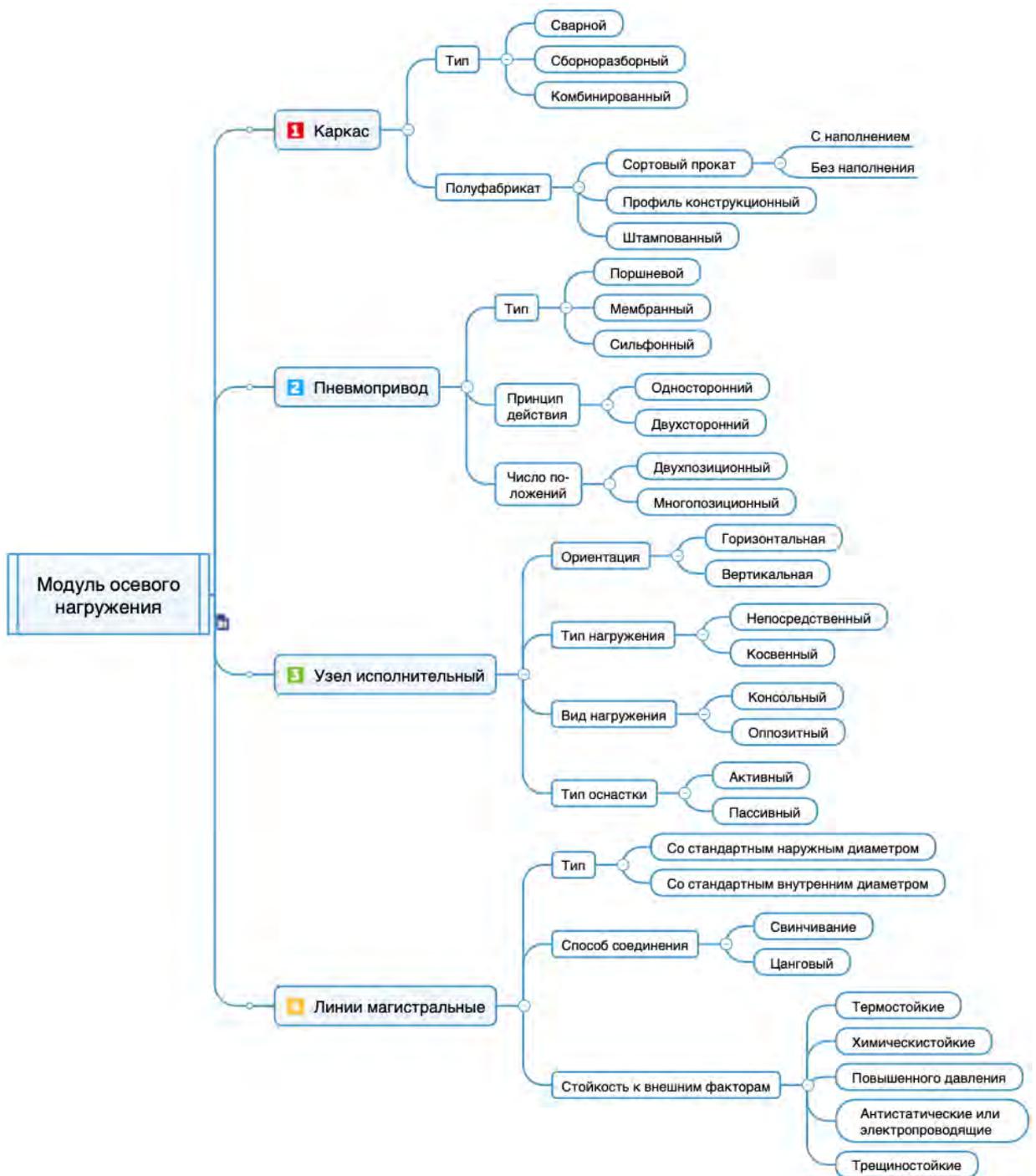


Рисунок 19. Схема вариантов исполнения модуля осевого нагружения

2.1.4.6.1 Каркас

Анализ достоинств и недостатков по типу и полуфабрикату является аналогичным описанием в каркасе основания, поэтому здесь не приводится.

2.1.4.6.2 Пневмопривод

Анализ достоинств и недостатков по типу, по принципу действия и по числу положений является аналогичным описанием в пневмоприводе модуля радиального нагружения, поэтому здесь не приводится.

2.1.4.6.3 Узел исполнительный

Анализ достоинств и недостатков по ориентации узла исполнительного приведен в таблице 25.

Таблица 25 – Анализ достоинств и недостатков по ориентации узла исполнительного

№	Наименование оценочного показателя	Горизонтальная	Вертикальная
1	Габаритность	1	2
2	Ремонтопригодность	2	1
3	Жесткость	1	2
4	Простота конструкции	1	2
	Итого:	5	7

Анализируя варианты ориентации модуля радиального нагружения, на данном этапе, оптимальным решением практически по всем показателям является вертикальная ориентация, предположительно и с точки зрения себестоимости исполнения.

Анализ достоинств и недостатков по типу и виду нагружения, и по типу оснастки является аналогичным описанием в узле исполнительном модуля радиального нагружения, поэтому здесь не приводится.

2.1.4.6.4 Линии магистральные

Анализ достоинств и недостатков по типу, по способу соединения и по стойкости к внешним факторам является аналогичным описанием в линиях магистральных модуля радиального нагружения, поэтому здесь не приводится.

2.1.4.7 Модуль измерительный

На рисунке 20 представлена схема вариаций, составляющих модуль измерительный.

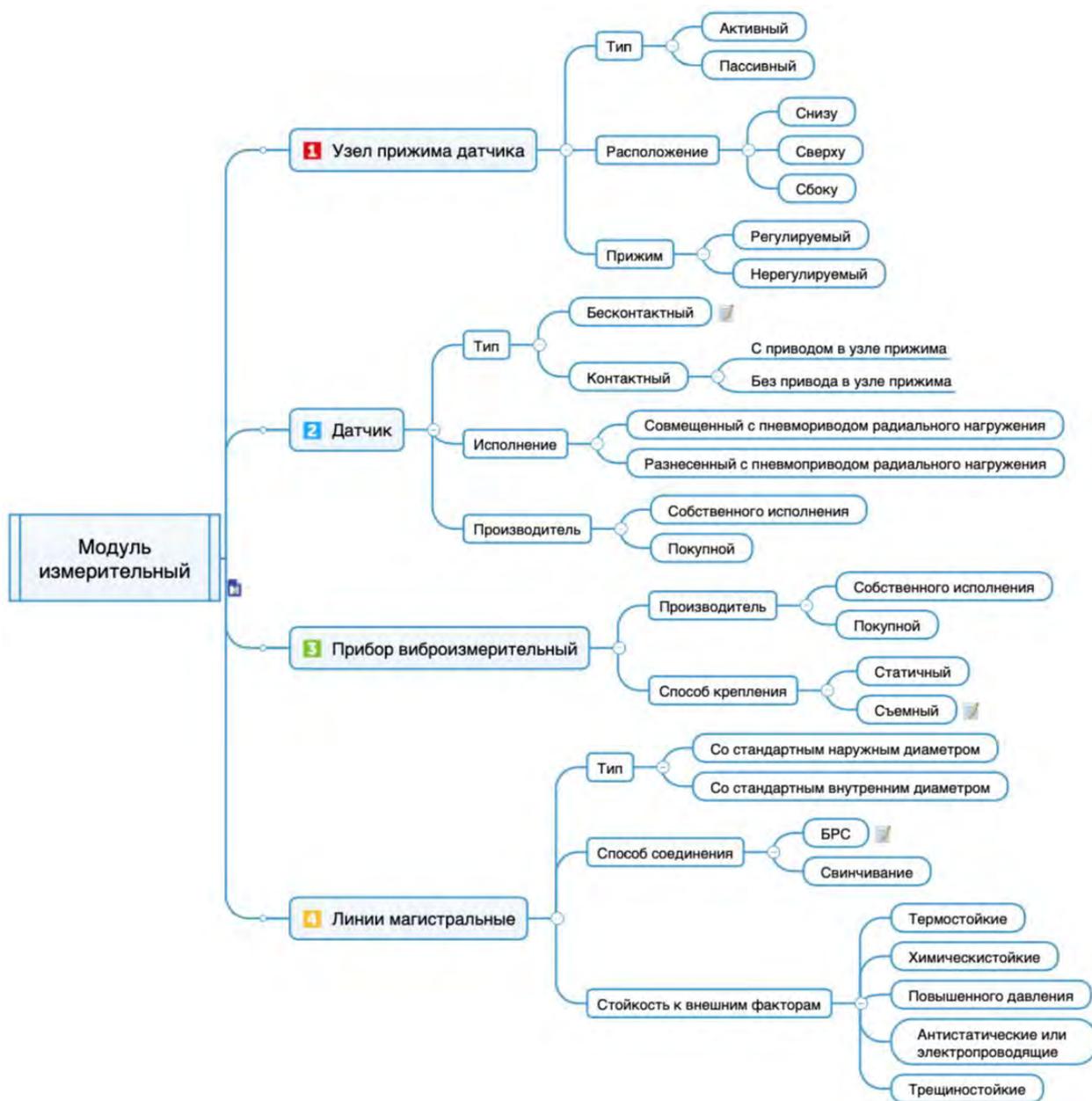


Рисунок 20 Схема вариантов исполнения измерительного модуля

2.1.4.7.1 Узел прижима датчика

Анализ достоинств и недостатков по типу узла прижима датчика приведен в таблице 26.

Таблица 26 – Анализ достоинств и недостатков по типу узла прижима датчика

№	Наименование оценочного показателя	Активный	Пассивный
1	Простота конструкции	1	2
2	Функциональность	2	1
3	Ремонтопригодность	1	2
4	Массогабаритность	1	2
5	Стабильность работы во времени	2	1

Продолжение таблицы 26

№	Наименование оценочного показателя	Активный	Пассивный
6	Точность прижима	2	1
	Итого:	9	9

Анализируя тип оснастки, на данном этапе, оба варианта заслуживают внимания, но если рассматривать надежность и стабильность работы станда длительное время, то оптимальным решением является оснастка активного типа. Даже в случае более низкой себестоимости оснастки пассивного типа следует пойти на дополнительные траты, которые окупятся в долгосрочной перспективе.

Анализ достоинств и недостатков по расположению узла прижима датчика приведен в таблице 27.

Таблица 27 – Анализ достоинств и недостатков по расположению узла прижима датчика

№	Наименование оценочного показателя	Снизу	Сверху	Сбоку
1	Простота конструкции	1	2	3
2	Применение бесконтактного датчика	1	2	3
3	Стоимость	3	2	1
4	Точность	3	2	1
	Итого:	8	8	8

Анализируя расположения узла прижима датчика, на данном этапе, оптимальным решением является любое расположение, однако соответствует требованиям технического задания только расположение сверху, хотя возможно какое-то иное расположение может оказаться более оптимальным в результате дальнейшей работы.

Анализ достоинств и недостатков прижимов для датчика приведен в таблице 28.

Таблица 28 – Анализ достоинств и недостатков прижимов для датчика

№	Наименование оценочного показателя	Регулируемый	Нерегулируемый
1	Стоимость	1	2
2	Точность установки	2	1
3	Массогабартность	2	1
4	Удобство	2	1

Продолжение таблицы 28

№	Наименование оценочного показателя	Регулируемый	Нерегулируемый
5	Простота конструкции	1	2
	Итого:	8	7

Анализируя прижимов для датчика, на данном этапе, оптимальным решением является регулируемый прижим, однако необходимо сопоставить себестоимость изготовления для принятия окончательного решения.

2.1.4.7.2 Датчик

Анализ достоинств и недостатков по типу датчика приведен в таблице 29.

Таблица 29 – Анализ достоинств и недостатков по типу датчика

№	Наименование оценочного показателя	Бесконтактный	Контактный
1	Точность установки	2	1
2	Массогабаритность	1	2
3	Удобство настройки	2	1
4	Простота конструкции	2	1
5	Доступность	1	2
6	Влияние качества поверхности	1	2
	Итого:	9	9

Анализируя типов датчиков, на данном этапе, оптимальным решением является любой вариант, однако необходимо сопоставить себестоимость изготовления для принятия окончательного решения.

Анализ достоинств и недостатков по исполнению датчика приведен в таблице 30.

Таблица 30 – Анализ достоинств и недостатков по исполнению датчика

№	Наименование оценочного показателя	Совмещенный с пневмоприводом радиального нагружения	Разнесенный с пневмоприводом радиального нагружения
1	Точность управления	1	2
2	Массогабаритность	1	2
3	Простота конструкции	2	1
	Итого:	4	5

Анализируя исполнений датчиков, на данном этапе, оптимальным решением является исполнение «разнесенный с пневмоприводом радиального нагружения», однако необходимо сопоставить себестоимость изготовления для принятия окончательного решения.

Анализ достоинств и недостатков по производителю датчика приведен в таблице 31.

Таблица 31 – Анализ достоинств и недостатков по производителю датчика

№	Наименование оценочного показателя	Собственного исполнения	Покупной
1	Инновационность	1	2
2	Доступность	2	1
3	Гибкость в модернизации	2	1
	Итого:	5	4

Анализируя производителей датчиков, на данном этапе, оптимальным решением является вариант датчика собственного производства, поскольку это рекламирование и сбыт основного вида продукции.

2.1.4.7.3 Прибор виброизмерительный

Анализ достоинств и недостатков по производителю является аналогичным описанием в датчике, поэтому здесь не приводится.

Анализ достоинств и недостатков по способу крепления прибора виброизмерительного приведен в таблице 32.

Таблица 32 – Анализ достоинств и недостатков по способу крепления прибора виброизмерительного

№	Наименование оценочного показателя	Статичный	Съемный
1	Простота монтажа	1	2
2	Массогабаритность	1	2
3	Простота конструкции	2	1
	Итого:	4	5

Анализируя способы крепления приборов виброизмерительных, на данном этапе, оптимальным решением является съемный, однако необходимо сопоставить себестоимость изготовления для принятия окончательного решения.

2.1.4.7.4 Линии магистральные

Анализ достоинств и недостатков по типу, по способу соединения и по стойкости к внешним факторам является аналогичным описанием в линиях магистральных модуля радиального нагружения, поэтому здесь не приводится.

2.1.4.8 Модуль подготовки сжатого воздуха

На рисунке 21 представлена схема вариаций, составляющих модуль подготовки сжатого воздуха.

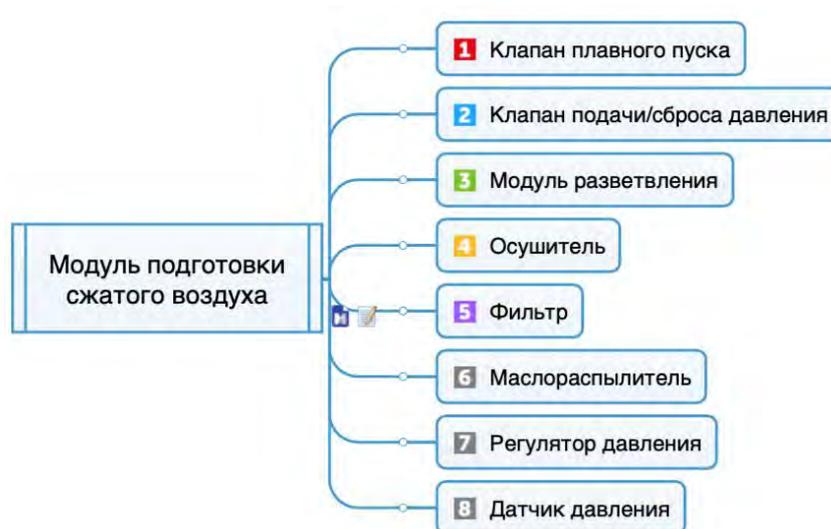


Рисунок 21. Схема вариантов исполнения модуля подготовки сжатого воздуха

2.1.4.9 Модуль управления

На рисунке 22 представлена схема вариаций, составляющих модуль управления.

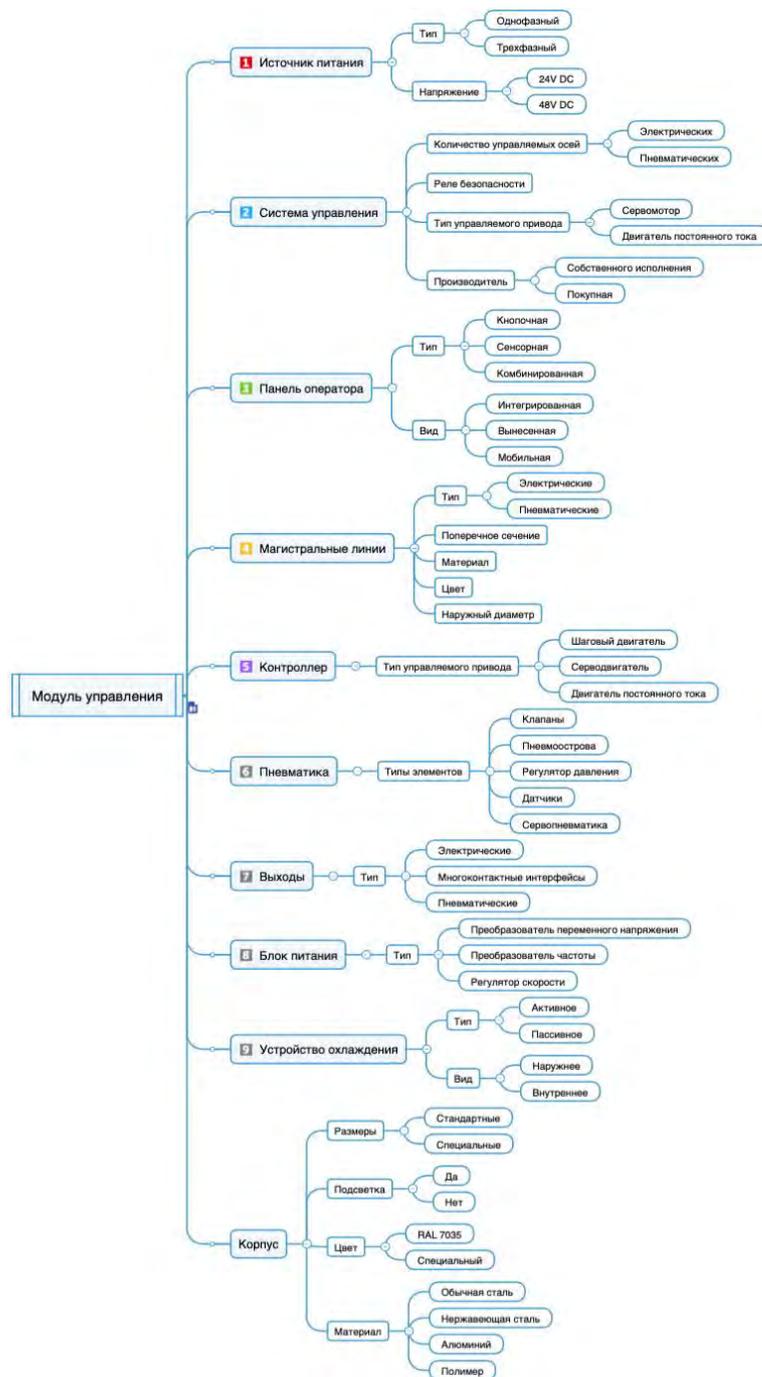


Рисунок 22. Схема вариантов исполнения модуля управления

2.2 Кинематические расчеты

2.2.1 Расчет пневмопривода модулей радиального и осевого нагружения

НИЯ

Исходные данные для расчета представлены в таблице 33.

Таблица 33 – Исходные данные для расчета усилия нагружения

Обозначение	Определение	Значение	Размерность
$F_{\text{треб}}$	Требуемое усилие нагружения	3000	Н
$P_{\text{раб}}$	Рабочее давление сжатого воздуха	0,5	МПа

Минимально необходимая площадь поршня $S_{\text{расч}}$ определяется по формуле:

$$S_{\text{расч}} = \frac{F_{\text{треб}}}{P_{\text{раб}}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{треб}}$ – требуемое усилие нагружения, Н;

$P_{\text{раб}}$ – рабочее давление сжатого воздуха, МПа.

$$S_{\text{расч}} = \frac{3000}{0,5} = 6000 \text{ мм}^2$$

Минимально необходимый диаметр поршня $D_{\text{расч}}$ рассчитывается по формуле:

$$D_{\text{расч}} = \sqrt{\frac{S_{\text{расч}} \cdot 4}{\pi}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{расч}}$ – расчетная площадь поршня, мм².

$$D_{\text{расч}} = \sqrt{\frac{6000 \cdot 4}{\pi}} = 87,41 \text{ мм}$$

Принят диаметр поршня согласно стандартному типоразмерному ряду:

$$D = 100 \text{ мм.}$$

Проверочный расчет площади поршня проводится по формуле:

$$S = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (3)$$

где D – диаметр подобранного поршня, мм.

$$S = \frac{\pi \cdot 100^2}{4} = 7853,98 \text{ мм}^2$$

Проверочный расчет развиваемого усилия нагружения проводится по формуле:

$$F = P_{\text{раб}} \cdot S, \quad (4)$$

где $P_{\text{раб}}$ – рабочее давление сжатого воздуха, МПа;

S – площадь выбранного поршня, мм².

$$F = 0,5 \cdot 7853,98 = 3926,99 \text{ Н}$$

Коэффициент запаса k определяется по формуле:

$$k = \frac{S}{S_{\text{расч}}}, \quad (5)$$

где S – площадь выбранного поршня, мм²;

$S_{\text{расч}}$ – расчетная площадь поршня, мм².

$$k = \frac{7853,98}{6000} = 1,31$$

2.2.2 Расчет мощности электродвигателя для преодоления трения по-

коя

Исходные данные для расчета представлены в таблице 34.

Таблица 34 – Исходные данные для расчета мощности электродвигателя

Обозначение	Определение	Значение	Размерность
k	Кратность пускового момента для стандартных двигателей	2,8 ... 3,6	–
$f_{\text{тр}}$	Коэффициент трения покоя Сталь-Сталь со смазкой	0,5 ... 0,1	–
F_{max}	Усилие, действующее на диагностируемый подшипник	3000	Н
D_{max}	Диаметр поверхности наружного кольца, по которому катятся тела качения диагностируемого подшипника	380	мм
n	Скорость вращения внутреннего кольца диагностируемого подшипника	3000	об/мин
$\eta_{\text{пс}}$	КПД подшипников скольжения	0,95 ... 0,96	–
$\eta_{\text{рп}}$	КПД ременной передачи	0,94 ... 0,96	–

Угловая скорость вращения внутреннего кольца диагностируемого подшипника ω определяется по формуле:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \quad (6)$$

где n – скорость вращения внутреннего кольца диагностируемого подшипника, об/мин.

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3000}{60} = 314,16 \text{ рад/с.}$$

Примем наименьшую кратность пускового момента:

$$\frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}} = 2,8;$$

отсюда получаем:

$$M_{\text{ном}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{2,8}. \quad (7)$$

Принят коэффициент трения $f_{\text{тр}}^{\text{тр}} по минимальному значению коэффициента трения покоя $f_{\text{тр}}^{\text{п}}$ из приведенного значения в исходных данных:$

$$f_{\text{тр}}^{\text{тр}} = 0,05.$$

Принят КПД:

$$\eta = \eta_{\text{пс}} = \eta_{\text{рп}} = 0,95.$$

Сила трения $F_{\text{тр}}^{\text{тр}}$ в диагностируемом подшипнике определяется по формуле:

$$F_{\text{тр}}^{\text{тр}} = F_{\text{max}} \cdot f_{\text{тр}}^{\text{тр}}, \quad (8)$$

где F_{max} – усилие, действующее на диагностируемый подшипник, Н;

$f_{\text{тр}}^{\text{тр}}$ – коэффициент трения качения Сталь-Сталь.

$$F_{\text{тр}}^{\text{тр}} = 3000 \cdot 0,05 = 150 \text{ Н}$$

Момент силы трения $M_{\text{тр}}^{\text{тр}}$ определяется по формуле:

$$M_{\text{тр}}^{\text{тр}} = F_{\text{тр}}^{\text{тр}} \cdot \frac{D_{\text{max}}}{2}, \quad (9)$$

где $F_{\text{тр}}^{\text{тр}}$ – сила трения в диагностируемом подшипнике, Н;

D_{max} – диаметр поверхности наружного кольца, по которому катятся тела качения.

$$M_{\text{тр}}^{\text{тр}} = 150 \cdot \frac{380}{2} = 28500 \text{ Нмм} = 28,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Пусковой момент двигателя $M_{\text{пуск}}$ определяется по формуле:

$$M_{\text{пуск}} = M_{\text{тр}}^{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{пс}} \cdot \eta_{\text{рп}}, \quad (10)$$

где $\eta_{\text{пс}}$ – КПД подшипников скольжения;

$\eta_{рп}$ – КПД ременной передачи.

$$M_{пуск} = 28,5/0,95^2 = 31,58 \text{ Нм}$$

Номинальный момент двигателя $M_{ном}$ определяется по формуле (11):

$$M_{ном} = \frac{31,58}{2,8} = 11,28 \text{ Нм.}$$

Мощность электродвигателя $P_{расч}$ определяется по формуле:

$$P_{расч} = \frac{\omega \cdot M_{ном}}{1000}, \quad (12)$$

где ω – угловая скорость вращения внутреннего кольца диагностируемого подшипника, рад/с;

$M_{ном}$ – номинальный момент электродвигателя, Нм.

$$P_{расч} = \frac{314,16 \cdot 11,28}{1000} = 3,54 \text{ кВт}$$

Принята мощность электродвигателя ближайшую по стандартному ряду мощностей: $P = 3,8$ кВт.

Проверочный расчет предельного момента трения в диагностируемом подшипнике проводится по формуле:

$$M = \frac{P \cdot 1000}{\omega}, \quad (13)$$

где P – мощность подобранного электродвигателя, кВт;

ω – угловая скорость вращения внутреннего кольца диагностируемого подшипника, рад/с.

$$M = \frac{4 \cdot 1000}{314,16} = 12,73 \text{ Нм}$$

Коэффициент запаса k определяется по формуле:

$$k = \frac{P}{P_{расч}}, \quad (14)$$

где P – мощность подобранного электродвигателя, кВт;

$P_{расч}$ – расчетная мощность электродвигателя, кВт.

$$k = \frac{4}{3,54} = 1,12$$

2.2.3 Расчет плоскоремненной передачи

Исходные данные для расчета представлены в таблице 35. Расчет выполнен согласно [14].

Таблица 35 – Исходные данные для расчета плоскоремненной передачи.

Обозначение	Определение	Значение	Размерность
P	Мощность электродвигателя	4	кВт
n_1	Частота вращения электродвигателя	2850	об/мин
a	Конструктивно полученное межосевое расстояние	255	мм

Выбран ремень GG 6 производства Ziligen, толщина $\delta = 1,5$ мм, плотность $\rho = 1267$ кг/м³, рабочее натяжение при 1% удлинении $\varphi = 6$ Н/мм, допускаемое напряжение растяжения $[\sigma]_p = 8$ Н/мм². Сила предварительного натяжения ремня пневмоцилиндром $F_0 = 245$ Н.

Определение диаметра ведущего шкива d_1 , мм:

$$d_1 = (35 \dots 70)\delta = (35 \dots 70) \cdot 1,5 = 52 \dots 101 \text{ мм};$$

Принят диаметр ведущего шкива $d_1 = 90$ мм.

Определение диаметра ведомого шкива d_2 , мм:

$$d_2 = \frac{a}{1,5} - d_1 = \frac{255}{1,5} - 90 = 80 \text{ мм}.$$

Фактическое передаточное число u определяется по формуле:

$$u = \frac{d_2}{d_1(1 - \varepsilon)}, \quad (15)$$

где $\varepsilon = 0,01 \dots 0,02$ – коэффициент скольжения.

$$u = \frac{80}{90 \cdot (1 - 0,0175)} = 0,9$$

Определение расчетной длины ремня L , мм:

$$\begin{aligned} L &= 2a + \frac{\pi}{2}(d_2 + d_1) + \frac{(d_2 - d_1)^2}{4a} = \\ &= 2 \cdot 255 + \frac{\pi}{2}(80 + 90) + \frac{(80 - 90)^2}{4 \cdot 255} = 777,1 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Принята длина ремня $L = 780$ мм.

Определение угла обхвата ремнем меньшего шкива α_1 , град:

$$\alpha_1 = 180^\circ - 57^\circ \frac{d_2 - d_1}{a} = 180^\circ - 57^\circ \cdot \frac{80 - 90}{255} = 177,8^\circ$$

Определение скорости ремня, v , м/с:

$$v = \frac{\pi d_1 n_1}{60 \cdot 10^3} = \frac{\pi \cdot 90 \cdot 2850}{60 \cdot 10^3} = 12,8 \text{ м/с.}$$

Частота пробегов ремня U , с^{-1} определяется по формуле:

$$U = \frac{L}{v} \leq [U], \quad (16)$$

где $[U] = 50 \text{ с}^{-1}$ – допустимая частота пробегов для передач с синтетическими ремнями.

$$U = \frac{v}{L} = \frac{12,8 \text{ м/с}}{0,78 \text{ м}} = 16,4 \leq 50 \text{ с}^{-1}$$

Определение окружной силы F_t , Н, передаваемой ремнем:

$$F_t = \frac{P \cdot 10^3}{v} = \frac{4 \cdot 10^3}{12,8} = 312,7 \text{ Н.}$$

Ширина ремня b , мм определяется по формуле:

$$b = \frac{F_0}{F_\varphi}, \quad (17)$$

где $F_0 = 245 \text{ Н}$ – сила предварительного натяжения ремня пневмоцилиндром;

$F_\varphi = 6 \text{ Н/мм}$ – рабочее натяжение ремня при 1% удлинении.

$$b = \frac{245}{6} = 40,8 \text{ мм}$$

Принята ширина ремня $b = 40 \text{ мм}$.

Определение площади поперечного сечения ремня A , мм^2 :

$$A = \delta b = 1,5 \cdot 40 = 60 \text{ мм}^2.$$

Определение силы натяжения ведущей F_1 и ведомой F_2 ветвей ремня, Н:

$$F_1 = F_0 + \frac{F_t}{2} = 245 + \frac{312,7}{2} = 401,4 \text{ Н;}$$

$$F_1 = F_0 - \frac{F_t}{2} = 245 - \frac{312,7}{2} = 88,65 \text{ Н.}$$

Определение силы давления ремня на вал $F_{оп}$, Н:

$$F_{оп} = 2F_0 \sin\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) = 2 \cdot 245 \cdot \sin\left(\frac{177,8}{2}\right) = 489,7 \text{ Н.}$$

Проверка прочности ремня по максимальным напряжениям в сечении ведущей ветви σ_{max} , Н/мм² проводится по формуле:

$$\sigma_{max} = \sigma_1 + \sigma_{и} + \sigma_v \leq [\sigma]_p, \quad (18)$$

где а) σ_1 – напряжение растяжения, Н/мм²;

$$\sigma_1 = \frac{F_0}{A} + \frac{F_t}{2A} = \sigma_1 = \frac{245}{60} + \frac{312,7}{2 \cdot 60} = 6,7 \text{ Н/мм}^2.$$

б) $\sigma_{и}$ – напряжения изгиба, Н/мм²;

$$\sigma_{и} = E_{и} \frac{\delta}{d_1},$$

где $E_{и} = 350 \dots 500/\text{мм}^2$ – модуль продольной упругости при изгибе для синтетических ремней;

$$\sigma_{и} = 450 \cdot \frac{1,5}{90} = 7,5 \text{ Н/мм}^2.$$

в) σ_v – напряжения от центробежных сил Н/мм²;

$$\sigma_v = \rho v^2 \cdot 10^{-6},$$

где $\rho = 1267 \text{ кг/м}^3$ – плотность материала ремня;

$$\sigma_v = 1267 \cdot 12,8^2 \cdot 10^{-6} = 0,2.$$

г) $[\sigma]_p = 90 \text{ Н/мм}^2$ – допускаемое напряжение растяжения.

$$\sigma_{max} = 6,7 + 7,5 + 0,2 = 14,4 \leq 90 \text{ Н/мм}^2$$

Условие прочности выполняется.

2.2.4 Расчет гидродинамических подшипников

Исходные данные для расчета представлены в таблице 36.

Таблица 36 – Исходные данные для расчета гидродинамических подшипников

Обозначение	Определение	Значение	Размерность
$[p]$	Предельное давление в подшипнике (справочное)	2	Н/мм ²
$[pv]$	Предельное произведение давления на скорость	8	$\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с}}$
$F_{\text{треб}}$	Прикладываемое усилие к подшипнику	3000	Н
d	Диаметр цапфы	40	мм
n	Скорость вращения вала	3000	об/мин

Угловая скорость вращения ω определяется по формуле:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \quad (19)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3000}{60} = 314,16 \text{ рад/с}$$

Скорость скольжения v определяется по формуле:

$$v = \frac{\omega d}{2 \cdot 1000}, \quad (20)$$

где ω – угловая скорость вращения, рад/с;

d – диаметр цапфы, мм.

$$v = \frac{\omega d}{2 \cdot 1000} = 6,28 \text{ м/с}$$

Минимальная длина цапфы l_{\min} определяется по формуле:

$$l_{\min} = \frac{F_{\text{треб}}}{[p] \cdot d}, \quad (21)$$

где $F_{\text{треб}}$ – прикладываемое усилие к подшипнику, Н;

$[p]$ – предельное давление в подшипнике, Н/мм²;

d – диаметр цапфы, мм.

$$l_{\min} = \frac{3000}{2 \cdot 40} = 37,5 \text{ мм}$$

Подбор ближайшего типоразмера длины цапфы: $l = 60$ мм.

Проверочный расчет давления в подшипнике проводится по формуле:

$$p = \frac{F_{\text{треб}}}{l \cdot d}, \quad (22)$$

где $F_{\text{треб}}$ – прикладываемое усилие к подшипнику, Н;

l – длина подобранной цапфы, мм;

d – диаметр цапфы, мм.

$$p = \frac{3000}{60 \cdot 40} = 1,25 \text{ Н/мм}^2$$

Проверочный расчет произведения давления на скорость:

$$p \cdot v = 1,25 \cdot 6,28 = 7,85 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с}}$$

$$p \cdot v \leq [pv]$$

$$7,85 \leq 8$$

Условие выполняется.

Коэффициент запаса k определяется по формуле:

$$k = \frac{l}{l_{min}}, \quad (23)$$

где l – длина подобранной цапфы, мм;

l_{min} – минимальная длина цапфы, мм.

$$k = \frac{60}{37,5} = 1,6$$

3 Результаты проведенного исследования

3.1 Эскизное проектирование

3.1.1 Описание итогового варианта исполнения

Принципиальная схема итогового варианта исполнения представлена на рисунке 23.

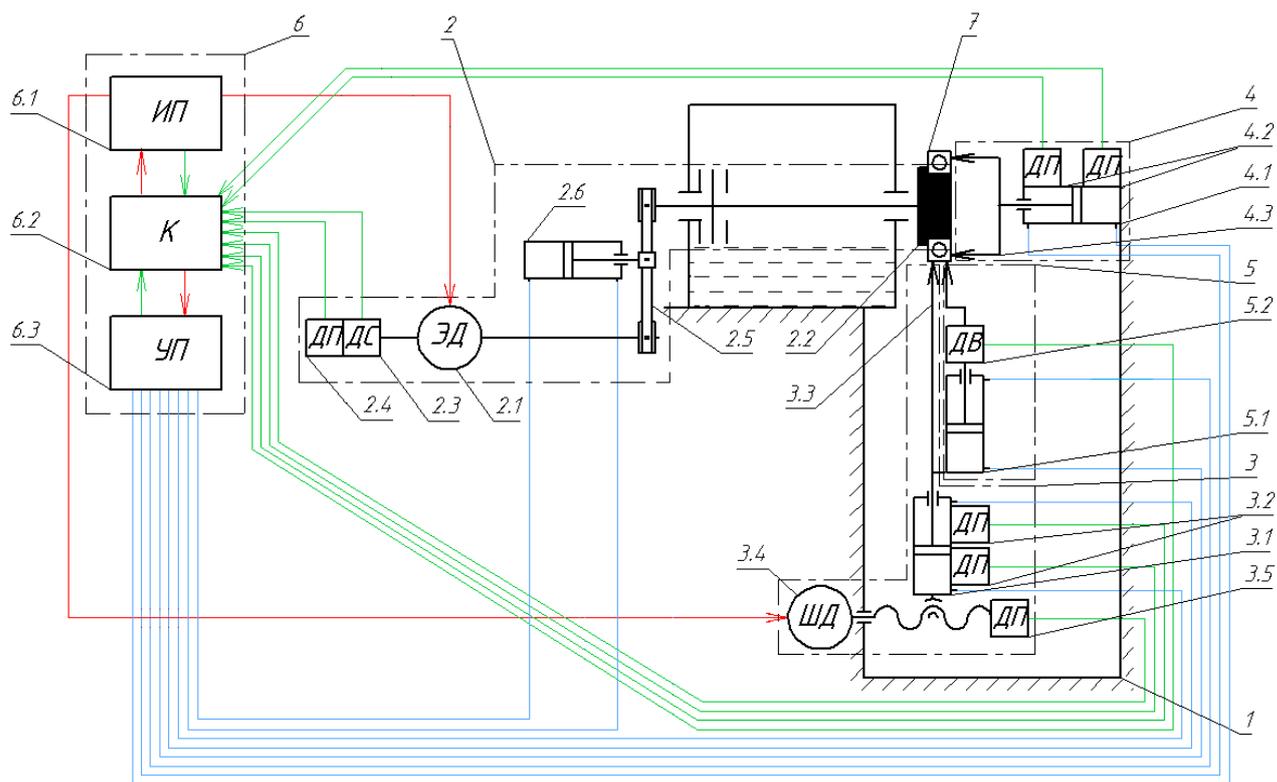


Рисунок 23. Принципиальная схема итогового варианта исполнения

Стенд состоит из шести основных частей: основание 1, модуль вращения внутреннего кольца подшипника 2 (МВВКП), модуль радиального нагружения подшипника 3 (МРНП), модуль осевого нагружения подшипника 4 (МОНП), модуль измерительный 5 (МИ), модуль управления 6 (МУ).

МВВКП 2 состоит из электродвигателя 2.1, приводящего в движение через ременную передачу 2.5 и оправку 2.2 внутренне кольцо подшипника 7. Натяжение ремня обеспечивается пневмоцилиндром, прижимающим ролик натяжения к ремню. Частота вращения контролируется датчиком скорости 2.3. Положение контролируется датчиком положения 2.4.

МРНП 3 и МОНП 4 состоят из пневмоцилиндров 3.1 и 4.1, оказывающее радиальное/осевое воздействие через переходник 3.3 и 4.3 (призму/упор) на наружное кольцо подшипника 7. Положение пневмоцилиндров контролируется датчиками положения 3.2 и 4.2. Взаимное положение МРНП 3 и наружного кольца подшипника 7 настраивается шаговым двигателем 3.4 с датчиком положения 3.5.

МИ 5 состоит из пневмоцилиндра 5.1, закрепленного на штоке пневмоцилиндра 3.1, который прижимает к наружному кольцу подшипника 7 датчик вибрации 5.2. Вибрационный сигнал обрабатывается контроллером 6.2.

МУ 6 состоит из источника питания 6.1 (ИП), контроллера 6.2 (К) и управления пневматикой 6.3 (УП).

Стенд работает следующим образом.

Модуль радиального нагружения подшипника 3 располагается внутри станины и представляет собой пневмоцилиндр 3.1, шток которого толкает штангу, вверху которой расположена призма 3.3, которая в процессе диагностирования упирается в наружное кольцо подшипника 7. Перед проведением измерения, благодаря шаговому двигателю 3.4 и винтовой передаче, производится автоматическая настройка взаимного положения подшипника 7 и датчика вибрации 5.2, исходя из введенных параметров испытуемого подшипника 7.

Внутри призмы 3.3 расположен датчик вибрации 5.2, крепление которого выполнено таким образом, чтобы на него независимо от величины испытательной нагрузки постоянно действовало усилие, не превышающее 2,5 кг, что необходимо для обеспечения точности измерения вибрации.

Модуль осевого нагружения подшипника 4 приводится в действие пневмоцилиндром 4.1, на чей шток одевается трехлучевой кронштейн 4.3. Кронштейн при диагностировании подшипника 7 упираются в его наружное кольцо, передавая осевое усилие.

Конструкция модуля вращения внутреннего кольца подшипников 2 выполнена таким образом, чтобы он кроме передачи вращательного движения,

представлял собой жёсткую базовую систему для оси внутреннего кольца испытуемого подшипника, что согласуется с требованиями ГОСТ Р 52545.1-2006. Это достигается за счёт применения в качестве опор шпинделя двух подшипников скольжения. Шпинделю сообщается вращение от электродвигателя 2.1 через ременную передачу 2.5.

3.1.2 Разработка конструктивного решения

3.1.2.1 Требования к дизайну и нормативные документы

Стенд соответствует требованиям ГОСТ 12.2.049-80 Общие эргономические требования, ГОСТ 20.39.108-85, ГОСТ 12.2.032-78 Рабочее место при выполнении работ сидя, ГОСТ 12.2.033-78 Рабочее место при выполнении работ стоя.

Эстетическая выразительность внешнего вида обеспечивается тщательностью выполнения элементов конструкции. Пространственная компоновка элементов управления обеспечивает удобство взаимодействия с ними оператора любой рукой. Ручки основных органов управления и индикаторы различимы. Доступ к органам управления, изменение параметров которых в процессе эксплуатации недопустимо, ограничен.

3.1.2.2 Материалы и технологии изготовления

Материалы должны удовлетворять следующим требованиям:

- физиологическая безвредность;
- отсутствие токсичности;
- отсутствие канцерогенности;
- отсутствие аллергенности;
- минимальное раздражающее действие на окружающие ткани;
- постоянство физико-химических и механических свойств;
- большая прочность и работоспособность при незначительной усталости.

сти.

Все части стенда выполнены из материалов, удовлетворяющих требованиям прочности и безопасности.

3.1.2.3 Компоновочная схема

Используется компоновочная схема типа Моноблок. Она представлена на рисунке 24.

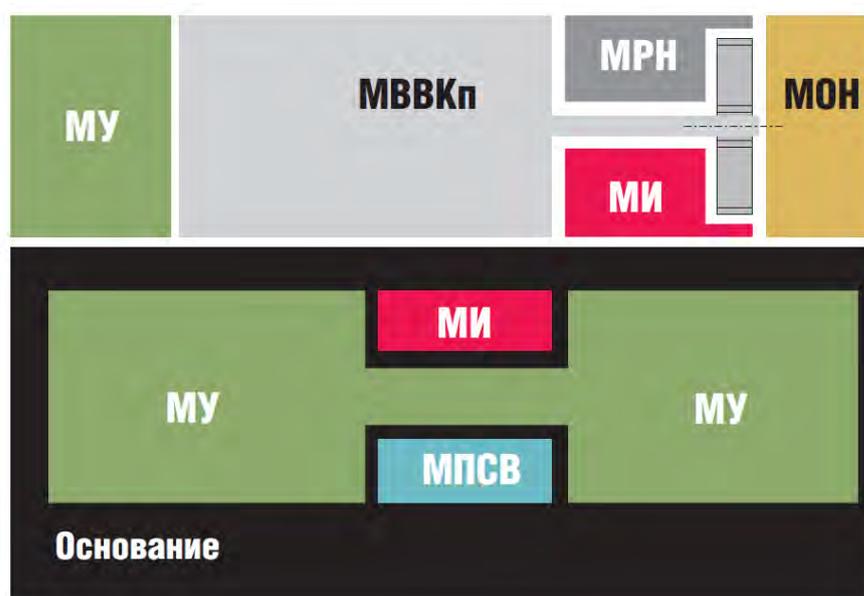


Рисунок 24. Компоновочная схема

Условные обозначения, принятые на схеме:

- МВВКп – модуль вращения внутреннего кольца подшипника.
- МРН – модуль радиального нагружения;
- МОН – модуль осевого нагружения;
- МИ – модуль измерительный;
- МПСВ – модуль подготовки сжатого воздуха;
- МУ – модуль управления.

Достоинствами данной компоновочной схемы являются:

- соответствие методике выполнения измерений;
- максимальная безопасность;
- простота в использовании;
- возможность интеграции панели оператора;
- короткие магистральные линии;
- возможность внутренней развязки внешних оболочек кожуха с основа-

нием.

3.1.2.4 Концепция дизайна

Основа корпуса стенда представляет собой комбинацию наружного и внутреннего каркаса с плоскими и плосковыгнутыми кожухами из листовой стали в двух цветах: черном и сером. Имеет сдвижные защитные кожухи. (Рисунок 25)



Рисунок 25. Концепция дизайна

Реализация дизайна стенда представлен на рисунке 26.



Рисунок 26. Реализация дизайна

3.1.3 Проектировочные расчеты

Для проведения прочностного проектировочного расчета конструктив был упрощен до вида, представленного на рисунке 27.

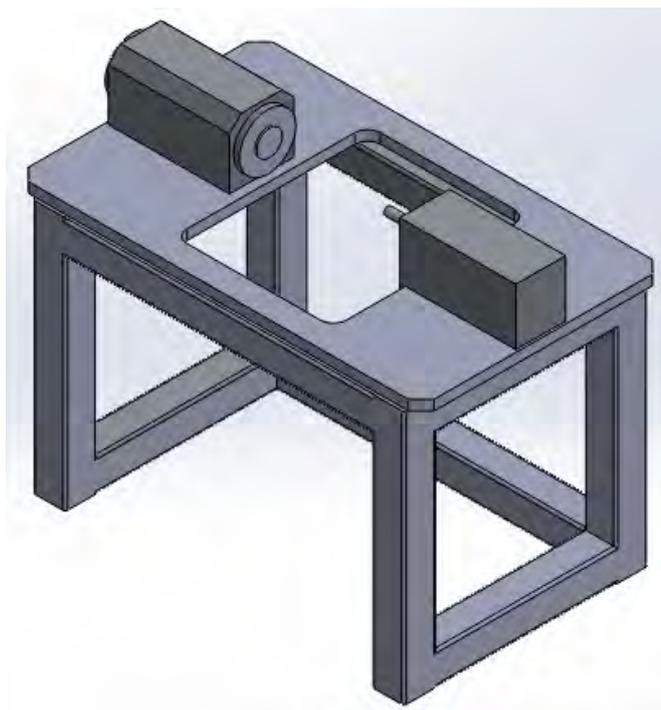


Рисунок 27. Внешний вид расчетного конструктива

На рисунке 28 приведен способ закрепления каркаса, а на рисунке 29 – способ нагружения. К силовым элементам конструкции приложена внешняя нагрузка 3000 Н.

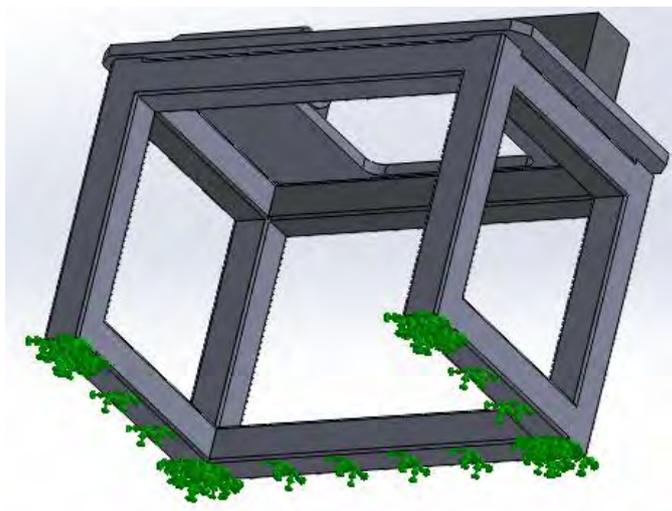


Рисунок 28. Задание закреплений

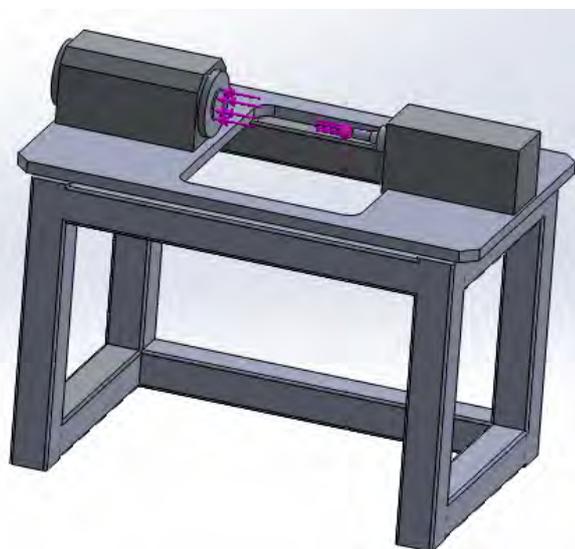


Рисунок 29. Задание нагрузок

Размеры поперечного сечения профиля основания – 80x80 мм, стенка – 4 мм (площадь поперечного сечения 1188,5 мм²). Минимальное сечение конструкционного элемента из материала Ст 3 ГОСТ 380-2005 из расчета на срез при нагрузке 3000 Н – 62,5 мм². Коэффициент запаса прочности:

$$\frac{1188,5 \text{ мм}^2}{62,5 \text{ мм}^2} = 19,02.$$

Сверху на основание устанавливается через виброгасящие проставки монтажная плита. Толщина монтажной плиты 25 мм. Минимальная толщина монтажной плиты (габаритные размеры плиты 1000x600 мм) из материала Ст 3 ГОСТ 380-2005 из расчета на изгиб при нагрузке 3000 Н – 12,5 мм. Коэффициент запаса прочности

$$\frac{25 \text{ мм}}{12,5 \text{ мм}} = 2$$

В расчете определялось максимальное значение напряжения, возникающего в конструкции при указанных выше внешних условиях. Использован линейный упругий изотропный тип модели материала.

Заданные параметры (материал Ст 3 ГОСТ 380-2005):

- предел текучести: 2,06807e+08 N/m²;
- предел прочности при растяжении: 5,17017e+08 N/m²;
- модуль упругости: 1,94e+11 N/m²;
- коэффициент Пуассона: 0,29;
- массовая плотность: 7 800 kg/m³;
- модуль сдвига: 7,5e+10 N/m²;
- коэффициент теплового расширения: 1,8e-05 /К.

На рисунке 30 представлен уровень напряжений в элементах конструкции, а на рисунке 31 – уровень деформаций. Для наглядности масштаб деформаций сильно увеличен. Реальные деформации имеют значительно меньшие величины и в масштабах изображений, размещаемых на листах формата А4 будут незаметны.

Коэффициент запаса прочности – соотношение предела текучести материала и максимального напряжения конструкции:

$$\frac{2,068 \cdot 10^8}{1,933 \cdot 10^8} = 1,67.$$

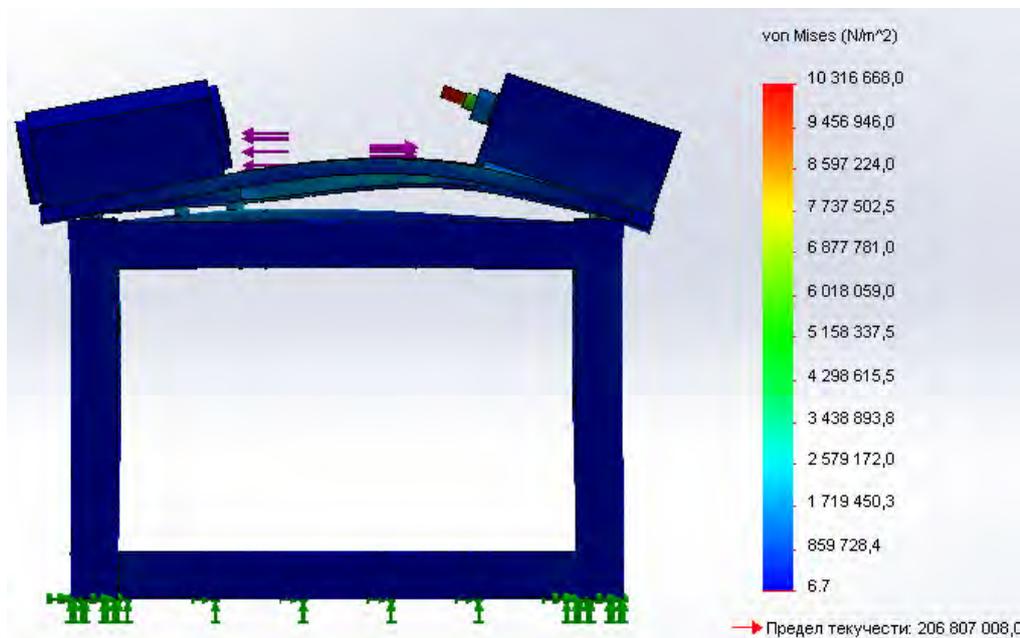


Рисунок 30. Уровень напряжений в элементах конструкции

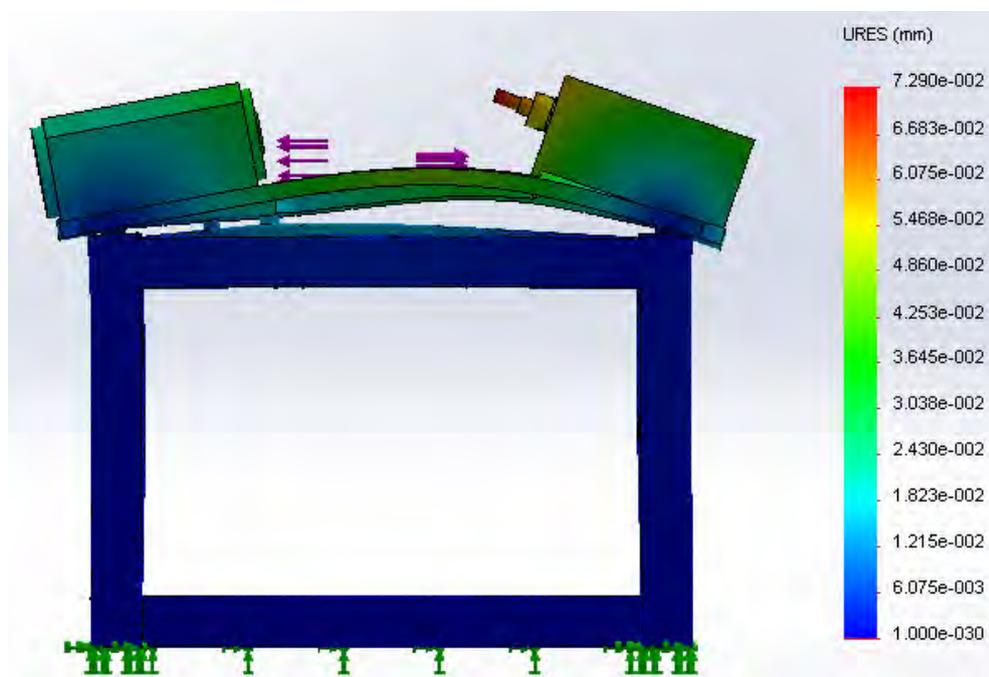


Рисунок 31. Уровень деформаций в элементах конструкции

3.2 Моделирование работы стенда

3.2.1 Модуль вращения внутреннего кольца подшипника

На стенде могут испытываться подшипники, имеющие:

- внутренний посадочный диаметр от 30 до 220 мм;
- наружный диаметр от 42 до 420 мм;
- ширину до 140 мм;
- массу до 65 кг.

Исходя из этого для моделирования определены минимальный и максимальный по габаритам и массе возможные подшипники, это 1000806 (масса 0,027 кг) и 3634 (масса 62 кг).

Подшипники испытываются на следующих частотах вращения:

- 900 об/мин;
- 1800 об/мин;
- 3000 об/мин.

Разработана расчетная модель в программном обеспечении Simcenter Amesim (рисунок 32), содержащая электромотор 1, ременную передачу (ведущий шкив 2, ведомый шкив 3, ролик натяжения 4, сила натяжения ремня 5), подшипниковые опоры шпинделя 6, 7, датчик частоты вращения шпинделя 8, диагностируемый подшипник 9, инерционную нагрузку от подшипника 10, сила радиального нагружения подшипника 11, сила осевого нагружения подшипника 12.

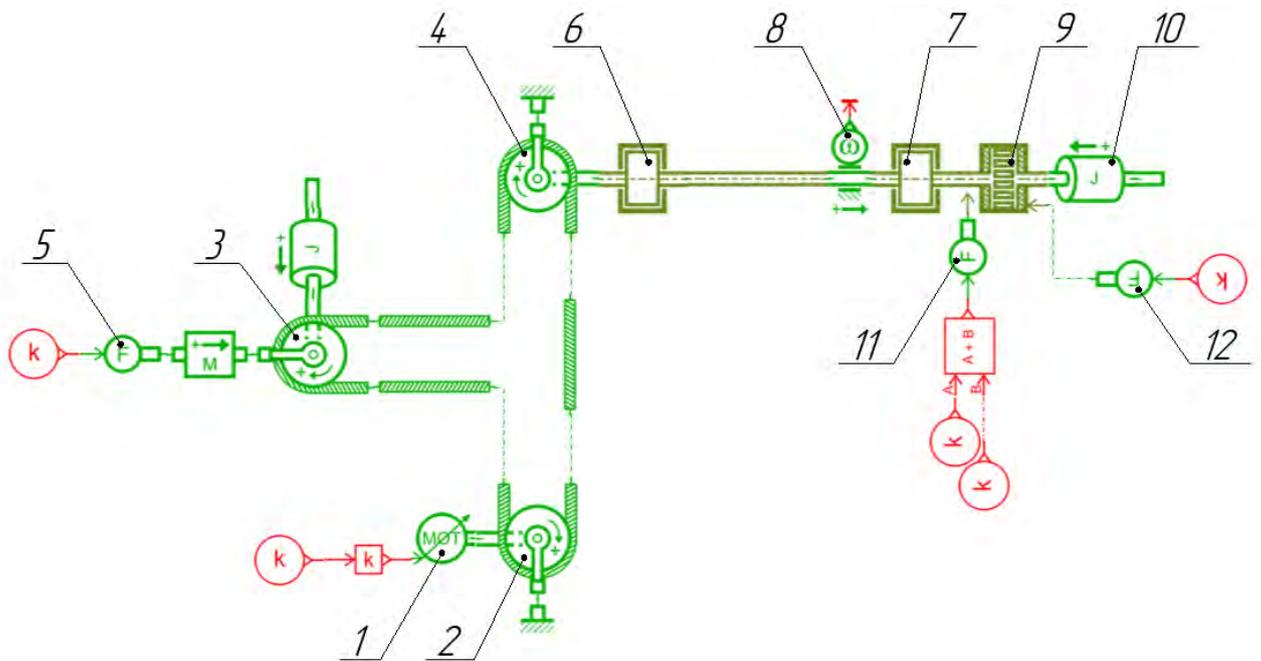


Рисунок 32. Расчетная модель модуля вращения
внутреннего кольца подшипника

В программном обеспечении SolidWorks определены моменты инерции подшипников 1000806 и 3634. Они составляют $9 \text{ кг}\cdot\text{мм}^2$ и $1288301 \text{ кг}\cdot\text{мм}^2$ соответственно.

Построены графики частоты вращения шпинделя по времени при пуске двигателя для моментов инерции подшипников 1000806 и 3634, а также промежуточных моментов инерции $40268 \text{ кг}\cdot\text{мм}^2$, $161045 \text{ кг}\cdot\text{мм}^2$, $322082 \text{ кг}\cdot\text{мм}^2$, $644155 \text{ кг}\cdot\text{мм}^2$, $966228 \text{ кг}\cdot\text{мм}^2$ (рисунки 33-39).

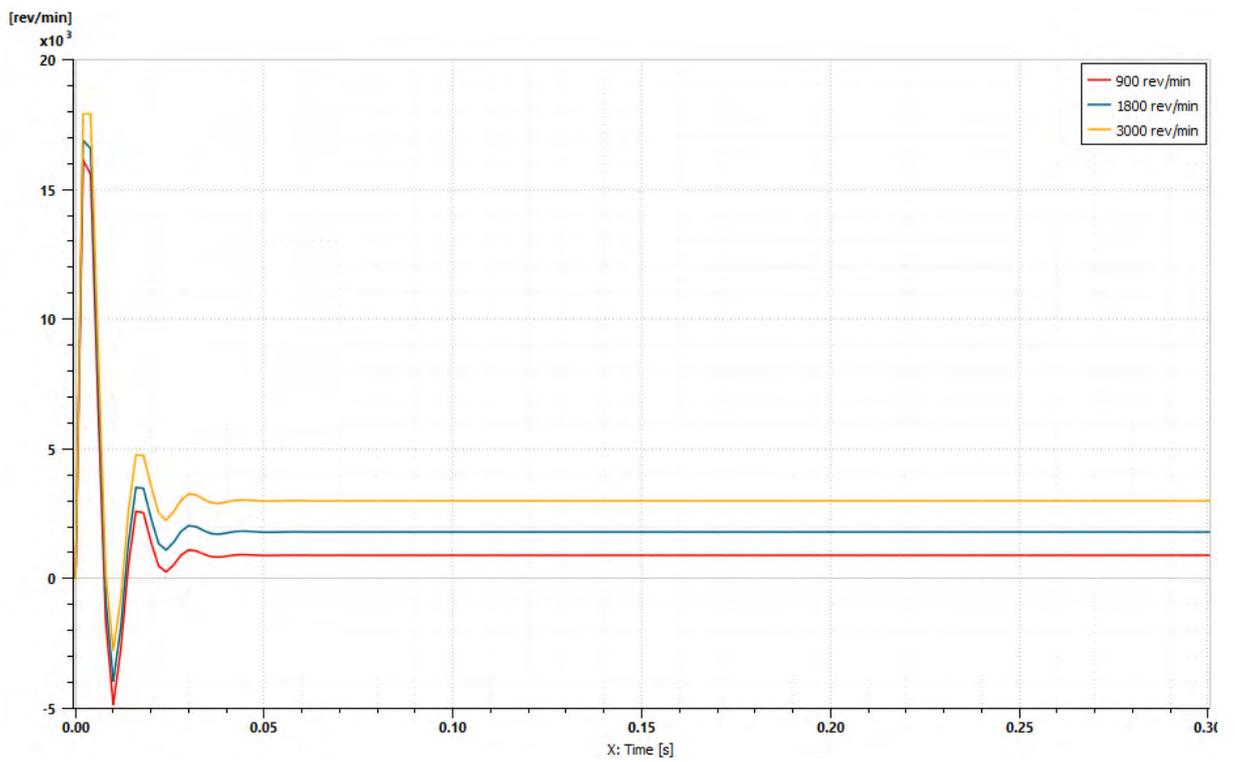


Рисунок 33. Частота вращения для момента инерции $9 \text{ кг}\cdot\text{мм}^2$

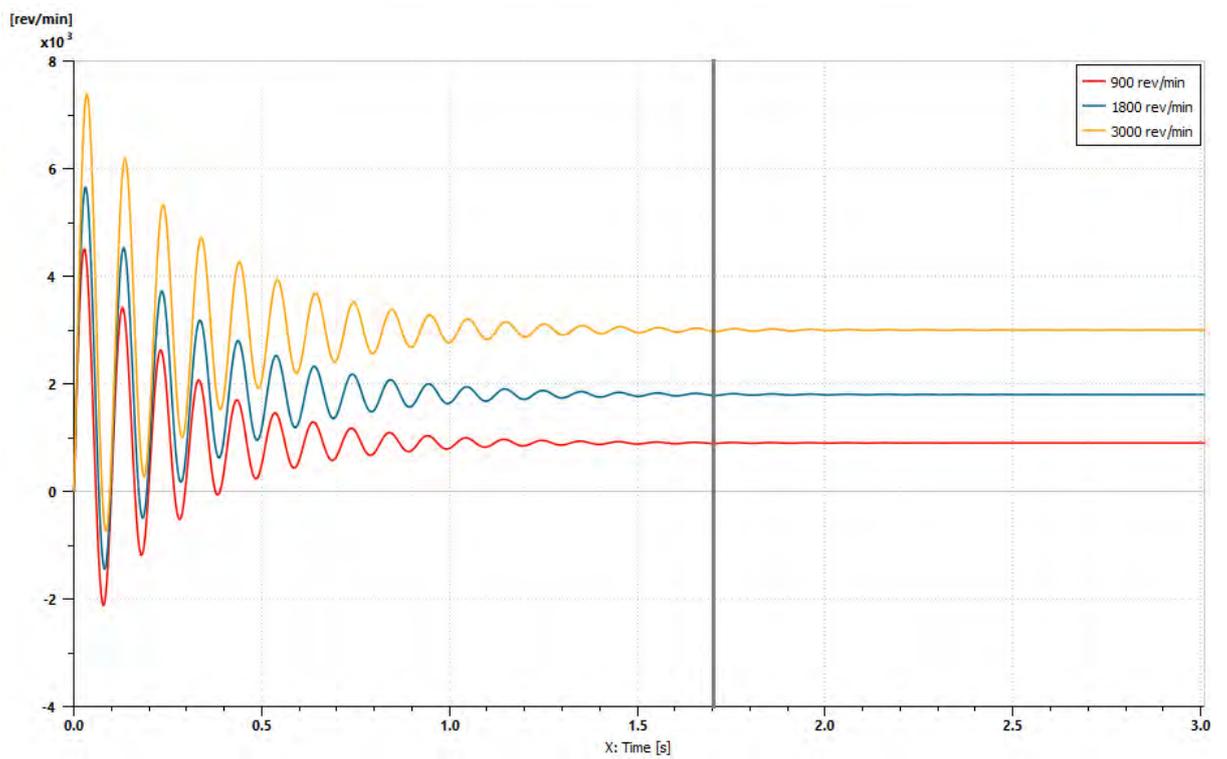


Рисунок 34. Частота вращения для момента инерции $40268 \text{ кг}\cdot\text{мм}^2$

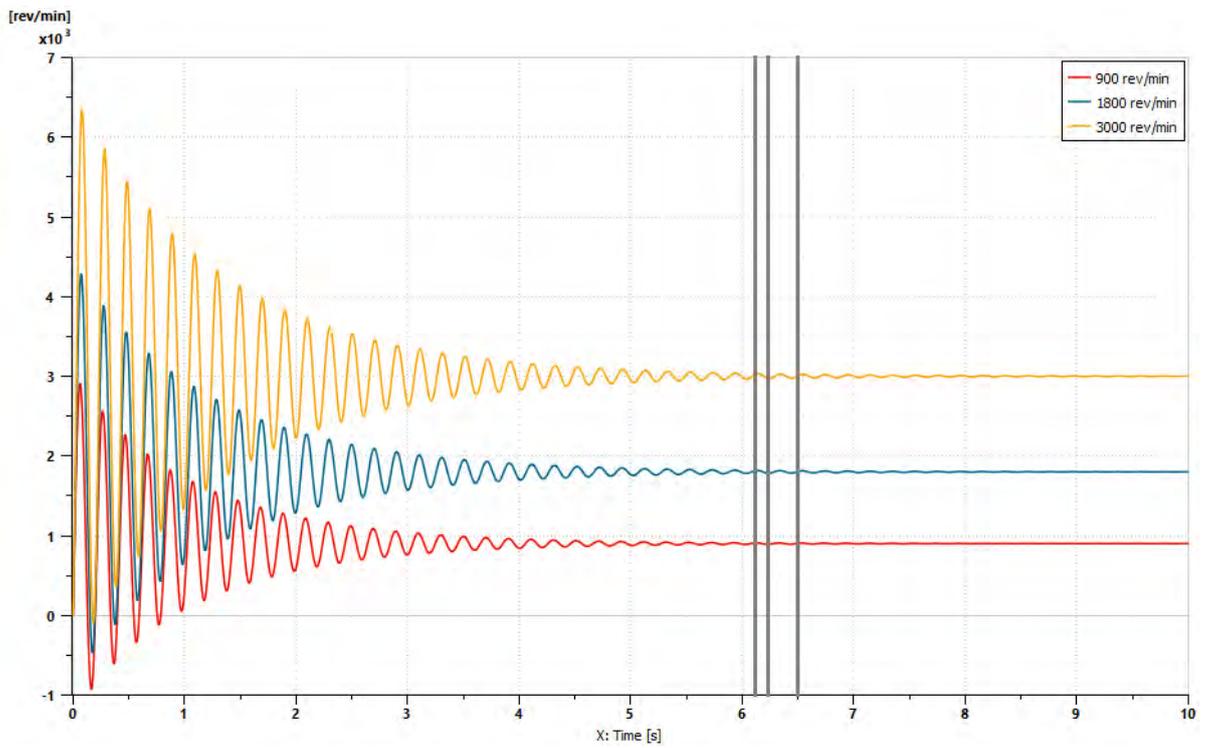


Рисунок 35. Частота вращения для момента инерции 161045 кг·мм²

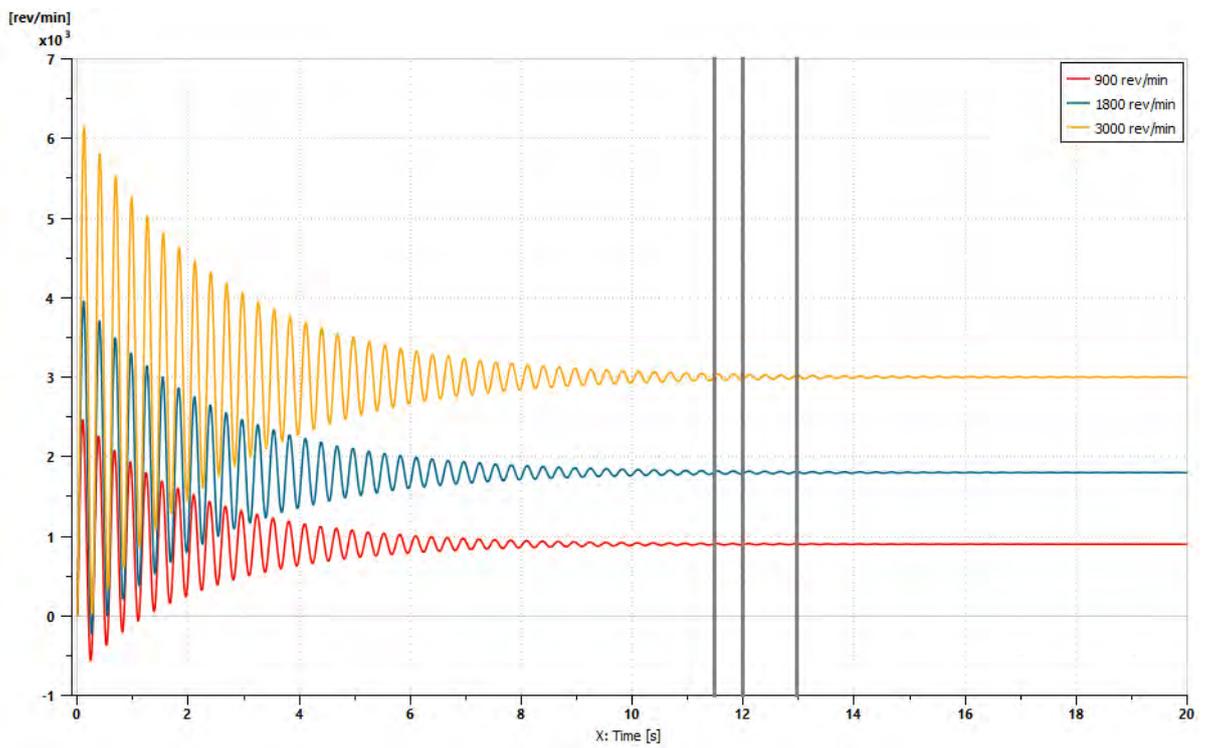


Рисунок 36. Частота вращения для момента инерции 322082 кг·мм²

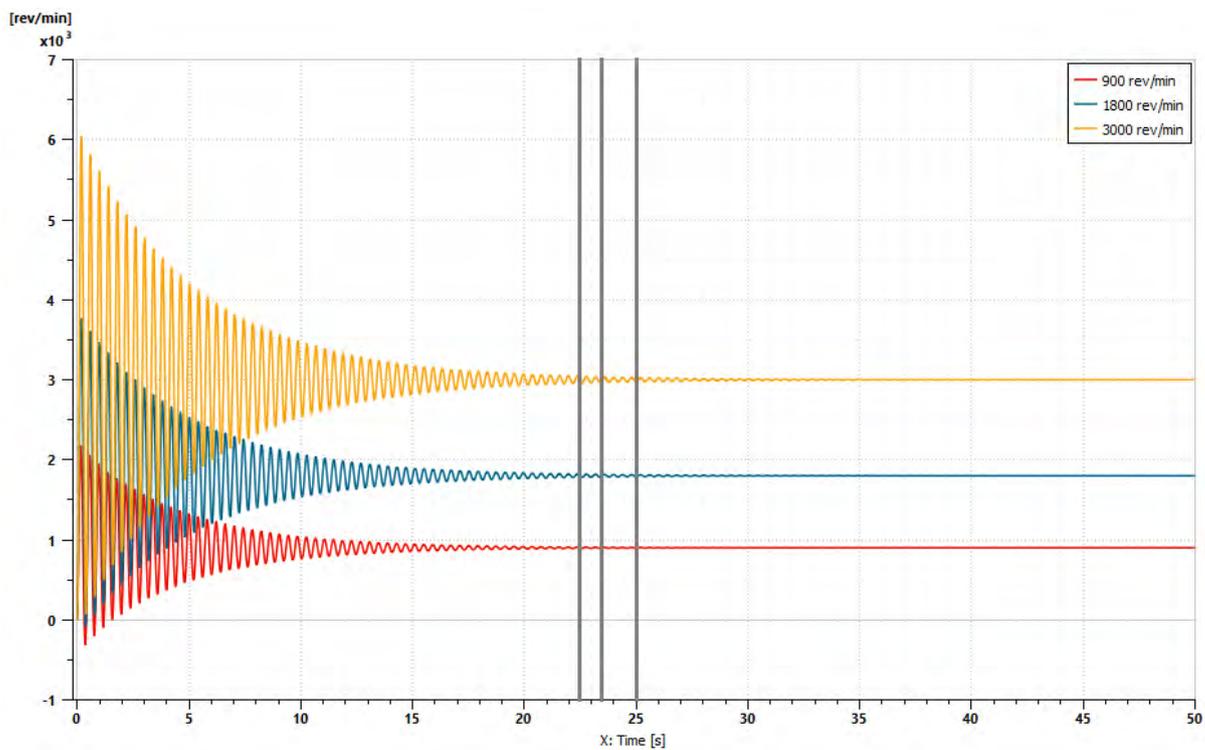


Рисунок 37. Частота вращения для момента инерции 644155 кг·мм²

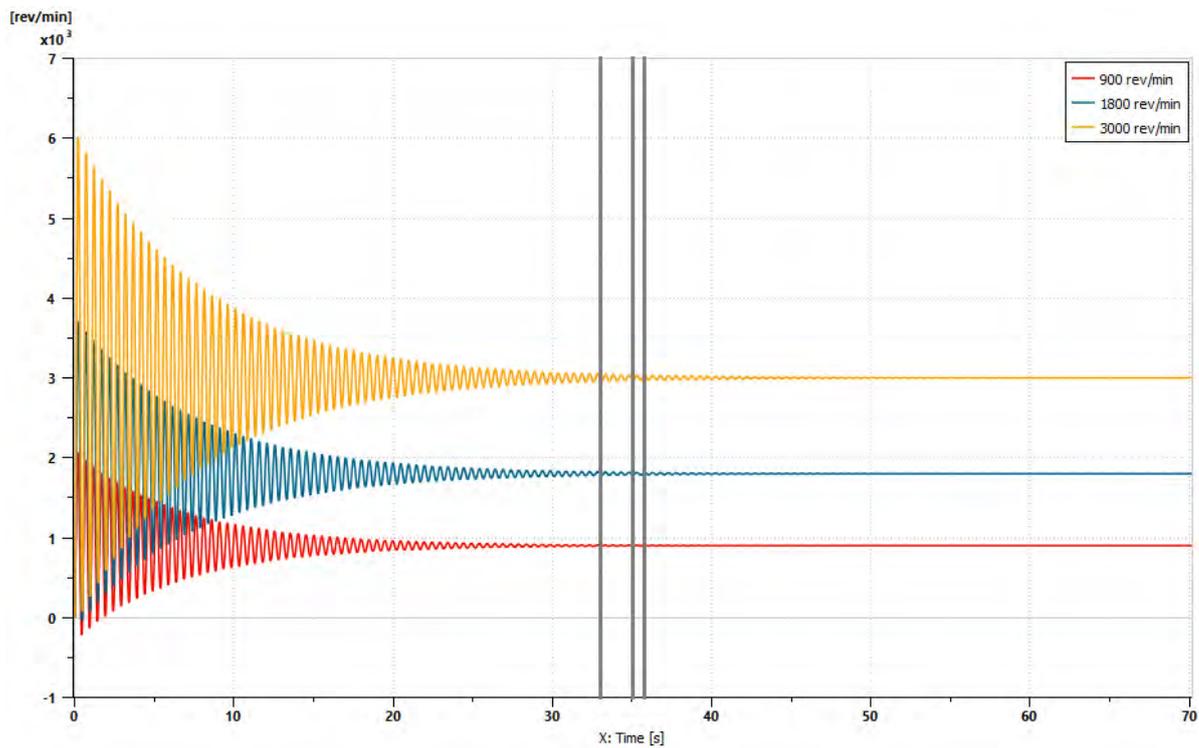


Рисунок 38. Частота вращения для момента инерции 966228 кг·мм²

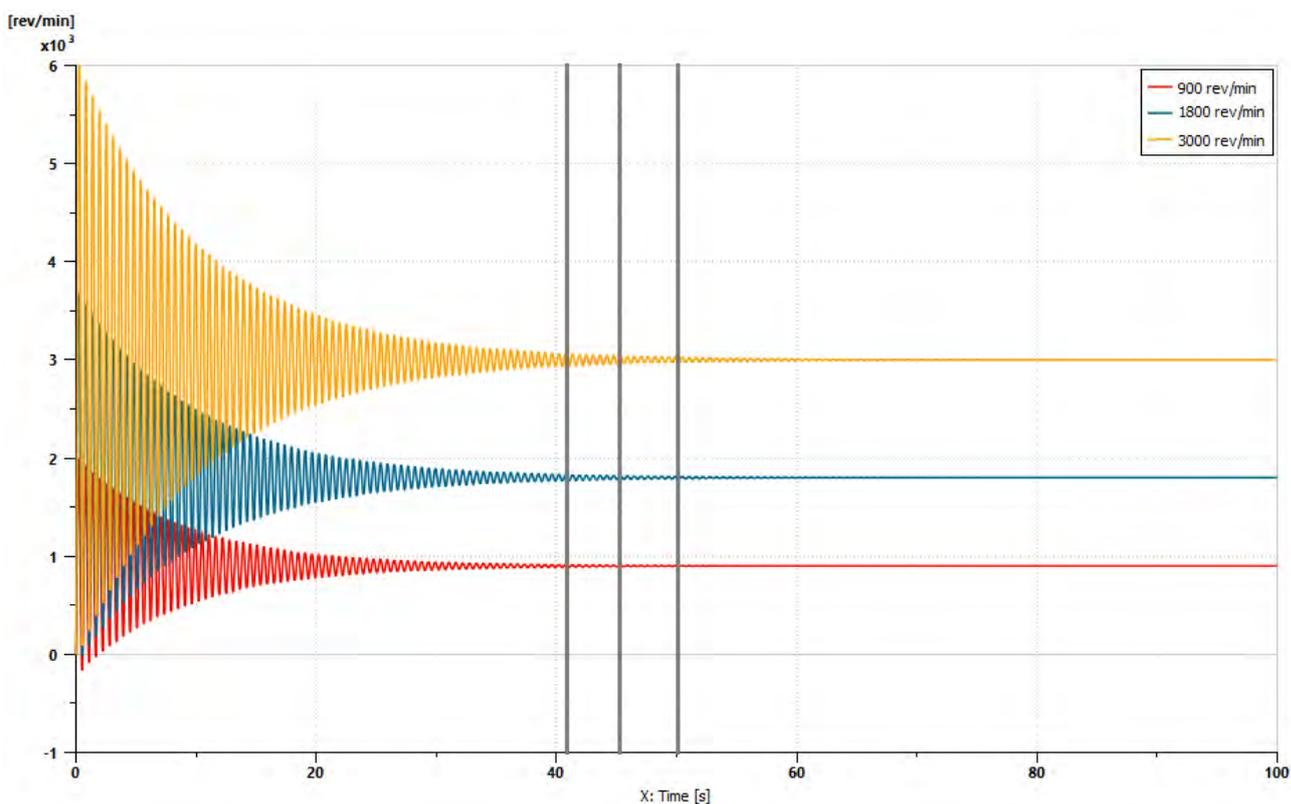


Рисунок 39. Частота вращения для момента инерции $1288301 \text{ кг}\cdot\text{мм}^2$

Исходя из моделирования определена продолжительность переходных процессов с погрешностью частоты вращения не более 1%, согласно техническому заданию. Можно сделать вывод, что на большей частоте вращения продолжительность переходного процесса больше, за исключением испытаний подшипников с малым моментом инерции. Так, например, при моменте инерции $40268 \text{ кг}\cdot\text{мм}^2$ продолжительность переходного процесса на всех частотах совпадает и составляет 1,7 с, а при испытании самого малого подшипника (1000806) — менее 0,1 с.

Наибольшая возможная продолжительность переходного процесса на данном стенде составляет 50 с при испытании самого большого подшипника (3634) на частоте вращения 3000 об/мин. Однако, поскольку такие подшипники обычно испытываются на меньшей частоте 900 об/мин, продолжительность переходного процесса будет не более 41 с.

График зависимости продолжительности переходного процесса от момента инерции подшипника на разных частотах представлен на рисунке 40.

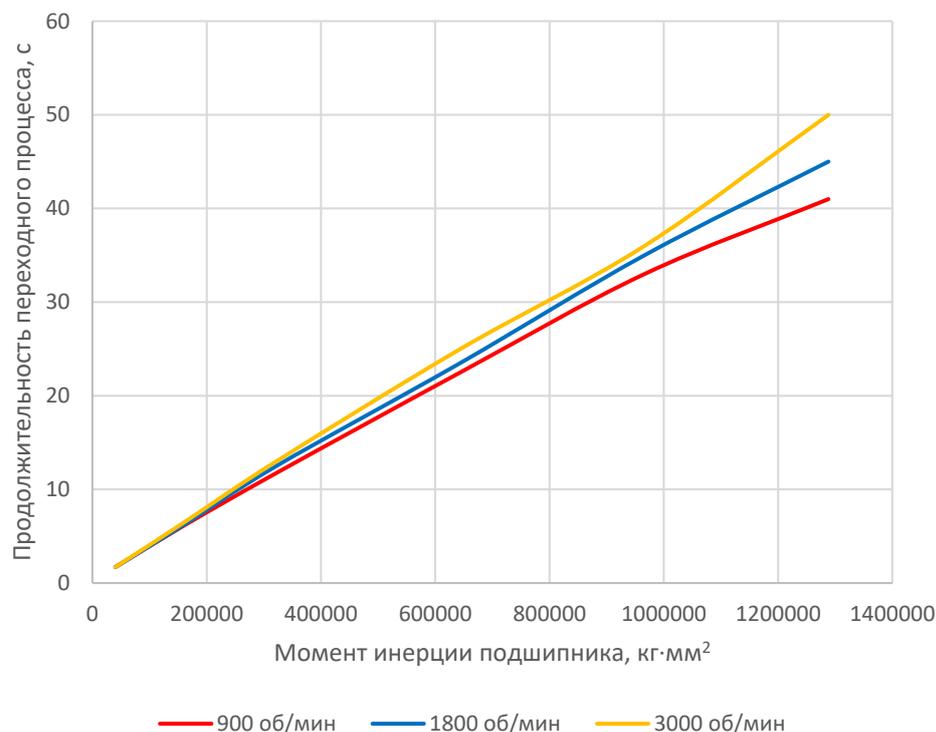


Рисунок 40. Зависимость продолжительности переходного процесса от момента инерции подшипника

3.2.2 Модуль радиального нагружения подшипника

На стенде подшипники испытываются радиальным нагружением от 70 до 3000 Н. Нагружение обеспечивается совместной работой пневмоцилиндра радиального нагружения и пневмоцилиндром поджима датчика вибрации. Усилие поджима датчика 25 Н. При этом поджатие датчика необходимо обеспечивать и при осевом нагружении подшипника.

Исходя из этого определены три расчетных случая:

1. Только поджим датчика 25 Н;
2. Радиальное нагружение 70 Н;
3. Радиальное нагружение 3000 Н.

Разработана расчетная модель в программном обеспечении Simcenter Amesim (рисунок 41), содержащая компрессор 1, модуль подготовки сжатого воздуха 2, манометр 3, регуляторы давления 4, 5, дроссель с глушителем 6, пневмораспределители 7, 8, пневмоцилиндр радиального нагружения 9, пневмоцилиндр поджима датчика 10, суммирование нагрузки пневмоцилиндров 11.

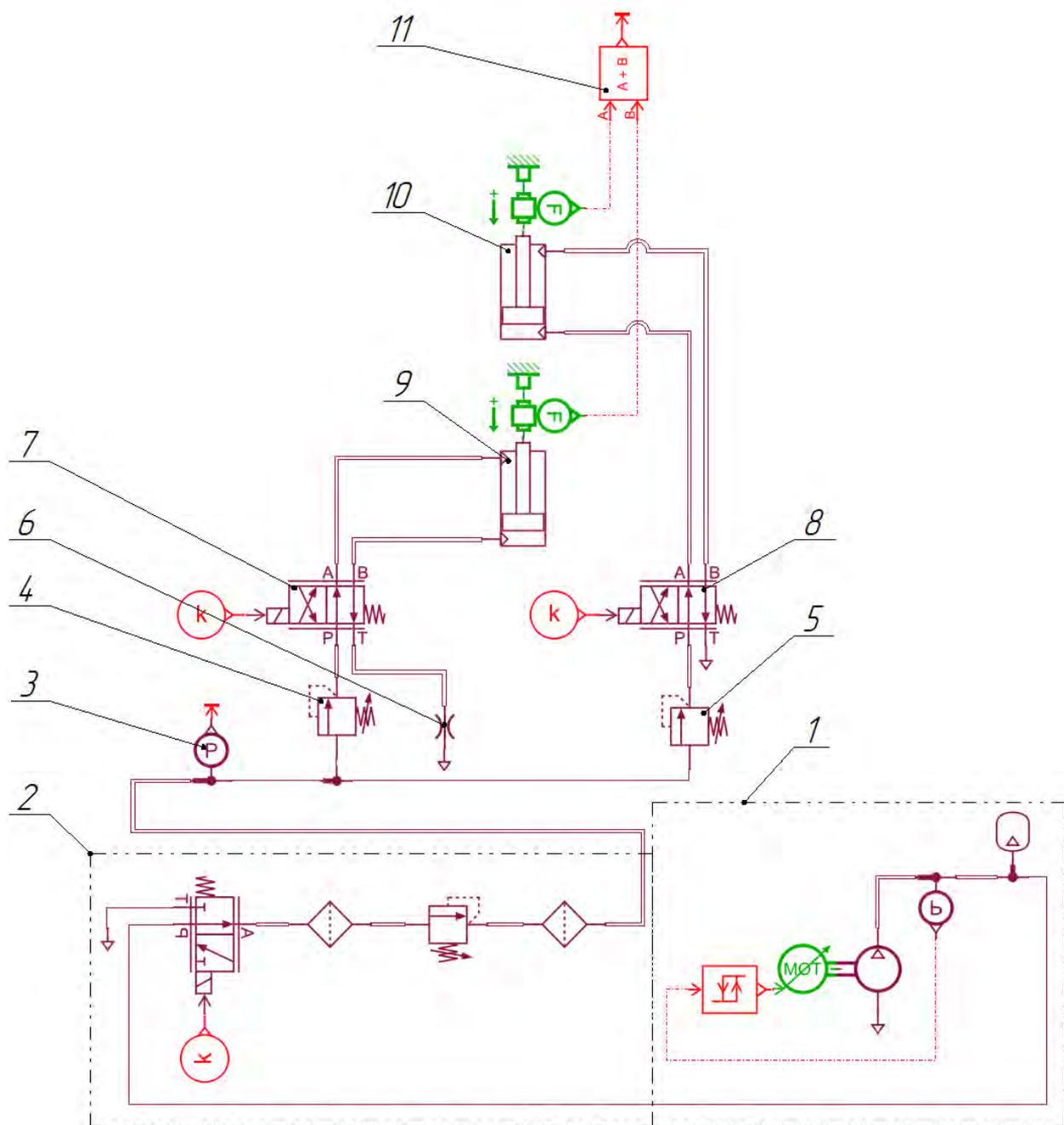


Рисунок 41. Расчетная модель модуля радиального нагружения подшипника

Построены графики силы, прикладываемой к подшипнику по времени в начале испытания для каждого расчетного случая (рисунки 42-44) и определено требуемое давление в пневмоцилиндрах. Результаты представлены в таблице 37.

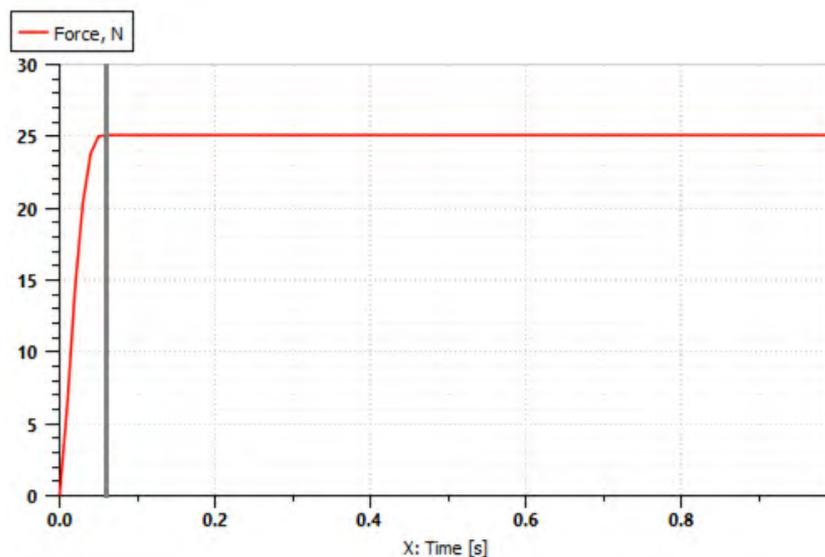


Рисунок 42. Время установления режима поджима датчика

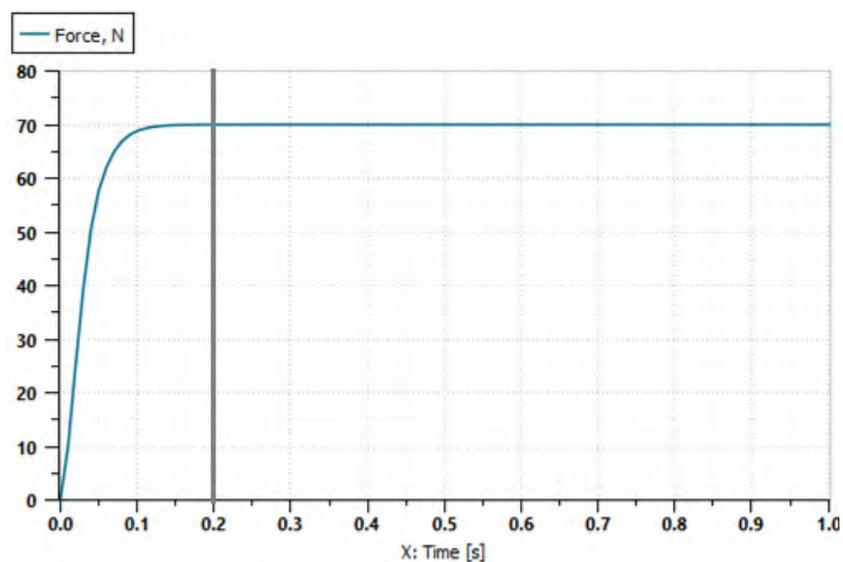


Рисунок 43. Время установления режима радиального нагружения 70 Н

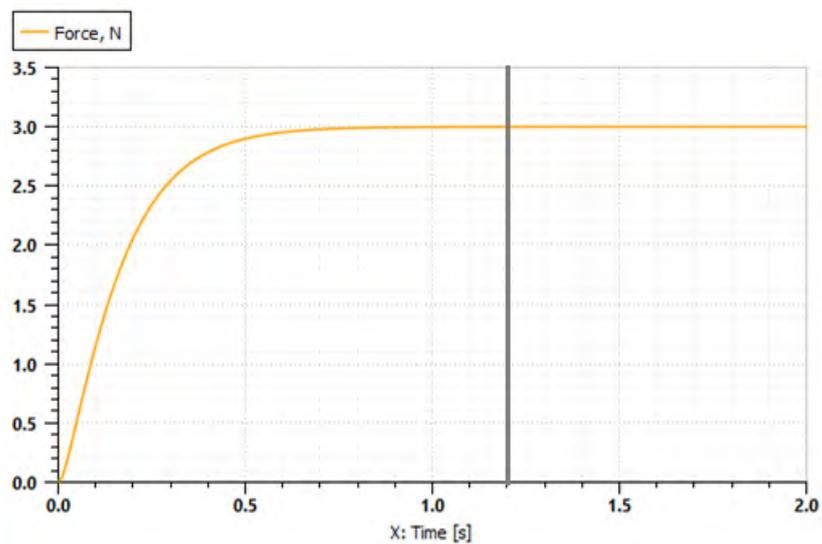


Рисунок 44. Время установления режима радиального нагружения 3000 Н

Таблица 37 – Результаты моделирования работы модуля радиального нагружения подшипника

№ расчетного случая	Время установления режима, с	Давление в пневмоцилиндре радиального нагружения, МПа	Давление в пневмоцилиндре поджима датчика, МПа
1	0,06	0,000	0,031
2	0,20	0,006	0,031
3	1,20	0,404	0,031

3.2.3 Модуль осевого нагружения подшипника

На стенде подшипники испытываются радиальным нагружением от 70 (расчетный случай №1) до 3000 Н (расчетный случай №2).

Разработана расчетная модель в программном обеспечении Simcenter Amesim (рисунок 45), содержащая компрессор 1, модуль подготовки сжатого воздуха 2, манометр 3, регулятор давления 4, дроссель с глушителем 5, пневмораспределитель 6, пневмоцилиндр осевого нагружения 7.

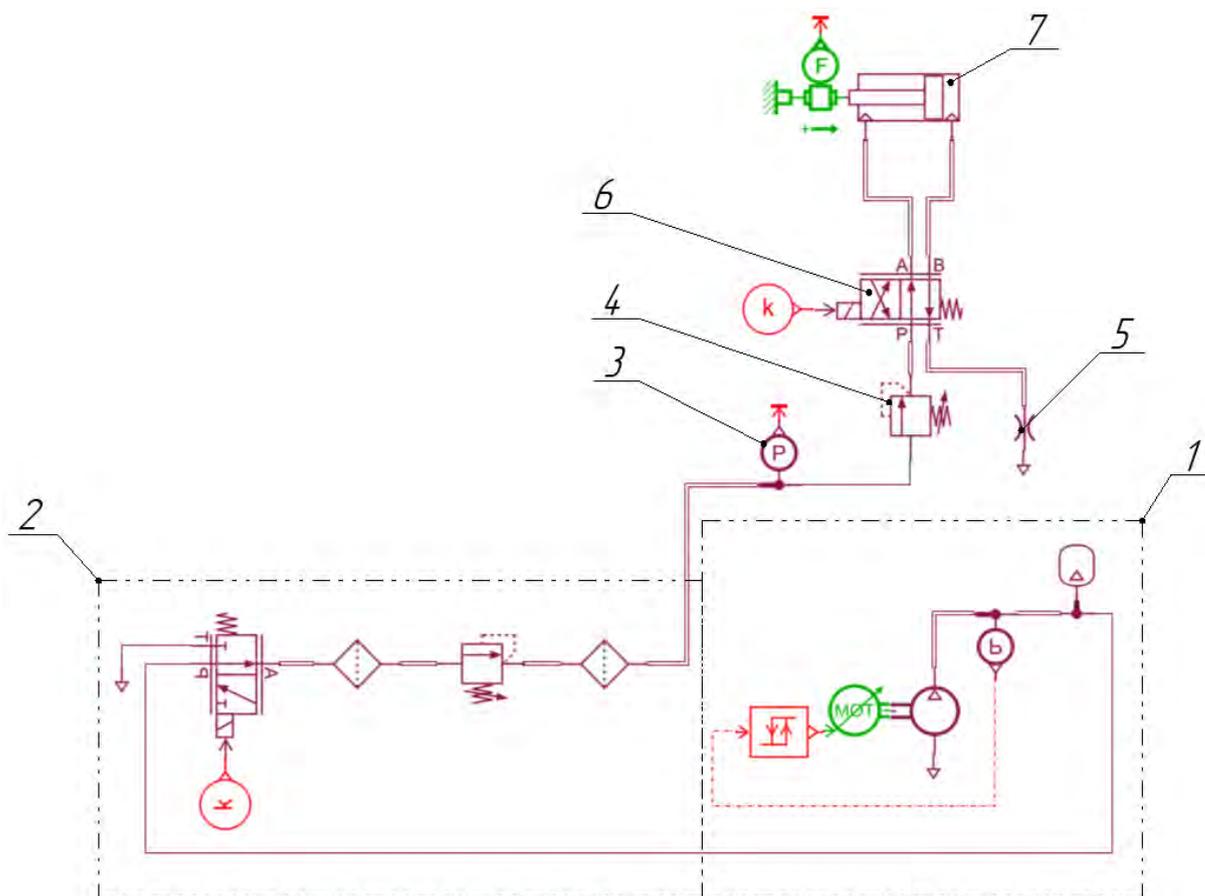


Рисунок 45. Расчетная модель модуля осевого нагружения подшипника

Построены графики силы, прикладываемой к подшипнику по времени в начале испытания для каждого расчетного случая (рисунки 42-44) и определено требуемое давления в пневмоцилиндре. Результаты представлены в таблице 38.

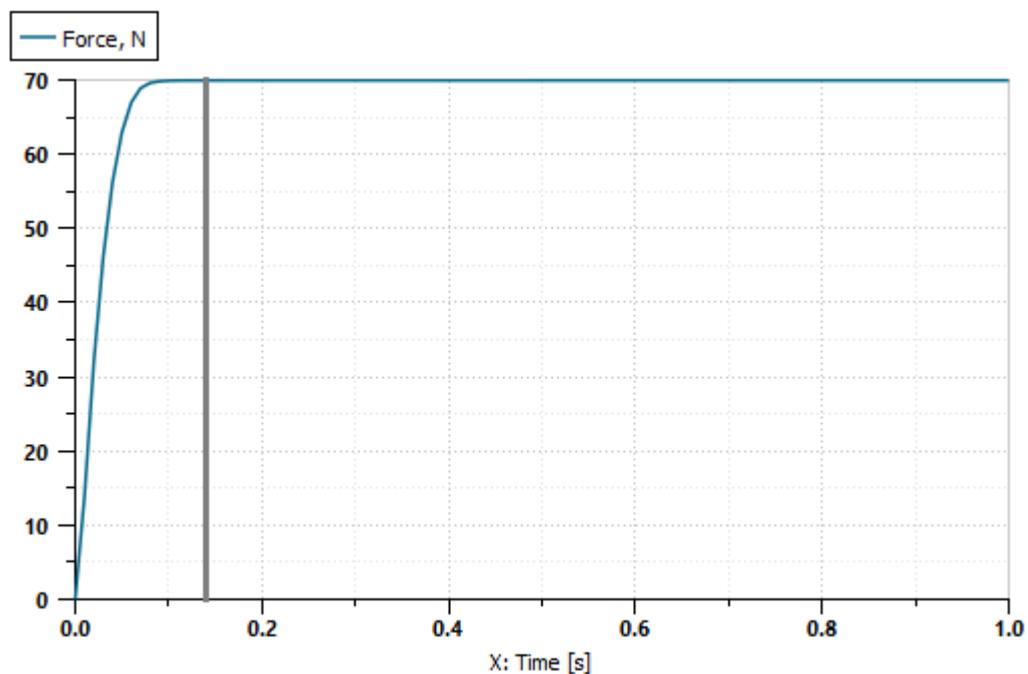


Рисунок 46. Время установления режима осевого нагружения 70 Н

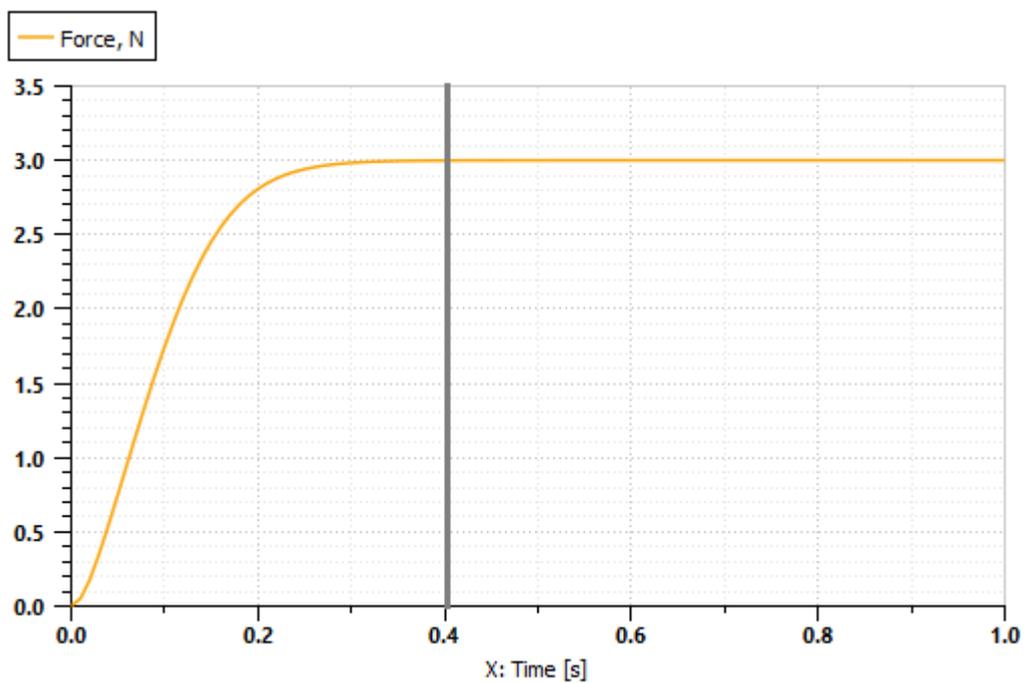


Рисунок 47. Время установления режима осевого нагружения 3000 Н

Таблица 38 – Результаты моделирования работы модуля осевого нагружения подшипника

№ расчетного случая	Время установления режима, с	Давление в пневмоцилиндре осевого нагружения, МПа
1	0,14	0,009
2	0,40	0,408

3.2.4 Совместная работа модулей

Для исследования совместной работы модулей разработана расчетная модель в программном обеспечении Simcenter Amesim (рисунок 48), содержащая компрессор 1, модуль подготовки сжатого воздуха 2, манометр 3, регуляторы давления 4-7, дроссели с глушителем 8, 9, пневмораспределители 10-13, пневмоцилиндр радиального нагружения 14, пневмоцилиндр осевого нагружения 15, пневмоцилиндр натяжения ремня 16, пневмоцилиндр поджима датчика 17, электромотор 18, ременную передачу (ведущий шкив 19, ведомый шкив 20, ролик натяжения 21), подшипниковые опоры шпинделя 22, 23, датчик частоты вращения шпинделя 24, диагностируемый подшипник 25, инерционную нагрузку от подшипника 26.

Исходя из п. 3.2.1-3.2.3 сформированы циклограммы работы стенда при испытании самого маленького (1000806, 0,027 кг) и самого большого (3634, масса 62 кг) подшипников на частоте вращения 900 об/мин. Они представлены на рисунках 49, 50, где а – работа пневмоцилиндра радиального нагружения, б – работа пневмоцилиндра поджима датчика, в – работа пневмоцилиндра осевого нагружения, г – работа пневмоцилиндра натяжения ремня, д – частота вращения шпинделя.

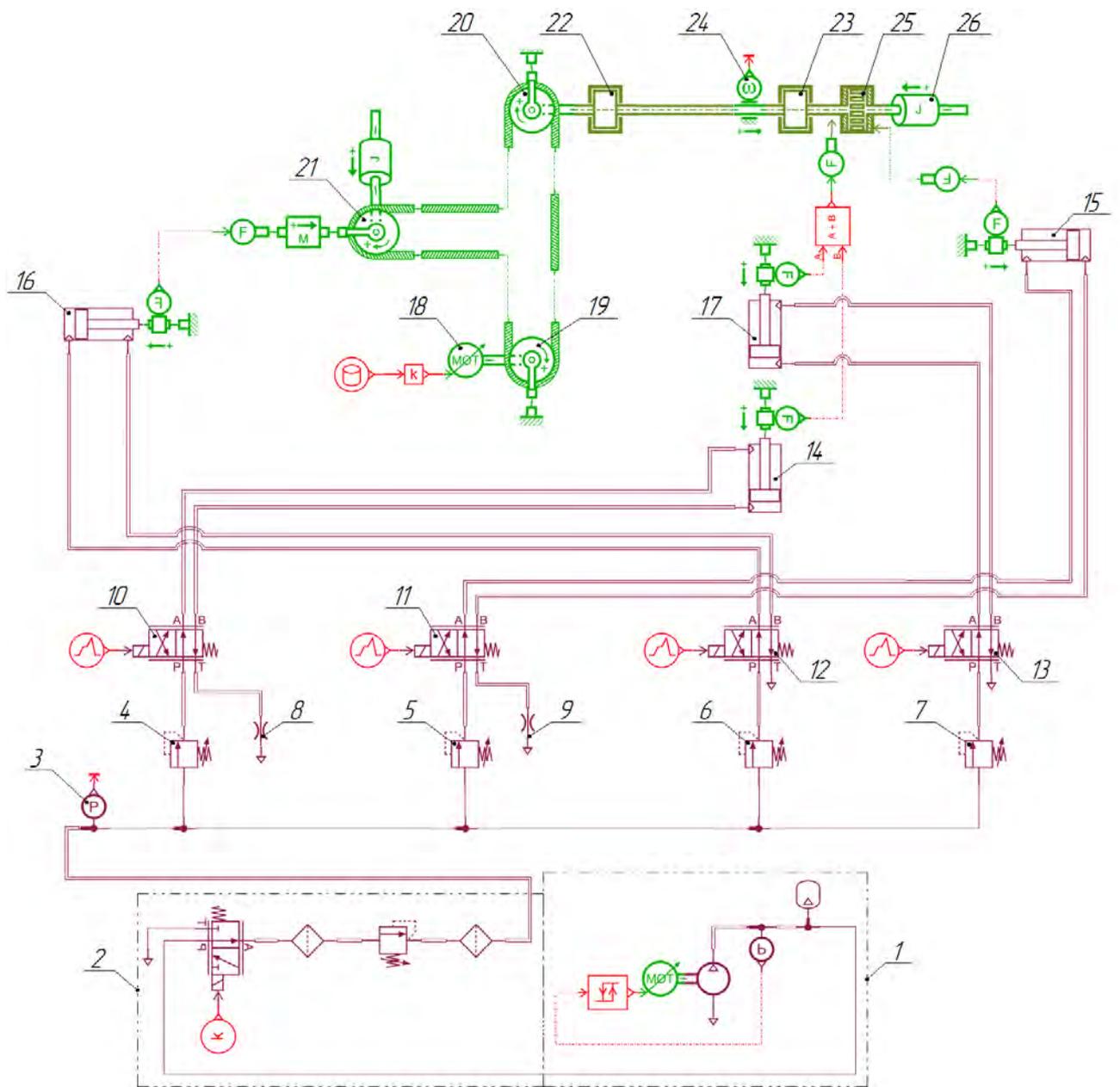


Рисунок 48. Расчетная модель совместной работы модулей

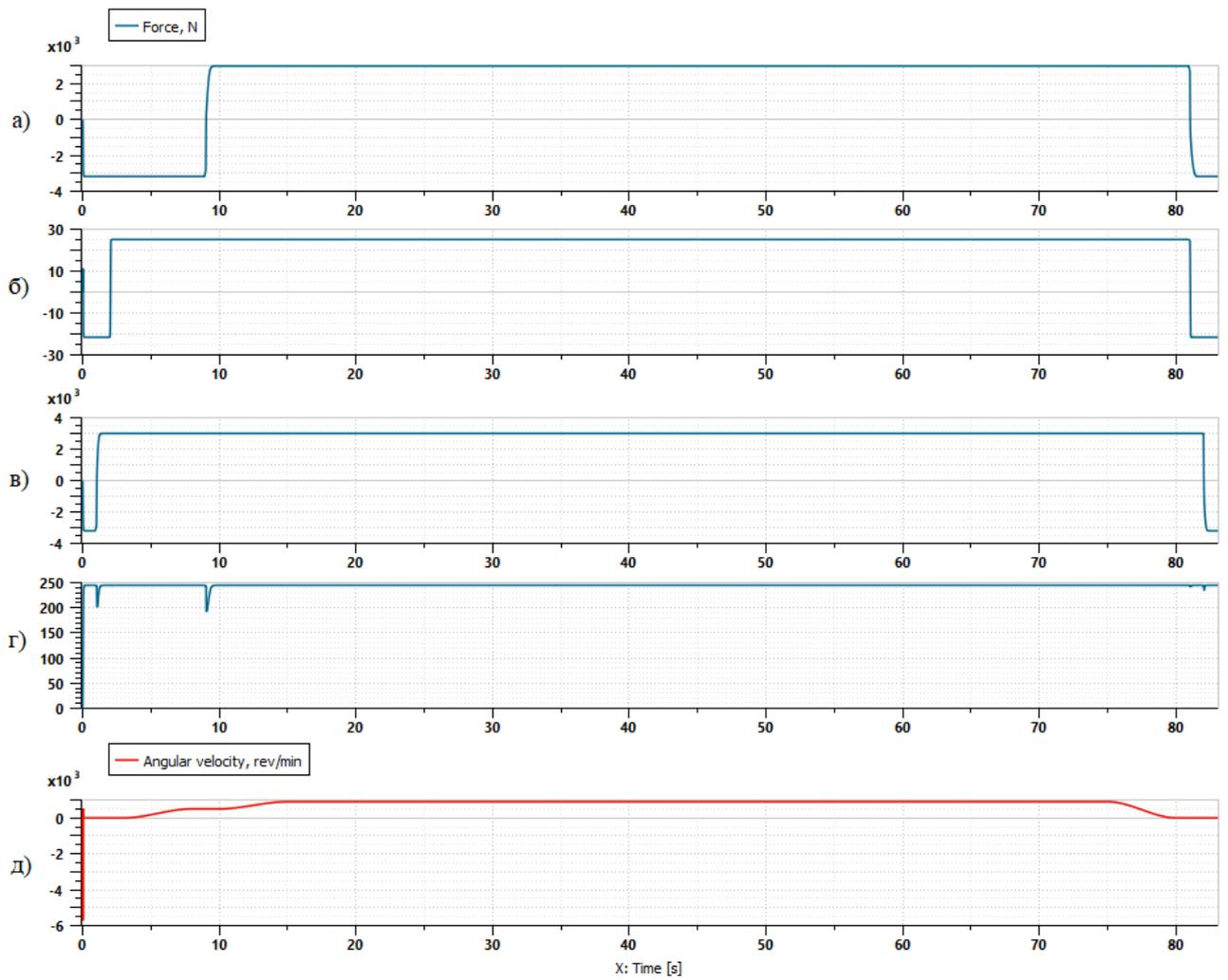


Рисунок 49. Цикл испытания маленького подшипника на частоте 900 об/мин

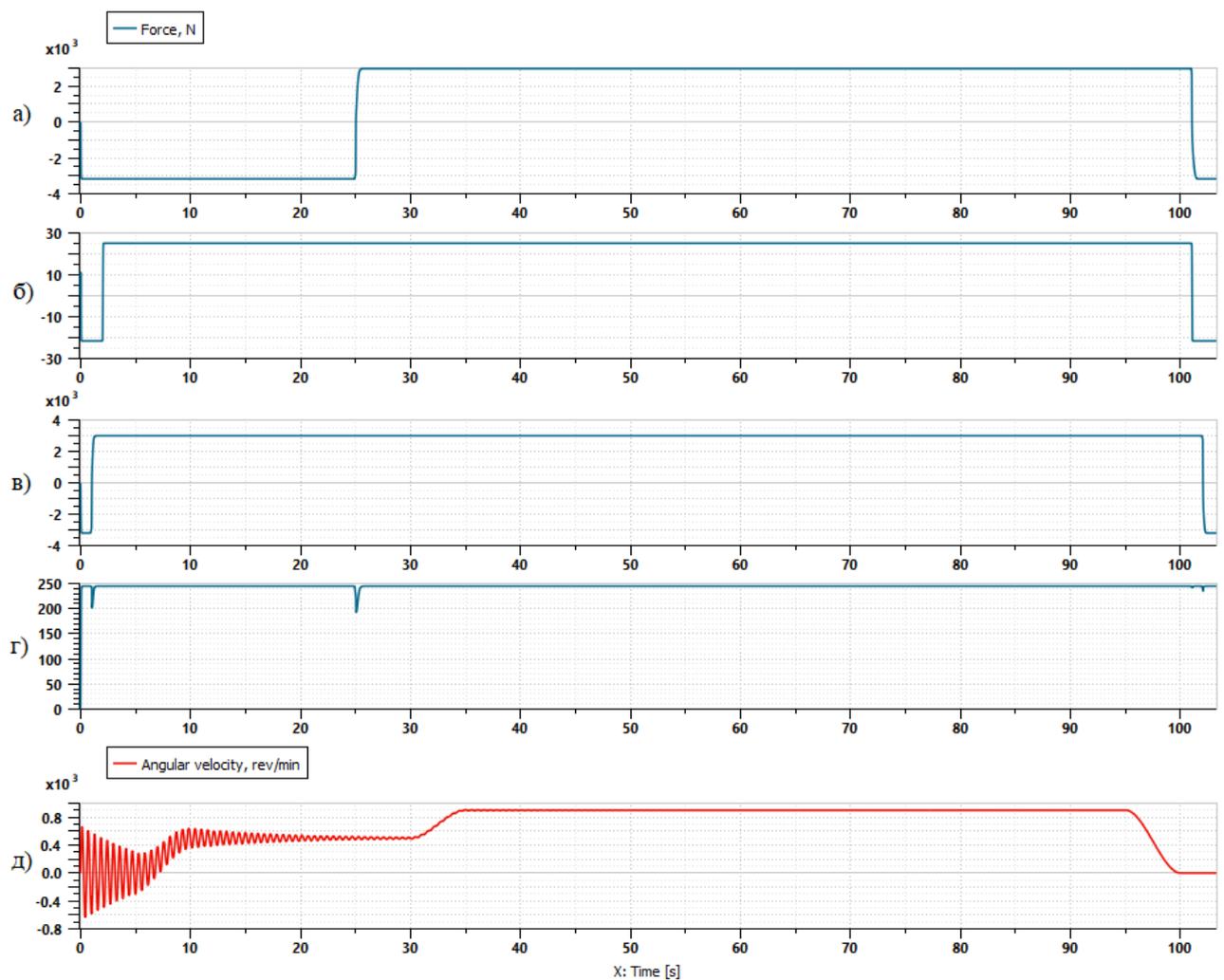


Рисунок 50. Цикл испытания большого подшипника на частоте 900 об/мин

Продолжительность циклов испытания самого маленького и самого большого подшипников на частоте 900 об/мин составляет 83 и 103 секунд соответственно (разница 19,4%). Сопоставление колебательных процессов при испытаниях больших и маленьких подшипников на частотах 900, 1800 и 3000 об/мин представлено на рисунке 51.

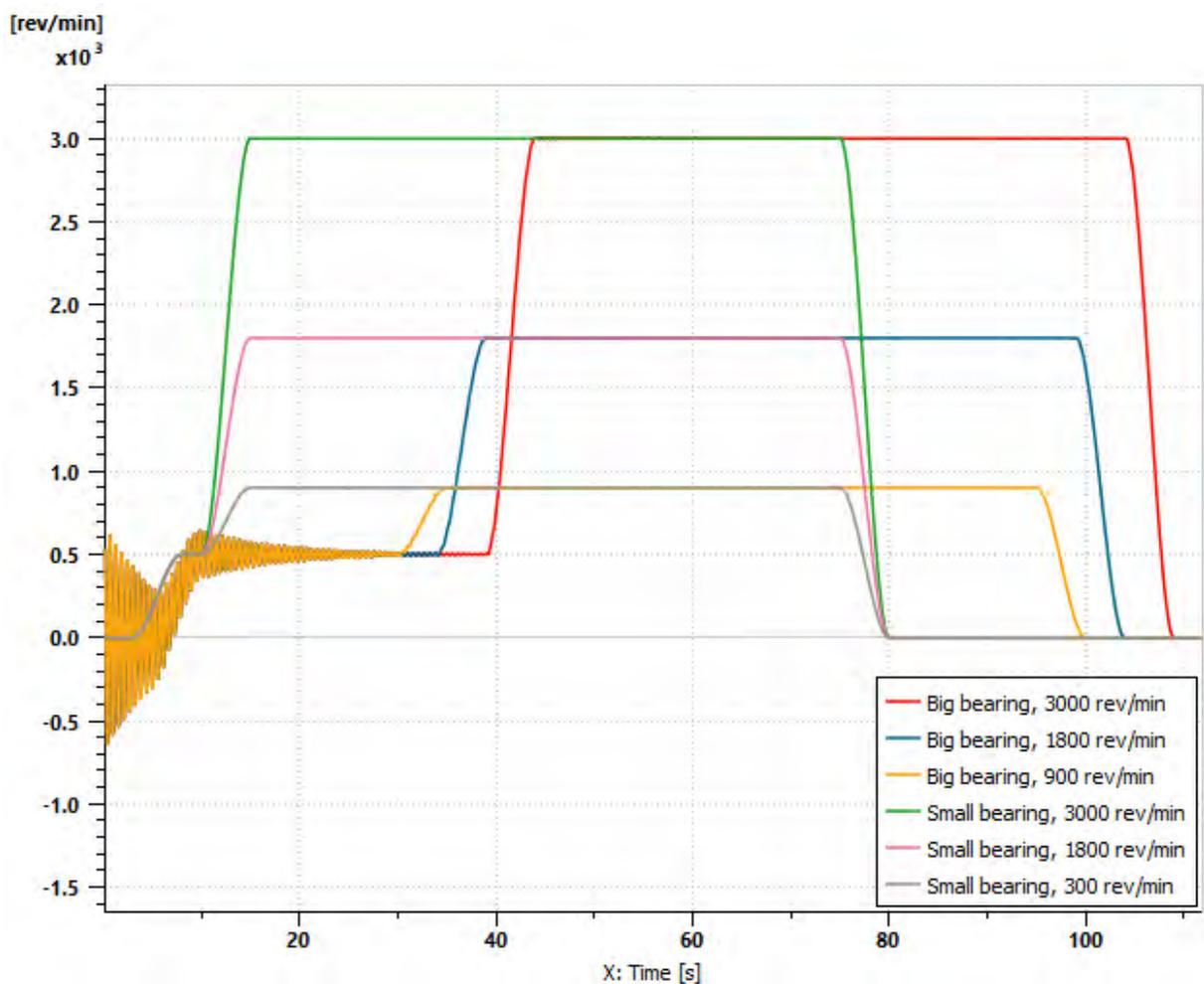


Рисунок 51. Колебательные процессы при вращении подшипников на разных частотах

Исходя из рисунка 51 видно, что продолжительность колебаний для маленьких подшипников мала и равна на всех трех частотах вращения. Для больших подшипников продолжительность колебаний увеличивается с увеличением частоты вращения, что приводит к увеличению длительности испытания.

3.3 Расчеты по разработанной модели стенда

3.3.1 Расчеты конструкции узлов на прочность

3.3.1.1 Анализ каркаса основания

Конструктивно каркас основания (рисунок 52) стенда выполнен из трубного сортового проката прямоугольного сечения, согласно КД. Материал – Ст 3 ГОСТ 380-2005. Соединение элементов каркаса основания выполнено посредством ручной дуговой сварки, швы – согласно конструкторской документации.

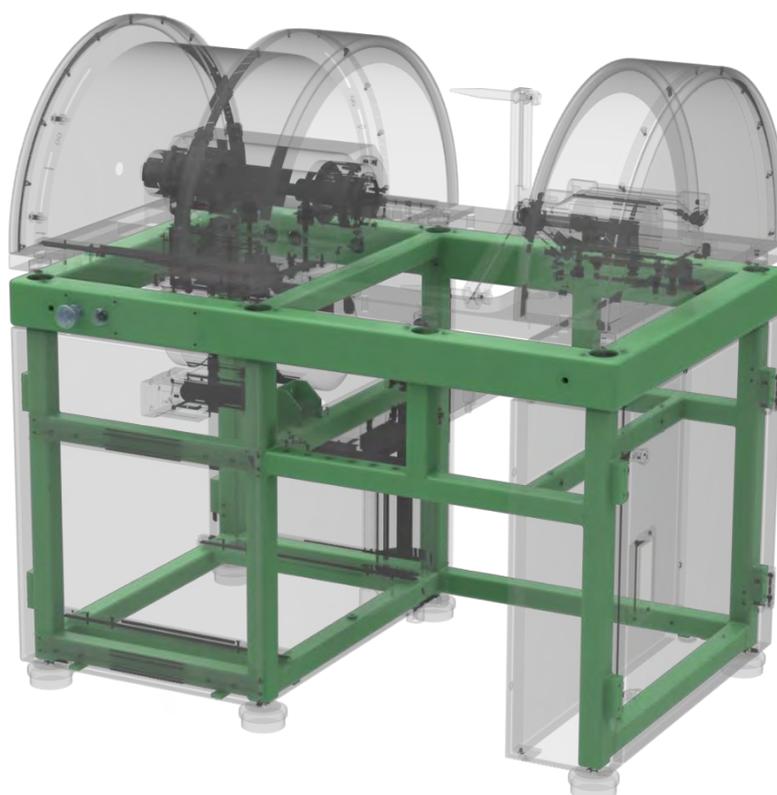


Рисунок 52. Место каркаса основания в общей компоновке стенда

В соответствии с техническим заданием, нагрузка на каркас основания представляет собой комбинацию разнонаправленных активных и реактивных сил. На рисунке 53 показано направление и области приложения активной силы от веса Модуля вращения с оснасткой и объектом контроля (подшипником), при испытаниях самого большого подшипника из заявленной номенклатуры, максимальная нагрузка составит 2440 Н (244 кг). Для упрощения расчетов примем равномерное распределение веса модуля по четырем точкам его крепления к каркасу

основания, следовательно, на каждое установочное отверстие будет приходиться по 610 Н. Нагрузку прикладываем вертикально к цилиндрическим поверхностям в отверстиях каркаса основания.

На рисунке 54 показана нагрузка от веса Модуля осевого нагружения. Масса модуля равна приблизительно 61 кг, нагрузку принимаем равной 610 Н, характер приложения нагрузки аналогичен описанному выше, из тех же соображений к цилиндрическим поверхностям в отверстиях каркаса основания прикладываем по 155 Н вертикально вниз.

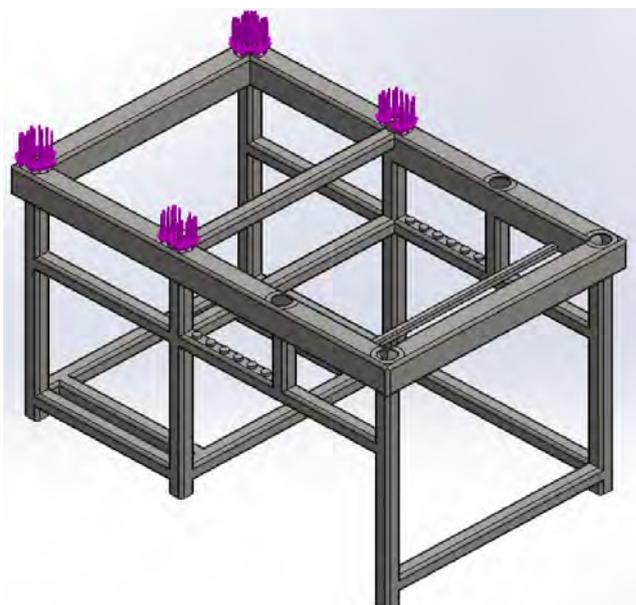


Рисунок 53. Нагрузка от веса Модуля вращения

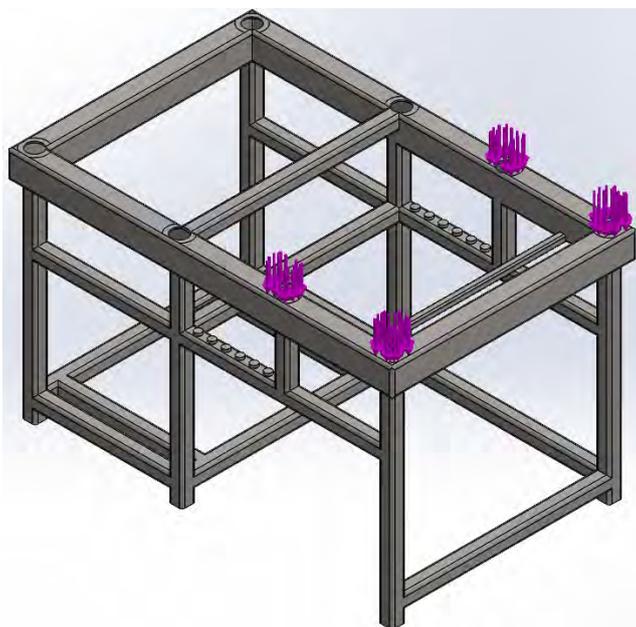


Рисунок 54. Нагрузка от веса Модуля осевого нагружения

Методика испытаний радиальных, упорных и радиально-упорных подшипников предполагает приложение осевой и радиальной нагрузок к объекту контроля. В стенде это реализуется за счет применения пневмоцилиндров, штоки которых через специальную оснастку воздействуют на вращающийся подшипник в радиальном, осевом или комбинированном направлении с усилием 3000 Н. Направления и области приложения нагрузок от пневмоцилиндров показаны на рисунках 55 и 56 (осевое и радиальное нагружение, соответственно).

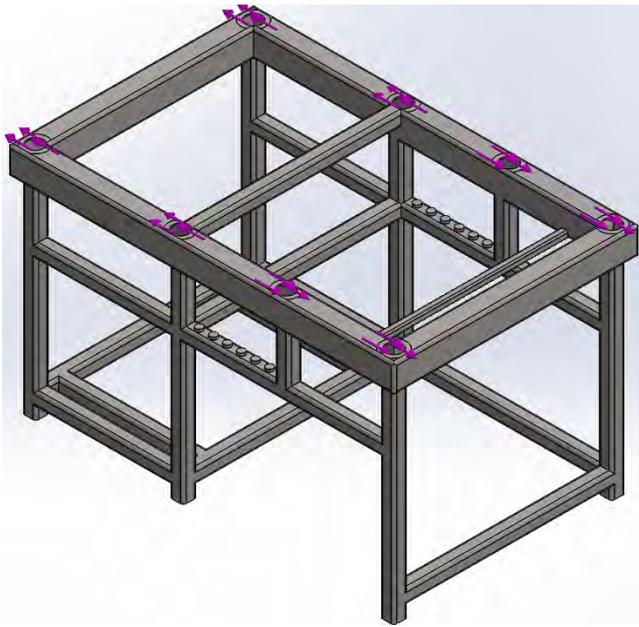


Рисунок 55. Осевая нагрузка
от пневмоцилиндра

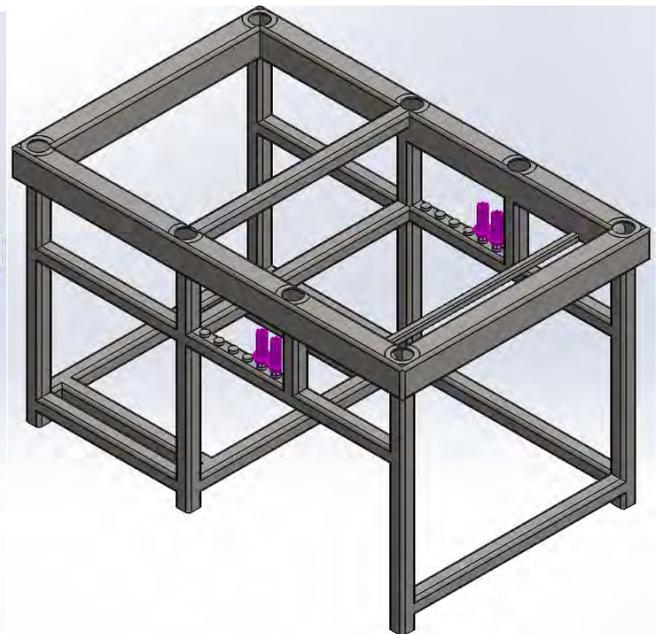


Рисунок 56. Радиальная нагрузка
от пневмоцилиндра

Стенд стоит на фундаменте, поэтому нижние торцевые поверхности ножек каркаса основания примем за неподвижные опоры, к которым приложим условие «Фиксированная геометрия» (рисунок 57).

Модель каркаса основания, разбитая на сетку конечных элементов показана на рисунке 58.

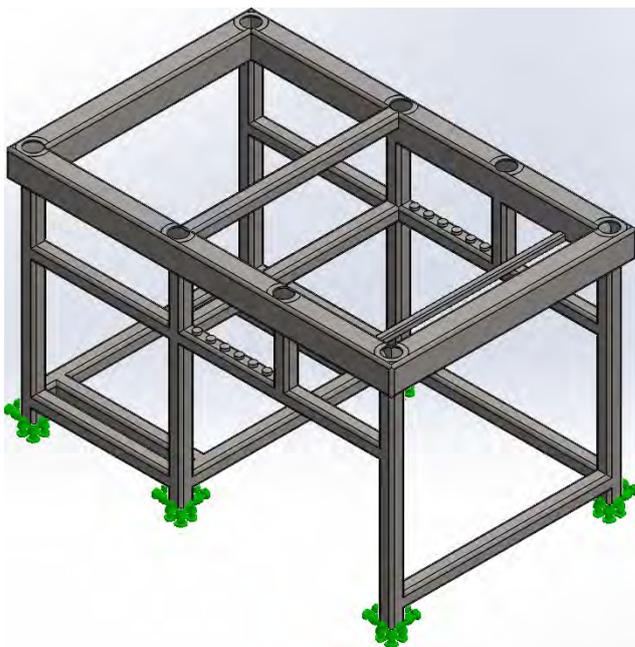


Рисунок 57. Реакции опор
каркаса основания

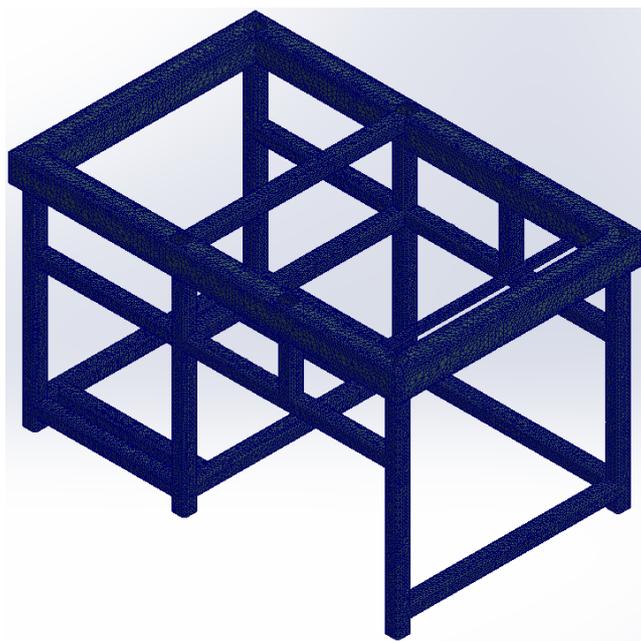


Рисунок 58. Расчетная модель
каркаса основания

Для упрощения расчетов не учитываются некоторые геометрические особенности модели, такие как, скругления и фаски размерами менее 2 мм, резьбовые канавки в установочных отверстиях, локальные искажения геометрии, возникающие при сварочных операциях, и т.п. Также, поскольку данный расчет не динамический, собственный вес каркаса основания не учитывается.

На приведенных ниже рисунках показаны результаты анализа, выполненного методом конечных элементов в программном обеспечении SolidWorks.

На рисунке 59 представлена эпюра эквивалентных напряжений по Мизесу. Для наглядности масштаб деформаций сильно увеличен. Реальные деформации имеют значительно меньшие величины и в масштабах изображений, размещаемых на листах формата А4 будут незаметны.

Цветовая кодировка, принятая в эпюре: синим цветом окрашены области с минимальным значением интенсивности напряжений по Мизесу, области с красным цветом – области с максимальным значением интенсивности напряжений.

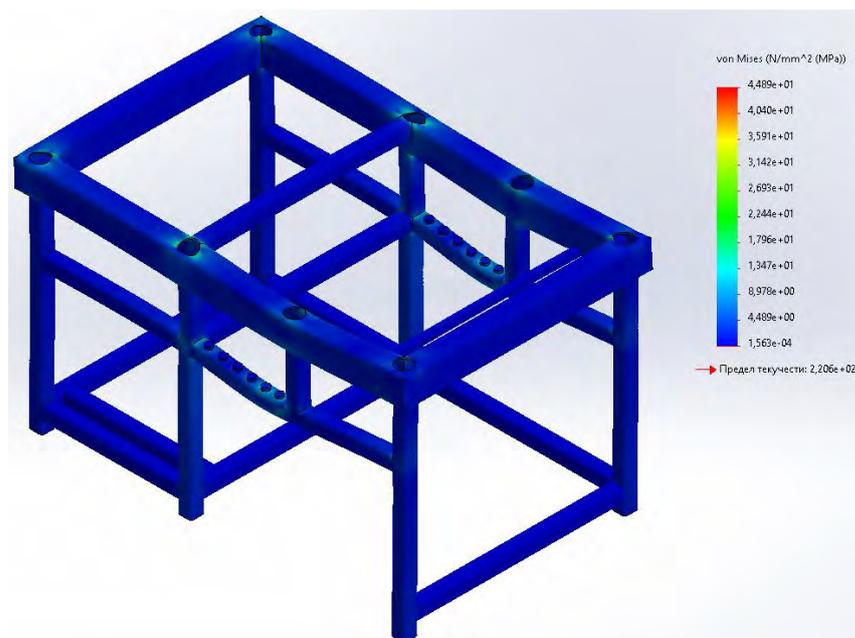


Рисунок 59. Эпюра эквивалентных напряжений по Мизесу
в каркасе основания

Анализ эпюр показывает, что максимальные значения напряжений по Мизесу не превышают величины равной 132 МПа, что ниже значения предела текучести для выбранного материала (220 МПа).

На следующих рисунках представлены эпюры результирующего перемещения элементов каркаса основания URES (рисунок 60) и эквивалентной деформации ESTRN (рисунок 61).

Из представленных рисунков видно, максимальные перемещения в каркасе основания составляют 0,036 мм.

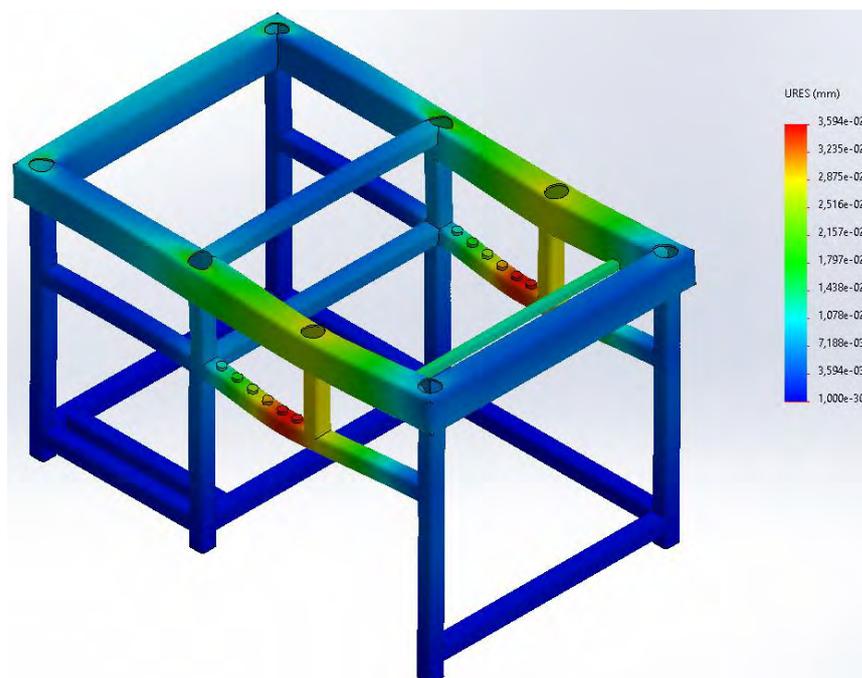


Рисунок 60. Результирующие перемещения элементов конструкции каркаса основания

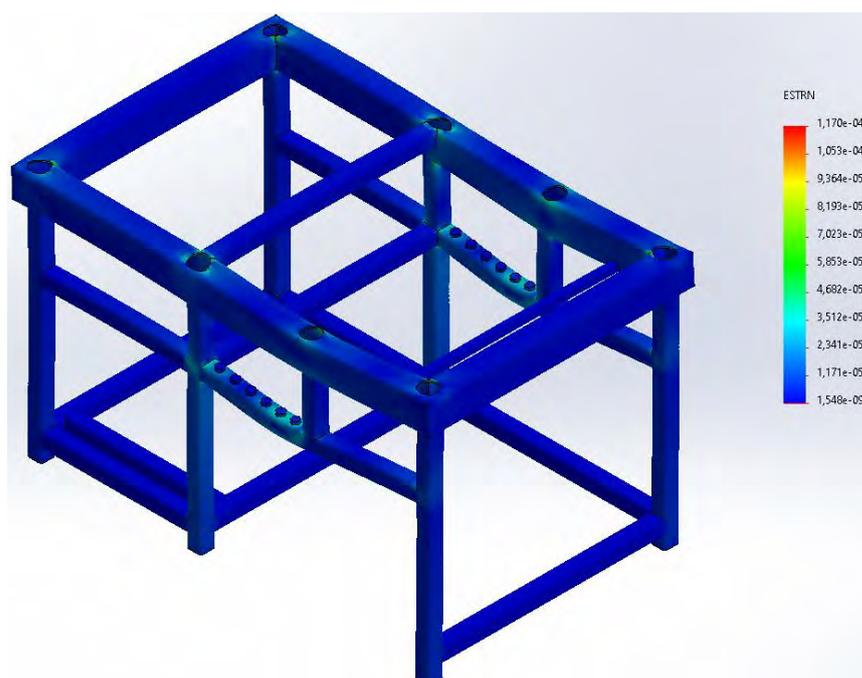


Рисунок 61. Эквивалентная деформация элементов конструкции каркаса основания

На рисунке 62 представлены результаты расчетов на определение коэффициента запаса прочности (FOS – factor of safety) модернизированного каркаса основания.

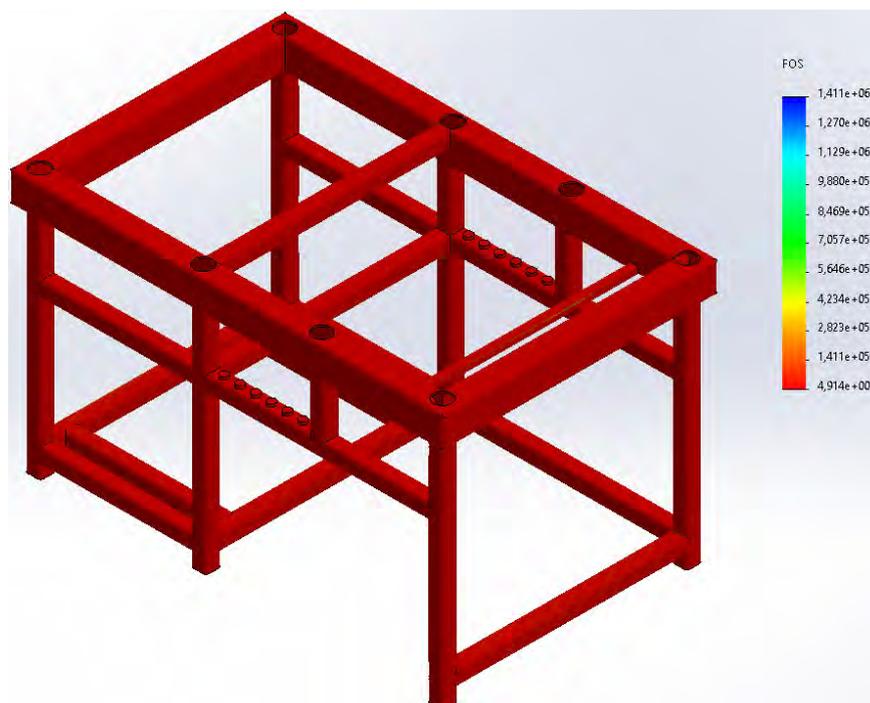


Рисунок 62. Эпюра коэффициента запаса прочности каркаса основания

Анализ запаса прочности на расчетной модели показывает, что минимум запаса прочности в проектируемой раме равен 4,91. Отсюда можно сделать вывод о работоспособности исследуемой конструкции рамы. Принятые в проекте размеры стандартных прокатных профилей способны выдерживать возникающие в процессе эксплуатации нагрузки.

3.3.1.2 Анализ модуля вращения внутреннего кольца подшипника

Подшипниковый узел (рисунок 63) является одним из базовых узлов конструкции модуля вращения внутреннего кольца подшипника, который предназначен для опоры шпинделя с испытываемым подшипником. Модуль представляет собой шпиндель, подвижно (1 степень свободы - вращение) установленный в паре гидростатических подшипниковых опор с оснасткой, размещенный на основании. Вращение шпиндель получает от асинхронного электродвигателя. На рабочем конце шпинделя установлена сменная оснастка для крепления испытываемых подшипников различной номенклатуры. В общей компоновке модуль размещается сверху на раме и закрывается защитным кожухом. Настоящий отчет посвящен расчету модуля вращения внутреннего кольца подшипника на способность воспринимать без потери работоспособности нагрузки, возникающие при

работе – вращение шпинделя с заданной скоростью и комбинированное (осевое и радиальное) нагружение объекта контроля.

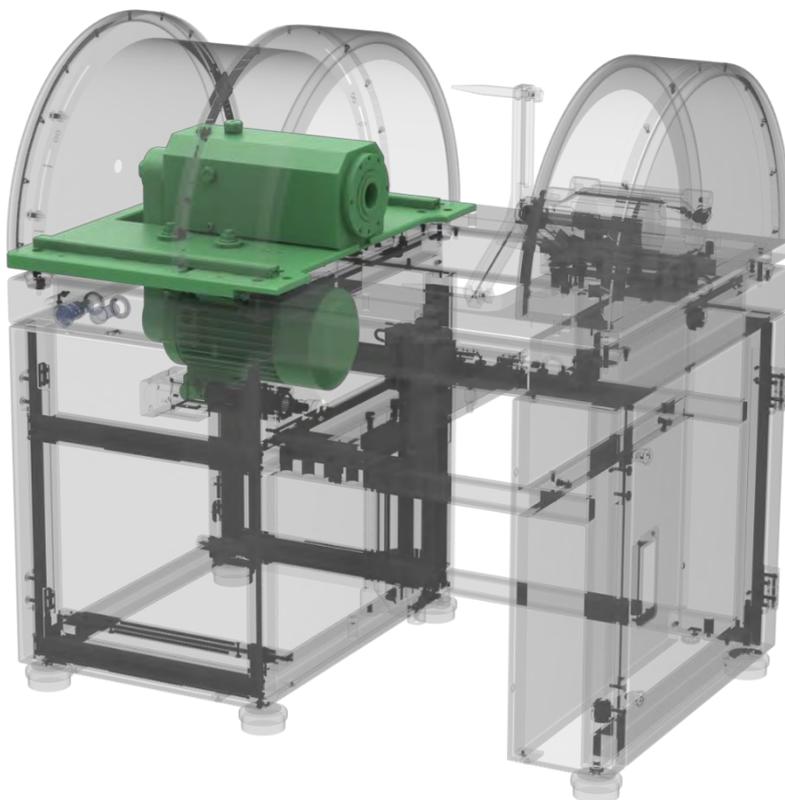


Рисунок 63. Место модуля вращения в общей компоновке стенда

Конструктивно модуль выполнен из металлических материалов, согласно конструкторской документации. Основной материал – сталь 3 ГОСТ 380-2005. Материал шпинделя – сталь 40Х ГОСТ 4543-2016. Материал фланцев гидростатических подшипников – бронза БрОФ 6,5-0,4 по ГОСТ 5017-74.

В соответствии с техническим заданием, нагрузка на узел представляет собой комбинированный характер – имеется несколько критически важных силовых факторов, таких как вращение шпинделя с заданной скоростью, комбинированная осевая и радиальная нагрузки на объект контроля – испытываемый подшипник со стороны гидроцилиндров соответствующих модулей осевого и радиального нагружения. Развиваемые поршнями цилиндров усилия равны 3000 Н каждое. Направление нагрузки от Модуля осевого нагружения – параллельно оси симметрии шпинделя, т.е. горизонтально в сторону шпинделя, от Модуля ради-

ального нагружения – перпендикулярно оси симметрии шпинделя, т.е. вертикально вверх. Нагрузка приложена к рабочему концу шпинделя, на который монтируется оснастка для испытываемых подшипников. Кроме того, к противоположному концу шпинделя приложена нагрузка от натяжения ремня плоскоремной передачи. Данная нагрузка задана равной 490 Н и направлена вертикально вверх перпендикулярно оси симметрии шпинделя. В конструкции узла предусмотрен тепловой зазор, необходимый для компенсации удлинения шпинделя при его длительной эксплуатации. С целью упрощения статических и тепловой расчеты приводится по отдельности. Также, не учитываются некоторые геометрические особенности модели модуля, такие как, скругления и фаски размерами менее 2 мм, резьбовые канавки в установочных отверстиях, локальные искажения геометрии и т.п.

3.3.1.2.1 Статический расчет элементов подшипникового узла на прочность

Модель подшипникового узла после необходимых упрощений представлена на рисунке 64. Задана нагрузка от модулей радиального и осевого нагружения (рисунок 65), приложено условие «Фиксированная геометрия» (рисунок 66).

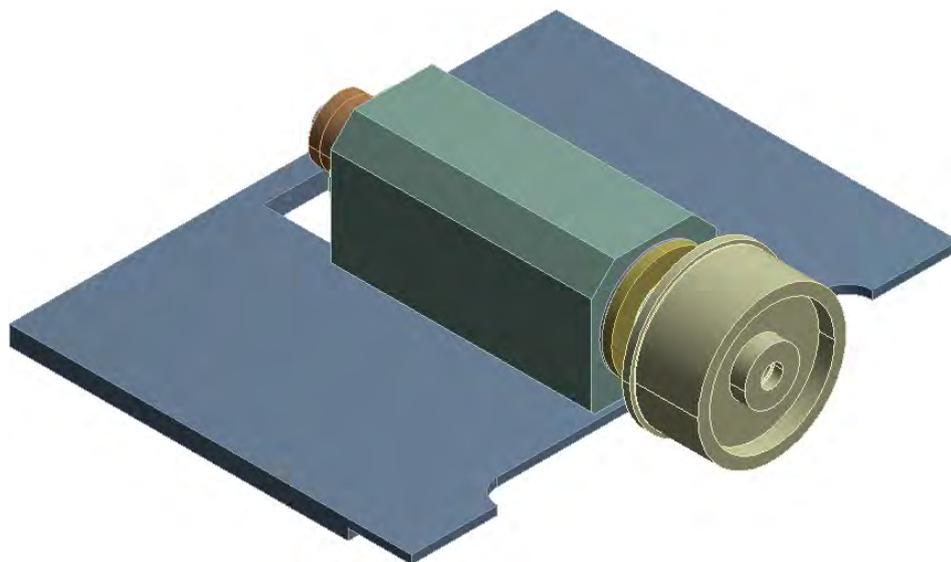


Рисунок 64. Модель модуля вращения после упрощения

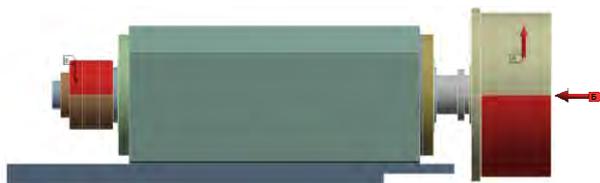


Рисунок 65. Нагрузка от модулей радиального и осевого нагружения

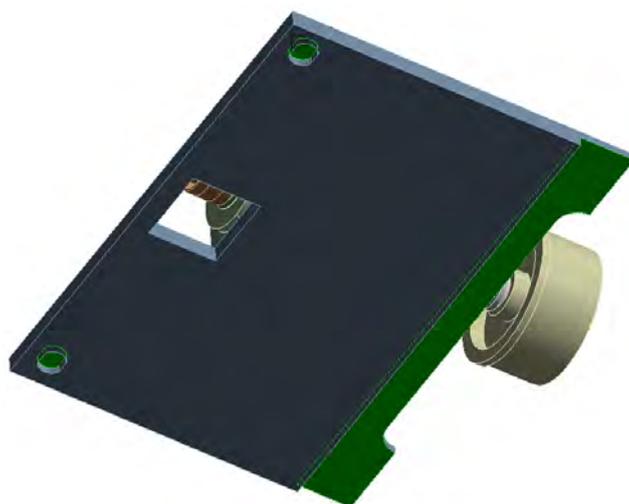


Рисунок 66. Реакции опор модуля вращения

На рисунках 67, 68 представлена модель подшипникового узла с сеткой конечных элементов.

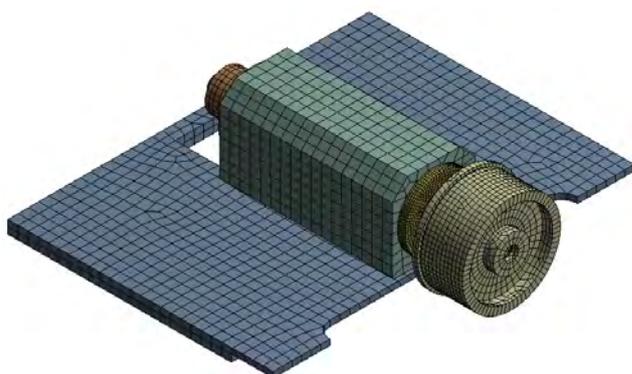


Рисунок 67. Расчетная модель модуля вращения целиком



Рисунок 68. Расчетная модель шпинделя с опорами

На приведенных ниже иллюстрациях показаны результаты анализа, выполненного методом конечных элементов в специальном программном обеспечении ANSYS.

На рисунке 69 представлена эпюра интенсивности напряжений по Мизесу. Модель подшипникового узла изображена в деформированном состоянии. Для наглядности масштаб деформаций сильно увеличен. Реальные деформации имеют значительно меньшие величины и в масштабах изображений, размещаемых на листах формата А4 будут незаметны.

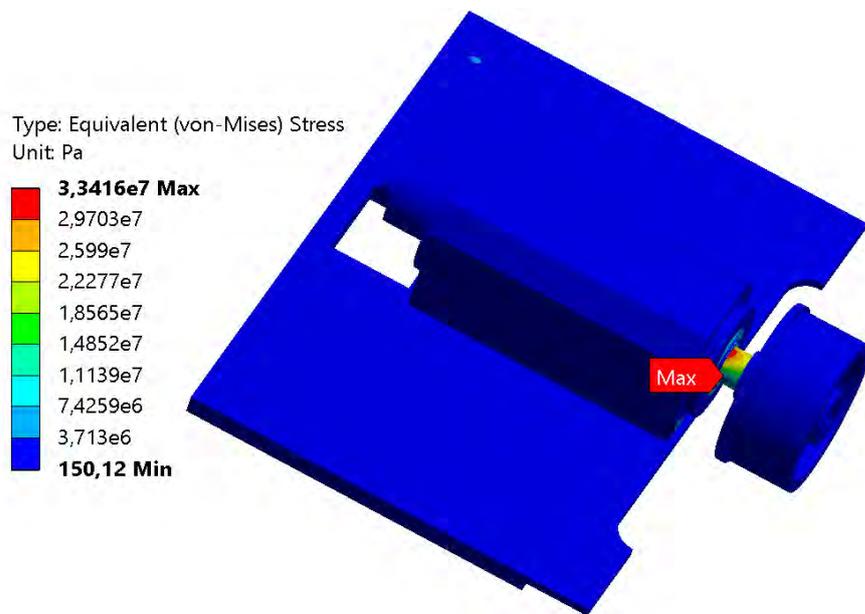


Рисунок 69. Эпюра интенсивности напряжений по Мизесу
в подшипниковом узле

Цветовая кодировка, принятая в эпюре: синим цветом окрашены области с минимальным значением интенсивности напряжений по Мизесу, области с красным цветом – области с максимальным значением интенсивности напряжений.

На рисунке 70 показана эпюра напряжений по Мизесу в шпинделе.

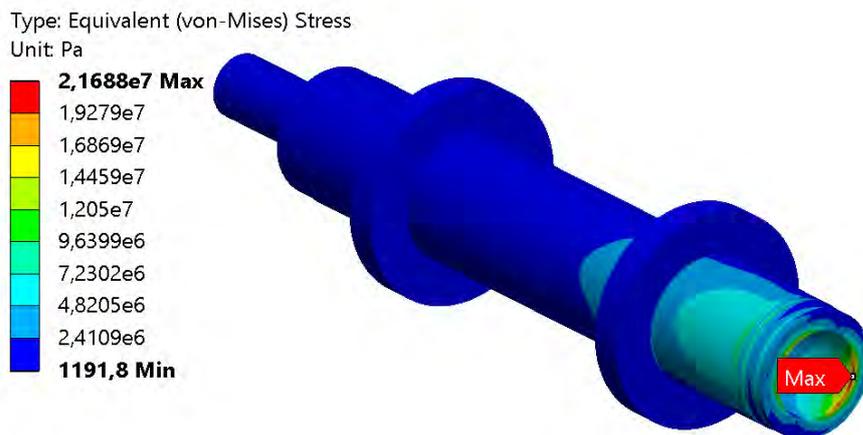


Рисунок 70. Эпюра интенсивности напряжений по Мизесу в шпинделе

На рисунке 71 показана эпюра интенсивности напряжений по Мизесу в оправке.

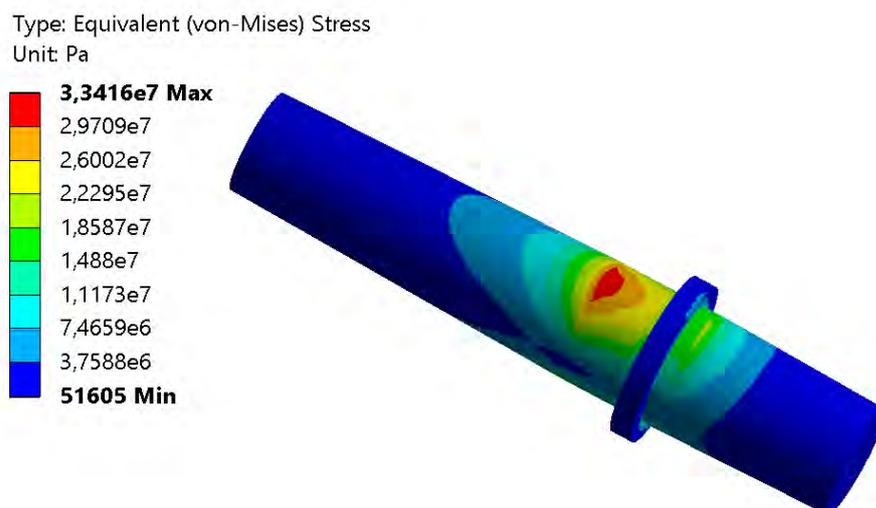


Рисунок 71. Эпюра интенсивности напряжений по Мизесу в оправке

На рисунке 72 показана эпюра интенсивности напряжений по Мизесу во фланце наиболее нагруженного подшипника скольжения.

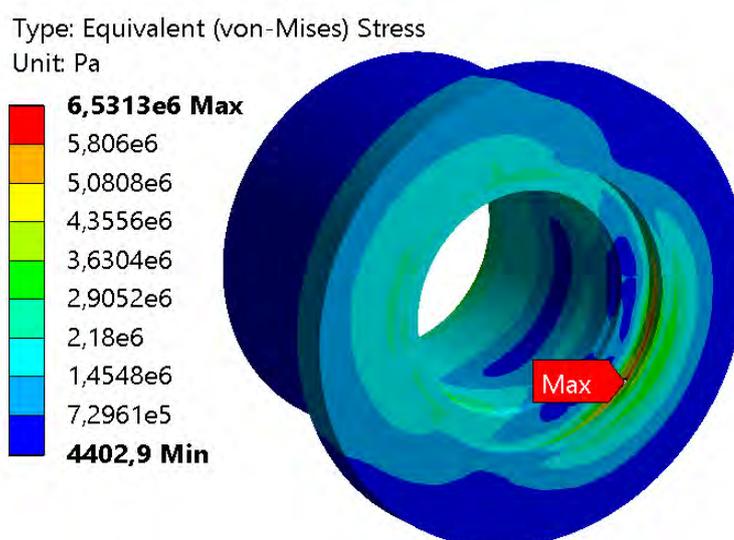


Рисунок 72. Эпюра интенсивности напряжений по Мизесу в оправке

Анализ эпюр напряжений, представленных на рисунках 58-60 показывает, что максимальные значения напряжений не превышают величины равной 34 МПа, что существенно ниже значения предела текучести для любого из выбранных материалов. Напряжения в бронзовых фланцах подшипниках также малы по сравнению с предельными для этого материала.

На рисунках 73 и 74 представлены эпюры результирующего перемещения URES и эквивалентной деформации ESTRN соответственно.

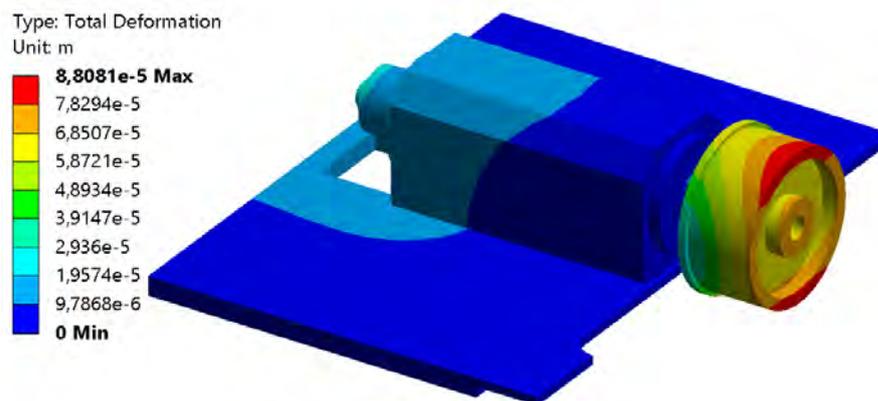


Рисунок 73. Эпюра результирующих перемещений в Модуле вращения

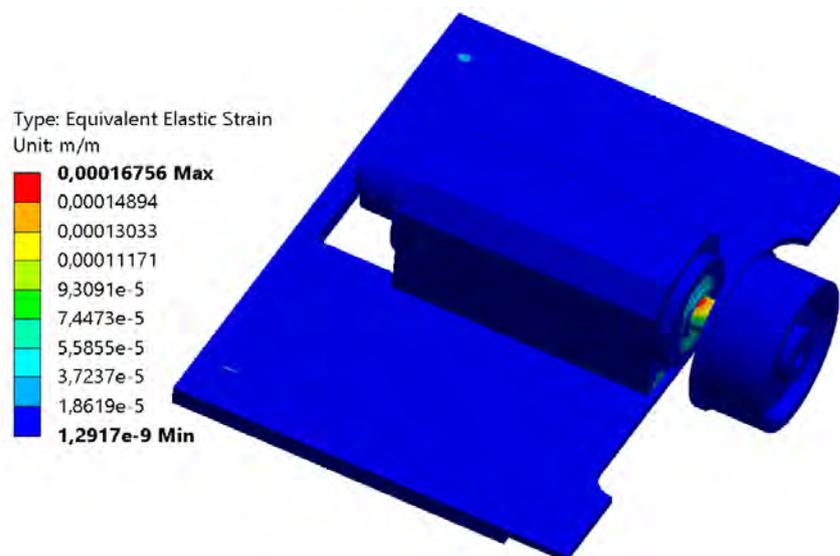


Рисунок 74. Эпюра эквивалентных деформаций в Модуле вращения

Далее представлены результаты расчета на определение коэффициента запаса прочности с учетом цикличности нагрузок (базовое число циклов 10^6) для подшипникового узла целиком (рисунок 75) и наиболее нагруженной детали – оправки (рисунок 76).

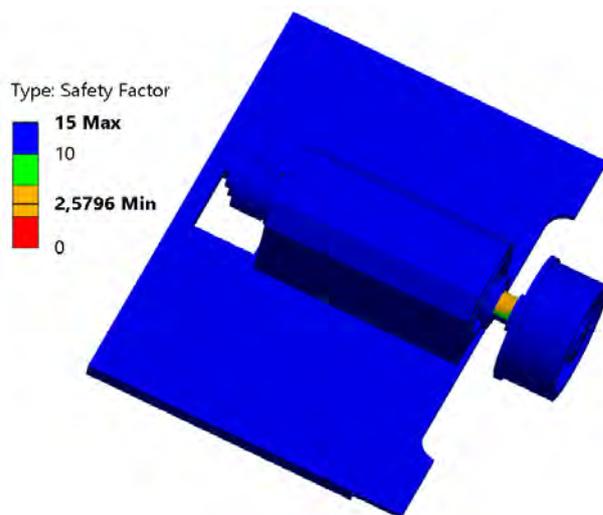


Рисунок 75. Эпюра коэффициента запаса усталостной прочности подшипникового узла

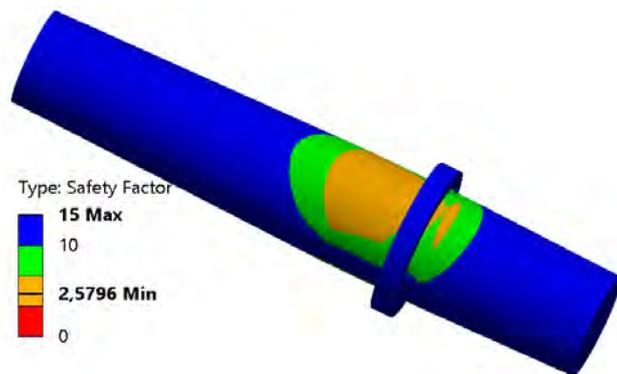


Рисунок 76. Эпюра коэффициента запаса усталостной прочности оправки

Цветовая кодировка: Синим цветом окрашены области с минимальным значением коэффициента запаса прочности, области с красным цветом — области с максимальным значением коэффициента запаса прочности. Анализ запаса усталостной прочности на расчетной модели показывает, что минимум запаса усталостной прочности по модели равен 2,5 для оправки. На рисунке 77 показана эпюра запаса усталостной прочности для шпинделя.

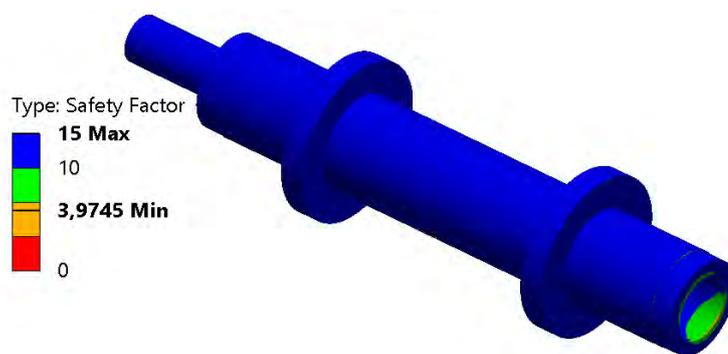


Рисунок 77. Эпюра коэффициента запаса усталостной прочности шпинделя

Коэффициент запаса усталостной прочности не менее 3,9. Таким образом, конструкция подшипникового узла отвечает требованиям условия прочности.

3.3.1.2.2 Тепловой расчет шпинделя подшипникового узла

Цель расчета – определение возможности заклинивания шпинделя в гидростатических опорах вследствие температурных деформаций, возникающих при его длительной эксплуатации.

На рисунке 78 представлена модель после необходимых упрощений. Расчетная модель шпинделя с приложенными нагрузками – тепловая нагрузка (температура 120°C) (рисунок 79) и реакции опор (рисунок 80). Условия закрепления заданы поверхностям фланцев подшипников скольжения. Расчет производился для системы в установившемся состоянии.

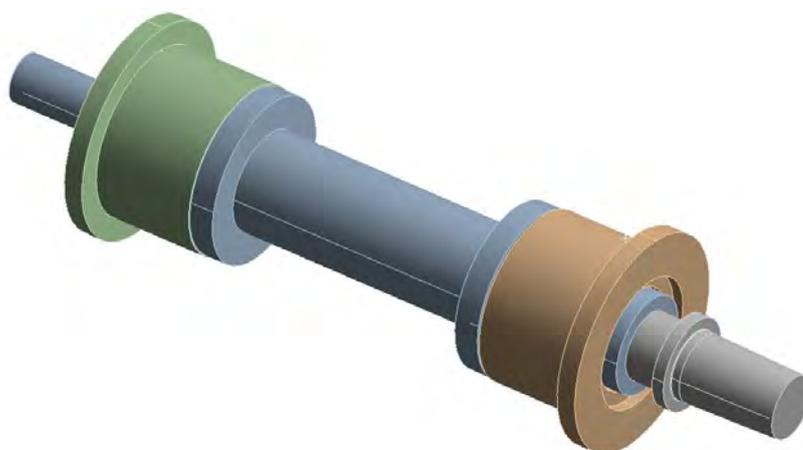


Рисунок 78. Модель шпинделя после упрощения

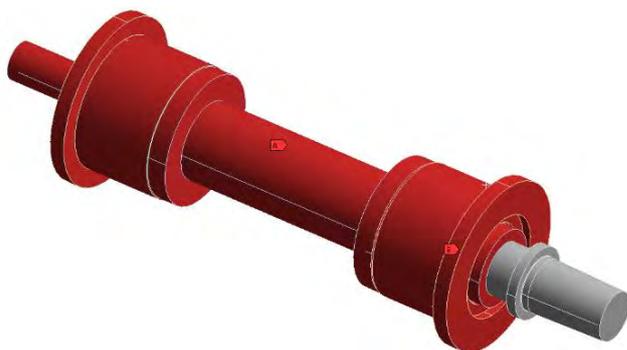


Рисунок 79. Тепловая нагрузка на шпиндель

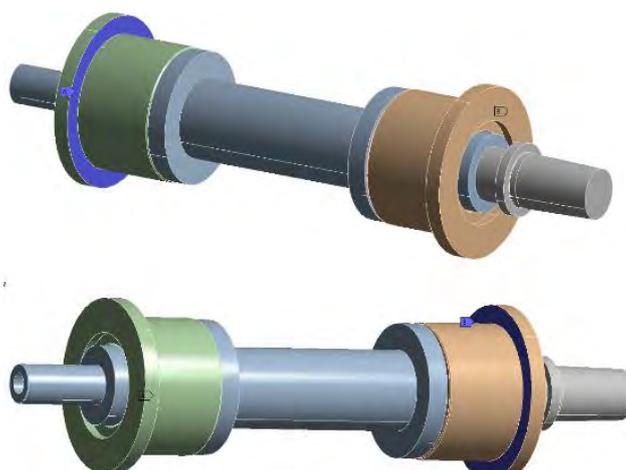


Рисунок 80. Реакции опор шпинделя

Моделировалось следующее положение шпинделя относительно фланцев подшипников скольжения. Фланец, расположенный ближе к ременной передаче вплотную прижат к буртику. Между фланцем со стороны оправки и буртиком имеется зазор. Рассмотрен ряд расчетных случаев для каждой величины зазора.

Базовый расчет – зазор задан 0,1 мм. Кроме того, геометрическая модель скорректирована так, чтобы для фланца со стороны оправки был зазор 0,04 мм. Для второго фланца этот зазор не моделировался по соображениям обеспечения геометрической неизменяемости конечно-элементной модели. На приведенных ниже иллюстрациях показаны результаты термического анализа, выполненного методом конечных элементов в специальном программном обеспечении ANSYS.

Вследствие нагрева шпиндель удлиняется и это может привести к его заклиниванию в опорах если будет выбран весь тепловой зазор между буртиком опоры и корпусом узла. На рисунке 81 представлена эпюра перемещений элементов узла вдоль оси шпинделя без учета взаимодействия с фланцами.

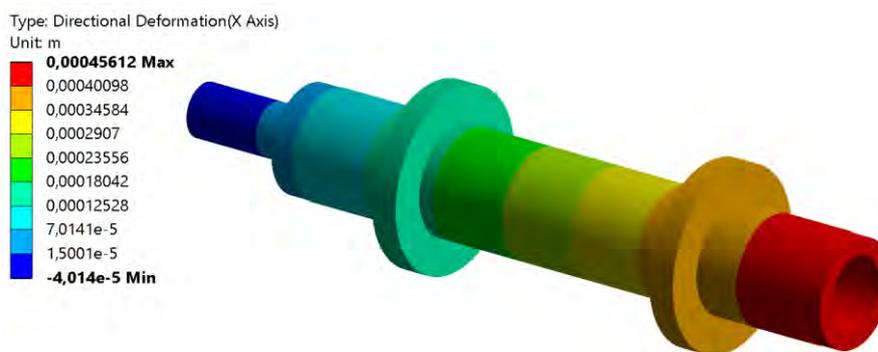


Рисунок 81. Эпюра перемещений вдоль оси шпинделя

Цветовая кодировка, принятая в эпюре: синим цветом окрашены области с минимальным значением рассматриваемого критерия, области с красным цветом – области с максимальным значением.

Наибольший интерес представляет собой перемещение буртика со стороны оправки. На рисунке 82 показаны перемещения плоскости этого буртика, обращенной к подшипниковому фланцу.

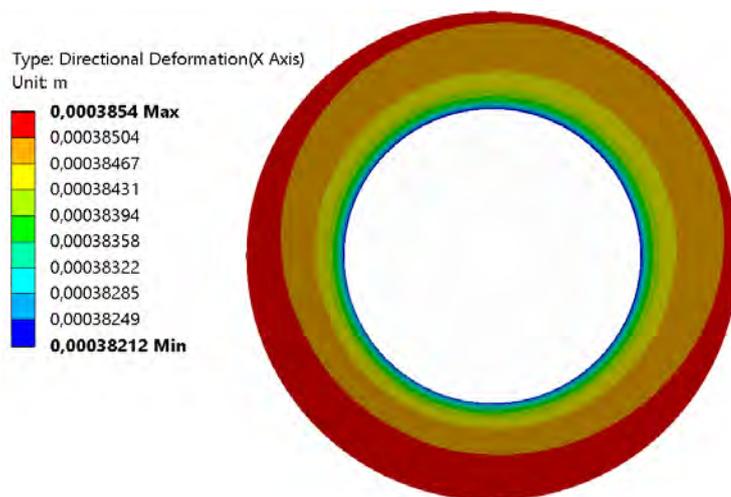


Рисунок 82. Эпюра перемещений плоскости буртика

На рисунке 83 показаны перемещения соответствующей плоскости подшипникового фланца.

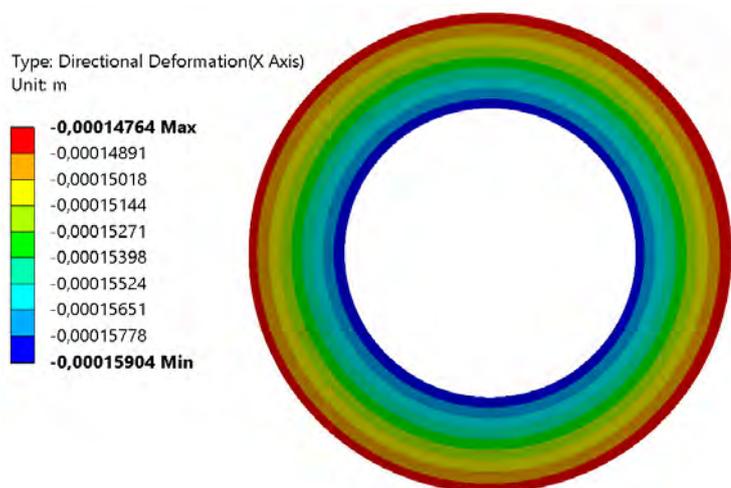


Рисунок 83. Эпюра перемещений плоскости фланца подшипника

Из анализа результатов видно, что максимальное суммарное уменьшение зазора составляет около 0,55 мм. Необходимый зазор, обеспечивающий необходимый запас температурного расширения деталей (без учета погрешностей монтажа, изготовления и др.) составляет не менее 0,6 мм.

На рисунке 84 показаны перемещения плоскостей буртика и фланца для модели, у которой зазор задан 0,1 мм в соответствии с планируемым значением.

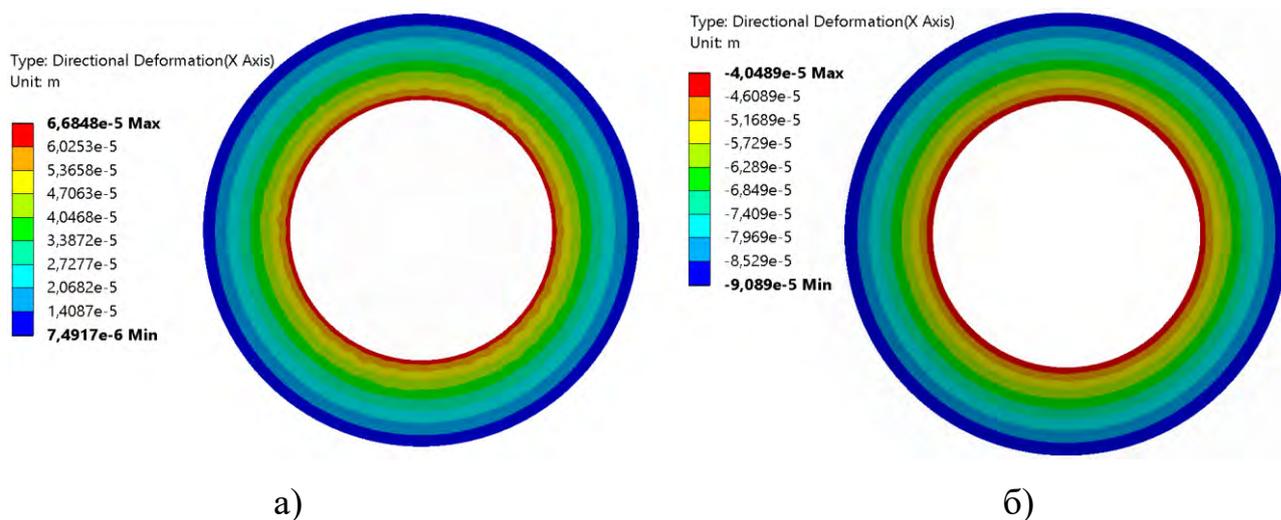


Рисунок 84. Эпюры перемещений плоскости при зазоре 0,1 мм:

а - буртика, б - фланца подшипника

Как видно из рисунка 84 зазор в 0,1 мм полностью перекрывается температурными деформациями шпинделя и фланца. На рисунке 85 показано распределение давления по контактным поверхностям буртика и фланца для зазора 0,1 мм и 0,6 мм.

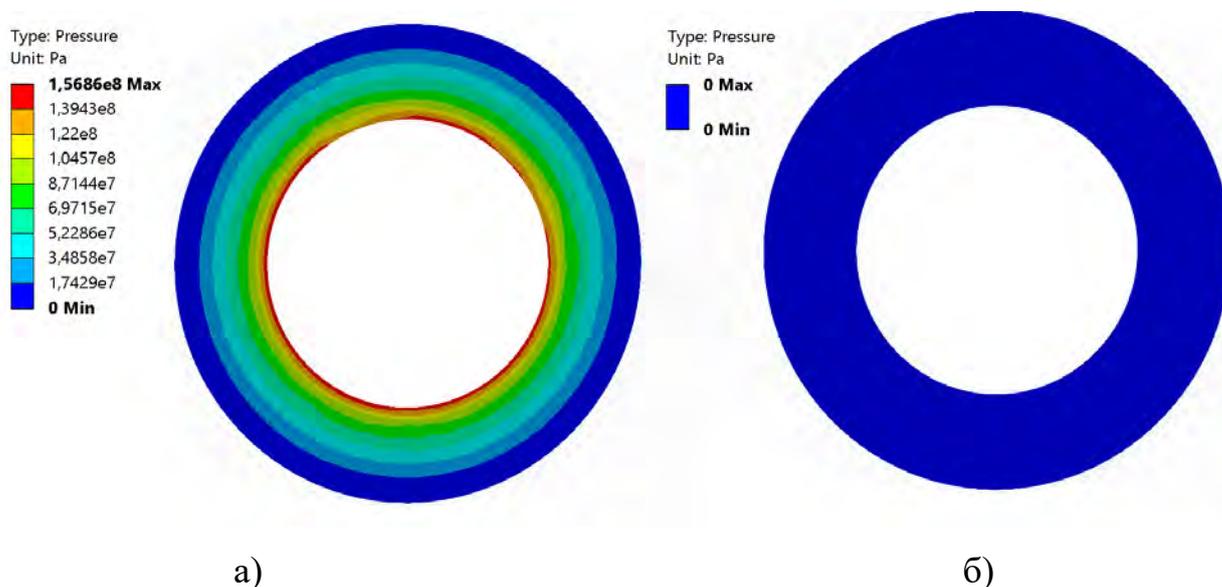


Рисунок 85. Давление в контактной паре буртика и фланца при зазоре:

а – равным 0,1 мм, б – равным 0,6 мм.

Таким образом, рекомендованный температурный зазор между буртиком и фланцем подшипника составляет не менее 0,6 мм.

Для оценки достаточности теплового зазора в радиальном направлении подготовлена модель, показанная на рисунке 86. Путем корректировки геометрических размеров исходной модели обеспечен радиальный зазор между шпинделем и фланцем, равный 0,04 мм. Для этого уменьшен внешний диаметр шпинделя на 0,02 мм, и на ту же величину увеличен внутренний диаметр фланца.

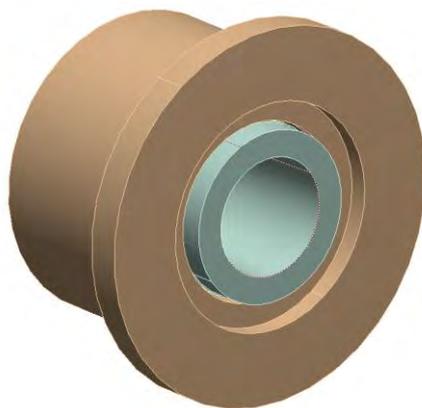


Рисунок 86. Модель для оценки достаточности радиального зазора

На рисунке 87 и 88 представлена модель шпинделя с приложенной тепловой нагрузкой и закрепление шпинделя соответственно. На рисунке 89 показана конечно-элементная сетка.

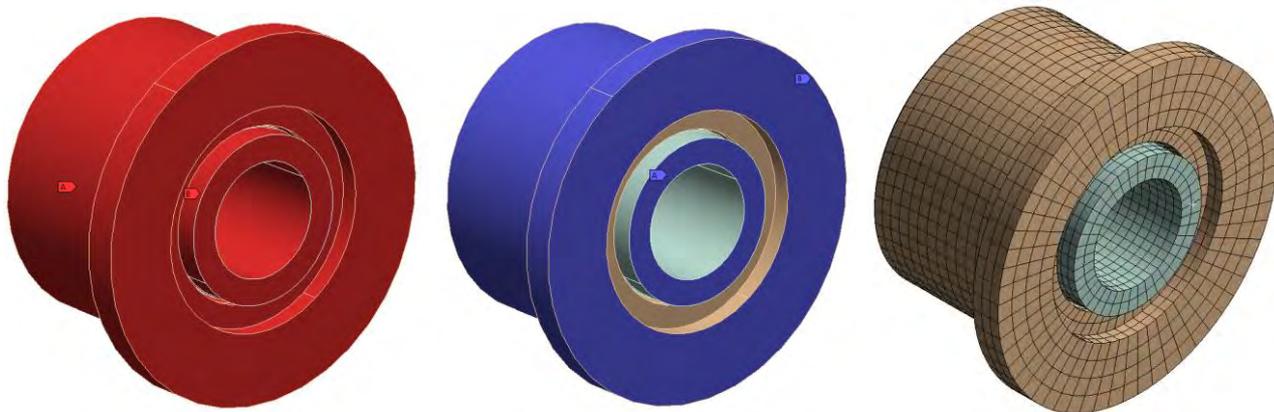


Рисунок 87. Тепловая

нагрузка на фланец
шпинделя

Рисунок 88. Закрепление
фланца шпинделя

Рисунок 89. Расчетная
модель фланца шпинделя

Далее показаны радиальные перемещения контактных поверхностей – внутренней поверхности фланца (рисунок 90) и внешней поверхности шпинделя (рисунок 91).

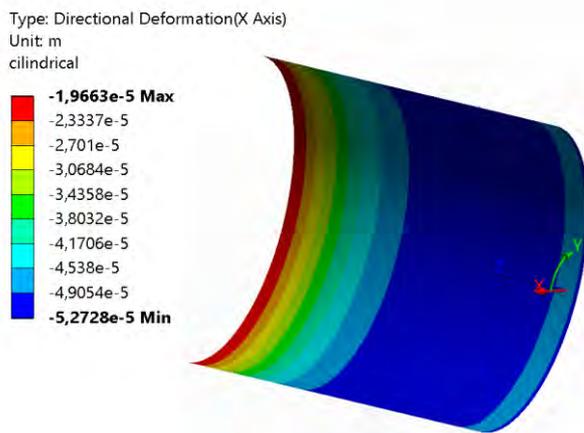


Рисунок 90. Радиальные перемещения контактной поверхности фланца

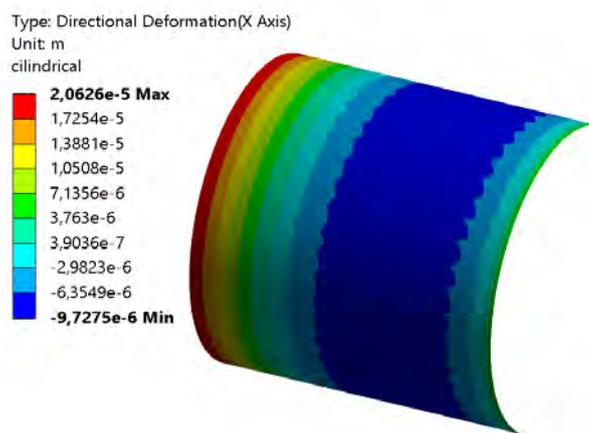


Рисунок 91. Радиальные перемещения контактных поверхности шпинделя

Как видно из рисунков выше, радиальный зазор при максимальных температурных нагрузках перекрывается полностью, и вызывает натяг посадки.

3.3.1.3 Анализ модуля осевого нагружения

Модуль осевого нагружения (рисунок 92) является одним из базовых модулей конструкции, который предназначен для создания осевой нагрузки на испытываемый подшипник. Модуль представляет собой пневмоцилиндр с оснасткой, размещенный на его основании. В общей компоновке модуль размещается сверху на основании и закрывается защитным кожухом. Настоящий отчет посвящен расчету модуля на способность воспринимать без потери работоспособности статические нагрузки, возникающие при взаимодействии поршня пневмоцилиндра с испытываемым подшипником.

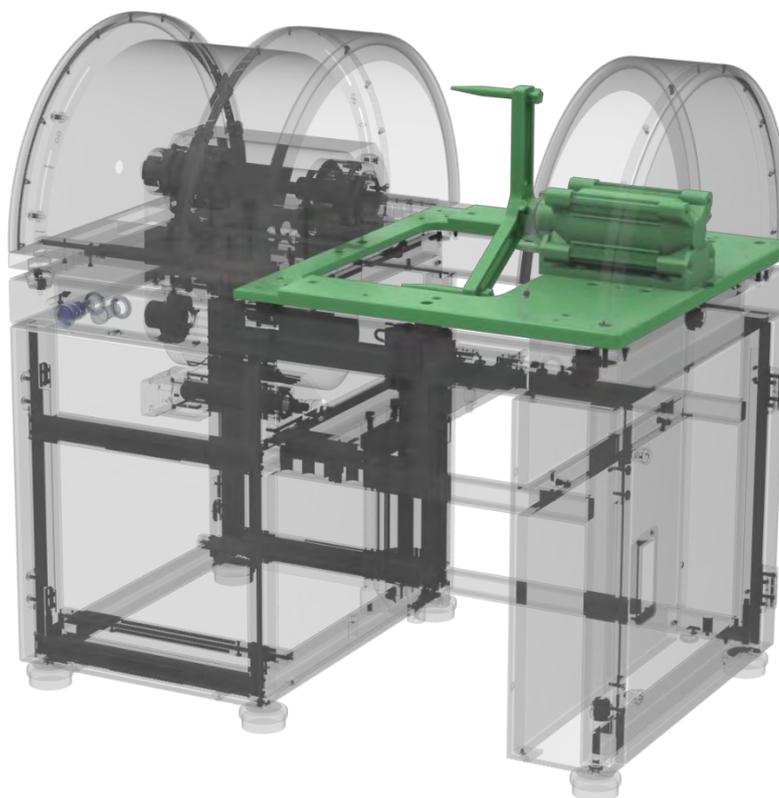


Рисунок 92. Место модуля осевого нагружения в компоновке стенда

Конструктивно узел выполнен из металлических материалов, согласно конструкторской документации. Основным материалом – Ст 3 ГОСТ 380-2005. Соединение элементов модуля выполнено посредством резьбовых или фасонных соединений согласно конструкторской документации.

В соответствии с техническим заданием, нагрузка на модуль возникает при воздействии установленной на поршень пневмоцилиндра специальной оснастки на испытываемый подшипник, таким образом, в системе возникает несколько критически важных силовых факторов – осевая нагрузка на шток поршня, приводящая к потере устойчивости штока, изгибающая нагрузка на «лучи» осевого упора, срезающая и растягивающая нагрузки на резьбовые элементы, соединяющие корпус пневмоцилиндра с основанием модуля. Развиваемое поршнем пневмоцилиндра усилие равно 3000 Н. Принимаем направление нагрузки от осевого перемещения поршня пневмоцилиндра параллельно оси симметрии пневмоцилиндра, то есть горизонтально. Между крепежной плитой

пневмоцилиндра и основанием модуля установлена пружина сжатия, необходимая для устранения зазоров и мертвых ходов, имеющих в системе, поскольку из-за необходимости испытывать различные по габаритным размерам подшипники в конструкцию заложено двухэтапное создание осевого нагружения. Несмотря на наличие пружины, для упрощения расчетов влиянием на систему ее упругих свойств следует пренебречь, поскольку усилие на элементы конструкции будет передаваться после выборки упругого хода пружины. Также, для упрощения расчетов элементы сборки модуля считаем по отдельности, то есть отдельно рассчитываем прочность осевого упора, отдельно – прочность резьбовых элементов сборки на срез и деформации контактирующих с ними поверхностей, а также отдельно выполним расчет на потерю устойчивости штока пневмоцилиндра. Кроме того, не учитываются некоторые геометрические особенности модели модуля, такие как скругления и фаски размерами менее 2 мм, резьбовые канавки в установочных отверстиях, локальные искажения геометрии и т.п.

Модель с приложенными нагрузками представлена на рисунке 39, реакции со стороны опор показаны на рисунке 94. Материал, из которого предварительно может быть выполнен осевой упор – Сталь 45 ГОСТ 1050-2013. При выставлении упорных пальцев в крайнее положение по удаленности от центра (точка приложения нагрузки) возникает самое неблагоприятное напряженно-деформированное состояние, расчет которого и будет произведен.



Рисунок 93. Нагрузка на осевой упор



Рисунок 94. Закрепление осевого упора

На рисунке 95 представлена модель осевого упора с сеткой конечных элементов.

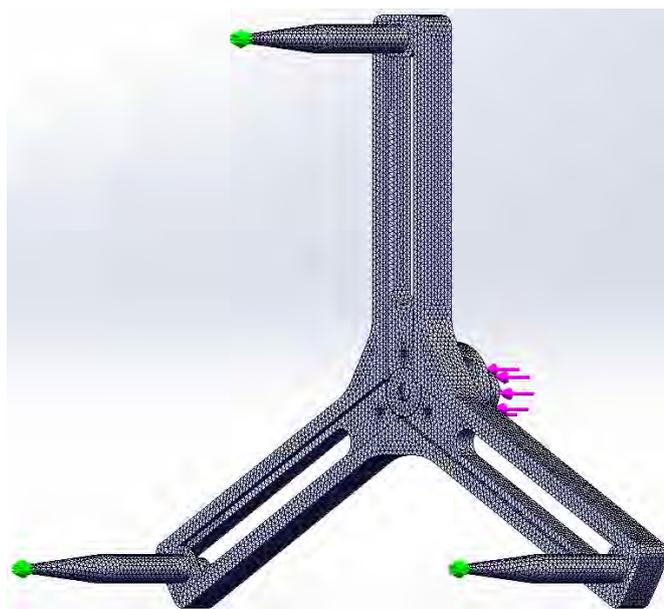


Рисунок 95. Расчетная модель упора осевого

На приведенных ниже иллюстрациях показаны результаты анализа, выполненного методом конечных элементов в программном обеспечении SolidWorks.

На рисунке 96 представлена эпюра напряжений по Мизесу. Модель осевого упора изображена в деформированном состоянии. Для наглядности масштаб деформаций сильно увеличен. Реальные деформации имеют значительно

меньшие величины и в масштабах изображений, размещаемых на листах формата А4 будут незаметны.

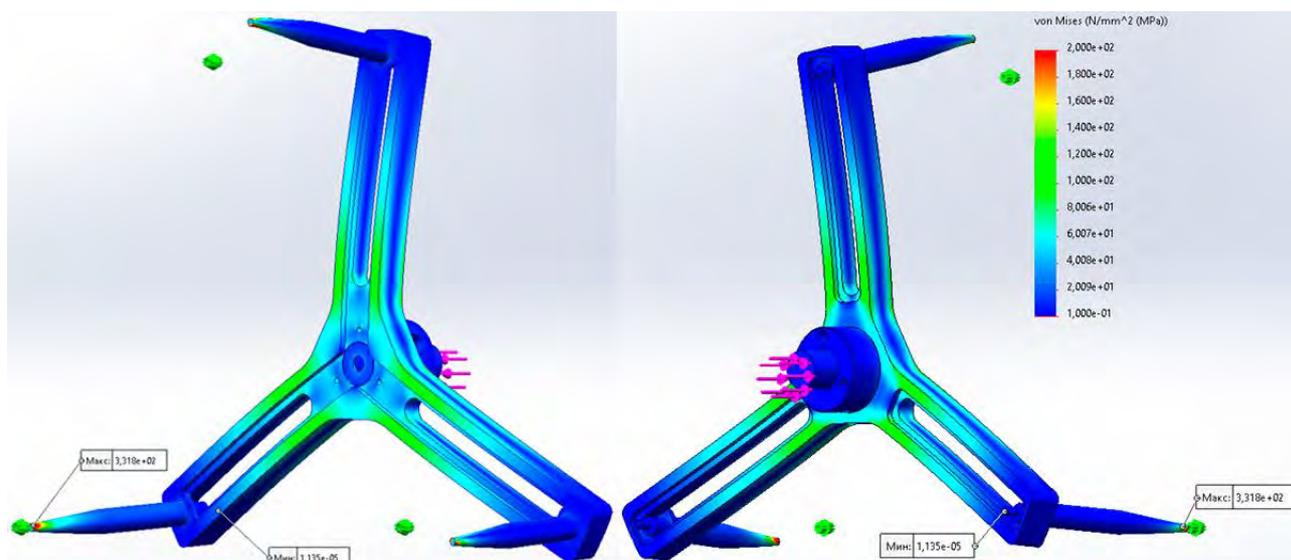


Рисунок 96. Эпюра эквивалентных напряжений по Мизесу
в каркасе основания

Цветовая кодировка, принятая в эпюре: синим цветом окрашены области с минимальным значением интенсивности напряжений по Мизесу, области с красным цветом – области с максимальным значением интенсивности напряжений.

Анализ эпюр напряжений, представленных на рисунке 96 показывает, что максимальные значения напряжений по Мизесу не превышают величины равной 320 МПа, что ниже значения предела текучести для выбранного материала (830 МПа).

На рисунке 97 представлены результаты расчетов на определение коэффициента запаса прочности осевого упора.

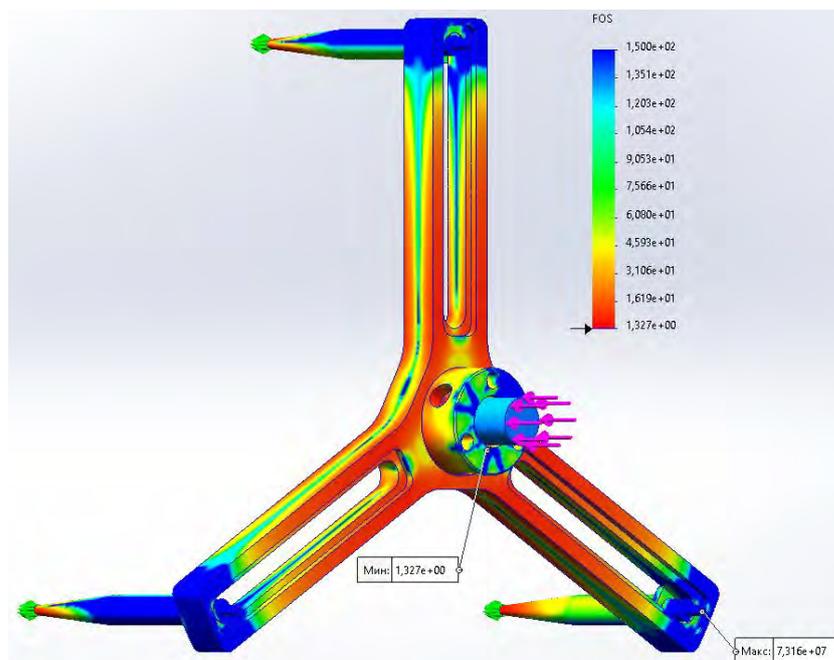


Рисунок 97. Эпюра коэффициента запаса прочности в упоре осевом

Анализ запаса прочности на расчетной модели показывает, что минимум запаса прочности по модели равен 1,3. Цветовая кодировка: красным цветом окрашены области с минимальным значением коэффициента запаса прочности, области синим цветом – с максимальным значением. Основной массив материала не нагружен напряжениями, вызывающими разрушения, что видно на представленной на рисунке 5. При условии изготовления осевого упора их качественной стали с последующей термообработкой возможно увеличение коэффициента запаса прочности до значения 2. Отсюда можно сделать вывод о приемлемой работоспособности исследуемой конструкции.

На следующих рисунках представлены эпюры результирующего перемещения URES (рисунок 98) и эквивалентной деформации ESTRN (рисунок 99).

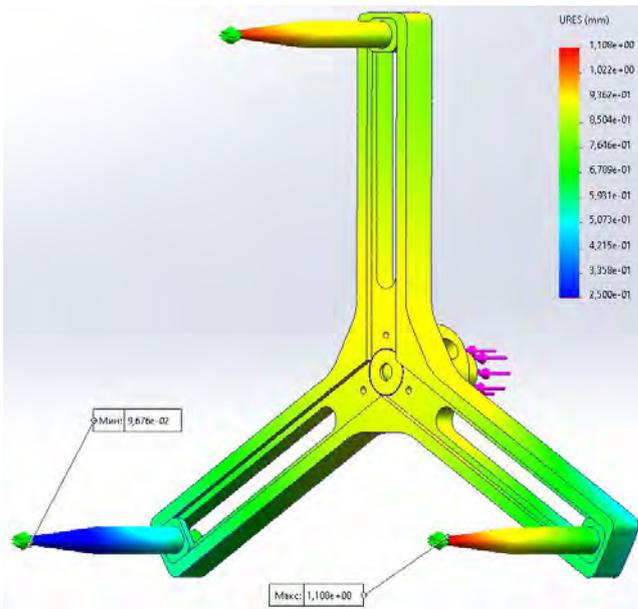


Рисунок 98. Эпюра результирующих перемещений в упоре осевом

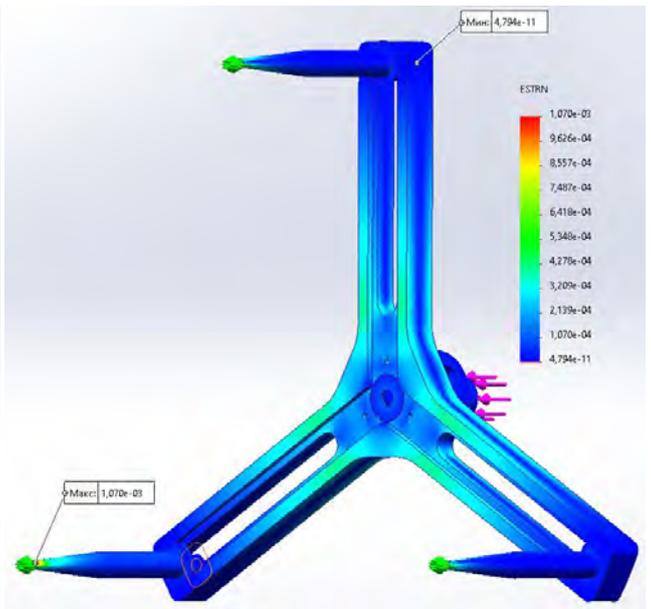


Рисунок 99. Эпюра эквивалентной деформации в упоре осевом

Анализируя представленные выше эпюры, можно сделать заключение о хорошей равномерности распределения напряжений в разработанной конструкции, способствующей минимизации материальных затрат и массогабаритных показателей конструкции.

3.3.2 Частотный анализ конструкции

3.3.2.1 Подготовка модели

Ввиду большой сложности геометрической сборки конструкции, содержащей большое количество деталей малого размера, для проведения частотного анализа использована упрощенная сборка, показанная на рисунке 100.

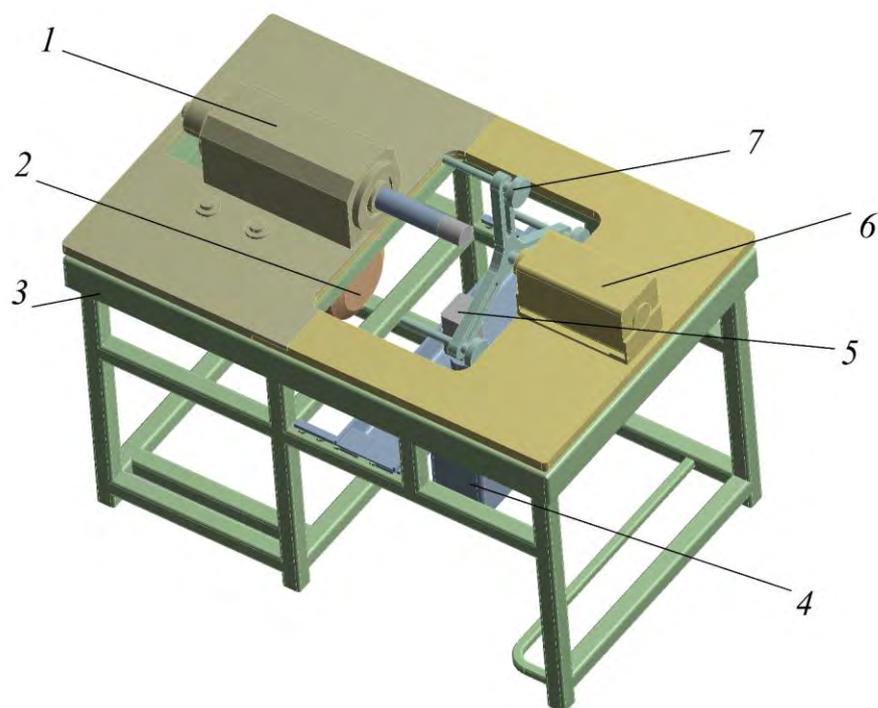


Рисунок 100: Упрощенная сборка станда: 1 – шпиндельный узел; 2 – привод; 3 – основание; 4 – модуль радиального нагружения; 5 – узел прижима датчика; 6 – модуль осевого нагружения; 7 – упор осевой

Из упрощенной сборки исключены все мелкие детали, часть деталей объединены в один объем. Вместе с тем, из модуля радиального нагружения выделен узел прижима датчика, а из модуля осевого нагружения – упор осевой. Это сделано для обеспечения корректного приложения нагрузки. Для всех элементов сборки кроме демпферных опор задан модуль упругости $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, соответствующий стали, поскольку основные детали выполнены из Ст 3 ГОСТ 380-2005, либо Стали 40Х ГОСТ 1050-2013. Плотность материалов подбиралось так, чтобы масса упрощенной детали соответствовала фактической массе моделируемого узла. В таблице 39 приведены значения масс основных узлов и соответствующих плотностей материалов.

Таблица 39. Массы узлов и плотности материалов

№	Название узла	Номиналь- ная масса, кг	Плотность материала, кг/м ³	Масса при подобранной плотности, кг
1	Шпиндельный узел	109	7440	108,99
2	Привод	30	3270	30,009
3	Основание	140	16500	140,04
4	Модуль радиального нагруже- ния	12,5	3015	12,507
5	Узел прижима датчика	4,7	7080	4,7005
6	Модуль осевого нагружения	57	5865	57,007
7	Упор осевой	0,8	898	0,80018

Виброопоры, LW.A-80-M12x1.25x120, размещенные между основанием и столешницами, смоделированы упрощенно. На рисунке 101 показана геометрия упрощенной виброопоры.



Рисунок 101. Геометрия упрощенной виброопоры

Характеристики упрощенной виброопоры подобраны таким образом, чтобы ее масса и жесткость соответствовали характеристикам, заявленным производителем:

- жесткость 2500 Н/мм;
- масса $m = 530$ г.

Плотность определена по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (24)$$

где V – объем упрощенной виброопоры, определен непосредственным изменением средствами CAD-системы, м^3 ($V = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$).

Модуль упругости определен по формуле:

$$E = \frac{Fl}{A\Delta l}, \quad (25)$$

где $F = 2500 \text{ Н}$ – усилие, необходимое для абсолютной деформации $\Delta l = 1 \text{ мм}$;

$l = 15 \text{ мм}$ – высота недеформированной опоры, определена прямым измерением средствами CAD-системы, $A = 0,0016619 \text{ м}^2$ – площадь основания упрощенной виброопоры, определена прямым измерением средствами CAD-системы.

Получены следующие значения:

- $\rho = 2,12 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3$;
- $E = 2,256 \cdot 10^7 \text{ Па}$.

3.3.2.2 Граничные условия и расчетные случаи

Для всех расчетных случаев задано условие закрепления нижних концов основания, представленных на рисунке 102.

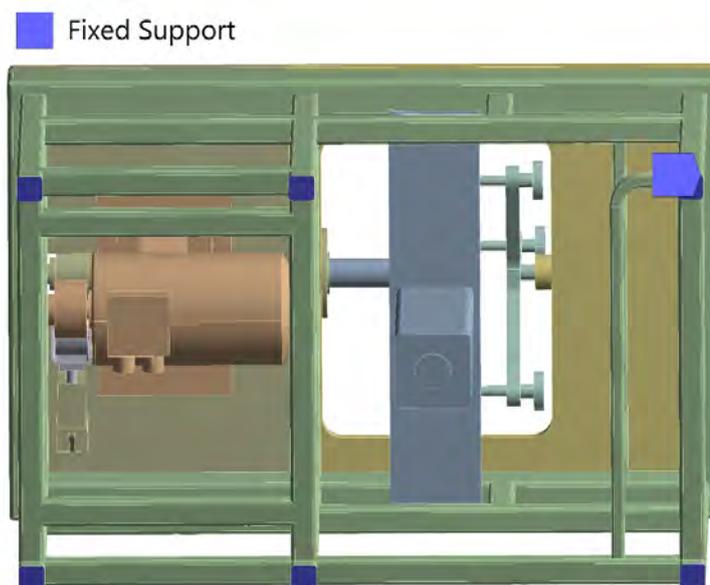


Рисунок 102. Условия закрепления модели

Также для всех расчетных случаев заданы усилия натяжения ремня (490 Н). Они приложены к шкивам ременной передачи (рисунок 103).

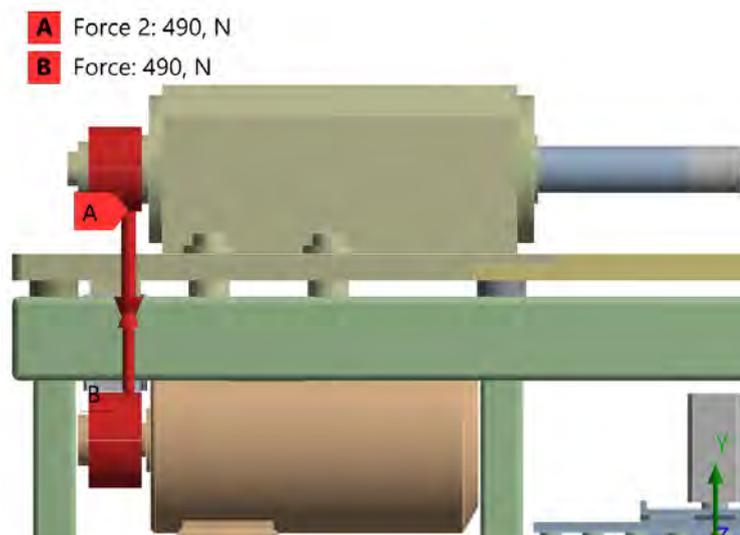


Рисунок 103. Усилие натяжения ремня

Рассмотрены три расчетных случая по нагрузкам. В первом случае прикладывается осевая нагрузка на подшипник, во втором – радиальная, в третьем случае имеет место совместное действие нагрузок. Кроме того, рассмотрено два варианта подшипника. Минимальный – внешний диаметр 42 мм, ширина 7 мм. Ввиду незначительности массы такого типа подшипника, ею пренебрегается. Максимальный – внешний диаметр 420 мм, ширина 138 мм, масса такого подшипника 65 кг.

Таким образом, рассмотрено шесть расчетных случаев:

1. Минимальный подшипник радиальная нагрузка 150 Н.
2. Минимальный подшипник осевая нагрузка 50 Н.
3. Минимальный подшипник комбинация радиальной и осевой нагрузок.
4. Максимальный подшипник радиальная нагрузка 3000 Н.
5. Максимальный подшипник осевая нагрузка. 3000 Н.
6. Максимальный подшипник комбинация радиальной и осевой нагрузок.

Для всех расчетных случаев проведен модальный анализ и определены собственные частоты конструкции и эффективные массы каждого тона колебаний.

Ввиду сложности конструкции, она имеет большое число собственных форм колебаний, подавляющее большинство из которых – низкоэнергетические, то есть ввиду демпфирующих свойств материалов при реальной эксплуатации не

проявляются. Произведена проверка совпадения собственных частот с рабочими частотами вращения:

- 900 об/мин (15 Гц);
- 1800 об/мин (30 Гц);
- 3000 об/мин (50 Гц).

3.3.2.3 Результаты модального анализа для расчетного случая №1

На рисунке 104 приведена схема приложения радиальной нагрузки. Для корректного моделирования работы пневмоцилиндра, реализующего радиальную нагрузку, усилие задано в двух направлениях и приложено как к штоку узла прижима датчика, так и к корпусу модуля радиального нагружения.

Для данного расчетного случая все контакты элементов конструкции друг с другом заданы жесткими, за исключением контакта узла прижима датчика и модуля радиального нагружения (рисунок 105). Для него задано условие скольжения без трения.

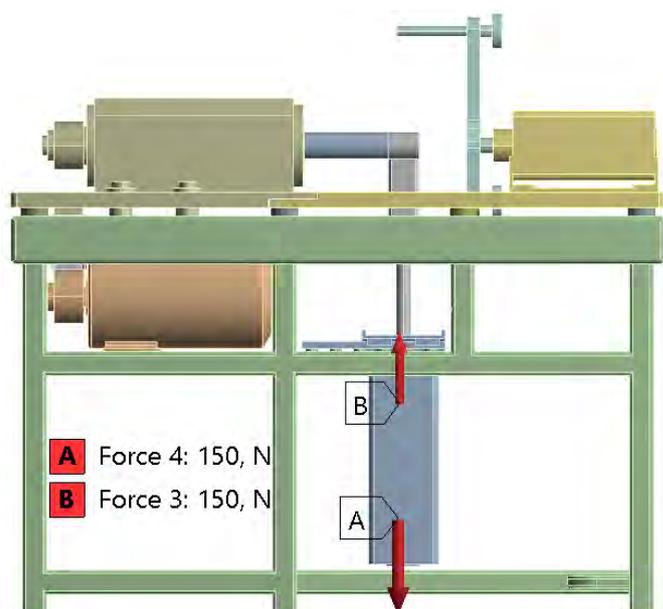


Рисунок 104. Схема приложения радиальной нагрузки

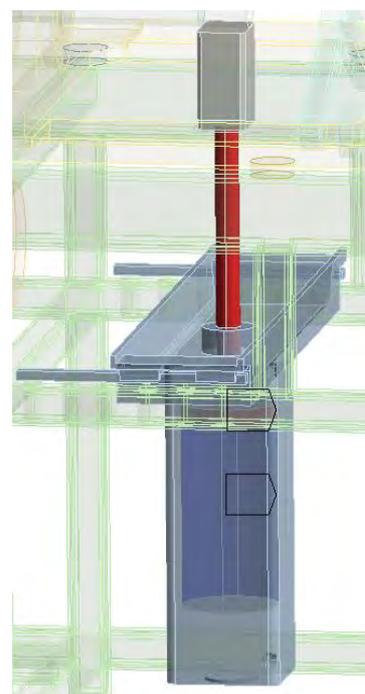


Рисунок 105. Контакт узла прижима датчика и модуля радиального нагружения

На рисунках 106-115 приведены первые десять форм собственных колебаний (ФК) конструкции.

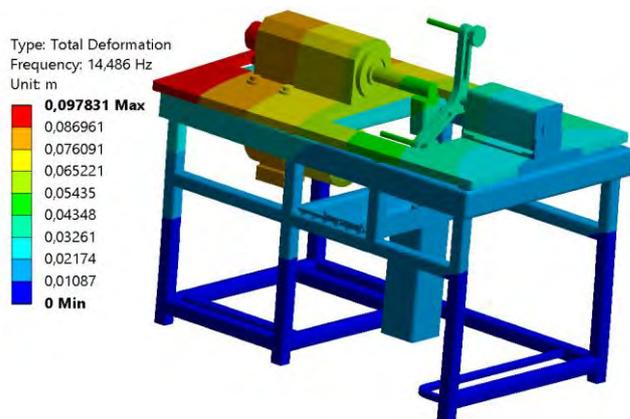


Рисунок 106. Первая ФК

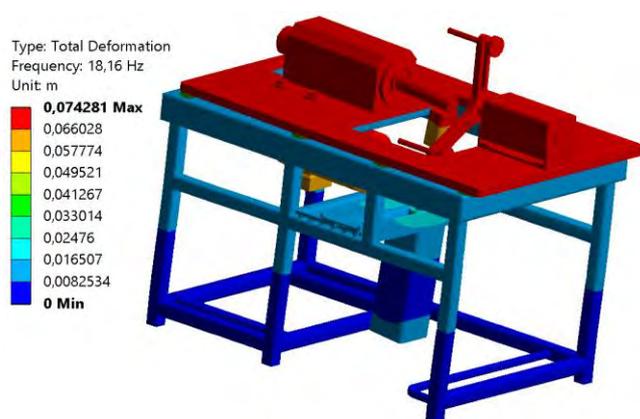


Рисунок 107. Вторая ФК

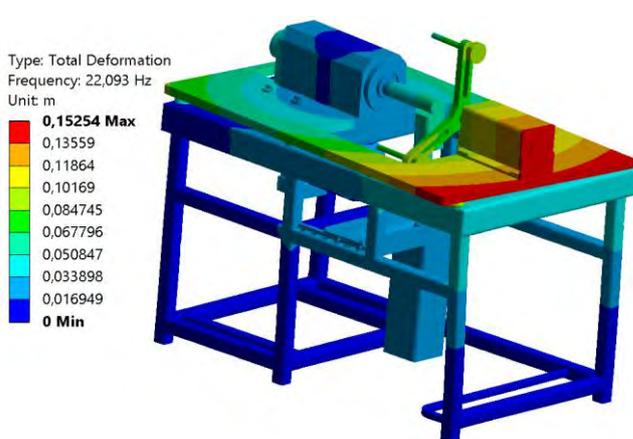


Рисунок 108. Третья ФК

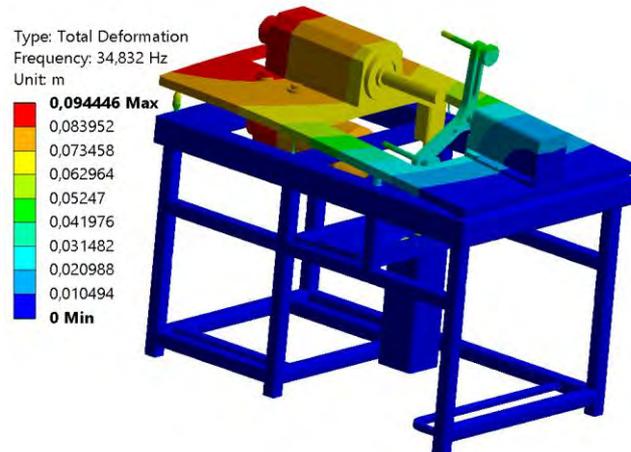


Рисунок 109. Четвертая ФК

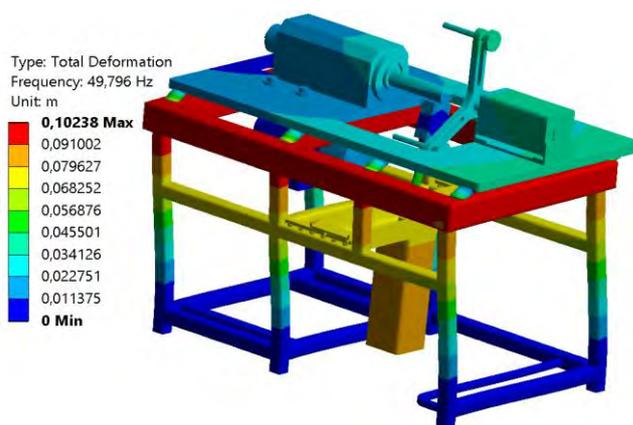


Рисунок 110. Пятая ФК

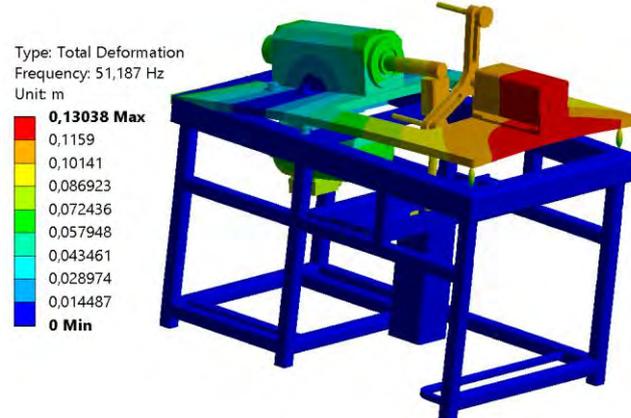


Рисунок 111. Шестая ФК

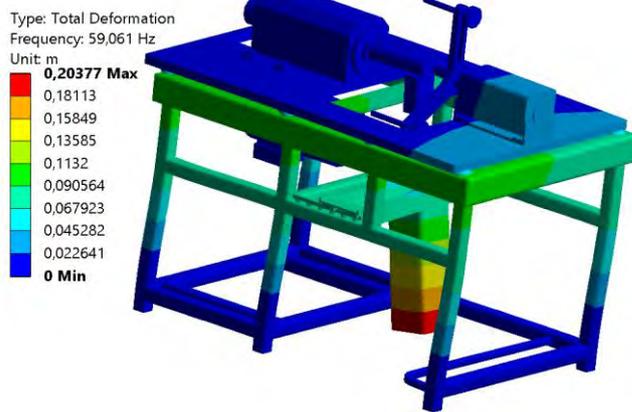


Рисунок 112. Седьмая ФК

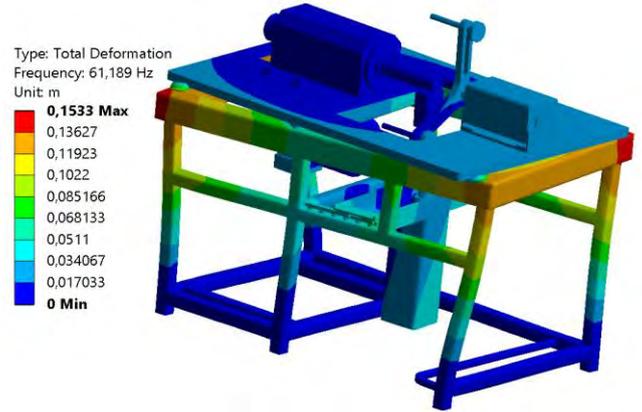


Рисунок 113. Восьмая ФК

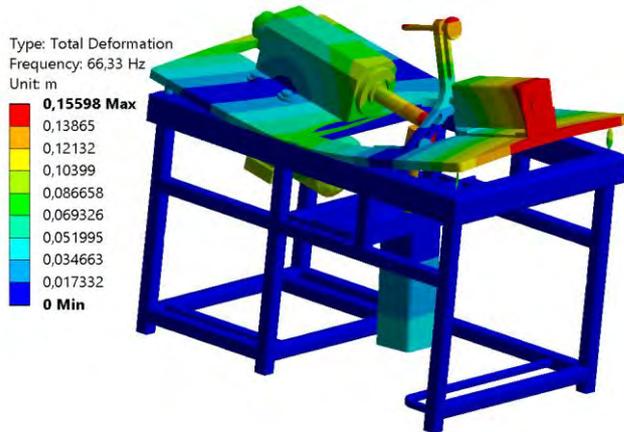


Рисунок 114. Девятая ФК

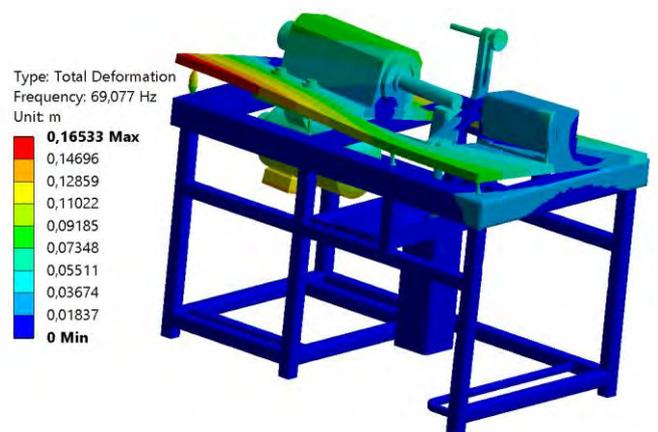


Рисунок 115. Десятая ФК

В таблице 40 приведены первые десять собственных частот конструкции и соответствующие эффективные массы для расчетного случая №1.

Таблица 40 – Собственные частоты и эффективные модули для расчетного случая №1

№	Частота, Гц	Эффективная масса, кг
1	14,486	111.0
2	18,16	189.1
3	22,093	51.96
4	34,832	112.3
5	49,796	95.46
6	51,187	58.84
7	59,061	24.15
8	61,189	57.03
9	66,33	44.52
10	69,077	36.80

Из анализа таблицы 40 видно, что расчетные собственные частоты не совпадают с рабочими частотами конструкции.

3.3.2.4 Результаты модального анализа для расчетного случая №2

На рисунке 116 приведена схема приложения осевой нагрузки. Для корректного моделирования работы пневмоцилиндра, реализующего осевую нагрузку, усилие задано в 2 направлениях и приложено как к штоку осевого упора, так и к корпусу модуля осевого нагружения.

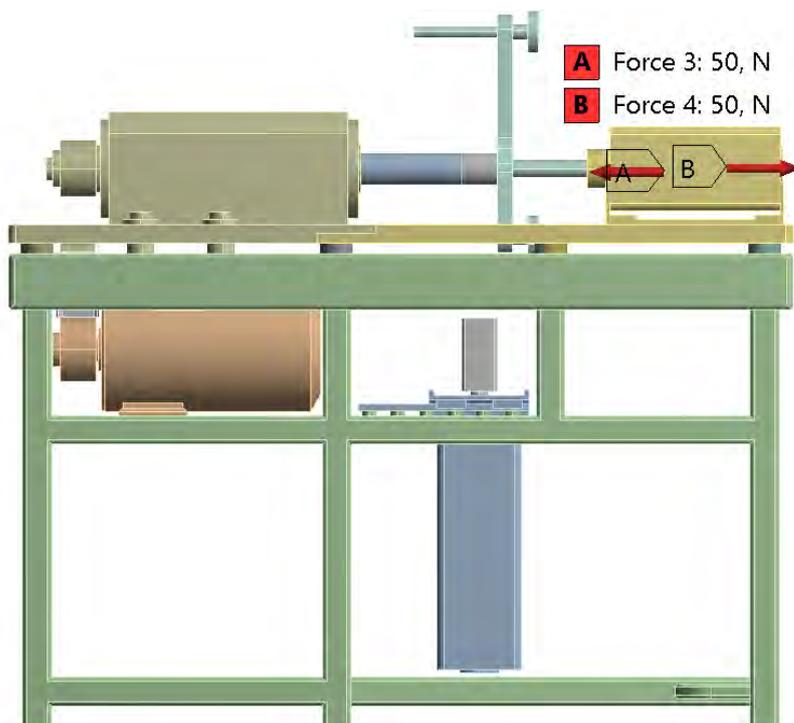


Рисунок 116. Схема приложения осевой нагрузки

Для данного расчетного случая все контакты элементов конструкции друг с другом заданы жесткими, за исключением контакта осевого упора и модуля осевого нагружения (рисунок 117). Для него задано условие скольжения без трения.

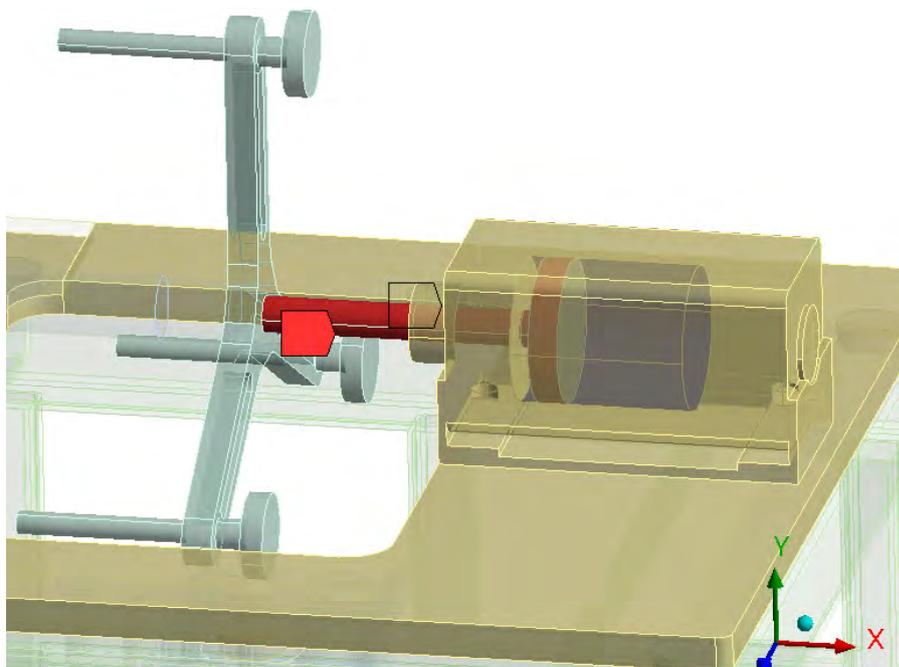


Рисунок 117. Контакт упора осевого и модуля осевого нагружения

На рисунках 108-127 приведены первые десять форм колебаний (ФК) для расчетного случая №2.

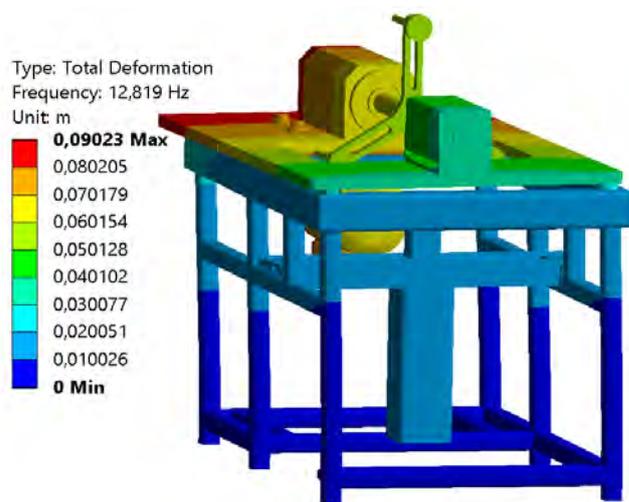


Рисунок 118. Первая ФК

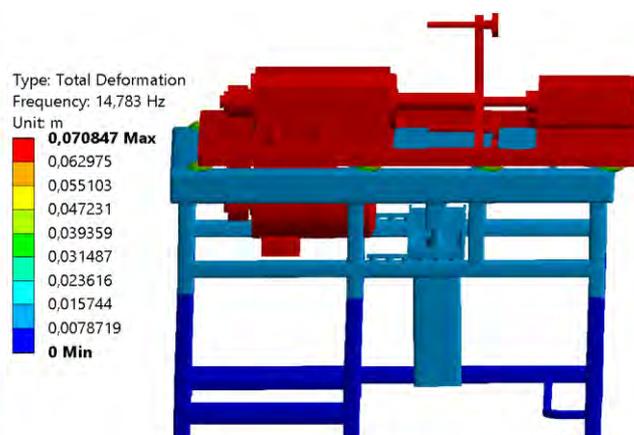


Рисунок 119. Вторая ФК

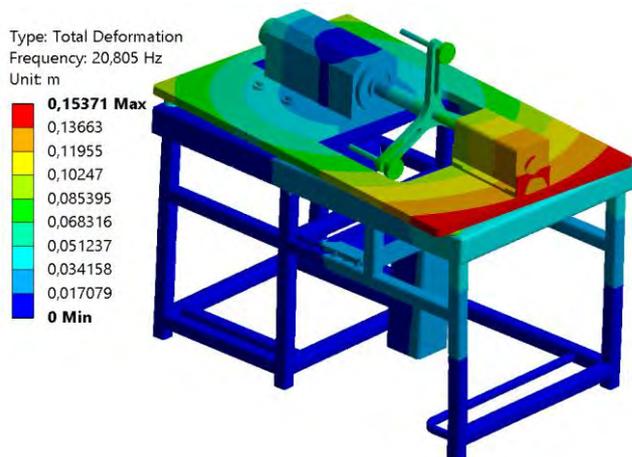


Рисунок 120. Третья ФК

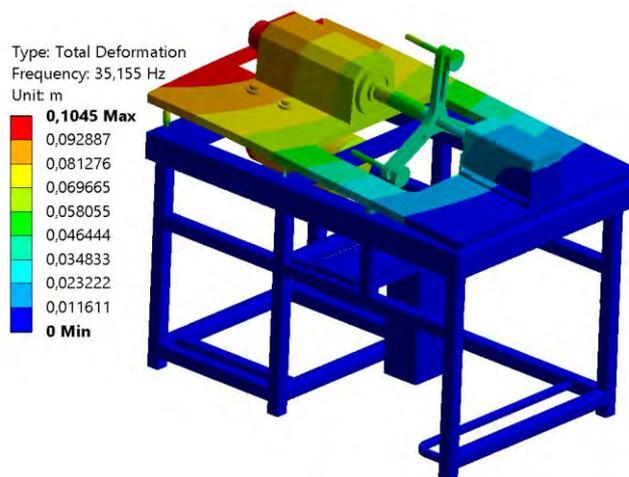


Рисунок 121. Четвертая ФК

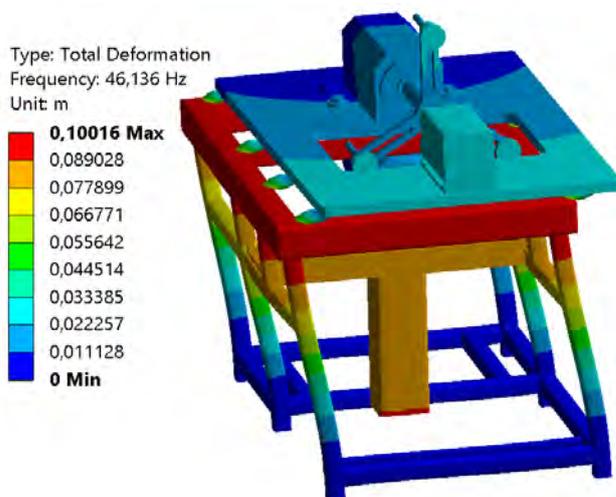


Рисунок 122. Пятая ФК

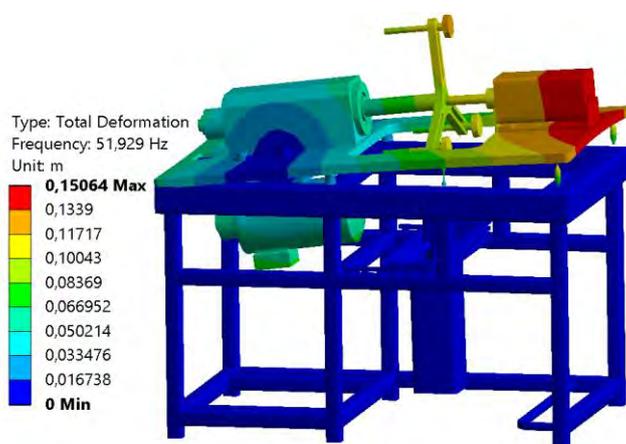


Рисунок 123. Шестая ФК

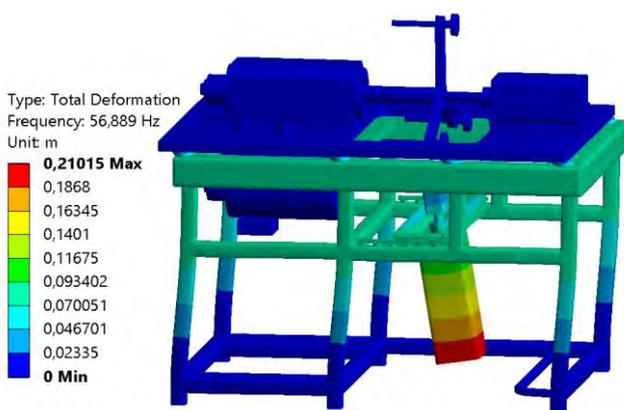


Рисунок 124. Седьмая ФК

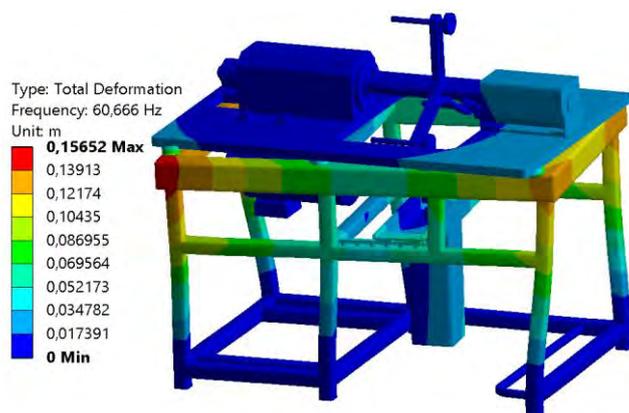


Рисунок 125. Восьмая ФК

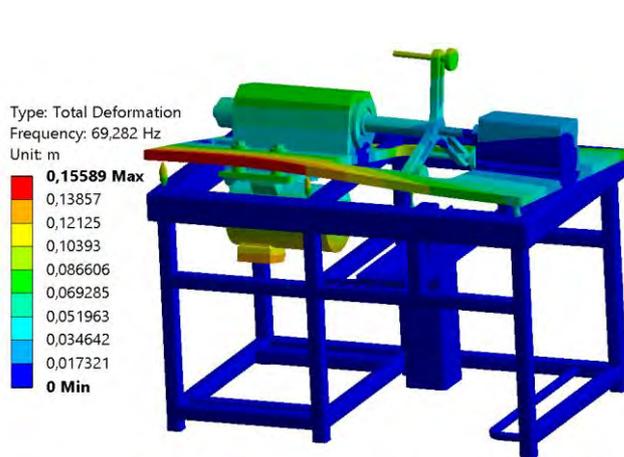


Рисунок 126. Девятая ФК

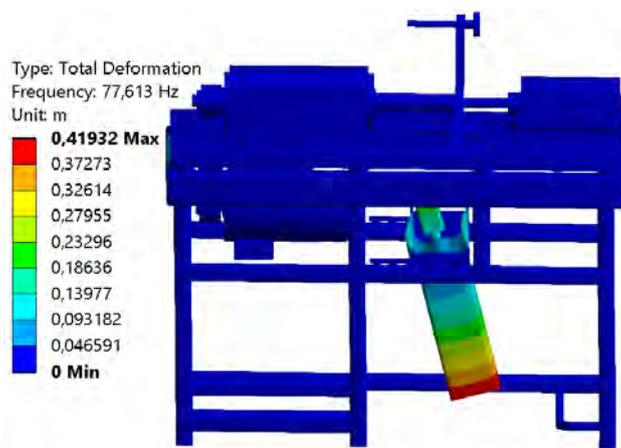


Рисунок 127. Десятая ФК

В таблице 41 приведены первые десять собственных частот конструкции и соответствующие эффективные массы для расчетного случая №2.

Таблица 41 – Собственные частоты и эффективные модули для расчетного случая №2

№	Частота, Гц	Эффективная масса, кг
1	12,819	127.5
2	14,783	199.6
3	20,805	51.95
4	35,155	91.60
5	46,136	99.76
6	51,929	44.08
7	56,889	22.66
8	60,666	52.46
9	69,282	41.31
10	77,613	5.762

Из анализа таблицы 41 видно, что расчетные собственные частоты не совпадают с рабочими частотами конструкции.

3.3.2.5 Результаты модального анализа для расчетного случая №3

На рисунке 128 приведена схема приложения радиальной и осевой нагрузки. Для корректного моделирования работы пневмоцилиндров, осевая и радиальная нагрузка также приложены в двух направлениях.

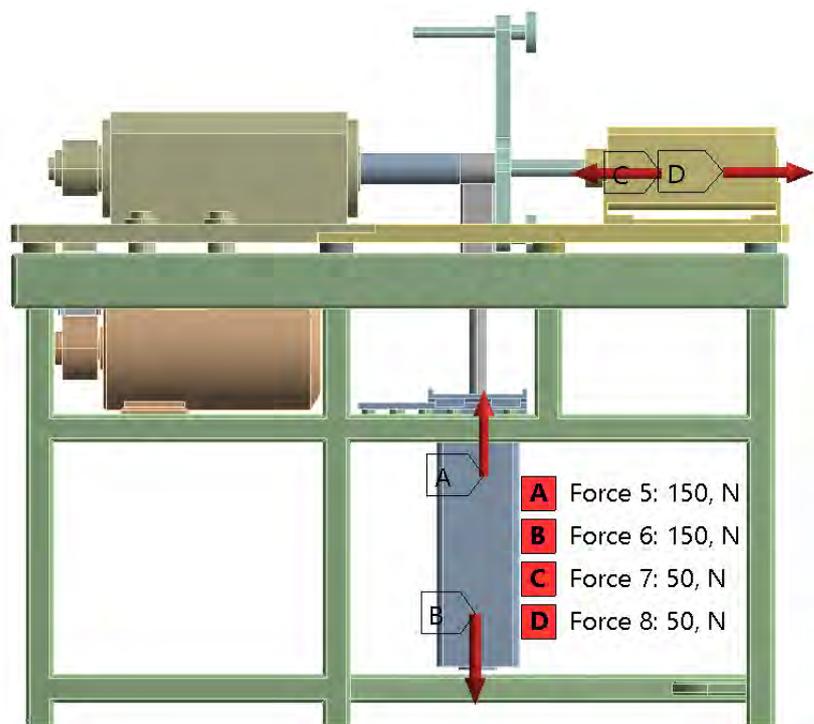


Рисунок 128. Схема приложения осевой и радиальной нагрузок

Для расчетного случая №3 также заданы условия жесткого соединения всех компонентов, за исключением контактов пневмоцилиндров узлов радиального и осевого нагружения с узлом прижима датчика и осевого упора соответственно. Для последних заданы условия скольжения без трения.

На рисунках 129-138 приведены первые десять форм колебаний (ФК) для расчетного случая №3.

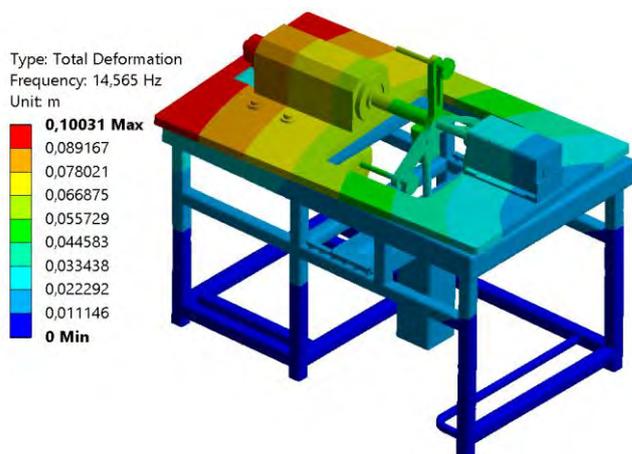


Рисунок 129. Первая ФК

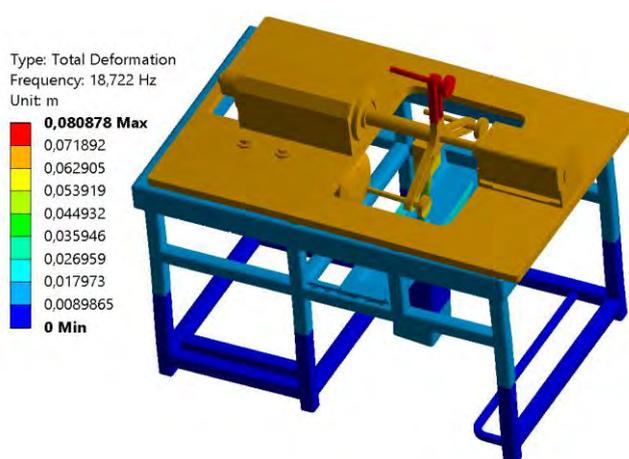


Рисунок 130. Вторая ФК

Type: Total Deformation
Frequency: 22,358 Hz
Unit: m

0,15214 Max
0,13523
0,11833
0,10142
0,08452
0,067616
0,050712
0,033808
0,016904
0 Min

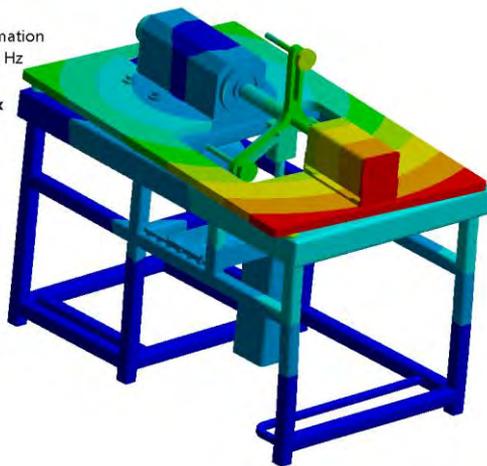


Рисунок 131. Третья ФК

Type: Total Deformation
Frequency: 35,31 Hz
Unit: m

0,10248 Max
0,09109
0,079704
0,068318
0,056931
0,045545
0,034159
0,022773
0,011386
0 Min

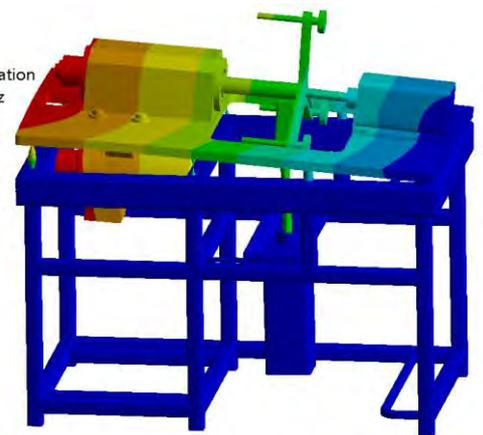


Рисунок 132. Четвертая ФК

Type: Total Deformation
Frequency: 50,317 Hz
Unit: m

0,10611 Max
0,094323
0,082532
0,070742
0,058952
0,047161
0,035371
0,023581
0,01179
0 Min

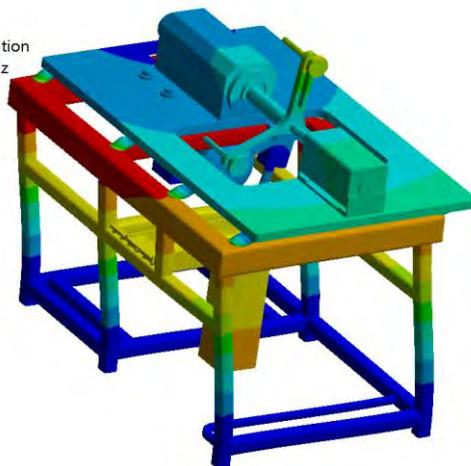


Рисунок 133. Пятая ФК

Type: Total Deformation
Frequency: 51,442 Hz
Unit: m

0,1416 Max
0,12587
0,11013
0,094401
0,078667
0,062934
0,0472
0,031467
0,015733
0 Min

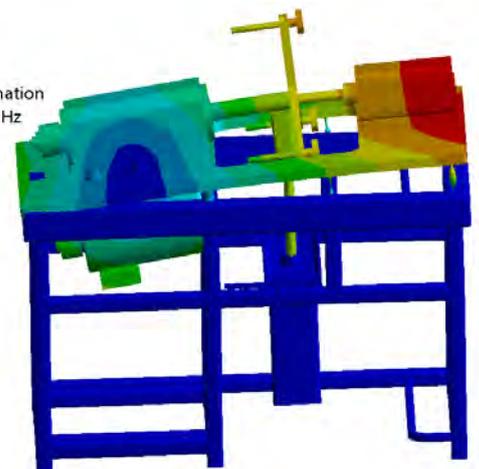


Рисунок 134. Шестая ФК

Type: Total Deformation
Frequency: 59,16 Hz
Unit: m

0,21166 Max
0,18814
0,16463
0,14111
0,11759
0,094072
0,070554
0,047036
0,023518
0 Min

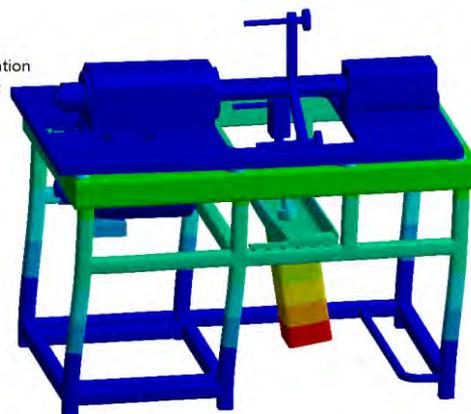


Рисунок 135. Седьмая ФК

Type: Total Deformation
Frequency: 61,198 Hz
Unit: m

0,15111 Max
0,13432
0,11753
0,10074
0,083952
0,067162
0,050371
0,033581
0,01679
0 Min

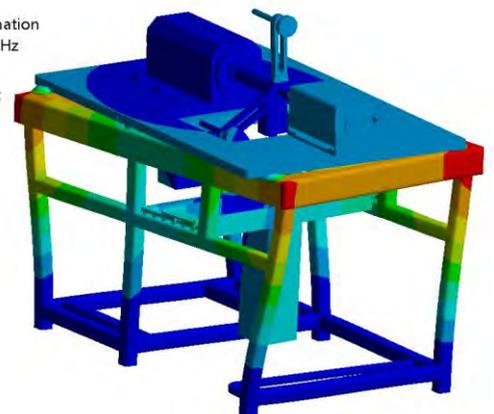


Рисунок 136. Восьмая ФК

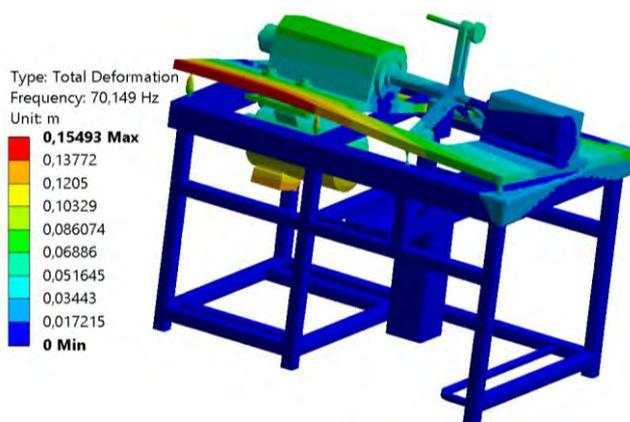


Рисунок 137. Девятая ФК

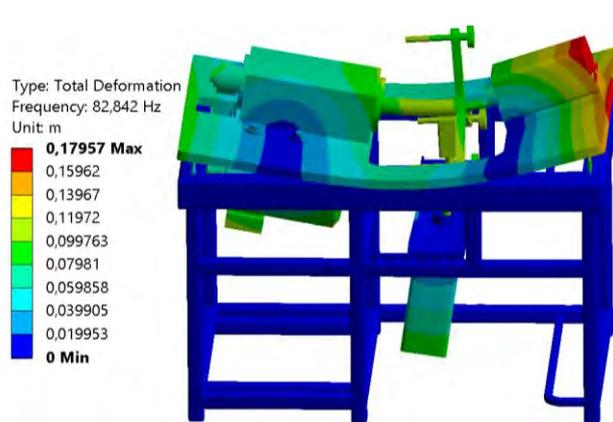


Рисунок 138. Десятая ФК

В таблице 42 приведены первые десять собственных частот конструкции и соответствующие эффективные массы для расчетного случая №3.

Таблица 42 – собственные частоты и эффективные модули для расчетного случая №3

№	Частота, Гц	Эффективная масса, кг
1	14,565	106.4
2	18,722	153.3
3	22,358	51.96
4	35,31	95.44
5	50,317	88.94
6	51,442	49.89
7	59,16	22.39
8	61,198	59.95
9	70,149	41.85
10	82,842	37.24

Из анализа таблицы 42 видно, что расчетные собственные частоты не совпадают с рабочими частотами конструкции.

3.3.2.6 Результаты модального анализа для расчетного случая №4

На рисунке 139 приведена схема приложения радиальной нагрузки. Для корректного моделирования работы пневмоцилиндра, реализующего радиальную нагрузку, усилие задано в 2 направлениях и приложено как к штоку узла прижима датчика, так и к корпусу модуля радиального нагружения. Видимая не-

соосность приложенных сил является дефектом отображения, вызванным особенностями работы алгоритмов визуализации использованного программного обеспечения.

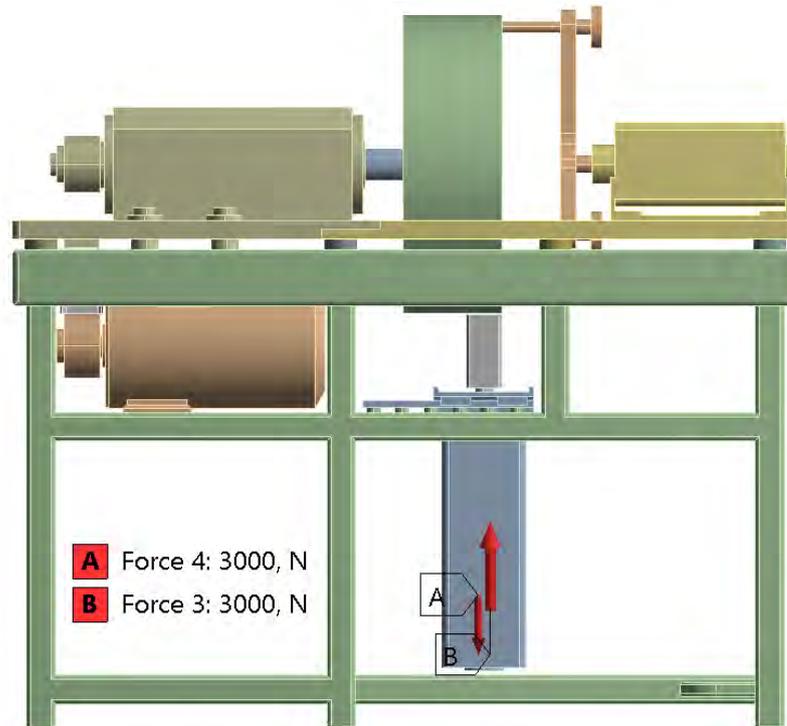


Рисунок 139. Схема приложения радиальной нагрузки

На рисунках 140-149 показаны первые десять форм колебаний (ФК) для расчетного случая №4.

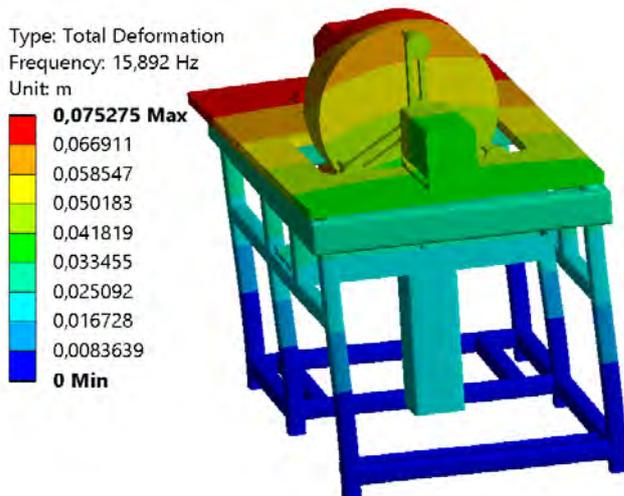


Рисунок 140. Первая ФК

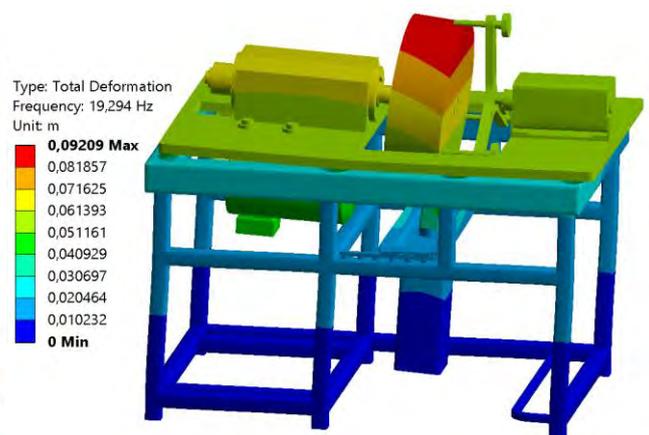


Рисунок 141. Вторая ФК

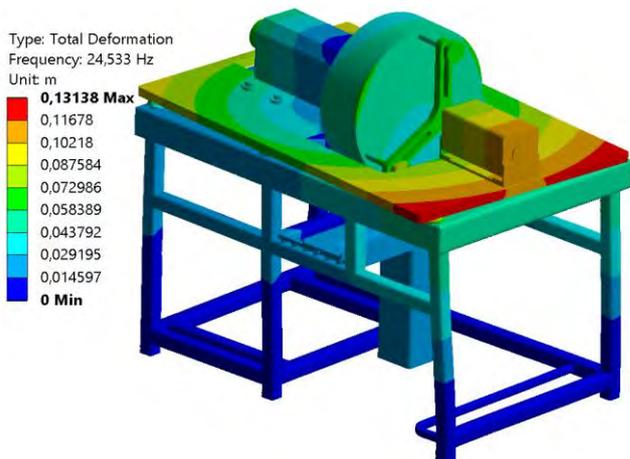


Рисунок 142. Третья ФК

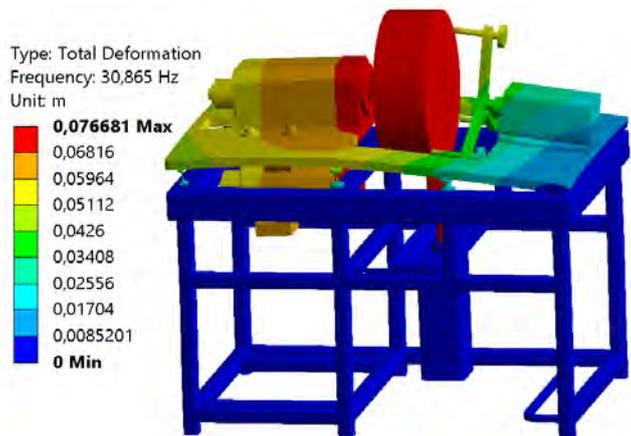


Рисунок 143. Четвертая ФК

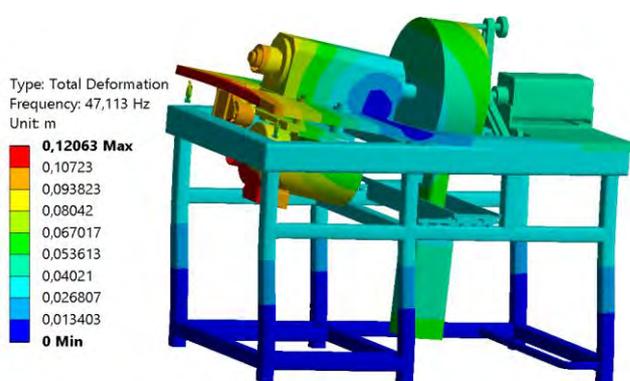


Рисунок 144. Пятая ФК

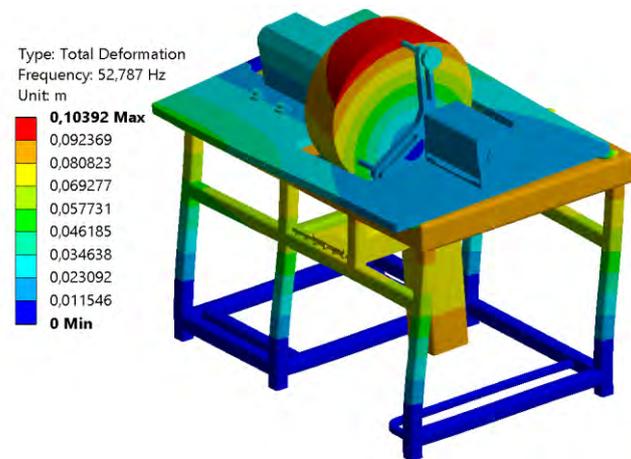


Рисунок 145. Шестая ФК

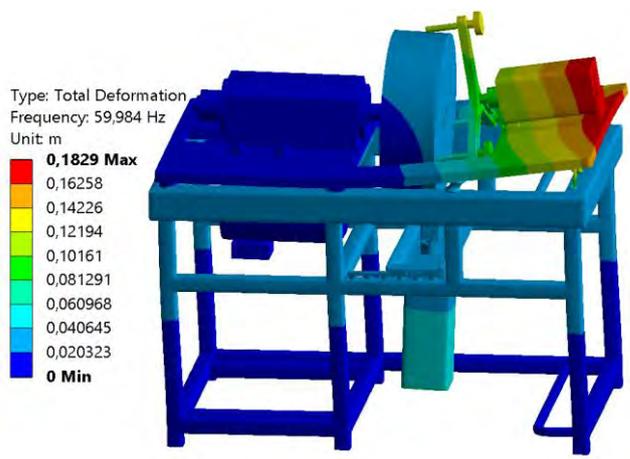


Рисунок 146. Седьмая ФК

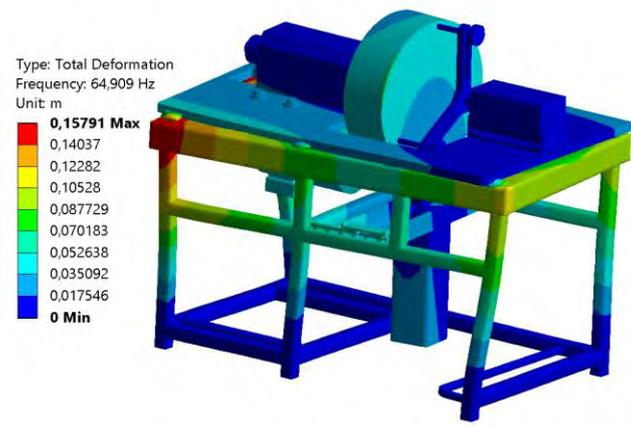


Рисунок 147. Восьмая ФК

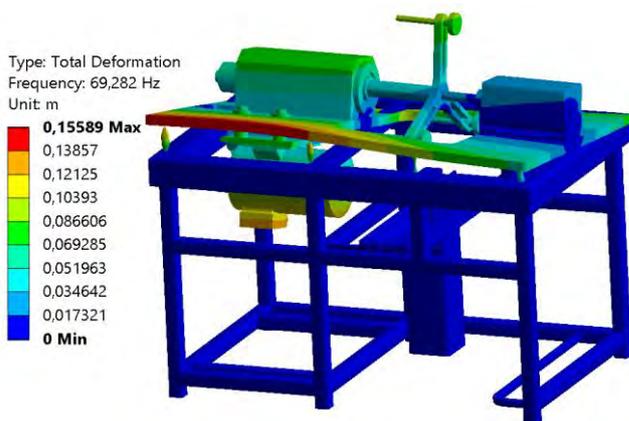


Рисунок 148. Девятая ФК

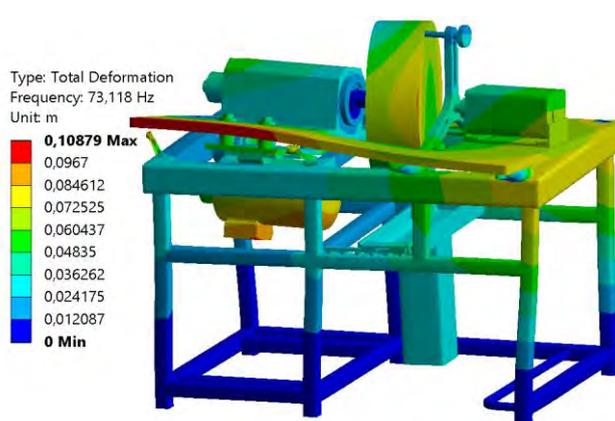


Рисунок 149. Десятая ФК

В таблице 43 приведены собственные частоты и эффективные массы для расчетного случая №4.

Таблица 43 – Собственные частоты и эффективные модули для расчетного случая №4

№	Частота, Гц	Эффективная масса, кг
1	15,892	181.6
2	19,294	132.8
3	24,533	73.96
4	30,865	171.0
5	47,113	72.36
6	52,787	92.64
7	59,984	29.95
8	64,909	48.31
9	67,646	25.10
10	73,118	89.52

Из анализа таблицы 43 видно, что расчетные собственные частоты не совпадают с рабочими частотами конструкции.

3.3.2.7 Результаты модального анализа для расчетного случая №5

На рисунке 150 приведена схема приложения осевой нагрузки. Для корректного моделирования работы пневмоцилиндра, реализующего осевую нагрузку, усилие задано в двух направлениях и приложено как к штоку осевого упора, так и к корпусу модуля осевого нагружения.

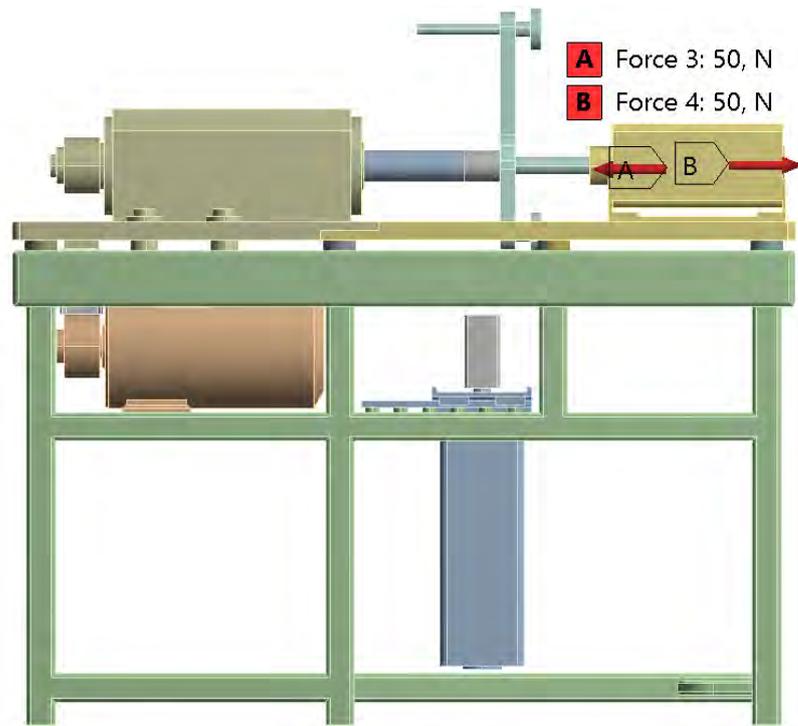


Рисунок 150. Схема приложения осевой нагрузки

На рисунках 151-160 показаны первые десять форм колебаний (ФК) для расчетного случая №5.

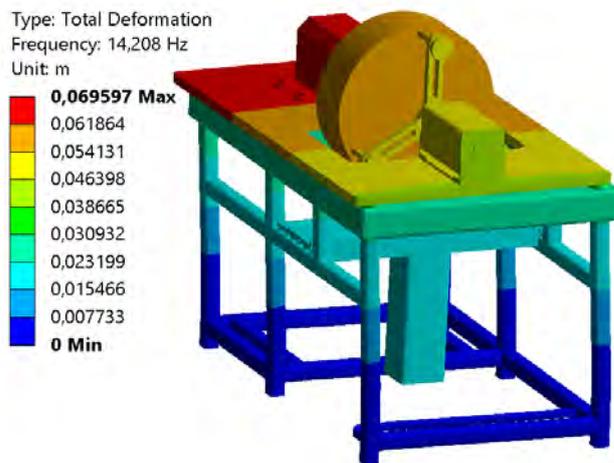


Рисунок 151. Первая ФК

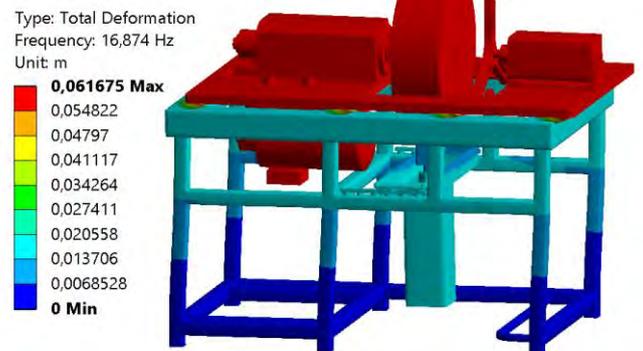


Рисунок 152. Вторая ФК

Type: Total Deformation
Frequency: 24,467 Hz
Unit: m

0,12986 Max
0,11543
0,101
0,086575
0,072146
0,057717
0,043287
0,028858
0,014429
0 Min

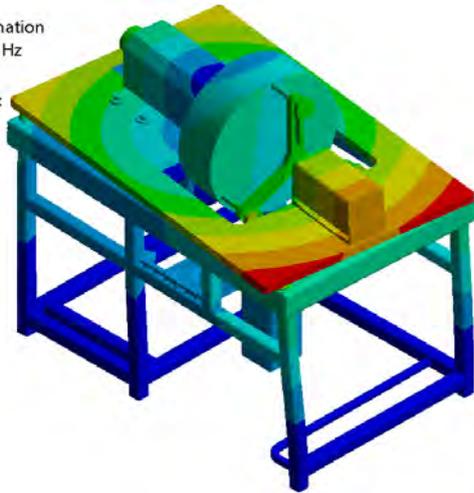


Рисунок 153. Третья ФК

Type: Total Deformation
Frequency: 33,253 Hz
Unit: m

0,073767 Max
0,06557
0,057374
0,049178
0,040981
0,032785
0,024589
0,016393
0,0081963
0 Min

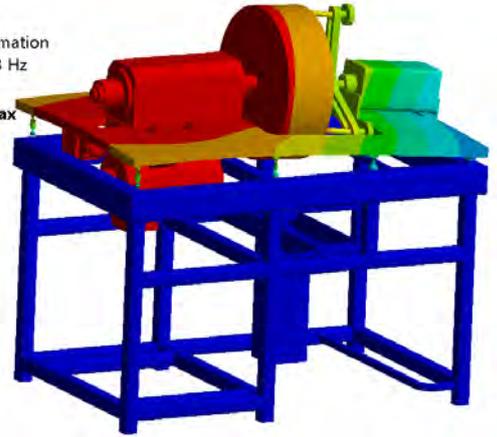


Рисунок 154. Четвертая ФК

Type: Total Deformation
Frequency: 46,105 Hz
Unit: m

0,10734 Max
0,095411
0,083484
0,071558
0,059632
0,047705
0,035779
0,023853
0,011926
0 Min

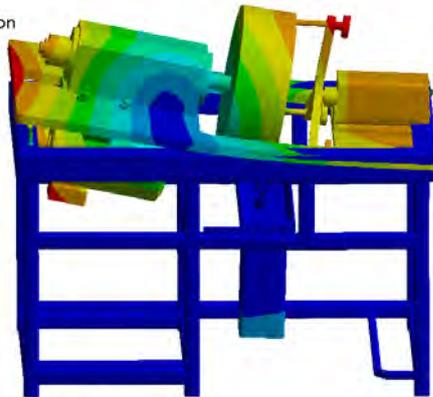


Рисунок 155. Пятая ФК

Type: Total Deformation
Frequency: 52,08 Hz
Unit: m

0,088429 Max
0,078604
0,068778
0,058953
0,049127
0,039302
0,029476
0,019651
0,0098255
0 Min

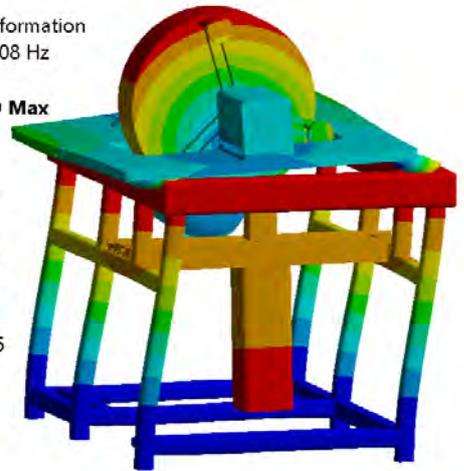


Рисунок 156. Шестая ФК

Type: Total Deformation
Frequency: 54,684 Hz
Unit: m

0,13718 Max
0,12194
0,1067
0,091453
0,076211
0,060969
0,045727
0,030484
0,015242
0 Min

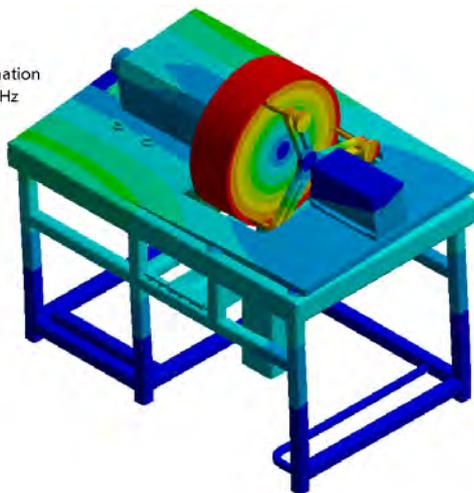


Рисунок 157. Седьмая ФК

Type: Total Deformation
Frequency: 60,733 Hz
Unit: m

0,24897 Max
0,2213
0,19364
0,16598
0,13832
0,11065
0,082989
0,055326
0,027663
0 Min

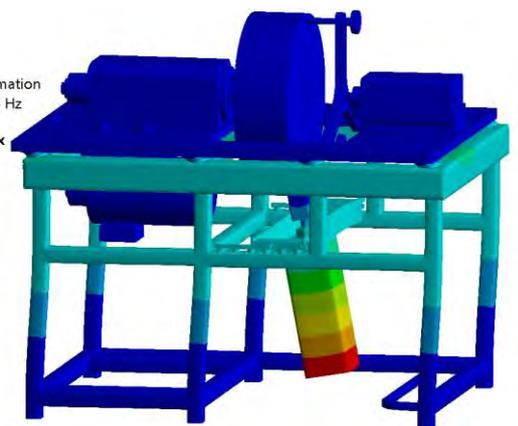


Рисунок 158. Восьмая ФК

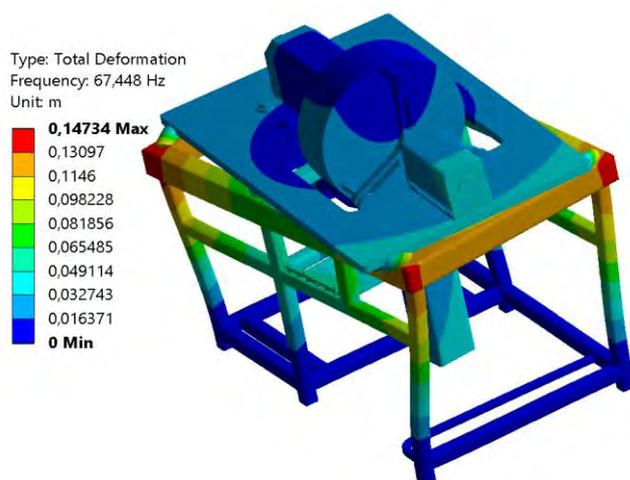


Рисунок 159. Девятая ФК

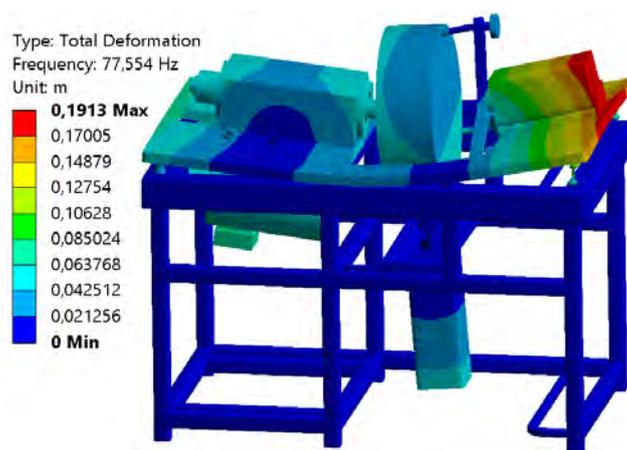


Рисунок 160. Десятая ФК

В таблице 44 приведены собственные частоты и эффективные массы для расчетного случая №5.

Таблица 44 – Собственные частоты и эффективные модули для 5 расчетного случая

№	Частота, Гц	Эффективная масса, кг
1	14,208	208.9
2	16,874	263.0
3	24,467	76.59
4	33,253	183.9
5	46,105	95.13
6	52,08	127.9
7	54,684	53.15
8	60,733	16.17
9	67,448	58.45
10	77,554	30.23

Из анализа таблицы 42 видно, что расчетные собственные частоты не совпадают с рабочими частотами конструкции.

3.3.2.8 Результаты модального анализа для расчетного случая №6

На рисунке 161 приведена схема приложения радиальной и осевой нагрузки. Для корректного моделирования работы пневмоцилиндров, осевая и радиальная нагрузка также приложены в двух направлениях.

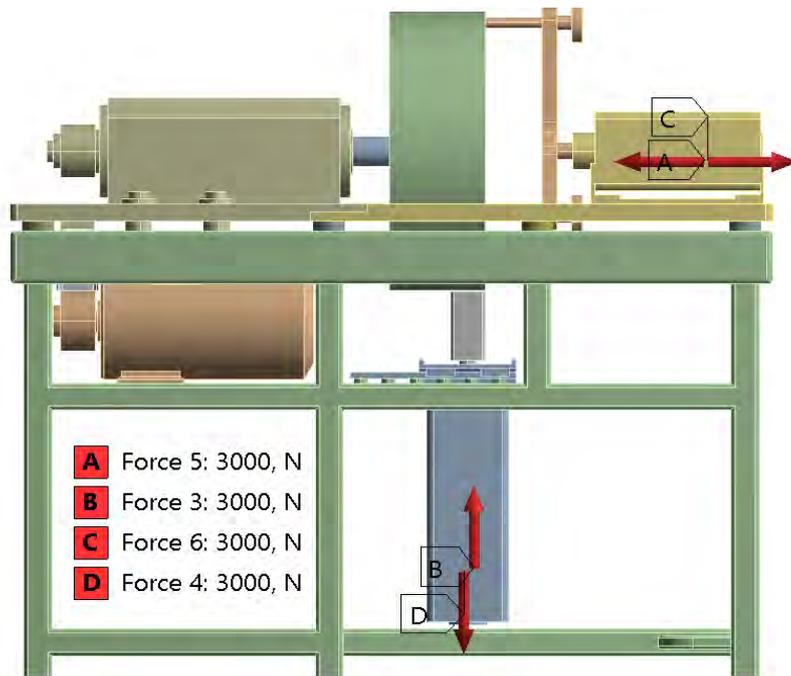


Рисунок 161. Схема приложения осевой нагрузки

На рисунках 162-171 показаны первые десять форм колебаний (ФК) для расчетного случая №6.

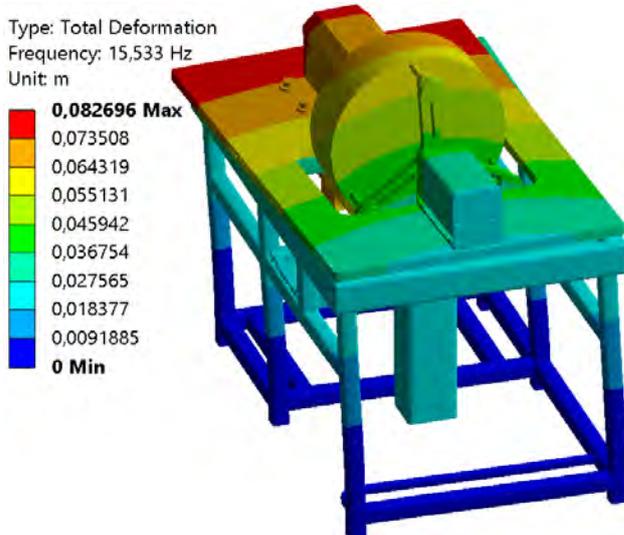


Рисунок 162. Первая ФК

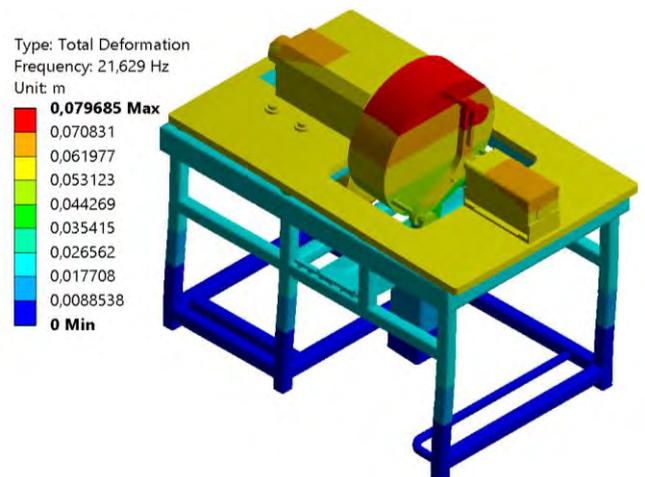


Рисунок 163. Вторая ФК

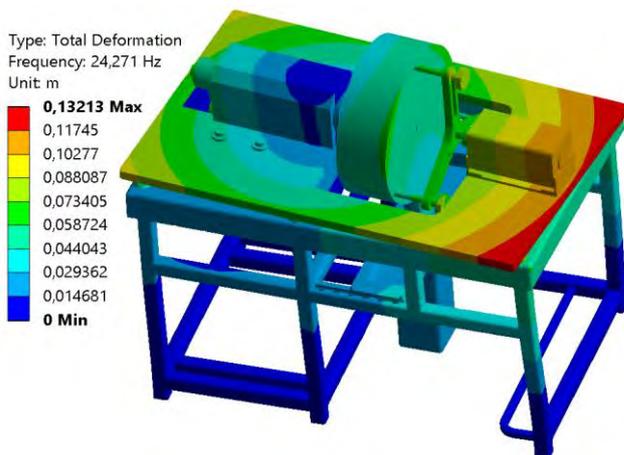


Рисунок 164. Третья ФК



Рисунок 165. Четвертая ФК

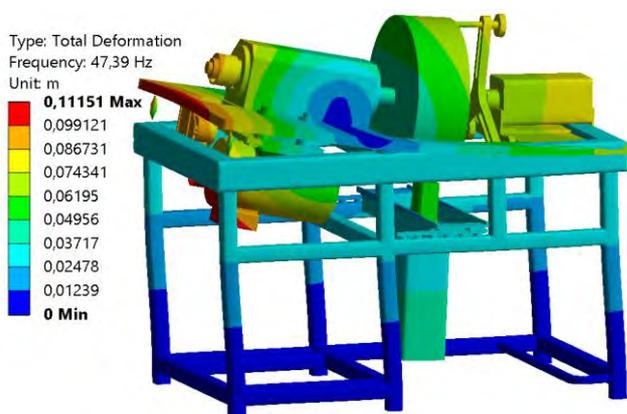


Рисунок 166. Пятая ФК

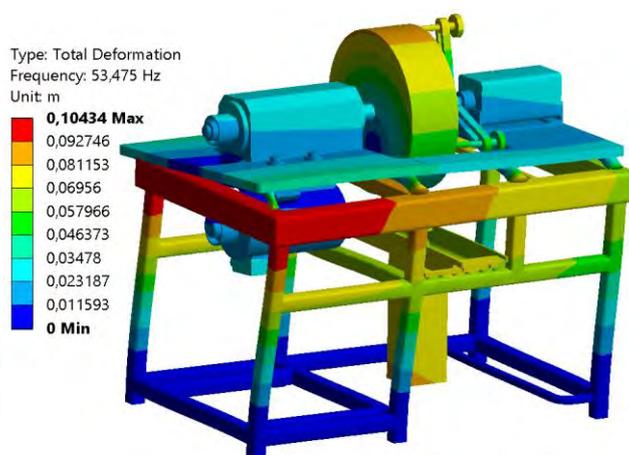


Рисунок 167. Шестая ФК

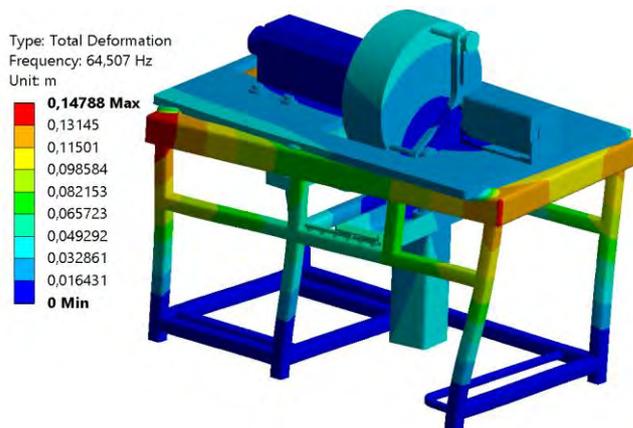


Рисунок 168. Седьмая ФК

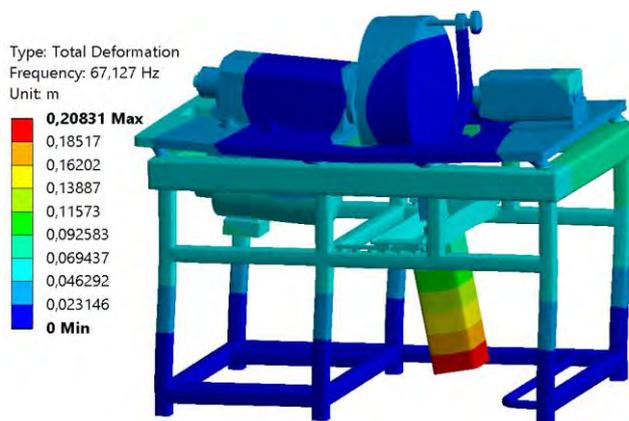


Рисунок 169. Восьмая ФК

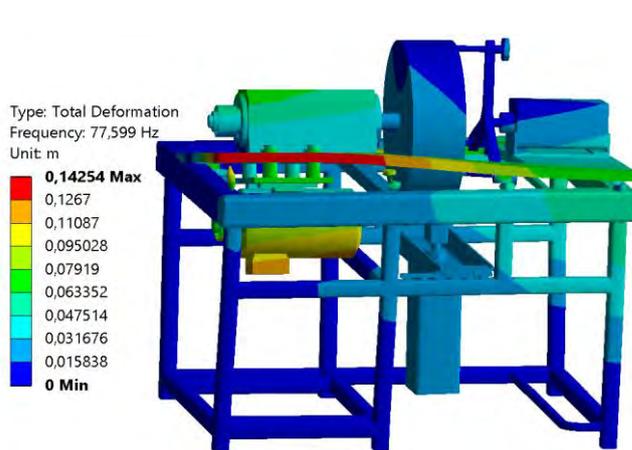


Рисунок 170. Девятая ФК

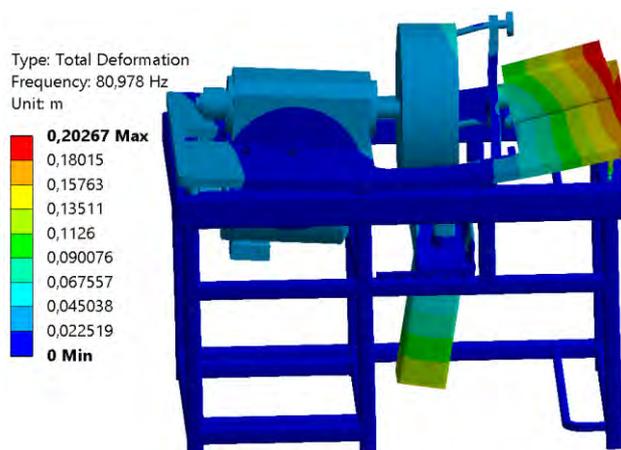


Рисунок 171. Десятая ФК

В таблице 45 приведены собственные частоты и эффективные массы для расчетного случая №6.

Таблица 45 – Собственные частоты и эффективные модули для расчетного случая №6

№	Частота, Гц	Эффективная масса, кг
1	15,533	153.2
2	21,629	161.1
3	24,271	71.95
4	33,476	201.0
5	47,39	87.52
6	53,475	92.48
7	64,507	58.83
8	67,127	23.11
9	77,599	50.09
10	80,978	26.24

Из анализа таблицы 45 видно, что расчетные собственные частоты не совпадают с рабочими частотами конструкции.

3.3.2.9 Заключение по разделу

Анализ результатов проведенного модального анализа на упрощенной модели изделия показал, минимальная разница расчетной собственной частоты от рабочей соответствует первому расчетному случаю и составляет 0,204 Гц, или 12,24 об/мин для частоты вращения 1800 об/мин.

Учитывая приближенный характер модели, это значение можно считать опасно близким к рабочей частоте. В случае возникновения резонансных явлений при опытной отработке конструкции можно рекомендовать использование сменных, виброопор, либо виброопор с регулируемой жесткостью.

Например, в таблице 46 приведены результаты анализа для расчетного случая №1 при увеличенной вдвое жесткости виброопор.

Таблица 46 – Собственные частоты и эффективные модули для расчетного случая №1 при увеличенной жесткости виброопор

№	Частота, Гц	Эффективная масса, кг
1	16,731	137,5
2	21,13	198,8
3	26,233	60,24
4	45,891	120,3
5	56,543	77,39
6	62,61	23,71
7	66,301	61,14
8	68,296	61,81
9	78,227	32,23
10	90,266	38,88

Как видно из данных таблицы 46, наименьшее отклонение собственной частоты конструкции от рабочей в данном случае составило 1,731 Гц (104 об/мин).

Таким образом, регулировка жесткости виброопор позволяет отстроиться от резонансных эффектов в случае их возникновения.

Кроме того, демпфирующее действие пневматических цилиндров натяжения ремня, осевого и радиального нагружения контролируемого подшипника несомненно внесет положительные коррективы. В любом случае, требуется практическая апробация на различных видах и типоразмерах подшипников.

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

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ11	Богданов Дмитрий Андреевич

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	ОМШ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств

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

1. Себестоимость Установки	Не более 800 000 руб.
----------------------------	-----------------------

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Расчет лимитных цен	Минимальная цена – 562 050 руб. Максимальная цена – 1 495 322 руб.
2. Расчет лимитных цен в процентном соотношении к себестоимости Установки	Минимальный процент от себестоимости – 70% Максимальный процент от себестоимости – 187%

Перечень графического материала:

1. Карта оценки себестоимости изготовления Основания.
2. Карта оценки себестоимости изготовления Модуля вращения внутреннего кольца подшипника.
3. Карта оценки себестоимости изготовления Модуля радиального нагружения.
4. Карта оценки себестоимости изготовления Модуля осевого нагружения.
5. Карта оценки себестоимости изготовления Модуля измерительного.
6. Карта оценки себестоимости изготовления Модуля подготовки сжатого воздуха.
7. Карта оценки себестоимости изготовления Модуля управления.
8. Итоговая карта оценки себестоимости Установки.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Маланина Вероника Анатольевна	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ11	Богданов Дмитрий Андреевич		

Разрабатываемый стенд для вибрационного контроля состояния подшипников качения (далее – Установка) предназначен для диагностики радиальных и радиально-упорных подшипников качения по вибрационным характеристикам. Установка имеет модульную конструкцию и состоит из следующих модулей:

- Основание;
- Модуль вращения внутреннего кольца подшипника;
- Модуль радиального нагружения;
- Модуль осевого нагружения;
- Модуль измерительный;
- Модуль подготовки сжатого воздуха;
- Модуль управления.

Согласно техническому заданию себестоимость Установки не должна превышать 800 000 рублей.

Данный расчет проводится для определения минимальной и максимальной проектной себестоимости Установки, позволяющий опираясь на достоинства и недостатки конструктивных особенностей составляющих основных модулей в совокупности с их стоимостью определить оптимальный конструктив на данном этапе.

Основная задача раздела заключается в определении технического решения, удовлетворяющего требованиям технического задания.

Расчет построен по методике укрупненного определения возможного диапазона изменения стоимостей комплектующих или технологических процессов, планируемых к реализации в каждом из возможных вариантов исполнения.

В рамках данного раздела проведен проектный расчет стоимости основных модулей в рублевом эквиваленте, а также в процентном соотношении к предельно допустимой себестоимости с использованием программного обеспечения MindManager.

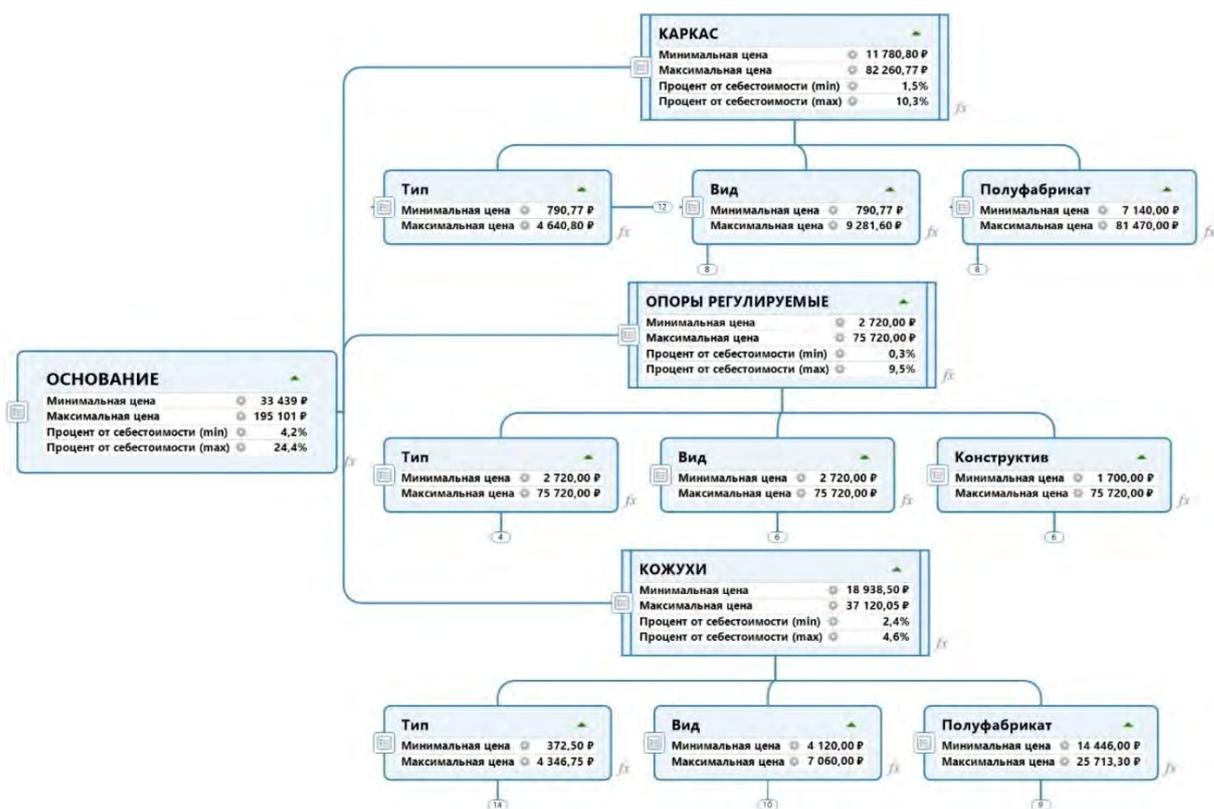


Рисунок 172. Карта оценки себестоимости изготовления Основания (первый и второй уровень)

На рисунке 172 представлен расчет интервала изменения себестоимости изготовления Основания. В зависимости от выбранной технологии, комплектующих и расходных материалов отличие минимальной себестоимости от максимальной может составить 5,81 раз.

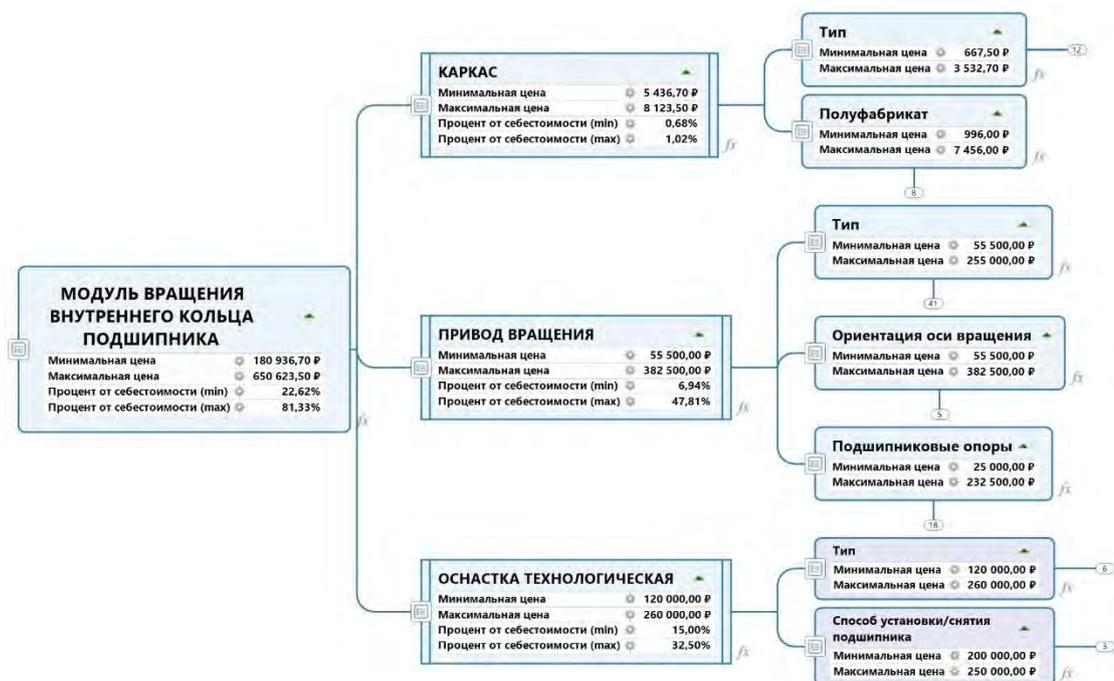


Рисунок 173. Карта оценки себестоимости изготовления Модуля вращения внутреннего кольца подшипника (первый и второй уровень)

На рисунке 173 представлен расчет интервала изменения себестоимости изготовления Модуля вращения внутреннего кольца подшипника. В зависимости от выбранной технологии, комплектующих и расходных материалов отличие минимальной себестоимости от максимальной может составить 3,61 раз.

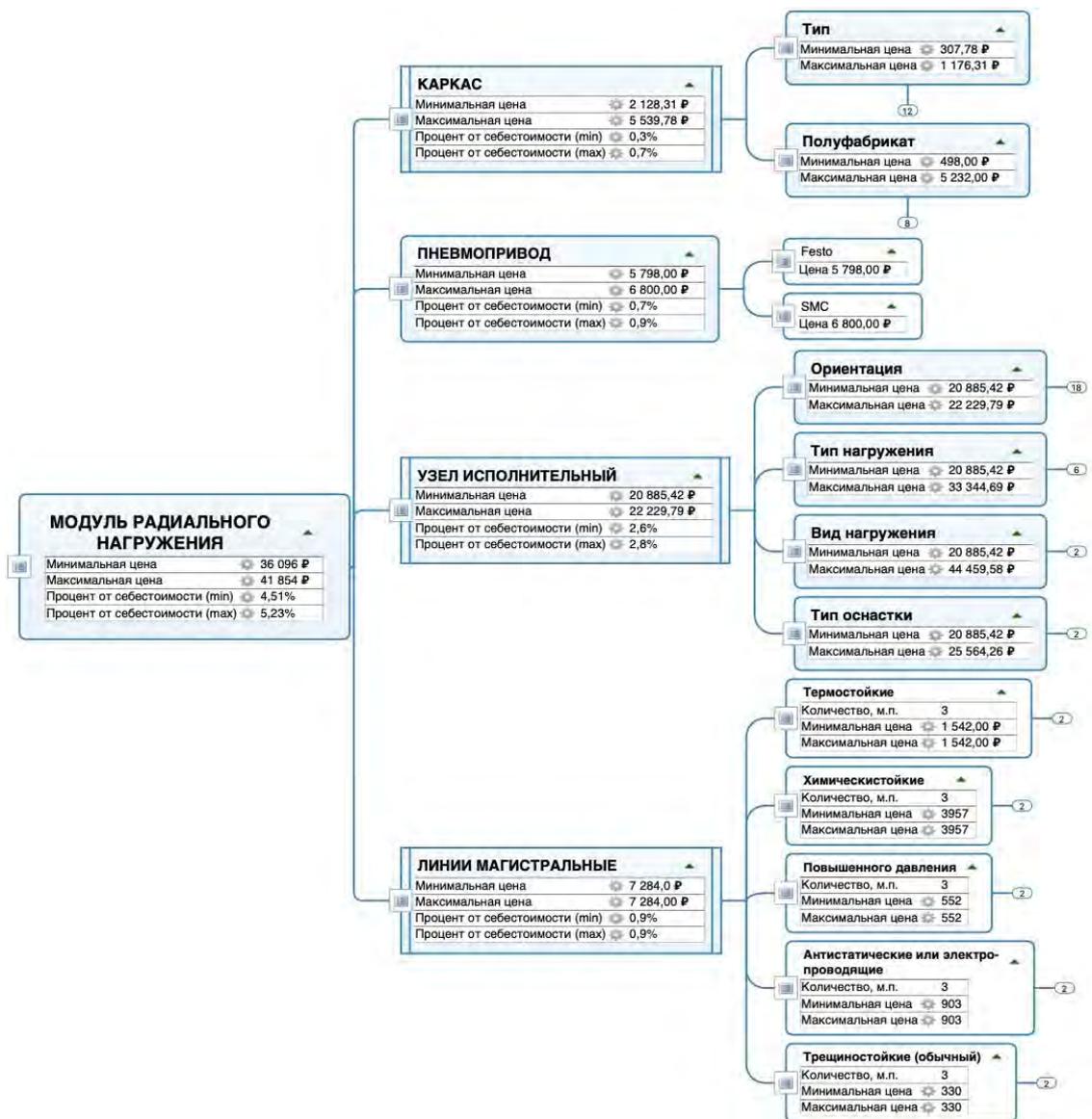


Рисунок 174. Карта оценки себестоимости изготовления Модуля радиального нагружения (первый и второй уровень)

На рисунке 174 представлен расчет интервала изменения себестоимости изготовления Модуля радиального нагружения. В зависимости от выбранной технологии, комплектующих и расходных материалов отличие минимальной себестоимости от максимальной может составить 1,16 раз.

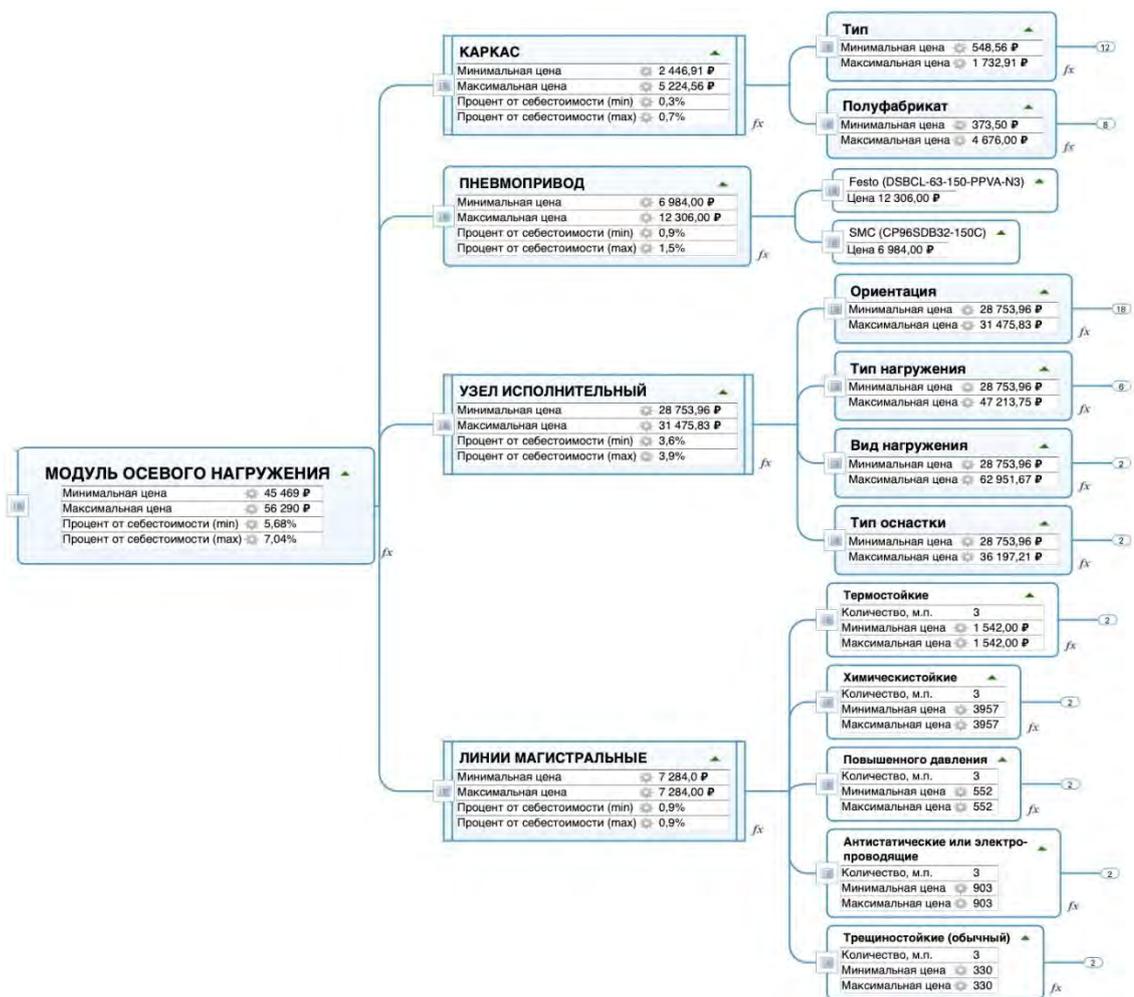


Рисунок 175. Карта оценки себестоимости изготовления Модуля осевого нагружения (первый и второй уровень)

На рисунке 175 представлен расчет интервала изменения себестоимости изготовления Модуля осевого нагружения. В зависимости от выбранной технологии, комплектующих и расходных материалов отличие минимальной себестоимости от максимальной может составить 1,24 раз.

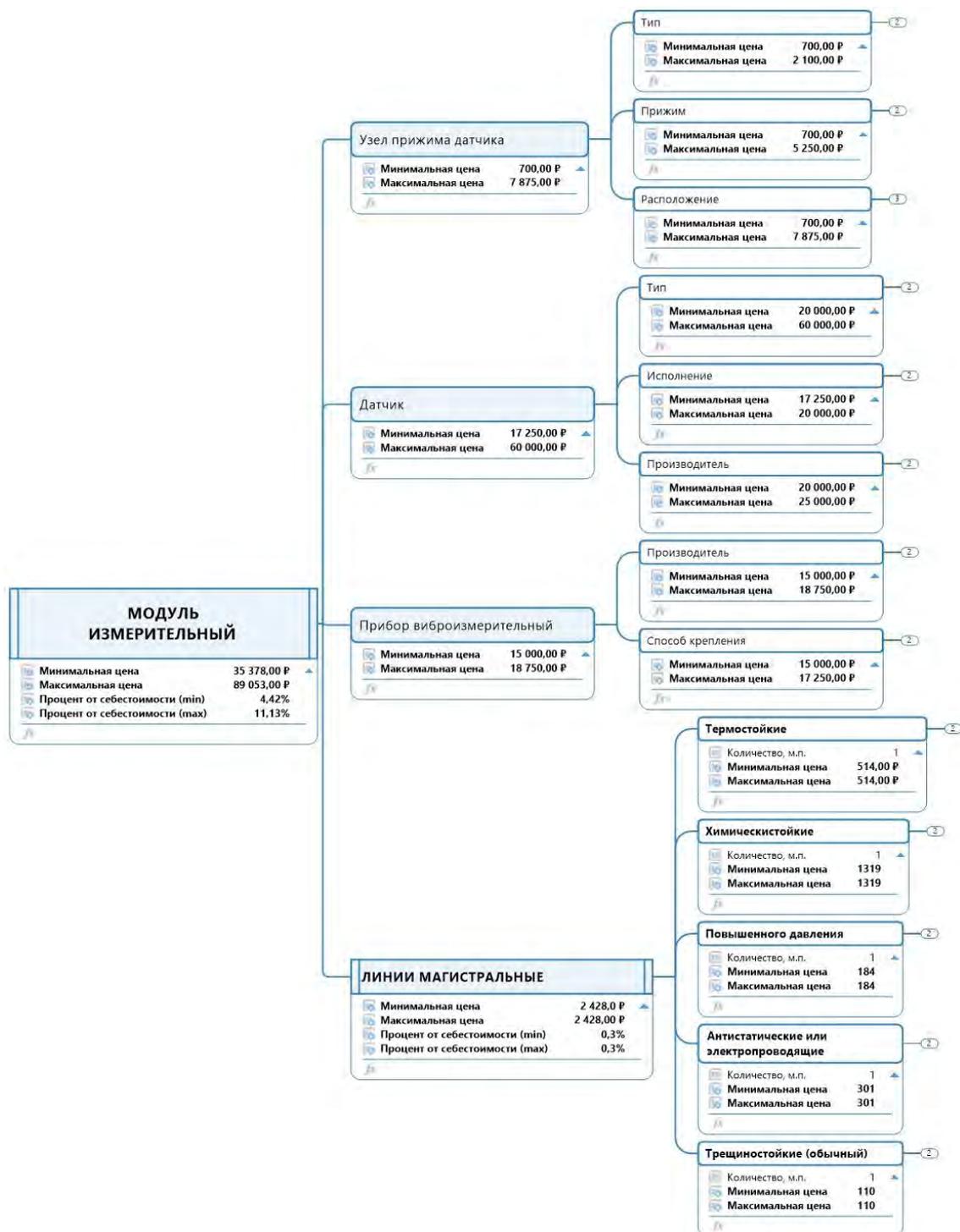


Рисунок 176. Карта оценки себестоимости изготовления Модуля измерительного (первый и второй уровень)

На рисунке 176 представлен расчет интервала изменения себестоимости изготовления Модуля измерительного. В зависимости от выбранной технологии, комплектующих и расходных материалов отличие минимальной себестоимости от максимальной может составить 2,52 раз.



Рисунок 177. Карта оценки себестоимости изготовления Модуля подготовки сжатого воздуха (первый и второй уровень)

На рисунке 177 представлен расчет интервала изменения себестоимости изготовления Модуля подготовки сжатого воздуха. В зависимости от выбранных комплектующих отличие минимальной себестоимости от максимальной может составить 1,11 раз. В данном случае выбор варианта реализации будет определяться доступностью комплектующих и логистическими издержками. Переход между вариантами исполнения не составляет существенных затрат.

На рисунке 178 представлен расчет интервала изменения себестоимости изготовления Модуля управления. В зависимости от выбранных комплектующих отличие минимальной себестоимости от максимальной может составить 2,11 раз. В данном случае выбор варианта реализации будет определяться доступностью комплектующих и логистическими издержками. Переход между вариантами исполнения не составляет существенных затрат.

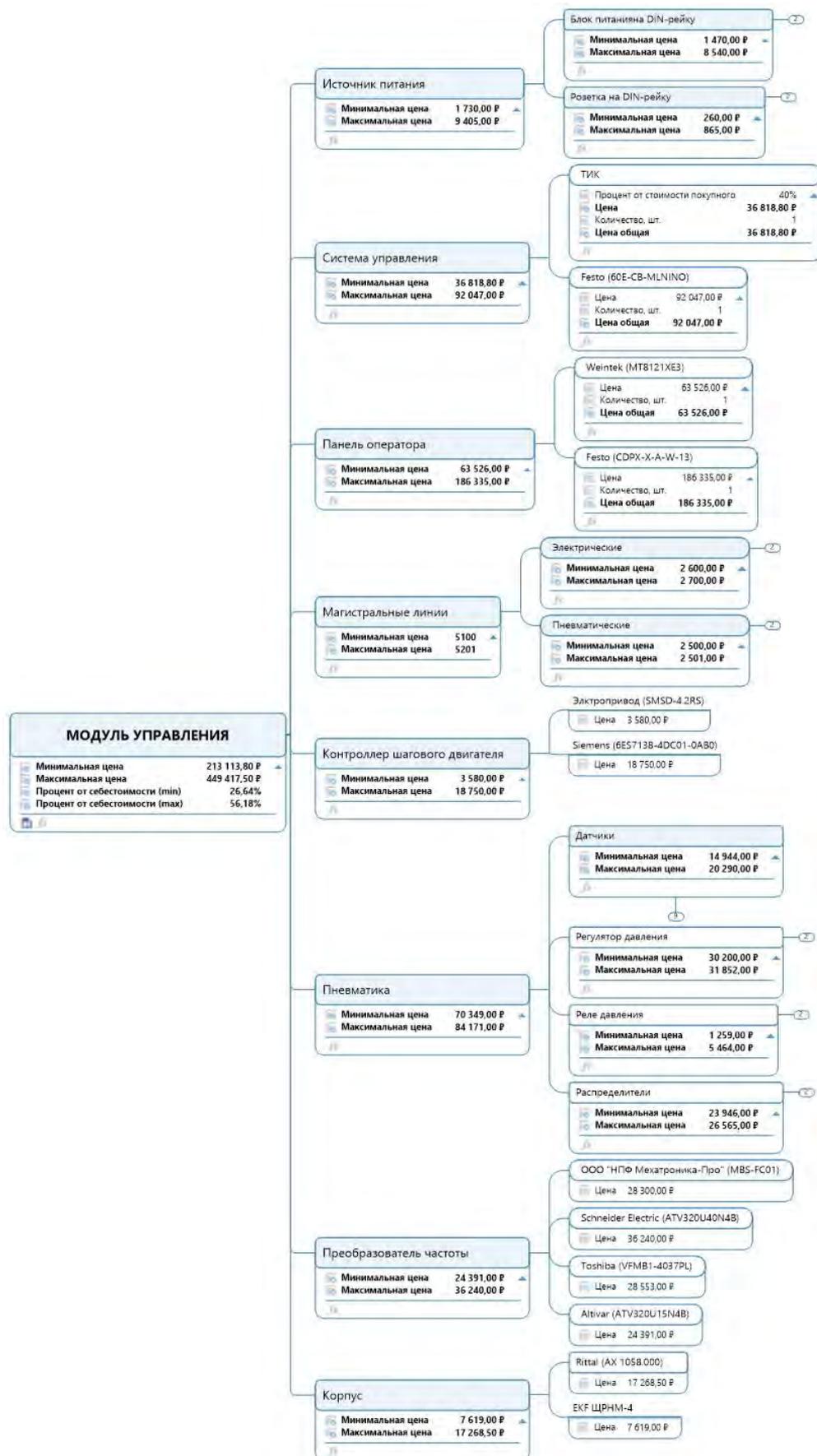


Рисунок 178. Карта оценки себестоимости изготовления Модуля управления (первый и второй уровень)

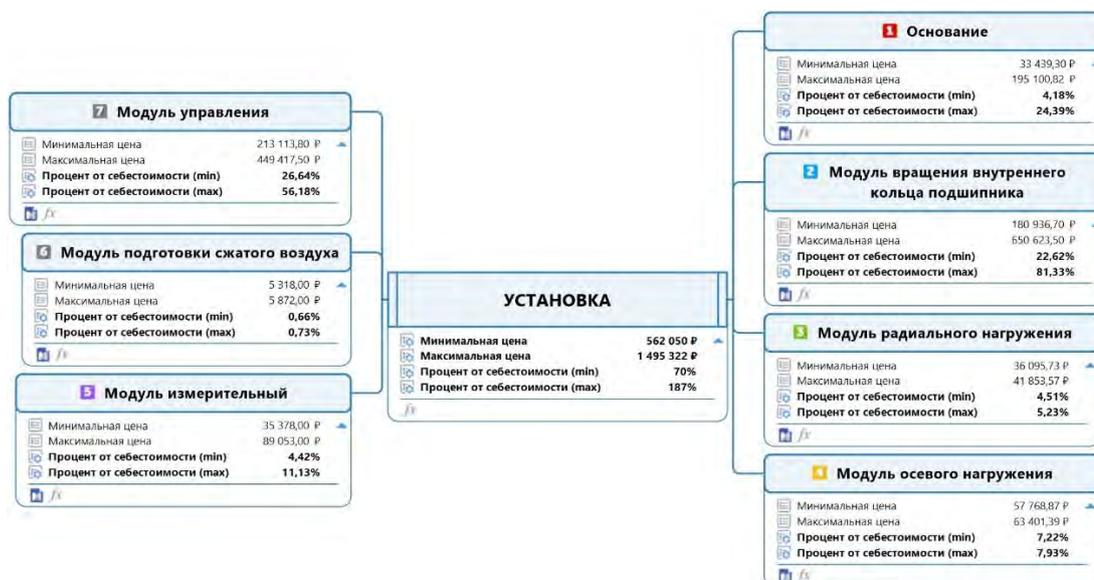


Рисунок 179. Итоговая карта оценки себестоимости Установки

На рисунке 179 представлен итоговый проектный расчет минимальной и максимальной себестоимости изготовления Установки. В зависимости от выбранной технологии, комплектующих и расходных материалов отличие минимальной себестоимости от максимальной может составить 2,66 раза.

На рисунках представлена оценка проектной себестоимости изготовления Установки, из которой виден достаточно широкий диапазон различия минимальной и максимальной себестоимостей.

При подсчете суммарной себестоимости Установки, при наличии запаса возможен выбор более качественных материалов и технологий для улучшения характеристик и сокращения сроков производства Установки. Рекомендуется выбор окончательного варианта исполнения делать в первую очередь основываясь на конструктивных особенностях и вариациях дизайна Установки в целом.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ11	Богданов Дмитрий Андреевич

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	ОМШ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств

Тема ВКР:

Стенд для вибрационного контроля состояния подшипников качения	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения 	<p>Объект исследования: подшипник качения. Область применения: машиностроение Рабочая зона: офис. Размеры помещения: 5x3 м. Количество и наименование оборудования рабочей зоны: персональный компьютер. Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне: работа на персональном компьютере.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Трудовой кодекс РФ от 30.12.2001 № 197-ФЗ ГОСТ 12.2.032-78 Рабочее место при выполнении работ сидя. СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах».</p>
<p>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>Вредные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Отсутствие или недостаток необходимого освещения. 2. Зрительное напряжение. 3. Нервно-психические перегрузки. 4. Повышенный уровень электромагнитных излучений. <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: средства вентиляции и очистки воздуха, дополнительные источники света, зоны отдыха.</p> <p>Расчет производится по фактору отсутствия или недостатка необходимого искусственного освещения.</p>
<p>3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения</p>	<p>Воздействие на селитебную зону: образование отходов от использования компьютеров и периферийных устройств, отходы жизнедеятельности.</p> <p>Воздействие на гидросферу: стоковые отходы, мусор, бытовая химия.</p> <p>Воздействие на атмосферу: попадание паров смазочных масел в воздух при испарении.</p>

4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения	Возможные ЧС: пожар, взрыв, короткое замыкание. Наиболее типичная ЧС: пожар.
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ11	Богданов Дмитрий Андреевич		

Введение

Основным видом работы при написании ВКР было, проведение аналитического обзора, 3D моделирование, проведение расчетов, разработка конструкторской документации, составление пояснительной записки. Основным местом работы над ВКР служил офис. Размеры помещения: 5х3 м. Рабочее место включает в себя персональный компьютер, стул, стол.

Вся вышеперечисленная работа производилась за компьютером. Действующее законодательство предполагает право работника на безопасные условия труда [15]. Обеспечение безопасной жизнедеятельности инженера-конструктора в значительной степени зависит от правильной оценки опасных и вредных производственных факторов.

В данном разделе более подробно рассмотрим некоторые опасные и вредные факторы, воздействующие на инженера.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Работа инженера по виду трудовой деятельности относится к группе В – творческая работа в режиме диалога с ЭВМ, а по напряженности работы ко II категории тяжести [16].

Согласно Статье 91 ТК РФ нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю.

Согласно Статье 92 ТК РФ сокращенная продолжительность рабочего времени устанавливается: для работников в возрасте до 16 лет – не более 24 часов в неделю; для работников в возрасте 60-80 лет – не более 35 часов в неделю; для работников, являющихся инвалидами I или II группы, - не более 35 часов в неделю; для работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, – не более 36 часов в неделю.

Согласно Статье 94 ТК РФ продолжительность ежедневной работы (смены) не может превышать: для работников в возрасте 15-16 лет – 5 часов, в возрасте 16-18 лет – 7 часов; для работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда: при 36-часовой рабочей неделе – 8 часов; при 30-часовой рабочей неделе и менее – 6 часов.

Площадь на одно постоянное рабочее место пользователей персональных компьютеров на базе электронно-лучевой трубки, должна составлять не менее 6 м², на базе плоских дискретных экранов – не менее 4,5 м². Оснащение светопроницаемых конструкций и оконных проёмов должно позволять регулировать параметры световой среды в помещении. Персональные компьютеры следует размещать таким образом, чтобы показатели освещённости не превышали установленных гигиенических нормативов, утверждённых в соответствии с пунктом 2 статьи 38 ФЗ № 52 «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» [17].

Конструкцией рабочего места должно быть обеспечено выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля. Зоны досягаемости моторного поля в вертикальной и горизонтальной плоскостях для средних размеров тела человека приведены на рисунке 180.

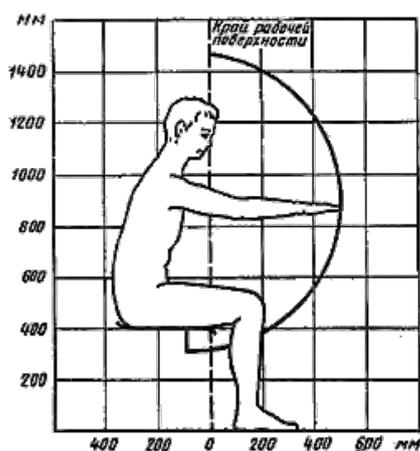


Рисунок 180. Зона досягаемости монитормого поля в вертикальной плоскости

Выполнение трудовых операций "часто" и "очень часто" должно быть обеспечено в пределах зоны легкой досягаемости и оптимальной зоны моторного поля, приведенных на рисунке 181 (1 – оптимальная зона моторного поля; 2 – зона легкой досягаемости моторного поля; 3 – зона досягаемости моторного поля).

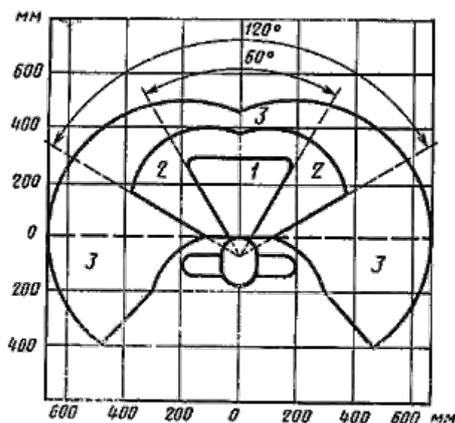


Рисунок 181. Зоны для выполнения ручных операций и размещения органов управления

При проектировании оборудования и организации рабочего места следует учитывать антропометрические показатели женщин или мужчин если оборудование обслуживают и женщины, и мужчины. Конструкцией производственного оборудования и рабочего места должно быть обеспечено оптимальное положение работающего, которое достигается регулированием: высоты рабочей поверхности, сиденья и пространства для ног. Регулируемые параметры следует выбирать по номограмме, приведенной на рисунке 182.

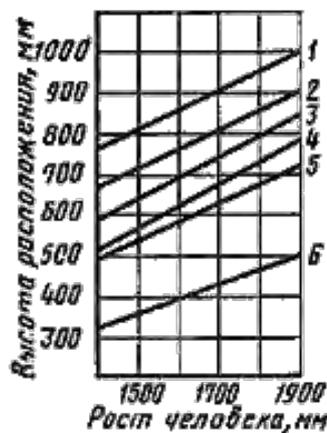


Рисунок 182. Номограмма зависимости высоты рабочей поверхности для разных видов работ (1-4), пространства для ног (5) и высоты рабочего сиденья (6) от роста человека

В случае, когда высота нерегулируемая, высоту рабочей поверхности устанавливают по номограмме (рисунок 182) для работающего ростом 1800 мм. Оптимальная рабочая поза для работающих более низкого роста достигается за

счет увеличения высоты рабочего сиденья и подставки для ног на величину, равную разности между высотой рабочей поверхности для работающего ростом 1800 мм и высотой рабочей поверхности, оптимальной для роста данного работающего.

Очень часто используемые средства отображения информации, требующие точного и быстрого считывания показаний, следует располагать в вертикальной плоскости под углом $\pm 15^\circ$ от нормальной линии взгляда и в горизонтальной плоскости под углом $\pm 15^\circ$ от сагиттальной плоскости (рисунок 183). [18]

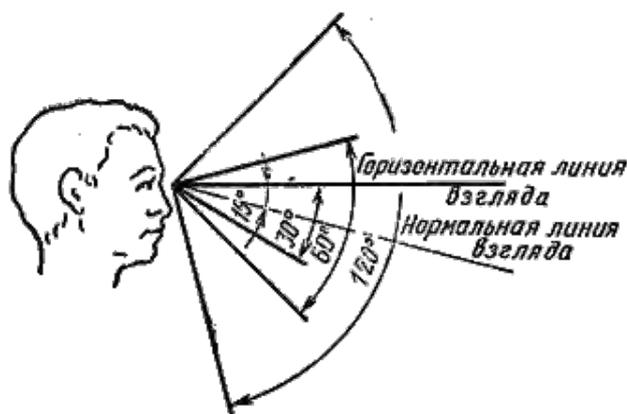


Рисунок 183. Зоны зрительного наблюдения в вертикальной плоскости

5.2 Производственная безопасность

Возможные вредные и опасные факторы, присутствующие при выполнении ВКР представлены в таблице 47.

Таблица 47 – Возможные вредные и опасные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
Отсутствие или недостаток необходимого освещения	СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение
Зрительное напряжение	ГОСТ Р 50948-2001 «Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования к безопасности»
Нервно-психические перегрузки	Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 №197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)

Продолжение таблицы 47

Повышенный уровень электромагнитных излучений	СанПиН 2.2.4.3359-16 "Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах
Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

5.3 Анализ вредных и опасных производственных факторов

5.3.1 Отсутствие или недостаток необходимого освещения

Плохая освещенность рабочего места (как и любого другого, где человек проводит много времени) влияет на работоспособность: появляется усталость, сонливость и т.д. От недостатка света может ухудшиться зрение. Помещения с постоянным пребыванием людей должны иметь естественное освещение [19]. Коэффициент естественной освещенности при верхнем освещении $e_n = 3\%$, при боковом освещении $e_n = 1\%$. Освещенность рабочих поверхностей при комбинированном искусственном освещении 400/200 лк, при общем освещении 300 лк.

Помещения для эксплуатации ПЭВМ должны иметь естественное и искусственное освещение. Эксплуатация ПЭВМ в помещениях без естественного освещения допускается только при соответствующем обосновании и наличии положительного санитарно-эпидемиологического заключения, выданного в установленном порядке. Естественное и искусственное освещение должно соответствовать требованиям действующей нормативной документации. Окна в помещениях, где эксплуатируется вычислительная техника, преимущественно должны быть ориентированы на север и северо-восток. Оконные проемы должны быть оборудованы регулируемыми устройствами.

Основными профилактическими мероприятиями являются: правильно спроектированное и рационально выполненное освещение производственных помещений, рациональные режимы труда и отдыха, лечебно-профилактические меры, а также организация и проведение обязательных предварительных и периодических медицинских осмотров.

5.3.2 Зрительное напряжение

Для точного считывания информации и обеспечения комфортных условий ее восприятия работа с дисплеями должна проводиться при таких сочетаниях значений яркости и контраста изображения, внешней освещенности экрана, углового размера знака и угла наблюдения экрана, которые входят в оптимальные или предельно допустимые (при кратковременной работе) диапазоны [20].

Дисплей на рабочем месте оператора должен располагаться так, чтобы изображение в любой его части было различимо без необходимости поднять или опустить голову. Дисплей на рабочем месте должен быть установлен ниже уровня глаз оператора. Угол наблюдения экрана оператором относительно горизонтальной линии взгляда не должен превышать 60° [21]. Конструкция дисплея должна предусматривать наличие органов регулирования яркости и контраста.

5.3.3 Нервно-психические перегрузки

Нервно-психические перегрузки подразделяются на: умственное перенапряжение, перенапряженность анализаторов, монотонность труда, эмоциональные перегрузки [22].

К показателям напряженности трудового процесса относят: длительность сосредоточенного наблюдения; активное наблюдение за ходом производства; число производственных объектов одновременного наблюдения; плотность сигналов (световых, звуковых) и сообщений в единицу времени; нагрузка на слуховой и голосовой анализатор; работа с оптическими приборами.

5.3.4 Повышенный уровень электромагнитных излучений

До недавнего времени воздействие электромагнитных полей считались безвредными. Однако, электромагнитные поля, характеризующиеся напряженностями электрических и магнитных полей, оказывает вредное воздействие на организм человек. Основным источником этих проблем, являются дисплеи (мониторы), особенно дисплеи с электронно-лучевыми трубками. Они представляют собой источники наиболее вредных излучений, неблагоприятно влияющих

на здоровье программиста. Электромагнитное поле имеет электрическую и магнитную составляющую. Считается, что магнитная составляющая вызывает большую реакцию, чем электрическая.

Может возникнуть опасность по уровням напряженности электромагнитного поля. На расстоянии 5-10 см от экрана и корпуса монитора уровни напряженности могут достигать 140 В/м по электрической составляющей, что значительно превышает допустимые значения. Допустимые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений от монитора представлены в таблице 48.

Таблица 48 – 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		15 кВ/м

5.4 Расчет системы искусственного освещения

Размеры помещения 5х3 м с высотой 2,5 м.

Был выбран светильник светодиодный мощностью 40 Вт и световым потоком 2300 Лм.

Выбранный светильник расположен непосредственно на потолке (рисунок 184). Минимальной высотой подвеса для светодиодных светильников является 2 м. В данном случае высота подвеса 2,44 м, что выше минимального значения.

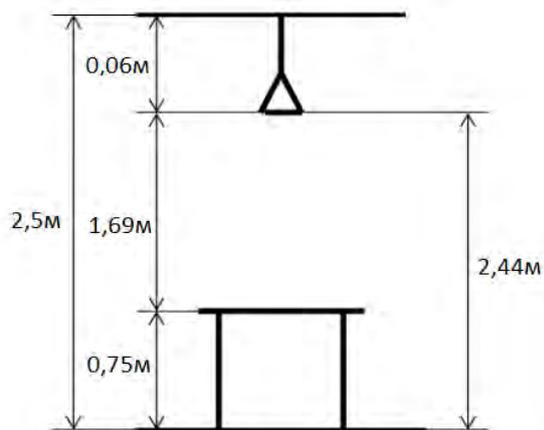


Рисунок 184. Основные расчетные параметры искусственного освещения

Расчётная высота светильника:

$$2,44 - 0,75 = 1,69 \text{ м.}$$

Принято решение использовать светильники в количестве трех штук (рисунок 185).

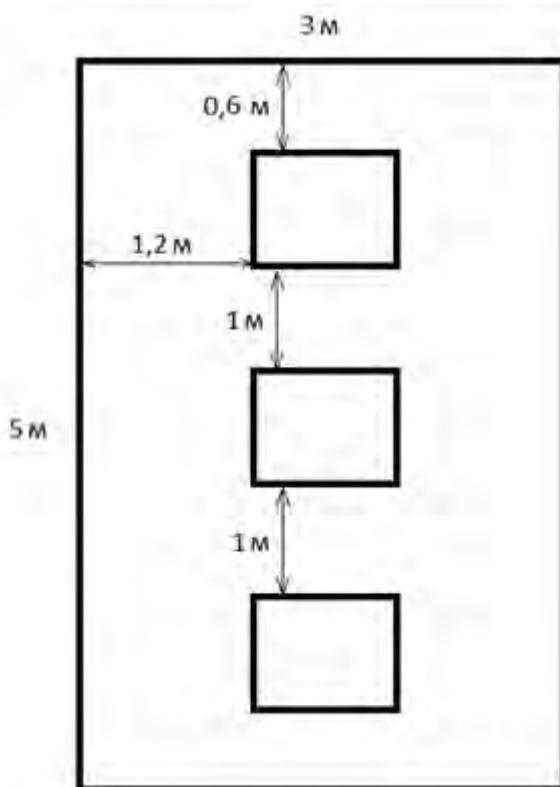


Рисунок 185. Схема размещения светильников в помещении

Индекс помещения:

$$i = \frac{5 \cdot 3}{1,69 \cdot (5 + 3)} = 1,1.$$

В рабочем помещении имеем свежепобеленный потолок ($\rho_{\text{п}} = 70 \%$) и стены с окном без штор ($\rho_{\text{ст}} = 50 \%$). Из таблицы 49 путем интерполяции делаем вывод о коэффициенте использования светового потока. Он составляем 47%.

Таблица 49 – Коэффициенты использования светового потока для светодиодных светильников

	потолок	0,8	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5
	стены	0,5	0,5	0,3	0,5	0,3	0,3
Индекс помещения	0,60	0,33	0,32	0,25	0,30	0,24	0,24
	0,80	0,41	0,39	0,32	0,36	0,30	0,29
	1,00	0,47	0,45	0,38	0,42	0,35	0,34
	1,25	0,53	0,51	0,44	0,47	0,41	0,39
	1,50	0,58	0,55	0,48	0,51	0,45	0,43
	2,00	0,65	0,62	0,56	0,57	0,52	0,49
	2,50	0,70	0,67	0,61	0,61	0,56	0,53
	3,00	0,64	0,71	0,65	0,64	0,60	0,56
	3,00	0,64	0,71	0,65	0,64	0,60	0,56
	5,00	0,83	0,78	0,74	0,71	0,68	0,62

Нормативная освещённость для офисов, где используются компьютеры – 200 лк. [23]

Рассчитаем общий световой поток Φ :

$$\Phi = \frac{200 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 1,1}{3 \cdot 0,47} = 2340 \text{ Лм.}$$

Проверка. Был выбран светильник со световым потоком 2300 Лм.

$$\frac{2300 - 2340}{2300} \cdot 100\% = -1,7\%$$

Проверка пройдена.

Так как система состоит из трех светильников, то её номинальная мощность будет равна сумме номинальных мощностей всех светильников, а именно $40 \cdot 3 = 120 \text{ Вт}$.

5.5 Экологическая безопасность

В данном разделе рассматривается только разработка конструкции, следовательно, загрязнения от производства установки не будут учитываться. Но даже при работе за компьютером человек загрязняет окружающую среду.

В процессе деятельности человек создаёт бытовой мусор, который в свою очередь должен быть утилизирован и переработан по правилам для того, чтобы не происходило загрязнения окружающей среды. В литосферу могут попадать не только бытовой мусор, но и отходы от использования компьютеров и периферийных устройств.

К группе однородных отходов "Оборудование компьютерное, электронное, оптическое, утратившее потребительские свойства" (далее - отходы электронного оборудования) относятся виды отходов, включенные в подтип видов отходов с кодом 4 81 000 00 00 0 "Оборудование компьютерное, электронное, оптическое, утратившее потребительские свойства" ФККО.

Согласно Федеральному классификационному каталогу отходов к отходам IV класса опасности (малоопасные отходы) относят:

4 81 206 11 52 4 – компьютеры портативные (ноутбуки), утратившие потребительские свойства;

4 81 204 01 52 4 – клавиатура, манипулятор "мышь" с соединительными проводами, утратившие потребительские свойства.

Согласно приказу Минприроды России от 11.06.2021 N 399 «Об утверждении требований при обращении с группами однородных отходов I-V классов опасности», отходы электронного оборудования подлежат сбору, накоплению, хранению, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию, условия и способы которых должны обеспечивать безопасность окружающей среды и здоровья человека. Запрещается обезвреживать и утилизировать отходы электронного оборудования путем их сжигания, за исключением случаев применения пирометаллургического или гидromеталлургического методов, позволяющих извлекать полезные компоненты из печатных плат (с последующей обязательной нейтрализацией всех отходящих газов и элементов).

Приказ Минприроды России об утилизации электронного оборудования вступил в силу с 1 марта 2022 года. В нем четко прописана обязанность для юридических лиц передавать такие отходы компаниям, которые на основании лицензии ведут деятельность по сбору, транспортировке, обработке, переработке, обезвреживанию и хранению отходов, отнесенных к группе «Оборудование компьютерное, электронное, оптическое, утратившее потребительские свойства».

Фирма, которая занимается переработкой отходов электронного оборудования должна иметь соответствующую лицензию, которая подтверждает наличие у нее мощностей для транспортировки, обработки, хранения, обезвреживания.

Компания обязана передать старое и ненужное оборудование на утилизацию в течение 11 месяцев с момента образования.

Граждане имеют право передавать отходы электронного оборудования следующим лицам:

юридическим лицам и индивидуальным предпринимателям, оказывающим услуги по обслуживанию и ремонту оборудования компьютерного, электронного, оптического или осуществляющим оптовую и (или) розничную торговлю таким оборудованием, с целью их накопления и последующей передачи на обработку и (или) утилизацию юридическим лицам и индивидуальным предпринимателям, осуществляющим на законных основаниях деятельность по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию и хранению видов отходов, отнесенных к группе однородных отходов "Отходы электронного оборудования", при наличии публичной оферты со стороны указанных лиц;

юридическим лицам и индивидуальным предпринимателям, осуществляющим прием отходов от граждан с целью их накопления и последующей передачи на обработку и (или) утилизацию юридическим лицам и индивидуальным предпринимателям, осуществляющим на законных основаниях деятельность по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию и хранению видов

отходов, отнесенных к группе однородных отходов "Отходы электронного оборудования", при наличии публичной оферты со стороны этих юридических лиц и индивидуальных предпринимателей;

юридическим лицам и индивидуальным предпринимателям, осуществляющим на законных основаниях деятельность по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию и хранению видов отходов, отнесенных к группе однородных отходов "Отходы электронного оборудования", осуществляющим сбор отходов от граждан на условиях публичного договора.

Также в результате деятельности человек загрязняет гидросферу отходами жизнедеятельности (стоковые воды), мусором и различной бытовой химией.

Для защиты окружающей среды, человек должен приложить максимальные усилия. Мусор, бытовые отходы, неработающая техника должны быть сортированы и правильно утилизированы. Для уборки должны быть использованы экологически безопасные средства.

5.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее типичная ЧС – пожар. Пожаром называется неконтролируемый процесс горения вне специального очага, наносящий материальный ущерб, вред здоровью и жизни людей, интересам общества и государства.

В помещениях офисного типа типичными причинами возникновения пожара являются: короткие замыкания, использование неисправного электрооборудования, применение обогревательных приборов открытого типа, курение в неположенных местах, неправильное обращение с оборудованием или опасными веществами, использование пиротехнических приспособлений.

Рассмотрим порядок действий, когда пожар случился на рабочем месте:

Сообщить о возгорании в пожарную охрану, закрыть окна и форточки, по возможности отключить электроприборы из сети.

Использовать первичные средства пожаротушения, такие как переносные и передвижные огнетушители; пожарные краны; пожарный инвентарь; покрывала для изоляции очага возгорания. [24]

Если ликвидировать очаг горения самостоятельно невозможно, необходимо покинуть помещение, закрыть дверь, не запирая ее на замок.

Оповестить о происшествии работников и принять меры по их эвакуации.

При необходимости отключить электроэнергию и вентиляцию.

Покинуть опасную зону и действовать по указанию администрации или пожарной охраны.

Вывод по разделу

Значение всех производственных факторов на изучаемом рабочем месте соответствует нормам, которые были продемонстрированы в данном разделе.

Рабочее помещение относится к I категории по электробезопасности согласно ПУЭ (Правила устройства электроустановок) «помещения без повышенной опасности».

Согласно правилам по охране труда работники данного помещения должны иметь I группу по электробезопасности, которая распространяется на персонал, не относящийся к электротехническому и электротехнологическому, то есть напрямую не связанный с выполнением работ в электроустановках, но для которого существует риск поражения электрическим током при нестандартных ситуациях, отклонении от нормального режима работы оборудования, при поломке оборудования, замыкании.

Работники с I группой должны иметь элементарные представления об опасности электрического тока и мерах безопасности при работе с электрооборудованием. Работники также должны быть ознакомлены с правилами оказания первой помощи при электротравмах. [25]

Категория офисных площадей относится, как правило, к В1-В4 (пожароопасность) по взрывопожарной и пожарной опасности согласно СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности и зависит от проведенного расчета пожарного риска. Связано это с тем, что основным оборудованием офисов являются не только компьютеры и периферийная техника, но и кабели освеще-

ния и интернета, а также мебель, изготовленная из различных композитных материалов, выделяющих при горении формальдегиды и другие химические вещества.

Выполняемая работа относится к категории 1б (работы, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и некоторым физическим напряжением) по тяжести труда согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

В письме от 29 сентября 2016 г. N AA-03-04-32/20054 Росприроднадзор рассказал об отнесении объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III, IV категорий (в соответствии с постановлением правительства от 28.09.2015 N 1029), в котором офисные помещения отнесли к IV категории загрязнителей окружающей среды согласно Федеральному закону от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 14.07.2022) "Об охране окружающей среды".

Заключение

В первом разделе определена классификация подшипников качения, проанализированы дефекты подшипников качения, проведен обзор аналогов станда, выбран прототип, определено его устройство и принцип работы.

Во втором разделе определено назначение и область применения станда, описана его техническая характеристика и состав, разработаны принципиальные схемы возможных вариантов исполнения и описан их принцип работы, разработан оптимальный вариант компоновки станда, выполнены кинематические расчеты модулей.

В третьем разделе выбран и описан итоговый вариант исполнения станда, выполнено теоретическое моделирование работы модулей станда, выполнены проектировочные расчеты, разработана конструкция, выполнены инженерные расчеты по разработанной модели станда.

В четвертом разделе определена минимальная и максимальная себестоимость станда.

В пятом разделе определены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, проанализированы опасные и вредные факторы, описано обеспечение экологической безопасности и действия в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения.

Список используемых источников

1. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. Том 2. 8 изд. М.: Машиностроение, 2001. 912 с.
2. Орлов П.И. Основы конструирования. Кн. 2. 2 изд. М.: Машиностроение, 1977. 574 с.
3. Коварский М.Е, Воловик А.П., Зайцев В.А. Об эффективности применения в малошумном электрооборудовании подшипников качения // Электротехника. 2010. №9. С. 16-19.
4. Повреждения подшипников качения и их причины. СПб.: SKF АВ, 2002. 47 с.
5. Диагностика подшипников качения // BALTECH URL: <http://vibropoint.ru/diagnostika-podshipnikov-kachenia/> (дата обращения: 11.05.2023).
6. Стенд входного контроля подшипников качения СВК-А // Научно-производственное предприятие "ТИК" URL: https://www.tik.perm.ru/produkcija/stendy/svk_a/ (дата обращения: 11.05.2023).
7. ПРОТОН-СПП-КВК // BALTECH URL: <https://baltech.ru/протон-спп-квк/> (дата обращения: 11.05.2023).
8. Стенды входного контроля подшипников качения СП-60М, СП-180М // ДИАМЕХ 2000 URL: http://diamech.ru/bearing_diagnostic.html (дата обращения: 11.05.2023).
9. Вибродиагностика подшипников качения и входной контроль подшипников: система КОМПАКС-РПП // Научно-производственный центр "Динамика" URL: <https://www.dynamics.ru/products/compacs-rpp/> (дата обращения: 11.05.2023).
10. FAG. Прибор для измерения радиального зазора с программой MC500 MGL 35-7 Стандартный прибор для радиальных подшипников качения с диаметром отверстия 3-120 мм. Руководство по эксплуатации. 2006. 25 с.

11. MVH 90E/200E, MVH 90EL/200EL // SKF URL: <https://www.skf.com/group/products/test-measuring-equipment/noise-and-vibration-testers/mvh-90e-200e-mvh-90el-200el> (дата обращения: 11.05.2023).
12. Общество с ограниченной ответственностью "Диамех 2000". Специальный вибродиагностический станок модели СП-180М. Руководство по эксплуатации. М.: 2014. 37 с.
13. Общество с ограниченной ответственностью "Диамех 2000". Виброизмерительный прибор "ЯШМА". Инструкция по эксплуатации. М.: 2014. 36 с.
14. Шейнблит А.Е. Курсовое проектирование деталей машин. 2 изд. Калининград: Янтарный сказ, 2002. 454 с.
15. Трудовой кодекс РФ от 30.12.2001 № 197-ФЗ.
16. СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания".
17. СП 2.2.3670-20 "Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда".
18. ГОСТ 12.2.032-78 Рабочее место при выполнении работ сидя.
19. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение.
20. ГОСТ Р 50948-2001 Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности.
21. ГОСТ Р 50923-96 Дисплей. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.
22. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов по безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
23. СНиП 23-05-95* Естественное и искусственное освещение.
24. ФЗ №123 22.07.2008 Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

25. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда. Электро-
безопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и то-
ков.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Literature Review

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ11	Богданов Дмитрий Андреевич		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМШ ИШНПТ	Буханченко Сергей Евгеньевич	к.т.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Преподаватель	Тайдонова Светлана Сергеевна	к.ф.н.		
Доцент	Полякова Наталья Владимировна	к.ф.н., доцент		

1 Overview of Bearings

The term "bearing" refers to a support component used to reduce friction between moving parts of mechanisms. Bearings are classified into rolling bearings, plain bearings, and linear bearings based on the type of motion they enable.

This study focuses on rolling bearings.

The classification of rolling bearings is presented in Figure A.1.

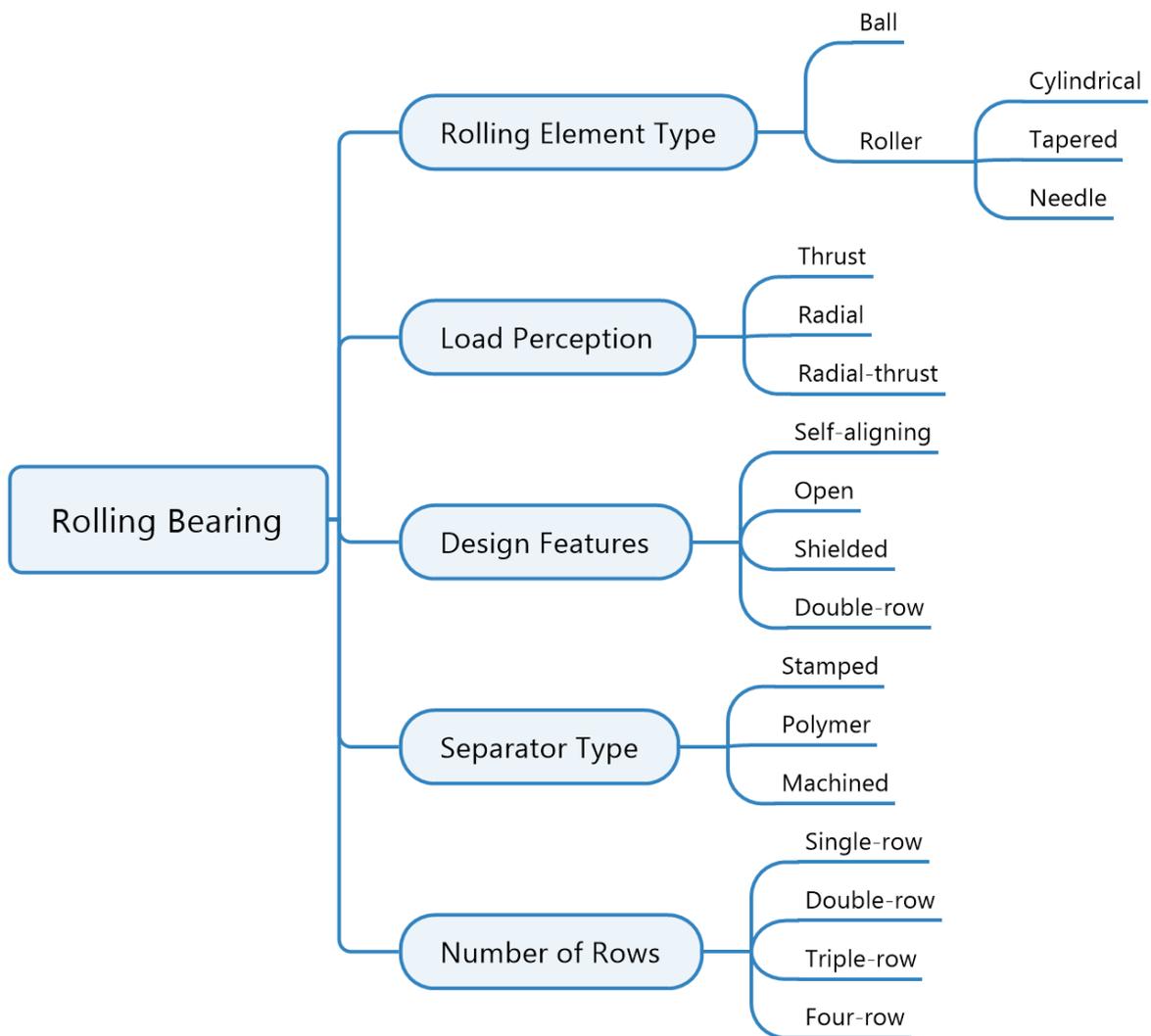


Figure A.1. Classification of rolling bearings

Rolling bearings primarily operate under rolling friction and consist of two rings, rolling elements, and a separator. The separator keeps the rolling elements separated from each other, maintains them at equal distances, and guides their motion.

The outer surface of the inner ring and the inner surface of the outer ring have grooves called raceways. These raceways serve as tracks for the rolling elements to roll along during bearing operation.

There are also rolling bearings without a separator. Such bearings have a larger number of rolling elements and higher load-carrying capacity, but their application is suitable for lower rotational speeds.

Bearings can handle radial loads, which act in a direction perpendicular to the bearing axis, and axial loads, which act in a direction parallel to the bearing axis.

Compared to plain bearings, rolling bearings have the following **advantages**:

more precise shaft alignment;

low friction coefficient;

minimal dependence of friction coefficient on operating conditions;

low resistance moments during startup;

compact axial dimensions;

ability to operate with low oil supply;

ability to work in a wide temperature range;

ability to operate in deep vacuum conditions.

The **disadvantages** of rolling bearings are:

larger radial dimensions and mass;

stiff operation, lack of load vibration damping;

noise during operation caused by form deviations;

complexity of installation and assembly of bearing units;

increased sensitivity to installation inaccuracies;

metal-to-metal contact between rolling elements and raceways.

Rolling bearings find application in various fields such as automobile wheels, aircraft, cranes, tractors, drive drums of tracked vehicles, electric motors, pumps, gear-boxes, spindles of metalworking machines, and more.

Rolling bearings are one of the sources of vibration that can generate a wide range of frequencies. The reduction of vibrations can be achieved through various design and technological measures, as well as by using high-quality bearings.

The wide range of applications and advantages compared to plain bearings make this study relevant.

2 Analysis of Rolling Bearing Defects

Each cause of bearing damage is reflected in a characteristic pattern of damage. Defects can be divided into primary and secondary, with the secondary defects being the direct cause of bearing failure. Primary defects and their causes create conditions for the occurrence of secondary defects.

Even primary damage can, in some cases, lead to the loss of bearing functionality. For example, wear and excessive clearance in the bearing can cause excessive vibrations and noise. Failed bearings often exhibit a combination of primary and secondary damage.

The classification of defects in rolling bearings is presented in Figure A.2.

Vibration diagnostics of rolling bearings can identify the following defects:

a) uneven wear on raceway surfaces of the rings and rolling elements, diagnosed by the increase of low-frequency bearing vibration (rotor kinematic vibration) and the excitation of high-frequency vibration due to friction force modulation.

b) wear on the sliding surfaces of the separator and protective rings, diagnosed by the excitation of high-frequency vibration caused by wear on the sliding surfaces and additional modulation of low-frequency rotor vibration due to separator wear.

c) chipping, spalling, and cracks on the raceway surfaces, diagnosed by the excitation of impact vibration in the medium and high-frequency range.

d) assembly defects (excessive preload, separator misalignment, and ring misalignment), diagnosed by the increase in kinematic vibration at medium frequencies and the excitation of high-frequency vibration due to friction force modulation.

e) ring slippage, diagnosed by the irregularity in the periodicity of kinematic bearing vibration and the excitation of impact high-frequency vibration.

f) deterioration of lubrication quality, diagnosed by the excitation of impact ultrasonic vibration due to the breakdown of the lubricating film and the impacts of rolling elements against the stationary ring.

Thus, it can be concluded that vibration diagnostics of rolling bearings allows for the detection of a significant portion of possible defects. The inadmissibility of

using low-quality bearings helps to reduce noise levels during operation and increase the lifespan of industrial dynamic equipment.

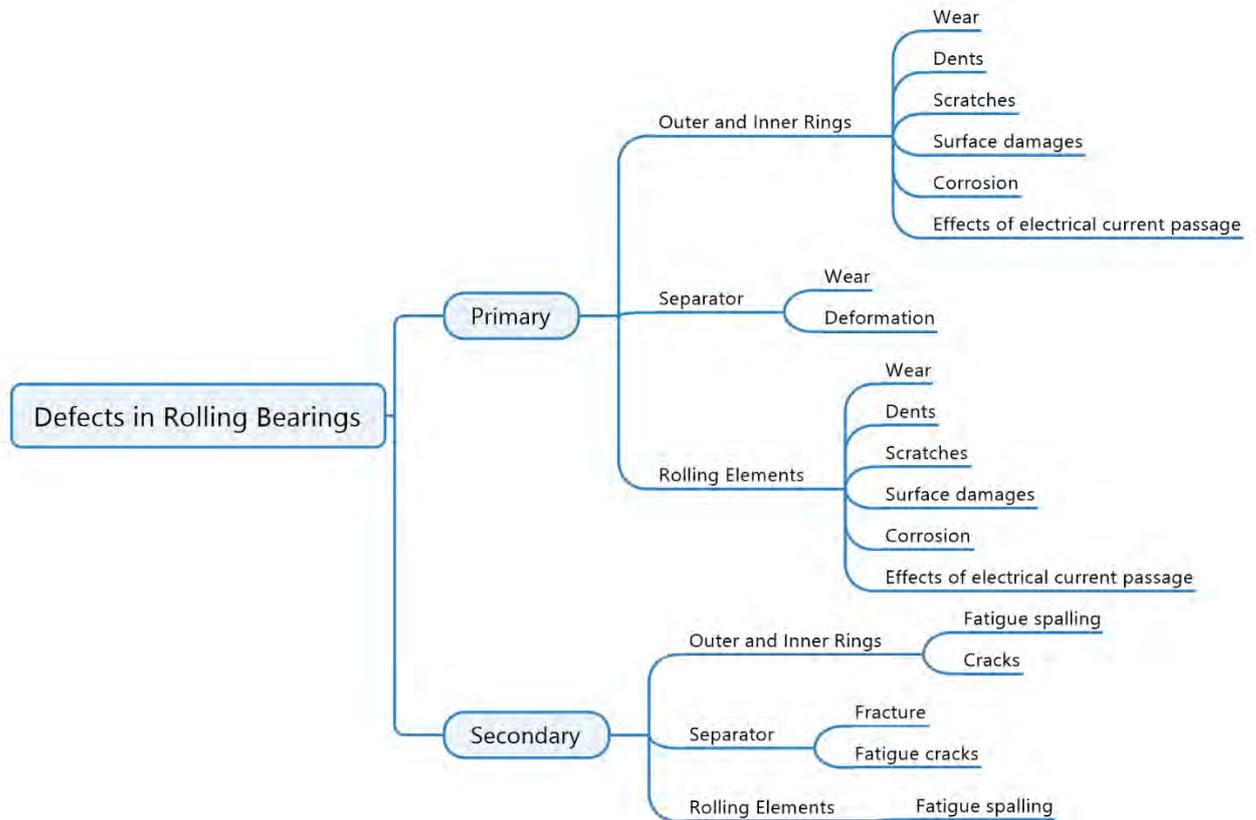


Figure A.2. Classification of defects in rolling bearings

3 Analysis of Vibration Monitoring Stands for Rolling Bearings

Testing bearings on test stands allows for testing large batches of bearings and detecting defects in them before their installation in equipment, thereby reducing maintenance costs for industrial dynamic equipment.

3.1 Russian Developments

Russian developments in the field of vibration monitoring stands for rolling bearings are:

- NPP TIK SVK-A, Perm (Figure A.3);
- BALTECH PROTON-SPK-KVK, St. Petersburg (Figure A.4);
- DIAMEKH SP-180M, Moscow (Figure A.5);
- NPC "Dinamika" KOMPAX-RPP 1602, Omsk (Figure A.6).



Figure A.3. SVK-A (NPP TIK)



Figure A.4. PROTON-SPK-KVK (BALTECH)



Figure A.5. SP-180M (DIAMEKH)



Figure A.6. KOMPAX-RPP 1602 (NPC "Dinamika")

3.2 Foreign Developments

Foreign developments in the field of vibration monitoring stands for rolling bearings are:

- FAG MGL 35-7, Germany (Figure A.7);
- SKF MVH 200EL, Sweden (Figure A.8).



Figure A.7. MGL 35-7 (FAG)



Figure A.8. MVH 200EL (SKF)

3.3 Comparison of Analog Characteristics

The classification of vibration monitoring stands for rolling bearings is presented in Figure A.9.

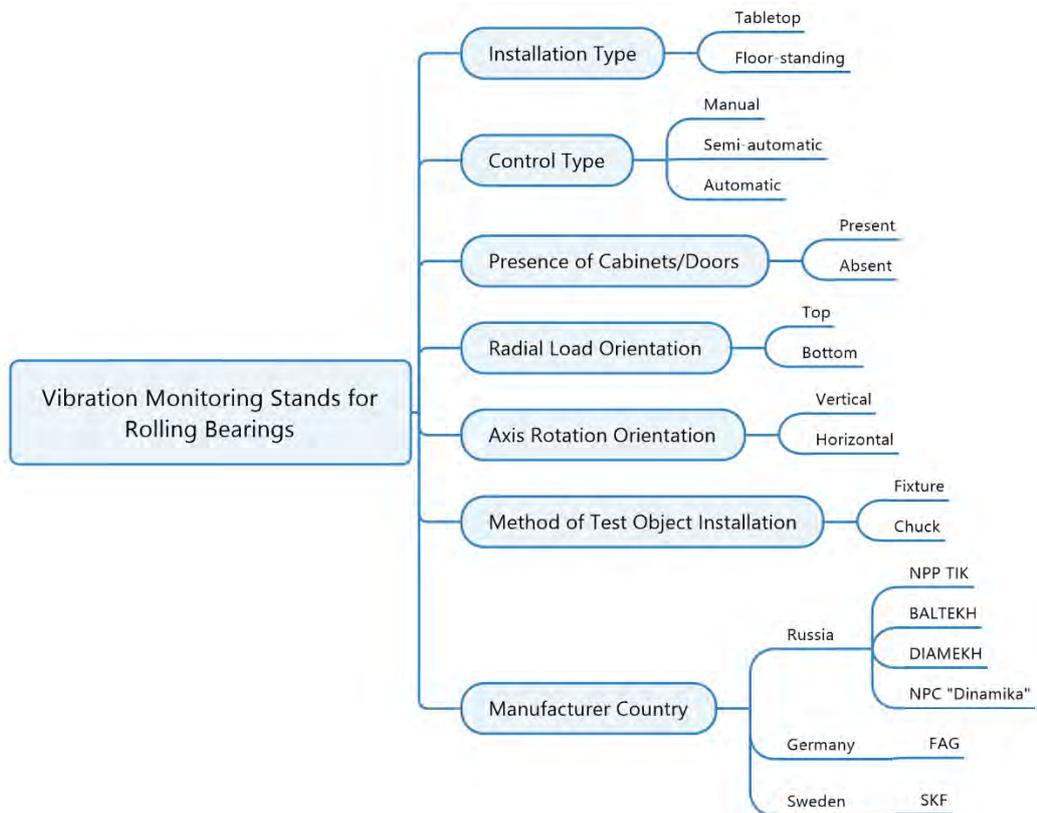


Figure A.9. Classification of vibration monitoring stands for rolling bearings

Below is a comparative table (Table A.1) of vibration monitoring stands for rolling bearings. The best characteristics are highlighted in color.

Table A.1 – Comparison of vibration monitoring stands for rolling bearings

	NPP TIK SVK-A	BALTECH PROTON-SPK-KVK	DIAMEKH SP-180M	NPC "Dinamika" KOMPAX-RPP 1602	FAG MGL 35-7	SKF MVH 200EL
Inner seating diameter of the diagnosed bearing, mm	35-150 20-180	7-240	25-220 60-300	40-120	3-120	-
Outer diameter of the diagnosed bearing, mm	42-320	30-420	до 420 до 460 до 500	до 310	10-180	80-200
Width of the diagnosed bearing, mm	7-106	-	до 145	-	4-60	-
Range of axial load on the bearing, N	0-2000	60-600	0-2000 0-2800	0-2000	-	100-900
Range of radial load on the bearing, N	0-2000	10-500	0-2000 0-2800	0-2000	5-100	150-700
Overall dimensions, mm	830x620x560 (drive unit) 300x450x240 (control cabinet)	1100x680x1460	1300x690x1450	-	460x650x850	1780x780x1104
Weight, kg	120 (drive unit) 30 (control cabinet)	400,0±10,0 (without computer)	400	-	100	320
Pneumatic network pressure, kg/cm ²	-	0-8	4 - 8	-	3-6	5,5-6
Compressed air consumption, m ³ /h	-	0,05	-	-	0,18	-
Frequency range of applied vibration transducers, Hz	20-10000	-	-	22-11200	-	-
Rotation frequency of the inner ring of the monitored bearing, rpm	1800 900	-	900 1800 0-3000	30-3000	130	700-1800
Rotation speed control error of the spindle shaft, %	±0,5	-	-	-	-	-
Diagnostic time, s	90	6-15	10 - 120	60	-	-
Power supply voltage, V	~220	-	-	-	230 V, 50/60 Hz	-
Power consumption, W, not exceeding	1600	2000	1500 2200	1500	-	750
Connection to a computer	USB	-	-	-	-	-

Continuation of table A.1

	NPP TIK SVK-A	BALTECH PROTON- SPK-KVK	DIAMEKH SP-180M	NPC "Dinamika" KOMPAX- RPP 1602	FAG MGL 35-7	SKF MVH 200EL
Operating temperature range, °C	+17...+27	-	-	-	-	-
Mean time between failures, hours, not less than	10 000	-	-	-	-	-
Warranty period, months	18	-	-	-	-	-
Service life, years	10	10	-	-	-	-
Calibration interval	2 year	-	-	-	-	-
Spindle rotation direction	-	right	-	-	-	-
Overall noise level based on vibration acceleration, dB	-	45-50	-	-	-	-
Sensors for recording information from the tested bearing:	-	-	1 vibration sensor 1 rotation sensor	-	-	-
Vibration sensor frequency range, Hz	-	-	5-10000	-	-	-
Operating frequency range for vibration acceleration measurement, Hz	-	-	20-20000	22-11200	-	-
Applied force of the vibration sensor, N	-	-	5-100 (adjustable)	-	-	-

Based on the Table A.1, it can be concluded that the DIAMEKH SP-180M stand has an advantage over its competitors in terms of the range of diagnosable bearing sizes, which reduces the amount of testing equipment and maintenance costs.

The second criterion for evaluation is the weight of the stand since higher weight helps reduce self-vibrations and allows for more accurate determination of the bearing noise level. The DIAMEKH SP-180M and BALTEKH PROTON-SPK-KVK stands have the highest weight.

3.4 Determining the Optimal Composition and Characteristics of the Stand

Based on section 1.3.3 and the customer's technical requirements, the optimal composition and technical characteristics of the future stand can be defined. They are presented in Figure A.10.

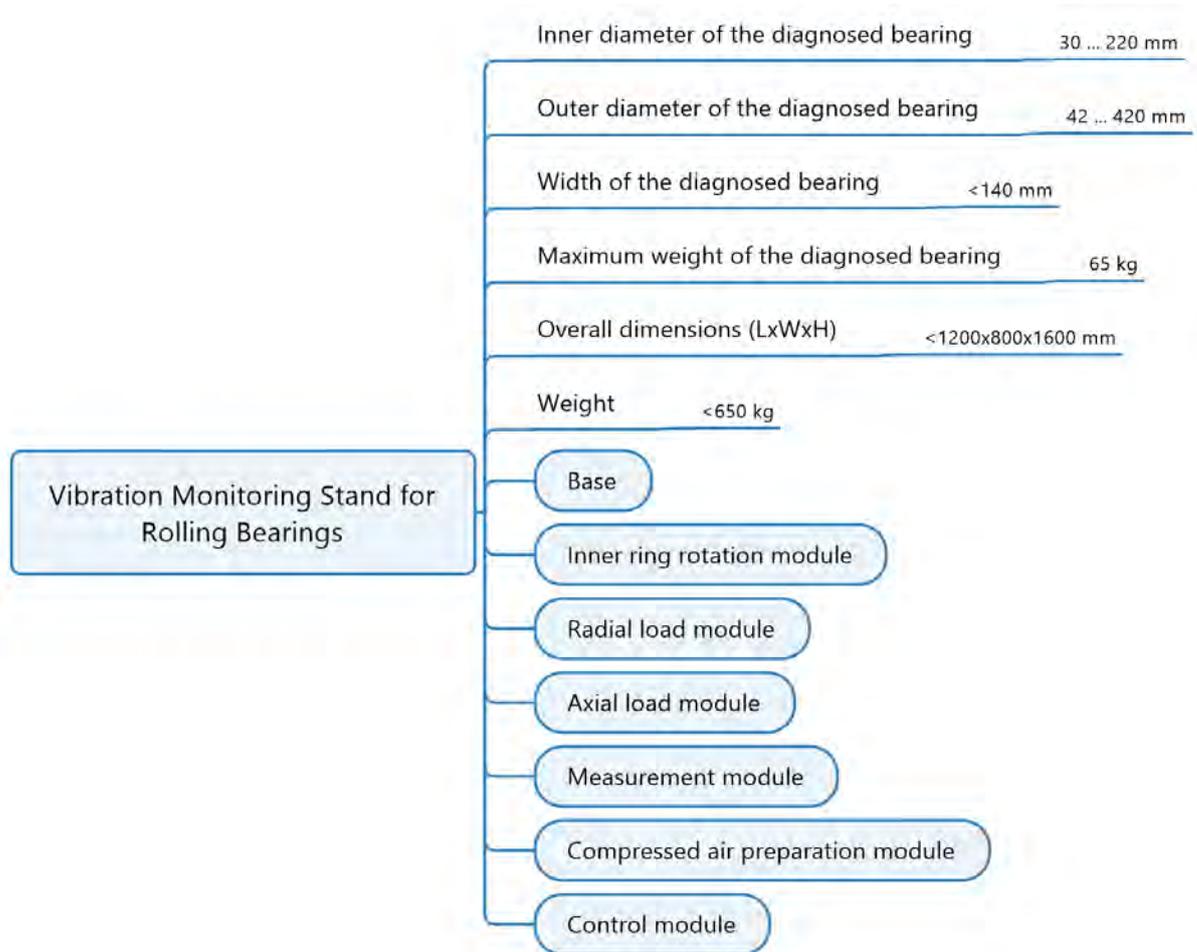


Figure A.10. Composition and technical characteristics of the stand

4 Description of the Prototype

Based on section 1.3, the best prototype is the DIAMEKH SP-180M.

4.1 Machine Structure

The structure of the DIAMEKH SP-180M machine is shown in Figure A.11.

The machine consists of the following main components:

- base;
- spindle assembly;
- belt electric drive;

- radial and axial load mechanisms;
- vibration measuring device "YASHMA";
- electrical equipment;
- pneumatic system;
- set of fixtures for installing the diagnosed bearings.

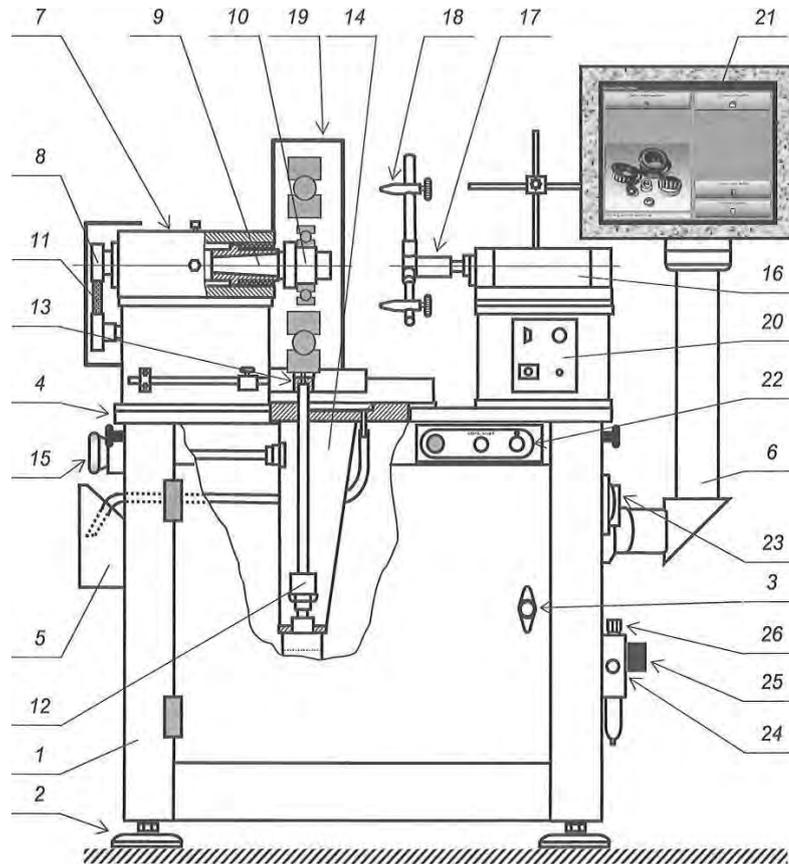


Figure A.11. The structure of the DIAMEKH SP-180M

The base (item 1) is a rigid welded structure. At the bottom, the frame has four height-adjustable supports (item 2) that allow for leveling on the floor. Inside the base, there are components of the pneumatic system and electrical equipment of the machine, which can be accessed and observed through doors on the front and rear sides. The doors are equipped with key-lockable locks (item 3). The countertop (item 4) is located on the base, on which the main elements of the machine are installed. On the left side, there is a tray (item 5) for collecting lubricating oil that flows out of the bearing through a groove in the pan. On the right side, a bracket (item 6) is attached for the system unit of the vibration measuring device "YASHMA."

The design of the spindle unit is made in such a way that, in addition to transmitting rotational motion, it serves as a rigid base system for the axis of the inner ring of the tested bearing, in accordance with the requirements of GOST R 52545.1-2006. This is achieved by using two oil-lubricated plain bearings as supports for the spindle, with the resulting non-compressible film (known as the "oil wedge") having a constant hardness during rotation. The spindle itself, located in the housing (item 7), is made of high-strength structural steel with heat-treated base surfaces to a hardness of 47...53 HRC.

The belt electric drive, installed at the rear of the machine, rotates the spindle at an adjustable speed through a belt (item 11).

The mechanism for applying radial load is located inside the frame and consists of a pneumatic cylinder (item 12), the piston rod of which pushes a rod, at the top of which a prism (item 13) is located. During diagnostics, the prism contacts the outer ring of the bearing. Inside the prism, there is a vibration sensor, the mounting of which is designed in such a way that it constantly experiences a force not exceeding 2.5 kg, regardless of the magnitude of the test load. This is necessary to ensure the accuracy of vibration measurement. The prism has two holes in which stops are placed to prevent displacement of the cages when testing bearings with cylindrical rollers. The stops are secured to the prism with locking washers.

The carriage (item 14), to which the mechanism is attached, can move along the countertop to provide the required position of the vector for applying radial load in the middle of the tested bearing. The movement of the carriage is facilitated by a lead screw (item 15) equipped with a mechanical displacement counter.

The mechanism for applying axial load is activated by a pneumatic cylinder (item 16), onto which a three-arm bracket (item 17) is attached. A bobbin (item 18) is placed on each rod of the axial thrust and can move along the rod and be fixed in the desired position with a screw. During bearing diagnosis, the bobbins press against its outer ring, transmitting the axial force. For convenience, the rods are marked at 5mm intervals. The oil guard cover (item 19) is used to protect the operator and surroundings from oil splashes that occur during bearing rotation. The cover can be moved to the left

along the table by a handle located at the bottom, providing free access to the spindle from the top and side. Below the axial load mechanism, there is a panel of connectors (item 20) that is closed with a door and lock.

The "YASHMA" vibration measuring device is the main component of the machine's measuring system, which also includes a highly sensitive vibration sensor. The device's system unit (item 21) with a sensor monitor allows the operator to control the machine and create databases for diagnosed bearings.

The electrical equipment of the machine includes the drive motor, controllers, connecting wires, relays, control lamps, safety switches, buttons, and so on.

On the front side of the machine, there is a panel (item 22) with buttons. A double 220V socket (item 23) is located on the right side of the machine's base and is used for connecting power to various external devices, such as a portable air compressor or a gap measuring device.

The pneumatic system of the machine consists of pneumatic cylinders, pressure regulators, pressure gauges, connecting hoses, and other components that drive the load application mechanisms. The compressed air for the pneumatic system is supplied either from the main pipeline or from an autonomous compressor to the filter regulator (item 24), equipped with a pressure gauge (item 25), and can be shut off using a valve (item 26). The remaining components of the pneumatic system are located behind the front door of the machine's base.

4.2 Working Principle of the Machine

The machine simulates the operation of a bearing, and its radial and axial load application mechanisms apply forces to the bearing that can occur in a real mechanism during the rotation of the inner ring. Meanwhile, a sensor measures the vibration level (noise) in decibels, and the "YASHMA" vibration measuring device compares it with values specified in regulatory documents. Based on this comparison, a conclusion is drawn regarding the suitability of a particular bearing for its intended use.

The operation cycle of the machine consists of the following main sequential stages:

a) The operator inserts the fixture of the corresponding size into the spindle shaft and attaches a specially designed sleeve for the specific bearing type onto it.

b) The diagnosed bearing is installed onto the sleeve (in necessary cases, it should be secured to the sleeve with a fixing washer)

c) The operator selects the pre-entered identification parameters for the diagnosed bearing on the monitor of the "YASHMA" vibration measuring device.

These can include:

- catalog number (designation);
- batch number;
- bearing number within the batch (if necessary).

The device's program includes test parameters for the bearing, such as:
spindle rotation speed;
type of applied load (radial, combined).

d) Based on these parameters, the operator adjusts the machine and performs the diagnosis of the bearing. The prism of the radial load application mechanism and the clamp of the axial load application mechanism are brought into contact with the outer ring of the bearing.

e) Compressed air at a pressure that creates the required force on the cylinder rods is supplied to the pneumatic cylinders of the load application mechanisms. As a result, the bearing starts to rotate.

f) The sensor located inside the prism of the radial load application mechanism measures the vibration of the bearing, which is converted into an electrical signal and sent to the measurement unit of the "YASHMA" device.

g) By comparing the actual vibration parameters with the normative data, a conclusion is drawn regarding the suitability of the bearing for its specific purposes.

The average estimated diagnostic time for one bearing, excluding preparatory operations, is up to 60 seconds, depending on the size and weight of the product. Diagnosing different types of bearings requires the application of either combined load (simultaneous radial and axial) or only one of these load types, depending on their design.

4.3 Analysis of Advantages and Disadvantages

Advantages:

1. Size of the diagnosed bearing: The stand allows for the diagnosis of bearings with diameters up to 500 mm, compared to competitors' range of 180-420 mm.

2. Weight of the stand: The stand has a weight of 400 kg, compared to competitors' range of 100-320 kg. The higher weight of the stand helps to reduce its own vibrations and enables testing of heavier bearings.

3. Range of axial and radial load: The stand can apply axial and radial loads up to 2800 N, compared to a maximum of 2000 N for competitors. This allows for testing bearings under higher loads.

Disadvantages:

1. Design and ergonomics: The stand lacks a cohesive and safe appearance; the frame has a single door on the sides; the control system screen is static and lacks rotation and position adjustment features; the oil tank does not have a cover.

2. Diagnostic time: The maximum diagnostic time on the stand is 120 seconds, compared to 15-90 seconds for competitors.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Техническое задание на разработку изделия «Стенд для вибрационного контроля состояния подшипников качения» для ООО «ТИК» г. Пермь

1. Наименование и назначение изделия

1.1. Приводная установка для вибрационного контроля состояния подшипников качения (далее Приводная установка или Установка).

1.2. Приводная установка предназначена для диагностики радиальных и радиально-упорных подшипников качения как новых, так и бывших в употреблении, по вибрационным характеристикам.

2. Цель, задачи и исходные данные для проведения работы

Установка разрабатывается с целью создания современной конкурентоспособной Приводной установки для вибрационного контроля технического состояния подшипников качения для её последующей реализации в целях извлечения прибыли от поставок.

Установка решает задачи по выявлению соответствия подшипников нормам, изложенным в РД ВНИПП.038-08.

Исходными данными для проведения работы являются:

1. Действующий образец-прототип – Стенд входного контроля подшипников качения СВК-А.

2. Нормативные документы, указанные в приложении 3 к Договору.

3. Основное содержание работы

3.1. Разработка конструкции Установки с учетом особенностей проектирования и эксплуатации Стенда СВК-А.

3.2. Промышленный дизайн Установки.

3.3. Разработка 3D модели Установки.

3.4. Проведение расчетов по 3D модели Установки.

3.5. Разработка конструкторской документации на изготовление Установки.

3.6. Разработка паспорта на Установку.

- 3.7. Разработка технологической документации.
- 3.8. Разработка программы и методики испытания Установки.

4. Состав Установки

- 4.1. Основание
 - 4.1.1. Каркас
 - 4.1.2. Опоры регулируемые
 - 4.1.3. Кожухи
- 4.2. Модуль вращения внутреннего кольца подшипника
 - 4.2.1. Каркас
 - 4.2.2. Привод вращения
 - 4.2.3. Оснастка технологическая
- 4.3. Модуль радиального нагружения подшипника
 - 4.3.1. Каркас
 - 4.3.2. Пневмопривод
 - 4.3.3. Узел исполнительный
 - 4.3.4. Линии магистральные
- 4.4. Модуль осевого нагружения подшипника
 - 4.4.1. Каркас
 - 4.4.2. Пневмопривод
 - 4.4.3. Узел исполнительный
 - 4.4.4. Линии магистральные
- 4.5. Модуль измерительный
 - 4.5.1. Узел прижима датчика
 - 4.5.2. Датчик
 - 4.5.3. Прибор виброизмерительный
 - 4.5.4. Линии магистральные
- 4.6. Модуль подготовки сжатого воздуха
 - 4.6.1. Клапан плавного пуска
 - 4.6.2. Клапан/подачи сброса давления
 - 4.6.3. Модуль разветвления

- 4.6.4.осушитель
- 4.6.5.Фильтр
- 4.6.6.Маслораспылитель
- 4.6.7.Регулятор давления
- 4.6.8.Влагоотделитель
- 4.6.9.Датчик давления
- 4.7.Модуль управления
 - 4.7.1.Источник питания
 - 4.7.2.Система управления
 - 4.7.3.Панель оператора
 - 4.7.4.Электро/пневмопроводка
 - 4.7.5.Контроллер
 - 4.7.6.Управление пневматикой
 - 4.7.7.Выходы
 - 4.7.8.Блок питания
 - 4.7.9.Устройство охлаждения
 - 4.7.10.Корпус

5. Компоновка Установки

Приводная установка должна представлять собой электротехническое изделие (ГОСТ 18311-80) и состоять из модулей, разделенных по функциям и прочно соединяемых в единое целое. Окончательный состав каждого из модулей или систем должен быть уточнен на стадии разработки эскизного проекта и зависит от типа выбранного энергоносителя. Допускается отдельное расположение Модуля управления в виде Стойки управления Установкой.

При испытании на Установке должно быть исключено вращение вокруг собственной оси наружного кольца диагностируемого подшипника при этом внутреннее кольцо должно приводиться во вращение с заданной частотой вращения.

5.1. Назначение модулей и систем Установки

5.1.1. Основание

Предназначено для размещения всех модулей Установки и их соединения в единую конструкцию. Дополнительно, основание придает жесткость и прочность всей конструкции Установки, что позволяет воспринимать различные нагрузки при движениях, реализуемых ее модулями или системами. Кроме того, массивность основания позволяет производить измерение параметров вибрации подшипников с минимальной погрешностью исключая влияние внешних источников колебаний.

5.1.2. Модуль вращения внутреннего кольца подшипника

Предназначен для создания жесткой базовой системы для оси внутреннего кольца диагностируемого подшипника и придания ему вращательного движения с требуемой угловой скоростью.

5.1.3. Модуль радиального нагружения подшипника

Предназначен для создания требуемой нагрузки на наружное кольцо диагностируемого подшипника в плоскости, перпендикулярной оси вращения внутреннего кольца.

5.1.4. Модуль осевого нагружения подшипника

Предназначен для создания требуемой нагрузки на наружное кольцо диагностируемого подшипника вдоль оси вращения внутреннего кольца.

5.1.5. Модуль измерительный

Предназначен для измерения вибрационных параметров, согласно МВИ НИИПП.002-2019.

5.1.6. Модуль подготовки сжатого воздуха

Предназначен для очистки, осушения и насыщения/отделения масла, поступающего от компрессора (пневмосети), а также регулировки давления и расхода сжатого воздуха, поступающего в пневматические элементы модулей Установки.

5.1.7. Модуль управления

Предназначен для автоматического или полуавтоматического управления оператором Установкой при выполнении диагностирования подшипника.

5.2. Составляющие, входящие в состав Установки.

5.2.1. Основание

Основание должно представлять собой каркас, выполненный в виде жесткой сварной или сборно-разборной рамной конструкции из стандартного сортового проката. Со всех сторон, при необходимости, должно быть предусмотрено защитное ограждение в виде кожухов, выполненных из металла или ударопрочного светопрозрачного материала или сетки, запираемых замками.

Все наружные металлические поверхности должны быть окрашены полимерной краской. В конструкции должны быть предусмотрены элементы для его транспортировки или сервисного обслуживания при помощи подъемно-транспортных устройств, вилочного погрузчика или ручным способом.

В нижней части основания должны быть предусмотрены места для его жесткого крепления к основанию помещения или установки регулируемых по высоте самоустанавливающихся виброопор. В конструкции основания должны быть предусмотрены места для присоединения составных элементов Установки и коробов (защитных кожухов) электрических и пневматических магистралей.

На основании должна быть предусмотрена емкость для сбора и последующего удаления смазочного материала, вытекающего из диагностируемого подшипника.

5.2.2. Модуль вращения внутреннего кольца подшипника

Модуль должен представлять собой жесткую базовую систему для оси внутреннего кольца диагностируемого подшипника (ГОСТ Р 52545.1-2006), выполненную в виде сварного или сборно-разборного каркаса, внутри или снаружи которого расположен привод вращения (согласно ГОСТ Р 50369-92). На выходном валу привода вращения должна быть расположена технологическая оснастка для установки диагностируемого подшипника.

Привод вращения внутреннего кольца диагностируемого подшипника должен представлять собой электромеханическую систему, состоящую из преобразовательного устройства, приводящее в движение электродвигатель посредством управляющего устройства, и передаточного устройства. Передаточное

устройство может представлять собой комбинацию механической передачи и устройства сопряжения.

Технологическая оснастка должна представлять собой оправку, базированную на выходном валу привода вращения по конусу Морзе. Наружная поверхность оправки должна позволять базировать подшипник с использованием комплекта баз, состоящего из установочной и двойной опорной баз согласно ГОСТ 21495-76. Цилиндрическая поверхность оправки, на которой монтируют внутреннее кольцо диагностируемого подшипника, должна иметь наружный диаметр с полем допуска $f5$ в соответствии с ГОСТ 25347-82 и минимальные геометрические погрешности для обеспечения скользящей посадки во внутреннее отверстие подшипника.

Прокладка электрических магистральных линий должна быть выполнена посредством кабель-каналов, соединенных с несущей рамой или с применением местных держателей.

5.2.3. Модуль радиального нагружения подшипника

Модуль должен быть расположен внутри основания и представлять собой сварной или сборно-разборный каркас, на или внутри которого расположен пневмопривод. На выходном звене пневмопривода должен быть размещен исполнительный узел, передающий усилие нагружения от пневмопривода на наружное кольцо диагностируемого подшипника.

Пневмопривод должен представлять собой пневмодвигатель поступательного действия, управляемый пневматической аппаратурой от источника пневматической энергии (компрессор или пневмосеть предприятия).

Узел исполнительный должен представлять собой конструктив, позволяющий передавать усилие нагружения от пневмопривода к требуемому месту приложения наружного кольца диагностируемого подшипника в диапазоне возможных типоразмеров. При этом, должна быть обеспечена возможность свободного вибрирования наружного кольца в радиальных, осевых, угловых и изгибных формах колебаний в зависимости от типа диагностируемого подшипника.

Кроме того, искажение формы колец подшипника, вызываемое контактом с элементами исполнительного узла, должно быть незначительным по сравнению с геометрической точностью диагностируемого подшипника.

Прокладка электрических и пневматических и магистральных линий должна быть выполнена посредством кабель-каналов, соединенных с несущей рамой или с применением местных держателей.

Пневматические комплектующие должны представлять собой серийно-выпускаемые изделия стандартных размеров.

5.2.4. Модуль осевого нагружения подшипника

Модуль должен быть расположен на основании и представлять собой сварной или сборно-разборный каркас, на или внутри которого расположен пневмопривод. На выходном звене пневмопривода должен быть размещен исполнительный узел, передающий усилие нагружения от пневмопривода на наружное кольцо диагностируемого подшипника.

Пневмопривод должен представлять собой пневмодвигатель поступательного действия, управляемый пневматической аппаратурой от источника пневматической энергии (компрессор или пневмосеть предприятия).

Узел исполнительный должен представлять собой конструктив, позволяющий передавать усилие нагружения от пневмопривода к трем местам приложения наружного кольца диагностируемого подшипника в диапазоне возможных типоразмеров. Места приложения осевого усилия нагружения должны быть расположенным друг относительно друга под углом 120 градусов в плоскости приложения нагрузки. При этом, должна быть обеспечена возможность свободного вибрирования наружного кольца в радиальных, осевых, угловых и изгибных формах колебаний в зависимости от типа диагностируемого подшипника. Кроме того, искажение формы колец подшипника, вызываемое контактом с элементами исполнительного узла, должно быть незначительным по сравнению с геометрической точностью диагностируемого подшипника.

Прокладка электрических и пневматических и магистральных линий должна быть выполнена посредством кабель-каналов, соединенных с несущей рамой или с применением местных держателей.

Пневматические комплектующие должны представлять собой серийно-выпускаемые изделия стандартных размеров.

5.2.5. Модуль измерительный

Модуль должен состоять из узла прижима датчика и виброизмерительного прибора, регистрирующего вибрационные характеристики диагностируемого подшипника при помощи датчика, связанного магистральными линиями между собой и модулем управления.

Узел прижима датчика должен быть расположен снизу диагностируемого подшипника и упираться щупом датчика в наружное кольцо диагностируемого подшипника и представлять собой конструктив, позволяющий прижимать с требуемым усилием измерительный щуп к требуемой точке приложения наружного кольца диагностируемого подшипника в диапазоне возможных типоразмеров (рисунок Б.1). Направление оси чувствительности датчика должно быть перпендикулярно оси вращения, при этом, должна быть обеспечена возможность свободного вибрирования наружного кольца в радиальных, осевых, угловых и изгибных формах колебаний в зависимости от типа диагностируемого подшипника. Кроме того, искажение формы колец подшипника, вызываемое контактом с элементами узла, должно быть незначительным по сравнению с геометрической точностью диагностируемого подшипника.

Щуп датчика должен быть закреплен в отверстии резиноканевой мембраны, внешний край которой должен быть прикреплен к корпусу датчикодержателя, представляющего собой пневматическую камеру. Датчик, при помощи шпильки, должен быть жестко соединен с щупом. При подаче сжатого воздуха в камеру датчикодержателя щуп должен прижиматься к поверхности наружного кольца диагностируемого подшипника.

Датчик должен иметь минимальную собственную массу для исключения контактного резонанса.

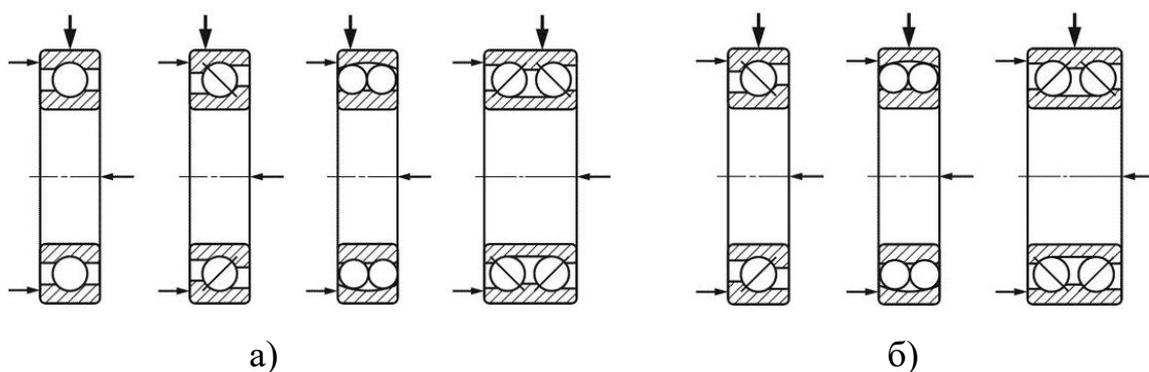


Рисунок Б.1. Положение датчика:

а – по умолчанию, б - альтернативное.

Прокладка электрических и пневматических и магистральных линий должна быть выполнена посредством кабель-каналов, соединенных с несущей рамой или с применением местных держателей.

Пневматические комплектующие должны представлять собой серийно-выпускаемые изделия стандартных размеров.

5.2.6. Модуль подготовки сжатого воздуха

Модуль должен представлять собой конструктив, состоящий из элементов, перечисленных в п.4.6 не обязательно соединенных в единое целое.

Модуль может быть выполнен как в виде отдельно стоящего конструктива, размещенного на основании, так и быть расположенным на DIN-рейке в шкафу управления Установкой.

Модуль должен представлять собой серийно-выпускаемый конструктив стандартных размеров или систему из серийно-выпускаемых изделий (Camozzi, SMC, Festo и пр.)

5.2.7. Модуль управления

Модуль должен представлять собой серийно-выпускаемый конструктив стандартных размеров, внутри которого должно быть размещено оборудование, перечисленное в п.4.7 для управления Установкой. Оборудование должно представлять собой устройства, монтируемые на DIN-рейку конструктива. Оборудование должно быть защищено от механических повреждений и легко извлекаться в случае необходимости.

Все энергетические магистрали должны быть скрыты от внешнего воздействия и защищены соответствующим образом. Прокладка электромагистралей должна быть выполнена посредством кабель-каналов или с применением местных держателей.

Модуль может быть размещен как на основании Установки, так и в виде отдельно стоящей стойки управления снабженный кнопкой аварийного останова.

Пневматические комплектующие должны представлять собой серийно-выпускаемые изделия стандартных размеров.

6. Технические характеристики Установки

- внутренний посадочный диаметр диагностируемых подшипников: 30...220 мм;

- наружный диаметр диагностируемого подшипника: 42...420 мм;

- ширина диагностируемого подшипника: не более 140 мм;

- максимальная масса диагностируемого подшипника: 65 кг;

- температура окружающей среды: +5...+40°C;

- габаритные размеры (Д×Ш×В): не более 1200×800×1600 мм.

- масса: не более 650 кг.

6.1. Основание

- габаритные размеры (Д×Ш×В): не более 1100×700×1200 мм.

- масса: не более 250 кг.

6.1.1. Каркас

- тип: сборно-разборный или сварной;

- материал: сталь (возможны отдельные элементы из нержавеющей стали или цветного сплава);

- тип окрашивания: полимерный.

6.1.2. Опоры

- тип опоры: виброгасящая, самоустанавливающаяся;

- количество опор: не менее 4 штук;

- несущая способность одной опоры: не менее 170 кг;

- способ регулирования высоты: винтовая регулировка;
- диапазон регулирования высоты: не менее 50 мм;
- диаметр опоры: не менее 50 мм.

6.1.3. Кожухи

- материал съемных панелей: сталь или пластмасса;
- толщина материала съемных панелей: не менее 1 мм;
- тип окрашивания: полимерный - для изделий из стали, в «массе» - для изделий из пластмасс;
- способ монтажа/демонтажа: винтовое или крепление на защелках.

6.2. Модуль вращения

6.2.1. Каркас

- тип: сборно-разборный или сварной;
- материал: сталь (возможны отдельные элементы из нержавеющей стали или цветного сплава);
- тип окрашивания: полимерный.

6.2.2. Привод вращения

- тип привода: программно-управляемый электрический или электромеханический с частотным регулированием;
- направление вращения: реверсивное;
- номинальная мощность: не менее 1,5 кВт;
- диапазон частот вращения внутреннего кольца подшипника: 0...3000 об/мин;
- погрешность частоты вращения внутреннего кольца подшипника:
по верхнему значению – не более 1%;
по нижнему значению – не более 2%.
- угловое отклонение оси чувствительности датчика от перпендикулярности оси вращения: не более 5°;
- уровень собственных шумов привода вращения на холостом ходу по среднеквадратичному значению виброскорости в полосах частот (выраженный в децибелах относительно исходного значения 0,05 мкм/с):

- низкой – не более 55 дБ;
- средней – не более 50 дБ;
- высокой – не более 40 дБ.

6.2.3. Оправка

- схема базирования: установка короткой втулки на гладкой цилиндрической оправке или цанге с базированием по торцу;
- способ базирования на шпинделе: конус Морзе;
- поле допуска посадочной поверхности под диагностируемый подшипник: f5 по ГОСТ 25347-82;
- размерный ряд посадочного диаметра, $d_{п}$: 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220 мм.
- минимальная ширина оправки в зависимости от диапазона посадочных диаметров оправки:
 - при $d_{п}=30...50$ – 40 мм;
 - при $d_{п}=55...75$ – 50 мм;
 - при $d_{п}=80...95$ – 70 мм;
 - при $d_{п}=100...120$ – 90 мм;
 - при $d_{п}=130...150$ – 110 мм;
 - при $d_{п}=160...180$ – 130 мм;
 - при $d_{п}=190...220$ – 150 мм.

6.3. Модуль радиального нагружения

6.3.1. Каркас

- тип: сборно-разборный или сварной;
- материал: сталь (возможны отдельные элементы из нержавеющей стали или цветного сплава);
- тип окрашивания: полимерный.

6.3.2. Пневмопривод

- тип привода: пневматический;
- усилие нагружения: 25...3000 Н;

- точность создаваемого усилия нагружения: не более $\pm 10\%$;
- рабочее давление: не менее 0,5 МПа;

6.3.3. Узел исполнительный

- позиционирование места приложения радиальной нагрузки: 0...140 мм;
- точность приложения радиальной нагрузки: не более ± 1 мм.

6.3.4. Магистральные линии

- материал пневмолиний: цветной сплав или полимер;
- тип пневмолиний: статичный или гибкий (в зависимости от места установки и назначения);
- способ присоединения: свинчивание или БРС.

6.4. Модуль осевого нагружения

6.4.1. Каркас

- тип: сборно-разборный или сварной;
- материал: сталь (возможны отдельные элементы из нержавеющей стали или цветного сплава);
- тип окрашивания: полимерный.

6.4.2. Пневмопривод

- тип привода: пневматический;
- усилие нагружения: 25...3000 Н;
- точность создаваемого усилия нагружения: не более $\pm 10\%$;
- рабочее давление: не менее 0,5 МПа;

6.4.3. Узел исполнительный

- количество точек приложения осевой нагрузки: 3 (три);
- угол между местами в плоскости приложения: 120 градусов;
- место приложения осевой нагрузки: торец наружного кольца диагностируемого подшипника.

6.4.4. Магистральные линии

- материал пневмолиний: цветной сплав или полимер;
- тип пневмолиний: статичный или гибкий (в зависимости от места установки и назначения);

- способ присоединения: свинчивание или БРС.

6.5. Модуль измерительный

- диапазоны условий измерения:

температура окружающего воздуха – 17...27 °С;

относительная влажность – 45...70%;

атмосферное давление – 84...106 кПа.

6.5.1. Узел прижима датчика

- тип прижима: пневматический;

- усилие прижима: $25 \pm 2,5$ Н;

- рабочее давление: не менее 0,5 МПа.

6.5.2. Прибор виброизмерительный

- диапазон измеряемого среднеквадратичного значения виброскорости в полосах частот:

низкой – не менее 5...300 Гц;

средней – не менее 300...1800 Гц;

высокой – не менее 1800...10000 Гц.

- предел допускаемой относительной погрешности измерений:

по виброскорости – не более $\pm 4\%$;

по виброускорению – не более $\pm 20\%$.

- максимальное отклонение от линейности для амплитуд вибрации виброскорости в диапазоне 10...10000 мкм/с. СКЗ: не более 10%;

- максимальное время стабилизации показаний от начала измерений: не более 5 мин;

- повторяемость среднего значения измеряемых величин в промежутке времени: не более $\pm 10\%$.

- габаритные размеры (Д×Ш×В): не более 150×150×50 мм.

- масса: не более 3 кг.

6.5.3. Датчик

- частотный диапазон датчика: не менее 5...10000 Гц;

- амплитудный диапазон датчика:
 вибрации по скорости - не менее 10...10000 мкм/с;
 по ускорению - не менее 0,03...100 м/с.
- предел допускаемой относительной погрешности измерений:
 по виброскорости – не более $\pm 4\%$;
 по виброускорению – не более $\pm 20\%$.
- максимальное отклонение от линейности для амплитуд вибрации вибро-
 скорости в диапазоне 10...10000 мкм/с. СКЗ: не более 10%;
- габаритные размеры (Д×В): не более $\varnothing 39,25 \times 28,5$ мм.
- масса: не более 0,1 кг.

6.5.4. Магистральные линии

- материал пневмолиний: цветной сплав или полимер;
- тип пневмолиний: статичный или гибкий (в зависимости от места Уста-
 новки и назначения);
- способ присоединения: свинчивание или БРС.

6.6. Модуль подготовки сжатого воздуха

- рабочее давление: 0,5...0,8 МПа;
- расход сжатого воздуха: не менее 0,05 м³/час;
- температурный диапазон: +5...+40°С.

6.6.1. Клапан плавного пуска

- тип: с пневматическим или электрическим управлением;
- напряжение питания: 24В DC;
- дополнительная опция: глушитель;
- индикация давления: с датчиком давления.

6.6.2. Клапан подачи/сброса давления

- тип: ручной или с электрическим управлением;
- напряжение питания: 24В DC;
- дополнительная опция: глушитель.

6.6.3. Модуль разветвления

- тип: со встроенным обратным клапаном.

6.6.4. Мембранный осушитель

- тип: со сменным картриджем.

6.6.5. Фильтр

- положение: вертикальное;

- степень фильтрации: не более 5 мкм.

6.6.6. Маслораспылитель

- положение: вертикальное.

6.6.7. Регулятор давления

- положение: вертикальное;

- тип: со встроенным обратным клапаном.

6.6.8. Влагоотделитель

- положение: вертикальное;

- тип: автоматический отвод конденсата.

6.6.9. Манометр

- рабочее давление: не менее 0,8 МПа;

- температурный диапазон: +5...+40°C.

6.6.10. Магистральные линии

- материал пневмолиний: цветной сплав или полимер;

- тип пневмолиний: статичный или гибкий (в зависимости от места Установки и назначения);

- способ присоединения: свинчивание или БРС.

6.7. Модуль управления

- габаритные размеры (Д×Ш×В): не более 450×450×240 мм.

- масса: не более 35 кг.

6.7.1. Источник питания

- напряжение питания: 24В DC;

- тип напряжения: однофазное.

6.7.2. Система управления

- количество осей управления: не менее 3;

- дополнительно: реле безопасности.

6.7.3. Панель оператора

- тип: сенсорный;
- дисплей: цветной TFT;
- размер дисплея: не менее 7”;
- разрешение дисплея: не менее 800x600 пикселей;

6.7.4. Электро/пневмопроводка

- тип: кабельные жгуты или отдельные кабели;
- дополнительно: наличие бирок подписей кабелей.

6.7.5. Контроллер

- производитель: Festo или аналог.

6.7.6. Пневматика

- производитель: Festo или аналог.

6.7.7. Выходы

- тип: пневматические и электрические;
- вид: многоконтактные интерфейсы.

6.7.8. Блок питания

- тип: в зависимости от выбранной аппаратной части;

6.7.9. Устройство охлаждения

- тип: активное;
- способ: искусственная вентиляция.

6.7.10. Корпус

- размер: стандартный в зависимости от комплектации;
- материал: сталь (возможны отдельные элементы из нержавеющей стали

или цветного сплава);

- толщина материала съемных панелей: не менее 1 мм;
- тип окрашивания: полимерный.

7. Требования к показателям назначения

7.1. Требования к совместимости

7.1.1. Работоспособность по основным требованиям к электромагнитной совместимости должна соответствовать ГОСТ Р 51317.6.2.

7.1.2. Приводная установка должна быть устойчива к магнитному полю промышленной частоты по ГОСТ Р 50648 (степень жесткости – 2).

7.1.3. На разрабатываемой Установке должны быть предусмотрены места для установки приборов КИПиА необходимых для регистрации технологических параметров, а также должно быть предусмотрено место для размещения кабельных трасс силового и измерительного оборудования.

7.1.4. Вся документация, предоставляемая Заказчику, должна быть выполнена на русском языке.

7.2. Требования по мобильности

7.3. Разрабатываемая Установка должна быть выполнена в стационарном исполнении, в виде модулей, поставляемых потребителю в собранном виде.

8. Требования к электропитанию

8.1. Электропитание разрабатываемой Установки должно осуществляться от сети ~220В (+10%, -15%), 50Гц ($\pm 5\%$) в соответствии с ГОСТ 13109-88.

9. Требования надежности

9.1. Требования к безотказности:

- гарантийный срок эксплуатации со дня ввода в эксплуатацию: 24 месяца;

- средняя наработка на отказ: 1000 часов;

- назначенный срок службы: 10 лет.

9.2. Требования к долговечности по ГОСТ 27.002-89:

- ресурс между средними (капитальными) ремонтами: 12 месяцев;

- срок службы до списания: 10 лет.

9.3. Требования к сохраняемости по ГОСТ Р 51908-2002:

- срок сохраняемости в упаковке до ввода в эксплуатацию: 3 года.

9.4. Критерии отказов и предельного состояния Установки

9.4.1. Отказ Установки по ГОСТ 27.002-2009 и ГОСТ 27.003-90:

- прекращение выполнения функций, заданных техническими требованиями настоящего Технического задания;

- снижение качества функционирования.

9.4.2. Предельное состояние Установки:

- отказ одного или нескольких модулей Установки, восстановление или замена которых на месте эксплуатации не предусмотрена эксплуатационной документацией и должна выполняться в ремонтных органах;

- превышение установленного уровня текущих (суммарных) затрат на техническое обслуживание и ремонты, определяющее экономическую нецелесообразность дальнейшей эксплуатации.

10. Конструктивные требования

10.1. Масса одного модуля или его составной части должна быть не более 250 кг.

10.2. Конструкция Установки должна быть выполнена с учетом эргономических требований по ГОСТ 12.2.049-80.

10.3. Наружные поверхности составных частей Установки должны быть выполнены из антикоррозионных материалов или иметь коррозионностойкое покрытие, обеспечивающее максимальную защиту от влияния окружающей среды при транспортировке, монтаже и эксплуатации в течение всего срока службы.

10.4. Поверхности составных частей Установки не должны иметь трещин, посторонних включений, а также других механических повреждений и дефектов.

10.5. Сварные швы не должны иметь посторонних включений, наплывов, непроваров и прожогов.

10.6. Метрические резьбы должны выполняться по ГОСТ 24705-81 с полями допусков по ГОСТ 16093-2004: 7H – для внутренних резьб и 8g – для наружных резьб.

10.7. Резьбы должны быть полного профиля, без вмятин, подрезов и сорванных ниток.

10.8. Не допускаются местные срывы, выкрашивания и дробления резьбы общей длиной более 10% длины нарезки, при этом на одном витке – более 0,2 его длины.

10.9. Все части Установки, вступающие в контакт с реагентами, должны быть изготовлены из коррозионностойких материалов или защищены коррозионностойкими покрытиями по ГОСТ 9.301-86.

11. Требования по стандартизации, унификации, совместимости и взаимозаменяемости

11.1. Разработка Приводной установки должна проводиться с учетом технически и экономически обоснованных требований унификации, стандартизации и взаимозаменяемости. Приводная установка не должна содержать дефицитных и уникальных материалов и комплектующих изделий.

11.2. Разрабатываемая Установка должна иметь блочно-модульную конструкцию.

11.3. Разрабатываемая Установка должна состоять из модулей, разделенных по функциям.

11.4. Способ крепления модулей должен разрабатываться с применением стандартного крепежа.

11.5. Конструктивное исполнение входящих в разрабатываемую Установка устройств и систем должно обеспечивать:

- удобство эксплуатации;
- ремонтпригодность и заменимость частей, поддаваться разборке и сборке при помощи стандартных инструментов;
- свободный доступ ко всем элементам, узлам, блокам, требующим замены или регулирования в процессе эксплуатации.

12. Требования по эргономике и технической эстетике

12.1. Приводная установка должна соответствовать общим требованиям комплекса стандартов Система "человек - машина" ГОСТ 12.2.049-80, ГОСТ 29149-91.

12.2. Эстетическая выразительность внешнего вида должна обеспечиваться тщательностью выполнения видимых элементов конструкции.

12.3. Пространственная компоновка элементов управления должна обеспечивать удобство взаимодействия с ними оператора любой рукой.

12.4. Органы управления и контроля должны соответствовать следующим требованиям:

- ручки основных органов управления и индикаторы должны быть различимы;

- доступ к органам управления, изменение параметров которых в процессе эксплуатации недоступно, должен быть ограничен или недоступен.

12.5. По эргономике и технической эстетике разрабатываемая Установка должна соответствовать требованиям ГОСТ 20.39.108-85.

13. Требования к эксплуатации, к стойкости к внешним воздействующим факторам, удобству технического обслуживания и ремонта

13.1. Требования к стойкости к внешним воздействующим факторам

13.1.1. Разрабатываемая Установка должна соответствовать группе климатического исполнения УХЛ4 по ГОСТ 15150-69.

13.1.2. Разрабатываемая Установка должна соответствовать группе механического исполнения М2 по ГОСТ 30631-99.

13.2. Требования к эксплуатационным показателям

13.2.1. Разрабатываемая Установка должна соответствовать требованиям:

13.2.1.1. По эксплуатационным и дежурным режимам:

- основной: полное функционирование Установки;

- аварийный: автоматический безопасный останов функционирования (с отключением электрического питания и пневматических элементов).

13.2.1.2. Периодичность техобслуживания должна составлять:

- при использовании: не реже 1 раза в год.

13.2.2. Приводная установка должна обеспечивать возможность перехода к ручному управлению при ремонтных и пуско-наладочных работах.

13.2.3. Техническое и эксплуатационное обслуживание Установки должно быть минимальным. В течение всего срока эксплуатации возможно техническое обслуживание с заменой смазки и уплотнительных элементов.

13.3. Требования по ремонтпригодности

13.3.1. При разработке Установки должно быть уделено особое внимание удобству ремонта в условиях эксплуатации, возможности кругового обслуживания модулей, сборки и разборки при техническом обслуживании, доступности к отдельным составным частям при выполнении этих операций без демонтажа других составных частей.

13.3.2. Обслуживание и ремонт Установки должны производиться без применения специальных инструментов.

13.3.3. Способ крепления Установки должен разрабатываться с применением стандартного крепежа.

14. Требования безопасности

14.1. Требования к эксплуатационной безопасности

14.1.1. Технические средства разрабатываемой Установки по требованиям защиты человека от поражений электрическим током должны относиться к классу 1 и должны быть выполнены в соответствии с ГОСТ 12.2.007-0-75.

14.1.2. Разрабатываемая Установка при монтаже, наладке, обслуживании и ремонте должна соответствовать общим требованиям безопасности по ГОСТ 12.2.003-91 и ГОСТ 12.3.002-75.

14.1.3. Аппаратные стойки разрабатываемой Установки должны быть изолированы от контура заземления здания, конструкций здания и другого оборудования, установленного в нем.

14.1.4. Условия работы персонала, разрабатываемой Установки, должны соответствовать санитарным нормам по СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.

14.1.5. Уровни шума и звуковой мощности в местах расположения персонала не должны превышать значений, установленных ГОСТ 12.1.003-83 и санитарными нормами.

14.1.6. Обеспечение регулировки и технического обслуживания Установки

Необходимо предусмотреть ограждения в опасных зонах, рационально расположить органы регулировки и при техническом обслуживании, исключить опасность для обслуживающего персонала.

14.1.7. Наличие специального и специализированного инструмента и приспособлений

Для осуществления безопасных регулировок, технического обслуживания и применения по назначению Установки должен использоваться стандартный инструмент и приспособления.

14.1.8. Органы управления Установки:

- должны быть легко доступны и свободно различимы, снабжены надписями, символами;
- размещены с учетом требуемых усилий для перемещения;
- выполнены так, что их форма и размеры соответствуют способу захвата (пальцами, кистью) или нажатия (пальцем руки, ладонью).

14.2. Требования к подвижным частям

Движущиеся части Установки должны быть ограждены и обозначены информационными табличками.

14.3. Требования к защитным и предохранительным устройствам

Имеющиеся защитные и предохранительные устройства, используемые для защиты от опасности, вызванной движущимися деталями, должны:

- иметь прочную устойчивую конструкцию;
- быть безопасными;
- располагаться на соответствующем расстоянии от опасной зоны;
- не мешать осуществлять контроль производственного процесса;
- позволять выполнять работу по наладке.

14.4. Требования электробезопасности

Электрооборудование Установки должно соответствовать правилам, утвержденным Госэнергонадзором «Правила устройства электроустановок (ПУЭ)».

14.5. Требования пожаробезопасности

Приводная установка должна соответствовать требованиям пожаробезопасности.

15. Требования к хранению, консервации и транспортированию

15.1. Модули, входящие в состав разрабатываемой Установки должны допускать многократное транспортирование в упаковке при температуре от -40°C до +40°C и относительной влажности от 5 до 100% всеми видами наземного транспорта.

15.2. Модули, входящие в состав разрабатываемой Установки должны храниться в упакованном виде в отапливаемых и вентилируемых помещениях при температуре от +5 до +35°C и относительной влажности воздуха не выше 80% (при температуре +25°C) при отсутствии в этих помещениях конденсации влаги, паров химически активных веществ и источников электромагнитных полей.

15.3. Маркировка Установки и тары должна быть устойчива в течение гарантийного срока службы.

15.4. Консервация Установки должна быть выполнена в соответствии с ГОСТ 9.014-78.

15.5. Транспортная упаковка должна обеспечивать удобство проведения погрузочно-разгрузочных работ.

15.6. Требования по хранению и транспортированию Установки должны быть приведены в эксплуатационной документации.

16. Требования маркировке

16.1. Приводная установка должна иметь маркировку, содержащую:

- наименование или товарный знак предприятия-изготовителя;
- наименование и условное обозначение;
- номинальная мощность, кВт;

- степень защиты по ГОСТ 14254-96;
- масса, кг;
- заводской номер;
- год выпуска;
- дата поверки;
- дата технического осмотра;
- средство идентификации.

16.2. Маркировка должна выполняться на нерабочих поверхностях Установки способами, обеспечивающими четкость надписи и ее сохранность на весь период хранения и монтажа.

16.3. Монтажные и сборочные риски должны быть обведены яркой несмываемой краской.

16.4. Транспортная маркировка каждого модуля Установки должна содержать:

- обозначение сборочной единицы;
- места строповки;
- центр тяжести;
- базовые поверхности для выверки;
- стрелку, указывающую направление вращения (движения);
- массу блока или сборной единицы.

17. Требования к материалам и комплектующим изделия

17.1. При проектировании Установки должны быть применены материалы, обеспечивающие их работоспособность под воздействием вибраций. Материалы подбираются с учетом нормального функционирования в течении всего срока службы.

17.2. Комплектующие изделия по возможности должны быть отечественного производства.

17.3. Покупные комплектующие изделия (ПКИ) до монтажа их в изделие должны быть подвергнуты входному контролю на соответствие требованиям их ТУ.

18. Требования к метрологическому обеспечению

18.1. Испытательное оборудование и методики измерений должны быть аттестованы, средства измерений поверены.

18.2. Разрабатываемая Установка должна быть оснащена контрольно-измерительным оборудованием, обеспечивающим измерение технологических параметров для каждого модуля в соответствии с ГОСТ 8.009-84, ГОСТ 26656-85.

19. Требования к себестоимости

19.1. Себестоимость изготовления Установки на дату согласования настоящего Технического задания не должна превышать 800 000 (восемьсот тысяч) рублей 00 копеек.

19.2. В себестоимость включаются только прямые расходы (затраты на комплектующие и материалы, а также трудовые затраты на изготовление Установки) без учета косвенных расходов.

19.3. Стоимость комплектующих и материалов учитывается по цене на дату согласования настоящего Технического задания исходя из следующих условий:

- для комплектующих и материалов зарубежного производства – в привязке прайсовой цене по курсу валюты (Евро или доллар);
- для комплектующих и материалов российского производства – в привязке прайсовой цене с учетом инфляции;
- для трудовых затрат – в привязке к нормативам предприятия-изготовителя.

20. Содержание и требования к работам создания 3D модели

20.1. Состав предоставляемых 3D моделей

20.2. Модель сборки Установки.

20.2.1. Модели сборочных единиц.

20.2.2. Модели деталей сборочных единиц.

20.3. Электронная модель Установки должна быть создана в программном обеспечении SolidWorks.

20.4. Формат предоставляемых файлов:

- для сборок -*. sldasm, *. step214;
- для деталей - *. sldprt, *. step214.

20.5. Модель оборудования должна разрабатываться с соблюдением:

- масштаба 1:1;
- габаритных размеров;
- установочных размеров (размеры под крепеж – диаметры отверстий, взаимное расположение отверстий в рамах, опорах и т.д.);
- присоединительных размеров – включать в себя патрубки присоединения трубопроводов, воздухопроводов, штуцеры КИП, бобышки, фланцы, места подключения электрических кабелей, гильзы и т.д.;
- размеров рамных и поддерживающих конструкций.

20.6. Модели должны быть твердотельными с назначенными конструкционными материалами, без ошибок в топологии.

21. Состав и требования к конструкторской документации Установки

21.1. Состав разрабатываемой и предоставляемой Заказчику конструкторской документации:

- 21.1.1. Принципиальная схема Установки.
- 21.1.2. Кинематические расчеты узлов и систем Установки.
- 21.1.3. Ведомость технического предложения.
- 21.1.4. Проектировочные расчеты узлов и систем Установки.
- 21.1.5. Ведомость эскизного проекта.
- 21.1.6. Габаритный чертеж Установки.
- 21.1.7. Чертеж общего вида Установки.
- 21.1.8. Сборочный чертеж Установки.
- 21.1.9. Монтажный чертеж Установки.
- 21.1.10. Ведомость технического проекта.
- 21.1.11. Сборочные чертежи систем и узлов Установки.
- 21.1.12. Рабочие чертежи деталей Установки.

21.1.13. Спецификации на сборочные чертежи Установки.

21.1.14. Ведомость покупных изделий.

21.2. Конструкторская документация должна быть оформлена в соответствии с ГОСТ 2.102-68.

21.3. Конструкторская документация на Приводная установка должна быть выполнена в программном обеспечении SolidWorks.

21.4. Формат предоставляемых файлов - *. slddrw, *. pdf.

21.5. Документация должна быть записана на флэш накопитель, распечатана и сложена в папку по ГОСТ 2.501-88.

22. Требования к инженерным расчетам

22.1. Общие требования к расчетам

22.1.1. Выбор методов расчета и расчетного программного обеспечения осуществляется Исполнителем.

22.1.2. Исполнитель гарантирует, что все расчеты будут выполнены квалифицированными специалистами, имеющими опыт и компетенцию.

22.2. Анализ напряженно-деформированного состояния узлов и элементов конструкции Установки с целью определения прочности

22.2.1. Выполнить анализ напряженно-деформированного состояния узлов и элементов конструкции Установки для оценки прочности конструкции с учетом действующих на нее нагрузок.

22.2.2. Выполнить анализ напряженно-деформированного состояния узлов и элементов конструкции Установки для оценки жесткости конструкции с учетом действующих на нее нагрузок.