

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ НЕФТИ И ГАЗА

Кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой РЭНГМ

_____ Н.Г. Квеско

« ____ » _____ 2021 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

21.03.01 Нефтегазовое дело

21.03.01.02 Эксплуатация и обслуживание объектов добычи нефти

Исследование нагрузочных свойств шарикоподшипников

Руководитель _____ профессор, канд. техн. наук М.Т. Нухаев
подпись, дата

Выпускник _____ М.О. Дергачев
подпись, дата

Нормоконтролер _____ С. В. Коржова
подпись, дата

Красноярск 2021

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ НЕФТИ И ГАЗА

Кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой РЭНГМ

_____ Н.Г. Квеско

« ____ » _____ 2021 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме бакалаврской работы

Студенту Дергачеву Максиму Олеговичу

Группа ЗНБ 16–04Б

21.03.01 Нефтегазовое дело

21.03.01.02 Эксплуатация и обслуживание объектов добычи нефти

Тема выпускной квалификационной работы: Исследование нагрузочных свойств шарикоподшипников

Утверждена приказом по университету № 6236/с от 13.05.2021 г.

Руководитель ВКР М.Т. Нухаев, профессор, доцент, ИНиГ СФУ, кафедра РЭНГМ.

Исходные данные для ВКР: Пакет технической, технологической и нормативной информации, тексты и графические материалы отчетов и исследовательских работ, научная литература, отчеты о научно–исследовательской работе.

Перечень разделов ВКР:

1. Виды и конструктив подшипников качения;
2. Патенты. Способы оценки работоспособности подшипников качения;
3. Конструктив стенда для испытания подшипников качения;
4. Экспериментальная часть и анализа данных.

Руководитель

подпись

М.Т. Нухаев

Задание принял к исполнению

подпись

М.О. Дергачев

« ____ » _____ 2021 г.

РЕФЕРАТ

На сегодняшний день сложно представить отрасли машиностроения, без применения подшипников качения, основными элементами которого являются шарики или ролики, установленные между кольцами и удерживаемые на определенном расстоянии друг от друга сепаратором. Шариковые подшипники используют в устройствах с небольшими или постоянными средними нагрузками и на валах небольших диаметров. Однако работоспособность подшипников качения, в основном, зависит от параметров трения качения: нагрузки, скорости вращения, свойств смазочного материала, температуры области контакта. Все эти условия определяют формирование эластогидродинамического слоя смазочного материала, разделяющего поверхности качения. При этом основным параметром, влияющим на формирование эластогидродинамического слоя смазочного материала, является скорость вращения подшипника – линейная скорость.

В данной работе представлен вариант определения диапазона линейных скоростей шарикоподшипников, при которых наблюдается образование эластогидродинамического слоя. В качестве установки для проведения исследований используем патент № 2567086 «Устройство для диагностики подшипников качения».

В литературном обзоре представлены основные методы и технологии, за счет которых возможно проведение анализа нагрузок на подшипники качения. В ходе обзора сделан вывод о недостаточном изучении изменения свойств смазочных масел при эксплуатации подшипниковых узлов.

В основной части был описан метод диагностики подшипников качения. Установлены необходимые параметры работы подшипников, проведен анализ образования эластогидродинамического слоя, сделаны необходимые выводы по работе узлов качения.

ЭЛАСТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ СЛОЙ, ПОДШИПНИКИ
КАЧЕНИЯ, ШАРИКОПОДШИПНИКИ, СМАЗЫВАЮЩИЙ МАТЕРИАЛ.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение..... | 5 |
| 1 Виды и конструктив подшипников качения. | 8 |
| 1.1 Смазочные материалы для подшипников и подшипниковых узлов. | 13 |
| 1.2 Эластогидродинамическая смазка..... | 17 |
| 2 Патенты. Способы оценки работоспособности подшипников качения. | 18 |
| 2.1 Патент №917031 Устройство для контроля состояния подшипника качения | 18 |
| 2.2 Патент №2006019 Устройство для оценки работоспособности подшипника качения | 20 |
| 3 Конструктив стенда для испытания подшипников качения..... | 25 |
| 3.1 Конструктивные особенности стенда | 25 |
| 3.2 Принцип работы стенда..... | 33 |
| 3.3 Методы расчета долговечности подшипников качения. | 37 |
| 3.4 Использование пружины радиальной нагрузки..... | 43 |
| 3.5 Использование пружины осевой нагрузки | 46 |
| 4 Экспериментальная часть и анализ данных | 48 |
| Заключение | 57 |
| Список использованных источников | 58 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Во всех отраслях машиностроения очень широкое применение нашли подшипники качения, основными элементами которого являются шарики или ролики, установленные между кольцами и удерживаемые на определенном расстоянии друг от друга сепаратором. Подшипник – сборочный узел, являющийся частью опоры или упора поддерживающий вал, ось или иную подвижную конструкцию. Он фиксирует положение в пространстве, обеспечивает вращение, качение или линейное перемещение с наименьшим сопротивлением, воспринимает и передаёт нагрузку от подвижного узла на другие части конструкции. Чаще всего подобные механизмы находят свое применение в производстве оборудования, в металлургии, при изготовлении автомобильной, авиационной и железнодорожной техники, а также во многих других сферах. Шариковые подшипники используют в устройствах с небольшими или постоянными средними нагрузками и на валах небольших диаметров. При создании валов с большими нагрузками прибегают к использованию роликоподшипников. Игольчатый тип часто применяют при изготовлении оборудования и узлов с большими нагрузками, но малыми габаритами. Чаще всего это практикуется в бытовой технике и станках.

Однако работоспособность подшипников качения, в основном, зависит от параметров трения качения: нагрузки, скорости вращения, свойств смазочного материала, температуры области контакта. Все эти условия определяют формирование эластогидродинамического слоя смазочного материала, разделяющего поверхности качения. При этом основным параметром, влияющим на формирование эластогидродинамического слоя смазочного материала, является скорость вращения подшипника – линейная скорость. Так, при низкой частоте вращения эластогидродинамический слой не образуется, а при высокой частоте происходит проскальзывание тел качения, что снижает

долговечность подшипника. Нагрузка (радиальная и осевая) определяет несущую способность эластогидродинамического слоя.

Важной составляющей применения подшипников качения в различных опорах является смазочный материал, оказывающий влияние на долговечность эксплуатации подшипников. При этом изменение свойств смазочных масел при эксплуатации данных узлов, изучено недостаточно.

Цель работы. Целью работы является определение диапазона линейных скоростей, учет необходимого смазочного материала, а также определение оптимальной температуры работы шарикоподшипников, при которых формируется эластогидродинамический слой смазочного материала для повышения срока службы подшипников качения.

Задачи исследования. Данная цель достигается решением ряда поставленных задач:

- произвести обзор научно–технической и патентной литературы по теме диссертации;
- рассмотреть способы повышения эксплуатационных свойств шарикоподшипников;
- изучить конструктивные особенности устройства для диагностики подшипников качения;
- определить технологические параметры для проведения опытов;
- провести исследования, по определению образования эластогидродинамического слоя в шарикоподшипниках;
- разработать практические рекомендации по режиму работы узлов подшипников качения.

Объект исследования – шарикоподшипники и их узлы

Предмет исследования – метод исследования нагрузочных свойств смазочных масел и скоростных параметров при работе шарикоподшипника

Метод исследования. Для решения поставленных задач использовались расчеты по утвержденным методикам для определения образования

эластогидродинамического слоя при определенных нагрузках на шарикоподшипник.

На защиту выносятся:

1. Результаты расчетов пружин осевой и радиальной нагрузок.
2. Диаграммы, подтверждающие теорию образования эластогидродинамического слоя при разных условиях
3. Выводы по контролю образования эластогидродинамического слоя.

Научно–исследовательская составляющая бакалаврской работы:

1. Получены результаты лабораторных испытаний по исследованию нагрузок и образованию эластогидродинамического слоя в шарикоподшипниках.

Практическая составляющая бакалаврской работы. На базе теоретических данных, а также устройства для диагностики подшипников качения, исследовано образование эластогидродинамического слоя в шарикоподшипниках. А также разработаны практические рекомендации, включающие технологию применения смазывающих материалов различных базовых основ к подшипникам качения.

Личный вклад автора. Автором был лично проведен эксперимент по исследованию нагрузочных свойств на шарикоподшипники, исследовано образование эластогидродинамического слоя. Так же обработаны лабораторные результаты, полученные в ходе экспериментов.

1 Виды и конструктив подшипников качения

В состав подшипника качения входят два кольца, комплект тел качения и сепаратор, предназначенный для удержания тел качения на фиксированных расстояниях друг от друга. Также, иногда используют и подшипники без сепаратора. Внутренняя поверхность наружного кольца и наружная поверхность внутреннего кольца снабжаются желобами – дорожками качения, предназначенными для движения тел качения в процессе работы подшипника.

В некоторых машинах и механизмах для увеличения точности работы, жесткости конструкции и снижения ее габаритов используют подшипники совмещенного типа, в которых роль одного из колец подшипника выполняет непосредственно вал (дорожка качения выполняется на валу) или корпусная деталь [1].

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

В подшипниках качения главенствующую роль играет трение качения, т.к. трение скольжения между сепаратором и телами качения, как правило, невелико. Поэтому в подшипниках качения, по сравнению с подшипниками скольжения, наблюдаются значительно меньшие потери энергии, а также меньший механический износ. Подшипники качения закрытого типа (с защитными крышками) почти не требуют какого-либо обслуживания, в то время, как открытые чувствительны к инородным телам, которые способны быстро разрушить подшипник.

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

Основные параметры подшипников:

- максимальные динамическая и статическая нагрузка;
- максимальная скорость;
- посадочные размеры;
- класс точности подшипников;
- требования к смазке;
- ресурс подшипника до появления признаков усталости, в оборотах;
- шумы подшипника;
- вибрации подшипника.

Нагружающие подшипник силы подразделяют на:

- радиальную, действующую в направлении, перпендикулярном оси подшипника;
- осевую, действующую в направлении, параллельном оси подшипника.

По принципу работы все подшипники можно разделить на два наиболее часто применяющиеся в машиностроении типа, это подшипники качения и подшипники скольжения.

Подшипники качения состоят из двух колец, тел качения (различной формы) и сепаратора (некоторые типы подшипников могут быть без сепаратора), отделяющего тела качения друг от друга, удерживающего на равном расстоянии и направляющего их движение. По наружной поверхности внутреннего кольца и внутренней поверхности наружного кольца (на торцевых поверхностях колец упорных подшипников качения) выполняют желоба – дорожки качения, по которым при работе подшипника катятся тела качения.[4]

В некоторых узлах машин в целях уменьшения габаритов, а также повышения точности и жёсткости применяют, так называемые, совмещённые опоры, когда дорожки качения при этом выполняют непосредственно на валу или на поверхности корпусной детали.

Подшипники качения, изготовленные без сепаратора, имеют большее число тел качения и большую грузоподъёмность. Однако при отсутствии

сепаратора в подшипниках предельные частоты вращения бессепараторных подшипников значительно ниже вследствие повышенных моментов сопротивления вращению.

В настоящее время используются следующие основные виды подшипников качения:

– шариковые подшипники: радиальные, радиальные самоустанавливающиеся – сферические, радиально – упорные, упорные, радиальные, предназначенные для корпусных конструкций;

– роликовые подшипники с роликами цилиндрической формы могут быть радиальные и упорными;

– роликовые подшипники с роликами конической формы могут быть упорными и радиально–упорными;

– роликовые подшипники с роликами сферической формы производятся радиальными самоустанавливающимися и упорными самоустанавливающимися;

– роликовые подшипники с игольчатыми роликами подразделяются на радиальные игольчатые, упорные игольчатые и комбинированные;

– прочие подшипники качения делятся на шариковые и роликовые с опорными роликами, роликовые радиально–тороидальные, роликовые радиальные с роликами витого типа, опорно–поворотные подшипники и подшипники комбинированных конструкций.

Классификация подшипников качения осуществляется на основе следующих признаков:

По виду тел качения:

- шариковые;
- роликовые (игольчатые, если ролики тонкие и длинные).

По типу воспринимаемой нагрузки:

- радиальные (нагрузка вдоль оси вала не допускается);

– радиально–упорные, упорно–радиальные. Воспринимают нагрузки как вдоль, так и поперек оси вала. Часто нагрузка вдоль оси только одного направления;

– упорные (нагрузка поперек оси вала не допускается);

– линейные. Обеспечивают подвижность вдоль оси, вращение вокруг оси не нормируется или невозможно. Встречаются рельсовые, телескопические или вальные линейные подшипники;

– шариковые винтовые передачи. Обеспечивают сопряжение винт–гайка через тела качения.

По числу рядов тел качения:

– однорядные;

– двухрядные;

– многорядные.

По способности компенсировать несоосность вала и втулки:

– самоустанавливающиеся;

– несамоустанавливающиеся.

На рисунке 1 представлены основные виды подшипников качения.

| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Радиальный шариковый подшипник | Радиально-упорный шариковый подшипник с четырёхточечным контактом | Самоустанавливающийся двухрядный радиальный шариковый подшипник |
|  |  |  |
| Радиальный шариковый подшипник для корпусных узлов | Радиальный роликовый подшипник | Радиально-упорный роликовый подшипник |
|  |  |  |
| Самоустанавливающийся радиальный роликовый подшипник | Самоустанавливающийся радиально-упорный роликовый подшипник | Самоустанавливающийся двухрядный радиальный роликовый подшипник с бочкообразными роликами (сферический) |
|  |  |  |
| Упорный шариковый подшипник | Упорный роликовый подшипник | Ролики и сепаратор упорного игольчатого подшипника |

Рисунок 1 – основные виды подшипников качения.

В подшипниках качения возникает преимущественно трение качения, а следовательно небольшие потери на трение скольжения между сепаратором и телами качения, поэтому по сравнению с подшипниками скольжения снижаются потери энергии на трение, и уменьшается износ. Закрытые подшипники качения, имеющие защитные крышки, практически не требуют обслуживания, открытые чувствительны к попаданию инородных тел, что может привести к быстрому разрушению подшипника [3].

Наибольшее применение нашли подшипники качения из-за ряда своих преимуществ:

- сравнительно малая стоимость вследствие массового производства подшипников;
- малые потери на трение и незначительный нагрев, потери на трение при пуске и установившемся режиме работы практически одинаковы;
- высокая степень взаимозаменяемости, что облегчает монтаж и ремонт машин;
- малый расход смазочного материала;
- не требуют особого внимания и ухода;
- малые осевые размеры.

К недостаткам подшипников качения относятся:

- высокая чувствительность к ударным и вибрационным нагрузкам вследствие большой жесткости конструкции подшипника;
- малонадежны в высокоскоростных приводах из-за чрезмерного нагрева и опасности разрушения сепаратора от действия центробежных сил;
- сравнительно большие радиальные размеры;
- шум при больших скоростях.

1.1 Смазочные материалы для подшипников и подшипниковых узлов

Основной проблемой подшипниковых узлов является прочность. Чаще всего она связана с начальной нагрузкой, которую очень трудно установить. В период приработки момент сопротивления преднагруженных подшипников быстро снижается. Поэтому начальная нагрузка может контролироваться только в новых подшипниках. Тем не менее повреждения могут возникать и при небольших нагрузках. Это связано с тем, что ролики и шарики склонны к скольжению вместо качения. При обычных условиях эксплуатации правильно подобранный и правильно используемый подшипник с 90 процентной вероятностью проработает весь срок службы, заложенный заводом изготовителем. Шанс выхода из строя в этом случае равен 10%. Порядка 43% подшипников приходят в негодность по причине плохой смазки, 27% – из-за плохого монтажа. Дело в том, что даже самая качественная сталь не может компенсировать недостатки смазочного материала и деформацию вала. Смазка подшипников ненадлежащего качества приводит к перегреву узла и его последующему заклиниванию [5].

При выборе смазочного материала для подшипника необходимо руководствоваться определенными требованиями производителя детали. Смазочный материал закладывается так, чтобы были покрыты все рабочие поверхности подшипника: сепаратор, ролики или шарики, дорожки качения. Низкоскоростные подшипники заполняются полностью. В скоростных узлах, где значение DN превышает 400000 об/мин смазка должна занимать 1/4 пространства. Во всех остальных случаях она закладывается на 1/3 объема. Так для уменьшения износа подшипников качения, в качестве смазочного материала в насосах используется для этой цели перекачиваемая жидкость для упрощения конструкции и для отвода тепла.

Выделяют синтетические, полусинтетические и минеральные масла. Синтетика производится на основе полимеров и различных соединений органических кислот. Сегодня на рынке представлены полиальфаолефиновые (ПАО), полигликолевые (ПАГ) и эфирные масла. По сравнению с минеральными, они практически не подвержены изменениям вязкости при перепадах температур и не теряют своих характеристик в агрессивной среде.

Минеральные масла изготавливают на основе продуктов нефтепереработки. Для усиления их рабочих свойств в состав материалов вводят различные присадки. Наряду с синтетикой, они широко используются в подшипниках качения и скольжения. Полусинтетика изготавливается на основе минеральных и синтетических масел.

Масла выполняют несколько важных функций:

- Фрикционная. Снижает силу трения при контакте скользящих или вращающихся поверхностей
- Защитная. Образует защитную пленку, которая предохраняет от коррозии и механических повреждений
- Барьерная. Защищает внутренние поверхности подшипника от проникновения механических частиц и агрессивных веществ
- Терморегулирующая. Снижает вероятность перегрева путем отвода тепла наружу

В подшипники, которые работают при низких температурах, рекомендуются масла с температурой застывания на 15–20 °С ниже условий эксплуатации. Например, если подшипник работает при температуре –20 °С, смазочный материал должен выдерживать минимум –35 °С. При этом вязкость продукта должна быть минимальной. Для смазывания высокотемпературных узлов нужно применять вязкие масла.

Чем выше угловая скорость вращения подшипника, тем меньше должна быть вязкость смазки. Если подшипник эксплуатируется при частых пусках, остановках и реверсах, масло должно быть более вязким.

В подшипниках скольжения преимущественно используются синтетические масла. В подшипниках качения вязкость материала определяется конструкцией детали. Например, в цилиндрических и шариковых подшипниках вязкость масла должна составлять не менее 13 мм²/с, в сферических и конических – не менее 20 мм²/с, в упорных – не менее 13 мм²/с.

Помимо выше указанных смазочных материалов, в подшипниках применяют пластичные смазки. Они представляют собой мази, которые служат для снижения трения. По сравнению с маслами они лучше удерживаются на вертикальных поверхностях, не выходят из контакта с взаимодействующими поверхностями и герметизируют смазываемые узлы. Пластичные смазки применяют, если подшипники работают при малых, средних, высоких скоростях и/или ударных нагрузках. В отличие от масел, пластичные смазки имеют более широкую область применения и подходят практически для любых условий эксплуатации узлов [6].

В зависимости от факторов работы подшипников выделяют:

- Универсальные смазки;
- Высокотемпературные смазки;
- Морозостойкие смазки;
- Смазки для высокоскоростных подшипников;
- Смазки для высоких и экстремально высоких нагрузок;
- Смазки для оборудования пищевой промышленности;
- Смазки для узлов, работающих под воздействием химически агрессивных сред;
- Шумоподавляющие смазки.

Пластичные смазки на 70–90 % состоят из базового масла (минеральное, синтетическое, полусинтетическое) и загустителя 10–15 %. В качестве загустителей используются различные мыла, продукты органического и неорганического происхождения и твердые углеводороды. Именно они позволяют смазке в состоянии покоя вести себя как твердое тело, а под

воздействием нагрузок – как жидкое. Присадки и различные добавки составляют до 5 % от общей массы смазочного материала. Это могут быть противозадирные, антиокислительные, антикоррозионные компоненты и т.д. Для придания дополнительных свойств в смазку добавляют антифрикционные и герметизирующие вещества: порошки цинка, меди или свинца, графит, дисульфид молибдена и др.

В зависимости от типа и состава все смазочные материалы обладают определенными свойствами.

– От прочности смазочного материала, зависит вероятность того, что он выдавится из подшипника. Данное свойство применимо к пластичным смазкам и маслам. Твердые смазочные материалы и газы лишены данной характеристики. Тем не менее смазка не должна обладать слишком высокой прочностью, так как она не сможет свободно попасть в зону трения.

– Вязкость смазки определяет ее консистенцию. Она варьируется от очень мягкой до мылообразной в пластичных смазках, и от очень жидкой до очень густой в маслах. Вязкость является непостоянной величиной, так как зависит от внешних факторов: температур, деформации т.п.

– Термостойкость определяет верхнюю границу рабочих температур смазочного материала. Чем она выше, тем лучше смазка будет работать при высоких температурах. Если термостойкость недостаточная, то смазочный материал может вытечь из зоны трения, закоксоваться и даже воспламениться. Поэтому термостойкие смазки являются наилучшим решением для работы при высоких температурах.

– Морозостойкость определяет нижнюю границу рабочих температур. Если она недостаточная, то смазка загустеет и затруднит движение узлов. Низкотемпературные смазки позволяют узлам бесперебойно работать при отрицательных температурах.

1.2 Эластогидродинамическая смазка

Износ подшипников напрямую зависит от свойств эластогидродинамического слоя.

Эластогидродинамическая смазка относится к таким условиям, при которых характер трения и толщина пленки между двумя поверхностями, находящимися в относительном движении, определяются упругими свойствами материала поверхности и вязкостными свойствами смазочного материала. Эластогидродинамическая смазка охватывает многие области трения и, прежде всего, тяжело нагруженные элементы машин: шестерни, шариковые и роликовые подшипники.

Эластогидродинамическая смазка – смазка, при которой трение и толщина пленки жидкого смазочного материала между двумя поверхностями, находящимися в относительном движении, определяются упругими свойствами материалов.

Изотермическая задача эластогидродинамической смазки впервые была решена А.М. Эртелем в 1939 г. Ему и его последователям удалось объединить основные действующие факторы для определения толщины эластогидродинамического смазочного слоя. Эта величина является определяющей при идентификации режима смазки, и поэтому при расчетах узлов трения, работающих в режиме эластогидродинамической смазки, для конструкторов она очень важна [8].

2 Патенты. Способы оценки работоспособности подшипников качения

2.1 Патент №917031 Устройство для контроля состояния подшипника качения

Изобретение относится к подшипниковой промышленности и может быть преимущественно использовано для контроля подшипников качения.

Известно устройство для контроля подшипника качения, содержащее смонтированные в корпусе приводной вал для установки контролируемого подшипника, включенного как электрическое сопротивление и точечный токосъемник, имеющий подвижную и неподвижную части.

Однако известное устройство обладает тем недостатком, что не позволяет качественно контролировать состояние подшипников качения.

Цель изобретения повышение качества контроля состояния подшипников качения [9].

Поставленная цель достигается тем, что устройство содержит смонтированные в корпусе приводной вал для установки контролируемого подшипника, включенного как электрическое сопротивление и точечный токосъемник, имеющий подвижную и неподвижную части. Устройство снабжено штырями, штоком, диском и уплотнительными кольцами [12].

Штыри размещены равномерно по окружности на торце вала, шток с подпружиненными на нем уплотнительными кольцами смонтирован соосно валу, а диск установлен на обращенном к валу конце штока и выполнен с отверстиями для штырей, при этом подвижная часть точечного токосъемника установлена на свободном конце штока [13].

На рисунке 2 представлена конструктивная схема устройства.

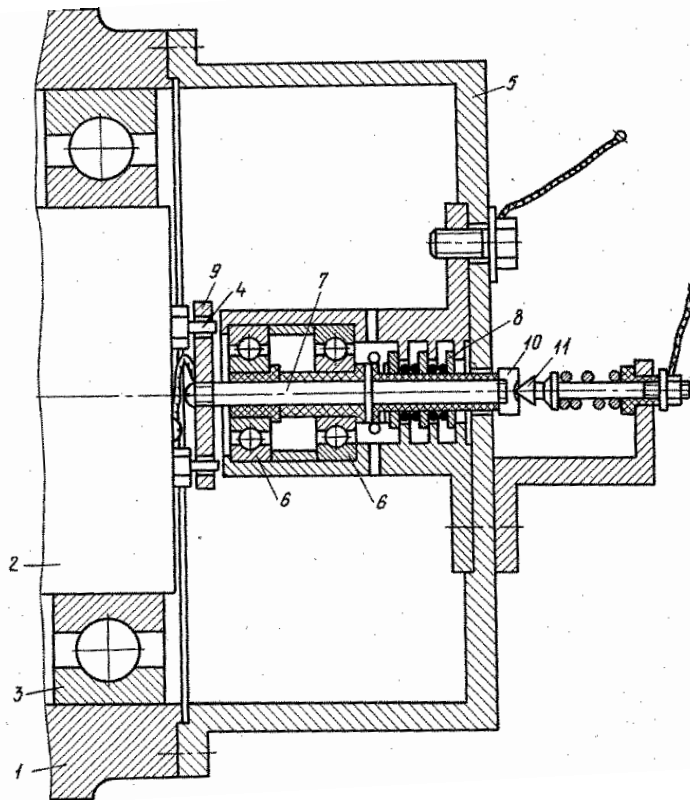


Рисунок 2 – Устройство для контроля состояния подшипника качения

В корпусе 1 смонтирован приводной вал 2 для установки контролируемого подшипника 3. Вал 2 содержит штыри 4 равномерно размещенные по окружности на торце вала 2. С помощью крышки 5 и подшипников 6 на корпусе 1 установлен шток 7 с подпружиненными на нем уплотнительными кольцами 8. Диск 9 установлен на обращенном к валу 2 конце штока 7 и выполнен с отверстиями для штырей 4. На другом конце штока 7 установлена подвижная часть 10 токосъемника 11 [14].

Устройство работает следующим образом:

при вращении вала 2 между поверхностями качения подшипника 3 возникает электрическое сопротивление, которое характеризует состояние подшипника. Наружное кольцо подшипника 3 электрически соединено с корпусом 1. Электрическое подключение вращающегося кольца подшипника 3

осуществляется с помощью токосъемника 11, подвижная часть 10 которого связана с валом 2 через штыри 4 и шток 7 [15].

2.2 Патент №2006019 Устройство для оценки работоспособности подшипника качения

Использование: подшипниковая промышленность, оценка работоспособности подшипников качения. Сущность изобретения: устройство содержит подшипник (1), закрепленный на приводном валу в корпусе (3), источник электрического напряжения (4), токосъемник (5), формирователь импульсов (6), четыре электронных ключа (7–10), таймер (11), генератор высокочастотных импульсов (12), диск с закрепленными на нем штырями (13), датчик фиксации угловых меток вала (15), датчик прохождения тел качения (16), пять счетчиков (17–21), микропроцессор (22), блок индикации (23) и блок ввода информации (24) [23].

Изобретение относится к подшипниковой промышленности и может быть использовано преимущественно для оценки работоспособности подшипников качения в процессе их испытаний и эксплуатации.

Цель изобретения – повышение точности и производительности.

Это достигается тем, что устройство для оценки работоспособности подшипника качения, содержащее контролируемый подшипник, закрепленный на приводном валу в корпусе, источник электрического напряжения, токосъемник, формирователь импульсов, датчик прохождения тел качения, соединенный через первый электронный ключ с первым входом первого счетчика, второй электронный ключ, выход которого соединен с первым входом второго счетчика, генератор импульсов и таймер, снабжено двумя электронными ключами, тремя счетчиками, микропроцессором, блоком индикации, блоком ввода информации, кнопкой "СБРОС" и установленным на приводном валу, диском с метками, датчиком меток, выход которого соединен

с первым входом второго ключа, входы формирователя импульсов подсоединены к источнику электрического напряжения и соответственно к корпусу подшипника и токосъемнику, контактирующему с валом, а выход – к первым входам третьего и четвертого ключей, вторые входы ключей подсоединены к выходу таймера и первому входу микропроцессора, первый вход таймера соединен с выходом генератора импульсов и с третьим входом третьего ключа, выход третьего ключа соединен с первыми входами третьего и четвертого счетчиков, выход четвертого ключа подсоединен к первому входу пятого счетчика, вторые входы счетчиков соединены с первым выходом микропроцессора и с вторым входом таймера, третьи входы счетчиков подсоединены к второму входу микропроцессора, к третьему и четвертому входам, которого подсоединены кнопка "СБРОС" и блок ввода информации, к третьему выходу микропроцессора подсоединен блок индикации [25; 26].

Устройство содержит контролируемый подшипник 1, закрепленный на приводном валу 2 в корпусе 3, источник 4 электрического напряжения, токосъемник 5, формирователь 6 импульсов, входы которого подсоединены к источнику 4 электрического напряжения и соответственно к корпусу 3 подшипника и токосъемнику 5, электронные ключи 7–10, таймер 11, генератор 12 импульсов, диск 13 с метками 14, датчик 15 меток, датчик 16 прохождения тел качения, пять счетчиков 17–21, микропроцессор 22, третий выход которого соединен с блоком 23 индикации. Четвертый вход микропроцессора подключен к блоку ввода информации, а третий вход – к кнопке "СБРОС" 25. Датчик 16 прохождения тел качения соединен через первый электронный ключ 7 с первым входом первого счетчика 17, а второй электронный ключ 8 выходом соединен с первым входом второго счетчика 18. Выход формирователя 6 подсоединен к первым входам третьего 9 и четвертого 10 электронных ключей. Вторые входы ключей 7–10 подсоединены к выходу таймера 11 и первому входу микропроцессора 22. Первый вход таймера 11 соединен с выходом генератора 12 и с третьим входом третьего ключа 9, выход третьего ключа 9 соединен с

первыми входами третьего 19 и четвертого 20 счетчиков, выход четвертого ключа 10 подсоединен к первому входу пятого 21 счетчика. Вторые входы счетчиков 17–21 соединены с первым выходом микропроцессора 22 и с вторым входом таймера 11, третьи входы счетчиков подсоединены к второму выходу микропроцессора, а выходы счетчиков подсоединены к второму входу микропроцессора 22. Выход датчика 15 меток соединен с первым входом второго электронного ключа 3 [27].

На рисунке 3 представлена схема устройства; на рисунке 4 – временная диаграмма работы устройства.

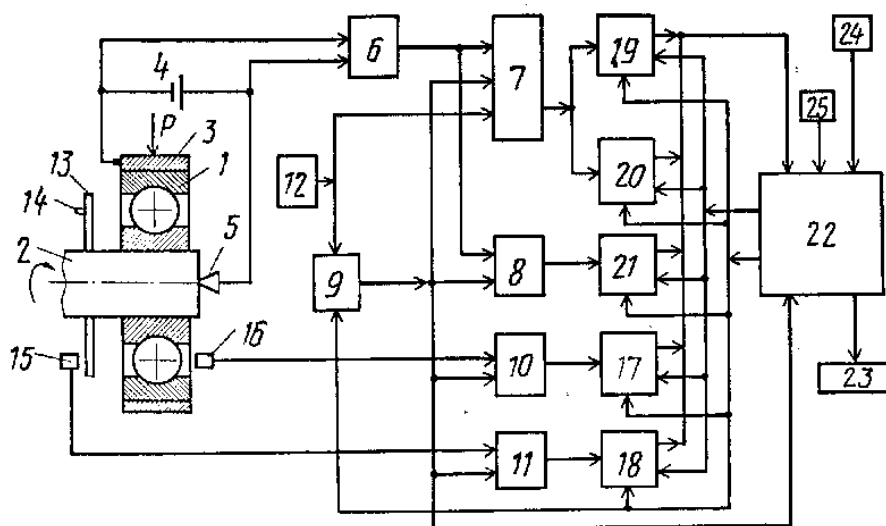


Рисунок 3 – Схема устройства

Устройство работает следующим образом. Приводят смазанный контролируемый подшипник 1 во вращение с помощью приводного вала 2, нагруженного радиальной нагрузкой P. При вращении подшипника 1 между контактными (рабочими) поверхностями беговых дорожек и тел качения возникает гидродинамическая масляная пленка. Наличие на рабочих поверхностях деталей подшипника дефектов в виде рисок, царапин, вмятин, забоин, выкрашиваний и т. п. приводит к резкому уменьшению толщины масляной пленки или ее разрыву – к появлению металлоконтактов. В

результате этого электрическое сопротивление подшипников 1, включенного в электрическую цепь источника электрического напряжения 4 резко уменьшается, что приводит к появлению импульсов напряжения на выходе формирователя 6. При этом импульсы напряжения имеют длительность, равную длительности резкого уменьшения электрического сопротивления масляной пленки в подшипнике, т. е. длительность металлоконтактов, вызванных наличием дефектов на рабочих поверхностях беговых дорожек и тел качения подшипника [28].

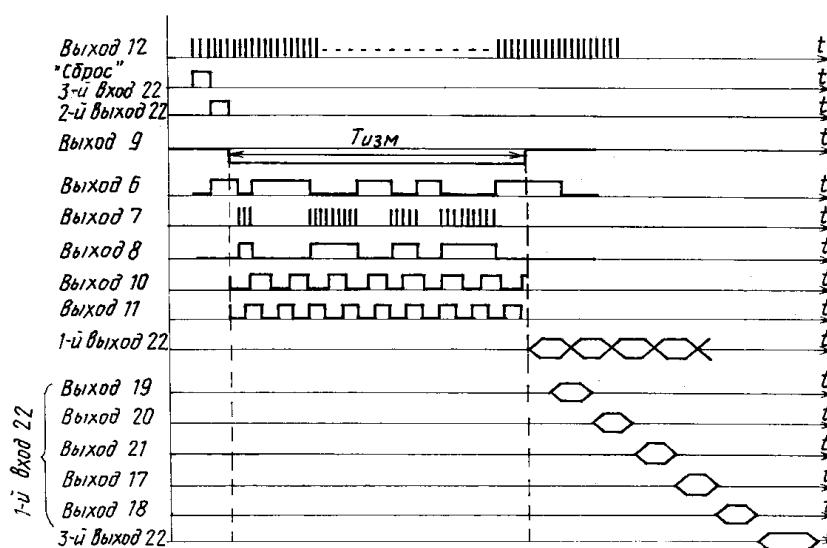


Рисунок 4 – Временная диаграмма работы устройства

В исходном состоянии после включения устройства электронные ключи 7–10, таймер 11, счетчики 17–21, микропроцессор 22, блок 23 и блок 24 находятся в произвольном состоянии.

Генератор 12 формирует последовательность высокочастотных импульсов с опорной частотой, например, $f = 10$ МГц, которые поступают на третий вход ключа 9 и первый вход таймера 11. С помощью таймера 11 устанавливается заданный интервал времени контроля подшипника, например, 10 с. Нажатием кнопки "СБРОС" 25 микропроцессор 22 первым выходом обнуляет счетчик 17–21 и таймер 11, который своим сигналом с выхода

открывает электронные ключи 7–10. Импульсы напряжения с выхода формирователя 6 через открытые ключи 9 и 10 поступают на входы счетчиков 19, 20 и 21, измеряющих соответственно суммарную длительность металлоконтактов, максимальную длительность единичного металлоконтакта и суммарное количество металлоконтактов.

Так как при оценке работоспособности подшипника 1 заданные время контроля и период следования высокочастотных импульсов генератора 12 есть величины постоянные, то количество высокочастотных импульсов, поступающих с выхода ключа 9 на счетчики 19 и 20, будут пропорциональны длительности металлоконтакта [30].

Электрические сигналы от датчиков 15 и 16 через ключи 7 и 8 поступают на входы счетчиков 17 и 18, измеряющих соответственно суммарное количество тел качения контролируемого подшипника и суммарное количество угловых меток вала.

По истечении заданного времени контроля 10 с – подшипника таймер 11 сигналом закрывает ключи 7–10 и дает разрешение микропроцессору 22 на поочередное считывание со счетчика 17–21 накопленной информации и обработки данной информации в микропроцессоре 22.

Микропроцессор 22 по заданной программе производит вычисления следующих параметров: величину проскальзывания тел качения подшипника, проходящих за время контроля мимо датчика 15.

Отличительное суммарное время контакта тела качения контролируемого подшипника; среднюю длительность металлоконтакта; относительную долю времени работы подшипника в режиме жидкостного трения 100 %.

С помощью кнопок блока 24 ввода информации производится набор кода, характеризующего конкретный типоразмер (номер) контролируемого подшипника, в результате чего сигнал из блока 24 поступает в микропроцессор 22, в котором сравниваются значения параметров контролируемого подшипника с допустимыми значениями эталонного подшипника [31; 32].

По результатам сравнения всей совокупности вышеуказанных параметров микропроцессор 22 определяет комплексное состояние контролируемого подшипника и на блоке индикации 23 высвечивается соответствующая информация для конкретного номера подшипника "годен" или "брак".

При необходимости для оценки работоспособности подшипника по какому-либо параметру с помощью кнопок блока 24 ввода информации на блок 23 можно выводить численные значения не только отдельные параметры контролируемых подшипников, но и результаты сравнений их с параметрами эталонных подшипников [33].

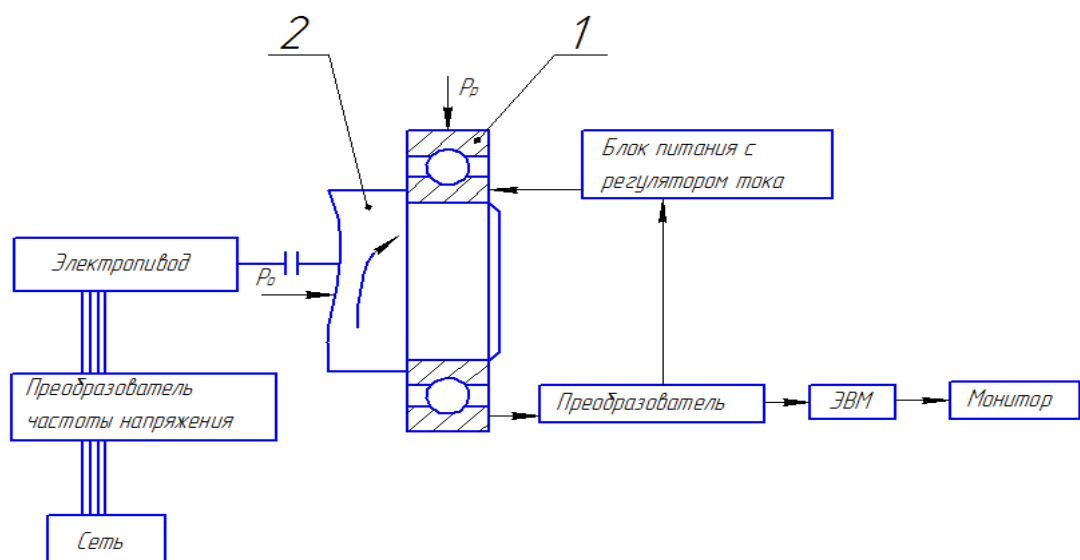
3 Конструктив стенда для испытания подшипников качения

3.1 Конструктивные особенности стенда

Поставленная задача для решения технического результата достигается тем, что стенд для оценки работоспособности подшипников качения состоит из ряда составляющих, которые позволяют регулировать различные параметры процесса качения в узле подшипников трения качения.

Стенд для испытания подшипников качения состоит из платформы, подшипникового узла, узла компенсации осевой нагрузки от веса электропривода, узлов осевой и радиальной нагрузки, блока регулирования частоты переменного напряжения питания электропривода; источника постоянного стабилизированного напряжения и измерительного устройства, определяющего параметры электрического тока, протекающего через испытуемый подшипник.

На рисунке 5 представлена схема соединения испытуемого подшипника с регистрирующей аппаратурой, посредством которой происходит мониторинг проводимого исследования.



1 – испытуемый подшипник качения, 2 – вал электродвигателя

Рисунок 5 – Схема соединения испытуемого подшипника с регистрирующей аппаратурой

Платформа 1 выполнена прямоугольной формы, на которой установлены вертикально две параллельные направляющие оси 2, нижняя часть которых выполнена с трапецеидальной резьбой, а верхняя без резьбы.

Узел основания приведен на рисунке 6.

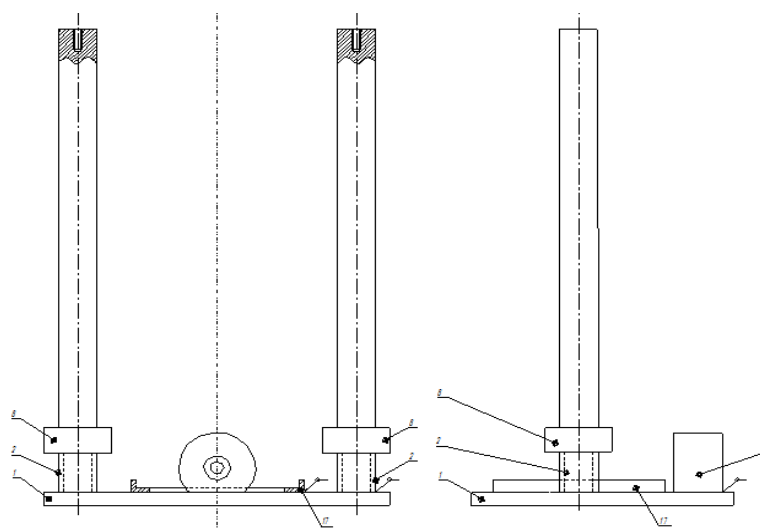


Рисунок 6 – Узел основания

Подшипниковый узел, свободно установлен и электроизолирован на шайбе 16, жестко закрепленной на основании 1 соосно валу электропривода и выполнен с возможностью испытания подшипников с различными наружными диаметрами обойм, устанавливаемых на оси 3 с упором в одно из 5-ти колец 18, установленных на дне корпуса подшипникового узла. Кольца выполнены с пазом диаметром под соответствующий диаметр наружного кольца испытуемого подшипника. При испытании подшипников большего диаметра шайбы 18, предназначенные для испытания подшипников с меньшим диаметром подшипникового узла 16 изымаются, что обеспечивает постоянство размера верхней кромки подшипника от основания 1. Шайбы 18, установлены в корпусе подшипникового узла, служащего масляной ванной, нижний торец которого выполнен с цилиндрической выемкой для установки нагревателя 19 закрытого цилиндрической крышкой 20 с помощью винтов 21, верхний торец подшипникового узла закрыт крышкой 22, выполненной с возможностью заливки жидкого смазочного масла или пластичной смазки. Корпус подшипникового узла покрыт теплоизоляцией. Подшипниковый узел приведен на рисунке 7 [17].

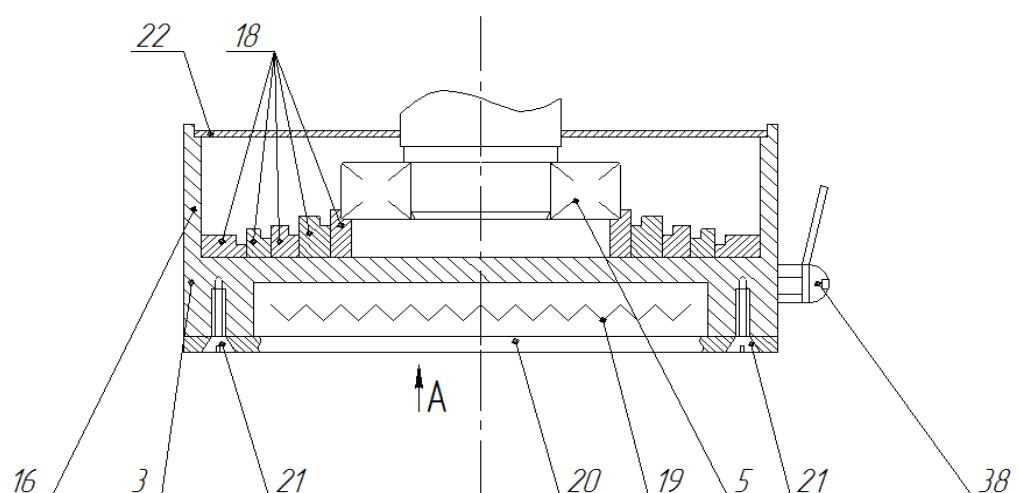


Рисунок 7 – Подшипниковый узел

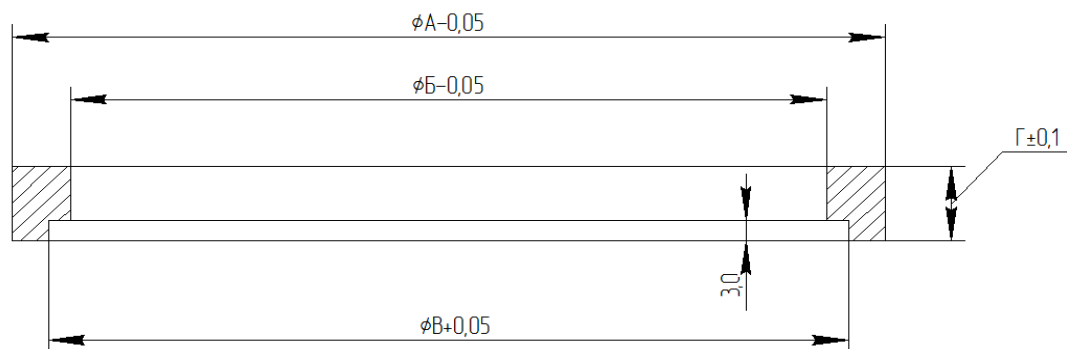


Рисунок 8 – Шайба для установки подшипников

Таблица 1 – Размеры шайб 18

| | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|----|
| А | 160 | 134 | 120 | 104 | 86 |
| Б | 134 | 119 | 104 | 84 | 74 |
| В | 140 | 125 | 110 | 90 | 80 |
| Г | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 |

Узел компенсации осевой нагрузки обеспечивает снятие осевой нагрузки от электропривода 6 на испытуемый подшипник 5 и состоит из двух гаек, установленных на резьбовых участках направляющих осей 2, на которых установлены пружины 17, упирающиеся во втулки 25, свободно перемещающиеся по направляющим осям 2 и жестко соединенные с боковыми щеками 10 платформы 11, выполненной с горизонтальным основанием 12. На платформе 11 закреплен электропривод 9, на выходном валу которого установлена втулка 14, на торце которой выполнена резьба для установки сменной оси 15, на которой устанавливаются 5 различных размеров шариковых или роликовых подшипников 5. Платформа 11 выполнена с возможностью вертикального перемещения за счет перемещения гаек и сжатия пружин 17 [17].

На нижней поверхности горизонтального основания 12 платформы 11 установлен токосъемник 37, через который ток от стабилизированного источника постоянного напряжения 3 В подается на втулку 14, с нее на испытуемый подшипник 5, корпус подшипникового узла, преобразователь, один выход которого соединен с блоком питания, а второй с измерителем тока (ЭВМ) выполненным с возможностью записи амплитуды тока, проходящего через испытуемый подшипник на дисплее в виде диаграммы.

Узел осевой нагрузки включает две втулки 23 скользящей по направляющим осям 2, жестко соединенных с помощью швеллера 24. Между узлом осевой нагрузки и втулками 10 установлены распорные втулки 25, передающие нагрузку на испытуемый подшипник 5.

На верхних торцах направляющих осей 2 закреплен швеллер 7 с помощью болтов. Между швеллерами 7 и 24 соосно валу электропривода, установлена пружина 26 в тарелках, а необходимое осевое усилие создается с помощью пружины 26, сжимаемой винтом 27, величина которой задается с помощью тарированной линейки 28.

Радиальная нагрузка создается с помощью узла, общий вид которого представлен на рисунке 10. Узел радиальной нагрузки состоит из корпуса 31. Жестко закрепленного на платформе 1, выполненного с цилиндрической полостью, в которой установлен цилиндрический упор 32 подпружиненный пружиной 33 и втулкой 34. Выполненной с возможностью перемещения с помощью винта 35, на котором установлен диск–указатель 36. На корпусе 31 установлена мерная линейка 37 оттарированная в нагрузке действующий на подшипниковый узел.

Стенд позволяет исследовать как отдельно влияние осевой и радиальной нагрузок, так и их совместное действие на формирование эластогидродинамического слоя между телами качения [17].

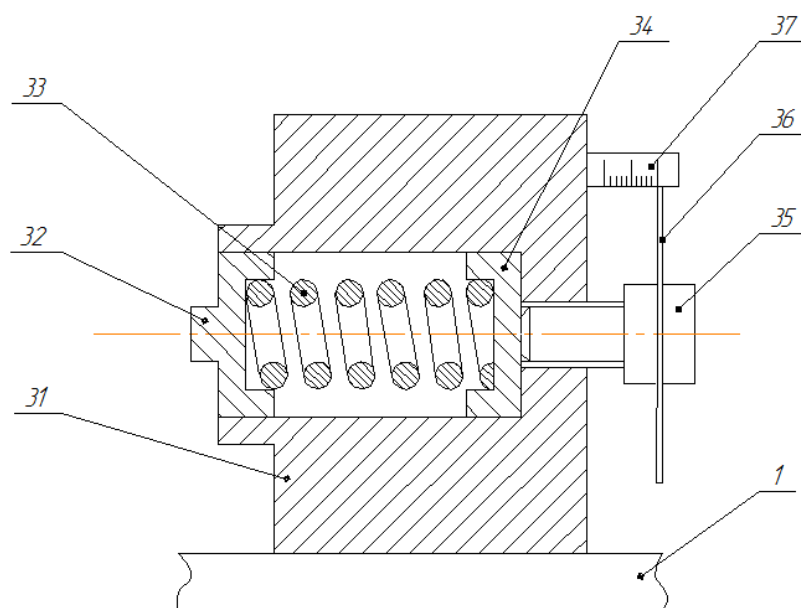


Рисунок 9 – Узел радиальной нагрузки

Блок регулирования частоты переменного напряжения предназначена для установки заданного тока, протекающего через испытуемый подшипник.

Измерительное устройство предназначено для измерения и регистрации тока, протекающего через испытуемый подшипник и состоит из стандартных изделий: преобразователя *R485*, компьютера и монитора.

Общий вид стенда представлен на рисунке 10.

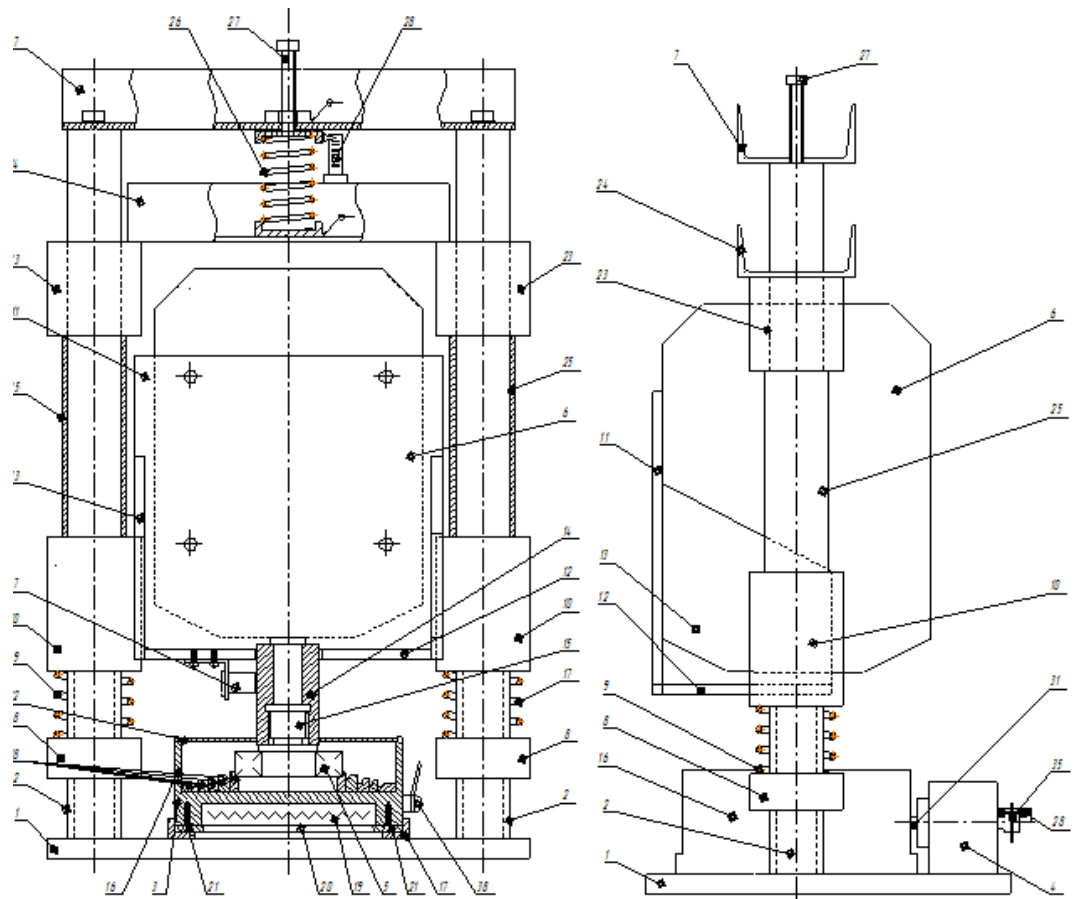


Рисунок 10 – Общий вид станда для испытания подшипников качения



Рисунок 11 – Устройство для диагностики подшипников качения



Рисунок 12 – ТРМ 202 измеритель – регулятор тока, АС3–М – вывод данных на экран.



Рисунок 13 – регулятор оборотов

3.2 Принцип работы стенда

Перед работой стенда необходимо осуществить следующие операции. Первая операция предусматривает установку испытуемого подшипника 5 во втулку 14. Предварительно необходимо подшипник установить на ось 15, причем для каждого размера подшипника изготавливается своя ось. Для установки подшипника во втулке 14 необходимо с помощью вращения гаек (по часовой стрелке) поднять платформу 11 на необходимую высоту, удобную для заворачивания оси 15 с подшипником 5 во втулку 14, при этом крышка 22 должна быть сверху подшипника [17].

Вторая операция заключается в опускании платформы 11 с электроприводом 6 до контакта с одним из колец 18. Для этого от стабилизированного источника напряжения подается постоянное напряжение через токосъемник на подшипник. Опускание платформы производится до тех пор, пока подшипник не коснется шайбы 18, при этом на источнике питания микроамперметр покажет значение тока равное 100 мкА. При испытании подшипников с большими размерами верхней обоймы, шайбы 18, предназначенные для испытания подшипника с меньшими размерами удаляются. В момент контакта подшипника 5 с шайбой 18 осевая нагрузка на подшипник отсутствует, поэтому на линейке 28 стрелка, закрепленная на тарелке, устанавливается на нулевой отметке.

Третья операция заключается в заливке смазочного масла в корпусе подшипникового узла через отверстие в крышке 22. Заправка пластиковой смазкой осуществляется перед второй операцией. Расположение нагревательного элемента в подшипниковом узле изображено на рисунке 14.

Четвертая операция предусматривает нагревание смазочного масла до требуемой температуры, задаваемой терморегулятором ТР 101.

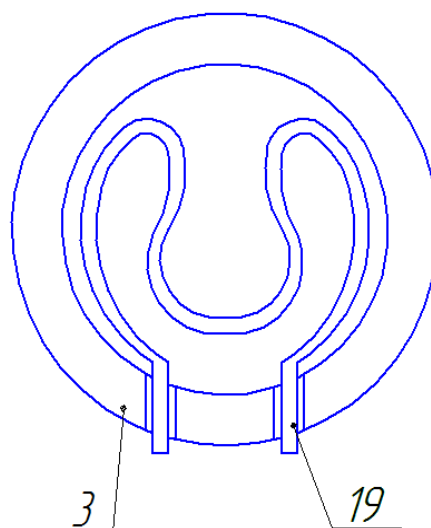


Рисунок 14 – Расположение нагревательного элемента в подшипниковом узле

После проведения данных операций стенд готов к работе. Работа стенда заключается в определении частоты вращения электропривода, при которой наступает формирование на поверхностях трения тел качения подшипника 5 эластогидродинамического слоя, полностью разделяющего их поверхности, при этом ток, протекающий через поверхности тел качения отсутствует. Изменяя частоту вращения электропривода с помощью преобразователя частоты напряжения при разных значения осевой и радиальной нагрузок, а также их совместного действия с помощью преобразователя $R3$ и ЭВМ величина амплитуды тока, протекающего через испытуемый подшипник, записывается на мониторе в виде диаграммы, по которой определяется влияние параметров трения на формирования эластогидродинамического слоя между поверхностями тел качения, а также частота вращения (или линейная скорость) подшипника, при которой эластогидродинамический слой полностью разделяет тела качения отсутствует. При отсутствии тока и данных параметрах качения долговечность испытуемого подшипника максимальна [17].

Пружины осевой и радиальной нагрузок были дополнительно оттарированны на образцовом переносном динамометре ДОСМ – 3 – 1, рисунок

12, и были составлены графики зависимости нагрузки от оборотов регулировочного болта, рисунок 15.

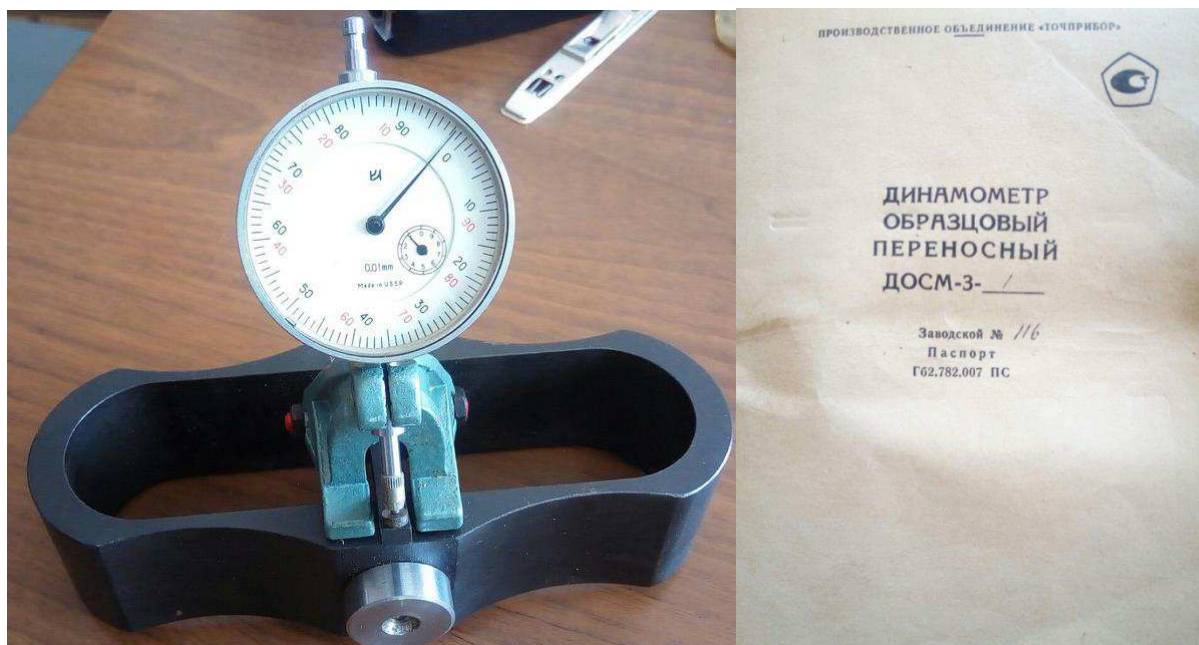


Рисунок 15 – Динамометр образцовый переносной

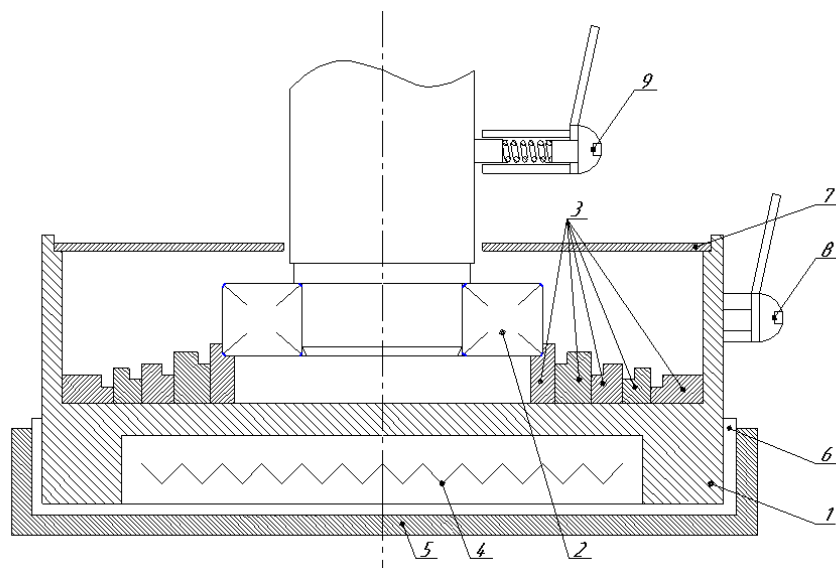


Рисунок 16 – График зависимости осевой нагрузки от оборотов регулировочного болта



Рисунок 17 – Графики зависимости радиальной нагрузки от оборотов регулировочного болта

Схема расположения электроизоляции подшипникового узла и токосъёмников представлена на рисунке 18.



| <i>Поз</i> | <i>Наименование</i> | <i>Кол</i> | <i>Прим</i> |
|------------|--------------------------------------|------------|-------------|
| 1 | <i>Корпус подшипникового узла</i> | 1 | |
| 2 | <i>Испытуемый подшипник</i> | 1 | |
| 3 | <i>Шайба</i> | 5 | |
| 4 | <i>Электронагреватель</i> | 1 | |
| 5 | <i>Нижняя крышка</i> | 1 | |
| 6 | <i>Электроизоляция</i> | 1 | |
| 7 | <i>Верхняя крышка</i> | 1 | |
| 8 | <i>Токоъемник</i> | 1 | |
| 9 | <i>Узел подачи тока на подшипник</i> | 1 | |

Рисунок 18 – Схема расположения электроизоляции и токосяёмников

Преимущество стенда заключается в определении влияния осевой, радиальной и совместных нагрузок, а также температуры смазочного материала, степени его окисления и частоты вращения подшипника на формирование эластогидродинамического слоя на поверхностях тел качения.

3.3 Методы расчета долговечности подшипников качения

Выбор подшипников качения основан на расчетах долговечности, условной нагрузки и коэффициента работоспособности. Однако долговечность зависит от усталостных процессов в металле колец и тел качения, поэтому нами

ставится задача определения интенсивности протекания этих процессов. И в дальнейшем учитывать их в расчетных формулах.

Связь расчетной долговечности h , условной нагрузкой Q , числом оборотов n и коэффициентом работоспособности C определяется равенством

$$Q (n \cdot h)^{0.3} = C, \quad (1)$$

где C – коэффициент работоспособности;

Q – условная нагрузка, Н;

n – число оборотов, об/мин;

h – расчетная долговечность.

Условная нагрузка Q учитывает характер и направление действующих нагрузок, особенности кинематики и температуру узла. Условную нагрузку определяют по формулам [6]

Для радиальных подшипников

$$Q = (R \cdot Kk + mA) \cdot K\delta \cdot Kt, \quad (2)$$

Для радиально–упорных подшипников

$$Q = (R \cdot Kk + m(A - S)) \cdot K\delta \cdot Kt, \quad (3)$$

Для упорных подшипников

$$Q = A \cdot K\delta \cdot Kt, \quad (4)$$

где R – осевая радиальная нагрузка, кг;

A – осевая нагрузка, кг;

S – осевая сила (реакция), возникающая в подшипника от радиальной нагрузки (для радиально–упорных подшипников);

m – коэффициент, учитывающий неодинаковое влияние радиальных и осевых нагрузок на срок службы подшипника;

$K\delta$ – коэффициент, учитывающий влияние характера нагрузки на срок подшипника;

Kt – коэффициент, учитывающий влияние температурного режима на срок службы подшипника;

Kk – коэффициент, учитывающий зависимость срока службы от того, какое кольцо вращается относительно вектора нагрузки.

Выбор подшипников по коэффициенту работоспособности производят по формулам, полученным путем подставления значений Q в формулах 2,3,4 в формулу 1, тогда для радиальных подшипников

$$C = (R \cdot Kk + m A) \cdot K\delta \cdot Kk (n h)^{0.3}, \quad (5)$$

Для радиальных роликовых подшипников расчет ведут исходя только из радиальной нагрузки

$$C = R \cdot Kk \cdot K\delta \cdot Kt (n h)^{0.3}, \quad (6)$$

Для радиально–упорных подшипников

$$C = (R \cdot Kk + (m A - S)) \cdot K\delta \cdot Kk (n h)^{0.3}, \quad (7)$$

где $S \approx 1.3R \cdot tg\beta$, β – угол контакта тел качения с дорожкой качения наружного кольца подшипника;

R – тоже, что и в формуле 2;

A – тоже, что и в формуле 2;

S – тоже, что и в формуле 3;
 m – тоже, что и в формуле 2;
 $K\delta$ – тоже, что и в формуле 2;
 Kt – тоже, что и в формуле 2;
 Kk – тоже, что и в формуле 2;
 C – тоже, что и в формуле 1.

Для упорных подшипников

$$C = A \cdot K\delta \cdot Kk (n h)^{0.3}, \quad (8)$$

где A – тоже, что и в формуле 2;
 n – тоже, что и в формуле 1;
 $K\delta$ – тоже, что и в формуле 2;
 h – тоже, что и в формуле 1;
 Kk – тоже, что и в формуле 2;
 C – тоже, что и в формуле 1.

Вторую методику рассмотрим на основе межгосударственного стандарта [7].

Базовая динамическая радиальная расчетная грузоподъемность для шариковых радиальных и радиально–упорных подшипников

При $D_w \leq 25.4$ мм

$$Cr = bm \cdot fc (icos\alpha)^{0.7} \cdot Z^{\frac{2}{3}} \cdot Dw^{1.8}, \quad (9)$$

При $D_w > 25.4$ мм

$$Cr = 3.647 bm \cdot fc (icos\alpha)^{0.7} \cdot Z^{\frac{2}{3}} \cdot Dw^{1.4}, \quad (10)$$

Базовая динамическая осевая расчетная грузоподъемность (Ca) для шариковых и упорно–радиальных однорядных одинарных или двойных подшипников

При $D_w \leq 25.4$ мм, $\alpha = 90^\circ$

$$Ca = bm \cdot fc \cdot Z^{\frac{2}{3}} \cdot Dw^{1.8}, \quad (11)$$

При $D_w \leq 25.4$ мм, $\alpha \neq 90^\circ$

$$Ca = bm \cdot fc(\text{icos}\alpha)^{0.7} \cdot \text{tg}\alpha \cdot Z^{\frac{2}{3}} \cdot Dw^{1.8}, \quad (12)$$

При $D_w > 25.4$ мм, $\alpha = 90^\circ$

$$Ca = 3.647 bm \cdot fc \cdot Z^{\frac{2}{3}} \cdot Dw^{1.4}, \quad (13)$$

При $D_w > 25.4$ мм, $\alpha \neq 90^\circ$

$$Ca = 3.647 bm \cdot fc (\text{icos}\alpha)^{0.7} \cdot \text{tg}\alpha \cdot Z^{\frac{2}{3}} \cdot Dw^{1.4}, \quad (14)$$

где D_w – диаметр шарика, мм;

Ca – базовая динамическая осевая расчетная грузоподъемность, Н;

Cr – базовая динамическая радиальная расчетная грузоподъемность, Н;

bm – коэффициент, зависящий от геометрии деталей подшипника, точность их изготовления и материала;

α – номинальный угол контакта подшипника;

i – число рядов тел качения в подшипнике;

Z – число шариков или роликов в однорядном подшипнике.

Эквивалентная динамическая радиальная нагрузка (Pr) для шариковых радиальных и радиально–упорных подшипников при постоянных радиальной и осевой нагрузках определяется по формуле

$$Pr = XFr + YFa, \quad (15)$$

Для шариковых упорно–радиальных подшипников с углом, $\alpha \neq 90^\circ$ при постоянных радиальной и осевой нагрузках применяется формула 15. Для шариковых подшипников с углом, $\alpha = 90^\circ$ динамическая эквивалентная осевая нагрузка (Pa) определяется формулой 16

$$Pa = Fa, \quad (16)$$

где X – коэффициент динамической радиальной нагрузки;

Y – коэффициент динамической осевой нагрузки;

Fr – радиальная нагрузка действующая на подшипник, Н;

Fa – осевая нагрузка на подшипник.

Базовый расчетный ресурс ($L10$) для шарикового радиального и радиально–упорного подшипника определяется по формуле 17

$$L10 = \left(\frac{Cr}{Pr}\right)^3, \quad (17)$$

Для шариковых упорных и упорно–радиальных подшипников 18

$$L10 = \left(\frac{Ca}{Ha}\right)^3, \quad (18)$$

где Ca – тоже, что и в формуле 11;

Cr – тоже, что и в формуле 9.

Значение коэффициентов, используемых в формулах 9–17 приводятся к стандарту, что позволяет определить базовую динамическую радиальную грузоподъемность, эквивалентную динамическую радиальную нагрузку, базовый расчетный ресурс, динамическую эквивалентную осевую нагрузку для различных типов подшипников [10].

Из приведённых методик следует, что предложенные эмпирические формулы выведены расчетно–экспериментальными методиками, а значение коэффициентов учитывают многообразие факторов и условий эксплуатации подшипников.

На основе существующих проблем и конструктивных недочетов устройств–аналогов было собрано новое устройство для исследования образования эластогидродинамического слоя между парами трения качения. Задачей изобретения является повышение информативности устройства при оценке работоспособности подшипников качения путем определения влияния параметров трения качения на формирование эластогидродинамического слоя на поверхностях трения.

3.4 Использование пружины радиальной нагрузки

Для создания радиальной нагрузки, выбираем и используем пружину изготовленную из проволоки класса II по ГОСТ 9389–75, с нагрузкой $P_1 = 25,8$ кг, диаметром проволоки $d = 4$ мм, и наружным диаметром пружины $D = 40$ мм. Подбираем пружину из таблицы стандартных пружин в нормах станкостроения с шагом $t = 12$ мм, с деформацией одного витка пружины при нагрузке $f = 4,7$ мм и с длиной пружины под нагрузкой $H_1 = 40,5$ мм [9].

Шаг пружины t_1 одного витка пружины при нагрузке P_1

$$t_1 = t - f_1, \quad (20)$$

где t_1 – шаг пружины одного витка пружины при нагрузке P_1 , мм;

t – шаг пружины одного витка пружины без нагрузки, мм;

f – деформация одного витка пружины при нагрузке P_1 , мм.

В результате решения получим

$$t_1 = 12 - 4,7 = 7,3, \text{ мм}$$

Число витков пружины

$$n = \frac{H_1 - d}{t_1}, \tag{21}$$

где t_1 – тоже, что и в формуле 20;

n – число витков пружины;

H_1 – длина пружины под нагрузкой P_1 , мм;

d – диаметром проволоки, мм.

В результате решения получим

$$n = \frac{40,5 - 4}{7,3} = 5$$

Длина пружины в свободном состоянии

$$H = n t + d, \tag{22}$$

где t – тоже, что и в формуле 20;

n – тоже, что и в формуле 21;

H – длина пружины в свободном состоянии, мм;

d – тоже, что и в формуле 21.

В результате решения получим

$$H = 5 \cdot 12 + 4 = 65, \text{ мм}$$

Длина заготовки пружины сжатия при подгибе и подшлифовке на $\frac{3}{4}$ витка

$$L = n (D - d) (n + 1,5), \tag{23}$$

где L – длина заготовки пружины, мм;

n – тоже, что и в формуле 21;

D – наружный диаметр пружины, мм;

d – тоже, что и в формуле 21.

В результате решения получим

$$L = 5(40 - 4)(5 + 1,5) = 1170, \text{ мм.}$$

3.5 Использование пружины осевой нагрузки

Для создания осевой нагрузки, выбираем пружину изготовленную из прутиков стали 60С2 по ГОСТ 2052–53, с нагрузкой $P_1 = 53$ кг, диаметром проволоки $d = 6$ мм, и наружным диаметром пружины $D = 60$ мм. Подбираем пружину из таблицы стандартных пружин в нормах станкостроения с шагом $t = 18$ мм, с деформацией одного витка пружины при нагрузке $f = 6,4$ мм и с длиной пружины под нагрузкой $H_1 = 73,3$ мм.

Шаг пружины t_1 одного витка пружины при нагрузке P_1

$$t_1 = t - f_1, \quad (24)$$

где t_1 – шаг пружины одного витка пружины при нагрузке P_1 , мм;

t – шаг пружины одного витка пружины без нагрузки, мм;

f – деформация одного витка пружины при нагрузке P_1 , мм.

В результате решения получим

$$t_1 = 18 - 6,4 = 11,6, \text{ мм}$$

Число витков пружины

$$n = \frac{H_1 - d}{t_1}, \quad (25)$$

где t_1 – тоже, что и в формуле 24;

n – число витков пружины;

H_1 – длина пружины под нагрузкой P_1 , мм;

d – диаметром проволоки, мм.

В результате решения получим

$$n = \frac{73,3 - 6}{11,6} = 5,8$$

Длина пружины в свободном состоянии

$$H = n t + d, \tag{26}$$

где t – тоже, что и в формуле 24;

n – тоже, что и в формуле 25;

H – длина пружины в свободном состоянии, мм;

d – тоже, что и в формуле 25.

В результате решения получим

$$H = 5,8 \cdot 18 + 6 = 110, \text{ мм}$$

Длина заготовки пружины сжатия при подгибе и подшлифовке на $\frac{3}{4}$

витка

$$L = n (D - d) (n + 1,5), \tag{27}$$

где L – длина заготовки пружины, мм;

n – тоже, что и в формуле 25;

D – наружный диаметр пружины, мм;

d – тоже, что и в формуле 25.

В результате решения получим

$$L = 5,8 (60 - 6) (5,8 + 1,5) = 2286,4, \text{ мм.}$$

4 Экспериментальная часть и анализ данных

Для получения экспериментальных данных по исследованию образования эластогидродинамического слоя при эксплуатации шарикоподшипника было проведено несколько экспериментов с полусинтетическим маслом Spectrol 5w40, а также с синтетическим маслом Navoline 5w40. На рисунках 19 и 20 представлены используемые масла.



Рисунок 19 – полусинтетическое масло Spectrol 5w–40



Рисунок 20 – синтетическое масло Havoline 5w40.

Задавались различные параметры, при помощи преобразователя частоты задавалась частота вращения подшипника от 200 до 1400 оборотов в минуту. Были проведены эксперименты без нагрузки на подшипник, с осевой, с радиальной, с применением и осевой и радиальной нагрузок, а также используя подогрев, увеличивали температуры среды подшипника. Полученные данные записываются на компьютере в виде диаграммы пропускаемого через подшипник тока, затем эти данные систематизируются математически регрессионным методом и сводятся в график зависимости величины тока от частоты вращения подшипника.

Эксперимент №1 длится 45 минут при 25°C, постепенно увеличивая частоту вращения подшипника качения с 200 каждые 2 минуты на 200 оборотов в минуту до максимально возможных оборотов двигателя.

Эксперимент №2 длится 45 минут при 25°C, постепенно увеличивая частоту вращения подшипника качения с 200 каждые 2 минуты на 200 оборотов в минуту до максимально возможных оборотов двигателя, а также используя осевую нагрузку в 6 кг·с (60 Н).

Эксперимент №3 длится 45 минут при 25°C, постепенно увеличивая частоту вращения подшипника качения с 200 каждые 2 минуты на 200 оборотов в минуту до максимально возможных оборотов двигателя, а также используя радиальную нагрузку в 6 кг·с (60 Н).

Эксперимент №4 длится 45 минут при 25°C, постепенно увеличивая частоту вращения подшипника качения с 200 каждые 2 минуты на 200 оборотов в минуту до максимально возможных оборотов двигателя, а также используя осевую и радиальную нагрузку с усилием в 6 кг·с (60 Н).

Эксперимент №5 длится 45 минут постепенно увеличивая температуру с 25°C до 80°C и частоту вращения подшипника качения с 200 каждые 2 минуты на 200 оборотов в минуту до максимально возможных оборотов двигателя.

Эксперимент №6 длится 45 минут постепенно увеличивая температуру с 25°C до 80°C и частоту вращения подшипника качения с 200 каждые 2 минуты на 200 оборотов в минуту до максимально возможных оборотов двигателя, а также используя осевую нагрузку в 6 кг·с (60 Н).

Эксперимент №7 длится 45 минут постепенно увеличивая температуру с 25°C до 80°C и частоту вращения подшипника качения с 200 каждые 2 минуты на 200 оборотов в минуту до максимально возможных оборотов двигателя, а также используя радиальную нагрузку в 6 кг·с (60 Н).

Эксперимент №8 длится 45 минут постепенно увеличивая температуру с 25°C до 80°C и частоту вращения подшипника качения с 200 каждые 2 минуты на 200 оборотов в минуту до максимально возможных оборотов двигателя, а также используя осевую и радиальную нагрузку с усилием в 6 кг·с (60 Н).

Результаты эксперимента в виде диаграмм зависимости тока от частоты вращения представлены на рисунках 21–24.

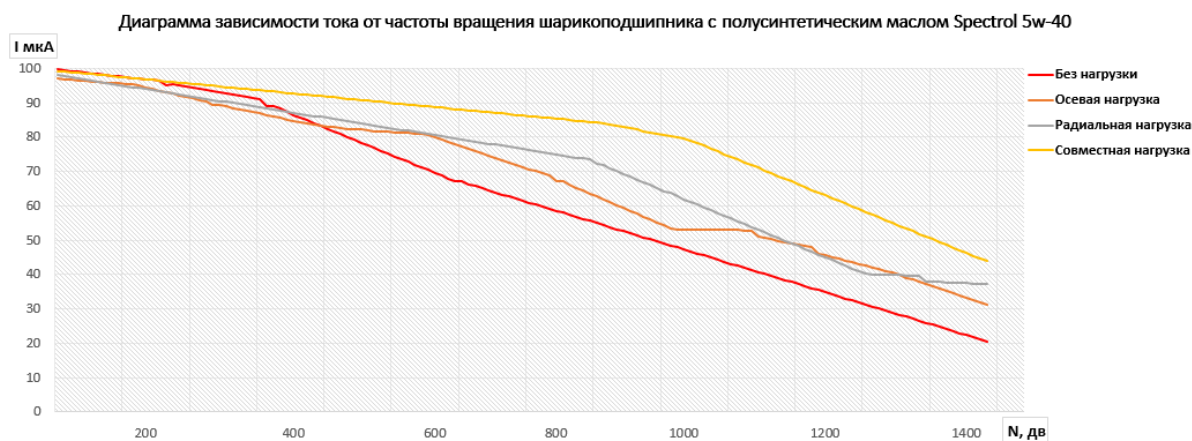


Рисунок 21 – Диаграмма зависимости тока от частоты вращения шарикоподшипника с полусинтетическим маслом Spectrol 5w–40.

Таблица 2 – Зависимость тока от частоты вращения шарикоподшипника с полусинтетическим маслом Spectrol 5w–40.

| | $\Pi_{дв}$ | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 |
|------------------------|------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Без нагрузки | мкА | 95,1 | 84,105 | 67,3 | 56,82 | 45,55 | 33,09 | 20,63 |
| С осевой нагрузкой | | 93,12 | 83,73 | 78,01 | 65,23 | 53,02 | 44,16 | 31,36 |
| С радиальной нагрузкой | | 93,04 | 86,21 | 79,68 | 74,09 | 59,54 | 42,59 | 37,19 |
| С совместной нагрузкой | | 96,29 | 92,16 | 88,22 | 84,84 | 77,51 | 60,68 | 43,86 |

Исходя из диаграммы рисунка 21, график зависимости тока от частоты вращения шарикоподшипника без нагрузки после 400 об/мин., имеет линейную зависимость, при совместной нагрузке линейная зависимость наблюдается до 1000 об/мин., и с 1000 до 1400 об/мин., в остальных случаях при осевой и радиальной нагрузках графики представляют ломаные, имеют разнотипный характер поведения тока.

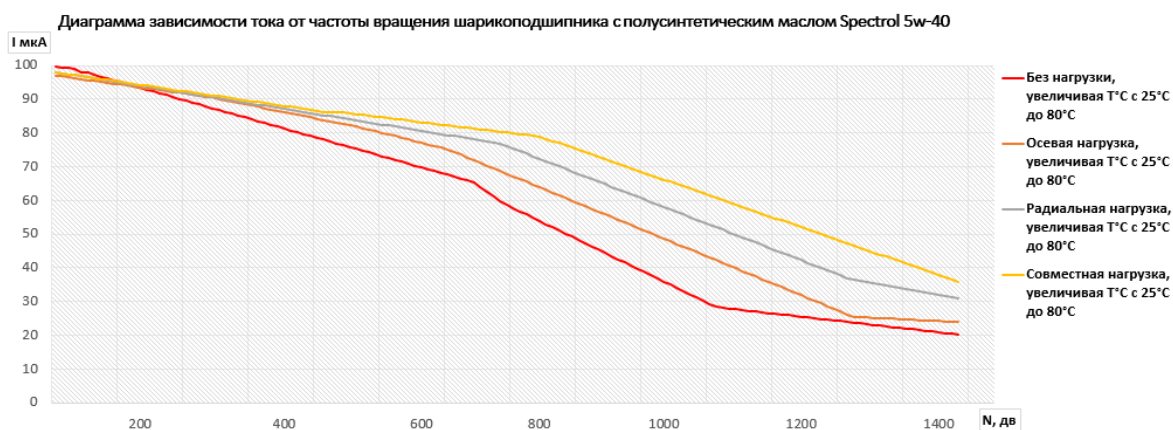


Рисунок 22 – Диаграмма зависимости тока от частоты вращения шарикоподшипника с полусинтетическим маслом Spectrol 5w–40, при изменении температуры от 25°С до 80°С

Таблица 3 – Зависимость тока от частоты вращения подшипника качения с полусинтетическим маслом Spectrol 5w–40, при изменении температуры от 25°С до 80°С

| | Пдв | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 |
|---------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Без нагрузки, | мкА | 91,76 | 79,67 | 68,13 | 51,07 | 33,07 | 24,82 | 20,22 |
| С осевой нагрузкой, | | 92,72 | 84,99 | 75,60 | 61,49 | 46,25 | 29,41 | 23,93 |

Окончание таблицы 3

| | | | | | | | | |
|------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| С радиальной нагрузкой | | 93,04 | 86,21 | 79,68 | 70,11 | 55,80 | 39,98 | 30,86 |
| С совместной нагрузкой | | 93,43 | 87,16 | 82,49 | 76,96 | 64,15 | 50,01 | 35,84 |

Исходя из диаграммы рисунка 22, график зависимости тока от частоты вращения шарикоподшипника при изменении температуры от 25°C до 80°C все представленные графики на отдельных участках имеют линейные зависимости.

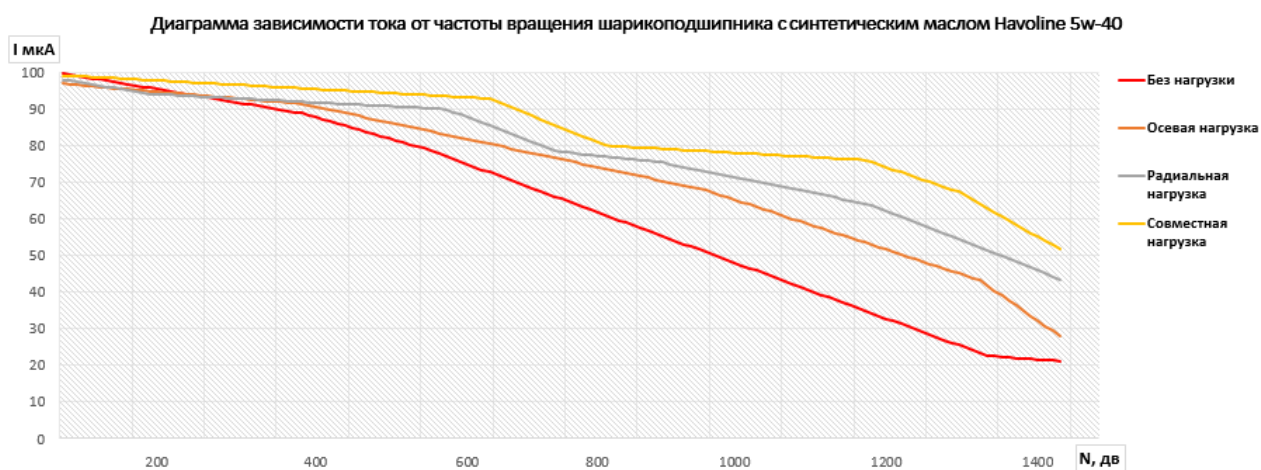


Рисунок 23 – Диаграмма зависимости тока от частоты вращения шарикоподшипника с синтетическим маслом Navoline 5w-40

Таблица 4 – Зависимость тока от частоты вращения шарикоподшипника с синтетическим маслом Navoline 5w–40

| | Пдв | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 |
|------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Без нагрузки | мкА | 94,53 | 86,11 | 72,79 | 59,71 | 45,91 | 30,65 | 21,21 |
| С осевой нагрузкой | | 94,35 | 89,44 | 80,56 | 72,95 | 63,34 | 49,73 | 28,03 |
| С радиальной нагрузкой | | 93,82 | 91,59 | 85,49 | 76,74 | 70,29 | 59,97 | 43,57 |
| С совместной нагрузкой | | 97,58 | 95,23 | 92,99 | 79,92 | 77,83 | 72,15 | 51,76 |

Исходя из диаграммы рисунка 23, график зависимости тока от частоты вращения шарикоподшипника без нагрузки после с 0 об/мин., до 1300 об/мин., а также с 1300 об/мин., до 1400 об/мин., имеет линейную зависимость, в остальных случаях при совместной, осевой и радиальной нагрузках графики представляют ломаные, имеют разнотипный характер поведения тока.

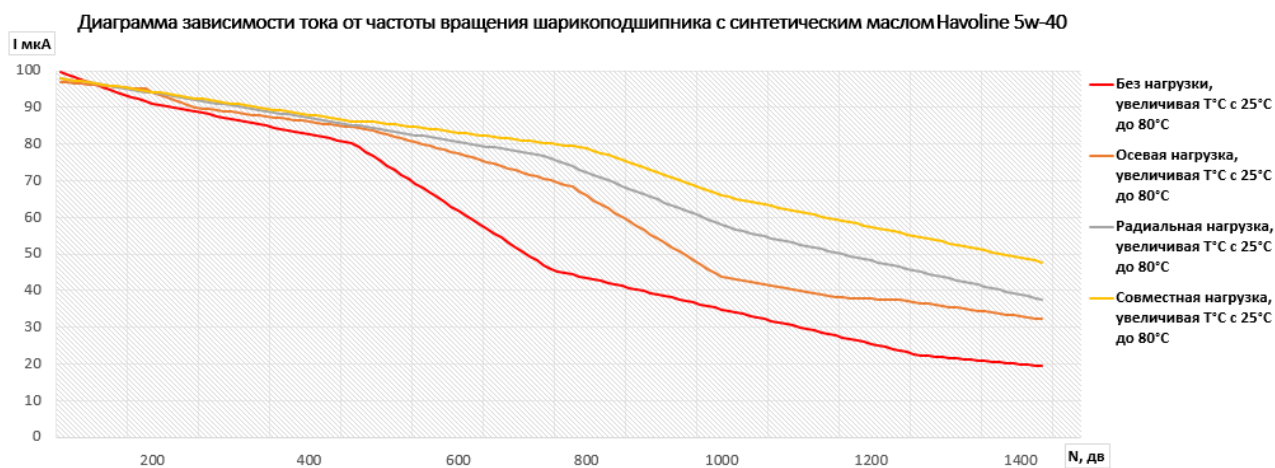


Рисунок 24 – Диаграмма зависимости тока от частоты вращения шарикоподшипника с синтетическим маслом Navoline 5w–40, при изменении температуры от 25°С до 80°С.

Таблица 5 – Зависимость тока от частоты вращения шарикоподшипника с синтетическим маслом Navoline 5w–40, при изменении температуры от 25°С до 80°С

| | Пдв | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 |
|------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Без нагрузки | мкА | 90,01 | 81,49 | 58,10 | 42,14 | 33,56 | 24,08 | 19,41 |
| С осевой нагрузкой | | 92,16 | 85,35 | 75,74 | 62,43 | 42,63 | 37,45 | 32,21 |
| С радиальной нагрузкой | | 93,04 | 86,21 | 79,68 | 70,11 | 56,11 | 46,82 | 37,54 |
| С совместной нагрузкой | | 93,43 | 87,16 | 82,49 | 76,96 | 64,69 | 56,20 | 47,71 |

Исходя из диаграммы рисунка 24, график зависимости тока от частоты вращения шарикоподшипника при изменении температуры от 25°С до 80°С все представленные графики на отдельных участках, имеют разнобойный характер поведения тока.

Данный метод контроля параметров формирования эластогидродинамического слоя в подшипниках качения позволяет определить параметры трения качения при которых формируется эластогидродинамический слой на поверхностях тел качения, при котором наблюдается наиболее стабильная работа, таким образом ресурс подшипников максимален. Исходя из диаграмм, приведенных выше, делаем вывод, что для достижения максимальной эффективности необходимо отсутствию нагрузок, а также при наличие постоянного плюсового температурного режима до 80°С. Эти параметры необходимо учитывать конструкторам в ходе проектировании узлов качения. Стоит отметить, что наличие любых нагрузок, пагубно влияет

на образование эластогидродинамического слоя, то есть в целом носит характер, при котором наблюдается наиболее быстрый износ шарикоподшипников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа научно–технической и патентной литературы, а также экспериментальным путем было произведено исследование нагрузочных свойств смазочных масел и скоростных параметров при работе шарикоподшипника. Произведен контроль параметров формирования эластогидродинамического слоя в подшипниках качения, определен диапазон линейных скоростей, при которых формируется эластогидродинамический слой смазочного материала с учетом осевой и радиальной нагрузок, свойств и назначения смазочного материала и конструктивных особенностей подшипника качения. Метод контроля параметров формирования эластогидродинамического слоя в подшипниках качения позволяет определить параметры трения качения, при которых формируется эластогидродинамический слой на поверхностях тел качения, при котором ресурс подшипников максимален. Эти параметры необходимо учитывать конструкторам при проектировании узлов качения. Также была определена зависимость формирования эластогидродинамического слоя от таких параметров, как осевая и радиальная нагрузки.

В ходе эксперимента было доказано, что лучшими свойствами обладает синтетическое масло Navoline 5w–40. Образовавшийся эластогидродинамический слой более стабилен и начинает образовываться при меньшей частоте вращения подшипника, по сравнению с полусинтетическим маслом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анурьев В.И. Справочник конструктора–машиностроителя: В 3 т. / Под ред. И.Н. Жестковой. – 8–е изд., перераб. и доп.. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 2. — 912 с.
2. Ничипорчик С.Н., Корженцевский М. И., Калачев В. Ф. и др. Глава 13. Подшипники скольжения // Детали машин в примерах и задачах: [Учеб. пособие] / Под общ. ред. С. Н. Ничипорчика. – 2–е изд. – Мн.: Выш. школа, 1981. – 432 с.
3. Леликов О.П. Основы расчета и проектирования деталей и узлов машин. Конспект лекций по курсу "Детали машин". – М.: Машиностроение, 2002. – 440 с.
4. Поиск лекций. Подшипники качения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.poisk-ru.ru/> (Дата обращения: 23.05.2019).
5. Иосилевич Г.Б. Детали машин: Учебник для студентов машиностроит. спец. вузов. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
6. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ. Для работников научных учреждений, промышленности и высших учебных заведений, занимающихся вопросами трения, смазки и износа в машинах – М.: Машиностроение, 1970. – 396 с.
7. Анурьев В.И. Справочник конструктора–машиностроителя, изд. 3–е, перераб. и доп. М., Машиностроение, 1968. – 688 с.
8. ГОСТ 18855–94 (ИСО 281–89) Подшипники качения. Динамическая расчетная грузоподъемность и расчетный ресурс (долговечность)
9. А.С. СССР №1054732. 601 № 3156. 1983. Способ определения смазывающей способности масел Ковальский Б.И., Сорокин Г.М., Ефремов А.П.
10. Пат 917031 СССР, G 01 M 13/04 Устройство для контроля состояния подшипника качения / Ю.,В. Корчагин; В. А. Мозолюк А. П. Голубев

заявитель и патентообладатель Николаевский кораблестроительный институт им. адмирала С.О. Макарова. – 2971607, заявл. 13.08.80 ; опубл. 30.03.82. – 3с.

11. Пат 2006019 Российская Федерация, G 01 M 13/04 Устройство для оценки работоспособности подшипника качения / В.П. Чечуевский, В.И.Фролов . заявитель и патентообладатель В.П. Чечуевский, В.И.Фролов . – 5006662/27, заявл. 01.07.91; опубл. 15.01.94. – 6с.

12. ЭЛСИН. Электронные компоненты :каталог содержит сведения о электронных приборах. – Ростов–на–Дону, [2012]. – Режим доступа: <http://www.elsin.ru/i99195578>

13. Набор химической посуды НПБЛ : ИПСП « Глобус» [сайт]. – Красноярск, 2010. – Режим доступа: <http://sp-globus.ru/p21578447-nabor-himicheskoy-posudy.html>

14. Автокомплекс «Снежный барс» : предоставляет различные смазочные материалы. – Новосибирск, [2009]. – Режим доступа: <http://sbr555.ru>

15. ГОСТ 12.4.113–82 Система стандартов безопасности труда. Работы учебные лабораторные. Общие требования безопасности. – Введ 01.07.1983. – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1983. – 6 с.

16. СП 4.13130.2013 Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно–планировочным и конструктивным решениям. – Введ. 24.04.2013. – Москва: МЧС России, 2013. – 182 с.

17. Пат 2567086 Российская Федерация, G 01 M 13/04 Устройство для диагностики подшипников качения / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, А.Н. Дерезин, Н.Н. Малышева. заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. – 2014129994/28, заявл. 21.07.2014; – 6с.

18. Isopromat.ru « Глобус» [сайт]. – Красноярск, 2010. – Режим доступа: <http://www.isopromat.ru/dm/lekcii-po-detalyam-mashin/podshipniki-kachenia-i-skolzhenia>

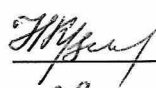
19. Штерензон В.А. Моделирование технологических процессов: конспект лекций – Екатеринбург., Рос. гос. проф.–пед. ун–та, 2010. – 66 с.
20. Пономарев В.Б. Математическое моделирование технологических процессов: курс лекций / В.Б. Пономарев, А.Б. Лошкарев. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. – 129 с.
21. Амосов Н.М. Моделирование сложных систем / Н.М. Амосов. Киев: Науковадумка, 1968
22. Докучаев А.А. Принципы обработки информации / А.А. Докучаев. СПб. :ТЭИ, 1995.
23. Масло компрессорное Газпромнефть Compressor Oil 46 // GPA OIL [сайт]. – Екатеринбург, 2016. Режим доступа: <http://gpa-oil.ru/>
24. Бухаленко Е.И. Справочник по нефтепромысловому оборудованию. М. Недра, 1990
25. ГОСТ 520–2011 (Подшипники качения. Общие технические условия); . – Введ 01.07.2011. – Москва: Государственный комитет по стандартам, 2011. – 26 с.
26. ГОСТ ИСО 4378–1–2001 (Подшипники скольжения. Термины, определения и классификация); . – Введ 01.07.2001. – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 2001. – 16 с.
27. Подшипники качения: справочник–каталог/ под ред. В.Н. Нарышкина и Р.В. Коростошевского. М.: машстрой 1984;
28. Большая Советская Энциклопедия; . М., Машиностроение, 1968. – 688 с.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ НЕФТИ И ГАЗА

Кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой РЭНГМ

 Н.Г. Квеско
«29» 06 2021 г.


БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

21.03.01 Нефтегазовое дело

21.03.01.02 Эксплуатация и обслуживание объектов добычи нефти

Исследование нагрузочных свойств шарикоподшипников

Руководитель  профессор, канд. техн. наук М.Т. Нухаев
Подпись, дата

Выпускник  29.06.2021 М.О. Дергачев
подпись, дата

Нормоконтролер  28.06.2021 С. В. Коржова
подпись, дата

Красноярск 2021