

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
УЧЕБНО-НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС»

На правах рукописи

Анцифорова Елена Владимировна

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ТРИБОМОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ
РЕМОНТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ
(НА ПРИМЕРЕ ПОДШИПНИКОВ)

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент, Е.В. Пахолкин

Орел, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	6
ВВЕДЕНИЕ	9
1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ТРИБОМОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ МОДИФИЦИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫМИ СОСТАВАМИ	15
1.1 Существующие гипотезы о механизмах действия ремонтно- восстановительных составов.....	15
1.1.1 Общая классификация гипотез о механизмах действия ремонтно- восстановительных составов.....	15
1.1.2 Гипотеза о многостадийном процессе механо-термо-химического взаимодействия с поверхностью трения с образованием защитного слоя	20
1.1.3 Гипотеза об ионной диффузии.....	23
1.1.4 Гипотеза об эффекте избирательного переноса	23
1.1.5 Гипотеза о механизме, аналогичном действию твердых смазочных материалов.....	24
1.1.6 Гипотеза о двойственном проявлении модификации поверхностей трения .	24
1.1.7 Выводы	26
1.2 Методы мониторинга процессов модифицирования рабочих поверхностей узлов трения ремонтно-восстановительными составами.....	26
1.2.1 Общая классификация методов мониторинга	26
1.2.2 Методы нанотрибологии	27
1.2.3 Методы стандартизованных испытаний на машинах трения с оценкой триботехнических характеристик пар трения до и после приработки с ремонтно-восстановительными составами.....	30
1.2.4 Методы стендовых испытаний ремонтно-восстановительных составов в различных трибосопряжениях	31
1.2.5 Оригинальные методы трибодиагностики и трибометрии с использованием видов неразрушающего контроля.....	32

1.2.6 Выводы	33
1.3 Выбор диагностического параметра и его обоснование	34
1.4 Предварительные экспериментальные исследования для подтверждения возможности использования диагностического параметра «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования»	38
1.5 Постановка задач исследования.....	50
1.6 Выводы	50
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗИ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПРИЗНАКА С УСЛОВИЯМИ ФОРМИРОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО СЛОЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТРЕНИЯ	52
2.1 Математическая модель вероятности электрического микроконтактирования в зоне трения, учитывающая наличие модифицированных слоев на рабочих поверхностях пар трения	52
2.2 Теоретические исследования связи диагностического признака с условиями фрикционного взаимодействия при наличии в зоне трения модифицированного слоя.....	57
2.3 Выводы	61
3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ТРИБОМОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ РЕМОНТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРУ «НОРМИРОВАННОЕ ИНТЕГРАЛЬНОЕ ВРЕМЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МИКРОКОНТАКТИРОВАНИЯ»	63
3.1 Определение физического эквивалента, адекватного исследуемому процессу	63
3.1.1 Качественный анализ процессов, связанных с приработкой рабочих поверхностей и улучшением условий фрикционного взаимодействия.....	63
3.1.2 Выбор статистических оценок для интерпретации результатов диагностирования	66
3.1.3 Экспериментальное обоснование числового значения критерия эффективного восстановления	70
3.2 Описание предлагаемого метода трибомониторинга.....	77

3.2.1 Физический принцип трибомониторинга процессов ремонтного восстановления деталей узлов трения по параметру «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования»	77
3.2.2 Последовательность операций трибомониторинга процессов ремонтного восстановления деталей узлов трения.....	78
3.2.3 Методика стендового и функционального трибомониторинга восстановления рабочих поверхностей подшипников качения ремонтно-восстановительными составами.....	78
3.3 Выводы	79
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ МЕТОДА И АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	81
4.1 Задачи экспериментальных исследований	81
4.2 Экспериментальное доказательство эффективности разработанного метода и чувствительности диагностического параметра к процессам ремонтного восстановления с использованием алгоритма поиска локальных дефектов.....	82
4.2 Применение образцового метода, основанного на стандартном методе трибологии для подтверждения эффективности разработанного метода и чувствительности диагностического параметра к процессам ремонтного восстановления	85
4.3 Метрологический анализ метода	91
4.4 Выводы	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	94
Список использованных источников	96
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Описание оборудования для экспериментальных исследований	105
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Результаты экспериментальных исследований адгезионных свойств смазочных материалов в условиях граничного трения с использованием диагностического параметра НИВ.....	117

ПРИЛОЖЕНИЕ В – Результаты экспериментальных исследований поведения значений диагностического параметра НИВ в процессе приработки	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Результаты экспериментальных исследований процессов восстановления подшипников типоразмера 1000900.....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Методика стендового и функционального трибомониторинга восстановления рабочих поверхностей подшипников качения ремонтно-восстановительными составами	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Результаты экспериментальных исследований процессов восстановления подшипников типоразмера 208.....	138

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

K – диагностический параметр НИВ;

t – время;

T_{II} – время измерения НИВ;

n_T – число импульсов микроконтактирования за время T_{II} ;

$t_{н(к)i}$ – время начала (конца) i -го импульса проводимости;

$f_{\text{в}}$ – частота вращения вала;

R – среднее сопротивление трибосопряжения;

Θ – краевой угол смачивания;

d – диаметр капли масла на границе раздела фаз;

h – высота капли масла;

$P_{\text{гид}}$ – вероятность электрического микроконтактирования двух микронеровностей при наличии гидродинамического слоя;

$h_{\text{ср}}$ – толщина смазочного слоя;

R_{q1}, R_{q2} – средние квадратические отклонения профилей двух поверхностей;

Φ – интегральная функция нормированного нормального распределения;

λ – параметр режима смазки (λ -параметр);

$P_{\text{гран}}$ – вероятность электрического микроконтактирования двух микронеровностей при граничном трении;

$S_{\text{защ}}$ – площадь контактирующей поверхности, покрытая модифицированным слоем;

$S_{\text{конт}}$ – потенциальная площадь микроконтактирования;

$k_{\text{отн. защ}}$ – относительный коэффициент защитного покрытия, показывающий, какая часть от потенциальной площади микроконтактирования покрыта модифицированным слоем и защищена граничным слоем;

P – вероятность электрического микроконтактирования двух поверхностей;

n – число микронеровностей, по которым может произойти контактирование;

$P_{H(B)i}$ – вероятность электрического микроконтактирования i -го тела качения с наружным (внутренним) кольцом;

P_k – вероятность электрического микроконтактирования в подшипнике;

Z – количество тел качения, которые могут воспринимать нагрузку;

W – площадь эллиптической поверхности контакта;

q – плотность микронеровностей на единицу площади контакта;

a – большая полуось эллипса деформации;

b – малая полуось эллипса деформации;

μ и γ – коэффициенты, зависящие от геометрических размеров деталей;

ε – коэффициент Пуассона материалов контактирующих тел;

E – модуль упругости материалов контактирующих тел;

$\sum \rho$ – сумма кривизн соприкасающихся поверхностей;

$r_{11}, r_{12}, r_{21}, r_{22}$ – радиусы кривизны контактирующих тел в двух взаимно перпендикулярных плоскостях;

D_W – диаметр тела качения;

D_0 – средний диаметр подшипника;

$r_{B(H)}$ – радиус дорожки качения внутреннего (наружного) кольца;

K_{cp} – среднее арифметическое значение диагностического параметра НИВ;

S – среднее квадратическое отклонение диагностического параметра НИВ;

K_i – текущее значение диагностического параметра НИВ;

m – количество значений диагностического параметра, по которым происходит усреднение;

ν – коэффициент вариации диагностического параметра НИВ;

ω_e – частота вращения внутреннего кольца;

F – радиальная нагрузка;

K_1 – значение диагностического параметра НИВ в процессе предварительной обкатки;

K_2 – значение диагностического параметра НИВ в процессе обкатки с РВС;

t_1 – время регистрации диагностического параметра НИВ в процессе предварительной обкатки;

t_2 – время регистрации диагностического параметра НИВ в процессе обкатки с РВС;

K_{1cp} – среднее значение диагностического параметра НИВ в процессе предварительной обкатки;

K_{2cp} – среднее значение диагностического параметра НИВ в процессе обкатки с РВС;

S_1 – среднее квадратическое отклонение диагностического параметра НИВ в процессе предварительной обкатки;

S_2 – среднее квадратическое отклонение диагностического параметра НИВ в процессе обкатки с РВС;

v_1 – коэффициент вариации диагностического параметра НИВ в процессе предварительной обкатки;

v_2 – коэффициент вариации диагностического параметра НИВ в процессе обкатки с РВС;

Ra_1 – шероховатость поверхности внутреннего кольца подшипника, не имеющей искусственных дефектов;

Ra_2 – шероховатость искусственно ухудшенной поверхности внутреннего кольца подшипника.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Состояние рабочих поверхностей определяет надежность и долговечность узлов трения. В настоящее время существует множество технологий восстановления трущихся поверхностей. При этом перспективными и экономически эффективными представляются способы безразборного восстановления узлов трения путем введения различных добавок (модификаторов) в смазочный материал. К таким добавкам относятся ремонтно-восстановительные составы (РВС) на основе мелкодисперсных частиц природных минералов, в частности, серпентинов в качестве геомодификаторов трения. Серпентины в зоне трения способны взаимодействовать с поверхностью металлов, результатом чего является модифицирование трущихся поверхностей. Многочисленные публикации, описывающие исследование рассматриваемых процессов, отмечают улучшение микрогеометрии пар трения, а также образование слоя с особыми физико-механическими свойствами, обеспечивающего улучшение триботехнических характеристик узлов трения.

Гипотезы о принципах действия РВС имеются в трудах К.Н. Долгополова, Д.Н. Любимова, М.Г. Перепелицына, В.Н. Кузьмина, П.М. Быкова, Г.И. Шарова, А.Т. Козакова, А.В. Никольского и др. Гипотезы содержат немало противоречий, при этом в настоящее время отсутствует общепринятая теория, объясняющая сущность явлений в зоне трения при наличии геомодификаторов, и, как следствие, отсутствует теоретически обоснованное диагностическое обеспечение данных технологий. Таким образом, несмотря на существующий много лет рынок смазочных композиций с РВС и повышенный интерес к данным технологиям со стороны промышленных субъектов, реальное внедрение рассматриваемого способа повышения качества узлов трения ограничено. Решение этой проблемы может быть достигнуто за счет разработки методов мониторинга процессов модификации рабочих поверхностей узлов трения. Данные методы мониторинга должны иметь научное обоснование, позволять корректировать технологии применения

РВС с целью повышения их эффективности и исключения отрицательных результатов.

Для исследования модифицирования рабочих поверхностей узлов трения в настоящее время используются различные способы, которые в целом характеризуются как трудоемкие и непригодные для широкого внедрения в промышленность, особенно в отношении средних и мелких субъектов хозяйственной деятельности.

Решение проблемы отсутствия диагностического обеспечения технологий восстановления пар трения предлагается достичь за счет разработки электрического метода трибомониторинга процессов модификации трущихся поверхностей. Предпосылкой этого является то, что электрические диагностические параметры чувствительны к изменению состояния поверхностей трения, изменению несущей способности смазочного материала, появлению износа, а процессы ремонтного восстановления, в свою очередь, способствуют улучшению микрогеометрии трущихся поверхностей, улучшению смазочного действия в зонах трения.

Теоретические основы электрических методов изложены в трудах Дж. Кеннела, Д. Снидекера, Т. Тэллиана, С.Ф. Корндорфа, К.В. Подмастерьева, Е.В. Пахолкина, В.Я. Варгашкина, В.В. Мишина, В.В. Маркова, А.Ф. Блинова, Ю.М. Санько, А.А. Бобченко, В.В. Нестеренко, В.П. Чечуевского, А.И. Свириденка, О.В. Холодилова, Н.К. Мышкина и др. Электрические методы трибомониторинга характеризуются высокой чувствительностью, безинерционностью, использованием сравнительно недорогих технических средств, пригодностью к применению в качестве методов функциональной диагностики. Многие задачи контроля и диагностирования узлов трения эффективно решаются с применением диагностического признака «вероятность электрического микроконтактирования в зоне трения», который, в свою очередь, инструментально оценивается при измерении диагностического параметра «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования» (НИВ). Однако, реализация методов во многих случаях сопряжена со сложностью интерпретации диагностической информации, а решение новых задач связано с разработкой самостоятельных методов, базирующихся на

теоретически обоснованных физических принципах диагностирования и принципах получения и обработки измерительной информации.

Объект исследования – трибомониторинг процессов модифицирования рабочих поверхностей при ремонтном восстановлении деталей узлов трения.

Предмет исследования – электрорезистивный контроль трибосопряжений и диагностическая модель процессов электрического микроконтактирования в зоне трения, учитывающая наличие модифицированных слоев на рабочих поверхностях.

Цель работы – расширение функциональных возможностей электрорезистивного контроля узлов трения за счет обеспечения мониторинга процессов модифицирования пар трения при реализации технологий их ремонтного восстановления.

В работе решаются следующие задачи:

- анализ существующих методов исследования модифицирования поверхностей пар трения при их ремонтном восстановлении геомодификаторами трения;
- обоснование физического принципа трибомониторинга, диагностического параметра;
- разработка математической модели диагностического признака – вероятности электрического микроконтактирования в зоне трения, описывающей связь процессов модифицирования трущихся поверхностей с диагностическим признаком;
- проведение теоретических исследований связи диагностического признака с параметрами модифицированного слоя на поверхностях трения;
- разработка метода и методики проведения трибомониторинга;
- экспериментальное подтверждение достоверности теоретических положений и эффективности предложенного метода.

Методы исследования. Теоретические исследования проведены на базе положений теорий: вероятности, электрорезистивной трибодиагностики, контактно-гидродинамической, контактирования шероховатых тел. Используются методы статистического и регрессионного анализа, математического моделирования.

Экспериментальные исследования проведены на специализированных установках с использованием серийно выпускаемых и оригинальных технических средств.

Научная новизна:

– предложен и обоснован оригинальный физический принцип трибомониторинга модифицирования поверхностей трения при наличии в смазочном материале геомодификатора трения и усовершенствована математическая модель диагностического признака – вероятности электрического микроконтактирования в зоне трения, базирующаяся на теориях контактирования шероховатых поверхностей, электрического сопротивления контакта поверхностей, теории смазки и отличающаяся учетом изменения смазочной способности при формировании модифицированных слоев;

– получены теоретические зависимости, описывающие связь диагностического признака «вероятность электрического микроконтактирования в зоне трения» с параметрами качества трущихся поверхностей, учитывающие не только характеристики микрогеометрии поверхностей, но и наличие в зоне трения граничных смазочных слоев с повышенной адсорбционной (смазочной) способностью;

– экспериментальные результаты трибомониторинга процессов модифицирования поверхностей трения с использованием диагностического параметра «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования» и его статистической характеристики (коэффициента вариации), обеспечивающей качественную и количественную интерпретацию результатов трибомониторинга, позволяющей оценивать эффективность восстановления трущихся поверхностей.

Практическая ценность:

– разработанный метод мониторинга процессов ремонтного восстановления отличается от существующих меньшими трудоемкостью и затратами на технические средства, пригоден в качестве метода функционального диагностирования объектов (не требует демонтажа и остановки эксплуатации объектов);

– разработанная методика трибомониторинга позволяет оценивать эффективность процессов ремонтного восстановления.

Реализация работы. Результаты диссертационной работы использовались при выполнении следующих научных проектов и грантов: «Исследования в области электрических методов мониторинга нанотехнологий восстановления трущихся поверхностей» (грант РФФИ 09-08-99076 – 2009 г.); «Разработка метода мониторинга процессов формирования модифицированных слоев на рабочих поверхностях пар трения» (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, шифр проекта П289); «Исследование направлений комплексирования физических принципов и параметров при создании технологий контроля и диагностирования триботехнических систем» (№ г.р. 01.2.007 05082, ЕЗН Минобрнауки РФ – 2007-2011 г.).

Разработанная методика мониторинга ремонтного восстановления получила внедрение в МУП «Спецавтобаза» (г. Орел). Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК».

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на 8-й Международной конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» (Москва, 2009), Девятой сессии международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов» (С.-Петербург, 2009), Международной научно-практической конференции «Инженерия поверхностного слоя деталей машин» (Кемерово, 2009), V-й научно-технической интернет-конференции с международным участием «Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении» (Тюмень, 2010), Международной научно-технической интернет-конференции «Информационные системы и технологии» (Орел, 2011, 2013), Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология» (Курск, 2011), конференциях ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК» (Орел, 2009-2013 гг.), Международной конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» (Орел, 2014 г.).

На защиту выносятся следующие положения:

1. Электрический метод трибомониторинга процессов ремонтного восстановления деталей узлов трения по параметру «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования», включающий оригинальный физический принцип, математический аппарат и последовательность действий при реализации метода.

2. Математическая модель диагностического признака «вероятность электрического микроконтактирования в зоне трения», учитывающая не только характеристики микрогеометрии поверхностей, но и наличие в зоне трения граничных смазочных слоев с повышенной адсорбционной (смазочной) способностью.

3. Теоретические зависимости, описывающие связь диагностического признака «вероятность электрического микроконтактирования в зоне трения» с состоянием трущихся поверхностей.

4. Экспериментальные результаты трибомониторинга процессов модифицирования поверхностей трения с использованием диагностического параметра «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования» и его статистической характеристики (коэффициента вариации) в качестве критерия качественной и количественной интерпретации результатов трибомониторинга.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 75 наименования, 6 приложений. Работа изложена на 143 страницах машинописного текста. Работа содержит 47 рисунков и 5 таблиц.

Публикации. По теме диссертационного исследования имеется 14 работ, в том числе: 6 статей в журналах из перечня ВАК, 7 публикации в материалах международных конференций.

1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ТРИБОМОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ МОДИФИЦИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫМИ СОСТАВАМИ

1.1 Существующие гипотезы о механизмах действия ремонтно-восстановительных составов

1.1.1 Общая классификация гипотез о механизмах действия ремонтно-восстановительных составов

Анализ публикаций по вопросам безразборного восстановления деталей машин и механизмов показал наличие повышенного научно-практического интереса к проблеме использования ремонтно-восстановительных составов – добавок к смазочному материалу на основе минералов естественного и искусственного происхождения. Это объясняется тем, что находясь в зоне трения, серпентины взаимодействуют с поверхностью металлов и модифицируют ее. При этом отмечается улучшение микрогеометрии, и на поверхности образуется защитный слой с особыми физико-механическими свойствами, в результате чего в целом улучшаются триботехнические характеристики узла трения: наблюдается увеличение износостойкости трибосопряжений, снижение шероховатости поверхностей контактирующих тел, уменьшение коэффициента трения, что в итоге приводит к снижению потерь энергии или топлива, увеличению ресурса технических объектов, снижению затрат на ремонт и техническое обслуживание, снижению шума и вибрации.

Вопросами применения РВС занимаются множество организаций [1 – 11]. В частности, улучшение триботехнических характеристик наблюдалось при проведении исследований в следующих организациях:

- Ивановская государственная сельскохозяйственная академия [1];
- Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН [2];
- Морской государственный университет (г. Владивосток) и Институт геологии ДВО РАН [4];

- ГМД ЗФ ГМК «Норильский никель» с привлечением специалистов ООО «Полихим» и Института химии и химической технологии СО РАН (г. Красноярск) [5];
- ВНИ Электромеханики совместно с Институтом физической химии и электрохимии РАН, а также ФГУП «25 ГосНИИ Министерства обороны РФ» [6];
- Институт проблем сверхпластичности металлов РАН (Уфа) [7];
- ООО «КамТехноПром» (исследования проводились на Нижнекамской ГЭС, Камышинской ТЭЦ ОАО «Волгоградэнерго», в филиале «Казанские тепловые сети» ОАО «Татэнерго») [8];
- Ивановский государственный химико-технологический университет совместно с Ивановской государственной сельскохозяйственной академией [9];
- ООО «Прайд-ВС» совместно с ИФХ РАН [11];
- ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК».

Аналитический обзор по проблеме обоснования принципов действия РВС выявил целый ряд гипотез, которые содержат немало противоречий, и показал отсутствие общепринятой теории, объясняющей сущность совокупности явлений, протекающих в зоне трения при наличии мелкодисперсных частиц минералов, и, как следствие, отсутствие должного теоретически обоснованного диагностического обеспечения данных технологий.

В литературе можно встретить описание случаев, когда при неправильном использовании РВС (например, при добавлении в смазочный материал недостаточного или избыточного количества состава) происходило ухудшение состояния узлов трения и даже их повреждение [1, 4, 12, 13]. Также на рынке смазочных материалов и автохимии встречаются восстановительные составы ненадлежащего качества, использование которых тоже может привести к повреждению трибосопряжений.

Таким образом, несмотря на существующий уже много лет рынок смазочных композиций с РВС и повышенный интерес к данным технологиям со стороны промышленных субъектов, реальное внедрение в промышленность рассматриваемого способа повышения качества узлов трения ограничено. Решение этой про-

блемы может быть достигнуто за счет разработки методов мониторинга процессов модификации рабочих поверхностей узлов трения. При этом методы мониторинга должны иметь научное обоснование, позволять корректировать технологии применения РВС с целью повышения их эффективности и исключения возможностей получения отрицательных результатов, а экономическая эффективность технологий мониторинга может быть достигнута при реализации методов неразрушающего контроля.

Чаще всего РВС изготавливают на основе минерала серпентина. При бурении сверхглубокой скважины на Кольском полуострове было замечено, что при прохождении долотом горных пород, богатых серпентином, ресурс режущих кромок инструмента резко увеличивался, что и послужило началом разработок в этом направлении [14, с. 174].

Серпентины – зеленые минералы, слагающие жирные на ощупь массивные агрегаты со слоистой структурой, отдаленно напоминающей графит [14, с. 175].

Минерал серпентин относится к подклассу слоистых силикатов $(Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8)$ или $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ или $(MgOH)_6Si_4O_{11} \cdot H_2O$. По морфологии и характеру деформации кристаллической решётки выделяются три основные разновидности серпентина: микрочешуйчатая листоватая – антигорит, тонковолокнистая – хризотил, тонкозернистая – лизардит. Все они кристаллизуются в моноклинной системе. Разнообразие структур серпентина связано с различными деформациями кристаллической решётки.

Химический состав минералов: MgO – 43,0 %, SiO_2 – 44,1 %, H_2O – 12,9 %. Соотношения компонентов могут незначительно варьироваться. Цвет серпентина – белый, желтоватый, зелёный, тёмно-буро-зелёный в зависимости от содержания и соотношения Fe^{3+} и Fe^{2+} , а также примесей никеля. Твердость по минералогической шкале – от 2,5 до 3, антигорита – 3,5; плотность составляет 2550 кг/м^3 [15].

Характерной особенностью минерала является сочетание слоёв, составленных кремнекислородными тетраэдрами (Si_2O_3) со слоями, состоящими из октаэдров, в центре которых находится магний, а в вершинах – гидроксильные группы

[$\text{Mg}_3\text{O}_3(\text{OH})_4$]. Структура серпентина приведена на рисунке 1.1 [16]. При этом слоистое строение во многом объясняет противоположные свойства минерала.

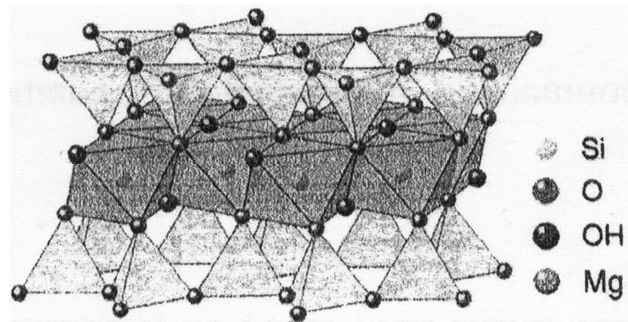


Рисунок 1.1 – Строение серпентина

Силикаты группы серпентинов минерализуются в виде тонких пластинок. Также они проявляют совершенную спайность параллельно структурным слоям [17, с. 293]. При трении дисперсные минеральные частицы проходят стадию физической адсорбции на поверхности и ориентируются своими базовыми плоскостями в направлении скольжения. Это способствует легкому расщеплению частиц вдоль плоскостей спайности под действием тангенциальных сил [18]. Механическое разрушение минерала по плоскостям спайности с разрывом связей может сопровождаться появлением активных фрагментов, способных механохимически взаимодействовать с поверхностью металлов [8, 11].

В литературе имеются многочисленные факты экспериментального доказательства положительного воздействия РВС на различные трибосопряжения. Однако в настоящее время отсутствует теория, объясняющая сущность совокупности явлений, протекающих в зоне трения при наличии мелкодисперсных частиц минералов. В тоже время существует множество гипотез о механизмах действия РВС, основные из них приведены на рисунке 1.2.

Рассмотрим гипотезы подробнее. Исторически первой появилась гипотеза о напрессовывании или нагартывании частиц серпентина на поверхностях трения. Главное условие образования защитного слоя – механическое давление [19]. В следующих пунктах более подробно рассмотрены гипотезы, приведенные на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Основные гипотезы о механизмах действия РВС

1.1.2 Гипотеза о многостадийном процессе механо-термо-химического взаимодействия с поверхностью трения с образованием защитного слоя

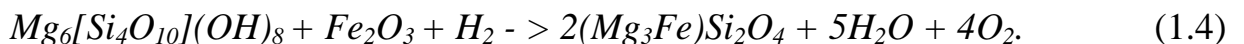
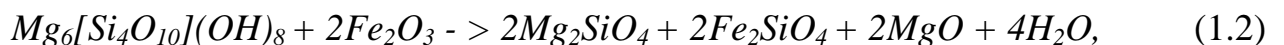
Гипотеза о многостадийном процессе механо-термо-химического взаимодействия с поверхностью трения с образованием защитного слоя является одной из наиболее распространенных.

В работе [20] описывается следующий механизм формирования защитного слоя на поверхностях трения:

- шаржирование поверхностей трения твердыми частицами, имеющимися в РВС (силикаты, оливины, пироксены и др.), имеющими твердость закаленной стали. При этом ухудшаются триботехнические характеристики, повышается температура, происходит абразивное изнашивание сопряженной детали;

- заполнение пространства между частицами SiO_2 , оливинов и пироксенов более мягкими частицами серпентина. Далее эти частицы сильно уплотняются и теряют свою подвижность в смазочном материале. Формирующаяся гетерогенная структура напоминает структуру антифрикционных сплавов. В мягкой основе присутствуют более твердые частицы несущей фазы. При этом триботехнические и противоизносные характеристики становятся удовлетворительными;

- разложение серпентина с образованием более твердых фаз и освобождением воды при более жестких условиях трения и неизбежных при этом локальных вспышках температуры на поверхности наиболее нагруженных контактных площадок:



Находящийся в псевдожидком состоянии новый гетерогенный конгломерат поглощает в своем объеме новые частицы РВС, доставляемые к активированному участку смазочным материалом, затем затвердевает. Как результат – наращивание защитного слоя на участке с повышенной интенсивностью изнашивания;

– освободившаяся вода участвует в реакциях гидратации с образованием кристаллогидратов, тем самым способствуя формированию и затвердеванию новой гетерогенной среды, т.е. образованию тонкого защитного слоя;

– защитный слой может образоваться на большей части поверхности трения или даже покрыть ее полностью. Это зависит от условий работы трибосопряжений в различных машинах и механизмах [20].

Подтверждение того, что процесс формирования защитного покрытия является многостадийным, приведено в работе [21], в которой приведено описание исследования процесса формирования покрытия на профильной поверхности кулачков. Процесс трения длился 120 ч, при этом через каждые 20 ч авторы проводили контроль площади образовавшегося покрытия с помощью вертикального металлографического микроскопа МИМ-7 путём выявления непротравленных зон при увеличении в 500 раз. В результате было выявлено, что площадь покрытия на разных стадиях фрикционного взаимодействия непостоянна. В момент начала образования, как показано на рисунке 1.3, б, площадь покрытия состоит из множества локальных площадок, имеет незначительную величину, и размытые границы. Затем локальные площадки начинают объединяться между собой, создавая площадки больших размеров, в итоге увеличивая общую площадь образованного покрытия, как показано на рисунке 1.3, в. Со временем наступает момент, когда все контактирующие зоны покрываются защитным слоем, процесс образования прекращается и начинается процесс изнашивания образованного покрытия [21]. Авторами работы также отмечено, что с увеличением нагрузки площадь покрытия также увеличивается.

Аналогичная гипотеза приведена в работе [22]. Авторы данной работы считают, что высокие температуры, генерируемые в зоне локальных контактов поверхностей, способны создавать условия для протекания окислительных, химических, электромагнитных явлений, которые при определенных граничных режимах работы механизма образуют на поверхностях деталей защитные противоизносные слои [22]. В работах [21, 23] также отмечается, что температура пятна

контакта является параметром, регулирующим образование защитного слоя, и скорость формирования защитного покрытия пропорциональна локальным всплескам температуры на пятнах фактического контакта.

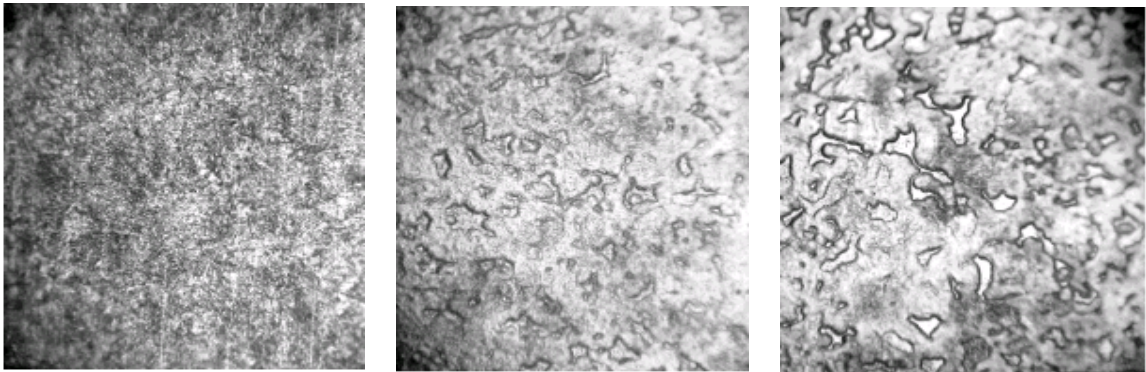
*а**б**в*

Рисунок 1.3 – Динамика образования и изнашивания защитного слоя: а – структура металла без РВС;

б – стадия формирования покрытия; в – сформированное покрытие

Процесс формирования защитного слоя авторами работы [22] описан следующим образом:

- разрушение граничного слоя смазочного материала;
- упругопластическое деформирование и разрушение пиков шероховатостей, измельчение частиц РВС. Следствием этого является выделение тепловой энергии и повышение температуры в зоне контакта;
- возникновение электрических и магнитных полей при смещении фаз образований (слоев) на поверхности тела (металла);
- разрыв связей Si-O-Si; Si-O-OH-металл; Si-O-OH и др. при механических воздействиях на частицы РВС. Появление продуктов химических реакций в поверхностных и подповерхностных слоях контактирующих тел;
- возникновение текучести металла, протекание химической реакции замещения с участием соединений железа основного металла и химически активных соединений РВС в надповерхностном, поверхностном и подповерхностном слоях. Появление первых зерен защитного слоя;

- удаление продуктов предшествующего износа из зоны трения, уплотнение защитного слоя;
- нагрузочное упрочнение защитного покрытия и выравнивание его механических свойств.

В различных источниках стадии процесса механо-термо-химического взаимодействия могут различаться, однако результатом всегда является образование защитного слоя на поверхностях трения и улучшение триботехнических характеристик.

1.1.3 Гипотеза об ионной диффузии

В работах [24, 25] в приводимых гипотезах основными являются процессы ионной диффузии. Процесс образования защитного покрытия также представлен многостадийным.

В работе [24], описаны следующие стадии процесса формирования защитного слоя:

- удаление дефектного поверхностного слоя при абразивном воздействии частиц РВС; образование ювеноальной поверхности;
- образование свободных ионов при дроблении частиц РВС, диффундирование их в поверхностный слой деталей и модификация поверхностей;
- удаление упрочненного слоя и дальнейшая приработка поверхностей.

1.1.4 Гипотеза об эффекте избирательного переноса

Во многих работах высказывается гипотеза о том, что добавленный в смазочный материал РВС обеспечивает открытый Д.Н. Гаркуновым и И.В. Крагельским эффект избирательного переноса в зонах трения [26-29]. Трущуюся пару можно рассматривать как термодинамическую систему, где возможен обмен поверхностями трения с внешней средой (смазочным материалом) энергией и веществом и, следовательно, возможно образование новых структур на основе самоорганизующихся процессов. Установлено, что эти новые структуры могут обеспечивать безызносную работу узла трения путем образования защитной (сервовитной) пленки на поверхности трущихся деталей [26].

Основное преимущество РВС состоит в способности создавать в зонах трения динамические защитные пленки из тонкодисперсных продуктов изнашивания и самого геомодификатора в виде квазисжиженного слоя или сервовитной пленки, образующейся в результате избирательного переноса. При этом в процессе приработки узла происходит равномерное упрочнение поверхности трения, что вызывает не только многократное снижение скорости изнашивания, но и существенное уменьшение коэффициента трения и, следовательно, механических потерь [27].

1.1.5 Гипотеза о механизме, аналогичном действию твердых смазочных материалов

В публикации [26] выдвинута гипотеза, что один из механизмов действия РВС аналогичен механизму действия твердых смазочных материалов.

Некоторые твердые тела могут производить смазочное действие, организуя и поддерживая режим трения при граничной смазке. Твердые смазочные материалы имеют высокую прочность с основой и низкое сопротивление на сдвиг. К твердым смазочным материалам относят графит, дисульфид молибдена (MoS_2), нитрид бора (BN), мягкие металлы (In, Ag, Al, Pb, Sn, Cu и др.)

К группе веществ со слоисто-решетчатой структурой, как уже отмечалось ранее, относится также серпентин, имеющий низкую твердость и весьма совершенную спайность. В связи с этим авторы статьи [26] предполагают, что один из механизмов действия РВС аналогичен механизму действия графита, дисульфида молибдена и др. противоизносных присадок к смазывающим материалам.

1.1.6 Гипотеза о двойственном проявлении модификации поверхностей трения

В публикации [30] выдвинута гипотеза о двойственном проявлении модификации поверхностей трения. С одной стороны, образование защитного покрытия сопровождается изменением микрогеометрии поверхности трения и, соответственно увеличением несущей способности смазочного слоя. С другой стороны, эффект от внесения в зону трения минеральных частиц наблюдается и при граничном трении, когда несущий гидродинамический слой отсутствует и определя-

ющим свойством в предотвращении изнашивания становится смазывающая способность смазочного материала, проявляющаяся в формировании поверхностного защитного полимолекулярного слоя компонентов смазочного материала. То есть положительный эффект достигается не только за счет модифицирования рабочих поверхностей неметаллическим слоем, но и за счет повышения прочности связи модифицированной поверхности с адсорбированным ею слоем смазочного материала.

Аналогичная гипотеза приведена и в работах [16, 18], там также указывается, что серпентин формирует на поверхности трения развитые пористые структуры, которые адсорбируют смазочный материал. Для подтверждения данной гипотезы в публикации [16] приведены результаты исследования покрытия методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Авторы приводят сравнение энергий связи компонентов поверхностной пленки относительно исходных значений в порошке серпентина, которое указывает на детальные изменения ее структуры. Энергия связи кремния возрастает. Энергия связи кислорода, отнесенного к кремнекислородной группировке, уменьшается. Это свидетельствует об увеличении угла связи Si-O-Si в кремнекислородной сетке, составляющей защитную пленку и уменьшении межатомного расстояния Si-O. Большой разброс углов между тетраэдрами в результате перестройки кремнекислородной сетки пленки при трении и ее неоднородность по химическому составу определяют флуктуации эффективных зарядов кремния в объеме пленки и на ее межфазной границе [16]. Как утверждают авторы, число атомов кремния в кремнекислородной сетке возрастает на 2-3 атома, приводя к повышению положительного эффективного заряда пленки и усилению ионного обмена между ее структурными элементами и окружающей средой. Атомы кремния с высоким эффективным зарядом в центрах максимально деформированных трением тетраэдров являются координационно-ненасыщенными и служат источниками образования донорно-акцепторных связей с атомами и молекулами, концевые группы которых имеют неподеленные пары электронов. Такими веществами при трении легко становятся разорванные под

действием фрикционного тепла молекулы смазочной среды – радикалы, а также кислород, галогены и др.

1.1.7 Выводы

На основе приведенного анализа существующих в трибологии гипотез о действии РВС на основе серпентинов в зоне трения можно сделать выводы, что механизм действия РВС связан не только с изменением микрогеометрии трущихся поверхностей за счет формирования слоя с особыми физическими свойствами, что сопровождается увеличением несущей способности смазочного слоя (классическая гипотеза), но и с изменением условий формирования граничных слоев смазочного материала (что подтверждено эффективностью РВС при работе в условиях граничного трения). Образующийся модифицированный слой обладает большей адсорбционной способностью, чем исходная поверхность трения. Это, в свою очередь, приводит к появлению более устойчивых к разрушению граничных слоев, которые при граничном трении являются основным фактором, предотвращающим изнашивание. Если учесть, что большинство узлов трения работают в условиях смешанного трения, когда наблюдаются кратковременные разрушения гидродинамического слоя с переходом к граничному трению на фактической площади контакта, то данный фактор (повышение смазывающей способности) нельзя не учитывать при обосновании физического принципа трибомониторинга.

1.2 Методы мониторинга процессов модифицирования рабочих поверхностей узлов трения ремонтно-восстановительными составами

1.2.1 Общая классификация методов мониторинга

Для исследования процессов модифицирования рабочих поверхностей узлов трения РВС в настоящее время используются методы, приведенные на рисунке 1.4. Рассмотрим более подробно данные методы.



Рисунок 1.4 – Методы мониторинга процессов модифицирования рабочих поверхностей узлов трения РВС

1.2.2 Методы нанотрибологии

К методам нанотрибологии относятся сканирующая зондовая микроскопия, электронная микроскопия, спектроскопические методы, рентгеновские методы с использованием синхротронного излучения [31] и другие методы, позволяющие исследовать структуру, морфологию и локальные свойства поверхностей.

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) [32] – эффективный, современный метод исследования морфологии и локальных свойств (механических, электрических, магнитных и др.) поверхности твердого тела. Имеет высокое пространственное разрешение вплоть до атомарного. Для исследования микрорельефа поверхности и ее локальных свойств в сканирующих зондовых микроскопах используются специальные зонды в виде игл. Размеры рабочей части зондов (острия) составляют порядка десяти нанометров. Расстояние между зондом и поверхностью образцов в данных микроскопах обычно составляет по порядку величин

0,1 – 10 нм. Сканирование исследуемой поверхности в микроскопе напоминает движение электронного луча по экрану электроннолучевой трубки. Движение зонда вдоль линии (строки) происходит сначала в прямом, а потом в обратном направлении (строчная развертка), затем зонд переходит на следующую строку

(кадровая развертка). Формируемые цифро-аналоговыми преобразователями пилообразные напряжения управляют движениями зонда. Регистрация информации о рельефе поверхности производится, как правило, на прямом проходе.

В основе работы зондовых микроскопов лежат различные типы взаимодействия зонда с поверхностью. Так, явление протекания туннельного тока между металлической иглой и проводящим образцом лежит в основе работы туннельного микроскопа. В зависимости от типа взаимодействия зонда с поверхностью существуют различные виды СЗМ: сканирующая туннельная микроскопия (СТМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ), электросиловая микроскопия (ЭСМ), магнитно-силовая микроскопия (МСМ), ближнепольная оптическая микроскопия (БОМ) [32].

Электронная микроскопия – совокупность электронно-зондовых методов исследования микроструктуры твердых тел, их локального состава и микрополей с помощью электронных микроскопов.

Электронный микроскоп – прибор, где используется электронный пучок для получения увеличенных изображений. В электронной микроскопии выделяют два основных направления: просвечивающая микроскопия и растровая микроскопия. В соответствии с направлениями выделяют два типа микроскопов: просвечивающие и растровые [33].

Только образцы в виде тонких плёнок или фольги толщиной от 1 нм до 10 мкм можно исследовать с помощью просвечивающих электронных микроскопов [34]. Поэтому для изучения модифицированных рабочих поверхностей узлов трения данное направление электронной микроскопии не подходит, а для решения рассматриваемой задачи можно использовать растровую электронную микроскопию.

Рассмотрим работу растровых электронных микроскопов. Здесь электронный луч сжимается магнитными линзами в тонкий (1-10 нм) зонд. Затем луч сканирует поверхность образца и формирует на ней растр из нескольких тысяч параллельных линий. При электронной бомбардировке поверхности появляются

вторичные излучения. Они, в свою очередь регистрируются различными детекторами, затем происходит их преобразование в видеосигналы, модулирующие электронный луч в электронно-лучевой трубке. В электронно-лучевой трубке и в колонне электронного микроскопа развертки лучей являются синхронными. Таким образом, на экране электронно-лучевой трубки появляется изображение, показывающее картину распределения интенсивности одного из вторичных излучений по сканируемой площади объекта [33].

Данный метод даёт информацию о размере частиц, рельефе поверхности, химическом составе образца, кристаллических фазах, находящихся на поверхности. Разрешение современных растровых микроскопов до 1 нм.

Примеры использования электронных микроскопов для изучения защитного модифицированного слоя приведены в работах [35, 36].

Спектроскопические методы, в которых анализируются различные спектры электромагнитного излучения, дают информацию о структуре и химическом составе поверхности. Также можно исследовать распределение заполненных и незаполненных энергетических поверхностных уровней, химическую активность поверхности, степень окисления поверхностных молекул. Данные методы дают характеристику связей системы «твердое тело–адсорбат». Сорт частиц, используемых в каждом конкретном эксперименте, непосредственно влияет на глубину анализа, которая может составлять от десятых долей нанометра до 10^3 нм [37].

Для решения поставленной задачи подойдут такие методы спектроскопии как радиоспектроскопия, инфракрасная спектроскопия и спектроскопия комбинационного рассеяния, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, электронная оже-спектроскопия и др. [14, с. 97, 31, 37]. Примеры применения данного метода для изучения поверхностей трения, модифицированных РВС, имеются в работах [16, 18].

В основе рентгеновских методов с использованием синхротронного излучения лежит исследование углового распределения интенсивности рассеяния исследуемым веществом излучения. Направив первичный (монохроматический) пучок

на объект исследования, анализируют картину рассеяния. С помощью счетчиков или фотографически регистрируют рассеянное излучение.

Данные методы относят к дифракционным методам исследования структуры вещества. Рассеяние падающей волны является дифракцией на атомах, т.к. длина волны излучения не более 0,2 нм (расстояние между атомами в веществе 0,1-0,4 нм). В свою очередь по дифракционной картине можно восстановить атомную структуру вещества [38].

Однако, несмотря на то, что эти современные методы позволяют получить самую различную информацию о химическом составе, структуре и свойствах (механических, электрических, химических и др.) модифицированных поверхностных слоев, для решения практических задач мониторинга модифицирования поверхностей трения эти методы являются мало пригодными. Для их реализации необходимы очень дорогие технические средства, высококвалифицированный персонал, требуются остановка и разборка узла трения (а значит, для неразборных узлов трения они неприменимы), они зачастую являются очень трудоемкими. Также они являются разрушающими методами в отношении многих объектов, поскольку требуется образец для сканирования. Всё это делает данные методы непригодными для широкого внедрения в промышленность.

1.2.3 Методы стандартизованных испытаний на машинах трения с оценкой триботехнических характеристик пар трения до и после приработки с ремонтно-восстановительными составами

К методам мониторинга действия РВС также относятся стандартизованные испытания на различных машинах трения с оценкой триботехнических характеристик пар трения до и после приработки с РВС. Как показывает анализ публикаций, большинство исследований процессов действия РВС в настоящее время проводится с использованием этих методов, при этом сравниваются триботехнические характеристики при наличии и отсутствии РВС в базовом смазочном материале, при различных концентрациях РВС, при различных схемах трения и материалах фрикционных пар.

При этом разными исследователями применяется различный перечень показателей и характеристик. В работах [26, 27, 29, 39, 41, 42] изучалось изменение коэффициента трения в зависимости от времени, нагрузки или давления. В работах [18, 23, 24, 26-27, 35-36, 41-45] измерялся линейный износ или износ по массе. Также измерялись следующие триботехнические параметры: давление задира [27]; время работы без смазочного материала (определялось по времени работы узла при наличии модифицированного слоя до задира) [27]; момент трения в зависимости от времени приработки [24, 40, 44]; температура в зоне трения [18, 23, 24, 41]; ток, потребляемый электродвигателем привода и пропорциональный силе трения [23]; индекс задира [46]; критическая нагрузка [18, 36]; нагрузка сваривания [18, 36, 46]. Также совместно с триботехническими характеристиками часто исследовались параметры шероховатости и микротвердости поверхности трения до и после приработки с РВС [23, 24, 35, 40, 41]. Для лабораторных испытаний использовались различные машины трения, например, МИ-1, СМЦ-1, СМЦ-2, МТУ-01, 77 МТ-1, ЧМТ-1, 2070 СМТ-1, ЧШМ-3,2. В работе [21] измеряли площадь образовавшегося покрытия по фотографиям поверхности трения, полученным с помощью металлографического микроскопа МИМ-7.

1.2.4 Методы стендовых испытаний ремонтно-восстановительных составов в различных трибосопряжениях

Среди методов мониторинга процессов действия РВС можно выделить стендовые испытания РВС в различных трибосопряжениях. Из анализа публикаций видно, что чаще всего стендовые испытания проводятся с целью исследования влияния смазочных композиций с РВС на основные показатели двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [21, 27, 35, 41, 47, 48]. При этом оценивается влияние РВС на такие показатели двигателей, как расход топлива, износ деталей двигателя, давление масла, угар моторного масла, номинальная мощность, максимальный крутящий момент, компрессия и др.

Несмотря на то, что методы лабораторных испытаний на машинах трения и стендовых испытаний широко распространены, они довольно трудоемки, так как

для комплексной оценки воздействия РВС на трибосопряжение необходимо измерить множество различных параметров, кроме того, для реализации этих методов часто требуется дорогое оборудование. Зачастую их нельзя применить для неразборных узлов трения.

Из-за указанных недостатков все описанные в пунктах 1.2.3-1.2.4 методы не пригодны для широкого внедрения в промышленность.

1.2.5 Оригинальные методы трибодиагностики и трибометрии с использованием видов неразрушающего контроля

К настоящему времени разработано большое количество различных методов трибомониторинга на основе применения теорий акустического, теплового, оптико-визуального, электрического неразрушающего контроля. Кроме того, широкое применение находят методы аналитического контроля. Эффективность применения тех или иных методов во многом определяется не только их спецификой, в частности, чувствительностью к исследуемым явлениям, но и характером решаемых задач контроля и диагностирования. Принимая во внимание, что к задачам исследования относится мониторинг поверхностных явлений при фрикционном взаимодействии, очевидно, что внимание нужно уделять наиболее чувствительным и безынерционным методам, в число которых входят методы электрического контроля.

Электрические методы неразрушающего контроля являются пригодными для широкого внедрения в промышленность, поскольку обладают следующими достоинствами: их реализация не требует применения первичных преобразователей, электрический сигнал о состоянии объекта контроля поступает непосредственно из зон трения его деталей к электронному средству диагностирования, где обрабатывается и оценивается. Также электрические методы являются универсальными (применяются для диагностики, контроля и прогнозирования состояния узлов трения), они безынерционны, обладают высокой чувствительностью при оценке качества рабочих поверхностей трибосопряжений и не требуют применения дорогих технических средств.

Электрические методы неразрушающего контроля также применяют для комплексной оценки технического состояния трибосопряжений. Их можно применить и в данном случае. Сущность данных методов заключается в оценке состояния узла трения по значениям электрических диагностических параметров, характеризующих сложные процессы, протекающие в зонах трения [49].

В работе [49, с. 35] подробно описаны существующие методы электрического контроля, применяемые для оценки состояния узлов трения. Авторы указывают на то, электрические диагностические параметры чувствительны к изменению состояния поверхностей трения, изменению несущей способности смазочного материала, появлению износа. В работе [50] показана эффективность электрических методов при поиске локальных дефектов. Процессы ремонтного восстановления, в свою очередь, имеют обратную направленность, способствуют уменьшению дефектов и общего износа, поэтому имеются предпосылки к использованию электрических методов для мониторинга процессов действия РВС. Также эффективность использования данных методов подтверждена экспериментальными исследованиями [51].

1.2.6 Выводы

Применяемые в настоящее время методы для оценки процессов модифицирования РВС поверхностей трения являются очень трудоемкими, требуют прерывания работы трибосопряжения, требуют наличия дорогих технических средств. Также данные методы практически невозможно применить для неразборных узлов трения. Перечисленных недостатков лишены электрические методы неразрушающего контроля, кроме того они позволяют осуществлять непрерывный трибомониторинг при эксплуатационных режимах работы трибосопряжения, являются эффективными не только при диагностике, но и при прогнозировании дальнейшего состояния узла трения. Наконец, они могут быть адаптированы для широкого внедрения в промышленность, поэтому в диссертационном исследовании разрабатывается электрический неразрушающий метод трибомониторинга ремонтного восстановления рабочих поверхностей деталей узлов трения.

1.3 Выбор диагностического параметра и его обоснование

В методах электрического контроля выделяют группу генераторных методов, и группу электропараметрических методов [52, с. 453].

К группе генераторных относятся методы, основанные на регистрации электрических сигналов, формируемых самим узлом трения (ЭДС, потенциалы, возникающие при электризации). В качестве диагностических параметров в данном случае используют ЭДС различной природы, а также производные величины – электрические потенциалы, трибо- и термоТоки.

К электропараметрическим относятся методы, основанные на регистрации электрических характеристик узла трения, меняющихся в зависимости от состояния объекта контроля. Для формирования сигнала измерительной информации в данном случае необходим внешний источник электрической энергии. Здесь используются такие параметры, как электрическое сопротивление и проводимость, электрическая емкость, магнитное сопротивление, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь [49].

Если рассматривать генераторные методы, источниками электризации при трении являются контактная электризация, термоэлектрические процессы, электрохимические процессы, электрокинетическое заряджение, экзоэлектронная эмиссия, эмиссия электронов высоких энергий, магнитные источники [53].

Данные источники электризации относятся, прежде всего, к случаю трения в металлах. Во всех проанализированных публикациях о механизмах действия РВС говорится о неметаллической структуре защитных слоев, поэтому можно сделать вывод об отсутствии основных источников электризации (на момент формирования модифицированного слоя), что ставит под сомнение целесообразность применения данных методов для решения поставленной задачи.

Также к существенным недостаткам генераторных методов относится невысокая помехозащищенность и воспроизводимость результатов из-за низкого уровня генерируемой узлом трения ЭДС [49]. Наличие помех и наводок от элек-

тромеханических приводов приведет к невозможности реализации данных методов на производстве. Кроме того, измерительный сигнал является совокупностью трибоэлектрической, термоэлектрической, акустоэлектрической и других, входящих в состав суммарной ЭДС [54], поэтому выделить информацию только о качестве поверхностей трения проблематично.

Рассмотрим диагностические параметры электропараметрических методов. Применение такого параметра, как магнитное сопротивление нецелесообразно по той же причине, что указана выше: неметаллическая структура защитных слоев.

Также распространенным диагностическим параметром является емкость [55-56]. Однако, использование данного параметра эффективно, в основном, при жидкостном режиме смазки [49], в данной же работе рассматривается также граничный режим смазки трибосопряжения. Кроме того, в процессе деструкции смазочных материалов и функциональных присадок изменяется диэлектрическая проницаемость. Образование защитного слоя также будет оказывать влияние на диэлектрическую проницаемость и, следовательно, на значение диагностического параметра.

Смазочный материал является диэлектриком (удельное сопротивление жидких смазочных материалов составляет $10^5 \dots 10^{13}$ Ом·м, а пластичных – $10^8 \dots 10^{22}$ Ом·м [49]), многие смазочные композиции имеют близкую к линейной зависимость электрического сопротивления от толщины смазочного слоя. Во время работы узла трения толщина смазочного слоя непрерывно изменяется (при улучшении условий работы она увеличивается, при ухудшении – уменьшается), контакт наиболее высоких микронеровностей вызывает разрушение смазочной пленки, при этом сопротивление узла трения падает до $10^{-3} - 10^2$ Ом, наблюдаются микроконтакты (импульсы проводимости) [57]. Образование защитного слоя и изменение микрогеометрии рабочих поверхностей также повлияет на число и длительность импульсов проводимости. Таким образом, для решения поставленной задачи можно использовать диагностический параметр «среднее сопротивление».

ние», (измеряют либо по величине падения напряжения на трибосопряжении, либо по средней величине тока через узел трения) [49, 52].

Однако, данный параметр обладает такими недостатками, как низкая помехозащищенность, кроме того сопротивление является комплексным критерием, на его изменение оказывает влияние множество факторов (нагрузка, свойства смазочного материала, температура, работоспособность системы смазывания и т.д.) [52], а не только состояние микрогеометрии и процессы взаимодействия поверхностей твердых тел с компонентами смазочных материалов. Решение поставленной задачи с использованием данного параметра может оказаться неэффективным по причине того, что изменение микрогеометрии вызывает флуктуацию высокочастотных составляющих сопротивления, а современные средства измерения электрического сопротивления зачастую имеют ограниченный частотный диапазон. Кроме того, на электропроводность пленки смазочного материала также влияет и химический состав смазочного материала, наличие в нем различных веществ и присадок.

Гораздо более перспективными в данном случае представляются параметры импульсов проводимости, например, их число, суммарная, максимальная или средняя за время измерения длительность [49]. Однако при измерении длительности импульсов проводимости не учитывается их число. Применение второго параметра неэффективно из-за его нелинейной характеристики, уменьшение его значения может свидетельствовать как об улучшении состояния поверхностей трения, так и об ухудшении их состояния (непрерывное контактирование).

Приведенных недостатков не имеет электрорезистивный метод, в котором в качестве диагностического признака используется вероятность электрического микроконтактирования в зоне трения, которую оценивают по параметру «нормированное интегральное время электрического контактирования» (НИВ). Численно данный параметр равен отношению суммарной длительности микроконтактирований в зоне трения за некоторый интервал времени измерения к значению этого интервала времени [49]:

$$K = \frac{1}{T_{II}} \sum_1^{n_T} (t_{ki} - t_{ni}), \quad (1.5)$$

где T_{II} – время измерения;

n_T – число импульсов микроконтактирования за время T_{II} ;

$t_{n(k)i}$ – время начала (конца) i -го импульса проводимости.

Под электрическим микроконтактированием понимается событие, заключающееся в том, что электрическое сопротивление трибосопряжения становится меньше некоторого порогового значения (100 ± 2 Ом) [49].

Данный параметр обладает гораздо большей помехозащищенностью по сравнению с другими электрорезистивными параметрами. Улучшение микрогеометрии должно сопровождаться уменьшением количества микроконтактирований, и, соответственно численным уменьшением значений данного параметра.

Несмотря на неоднозначные представления трибологов об электрических свойствах граничных слоев [58], можно утверждать, что сопротивление граничных смазочных пленок хоть и на несколько порядков меньше сопротивления гидродинамических слоев, но при этом превышает сопротивление металлического контакта. Процесс модифицирования сопровождается заполнением фактической площади контакта (ФПК) слоями с большей адсорбционной способностью с образованием более устойчивых граничных слоев, что также должно приводить к повышению сопротивления в зоне трения и уменьшению вероятности электрического микроконтактирования.

Однако, согласно классической модели значение вероятности электрического микроконтактирования зависит от соотношения высот микронеровностей поверхности и толщины смазочного слоя. При отсутствии несущего гидродинамического слоя (режим граничного трения) вероятность микроконтактирования должна равняться единице. Ранее нигде не проводились исследования возможности применения НИВ в условиях граничного трения. А при проведении аналитического обзора было выявлено, что во многих работах имеется экспериментальное доказательство эффективности РВС при граничном трении. Поэтому для возмож-

ности использования НИВ в качестве диагностического параметра при разработке электрического метода трибомониторинга ремонтного восстановления рабочих поверхностей деталей узлов трения были проведены предварительные экспериментальные исследования возможности применения параметра НИВ в условиях граничного трения для оценки смазывающей способности смазочных материалов.

В работах [59, 60] рекомендуется при исследовании смазывающей способности совместно использовать параметр НИВ и электрическое сопротивление с целью повышения информативности исследовательского метода. Поэтому предварительные экспериментальные исследования проводились с использованием двух указанных параметров.

1.4 Предварительные экспериментальные исследования для подтверждения возможности использования диагностического параметра «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования»

Исследования проводились с применением образцового метода. В публикации [61], исходя из анализа нормативных источников, предлагается в качестве образцового применять способ оценки адгезионных свойств, заключающийся в нанесении капли исследуемого смазочного материала на поверхность металла с измерением геометрических характеристик капли (углы смачивания, диаметр и высота капли). Данный метод применяется в качестве стандартизованного при оценке маслянистости часовых масел (ГОСТ 7934.2-74. Масла часовые. Метод определения краевого угла смачивания).

Таким образом, в данном разделе представлены результаты экспериментальных исследований смазочной способности моторных масел по электрическим параметрам с последующим их сравнением с результатами образцового метода.

В качестве трибосопряжения использовалась пара трения «вал–неподвижное кольцо», площадь поверхности трения составляла $8,5 \text{ мм}^2$. Нагрузка

на трибосопряжение составила 25 Н. Частота вращения вала $f_B=230 \text{ мин}^{-1}$. Время измерения диагностического параметра $T_{и}=1 \text{ с}$.

В экспериментальных исследованиях использовались пробы следующих смазочных материалов:

- LUXE ЛЮКС НТ 10W-40 SL/CF (масло моторное полусинтетическое, класс SAE 10W-40);
- ZIC A+ 10W-40 (полусинтетическое моторное масло для бензиновых двигателей всех типов);
- ZIC XQ 5W-40 (синтетическое моторное масло класса SAE 5W-40 высшего качества для бензиновых и дизельных двигателей);
- Mobil Super M 10W-40 (масло класса SAE 10W-40 на основе высокоочищенного минерального базового масла с использованием дополнительного загущающего компонента, улучшающего его вязкостно-температурные свойства);
- M-8B (моторное масло, изготовленное на основе базовых масел с добавлением многофункционального пакета присадок. Обладает хорошими смазывающими свойствами при высоких нагрузках. Класс SAE 20W-20);
- FORD 5W-30 FORMULA F (синтетическое моторное масло класса SAE 5W-30).

Использованное оборудование: измеритель параметров электрического контактирования ИПЭК-1 (ТУ 4276-195-02069036-2005) (для измерения НИВ); измеритель электрических параметров трибосопряжений ИЭПТ (для измерения сопротивления); персональный компьютер; аналогово-цифровой преобразователь ADC16USB (для передачи данных от прибора ИЭПТ в компьютер). Подробное описание используемого оборудования приведено в приложении А.

При исследовании каждой пробы выполнялись следующие действия:

- подготовка трибосопряжения (схема трения – «вал–кольцо», размеры вала и кольца выбраны таким образом, чтобы исключить возможность образования гидродинамического слоя);
- промывка трущихся поверхностей, сушка, монтаж на испытательном

стенде;

- внесение пробы смазочного материала;
- включение привода и измерение диагностического параметра НИВ в течение от 15 до 19 минут (для различных проб в зависимости от характера изменения измеряемого параметра в процессе приработки);
- завершение измерения параметра НИВ, измерение параметра «среднее электрическое сопротивление» (без остановки привода).

Результаты измерения параметра НИВ (K) для указанных проб показаны на рисунке 1.5.

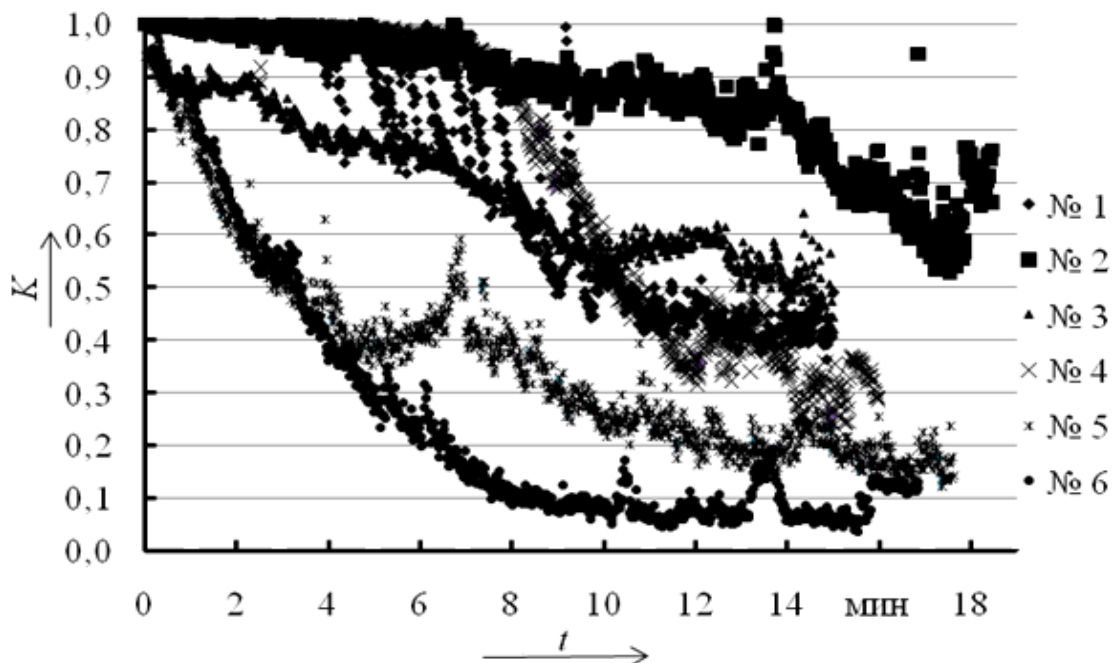


Рисунок 1.5 – Результаты измерения параметра НИВ для шести проб масел

Общий анализ полученных результатов измерений позволил сделать следующие выводы. Во-первых, при смазывании испытуемого трибосопряжения пробой № 1 в процессе трения наблюдаются нестационарные процессы, не характерные монотонной приработке. В частности, следует отметить скачкообразные изменения режимов трения после четвертой минуты. После десятой минуты режим трения стабилизировался, однако в целом данные этого эксперимента следует рассматривать как результаты с невысокой достоверностью.

Аналогичные выводы можно сделать и по четвертой пробе смазочного материала. В частности, следует отметить резкие изменения режима трения между второй и третьей минутой, а также после двенадцатой минуты.

Анализ результатов измерения параметра НИВ для проб № 2, № 3, № 5 и № 6 не дает оснований подвергать сомнению достоверность полученных результатов, исходя из отсутствия явно выраженных резких изменений режимов трения.

Исходя из приведенного анализа, можно сделать заключение, что следует учитывать результаты исследований, полученные на начальной стадии (до четвертой минуты), когда результаты измерения диагностического параметра в большей степени определяются качеством процесса смазки при граничном трении.

Анализ результатов измерения параметра НИВ можно проводить также для конечных этапов исследований по каждой пробе, но при этом следует исключить из рассмотрения пробы № 1 и № 4.

С учетом сказанного, обобщением проведенных экспериментальных исследований следует считать диаграммы, приведенные на рисунках 1.6 и 1.7 (по оси ординат представлены усредненные значения параметра по шестидесяти точкам). На рисунке 1.6 показаны значения диагностического параметра НИВ, измеренные для исследуемых проб на конечных стадиях фрикционного взаимодействия. Эти данные представляют интерес, так как именно для этих стадий проводилось измерение среднего электрического сопротивления, а сопоставление результатов измерения обоих параметров предполагается использовать для анализа адекватности и достоверности полученных результатов.

На рисунке 1.7 приведены результаты измерения параметра НИВ на начальной стадии фрикционного взаимодействия, когда числовые значения параметра НИВ в полной мере характеризуют условия смазывания, а не изменение микрогеометрии деталей испытываемого трибосопряжения в процессе фрикционного взаимодействия.

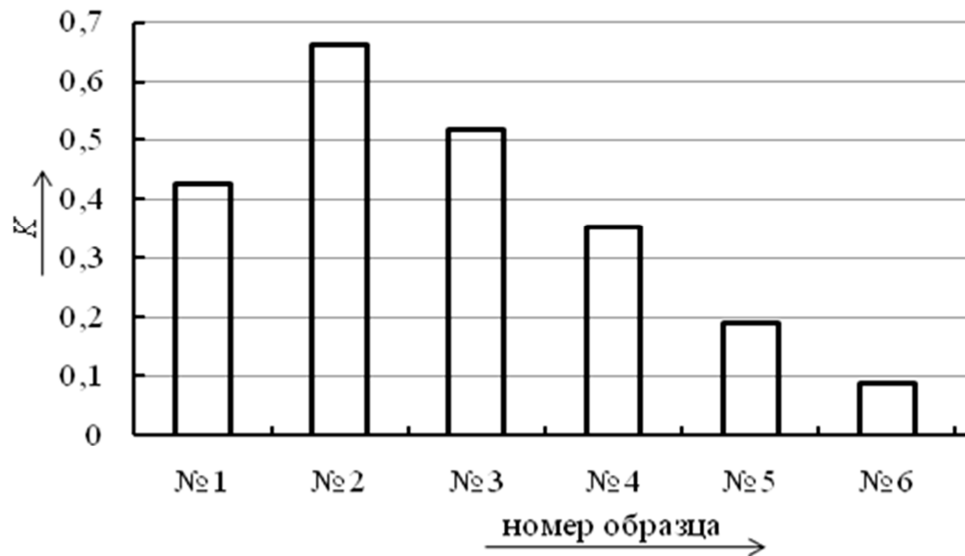


Рисунок 1.6 – Результаты измерения параметра НИВ для исследуемых проб на конечной стадии фрикционного взаимодействия

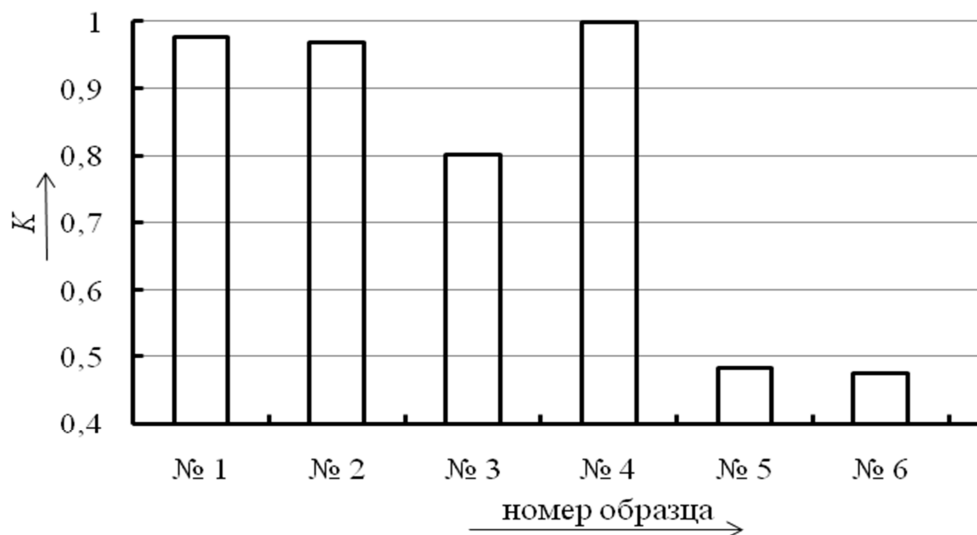


Рисунок 1.7 – Результаты измерения параметра НИВ для исследуемых проб на начальной стадии фрикционного взаимодействия (от 3 до 4 минуты)

Характер изменения диагностического параметра НИВ для интервалов времени начальных стадий фрикционного взаимодействия показан на рисунке 1.8. Анализ характера изменения диагностического параметра позволяет констатировать отсутствие явно выраженных монотонных трендов, связанных с приработкой трибосопряжения, в течение рассматриваемого интервала времени.

Выборка значений НИВ с третьей по четвертую минуты эксперимента, график которых приведен на рисунке 1.8, представлена в таблице Б.1 приложения Б.

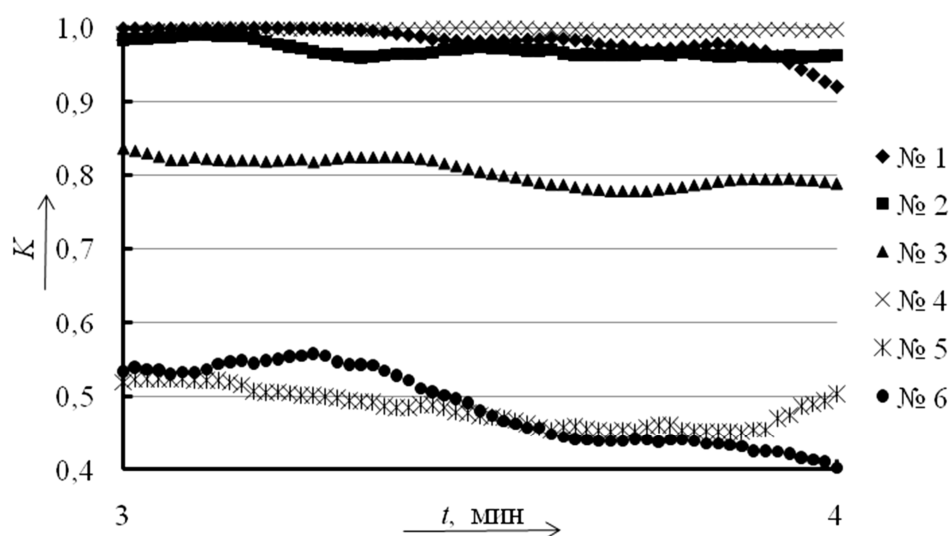


Рисунок 1.8 – Характер изменения параметра НИВ для исследуемых проб на начальной стадии фрикционного взаимодействия (от 3 до 4 минуты)

Для проверки адекватности полученных результатов измерения основного параметра НИВ выполнены измерения среднего сопротивления (R). Сопротивление измерялось для каждой пробы (после завершения измерения НИВ) в течение 5 с, частота дискретизации составляла 10 кГц. При обработке результатов выполнено усреднение результатов за 1 с. Результаты измерений для каждой пробы показаны на рисунке 1.9.

Сводная диаграмма результатов измерения среднего сопротивления показана на рисунке 1.10.

Качественный анализ рисунков 1.10 и 1.6 позволяет сделать вывод о достоверности результатов измерения НИВ и сопротивления, так как наблюдается строго противоположный характер результатов по различным пробам, а именно, убыванию числовых значений параметра НИВ соответствует возрастание значений электрического сопротивления для соответствующих проб исследуемых материалов.

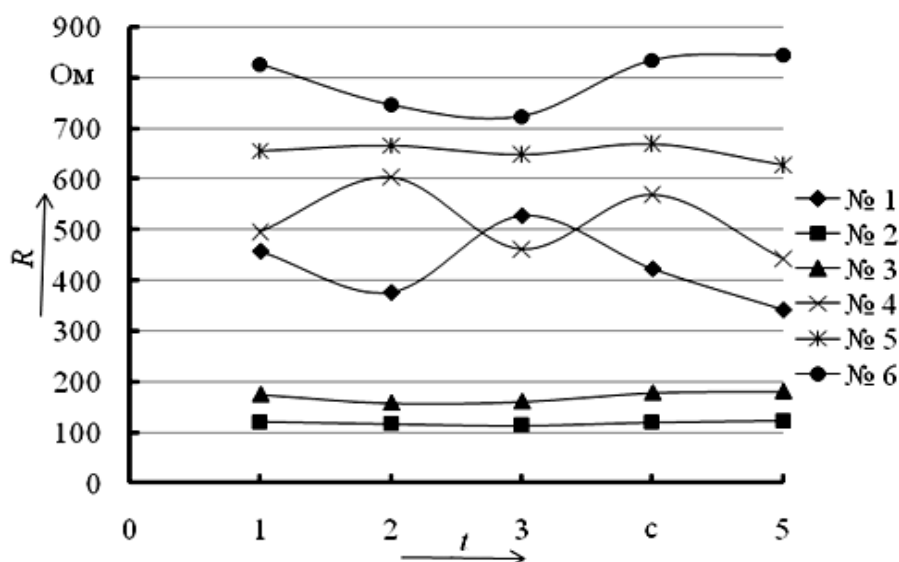


Рисунок 1.9 – Характер изменения сопротивления трибосопряжения при смазывании различными пробами

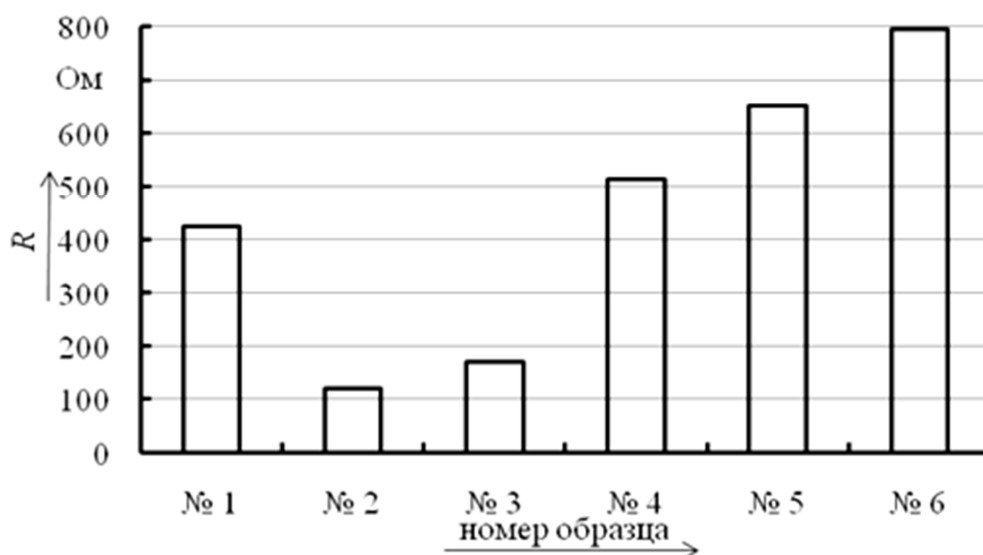


Рисунок 1.10 – Результаты измерения сопротивления трибосопряжения при смазывании исследуемыми пробами

Окончательная проверка достоверности результатов может быть получена при сравнении полученных данных с данными образцового метода. Исходя из анализа нормативных источников [61], в качестве образцового решено применять метод исследования краевых углов смачивания.

При реализации метода применяют различное оборудование для измерения краевых углов смачивания. Стандартные методы предполагают применение ин-

струментальных микроскопов и катетометров. Существуют также серийно выпускаемые программно-аппаратные комплексы, основанные на фото- и видеонаблюдении капель исследуемых сред с последующей автоматической или полуавтоматической обработкой. Применение анализа фотоизображений капель допускают и стандартизованные методы. При этом к основным требованиям относят минимально допустимое увеличение изображения (не менее чем в пять раз), а также максимальную погрешность измерения параметров краевых углов смачивания (например, стандарт на исследования смазывающей способности часовых масел регламентирует погрешность до 12 %).

В таблице 1.1 приведены результаты измерения краевых углов капель исследуемых проб (были реализованы два метода – метод непосредственной оценки и метод «ширины – высоты», основанный на измерении диаметра капли и ее высоты).

Для измерения диаметра и высоты капель на исследуемую поверхность в непосредственной близости от капель помещалась концевая мера длины. Фотографии (разрешение фотосъемки 3072×2304 точек) после цифровой фильтрации шума обрабатывались в программной среде «Компас»: масштабировались с приведением к номинальному размеру концевой меры длины. После масштабирования выполнялись измерения параметров капель.

Для каждой пробы измерения проводились по трем каплям, измерялись углы Θ_1 и Θ_2 – соответственно, с левой и правой стороны каждой капли. После измерения данных углов определялся средний угол. Таким образом, для каждой пробы результат измерения краевого угла представлен средним значением по шести измерениям.

Для оценки достоверности измерений дополнительно был реализован метод «ширины – высоты», который заключается в использовании зависимости:

$$\cos \Theta = \frac{(d/2)^2 - h^2}{(d/2)^2 + h^2}, \quad (1.6)$$

где d – диаметр капли на границе раздела фаз, мм;

h – высота капли, мм.

Таблица 1.1 – Результаты измерения краевых углов и реализации метода «ширины – высоты»

Номер пробы		1	2	3	4	5	6
Значение краевого угла, град.	прямые измерения	16,23	15,63	13,48	16,97	10,3	9,83
	расчетный метод	16,11	14,84	13,42	15,86	9,46	9,51

Анализ данных таблицы 1.1 показывает, что расхождение в результатах измерений и расчетов не превышает 9 %, что меньше регламентированной погрешности измерения стандартизованным методом (12 %).

На рисунке 1.11 представлены результаты измерения краевых углов (Θ) в виде диаграммы.

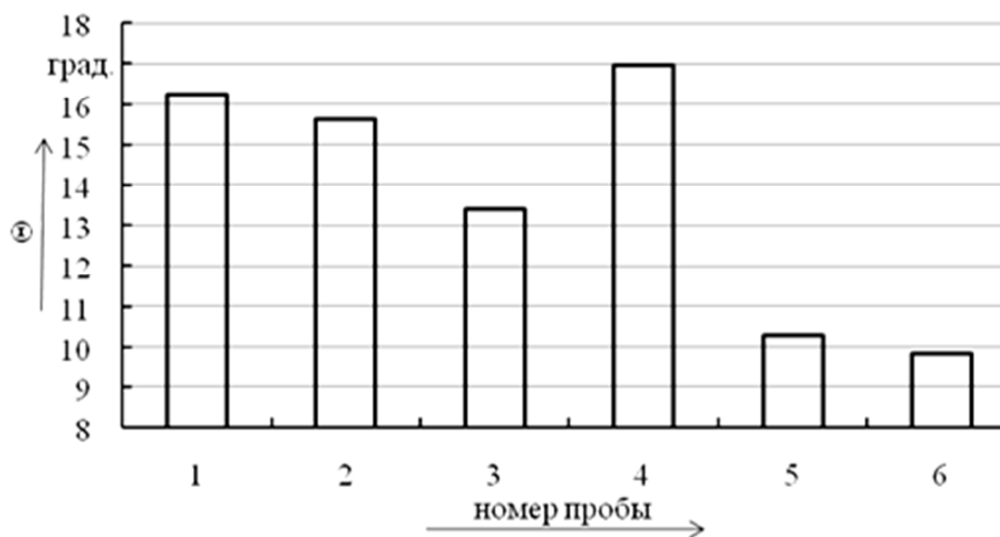


Рисунок 1.11 – Результаты измерения краевых углов смачивания

Доказательством достоверности электрического метода оценки смазывающей способности материалов по параметру НИВ может являться установление связей между результатами предлагаемого метода и образцового метода.

Качественный анализ рисунков 1.6, 1.10 и 1.11 позволяет констатировать следующее:

- между значениями краевых углов капель масел и параметром НИВ наблюдается монотонно возрастающая зависимость;
- между значениями краевых углов капель масел и сопротивлением наблюдается монотонно убывающая зависимость.

На рисунке 1.12 показаны результаты регрессионного анализа по установлению функциональной зависимости между краевым углом капли масла и значением параметра НИВ.

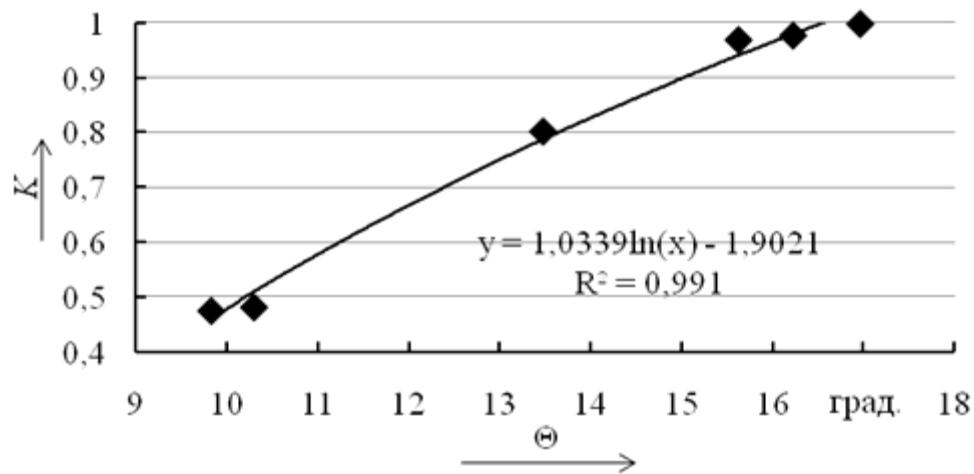


Рисунок 1.12 – Зависимость между краевым углом капли и значением параметра НИВ

Приведенные на рисунке 1.12 точки получены в результате усреднения по 60 отсчетам параметра НИВ (ордината) и по усреднению шести результатов измерения краевого угла (абсцисса). Приведенные данные соответствуют начальной стадии фрикционного взаимодействия (от 3 до 4 минуты). Результаты регрессионного анализа получены с помощью программы Microsoft Excel.

На рисунке 1.13 показаны результаты регрессионного анализа по установлению функциональной зависимости между краевым углом капли и значением параметра НИВ на конечной стадии фрикционного взаимодействия. В данном случае к рассмотрению были приняты пробы № 2, № 3, № 5 и № 6 по причинам, указанным выше.

На рисунке 1.14 показаны результаты регрессионного анализа по установ-

лению функциональной зависимости между краевым углом капли и значением параметра «среднее электрическое сопротивление».

Каждая точка получена по результатам усреднения десяти тысячи отсчетов по сопротивлению (ордината) и шести результатов измерения краевого угла (абсцисса).

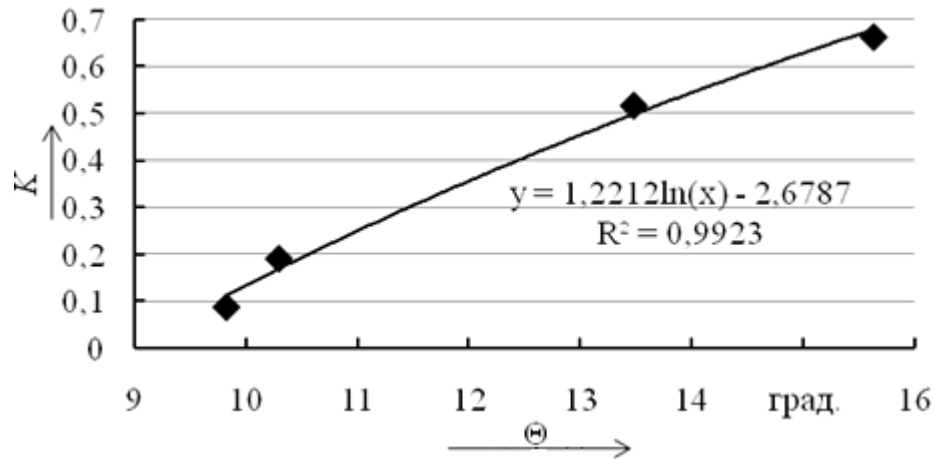


Рисунок 1.13 – Зависимость между краевым углом капли и значениями НИВ

Представленные рисунками 1.12-1.14 результаты позволяют сделать вывод, что гипотеза о связи вероятности электрического микроконтактирования в трибосопряжении при граничной смазке со смазывающей способностью смазочных материалов подтверждена, при этом указанная связь может быть описана функциональной зависимостью.

В результате проведенных исследований было установлено, что существует однозначная связь между значениями параметра НИВ и смазывающей способностью смазочного материала: чем лучше смазывающая способность и, соответственно меньше краевой угол капли, тем меньше значения диагностического параметра НИВ. Таким образом, параметр НИВ показал свою эффективность при оценке смазывающей способности в условиях граничного трения. Результаты, полученные при помощи указанного параметра, совпали с результатами образцового метода.

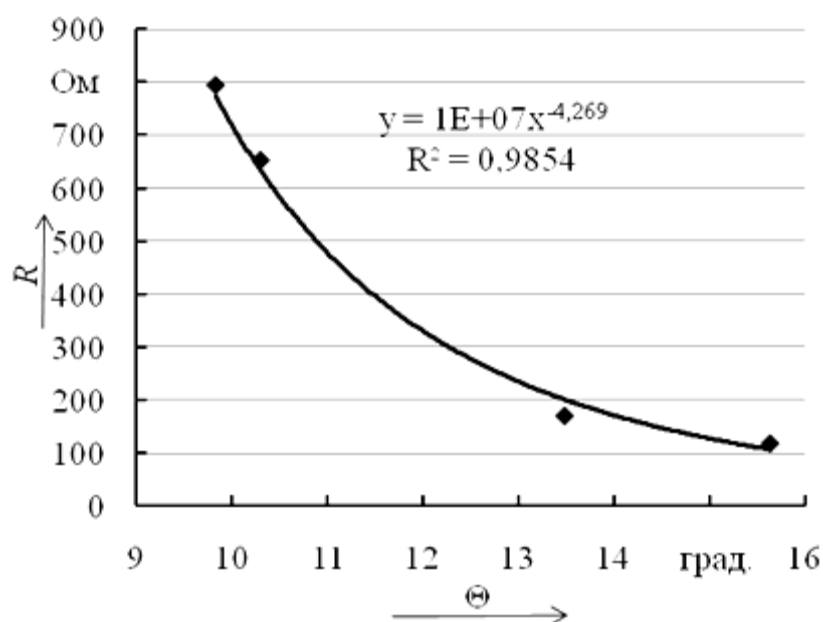


Рисунок 1.14 – Зависимость между краевым углом капли и значениями среднего электрического сопротивления

Проведенные предварительные эксперименты показали, что известная математическая модель, описывающая диагностический признак, требует доработки, так как не учитывает действие полимолекулярных граничных слоев.

Поскольку параметр НИВ является чувствительным как к изменению микрогеометрии, так и к улучшению адсорбционной способности и появлению более устойчивых к разрушению граничных слоев, его можно использовать для трибомониторинга процессов модифицирования узлов трения РВС.

На основании изложенных предпосылок предложен физический принцип трибомониторинга, который заключается в следующем. При фрикционном взаимодействии трущихся поверхностей в результате функционирования геомодификатора трения происходит модифицирование поверхностей с изменением параметров микрогеометрии и повышением прочности граничного слоя компонентов смазочной композиции, что приводит к уменьшению вероятности электрического микроконтактирования в зоне трения.

На основе сформулированного принципа трибомониторинга было предложено использовать НИВ в качестве диагностического параметра.

1.5 Постановка задач исследования

С учетом проведенного в данной главе анализа проблемы задачами диссертационного исследования являются:

- анализ существующих методов исследования модифицирования поверхностей пар трения при их ремонтном восстановлении геомодификаторами трения;
- обоснование физического принципа трибомониторинга, диагностического параметра;
- разработка математической модели диагностического признака – вероятности электрического микроконтактирования в зоне трения, описывающей связь процессов модифицирования трущихся поверхностей с диагностическим признаком;
- проведение теоретических исследований связи диагностического признака с параметрами модифицированного слоя на поверхностях трения;
- разработка метода и методики проведения трибомониторинга;
- экспериментальное подтверждение достоверности теоретических положений и эффективности предложенного метода.

1.6 Выводы

1 Применение РВС в качестве добавки к смазочному материалу позволяет существенно улучшить триботехнические характеристики узлов трения: увеличивается износостойкость, уменьшается коэффициент трения и т.д., это приводит к снижению потерь энергии, увеличению ресурса технических объектов, увеличению межремонтных интервалов, что позволяет достичь существенных экономических эффектов. Отсутствие научно обоснованного диагностического обеспечения сдерживает внедрение данных технологий в промышленности, поскольку неправильное использование данных добавок может привести к повреждению узлов трения.

2 При разработке метода трибомониторинга процессов ремонтного восстановления деталей узлов трения в диссертационной работе анализировались две наиболее достоверные концепции механизма действия восстановительных составов: изменение микрогеометрии поверхности трения, что сопровождается увеличением несущей способности смазочного слоя, а также изменение условий смазывания при граничном трении, когда смазочное действие проявляется в формировании поверхностного защитного полимолекулярного слоя компонентов смазочного материала на предварительно модифицированной поверхности.

3 Применяемые в настоящее время методы для оценки процессов на поверхностях трения, протекающих при наличии в смазочном материале РВС, очень трудоемки, требуют остановки узлов трения (двигателей, оборудования), наличия дорогих технических средств. Их невозможно применить для неразборных узлов трения. Данные методы применимы только в лабораториях и исследовательских центрах, невозможно их широкое внедрение в промышленность.

4 Для решения проблемы можно использовать электрические методы. При отсутствии недостатков других методов, они также позволяют осуществлять непрерывный трибомониторинг при эксплуатационных режимах работы трибосопряжения. Данные методы могут быть адаптированы для широкого внедрения в промышленность, поэтому в диссертационном исследовании разрабатывается электрический неразрушающий метод трибомониторинга ремонтного восстановления рабочих поверхностей деталей узлов трения.

5 В соответствии с рассматриваемыми концепциями механизма действия РВС наиболее целесообразно использовать в качестве диагностического признака вероятность электрического микроконтактирования в зоне трения, которую оценивают по параметру НИВ.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗИ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПРИЗНАКА С УСЛОВИЯМИ ФОРМИРОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО СЛОЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТРЕНИЯ

2.1 Математическая модель вероятности электрического микроконтактирования в зоне трения, учитывающая наличие модифицированных слоев на рабочих поверхностях пар трения

Для разработки математической модели, описывающей связь выбранного диагностического признака с условиями фрикционного взаимодействия, сопровождающими модифицирование поверхностей трения, необходимо выбрать объект исследования (тип трибосопряжения). Исходя из того, что наиболее распространенными видами трибосопряжений являются опоры качения, а также с учетом того, что именно такой тип узла трения характеризуется как наиболее сложный с точки зрения моделирования различных физических процессов, в дальнейшем в качестве объекта будут рассматриваться подшипники качения.

Электрические методы диагностирования узлов трения с использованием диагностического признака – вероятности электрического микроконтактирования описаны в работах [49, 50, 62]. Математическая модель электрического микроконтактирования в зоне трения двух поверхностей, разделенных слоем смазочного материала с учетом геометрии трущихся поверхностей, описана в работах [49, 63, 64].

Согласно указанным выше источникам, вероятность электрического микроконтактирования в подшипнике – вероятность события, заключающегося в том, что хотя бы одно тело качения одновременно контактирует с обоими кольцами; при этом микроконтактирование деталей подшипника может осуществляться хотя бы по одной паре неровностей.

Вероятность электрического микроконтактирования оценивается инструментально по параметру НИВ. Численно данный параметр равен отношению

суммарной длительности микроконтактирований в зоне трения за некоторый интервал времени измерения к значению этого интервала времени (выражение (1.5)).

В классической модели значение вероятности электрического микроконтактирования в трибосопряжении зависит от соотношения высот микронеровностей поверхности и толщины смазочного слоя [49]. В соответствии с этой моделью при отсутствии несущего гидродинамического (эластогидродинамического, гидростатического) слоя (режим граничного трения) вероятность электрического микроконтактирования должна равняться единице. Однако результаты предварительных экспериментов, описанных в разделе 1.4, противоречат этому утверждению: при граничном трении вероятность электрического микроконтактирования не только меньше единицы, но и имеет разные значения для различных смазочных материалов. Это объясняется тем, что вероятность электрического микроконтактирования зависит также от смазывающей способности смазочного материала: чем лучше смазывающая способность, тем меньше вероятность микроконтактирования. Согласно анализу существующих в трибологии гипотез о действии РВС, модифицированные участки поверхности способны лучше адсорбировать смазочный материал и улучшать его смазывающую способность, что в свою очередь также приведет к снижению численных значений признака.

Таким образом, на значение вероятности электрического микроконтактирования влияет не только соотношение параметров шероховатости поверхности и толщины гидродинамического слоя, но и степень заполнения поверхности трения модифицированным слоем. Исходя из этого, известная математическая модель вероятности электрического микроконтактирования [49] была усовершенствована введением параметров, учитывающих наличие модифицированных слоев на поверхности трения.

Микроконтактирование металлических поверхностей может наступить при одновременном соблюдении двух условий:

- 1) отсутствует несущий гидродинамический (эластогидродинамический, гидростатический) слой;

2) отсутствует модифицированный слой с граничным полимолекулярным слоем компонентов смазочного материала, как показано на рисунке 2.1.

В соответствии с классической моделью значение вероятности контактирования микронеровности с другой поверхностью определяется интегральной функцией $\Phi(\lambda)$ нормированного нормального распределения λ -параметра – параметра режима смазки, который определяется соотношением толщины смазочного слоя и параметров микрогеометрии [49]:

$$P_{\text{гид}} = 1 - \Phi(\lambda), \quad (2.1)$$

$$\lambda = \frac{h_{\text{ср}}}{\sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}}, \quad (2.2)$$

где $h_{\text{ср}}$ – толщина смазочного слоя;

R_{q1}, R_{q2} – средние квадратические отклонения профилей двух поверхностей.

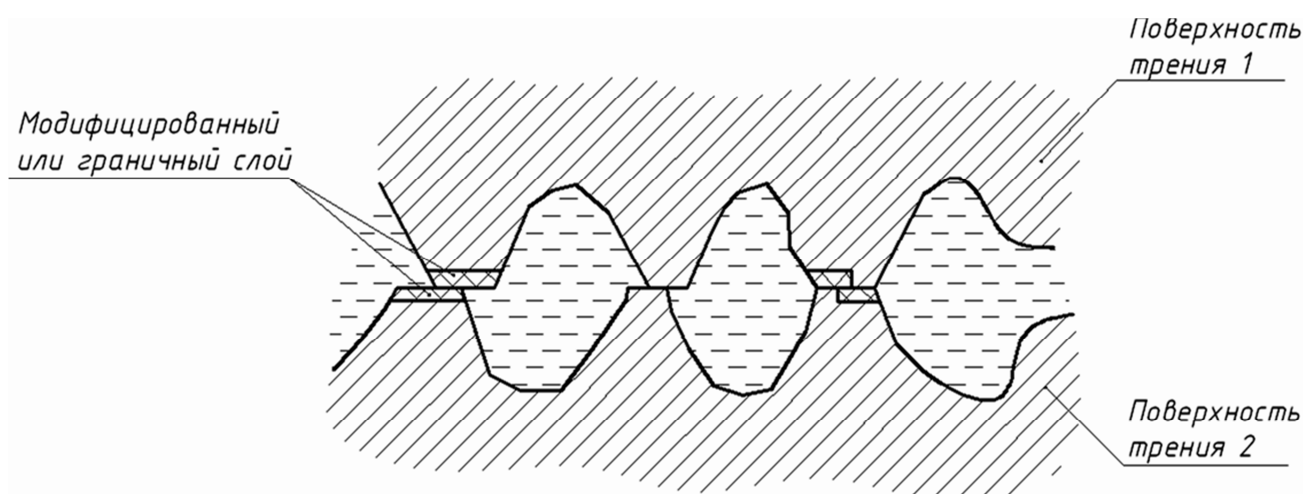


Рисунок 2.1 – Микроконтактирование поверхностей трения

По выражению (2.1) при отсутствии гидродинамического слоя при граничном трении вероятность должна равняться 1. При отсутствии жидкостной смазки вероятность микроконтактирования $P_{\text{гран}}$ предложено определять следующим образом:

$$P_{\text{гран}} = 1 - \frac{S_{\text{защ}}}{S_{\text{конт}}}, \quad (2.3)$$

где $S_{\text{защ}}$ – площадь контактирующей поверхности, покрытая модифицированным слоем;

$S_{\text{конт}}$ – потенциальная площадь микроконтактирования.

Для связи величин $S_{\text{защ}}$ и $S_{\text{конт}}$ предложено использовать относительный коэффициент защитного покрытия $k_{\text{отн. защ}}$:

$$S_{\text{защ}} = k_{\text{отн. защ}} \cdot S_{\text{конт}}. \quad (2.4)$$

Данный коэффициент показывает, какая часть от потенциальной площади микроконтактирования покрыта модифицированным слоем и защищена граничным слоем, вероятность электрического микроконтактирования через $k_{\text{отн. защ}}$ равна:

$$P_{\text{гран}} = 1 - \frac{k_{\text{отн. защ}} \cdot S_{\text{конт}}}{S_{\text{конт}}} = 1 - k_{\text{отн. защ}}. \quad (2.5)$$

Диапазон значений коэффициента $k_{\text{отн. защ}}$ – от нуля до единицы.

Поскольку микроконтактирование возможно при одновременном отсутствии несущего гидродинамического слоя и защитного граничного слоя на модифицированной поверхности, вероятность электрического микроконтактирования двух микронеровностей P_1 представляется как произведение рассмотренных выше вероятностей:

$$P_1 = P_{\text{гид}} \cdot P_{\text{гран}} = (1 - \Phi(\lambda)) \cdot (1 - k_{\text{отн. защ}}). \quad (2.6)$$

Вероятность электрического микроконтактирования P двух поверхностей, на которых находятся n микронеровностей, по которым может произойти контактирование, определяется выражением [49]:

$$P = 1 - (1 - P_1)^n, \quad (2.7)$$

подставляя (2.6) в (2.7), получаем:

$$P = 1 - \left(\Phi(\lambda) + k_{\text{отн. защ}} - \Phi(\lambda) \cdot k_{\text{отн. защ}} \right)^n. \quad (2.8)$$

Если рассматривать пример вероятности электрического микроконтактирования в подшипнике качения, вероятность микроконтактирования i -го тела качения с наружным (внутренним) кольцом $P_{H(B)i}$ будет определяться выражением [49]:

$$P_{H(B)i} = 1 - (1 - P_{H(B)i})^{n_{H(B)i}}, \quad (2.9)$$

где $P_{H(B)i}$ – вероятность микроконтактирования двух микронеровностей на поверхностях i -го тела качения и наружного (внутреннего) кольца, она определяется выражением (2.6);

$n_{H(B)i}$ – число микронеровностей на поверхностях i -го тела качения и наружного (внутреннего) кольца, по которым может произойти микроконтактирование.

Так как нагрузку могут воспринимать несколько тел качения, и, соответственно, микроконтактирование может происходить по любому из этих тел, вероятность электрического микроконтактирования в подшипнике P_k определяется выражением [49]:

$$P_k = 1 - \prod_i^Z (1 - P_{Hi} P_{Bi}), \quad (2.10)$$

где Z – количество тел качения, которые могут воспринимать нагрузку.

Подставляя в (2.10) выражения (2.6) и (2.9), получаем окончательную формулу:

$$P_k = 1 - \prod_i^Z \left(1 - (1 - (\Phi(\lambda) + k_{\text{отн.защ}} - \Phi(\lambda) \cdot k_{\text{отн.защ}})^{n_{Bi}}) \times \right. \\ \left. \times (1 - (\Phi(\lambda) + k_{\text{отн.защ}} - \Phi(\lambda) \cdot k_{\text{отн.защ}})^{n_{Hi}}) \right) \quad (2.11)$$

Выражение (2.11) представляет собой математическую модель вероятности электрического микроконтактирования в подшипнике качения, учитывающую наличие модифицированных слоев на рабочих поверхностях пар трения.

2.2 Теоретические исследования связи диагностического признака с условиями фрикционного взаимодействия при наличии в зоне трения модифицированного слоя

Проведены теоретические исследования полученной модели и построен график зависимости вероятности электрического микроконтактирования P_k в подшипнике от изменений λ -параметра и относительного коэффициента защитного покрытия (на примере подшипника типоразмера 208).

Число микронеровностей n по которым может произойти микроконтактирование было определено на основании справочных данных, для этого использовалось выражение:

$$n = W \cdot q, \quad (2.12)$$

где W – площадь эллиптической поверхности контакта;

q – плотность микронеровностей на единицу площади контакта.

Площадь эллиптической поверхности контакта, в свою очередь определяется из выражения [65]:

$$W = \pi ab + \pi \mu \gamma \cdot \sqrt[3]{\left[\frac{3(1-\varepsilon^2)}{E \sum \rho} \cdot F \right]^2}, \quad (2.13)$$

где a – большая полуось эллипса деформации;

b – малая полуось эллипса деформации;

μ и γ – коэффициенты, зависящие от геометрических размеров деталей;

ε – коэффициент Пуассона материалов контактирующих тел;

E – модуль упругости материалов контактирующих тел;

$\sum \rho$ – сумма кривизн соприкасающихся поверхностей;

F – нагрузка на подшипник.

Большая полуось вычисляется из выражения [65]:

$$a = \mu \left\{ \frac{3F}{\sum \rho} \cdot \frac{(1 - \varepsilon^2)}{E} \right\}^{\frac{1}{3}}, \quad (2.14)$$

малая полуось вычисляется из выражения:

$$b = \gamma \left\{ \frac{3F}{\sum \rho} \cdot \frac{(1 - \varepsilon^2)}{E} \right\}^{\frac{1}{3}}. \quad (2.15)$$

Сумма кривизн находится по формуле [53]:

$$\sum \rho = \frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}}, \quad (2.16)$$

где r_{11} , r_{12} , r_{21} , r_{22} – радиусы кривизны контактирующих тел в двух взаимно перпендикулярных плоскостях:

$$r_{11} = r_{12} = \frac{D_W}{2}, \quad (2.17)$$

$$r_{21B} = \frac{D_0 - D_W}{2}, \quad (2.18)$$

$$r_{21H} = \frac{D_0 + D_W}{2}, \quad (2.19)$$

$$r_{22} = r_{B(H)}, \quad (2.20)$$

где D_W – диаметр тела качения (шарика), 12,7 мм;

D_0 – средний диаметр подшипника, 60 мм;

$r_{B(H)}$ – радиус дорожки качения внутреннего (наружного) кольца, 6,6 мм.

Подставляя числовые значения в (2.16), получаем сумму кривизн для внутреннего кольца:

$$\sum \rho_B = \frac{1}{6,35} + \frac{1}{6,35} + \frac{1}{23,65} - \frac{1}{6,6} = 0,2057 \text{ мм}^{-1},$$

для наружного:

$$\sum \rho_H = \frac{1}{6,35} + \frac{1}{6,35} - \frac{1}{36,35} - \frac{1}{6,6} = 0,1359 \text{ мм}^{-1}.$$

Далее для расчетов использовались следующие справочные данные: $\mu_B = 3,88$, $\gamma_B = 0,409$, $\mu_H = 3,27$, $\gamma_H = 0,448$, $F=200 \text{ Н}$, $E=2,11 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $\varepsilon=0,3$ [65].

Подставляя числовые значения в (2.14) и (2.15), получаем: большая полуось эллипса деформации для внутреннего и наружного колец соответственно:

$$a_B = 0,495 \text{ мм}, \quad a_H = 0,479 \text{ мм}.$$

Малая полуось:

$$b_B = 0,052 \text{ мм}, \quad b_H = 0,066 \text{ мм}.$$

Подставляя полученные значения в (2.13), получаем площадь поверхности контакта для внутреннего и наружного колец соответственно: $W_B = 0,162 \text{ мм}^2$, $W_H = 0,197 \text{ мм}^2$.

Плотность микронеровностей на единицу площади контакта можно найти из параметра шероховатости поверхностей [49]:

$$q = \frac{1}{(10 \cdot Rz)^2}, \quad (2.21)$$

$$q = 4 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2},$$

тогда число микронеровностей из (2.12) (для внутреннего и наружного колец) равно: $n_B = 65$, $n_H = 80$.

Зная число микронеровностей, по которым может произойти микроконтактирование, по выражению (2.11) был построен график зависимости вероятности электрического микроконтактирования P_k для подшипника типоразмера 208 при радиальной нагрузке 200 Н от изменений λ -параметра и относительного коэффициента защитного покрытия $k_{\text{отн. защ}}$. Значение параметра λ принято в диапазоне от 0 до 3,5, значение $k_{\text{отн. защ}}$ – в диапазоне от 0 до 1. Результаты теоретического исследования по выражению (2.11) иллюстрируются графиком на рисунке 2.2. На рисунке 2.3 приведен тот же график в плоскости λ – P_k .

В [49] приводятся результаты экспериментальных исследований и испытаний подшипников качения, которые показали, что только при $\lambda > 1,5$ в подшипнике начинает преобладать жидкостная смазка. Если $\lambda < 1,5$ при полужидкостной смазке доминирует граничная и происходит износ поверхностей трения. Как видно из рисунка 2.3 при хорошем покрытии поверхности трения модифицированным слоем с граничным полимолекулярным слоем компонентов смазочного материала ($k_{\text{отн. защ}} = 0,9 \div 1$) уже при $\lambda = 1$ (отсутствует гидродинамический слой) вероятность электрического микроконтактирования поверхностей трения становится меньше единицы, поверхности оказываются защищенными от износа и повреждения. Из рисунка также видно, что при отсутствии модифицированного слоя (кривая, соответствующая $k_{\text{отн. защ}} = 0$ на графике) только при $\lambda > 2$ вероятность электрического микроконтактирования становится меньше 1. Наличие же модифицированного слоя позволяет защитить поверхности трения и при сравнительно небольшой толщине несущего слоя смазочного материала.

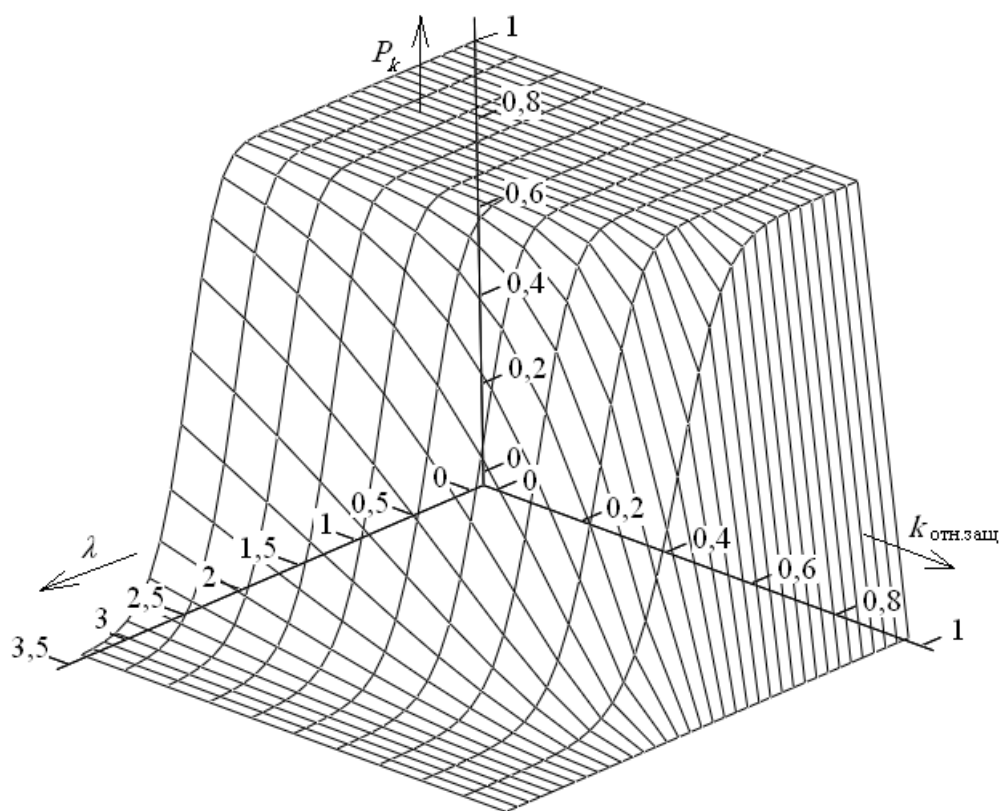


Рисунок 2.2 – График значений вероятности электрического микроконтактирования для подшипника типоразмера 208

Из рисунков 2.2 и 2.3 следует, что как улучшение микрогеометрии (что ведет к возрастанию λ), так и увеличение площади, покрытой модифицированным слоем (что ведет к возрастанию $k_{\text{отн. защ}}$ и улучшению смазывающей способности) однозначно приводят к монотонному убыванию вероятности электрического микроконтактирования. Следовательно, использование данного признака можно признать эффективным для решения поставленной задачи.

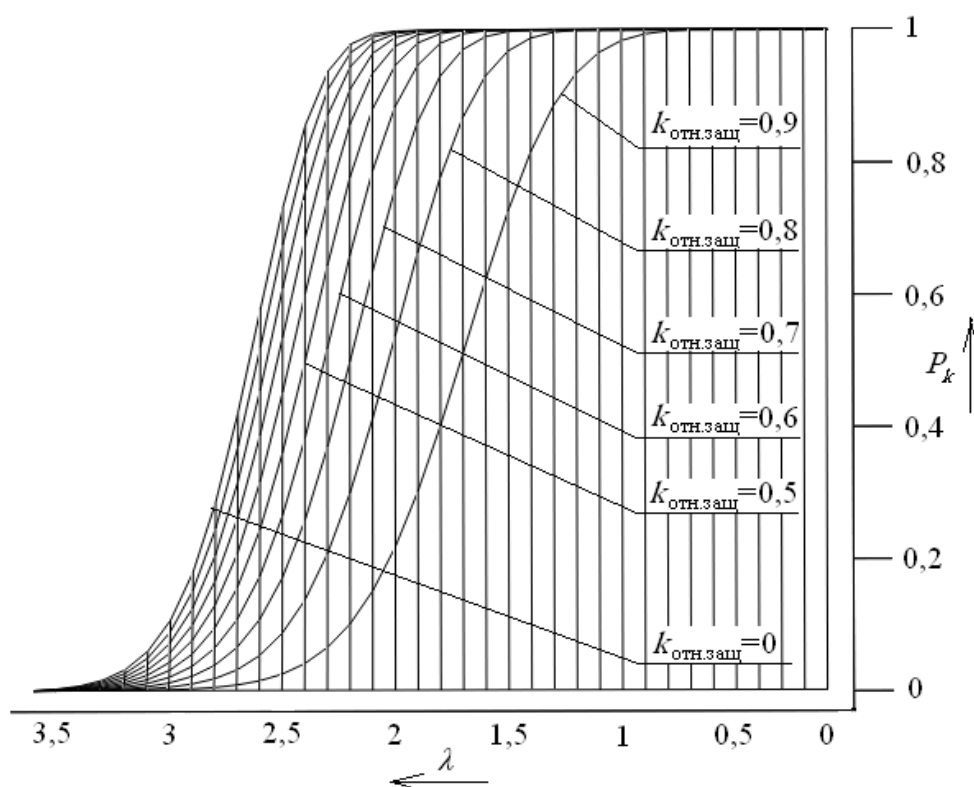


Рисунок 2.3 – График значений вероятности электрического микроконтактирования для подшипника типоразмера 208 (в плоскости λ – P_k)

2.3 Выводы

1 Выполнено усовершенствование математической модели вероятности электрического микроконтактирования в зоне трения, учитывающей геометрию трущихся поверхностей. Полученная математическая модель вероятности электрического микроконтактирования в зоне трения учитывает помимо геометрии

трущихся поверхностей наличие на них модифицированного слоя и полимолекулярных граничных слоев смазочного материала.

2 Теоретические исследования полученной модели показали, что как улучшение микрогеометрии (что ведет к возрастанию λ), так и увеличение площади, покрытой модифицированным слоем и полимолекулярными граничными слоями смазочного материала, однозначно приводят к монотонному убыванию вероятности электрического микроконтактирования.

3 Проведенные теоретические исследования доказали возможность использования диагностического признака «вероятность электрического микроконтактирования» для трибомониторинга процессов модифицирования узлов трения РВС.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ТРИБОМОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ РЕМОНТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРУ «НОРМИРОВАННОЕ ИНТЕГРАЛЬНОЕ ВРЕМЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МИКРОКОНТАКТИРОВАНИЯ»

3.1 Определение физического эквивалента, адекватного исследуемому процессу

3.1.1 Качественный анализ процессов, связанных с приработкой рабочих поверхностей и улучшением условий фрикционного взаимодействия

Основной задачей при разработке метода трибомониторинга был поиск подходов к обработке результатов измерения диагностического параметра и интерпретации результатов диагностирования. Сложность этой задачи определяется следующим.

Параметр НИВ при использовании существующих средств измерений имеет широкий динамический диапазон (в зависимости от времени измерения – до 8 порядков). При этом известно, что результаты измерения даже для однотипных объектов, работающих в одинаковых условиях, могут отличаться на несколько порядков. С одной стороны, это является достоинством параметра НИВ (высокая чувствительность), с другой стороны, существенно усложняет интерпретацию результатов измерений.

Таким образом, для выявления процессов ремонтного восстановления возникла необходимость в качественном анализе временных диаграмм приработки подшипников с различным качеством поверхностей трения (от новых – со сравнительно хорошим качеством поверхностей, до частично отработавших свой ресурс – со сравнительно невысоким качеством поверхностей) с целью изучения различий в характере изменения значений диагностического параметра.

В качестве объектов для исследования процессов приработки были использованы распространенные подшипники типоразмера 208.

Использованное оборудование: универсальный стенд для диагностирования подшипников [66], обеспечивающий вращение внутреннего кольца подшипника с частотой 500 мин^{-1} , радиальное нагружение 200 Н; измеритель параметров электрического контактирования ИПЭК-1 (ТУ 4276-195-02069036-2005) [67]; персональный компьютер.

Смазочный материал – литол-24. Время измерения диагностического параметра $T_{и}=10 \text{ с}$.

При исследовании процессов приработки выполнялись следующие действия:

- промывка подшипников, сушка, внесение смазочного материала, монтаж на испытательном стенде;
- включение привода и измерение диагностического параметра НИВ в течение приработки.

В результате проведенных исследований были выявлены две типовые картины изменения значений диагностического параметра в процессе приработки. Они приведены на рисунках 3.1 и 3.2. На рисунке 3.1 показана типовая картина поведения значений диагностического параметра при сравнительно лучшем качестве трущихся поверхностей, на рисунке 3.2 – при сравнительно худшем качестве поверхностей трения.

Из анализа рисунков 3.1 и 3.2 можно сделать вывод, что изменения значений параметра НИВ при эффективной приработке характеризуются следующими особенностями:

- наличие более продолжительного временного тренда в сторону снижения средних значений параметра;
- появление аномальных (нулевых) отсчетов (на практике при обработке такие отсчеты заменяют на минимальное значение диагностического параметра для выбранного времени измерения), а также увеличение со временем числа таких отсчетов;
- заметное увеличение variability значений параметра в процессе

уменьшения средних значений.

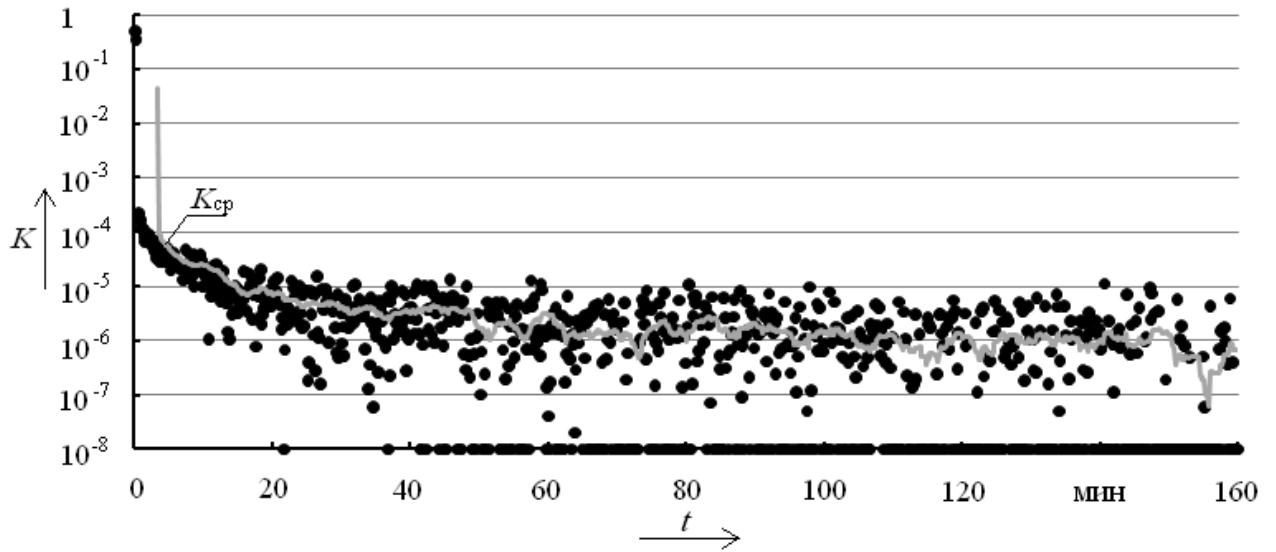


Рисунок 3.1 – Типовой процесс изменения значений параметра НИВ в процессе приработки при сравнительно лучшем качестве поверхностей трения (например, для новых подшипников) (кривая $K_{\text{ср}}$ – средние значения НИВ по 20-ти точкам)

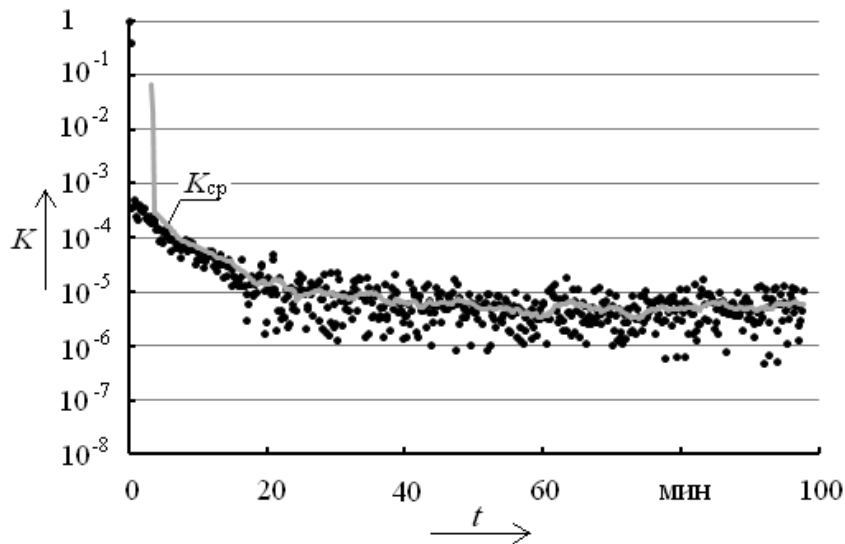


Рисунок 3.2 – Типовой процесс изменения значений параметра НИВ в процессе приработки при сравнительно худшем качестве поверхностей трения (например, для бывших в эксплуатации подшипников) (кривая $K_{\text{ср}}$ – средние значения НИВ по 20-ти точкам)

При сравнительно худшем качестве рабочих поверхностей стабилизация значений параметра происходит раньше (уже после 20-30 мин работы для объектов выбранного типа), временной тренд здесь гораздо менее продолжительный. Также вариабельность значений НИВ гораздо меньше, во многих случаях наблюдается отсутствие нулевых отсчетов.

Таким образом, качественный анализ временных диаграмм приработки подшипников выявил характерные признаки в изменении значений диагностического параметра, по которым можно судить об улучшении условий фрикционного взаимодействия в целом.

Однако интерпретировать результаты измерения диагностического параметра только по его числовым значениям очень трудно. Например, из рисунков 3.1 и 3.2 видно, что, несмотря на различие в качестве поверхностей трения, средние значения НИВ к концу приработки отличаются не более, чем на половину порядка (примерно 10^{-6} – для сравнительно лучшего качества поверхности, примерно $0,5 \cdot 10^{-5}$ – для сравнительно худшего качества поверхности). Таким образом, для количественной интерпретации результатов среднее значение диагностического параметра не является пригодным.

3.1.2 Выбор статистических оценок для интерпретации результатов диагностирования

Наиболее распространенными статистическими оценками являются среднее арифметическое K_{cp} и среднее квадратическое отклонение S , характеризующее вариацию значений диагностического параметра [69]:

$$K_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m K_i}{m}, \quad (3.1)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (K_i - K_{cp})^2}{m - 1}}, \quad (3.2)$$

где K_i – текущее значение диагностического параметра;

m – количество значений диагностического параметра, по которым происходит усреднение.

На рисунках 3.3 и 3.4 приведены графики изменения $K_{\text{ср}}$ и S ($m=20$) в процессе приработки подшипников, числовые значения параметра НИВ для которых иллюстрируются рисунками 3.1 и 3.2. Количественный анализ рисунков 3.3 и 3.4 показывает, что из-за большого динамического диапазона НИВ интерпретировать результаты диагностирования с использованием этих оценок трудно. Несмотря на различное качество поверхностей и большие различия в числовых значениях диагностического параметра в первом и во втором случаях, значения указанных статистических оценок отличаются менее чем на один порядок. Такое различие при динамическом диапазоне в 8 порядков является несущественным даже для однотипных объектов при одинаковых условиях эксплуатации. $K_{\text{ср}}$ и S являются чувствительными к наличию временного тренда в сторону снижения средних значений параметра. Однако они обладают недостаточной чувствительностью к появлению аномальных отсчетов (в данном случае это нулевые отсчеты) и увеличению вариабельности значений параметра НИВ.

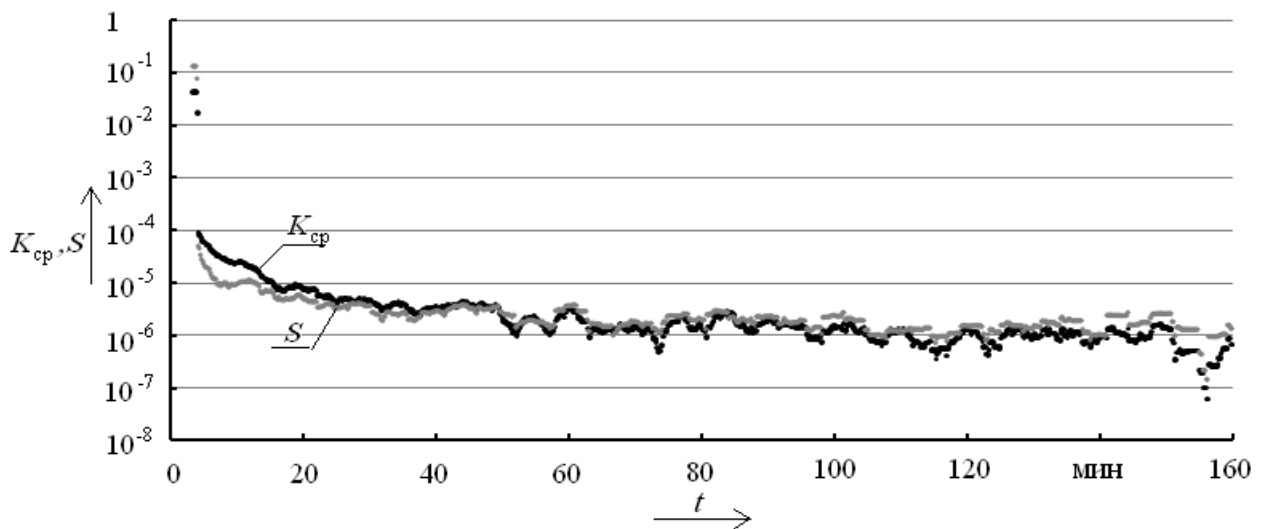


Рисунок 3.3 – Изменение средних значений и СКО параметра НИВ в процессе приработки при сравнительно лучшем качестве поверхностей трения

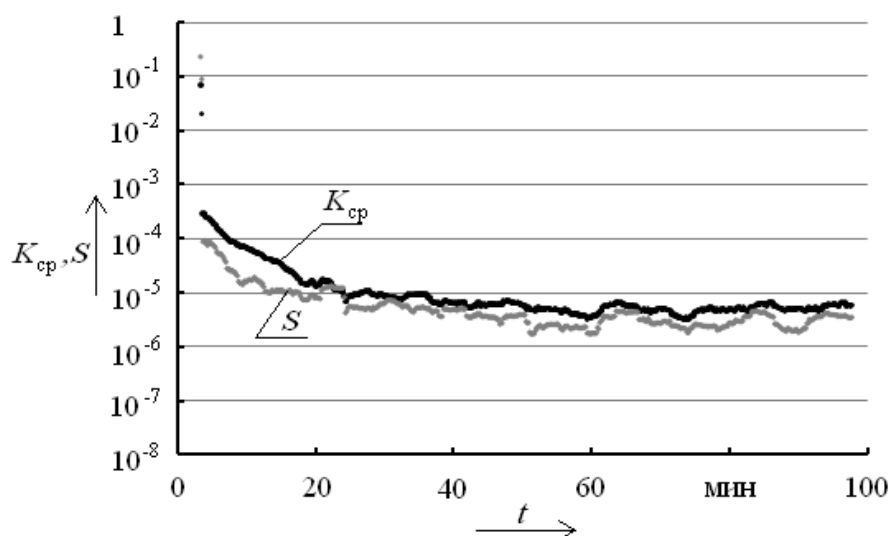


Рисунок 3.4 – Изменение средних значений и СКО параметра НИВ в процессе приработки при сравнительно худшем качестве поверхностей трения

Анализ литературы [68-71] по статистике показал, что в данном случае целесообразно использовать в качестве результатов обработки статистический показатель – коэффициент вариации:

$$n = \frac{S}{K_{cp}} \cdot 100 \% . \quad (3.3)$$

Среднеквадратическое отклонение дает абсолютную оценку меры вариации значений, и без привязки к масштабу данных этот показатель является малоэффективным. Коэффициент вариации – наиболее универсальный показатель, отражающий степень вариации значений независимо от их масштаба и единиц измерения [68-71]. Он обладает высокой чувствительностью к наличию аномальных отсчетов в массиве данных и вариабельности данных [68].

Графики изменения коэффициента вариации в процессе обкатки подшипников приведены на рисунках 3.5 и 3.6. При различных условиях фрикционного взаимодействия коэффициент вариации имеет различную динамику. При сравнительно лучшем качестве поверхностей трения и, соответственно лучших условиях фрикционного взаимодействия, как показано на рисунке 3.5, коэффициент вариации n имеет устойчивый тренд во времени на увеличение значений. При сравни-

тельно худшем качестве поверхностей трения, как видно из рисунка 3.6, тренд отсутствует.

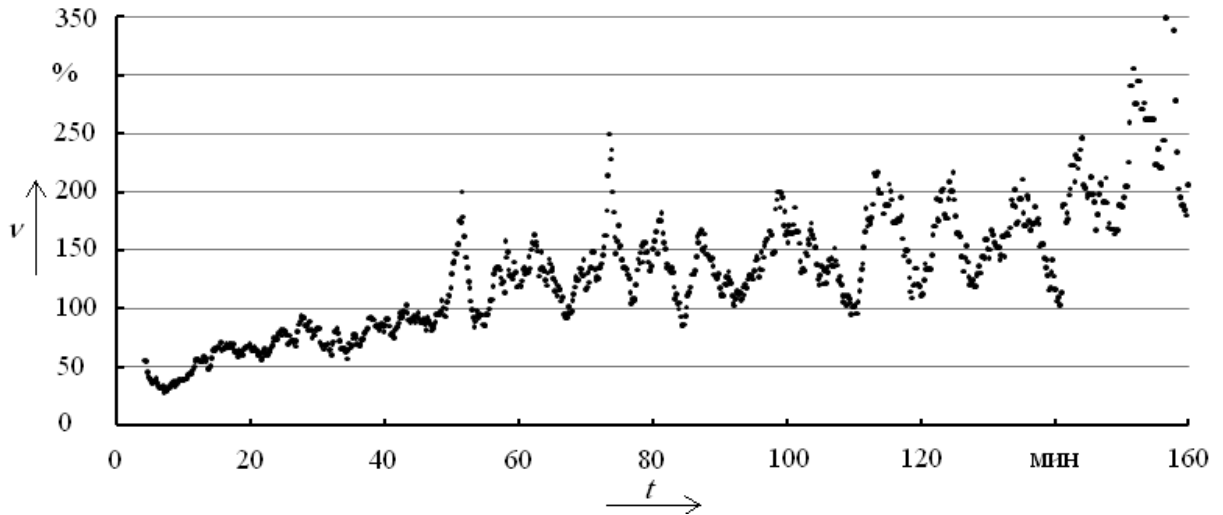


Рисунок 3.5 – Изменение коэффициента вариации параметра НИВ в процессе приработки при сравнительно лучшем качестве поверхностей трения

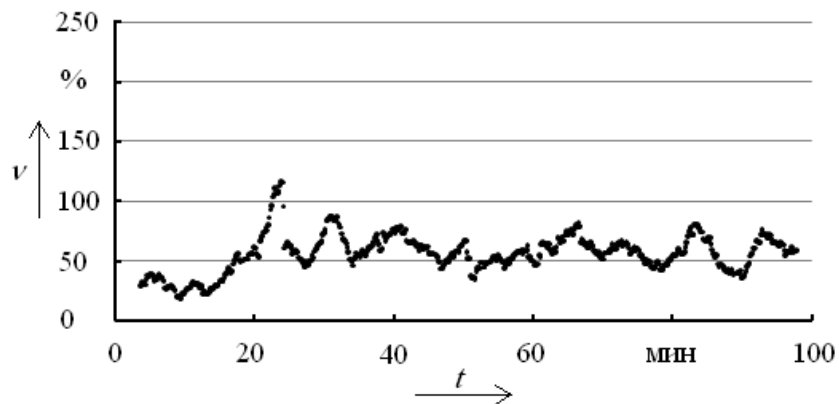


Рисунок 3.6 – Изменение коэффициента вариации параметра НИВ в процессе приработки при сравнительно худшем качестве поверхностей трения

Коэффициент вариации является чувствительным ко всем признакам в изменении значений диагностического параметра, которые признаны характерными для процессов эффективной приработки рабочих поверхностей. Он обладает хорошей чувствительностью к появлению аномальных отсчетов, увеличению вариации

бельности значений параметра НИВ. Также он чувствителен к вариабельности среднего и наличию продолжительных временных трендов.

При сравнительно худшем качестве поверхностей, как видно из рисунка 3.6, значения коэффициента вариации составляют не более 100 % (максимальное, полученное экспериментально значение для рассматриваемого типа подшипника). При сравнительно лучшем качестве поверхностей, как видно из рисунка 3.5, значения коэффициента вариации к концу приработки достигают 250-300 %. Выборки значений НИВ и коэффициента вариации НИВ с 80-той по 100-ую минуты эксперимента представлены в приложении В (таблица В.1 – значения при сравнительно лучшем качестве поверхностей трения; таблица В.2 – значения при сравнительно худшем качестве поверхностей трения).

С учетом сказанного коэффициент вариации можно признать в данном случае эффективным статистическим показателем для интерпретации результатов мониторинга.

3.1.3 Экспериментальное обоснование числового значения критерия эффективного восстановления

Как известно из практики применения параметра НИВ, для различных объектов диагностирования он может принимать самые разные значения. Например, в [49] приведены результаты диагностирования подшипников качения по параметру НИВ, которые показывают, что значения параметра могут лежать в диапазоне $10^{-8} \div 10^{-2}$. На значения параметра влияют тип подшипников, условия эксплуатации или диагностирования, вид смазочного материала. При этом даже у однотипных подшипников одного производителя при одинаковых условиях эксплуатации значения НИВ могут отличаться на несколько порядков. Для подшипников скольжения значения параметра НИВ могут быть близки к единице [72]. Поэтому для реализации функциональной диагностики какого-либо объекта по данному параметру необходима априорная информация о значениях диагностического параметра для этого объекта в определенных (рабочих) условиях эксплуатации.

Очевидно, что для реализации разрабатываемого метода трибомониторинга необходимо предварительно получить априорную информацию о значениях параметра НИВ для конкретных объектов в процессе их функционального диагностирования или для условий, в которых проводится стендовое диагностирование.

В качестве объекта для проведения исследования целесообразно принять малогабаритные подшипники качения, для которых процессы приработки (стабилизации условий фрикционного взаимодействия) занимают меньше времени. Примером таких подшипников являются подшипники типа 1000900, для которых стабилизация условий фрикционного взаимодействия может наступать уже через 5 .. 10 мин после начала приработки [73].

Методика экспериментальных исследований включает следующие действия:

1) предварительный мониторинг состояния поверхности трибосопряжения (подшипника) с использованием штатного смазочного материала:

– в чистый подшипник помещался штатный смазочный материал, в количестве, соответствующем нормальному режиму эксплуатации;

– производилась технологическая обкатка подшипника со штатным смазочным материалом (при этом режимы работы (частота вращения внутреннего кольца ω_6 , радиальная нагрузка F) соответствуют эксплуатационным) в течение заданного времени t_1 с непрерывной регистрацией значений диагностического параметра НИВ – K_1 ;

2) мониторинг состояния поверхности подшипника при добавлении к штатному смазочному материалу ремонтно-восстановительного состава:

– смешивались в соотношении 1:10 РВС и штатный смазочный материал, в количестве, соответствующем нормальному режиму эксплуатации узла трения;

– в промытый подшипник помещалась полученная смазочная композиция;

– производилась обкатка подшипника (при этом режимы работы (частота вращения кольца ω_6 , нагрузка F) соответствуют эксплуатационным) в течение

времени t_2 с непрерывным мониторингом значений диагностического параметра НИВ – K_2 ;

– полученные результаты измерения диагностического параметра K_1 и K_2 обрабатывались следующим образом: вычислялись средние значения K_{1cp} и K_{2cp} по 20-ти точкам, вычислялись среднеквадратические отклонения S_1 и S_2 по 20-ти точкам, вычислялись коэффициенты вариации v_1 и v_2 по 20-ти точкам. По результатам сравнения данных параметров с априорной информацией о характерных уровнях коэффициента вариации делались выводы об эффективности ремонтного восстановления.

Время регистрации параметра НИВ (t_1 и t_2) определяется периодом, в течение которого подшипник из режима приработки (который характеризуется значительным изменением средних значений параметра и его дисперсии) переходит в квазистационарный режим (характеризующийся незначительным изменением средних значений и постоянной дисперсией). Этот период для разных типов подшипников имеет различные значения, опытным путем установлено, что, например, для подшипников типоразмера 1000900 он составляет от 200 до 300 мин, для подшипников типоразмера 208 – 500-600 мин.

Использованное оборудование: универсальный стенд для диагностирования подшипников, обеспечивающий различные скоростные и нагрузочные режимы; [66], измеритель параметров электрического контактирования ИПЭК-1 (ТУ 4276-195-02069036-2005) [67]; персональный компьютер.

Объекты исследования: подшипники типоразмера 1000900 с естественным износом рабочих поверхностей деталей (бывшие в эксплуатации).

Частота вращения внутреннего кольца подшипника – 700 мин^{-1} ; радиальная нагрузка – 50 Н; период измерения диагностического параметра – 10 с. Смазочный материал – пластичная смазка литол-24 в объеме 1 мл; используемый РВС – смазочная композиция «Супротек» в объеме 0,1 мл.

По результатам экспериментальных исследований приведены значения параметра НИВ и его характеристик для подшипника с минимальными полученными

ми значениями коэффициента вариации (рис. 3.7 и 3.8), и для подшипника с максимальными полученными значениями коэффициента вариации (рис. 3.9 и 3.10). Для остальных подшипников, с которыми проводились экспериментальные исследования, значения коэффициента вариации лежат между минимальными и максимальными значениями.

На рисунке 3.7, *а* представлен график изменения диагностического параметра, регистрируемого во время предварительного мониторинга. Как видно из рисунка в течение первых 250-ти минут происходит приработка, затем наступает квазистационарный режим, значения диагностического параметра колеблются в интервале от 10^{-5} до 10^{-4} .

На рисунке 3.8, *а* представлен график изменения диагностического параметра, регистрируемого во время обкатки с РВС. Из рисунка видно, что в течение первых 100 мин ничего не происходит, значения диагностического параметра лежат в том же интервале, что при предварительной обкатке. Затем постепенно появляется тренд на снижение значений параметра, это объясняется тем, что для начала ремонтного восстановления требуется некоторое время. Также присутствуют и другие признаки улучшения условий фрикционного взаимодействия: появляются нулевые отсчеты, с течением времени их становится все больше. По этим признакам можно судить о присутствии процессов ремонтного восстановления.

На рисунке 3.7, *б* приведены, полученные в процессе обработки данных, графики изменения средних значений диагностического параметра (K_{1cp}), его СКО (S_1) при предварительном мониторинге. На рисунке 3.7, *в* приведен график изменения коэффициента вариации (v_1).

Если смотреть на изменение средних значений и СКО, то они в процессе предварительной обкатки уменьшаются, причем среднее уменьшается быстрее. Коэффициент вариации на момент окончания обкатки не превышает 40-50 %.

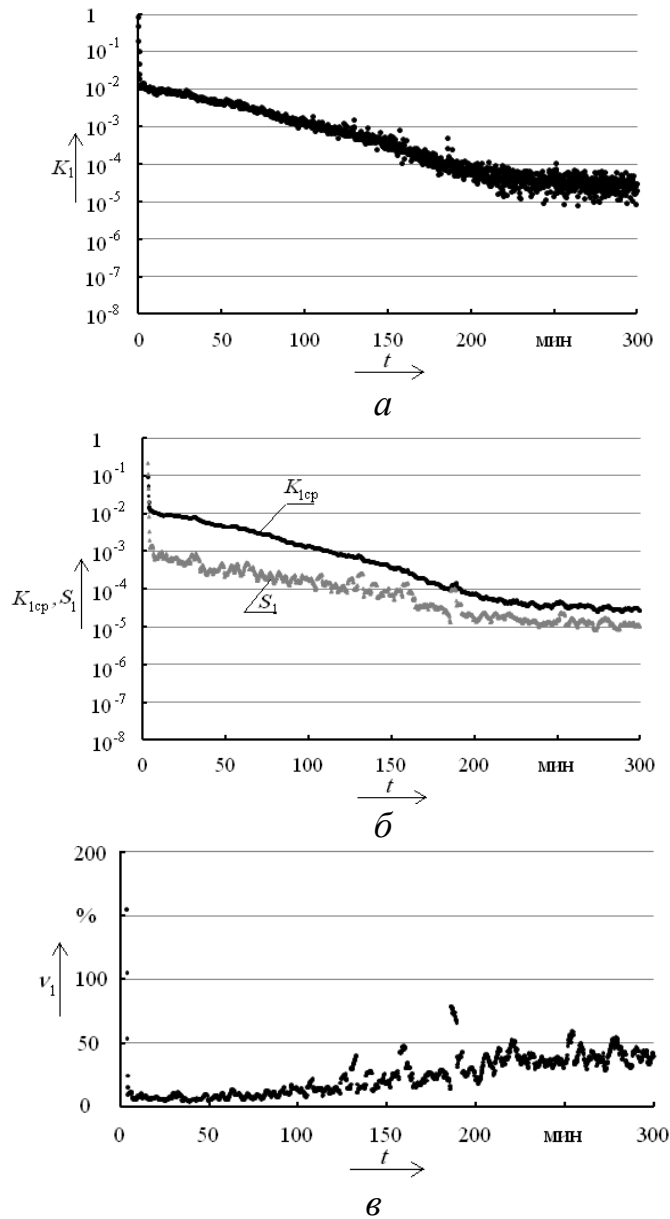


Рисунок 3.7 – Изменение значений диагностического параметра и его характеристик в процессе предварительной обкатки (a – изменение НИВ, \bar{b} – изменение средних значений и СКО, \bar{v} – изменение коэффициента вариации) (подшипник с минимальными значениями коэффициента вариации)

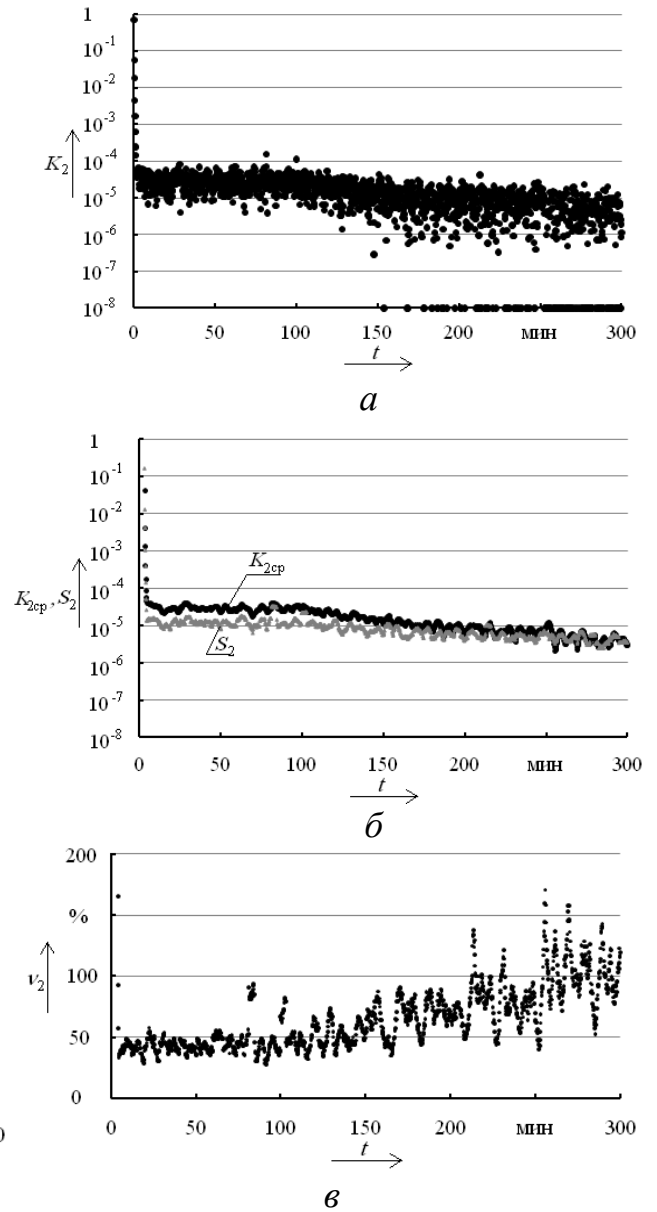


Рисунок 3.8 – Изменение значений диагностического параметра и его характеристик в процессе обкатки с РВС (a – изменение НИВ, \bar{b} – изменение средних значений и СКО, \bar{v} – изменение коэффициента вариации) (подшипник с минимальными значениями коэффициента вариации)

На рисунке 3.8, б приведены, полученные в процессе обработки данных, графики изменения средних значений диагностического параметра (K_{2cp}), его СКО (S_2) при мониторинге с РВС. На рисунке 3.8, в приведен график изменения коэффициента вариации (v_2).

Если сравнить рисунки 3.7, б и 3.8, б, то можно заметить, что в процессе предварительной обкатки среднее K_{1cp} уменьшилось на 2,5 порядка (с 10^{-2} до $0,5 \cdot 10^{-5}$), СКО S_1 уменьшилось на 2 порядка (с 10^{-3} до 10^{-5}). В процессе обкатки с РВС среднее K_{2cp} уменьшилось на порядок (с $0,5 \cdot 10^{-5}$ до $0,5 \cdot 10^{-6}$), СКО S_2 уменьшилось на половину порядка. Из этого можно сделать вывод, что эти статистические оценки, как и изложено в пункте 3.1.2, слабо чувствительны к процессам ремонтного восстановления.

Коэффициент вариации в данном случае – гораздо более чувствительный показатель. В процессе ремонтного восстановления значения коэффициента вариации возрастают от 50 % до 150 %. Выборки значений НИВ и коэффициента вариации НИВ с 280-той по 300-ую минуты эксперимента представлены в приложении Г (таблица Г.1 – значения, полученные в процессе предварительной обкатки; таблица Г.2 – значения, полученные в процессе обкатки с РВС).

Таким образом, при обкатке со штатным смазочным материалом после стабилизации значений диагностического параметра коэффициент вариации не превышает 50 %. В то время как обкатка с РВС дает увеличение значений коэффициента вариации до 150 %.

На рисунках 3.9 и 3.10 приведены графики изменения числовых значений диагностического параметра и его статистических характеристик в процессе предварительной обкатки и обкатки с РВС подшипника 1000900 с максимальными значениями коэффициента вариации. Из рисунка 3.10, а видно, что процесс обкатки с РВС характеризуется появлением нулевых отсчетов, увеличением вариабельности значений параметра. Рисунки 3.9, б и 3.10, б показывают, что как в экспериментах с РВС, так и без него, средние значение и СКО НИВ снижаются на 1-2 порядка.

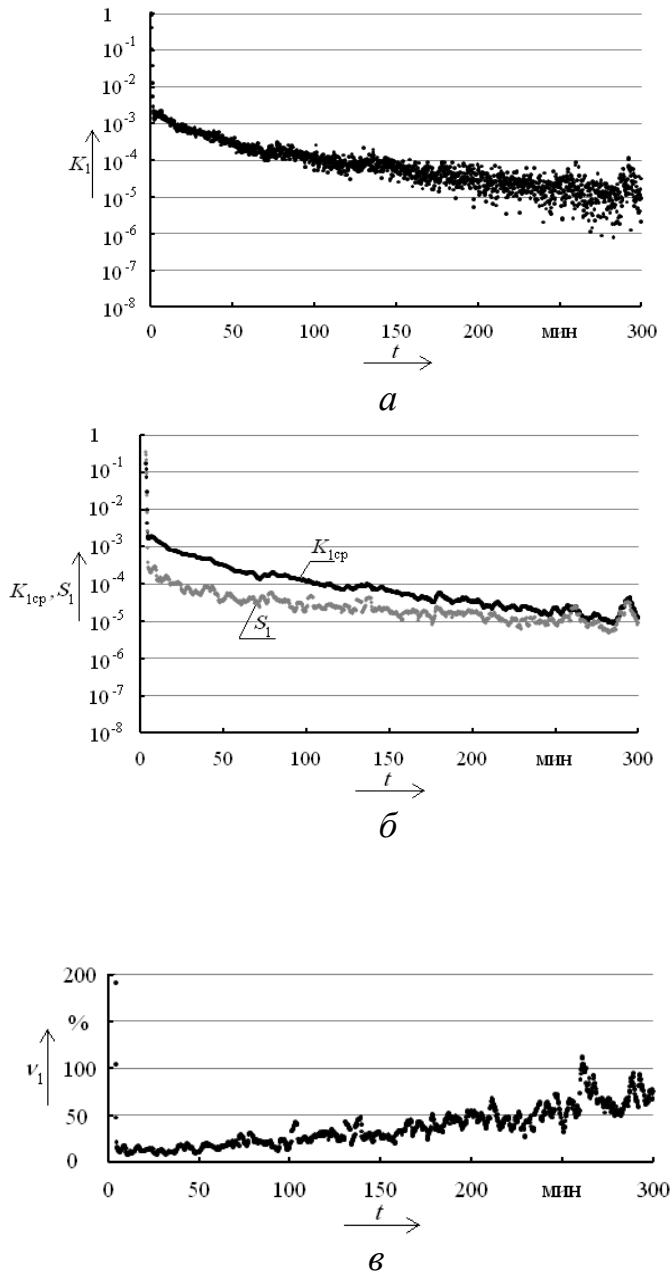


Рисунок 3.9 – Изменение значений диагностического параметра и его характеристик в процессе предварительной обкатки (a – изменение НИВ, $б$ – изменение средних значений и СКО, $в$ – изменение коэффициента вариации) (подшипник 1000900 с максимальными значениями коэффициента вариации)

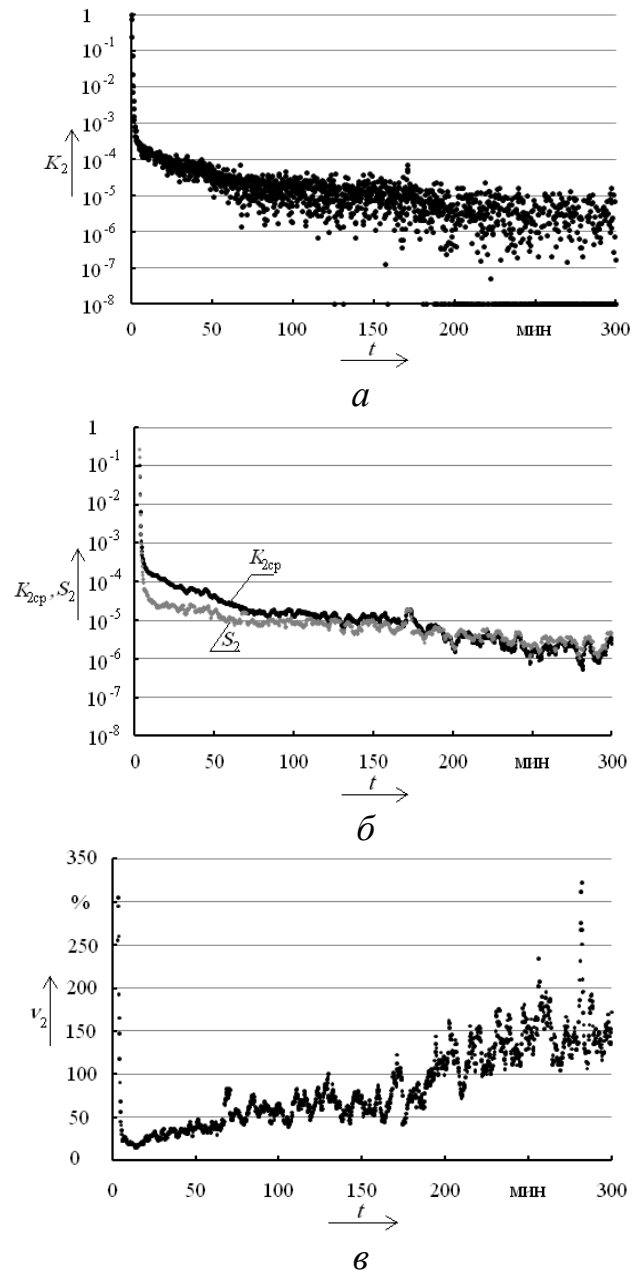


Рисунок 3.10 – Изменение значений диагностического параметра и его характеристик в процессе обкатки с РВС (a – изменение НИВ, $б$ – изменение средних значений и СКО, $в$ – изменение коэффициента вариации) (подшипник 1000900 с максимальными значениями коэффициента вариации)

Рисунки 3.9, в и 3.10, в подтверждают, что коэффициент вариации более чувствителен к появлению процессов ремонтного восстановления. На момент окончания предварительной обкатки его значения не превышают 100 %. После проведения ремонтного восстановления коэффициент вариации составляет 200-300 %.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили установить числовые значения критерия эффективного восстановления (наличия ремонтного восстановления) для подшипников типоразмера 1000900. Если коэффициент вариации в процессе обкатки не превышает 100 %, можно говорить об отсутствии процессов ремонтного восстановления. Если в процессе обкатки коэффициент вариации достигает уровня в 100 % и более, это говорит о наличии эффективного восстановления.

3.2 Описание предлагаемого метода трибомониторинга

3.2.1 Физический принцип трибомониторинга процессов ремонтного восстановления деталей узлов трения по параметру «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования»

Под физическим принципом понимается явление или совокупность физических явлений, положенных в основу метода.

Основные предпосылки, на основании которых был предложен физический принцип, изложены в разделе 1. В разделе 2 приведены теоретические исследования, подтверждающие возможность использования предложенного физического принципа и диагностического признака для разработки метода трибомониторинга процессов ремонтного восстановления деталей узлов трения.

Физический принцип состоит в следующем: при фрикционном взаимодействии трущихся поверхностей в результате функционирования геомодификатора происходит модифицирование поверхностей с изменением параметров микрогеометрии и повышением прочности граничного слоя компонентов смазочной ком-

позиции, что приводит к уменьшению вероятности электрического микроконтактирования в зоне трения.

3.2.2 Последовательность операций трибомониторинга процессов ремонтного восстановления деталей узлов трения

Последовательность операций трибомониторинга процессов ремонтного восстановления деталей узлов трения предусматривает следующие действия:

- получение априорной информации;
- приработка подшипника (частота вращения кольца (колец) соответствует эксплуатационной) с непрерывной регистрацией значений диагностического параметра НИВ. Приработка осуществляется до наступления квазистационарного режима с учетом априорной информации о времени приработки для конкретного объекта;
- обработка результатов измерения параметра НИВ для определения статистических оценок – среднего арифметического, среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации;
- принятие решения об эффективности ремонтного восстановления по результатам анализа значения коэффициента вариации с использованием априорной статистической информации, полученной для конкретного объекта диагностирования.

3.2.3 Методика стендового и функционального трибомониторинга восстановления рабочих поверхностей подшипников качения ремонтно-восстановительными составами

Данная методика основана на описанных в пункте 3.1.3 экспериментальных исследованиях. Она ориентирована на подшипники качения в условиях стендового ремонтного восстановления, а также на ремонтное восстановление в условиях функционального диагностирования.

Методика представлена в приложении Д и содержит следующие разделы:

- диагностический параметр для трибомониторинга;
- условия проведения трибомониторинга;

- оборудование для трибомониторинга;
- подготовка к трибомониторингу;
- предварительный трибомониторинг состояния поверхности подшипника с использованием стандартного смазочного материала;
- трибомониторинг состояния поверхности подшипника с добавлением к стандартному смазочному материалу ремонтно-восстановительного состава;
- требования к представлению результатов трибомониторинга.

3.3 Выводы

1 Проведенный качественный анализ временных диаграмм приработки подшипников выявил характерные признаки в изменении значений диагностического параметра, по которым можно судить об улучшении условий фрикционного взаимодействия в целом:

- наличие более продолжительного временного тренда в сторону снижения средних значений параметра;
- появление аномальных (нулевых) отсчетов, а также увеличение со временем числа таких отсчетов;
- заметное увеличение вариабельности значений параметра в процессе уменьшения средних значений.

2 Анализ статистических оценок диагностического параметра НИВ показал, что использовать для интерпретации результатов мониторинга среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонение НИВ трудно из-за большого динамического диапазона параметра. При различном качестве поверхностей трения значения указанных оценок могут отличаться менее, чем на один порядок. В данном случае целесообразно использовать статистический показатель – коэффициент вариации. Он является чувствительным ко всем признакам в изменении значений диагностического параметра, которые признаны характерными для процессов эффективной приработки рабочих поверхностей. Результаты эксперименталь-

ных исследований также подтвердили высокую чувствительность данного параметра и возможность использования его для интерпретации результатов мониторинга.

3 Проведенные экспериментальные исследования ремонтного восстановления подшипников позволили установить числовое значение коэффициента вариации НИВ (более 100 %), являющееся критерием эффективного восстановления для подшипников типоразмера 1000900.

4 Разработанная методика обеспечивает возможность реализации предложенного принципа мониторинга процессов ремонтного восстановления деталей узлов трения по изменению вероятности электрического микроконтактирования в подшипнике вследствие изменения параметров микрогеометрии и повышения прочности граничного слоя компонентов смазочного материала, оцениваемой по электрическому параметру НИВ.

5 Разработанная методика обеспечивает возможность давать заключение об эффективности ремонтного восстановления по результатам анализа значения коэффициента вариации с использованием априорной статистической информации, полученной для конкретного объекта диагностирования.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ МЕТОДА И АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

4.1 Задачи экспериментальных исследований

В соответствии с предложенным физическим принципом требуют доказательства следующие положения:

- чувствительность метода к изменению микрогеометрии рабочих поверхностей;
- чувствительность метода к изменению условий формирования граничных слоев смазочных композиций (смазывающей способности).

Последний тезис доказан в первом разделе, где рассмотрены результаты эксперимента по установлению связи значений диагностического параметра со смазывающей способностью материалов.

Таким образом, основной целью раздела 4 являлось подтверждение того, что при наличии РВС в смазочном материале улучшается микрогеометрия поверхностей трения и увеличивается несущая способность смазочного слоя, а также доказательство чувствительности НИВ к указанным процессам.

Это было сделано с помощью экспериментальных исследований с использованием алгоритма поиска локальных дефектов и с применением образцового метода, основанного на стандартном методе трибометрии.

4.2 Экспериментальное доказательство эффективности разработанного метода и чувствительности диагностического параметра к процессам ремонтного восстановления с использованием алгоритма поиска локальных дефектов

Для экспериментального доказательства использовался алгоритм поиска локальных дефектов, подробно описанный в [50, 74]. Он заключается в том, что дефект поверхности трения вызывает увеличение значений НИВ. Поскольку вероятность электрического микроконтактирования в подшипнике – вероятность события, заключающегося в том, что хотя бы одно тело качения одновременно контактирует с обоими кольцами, значения параметра НИВ определяются теми участками поверхности трения, которые попадут за время его измерения в зону нагружения. Таким образом, размер зоны контроля совпадает с размером зоны нагружения. При радиальной нагрузке зона нагружения представляет собой угловой сектор, симметричный линии действия нагрузки.

Для проверки всех участков поверхностей трения на наличие дефектов необходимо перемещать зону контроля по этим поверхностям. Поскольку в данном случае использовался алгоритм непрерывного сканирования [50], для перемещения зоны контроля вектор радиальной нагрузки вращался относительно контролируемого кольца. В данном эксперименте контролируемое кольцо – наружное кольцо подшипника типоразмера 208 с естественным износом. Для реализации сканирования внутреннее кольцо подшипника вращалось с частотой 2700 мин^{-1} , наружное, к которому приложена радиальная нагрузка, вращалось с частотой 4 мин^{-1} . Измерение диагностического параметра проводилось непрерывно с периодом 1 с.

Результат измерения НИВ при реализации этого алгоритма содержит две составляющие: фоновую – комплексно оценивающую качество всех поверхностей трения, и переменную – оценивающую качество участка поверхности, попадаю-

щего в зону контроля. При попадании дефекта в зону контроля наблюдается характерный всплеск НИВ [50].

Сканирование проводилось периодически в процессе обкатки со штатным смазочным материалом – литол-24, и в процессе обкатки с добавлением РВС в соотношении 1:10. Радиальная нагрузка – 200 Н.

Использованное оборудование: универсальный стенд для диагностирования подшипников, обеспечивающий различные скоростные и нагрузочные режимы [66]; измеритель параметров электрического контактирования ИПЭК-1 (ТУ 4276-195-02069036-2005) [67]; персональный компьютер. Оборудование подробно описано в приложении А.

На рисунке 4.1 приведены результаты сканирования в процессе обкатки с литол-24. На графике максимальным значениям диагностического параметра соответствуют участки наружного кольца с наихудшим качеством рабочей поверхности, минимальным значениям НИВ – участки с наилучшим качеством рабочей поверхности. Как видно из рисунка 4.1, участки, которые изначально характеризовались лучшим качеством, подверглись приработке, в результате чего уровень диагностического параметра для этих участков снизился более, чем на два порядка (уровень параметра 10^{-7} – минимально возможный при длительности измерения 1 с). Для участков рабочей поверхности, обладающих худшим качеством, обкатка в течение 3 ч не дала подобных результатов: пиковое значение параметра (для представленных фрагментов) снизилось от $1,98 \cdot 10^{-3}$ до $1,19 \cdot 10^{-3}$, то есть незначительно.

По результатам сканирования можно сделать вывод, что на поверхности имеются участки с лучшим качеством, для которых в процессе обкатки прошла приработка, им соответствуют минимальные (10^{-7}) значения диагностического параметра, и они не требуют ремонтного восстановления. Для участков с худшим качеством (всплески НИВ) требуется ремонтное восстановление. Выполненный после промывки подшипника визуальный осмотр подтвердил наличие участков со следами изнашивания.

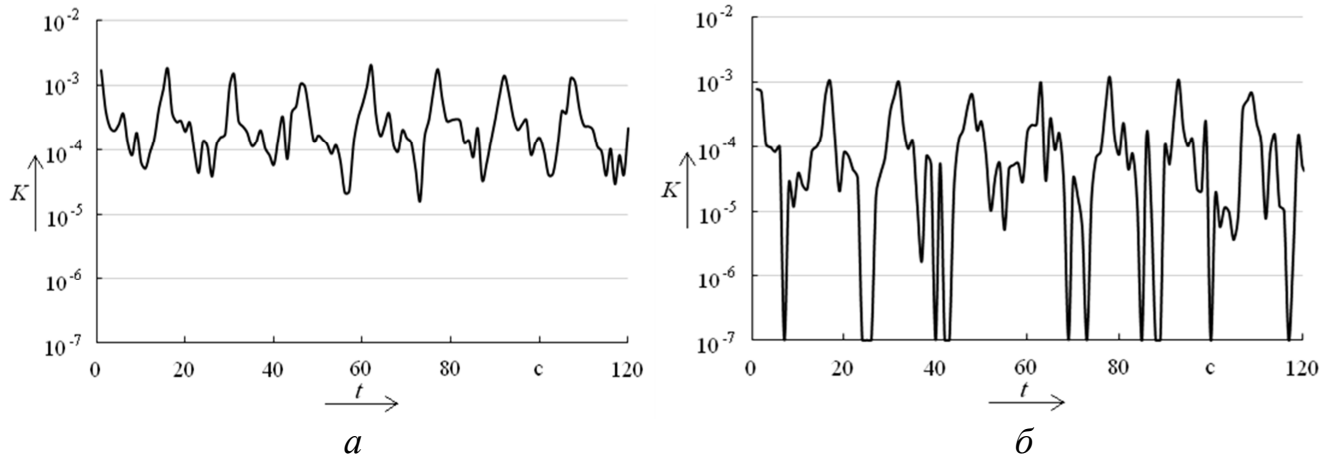


Рисунок 4.1 – Результаты сканирования наружного кольца подшипника типоразмера 208 после обкатки с литол-24: *а* – продолжительность обкатки на момент сканирования – 1 ч; *б* – продолжительность обкатки на момент сканирования – 3 ч

На рисунке 4.2 приведены результаты сканирования в процессе обкатки с РВС. Как видно из рисунка, улучшение качества поверхности происходит постепенно. Пиковые значения диагностического параметра составляли: после 3 ч обкатки с РВС – $1,14 \cdot 10^{-3}$; после 6 ч обкатки с РВС – $4,87 \cdot 10^{-4}$; после 9 ч обкатки с РВС – $1,8 \cdot 10^{-4}$; после 12 ч обкатки с РВС – $5,71 \cdot 10^{-5}$.

По результатам сканирования видно, что даже для участков, изначально характеризующихся худшим качеством, значения диагностического параметра снизились практически на 2 порядка. Это говорит об уменьшении размеров локальных дефектов и о ремонтном восстановлении поверхностей трения. Таким образом, эксперименты со сканированием поверхности наружного кольца подшипника подтвердили улучшение микрогеометрии поверхностей трения и увеличение несущей способности смазочного слоя при наличии в смазочном материале РВС.

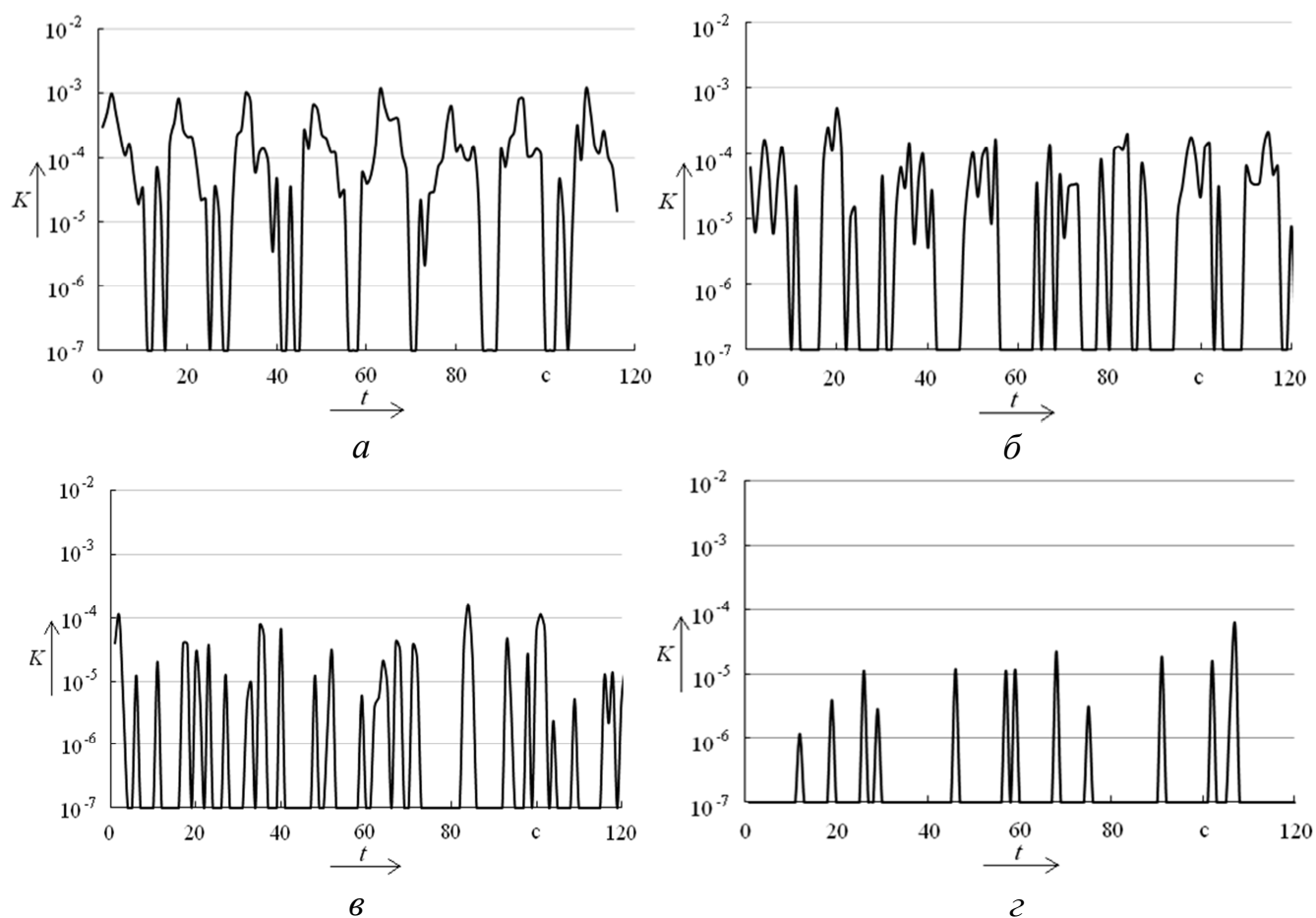


Рисунок 4.2 – Результаты сканирования наружного кольца подшипника типоразмера 208 после обкатки с РВС: *a* – продолжительность обкатки на момент сканирования – 3 ч; *б* – продолжительность обкатки на момент сканирования – 6 ч; *в* – продолжительность обкатки на момент сканирования – 9 ч; *г* – продолжительность обкатки на момент сканирования – 12 ч

4.2 Применение образцового метода, основанного на стандартном методе трибометрии для подтверждения эффективности разработанного метода и чувствительности диагностического параметра к процессам ремонтного восстановления

Улучшение микрогеометрии поверхностей трения при наличии в смазочном материале РВС также было подтверждено в результате экспериментальных исследований с применением образцового метода. Он заключался в измерении па-

раметра шероховатости Ra поверхности внутреннего кольца подшипника после обкатки со стандартным смазочным материалом и после обкатки с РВС. Затем проводилось сравнение результатов оценки качества поверхностей трения, полученных с помощью разработанного метода и с помощью образцового метода.

Для эксперимента был выбран подшипник типоразмера 208. Для возможности измерения шероховатости был изготовлен специальный разборный сепаратор, позволивший при необходимости разбирать и собирать подшипник. Выбор типоразмера подшипника обусловлен тем, что технологически проще изготовить разборный сепаратор. Фотография разобранного подшипника и детали сепаратора приведены на рисунке 4.3. Качество поверхности внутреннего кольца подшипника предварительно было искусственно ухудшено методом травления. В результате этого на поверхности качения образовались участки (раковины), качество которых было значительно хуже качества остальной поверхности.



Рисунок 4.3– Фотография разобранного подшипника

Методика экспериментальных исследований включала в себя следующие действия:

1) предварительный мониторинг состояния поверхности подшипника при использовании штатного смазочного материала с помощью диагностического параметра НИВ:

- в чистый подшипник помещался штатный смазочный материал, в количестве, соответствующем нормальному режиму эксплуатации;

- производилась технологическая обкатка подшипника со штатным смазочным материалом (при этом режимы работы (частота вращения внутреннего кольца ω_6 , радиальная нагрузка F) соответствовали эксплуатационным) в течение заданного времени t_1 с непрерывной регистрацией значений диагностического параметра НИВ – K_1 ;

2) измерение параметра шероховатости поверхности после обкатки со стандартным смазочным материалом:

- подшипник промывался, производилась его разборка;
- измерялись параметры шероховатости поверхности внутреннего кольца на участках с худшим качеством (раковинах, полученных в результате травления), и на участках с обычным качеством;

3) мониторинг состояния поверхности подшипника при добавлении к штатному смазочному материалу ремонтно-восстановительного состава с помощью диагностического параметра НИВ:

- производилась сборка подшипника;
- смешивались в соотношении 1:10 РВС и штатный смазочный материал, в количестве, соответствующем нормальному режиму эксплуатации узла трения;
- в промытый подшипник помещалась полученная смазочная композиция;
- производилась обкатка подшипника (при этом режимы работы (частота вращения кольца ω_6 , нагрузка F) соответствовали эксплуатационным) в течение времени t_2 с непрерывным мониторингом значений диагностического параметра НИВ – K_2 ;

4) измерение параметра шероховатости поверхности после обкатки с РВС:

- подшипник промывался, производилась его разборка;
- измерялись параметры шероховатости поверхности внутреннего кольца на участках с худшим качеством (раковинах, полученных в результате травления), и на участках с обычным качеством;

5) обработка результатов измерения НИВ:

– полученные результаты измерения диагностического параметра K_1 и K_2 обрабатывались следующим образом: вычислялись средние значения K_{1cp} и K_{2cp} по 20-ти точкам, вычислялись среднеквадратические отклонения S_1 и S_2 по 20-ти точкам, вычислялись коэффициенты вариации v_1 и v_2 по 20-ти точкам.

б) сравнение результатов оценки качества поверхностей трения, полученных с помощью параметра НИВ и с помощью образцового метода.

Время регистрации параметра НИВ (t_1 и t_2) определяется периодом, в течение которого подшипник из режима приработки (который характеризуется значительным изменением средних значений параметра и его дисперсии) переходит в квазистационарный режим (характеризующийся незначительным изменением средних значений и постоянной дисперсией). Этот период для разных типов подшипников имеет различные значения, для подшипников типоразмера 208 он составляет 500-600 мин.

Объект исследования: подшипник 208 с естественным износом рабочих поверхностей деталей (бывший в эксплуатации) и с искусственно ухудшенным состоянием рабочей поверхности внутреннего кольца (метод травления, обеспечивающий имитацию следов коррозии).

Использованное оборудование: универсальный стенд для диагностирования подшипников, обеспечивающий различные скоростные и нагрузочные режимы; [66], измеритель параметров электрического контактирования ИПЭК-1 (ТУ 4276-195-02069036-2005) [67]; персональный компьютер; профилограф-профилометр АБРИС-ПМ7.2 [75].

Частота вращения внутреннего кольца подшипника – 500 мин^{-1} ; радиальная нагрузка – 200 Н; период измерения диагностического параметра – 10 с. Смазочный материал – пластичная смазка литол-24 в объеме 3 мл; используемый РВС – смазочная композиция «Супротек» в объеме 0,3 мл.

Обкатка с литол-24 и с РВС проводилась по 12 ч. При сравнении результатов, полученных с помощью разработанного метода, с результатами образцового

метода наибольший интерес представляют значения диагностического параметра НИВ, полученные в конце обкатки. На рисунке 4.4, *а* показан график изменения диагностического параметра в конце обкатки с литол-24. Как видно из рисунка, значения НИВ колеблются в интервале от 10^{-6} до 10^{-4} .

На рисунке 4.4, *б* приведены, полученные в процессе обработки данных, графики изменения средних значений диагностического параметра (K_{1cp}), его СКО (S_1) в конце предварительного мониторинга. На рисунке 4.4, *в* приведен график изменения коэффициента вариации (v_1). Коэффициент вариации на момент окончания обкатки составляет 50-100 %.

При измерении параметров шероховатости после обкатки с литол-24 получены следующие результаты: шероховатость чистой поверхности (не имеющей искусственных дефектов) составила $Ra_1=0,20$ мкм; шероховатость искусственно ухудшенной поверхности составила $Ra_2=0,51$ мкм, т.е. $Ra_2 \cong 2,5 \cdot Ra_1$.

На рисунке 4.5, *а* показан график изменения диагностического параметра в конце обкатки с РВС. Как видно из рисунка, значения НИВ колеблются в интервале от 10^{-8} до 10^{-5} . Также присутствуют признаки эффективного ремонтного восстановления: большое количество нулевых отсчетов, вариабельность значений.

На рисунке 4.5, *б* приведены, полученные в процессе обработки данных, графики изменения средних значений диагностического параметра (K_{2cp}), его СКО (S_2) в конце мониторинга с РВС. На рисунке 4.5, *в* приведен график изменения коэффициента вариации (v_2). К концу обкатки с РВС коэффициент вариации составляет от 150 % до 250 %. Выборки значений НИВ и коэффициента вариации НИВ с 700-той по 720-ую минуты эксперимента представлены в приложении Е (таблица Е.1 – значения, полученные в процессе предварительной обкатки; таблица Е.2 – значения, полученные в процессе обкатки с РВС).

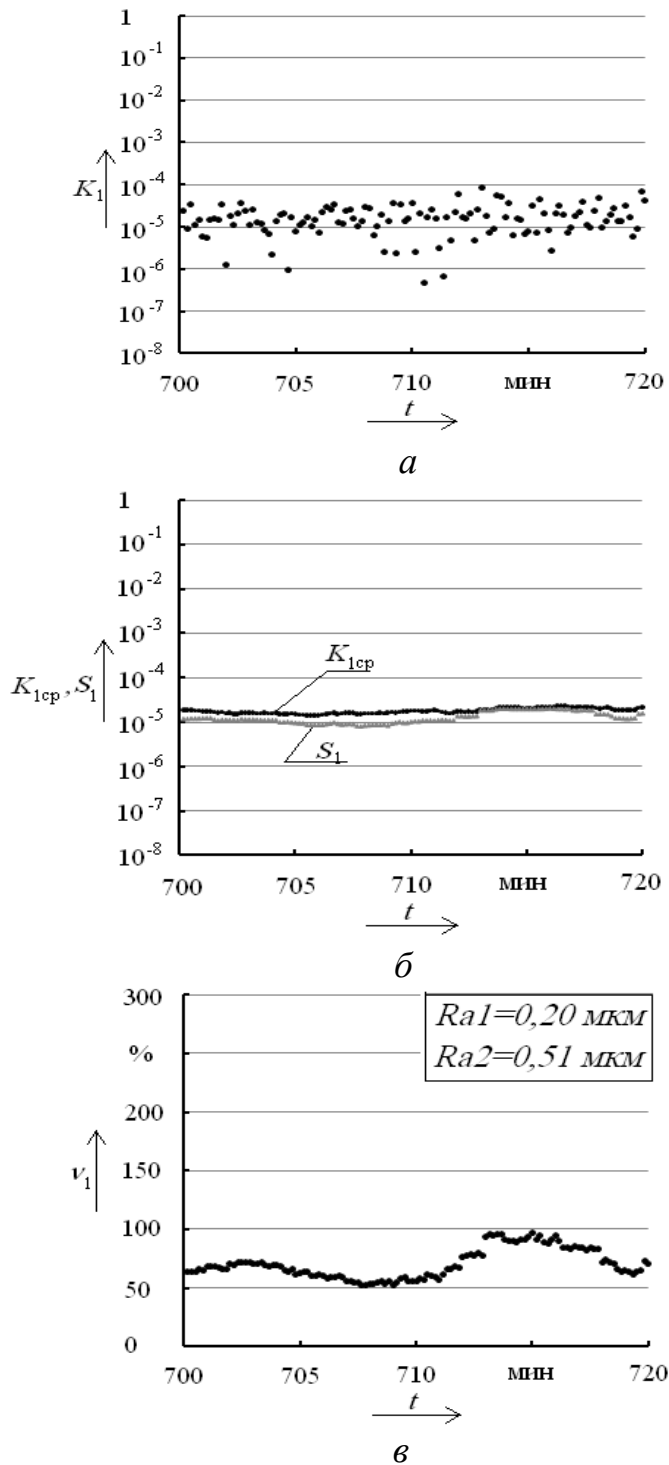


Рисунок 4.4 – Изменение значений параметра НИВ и его характеристик в процессе обкатки с литол-24 (*a* – изменение НИВ, *б* – изменение средних значений и СКО, *в* – изменение коэффициента вариации)

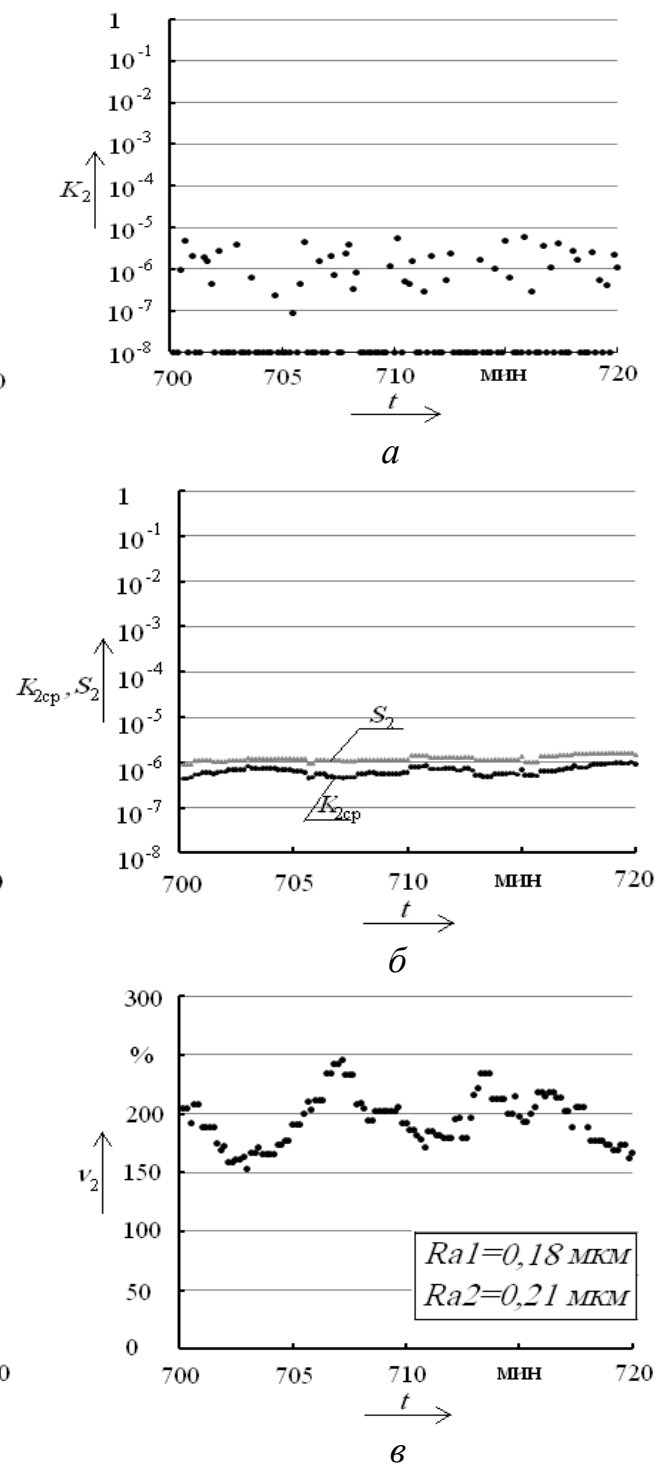


Рисунок 4.5 – Изменение значений параметра НИВ и его характеристик в процессе обкатки с РВС (*a* – изменение НИВ, *б* – изменение средних значений и СКО, *в* – изменение коэффициента вариации)

Результаты измерения параметров шероховатости после применения РВС следующие: шероховатость чистой поверхности (не имеющей искусственных дефектов) составила $Ra_1=0,18$ мкм; шероховатость искусственно ухудшенной поверхности составила $Ra_2=0,21$ мкм, т.е. $Ra_2 \cong 1,1 \cdot Ra_1$.

Таким образом, применение образцового метода подтвердило улучшение микрогеометрии поверхностей трения при наличии в смазочном материале РВС. При этом большим средним значениям НИВ и меньшему коэффициенту вариации соответствует худшая шероховатость поверхности. Меньшим средним значениям НИВ и большему коэффициенту вариации соответствует лучшая шероховатость поверхности, что подтверждает эффективность разработанного метода.

4.3 Метрологический анализ метода

В [49] представлен анализ точности и надежности оценки вероятности электрического микроконтактирования в подшипнике по параметру НИВ. Согласно данному источнику, относительную погрешность оценки вероятности микроконтактирования можно найти из выражения:

$$\delta_K = t_\alpha \sqrt{\frac{1-K}{K \cdot N_3}}, \quad (4.1)$$

где t_α – функция доверительной вероятности α , с которой находится относительная погрешность;

N_3 – общее число опытов.

$$N_3 = \frac{T_{II}}{T_3}, \quad (4.2)$$

где T_{II} – период измерения НИВ;

T_3 – период импульсов заполнения (конструктивный параметр измерительного устройства).

Тогда абсолютную погрешность оценки вероятности микроконтактирования можно определить как:

$$\Delta K = K \cdot t_{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{1-K}{K \cdot N_3}}. \quad (4.3)$$

На рисунках 4.6 и 4.7 приведены зависимости среднего квадратического отклонения НИВ от средних значений параметра, полученные при экспериментальных исследованиях ремонтного восстановления подшипников типоразмера 1000900, подробно описанных в пункте 3.1.3. На рисунке 4.6 – данные, полученные в процессе предварительной обкатки, на рисунке 4.7 – данные, полученные в процессе обкатки с РВС. Для сравнения на рисунках также приведен график зависимости погрешности ΔK от значений параметра K , построенный по выражению (4.3) для доверительной вероятности $\alpha=0,95$, $t_{\alpha} = 1,96$, период импульсов заполнения ИПЭК-1 составляет $T_3 = 10^{-7}$ с, $T_{II} = 10$ с.

Как видно из рисунков 4.6 и 4.7, рассеивание экспериментальных точек превышает методическую погрешность оценки вероятности электрического микроконтактирования на порядок, что позволяет сделать вывод о несущественном вкладе погрешности в исследуемый процесс.

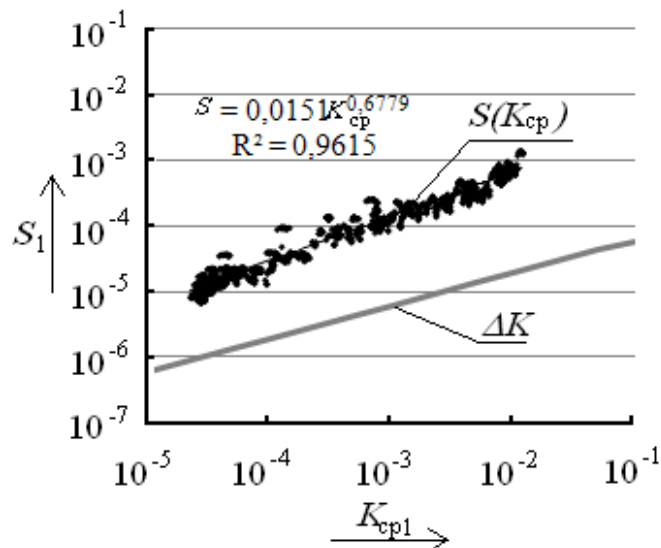


Рисунок 4.6 – График зависимости методической погрешности измерения НИВ и рассеивания экспериментальных точек в процессе обкатки с литол-24

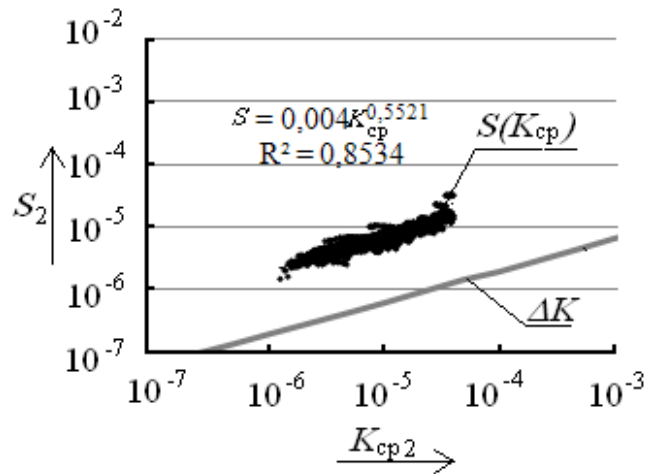


Рисунок 4.7 – График зависимости методической погрешности измерения НИВ и рассеивания экспериментальных точек в процессе обкатки с РВС

4.4 Выводы

1 Проведенные экспериментальные исследования с использованием алгоритма поиска локальных дефектов подтвердили улучшение микрогеометрии поверхностей трения и увеличение несущей способности смазочного слоя при наличии в смазочном материале РВС. Полученные графики изменения значений диагностического параметра указывают на уменьшение размеров локальных дефектов.

2 Экспериментальные исследования с использованием образцового метода (измерение шероховатости) также подтвердили улучшение микрогеометрии поверхностей трения при наличии в смазочном материале РВС.

3 Выполненный метрологический анализ разработанного метода показал, что рассеивание экспериментальных точек превышает методическую погрешность оценки вероятности электрического микроконтактирования на порядок. Таким образом, погрешность вносит несущественный вклад в исследуемый процесс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Применяемые в настоящее время методы исследования процессов на поверхностях трения, протекающих при наличии в смазочном материале геомодификаторов трения (в частности, серпентинов), трудоемки, требуют ремонтных простоев оборудования, наличия дорогостоящих технических средств, что не обеспечивает возможности их широкого внедрения в промышленности. Отсутствие эффективных методов трибомониторинга ремонтного безразборного восстановления узлов трения сдерживает внедрение прогрессивных технологий ремонта, что указывает на актуальность разработки таких методов.

2 Предложен физический принцип трибомониторинга процессов ремонтного восстановления, основанный на влиянии модифицированных слоев на вероятность электрического микроконтактирования в зоне трения трибосопряжения, оцениваемую по диагностическому параметру «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования». Установленная зависимость диагностического признака от смазывающей способности смазочных композиций подтверждает эффективность его использования при трибомониторинге процессов ремонтного восстановления.

3 Усовершенствована математическая модель диагностического признака «вероятность электрического микроконтактирования в зоне трения» с целью учета наличия модифицированных слоев на рабочих поверхностях пар трения, изменения шероховатости и смазывающей способности смазочного слоя, что обеспечивает возможность описания характера влияния процессов ремонтного восстановления поверхностей на диагностический признак.

4 Теоретические исследования, проведенные с помощью разработанной модели, подтвердили возможность использования описанного физического принципа, поскольку предложенный для трибомониторинга диагностический признак является чувствительным как к изменению микрогеометрии поверхностей трения,

так и к изменению условий смазывания при образовании защитного слоя компонентов смазочного материала на модифицированной поверхности.

5 Разработан электрический метод трибомониторинга процессов ремонтного восстановления деталей узлов трения по параметру «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования», включающий оригинальный физический принцип, математический аппарат и последовательность действий при реализации метода. Достоинством метода является применение в качестве критерия результатов трибомониторинга простой статистической характеристики – коэффициента вариации нормированного интегрального времени электрического микроконтактирования и простейших методов статистической обработки, не требующих специального программного обеспечения и высококвалифицированного персонала.

6 Экспериментальные исследования с применением образцовых методов подтвердили чувствительность диагностического параметра «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования» и его коэффициента вариации к качеству процессов ремонтного восстановления, а также достоверность теоретических положений разработанного метода.

7 С применением разработанной методики трибомониторинга на примере подшипников типа 1000900 установлено числовое значение коэффициента вариации параметра «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования» (более 100 %), характерное для процессов эффективного ремонтного восстановления.

Список использованных источников

1 Мельников, В.Г. Влияние геомодификаторов, полученных различными методами, на свойства смазочных композиций [Текст] / В.Г. Мельников, В.В. Терентьев, В.П. Зарубин // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2007. – № 9. – С. 25-29.

2 Андреева, О.Г. Пути повышения долговечности узлов трения приборов [Текст] / О.Г. Андреева, Н.А. Романова, И.А. Буяновский // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 1. – С. 23-27.

3 Кулаков, В.А. О механизме смазочного действия силикатного смазочного материала, модифицированного медью [Текст] / В.А. Кулаков // Тяжелое машиностроение. – 2002. – № 11. – С. 26-29.

4 Макаренков, А.М. Применение в триботехнике геомодификаторов трения и перспективы развития этого направления [Текст] / А.М. Макаренков // Принципы и процессы создания неорганических материалов: Международный симпозиум (3 Самсоновские чтения), Хабаровск, 15 апр. 2006: Материалы симпозиума. Хабаровск: ТОГУ, 2006. – С. 58-59.

5 Сушко, В.Ю. Разработка и испытание противоизносных ремонтно-восстановительных составов [Текст] / В.Ю. Сушко, А.А. Соколов, В.В. Штепа, В.Ц. Арутюнов // Цветные металлы. – 2007. – № 7. – С. 109-111.

6 Волков, В.Г. Использование высокодисперсных природных гидросиликатов для модифицирования трущихся поверхностей [Текст] / В.Г. Волков, К.А. Павлов, Н.Н. Лознецова, Ю.П. Топоров, В.А. Ключев // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2006. – № 12. – С. 3-5.

7 Бикмухаметов, Т.Ф. Микроструктурные исследования гильзы цилиндра, обработанной по нанотехнологии «РВС» [Текст] / Т.Ф. Бикмухаметов, А.В. Сисанбаев // Химическая физика и мезоскопия. – 2008. – Т. 10. – № 2. – С. 170-173.

8 Попов, В.П. Противоизносный и антифрикционный ОТК-состав к смазочным материалам на основе природных гидросиликатов [Текст] / В.П. Попов // Энергетика Татарстана. – 2005. – № 1. – С. 59-63.

9 Мельников, В.Г. Исследование влияния на микротвердость поверхности пар трения смазочных композиций, наполненных порошками силикатов [Текст] / В.Г. Мельников, В.В. Терентьев, В.П. Зарубин // Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 50, вып. 1. – С. 110-111.

10 Новая противоизносная и антифрикционная ресурсовосстанавливающая композиция присадок к смазочным материалам [Текст] / Ю.Н. Дроздов, И.А. Буяновский, М.Н. Зеленская [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – № 5. – С. 50-53.

11 Волков, В.Г. Силикаты группы серпентина как материал для присадок к смазочным маслам [Текст] / В.Г. Волков, Н.Н. Лознецова, К.А. Павлов [и др.] // Материаловедение. – 2006. – № 4. – С. 41-45.

12 Погодаев, Л.И. Влияние геомодификаторов трения на работоспособность трибосопряжений [Текст] / Л.И. Погодаев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – № 1. – С. 58-67.

13 Погодаев, Л.И. Влияние смазочных композиций с добавками геомодификаторов трения на работоспособность трибосопряжений [Текст] / Л.И. Погодаев, В.М. Петров, А.Ю. Шабанов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – № 3. – С. 60-66.

14 Балабанов, В.И. Нанотехнологии. Наука будущего [Текст] / В.И. Балабанов. – М.: Эксмо, 2009. – 256 с.: ил. – (Открытия, которые потрясли мир).

15 Большая советская энциклопедия. Серпентин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bse.sci-lib.com/article101665.html>.

16 Долгополов, К.Н. Трибохимические аспекты взаимодействия высокодисперсных частиц серпентинов с металлической поверхностью трения [Текст] / К.Н. Долгополов, Д.Н. Любимов, А.Т. Козаков, А.В. Никольский, Е.А. Глазунова // Трение и износ. – 2012. – Т. 33. – № 2. – С. 141-148.

17 Минералогическая энциклопедия [Текст] / под. ред. К. Фреф. – Л.: Недра, 1985. – 511 с.

18 Любимов, Д.Н. Улучшение эксплуатационных свойств смазочных материалов применением добавок глинистых минералов [Текст] / Д.Н. Любимов, К.Н. Долгополов, А.Т. Козаков, А.В. Никольский // Трение и износ. – 2011. – Т. 32. – № 6. – С. 585-595.

19 Дунаев, А.В. и др. Гипотезы механизма действия ремонтно-восстановительных серпентиновых трибопрепаратов [Текст] / А.В. Дунаев, В.В. Зуев, Д.В. Васильков, Ю.Г. Лавров, О.Г. Павлов, И.Ф. Пустовой, С.А. Сокол // Нанотехника. – 2012. – № 4 (32). – С. 58-63.

20 Кузьмин, В.Н. Работоспособность трибосопряжений при использовании смазочных композиций (СК) с добавками – минеральными геомодификаторами трения [Текст] / В.Н. Кузьмин // Трение, износ, смазка. – 2009. – Т. 12. – № 41.

21 Перепелицын, М.Г. Безразборное восстановление поверхностей трения ремонтно-восстановительным составом [Текст] / М.Г. Перепелицын // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. – 2011. – № 42. – С. 104-112.

22 Быков, П.М. Теплотехнические условия защиты деталей от износа при введении в зону трения серпентино-магниевого состава [Текст] / П.М. Быков, Г.И. Шаров // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2007. – № 4. – С. 105-109.

23 Нигматуллин, Р.Г. Повышение эффективности смазочных материалов с геомодификаторами трения [Текст] / Р.Г. Нигматуллин, В.Ю. Шолом, Л.Ш. Шустер, И.М. Нигматуллин // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т. 16. – № 1(46). – С. 51-56.

24 Буйносов, А.П. Влияние применения триботехнического состава НИОД на ресурс колесных пар электроподвижного состава [Текст] / А.П. Буйносов, К.А. Стаценко, В.А. Тихонов // Вестник транспорта Поволжья. – 2011. – № 1. – С. 30-35.

25 Зеньков, С.А. Снижение адгезии грунтов с помощью ремонтно-восстановительных составов [Текст] / С.А. Зеньков, В.В. Жидовкин, А.Н. Нечаев // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. – 2010. – Т. 2. – С. 127-131.

26 Дураджи, В.Н. Некоторые триботехнические исследования противоизносных антифрикционных ремонтно-восстановительных составов [Текст] / В.Н. Дураджи, С.П. Хазов // Производство и ремонт машин: Сборник материалов Международной научно-технической конференции, Ставрополь, 28 февр. – 6 марта 2005. – Ставрополь.: Изд-во Ст.-ГАУ «АРГУС», 2005. – С. 37-44.

27 Перминов, Б.Н. Триботехнические характеристики модификаторов трения [Текст] / Б.Н. Перминов // Повышение надежности судового оборудования: Сборник научных трудов. Мор. гос. ун-т. – Владивосток: Изд-во Мор. гос. ун-та, 2002. – С. 173-181.

28 Лавров, Ю.Г. Минеральные добавки в смазочное масло [Текст] / Ю.Г. Лавров // Двигателестроение. – 2003. – № 2. – С. 46-48.

29 Поляков, С.А. Проблемы динамической адаптации трибосистем к условиям эксплуатации на основе наноструктурной самоорганизации [Текст] / С.А. Поляков // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – № 5. – С. 360.

30 Пахолкин, Е.В. Мониторинг модифицирования поверхностей трения электрическим методом: предпосылки, физический принцип, технические средства [Текст] / Е.В. Пахолкин, С.Н. Сычев // Контроль. Диагностика. – 2011. - № 12. – С. 33-39.

31 Елисеев, А.А. Функциональные наноматериалы [Текст] : учеб. пособие / А.А. Елисеев, А.В. Лукашин; под ред. Ю.Д. Третьякова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 456 с.

32 Миронов, В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии [Текст] : учеб. пособие / В.Л. Миронов. – Н. Новгород: РАН, Институт физики микроструктур, 2004. – 114 с. : ил.

33 Электронная микроскопия – Химическая энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/5313.html>.

34 Электронная микроскопия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/126/079.htm>.

35 Мясников, Б.Н. Использование нанокomпонентов для формирования поверхностей трения с оптимальными свойствами [Текст] / Б.Н. Мясников, Л.В. Журавель, А.С. Митрофанов, С.А. Пеньковский // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2010. – № 10. – С. 45-47.

36 Цыганок, С.В. Влияние природных силикатов-серпентинов на трибологические свойства пластичных смазок [Текст] / С.В. Цыганок, Н.М. Лихтерова // Вестник МИТХТ им. М.В. Ломоносова. – 2010. – Т. 5. – № 5. – С. 96-101.

37 Борисов, С.Ф. Межфазная граница «газ - твердое тело»: структура, модели, методы исследования [Текст]: учеб. пособие / С.Ф. Борисов, О.Е. Герасимова. – Екатеринбург: Изд-во УрГУ, 2006.

38 Дифракционные методы – Химическая энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/1430.html>.

39 Ильиных, В.А. Исследование трибологических параметров подшипников скольжения при использовании жидкой смазки с РВС [Текст] / В.А. Ильиных // Трибофатика: Сборник докладов 5 Международного симпозиума, Иркутск, 3-7 окт. 2005. Т. 2. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2005. – С. 253-254.

40 Петров, В.М. Влияние геомодификаторов трения на приработку ответственных трибосопряжений [Текст] / В.М. Петров, С.Г. Чулкин, П.Б. Аратский // Трение, износ, смазка. – 2001. – Т. 3. - № 3. – С. 78-93.

41 Петров, В.М. Некоторые результаты исследований влияния смазочных композиций с добавками геомодификаторов трения на работоспособность трибосопряжений в лабораторных и натуральных условиях [Текст] / В.М. Петров // Трение, износ, смазка. – 2004. - № 22.

42 Чулкин, С.Г. Триботехнические испытания препарата «ФОРСАН» [Текст] / С.Г. Чулкин, В.М. Петров // Трение, износ, смазка. – 2001. - № 9.

43 Попов, Д.А. Исследование антифрикционных свойств пар трения со смазкой содержащей геомодификатор [Текст] / Д.А. Попов, И.Г. Павлов, С.А. Столбовских, А.И. Таможников // Воронежский научно-технический Вестник. – 2013. – № 1. – С. 31-35.

44 Бреки, А.Д. Противоизносные и антифрикционные свойства смазочных композиций с геомодификаторами трения [Текст] / А.Д. Бреки, М.Ю. Максимов, О.В. Толочко, Е.С. Васильева // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2011. – № 4. – С. 27-30.

45 Виноградов, А.Б. Лабораторные исследования модификатора моторного масла на основе серпентина и мягких металлов [Текст] / А.Б. Виноградов, В.Б. Ломухин, В.В. Сургин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2012. – № 6. – С. 69-73.

46 Толочко, О.В. Исследование жидких смазочных композиций для смазки и восстановления ответственных узлов трения машин [Текст] / О.В. Толочко, А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, М.Ю. Максимов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2011. – № 3. – С. 30-33.

47 Мохнаткин, Э.М. Расчетно-экспериментальное исследование влияния антифрикционных восстанавливающих добавок в масло на показатели механических потерь и износа сопряжений трения поршневого двигателя [Текст] / Э.М. Мохнаткин, А.Ю. Шабанов, А.Б. Зайцев, А.В. Тимофеев // 2 Международная научно-практическая конференция "Теория и практика повышения качества и рационального использования масел, смазочных материалов и технических жидкостей", Санкт-Петербург, 5-8 июня, 2007: Сборник трудов конференции. - СПб: Акад. прикл. Исслед, 2007. - С. 90-93, 2 ил.

48 Виноградов, А.Б. Применение модификатора моторного масла на основе серпентина и мягких металлов при эксплуатации земснаряда типа ДЭР-250 [Текст] / А.Б. Виноградов, В.Б. Ломухин, В.В. Сургин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2012. – № 7-8. – С. 90-95.

49 Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения [Текст] / К.В. Подмастерьев. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.

50 Пахолкин, Е.В. Метод и средства поиска локальных дефектов при контроле опор качения: Дисс. канд. техн. наук. – Орел, 1999. – 251 с.

51 Пахолкин, Е.В. Мониторинг восстановительных свойств смазочных материалов с ремонтно-восстановительными составами [Текст] / Е.В. Пахолкин, Е.В. Анцифорова // Известия ОрелГТУ. Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2008. – № 4. – С. 69-74.

52 Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник [Текст] / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др.; под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. И доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с., ил.

53 Свириденко, А.И. Акустические и электрические методы в триботехнике [Текст] / А.И Свириденко, Н.К. Мышкин, Т.Ф. Калмыкова, О.В. Холодилов. – Минск: Наука и техника, 1987. – 257 с.

54 Плахова, Е.В. Разработка метода и средств контроля температуры в зоне трения электропроводящих тел: Дисс. канд. техн. наук. – Орел, 1997. – 198с.

55 Блинов, А.Ф. Новые методы оценки качества приборных подшипников качения [Текст] / А.Ф. Блинов, С.Ф. Корндорф, Ф.М. Санько, В.А. Широкова // Надежность и контроль качества. – 1979. – № 6. – С. 43-48.

56 Снеговский, Ф.П. Способ и устройство для измерения толщины смазочного слоя подшипников скольжения [Текст] / Ф.П. Снеговский, В.И. Рой // Трение и износ. - 1980. – Т. 1. – № 6. – С. 1069-1077.

57 Справочник по триботехнике: В 3-х т. Т. 2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения [Текст] / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.: ил.

58 Пахолкин, Е.В. Проблемы исследования граничной смазки электрическим методом [Текст] / Е.В. Пахолкин, С.В. Гниздох // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4. – С. 128-132.

59 Пахолкин, Е.В. Экспериментальные исследования смазывающей способности моторных масел электрическим методом [Текст] / Е.В. Пахолкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 5 (283). – С. 125-128.

60 Пахолкин, Е.В. О комплексном исследовании адгезионной способности смазочных материалов электрическим методом [Текст] / Е.В. Пахолкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 1. – С. 114-118.

61 Пахолкин, Е.В. Экспериментальные исследования смазочной способности моторных масел электрическим методом [Текст] / Е.В. Пахолкин, Е.В. Анцифорова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 6-2.

62 Подмастерьев, К.В. Электрический метод и средства диагностирования подшипников качения (при ремонте и изготовлении машин и механизмов): Дисс. канд. техн. наук. – М., 1986. – 244 с.

63 Коднир, Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин [Текст] / Д.С. Коднир. – М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.

64 Демкин Н.Б. Упругое контактирование шероховатых поверхностей [Текст] / Н.Б. Демкин // Изв. вузов. Машиностроение. – 1959. – № 6. – 44-51.

65 Перель, Л.Я. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор [Текст] / Л.Я. Перель, А.А. Филатов: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 608 с.: ил.

66 Подмастерьев, К.В. Исследование эксплуатационных свойств смазочных материалов электрическими методами [Текст] / К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин, Н.А. Сотникова // Славянтрибо-6. Интегрированное научно-техническое обеспечение качества трибообъектов, их производства и эксплуатации: Материалы международного научно-практического симпозиума: В 2 т. – Рыбинск: РГА-ТА, 2004. – Т. 2.

67 Подмастерьев, К.В. Измеритель параметров электрического контактирования ИПЭК-1 [Текст] / К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин, В.В. Мишин // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 11. – С. 7-8.

68 Дисперсия, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации – Статистический анализ данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://statanaliz.info/index.php/metody/variatsiya/11-dispersiya-standartnoe-otklonenie-koeffitsient-variatsii>.

69 Статистика: учебник [Текст] / И.И. Елисеева [и др.]; под ред. И.И. Елисеевой. – М.: Проспект, 2011. – 448 с.

70 Батуева, А.Д. Статистика [Текст]: учеб. пособие для вузов / А.Д. Батуева, Е.П. Петецкая, М.А. Кокарев. – М.: Издательство «Экзамен», 2008. – 255 с.

71 Елисеева, И.И. Общая теория статистики [Текст]: учеб. / И.И. Елисеева, М.М. Юзбашев; под ред. И.И. Елисеевой. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 656 с.: ил.

72 Пахолкин, Е.В. Исследование эффективности контроля несущей способности смазочного слоя в подшипниках скольжения жидкостного трения электрическими методами [Текст] / Е.В. Пахолкин, К.В. Подмастерьев, В.В. Мишин, Н.Н. Фокин, Д.А. Медведев // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 6. – С. 25-32.

73 Подмастерьев, К.В. Электрический контроль вязкостно-температурных свойств моторных масел: теоретическое обоснование, алгоритм, программно-аппаратные средства [Текст] / К.В. Подмастерьев, Е. В. Пахолкин, Н.Н. Фокин // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 7 (133). – С. 17-25.

74 Подмастерьев, К.В. Электрический метод и средства поиска локальных дефектов опор качения [Текст] / К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин // Дефектоскопия. – 1998. – № 8.

75 Профилометры, профилографы – профилометры "Абрис-ПМ7" (приборы для измерения, контроля и оценки шероховатости поверхности) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.p-komplekt.ru/catps.71.htm>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Описание оборудования для экспериментальных исследований

А.1 Измеритель параметров электрического контактирования ИПЭК-1

С помощью измерителя параметров электрического контактирования ИПЭК-1 проводят диагностику различных узлов трения (подшипники качения и скольжения, зубчатые пары и т.п.). Также его можно использовать для контроля вида смазки в трибосопряжениях, для исследования различных смазочных и конструкционных материалов узлов трения.

Толщина смазочной пленки в процессе работы трибообъекта непрерывно изменяется. Контакты наиболее высоких микронеровностей вызывают разрушение смазочной пленки, при этом сопротивление узла трения резко падает, наблюдаются микроконтакты (импульсы проводимости). Измеряя параметры электрического контактирования деталей узлов трения, ИПЭК-1 дает диагностическую информацию о состоянии трибосопряжений.

Измеряемые параметры прибора: нормированное интегральное время микроконтактирования (НИВ) и средняя частота микроконтактирований (СЧМ).

Внешний вид прибора показан на рисунке А.1.



Рисунок А.1 – Внешний вид прибора ИПЭК-1

Основные технические характеристики прибора приведены в таблице А.1.

Таблица А.1 – Технические характеристики измерителя ИПЭК-1

Наименование технической характеристики	Значения характеристики
Диапазон измерения НИВ	от 0 до 1
Диапазон измерения СЧМ, МГц	от 0 до 20
Время ($T_{и}$) измерения диагностических параметров, с	0,01; 0,1; 1; 10
Порог срабатывания по сопротивлению ($R_{пор}$), Ом	100±2
Минимальная длительность учитываемых импульсов микроконтактирования, мкс, не более	1
Значение опорного напряжения на объекте, мВ:	100±2
Вывод данных на персональный компьютер (ПК)	COM
Индикация результатов измерения (для времени измерения 1 и 10 с)	ЖК-экран
Режимы измерения:	автоматический; ручной запуск
Вид питания:	автономное; сетевое
Параметры сетевого питания: напряжение, В	220 ±22
частота, Гц	50 ± 1

ИПЭК-1 передает измерительную информацию через COM-порт в компьютер. Для этой цели имеется программный продукт (разработчик – Фокин Н.Н.), выполняющий следующие функции:

- сбор данных с устройства диагностирования ИПЭК-1;
- отображение данных в режиме реального времени;
- запись полученных данных в стандартном формате CSV;
- установка маркеров в произвольные моменты работы программы;

- режим цветовой подсветки уровня диагностируемого параметра;
- статистическая обработка данных;
- автоматическое определение момента стабилизации уровня параметра НИВ в процессе предварительной обкатки (вычисление времени, в течение которого изменение среднего значения НИВ не превышало инструментальную погрешность определения вероятности электрического микроконтактирования).

Вид окна программы приведен на рисунке А.2. Минимальные системные требования: операционная система Windows XP SP2 /2003/Vista/2008/Windows 7. Процессор x86, x64 с тактовой частотой не менее 500 МГц, 128 Мб оперативной памяти, 40 Мб на жестком диске.

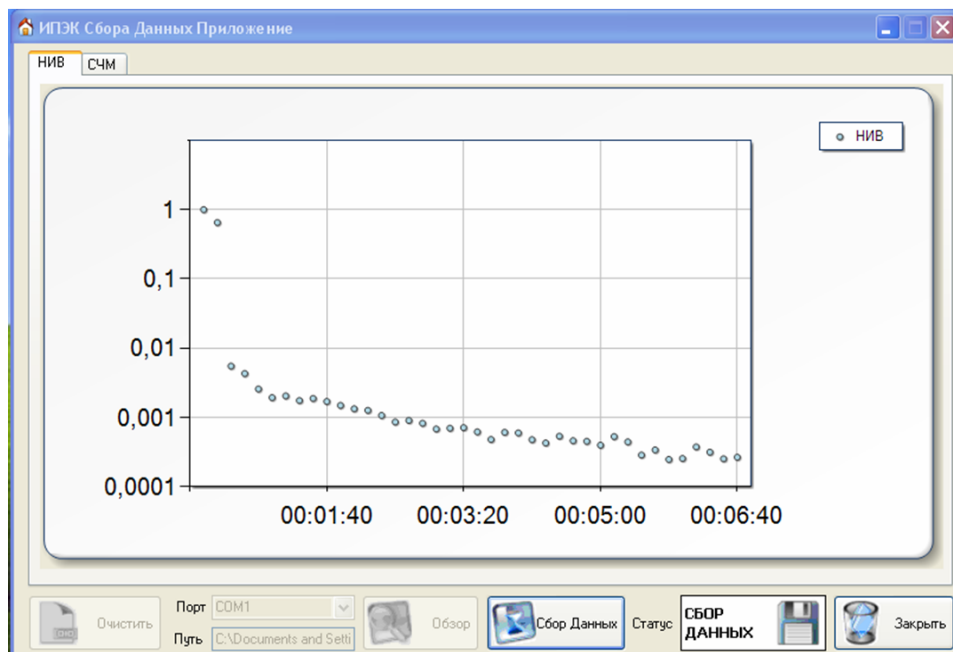


Рисунок А.2 – Вид окна программы

А.2 Измеритель электрических параметров трибосопряжений ИЭПТ

Измеритель электрических параметров трибосопряжений ИЭПТ предназначен для проведения трибологических исследований процессов и явлений, происходящих в зонах трения. Также данный прибор позволяет проводить диагностику, контроль и прогнозирование состояния технических объектов, содержащих узлы трения.

Измеряемые параметры прибора:

- электрическое сопротивление (проводимость) объекта;
- генерируемая объектом ЭДС.

Имеющийся в приборе омметр предназначен для преобразования сопротивлений узла трения на диапазонах 1,7 кОм, 170 кОм и 1,7 МОм в напряжение. Пределы измерения подобраны с целью подключения выхода омметра к АЦП с номинальным кодом 16383 (для АЦП 14 бит) и опорным напряжением 2,5 В.

Коэффициент преобразования сопротивления в напряжение рассчитан из условия равенства максимального выходного напряжения с опорным напряжением АЦП $K = 1,526$. Внешний вид прибора показан на рисунке А.3.



Рисунок А.3 – Внешний вид прибора ИЭПТ

Основные технические характеристики прибора приведены в таблице А.2.

Таблица А.2 – Технические характеристики ИЭПТ

Наименование технической характеристики	Значения характеристики
Диапазон измерения сопротивления, <i>Ом</i>	от 1 до 1638300
Диапазон измерения ЭДС, <i>В</i>	от 0,00001 до 0,01638
Верхний предел частотного диапазона, <i>кГц</i>	100
Выходное напряжение на выходе омметра, <i>В</i>	от 0 до 2,5
Индикация результатов измерения	ЖК-экран
Режимы измерения:	автоматический; ручной запуск
Вид питания:	сетевое
Параметры сетевого питания: напряжение, <i>В</i>	220 ± 22
частота, <i>Гц</i>	50 ± 1

А.3 Аналогово-цифровой преобразователь ADC16USB

Преобразователь состоит из микроконтроллера (AT89S8252) и двух 16-ти битных АЦП (AD7663), которые опрашивает микроконтроллер и затем передает данные в интерфейс USB (FT245) и далее в компьютер. Специальная программа позволяет задавать с компьютера частоту дискретизации, время приема данных, запуск и остановку передачи. Внешний вид устройства приведен на рисунке А.4.



Рисунок А.4 – Внешний вид устройства ADC16USB:

а – вид спереди; *б* – вид сзади

Программа USB АЦП 1.0 предназначена для сбора измерительной информации с данного АЦП. Минимальные системные требования данной программы следующие: процессор Pentium II или аналогичный; оперативная память 64 Мб; жесткий диск 1 Гб или более; наличие интерфейса USB 1.1 или старше; видеокарта SVGA 800x600x8 bit; операционная система Windows 95 или старше.

Рекомендуемые системные требования: процессор Pentium III или аналогичный; оперативная память 128 Мб; жесткий диск 10 Гб или более; USB интерфейс версии 2.0 или старше; видеокарта SVGA 1024x768x16 bit; операционная система Windows 2000 или старше.

Минимальная частота дискретизации данного устройства – 3,7 кГц, максимальная – 111,11 кГц.

Вид окна программы приведен на рисунке А.5.

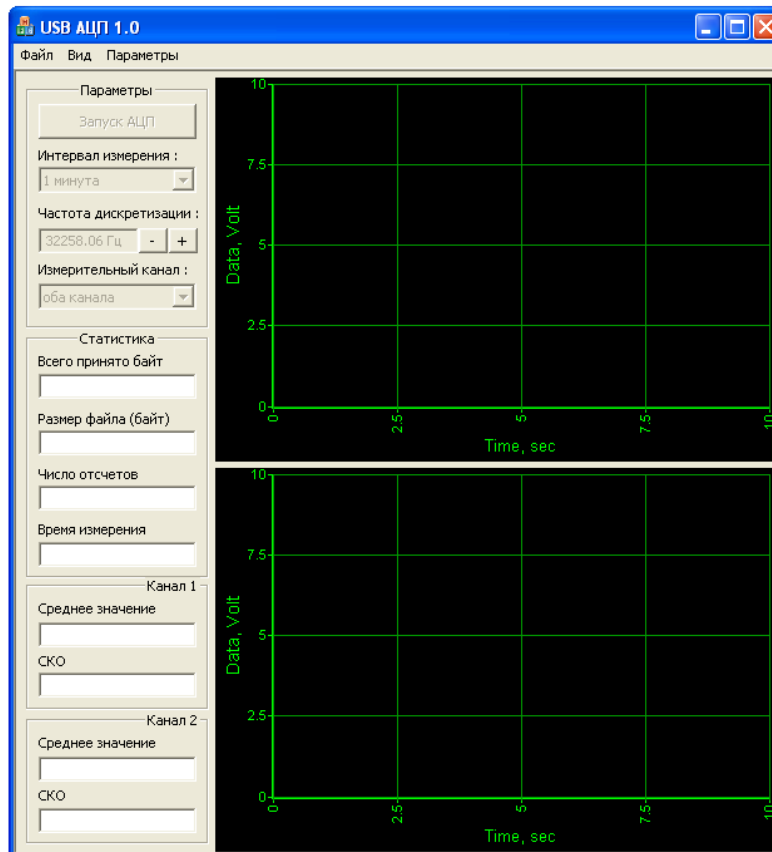


Рисунок А.5 – Окно программы USB АЦП 1.0

А.4 Стенд для диагностики подшипников электрорезистивным методом

Кинематическая схема стенда приведена на рисунке А.6. Стенд состоит из электропривода, жестко закрепленного на основании. Привод включает в себя вал 1, установленный в подшипниках 2 и соединенный с валом электродвигателя 4 с помощью электроизоляционной муфты 3. Необходимая частота вращения устанавливается с помощью системы шкивов (не показана на схеме) и регулировки частоты вращения вала электродвигателя 4. Специальные оправки позволяют крепить на вал 1 одно из колец исследуемого подшипника 5.

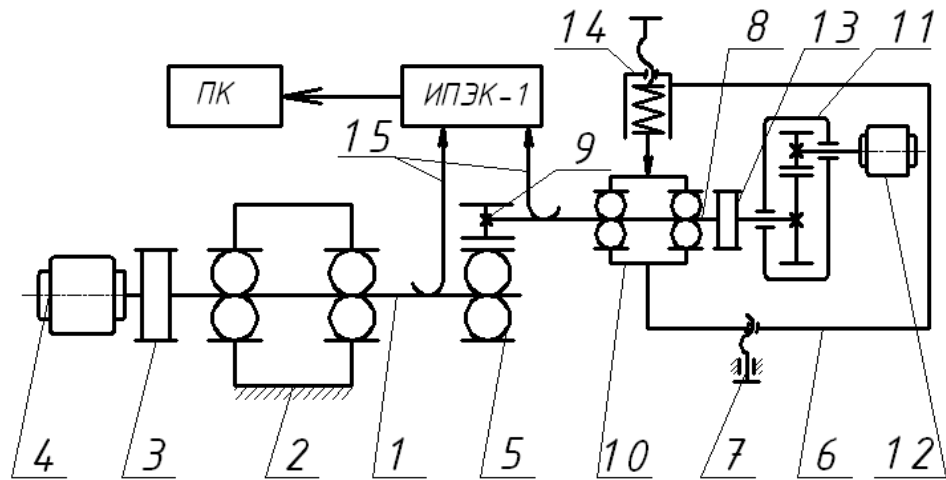
В стенде также имеется дополнительный привод 6-14, создающий радиальную нагрузку на подшипник 5. Также данный привод предназначен для непрерывного вращения второго кольца исследуемого подшипника или для поворота его на заданный угол.

Дополнительный привод включает в себя вал 8, установленный в подшипниках 10 и связанный с валом двигателя постоянного тока 12 посредством редуктора 11 с помощью муфты 13. Привод закреплен через электроизоляционную прокладку на суппорте 6, который посредством винтовой передачи 7 перемещается по направляющим относительно основания.

На валу 8 закреплен ролик 9, который с помощью тарировочной пружины в стакане 14 прижимается к кольцу подшипника. Деформация пружины определяет величину радиальной нагрузки на подшипник 5 и задается винтом.

Диапазон частот вращения основного привода $5 \div 100$ Гц, дополнительного – $0,005 \div 25$ Гц. Радиальная нагрузка регулируется в пределах $0 \div 3000$ Н.

ИПЭК-1 подключается посредством медно-графитовых токосъемников 15 к валам приводов. Далее диагностическая информация поступает в персональный компьютер (ПК) для дальнейшей обработки.



- 1 – вал; 2 – подшипники; 3 – муфта; 4 – электродвигатель;
 5 – подшипник; 6 – суппорт; 7 – винтовая передача; 8 – вал; 9 – прижимной ролик; 10 – подшипники; 11 – редуктор; 12 – двигатель; 13 – муфта;
 14 – стакан; 15 – токосъемники

Рисунок А.6 – Кинематическая схема станда для
 диагностирования подшипников качения

А.5 Профилограф-профилометр АБРИС-ПМ7.2

Профилограф-профилометр АБРИС-ПМ7.2 предназначен для измерения шероховатости и записи профиля поверхностей изделий, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию, в лабораторных и цеховых условиях машиностроительных, приборостроительных и других предприятий, а также в полевых условиях, и для измерения шероховатости шаров при использовании дополнительных приспособлений.

Измерение параметров шероховатости поверхности производится по системе средней линии в соответствии с номенклатурой и диапазонами значений, предусмотренными ГОСТ 2789-73.

Основные технические характеристики АБРИС-ПМ7.2 приведены в таблице А.3.

Таблица А.3 – Основные технические характеристики АБРИС-ПМ7.2

Наименование технической характеристики	Значения характеристики
Измеряемые параметры шероховатости при использовании прибора в качестве: – профилографа-профилометра – профилометра	$Ra, Rz, Rmax, Sm, tp$ $Ra, Rz, Rmax$
Вид отсчета результатов измерения	цифровой
Форма измеряемых поверхностей	плоские, цилиндрические, конические и другие поверхности, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию
Метод измерения	непосредственной оценки

Наименование технической характеристики	Значения характеристики
Диапазон измерений по параметрам:	
Ra , мкм	0,04 ... 12,5
Rz , $Rmax$, мкм	0,16 ... 50,0
Sm , мкм	8,0 ... 250,0
tp , %	0,1 ... 99,9
Максимальная длина трассы ошупывания, мм	7,5
Значения отсечек шага, мм	0,25; 0,8; 2,5
Скорость перемещения щупа, мм/с:	
– при рабочем ходе	$1 \pm 0,05$
– при возврате	$2 \pm 0,4$
Радиус кривизны вершины щупа, мкм	2
Статическое измерительное усилие, Н, не более	0,016
Параметр шероховатости Rz рабочей поверхности опоры, мкм, не более	0,1
Усилие воздействия опоры датчика на контролируемую поверхность, Н, не более	0,5

Предел допускаемой основной погрешности профилометра для профиля, близкого к трапецеидальному, с шагом не более $0,25 \cdot \lambda_s$, должен соответствовать значениям, определяемым по формулам:

$$\Delta Ra = 0,02 \cdot Ra_{\text{ВП}} + 0,04 \cdot Ra \text{ мкм};$$

$$\Delta Rz = 0,03 \cdot Rz_{\text{ВП}} + 0,05 \cdot Rz \text{ мкм};$$

$$\Delta Rmax = 0,03 \cdot Rmax_{\text{ВП}} + 0,05 \cdot Rmax \text{ мкм};$$

$$\Delta Sm = 0,02 \cdot Sm_{\text{ВП}} + 0,1 \cdot Sm \text{ мкм};$$

$$\Delta tp = 8 + 0,02 \cdot tp \text{ \%},$$

где $Ra_{\text{ВП}}$, $Rz_{\text{ВП}}$, $Rmax_{\text{ВП}}$, $Sm_{\text{ВП}}$ – верхний предел поддиапазона по параметрам Ra , Rz , $Rmax$, Sm соответственно;

$Ra, Rz, Rmax, Sm, tp$ – измеряемые значения параметров.

Предел допускаемой основной погрешности профилографа для профиля, близкого к трапецеидальному, должен соответствовать значениям, определяемым по формуле:

$$\Delta y = 0,02 \cdot y_{\text{вп}} + 0,03 \cdot y \text{ мкм},$$

где $y_{\text{вп}}$ – верхний предел поддиапазона, соответствующего выбранному значению вертикального увеличения, мкм;

y – максимальная по абсолютному значению ордината профиля по профилограмме, мкм.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты экспериментальных исследований адгезионных свойств
смазочных материалов в условиях граничного трения с
использованием диагностического параметра НИВ

Таблица Б.1 – Значения параметра НИВ для исследуемых проб на начальной стадии фрикционного взаимодействия (от 3 до 4 минуты)

Время	НИВ, проба № 1	НИВ, проба № 2	НИВ, проба № 3	НИВ, проба № 4	НИВ, проба № 5	НИВ, проба № 6
0:03:01	1,0000000	0,9950961	0,8222152	0,9967965	0,5533466	0,5651176
0:03:02	1,0000000	1,0000000	0,8194724	0,9988833	0,5365434	0,5369211
0:03:03	1,0000000	0,9959354	0,8026412	0,9978973	0,4971037	0,5305999
0:03:04	1,0000000	0,9913682	0,8000442	0,9992305	0,5130836	0,5177034
0:03:05	0,9996614	0,9915436	0,8361132	0,9994130	0,5057537	0,5578694
0:03:06	1,0000000	0,9945356	0,8586430	0,9965743	0,4958310	0,5243888
0:03:07	1,0000000	0,9892076	0,8021742	0,9983216	0,5197015	0,5525527
0:03:08	1,0000000	0,9790659	0,8147111	0,9986575	0,5182662	0,5821898
0:03:09	1,0000000	0,9807996	0,8124552	0,9978043	0,5126205	0,5440425
0:03:10	1,0000000	0,9715126	0,8329772	0,9980187	0,4929902	0,5672628
0:03:11	1,0000000	0,9656858	0,8218553	0,9987865	0,4754984	0,5310702
0:03:12	0,9999661	0,9533658	0,8035159	0,9973002	0,5147684	0,5732456
0:03:13	0,9990967	0,9629699	0,8145112	0,9975925	0,5081656	0,5460038
0:03:14	0,9989499	0,9619180	0,8155024	0,9988741	0,4963752	0,5571835
0:03:15	0,9985694	0,9624339	0,8399957	0,9989446	0,4713276	0,5667976
0:03:16	0,9991257	0,9527833	0,8208021	0,9967466	0,4952385	0,5508505
0:03:17	0,9987374	0,9569826	0,8358485	0,9989010	0,5025652	0,5275918
0:03:18	0,9970044	0,9703939	0,8339666	0,9992778	0,5053666	0,4963609

Время	НИВ, проба № 1	НИВ, проба № 2	НИВ, проба № 3	НИВ, проба № 4	НИВ, проба № 5	НИВ, проба № 6
0:03:19	0,9907034	0,9510703	0,8298223	0,9995279	0,4793295	0,5078563
0:03:20	0,9930391	0,9681314	0,8261424	0,9985553	0,4771405	0,5648731
0:03:21	0,9852901	0,9759706	0,8235835	0,9996648	0,4679331	0,5197730
0:03:22	0,9846676	0,9679755	0,8090382	0,9986247	0,4642293	0,5016020
0:03:23	0,9834789	0,9777434	0,8125760	0,9996638	0,4902876	0,4865853
0:03:24	0,9762174	0,9691735	0,8139386	0,9980974	0,4969795	0,4886118
0:03:25	0,9762342	0,9616664	0,8164526	0,9999218	0,5033959	0,4625066
0:03:26	0,9652199	0,9714908	0,8020925	0,9994687	0,4897477	0,4995570
0:03:27	0,9904349	0,9859807	0,7920279	0,9997050	0,4666976	0,4771426
0:03:28	0,9828265	0,9827373	0,7999748	0,9993662	0,4457363	0,4558541
0:03:29	0,9810868	0,9632614	0,7911881	0,9988791	0,4680690	0,4537342
0:03:30	0,9940183	0,9830617	0,7872895	0,9997744	0,4453194	0,4574830
0:03:31	0,9950076	0,9638474	0,7946926	0,9992723	0,4465302	0,4485543
0:03:32	0,9883344	0,9642957	0,7842623	0,9993946	0,4528692	0,4367254
0:03:33	0,9786361	0,9622468	0,7919738	0,9965112	0,4563712	0,4397755
0:03:34	0,9924868	0,9576134	0,7785145	0,9981920	0,4493557	0,4404591
0:03:35	0,9787749	0,9610517	0,7788060	0,9967217	0,4490472	0,4554735
0:03:36	0,9848836	0,9777937	0,7750337	0,9972133	0,4535248	0,4158876
0:03:37	0,9778445	0,9422977	0,7896794	0,9935638	0,5117920	0,4339062
0:03:38	0,9670504	0,9596500	0,7677757	0,9960162	0,4579170	0,4312556
0:03:39	0,9721241	0,9708887	0,7649797	0,9974528	0,4236736	0,4489066
0:03:40	0,9477234	0,9690956	0,7783007	0,9960212	0,4289193	0,4406890
0:03:41	0,9794718	0,9696349	0,7742736	0,9974970	0,4361693	0,4457054
0:03:42	0,9806807	0,9617957	0,7870514	0,9963177	0,4739001	0,4312714
0:03:43	0,9523059	0,9695320	0,7902618	0,9967103	0,4405578	0,4730391
0:03:44	0,9552094	0,9751966	0,7767088	0,9950779	0,5070608	0,4264025

Время	НИВ, проба № 1	НИВ, проба № 2	НИВ, проба № 3	НИВ, проба № 4	НИВ, проба № 5	НИВ, проба № 6
0:03:45	0,9991043	0,9648254	0,8042039	0,9954312	0,4764712	0,4293358
0:03:46	0,9923105	0,9473573	0,7887902	0,9984437	0,4541749	0,4441070
0:03:47	0,9959152	0,9781139	0,8069624	0,9974123	0,4398026	0,4335310
0:03:48	0,9813632	0,9426182	0,7940353	0,9973202	0,4418584	0,4186689
0:03:49	0,9841197	0,9517249	0,7872744	0,9957626	0,4268670	0,4037217
0:03:50	0,9684577	0,9605287	0,8032960	0,9964864	0,4154544	0,4454299
0:03:51	0,9581482	0,9679570	0,7957976	0,9979150	0,4408887	0,4261177
0:03:52	0,9444541	0,9701009	0,7962734	0,9981738	0,4630676	0,4159923
0:03:53	0,9306435	0,9608569	0,7955147	0,9968392	0,4761539	0,4075442
0:03:54	0,9313067	0,9648098	0,7733603	0,9972012	0,5055592	0,4237404
0:03:55	0,9358630	0,9642912	0,8036701	0,9963501	0,6291504	0,4240126
0:03:56	0,9039252	0,9622488	0,8010200	0,9982640	0,5073607	0,4167606
0:03:57	0,9072996	0,9565963	0,7842619	0,9957030	0,5522265	0,3746178
0:03:58	0,9130017	0,9595934	0,7894550	0,9968682	0,4718618	0,3888021
0:03:59	0,8873756	0,9560754	0,7680475	0,9964553	0,4765559	0,3802256
0:04:00	0,9032368	0,9722853	0,7796927	0,9977015	0,5024232	0,3597533

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты экспериментальных исследований поведения значений
диагностического параметра НИВ в процессе приработки

Таблица В.1 – Типовой процесс изменения значений параметра НИВ в
процессе приработки при сравнительно лучшем качестве поверхностей трения
(например, для новых подшипников)

Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %	Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %
80,00	0,00000014	151	83,17	0,00000443	119
80,17	0,00000123	158	83,33	0,00000413	109
80,33	0,00000001	158	83,50	0,00000001	113
80,50	0,00000038	166	83,67	0,00000299	105
80,67	0,00000170	147	83,83	0,00000192	100
80,83	0,00001065	175	84,00	0,00000007	105
81,00	0,00000001	175	84,17	0,00000259	93
81,17	0,00000001	175	84,33	0,00000628	86
81,33	0,00000016	182	84,50	0,00000001	86
81,50	0,00000281	165	84,67	0,00000001	86
81,67	0,00000672	157	84,83	0,00000001	94
81,83	0,00000496	151	85,00	0,00000001	101
82,00	0,00000658	135	85,17	0,00000001	112
82,17	0,00000041	139	85,33	0,00000053	114
82,33	0,00000064	136	85,50	0,00000003	115
82,50	0,00000214	132	85,67	0,00000001	119
82,67	0,00000202	131	85,83	0,00000001	129
82,83	0,00000256	135	86,00	0,00000609	129
83,00	0,00000093	131	86,17	0,00000264	129

Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %	Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %
86,33	0,00000031	133	90,67	0,00000001	121
86,50	0,00000054	144	90,83	0,00000139	127
86,67	0,00000001	162	91,00	0,00000126	121
86,83	0,00000067	156	91,17	0,00000001	127
87,00	0,00000127	164	91,33	0,00000001	132
87,17	0,00000143	167	91,50	0,0000015	125
87,33	0,00000273	151	91,67	0,00000001	122
87,50	0,00000559	150	91,83	0,00000282	111
87,67	0,00000001	164	92,00	0,00000329	105
87,83	0,00000133	153	92,17	0,00000041	103
88,00	0,00000084	147	92,33	0,00000001	109
88,17	0,00000001	147	92,50	0,00000726	114
88,33	0,00000815	144	92,67	0,00000209	115
88,50	0,00000009	143	92,83	0,00000322	113
88,67	0,0000008	142	93,00	0,00000001	114
88,83	0,00000001	144	93,17	0,00000141	107
89,00	0,00000123	137	93,33	0,00000209	109
89,17	0,00000149	129	93,50	0,00000024	119
89,33	0,00000531	128	93,67	0,00000263	112
89,50	0,00000556	126	93,83	0,00000001	121
89,67	0,00000021	127	94,00	0,00000058	118
89,83	0,00000001	130	94,17	0,00000001	125
90,00	0,00000345	118	94,33	0,00000071	128
90,17	0,00000029	111	94,50	0,00000001	128
90,33	0,00000072	113	94,67	0,00000001	128
90,50	0,00000187	112	94,83	0,00000519	125

Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %	Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %
95,00	0,00000001	125	97,67	0,00000105	163
95,17	0,00000085	132	97,83	0,00000199	148
95,33	0,00000081	141	98,00	0,00000005	147
95,50	0,00000001	144	98,17	0,00000001	149
95,67	0,00000025	143	98,33	0,00000965	186
95,83	0,00000144	128	98,50	0,00000001	193
96,00	0,00000008	134	98,67	0,00000012	200
96,17	0,00000001	149	98,83	0,00000001	200
96,33	0,00000265	133	99,00	0,00000185	187
96,50	0,00000011	144	99,17	0,00000001	200
96,67	0,00000051	154	99,33	0,00000124	196
96,83	0,00000001	157	99,50	0,00000478	171
97,00	0,00000413	160	99,67	0,00000065	183
97,17	0,00000001	160	99,83	0,00000411	163
97,33	0,00000001	167	100,00	0,00000001	167
97,50	0,00000001	167			

Таблица В.2 – Типовой процесс изменения значений параметра НИВ в процессе приработки при сравнительно худшем качестве поверхностей трения (например, для бывших в эксплуатации подшипников)

Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %	Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %
80,00	0,00000298	55	83,83	0,00000896	78
80,17	0,00000601	55	84,00	0,00000286	75
80,33	0,00000427	55	84,17	0,00000884	74
80,50	0,00000675	55	84,33	0,00000761	69
80,67	0,00000063	59	84,50	0,00000647	68
80,83	0,00001099	60	84,67	0,00000705	67
81,00	0,00000171	58	84,83	0,00000212	69
81,17	0,0000047	56	85,00	0,0000028	70
81,33	0,00000542	57	85,17	0,00000492	67
81,50	0,00000388	57	85,33	0,00000167	70
81,67	0,00000392	58	85,50	0,00000633	64
81,83	0,00000171	62	85,67	0,00000943	60
82,00	0,00001362	66	85,83	0,00000527	57
82,17	0,00000126	71	86,00	0,00000702	53
82,33	0,00000194	76	86,17	0,00000414	55
82,50	0,00000249	78	86,33	0,00000574	56
82,67	0,00000261	79	86,50	0,00000077	48
82,83	0,00000825	72	86,67	0,00000487	46
83,00	0,00001089	73	86,83	0,00000391	48
83,17	0,00001723	81	87,00	0,00000467	47
83,33	0,00000315	81	87,17	0,00000593	46
83,50	0,00000583	81	87,33	0,00000382	44
83,67	0,00000896	79	87,50	0,00000648	43

Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %	Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %
87,67	0,00000536	42	92,00	0,00000047	67
87,83	0,00000368	43	92,17	0,00000784	67
88,00	0,00000452	42	92,33	0,00001143	66
88,17	0,0000035	40	92,50	0,00000502	66
88,33	0,00000981	42	92,67	0,00000068	73
88,50	0,00000367	43	92,83	0,00000277	76
88,67	0,00000442	40	93,00	0,0000072	73
88,83	0,00000653	40	93,17	0,00000557	72
89,00	0,00000196	40	93,33	0,00000745	72
89,17	0,00000644	40	93,50	0,00001113	71
89,33	0,0000072	40	93,67	0,00001192	69
89,50	0,00000783	41	93,83	0,00000049	72
89,67	0,00000314	42	94,00	0,00000188	72
89,83	0,00000426	36	94,17	0,00000612	69
90,00	0,00000629	36	94,33	0,00000909	66
90,17	0,00000316	37	94,50	0,00000605	66
90,33	0,00000289	39	94,67	0,00000293	66
90,50	0,00000257	42	94,83	0,00001283	66
90,67	0,00000144	46	95,00	0,00000637	65
90,83	0,00000264	48	95,17	0,0000044	64
91,00	0,00000407	48	95,33	0,00000112	62
91,17	0,00001153	55	95,50	0,00000305	66
91,33	0,00000279	56	95,67	0,00000558	65
91,50	0,00001279	61	95,83	0,00000881	64
91,67	0,00000455	61	96,00	0,00001199	59
91,83	0,0000033	61	96,17	0,00000715	56

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Результаты экспериментальных исследований процессов восстановления
подшипников типоразмера 1000900

Таблица Г.1 – Изменение значений параметра НИВ в процессе
предварительной обкатки с литол-24

Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %	Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %
280,00	0,00004277	48	283,33	0,00001655	43
280,17	0,00003337	47	283,50	0,00004031	43
280,33	0,00004381	46	283,67	0,00002282	43
280,50	0,00003291	42	283,83	0,00002320	44
280,67	0,00001903	42	284,00	0,00003202	42
280,83	0,00001393	46	284,17	0,00001706	41
281,00	0,00005829	47	284,33	0,00003830	35
281,17	0,00002903	47	284,50	0,00004227	36
281,33	0,00001988	47	284,67	0,00003139	35
281,50	0,00001825	47	284,83	0,00003127	33
281,67	0,00004274	45	285,00	0,00004411	34
281,83	0,00002082	46	285,17	0,00003335	33
282,00	0,00004285	41	285,33	0,00002052	33
282,17	0,00003679	38	285,50	0,00003549	33
282,33	0,00002359	38	285,67	0,00001734	34
282,50	0,00002096	38	285,83	0,00002559	33
282,67	0,00001471	41	286,00	0,00001976	32
282,83	0,00001666	43	286,17	0,00001835	31
283,00	0,00002945	41	286,33	0,00003077	31
283,17	0,00003596	41	286,50	0,00001831	33

Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %	Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %
286,67	0,00003152	30	291,00	0,00003829	45
286,83	0,00002257	30	291,17	0,00004841	44
287,00	0,00001565	32	291,33	0,00004181	40
287,17	0,00004289	33	291,50	0,00003281	39
287,33	0,00002646	33	291,67	0,00001547	38
287,50	0,00001802	33	291,83	0,00001976	39
287,67	0,00003597	33	292,00	0,00002629	39
287,83	0,00002045	32	292,17	0,00002473	38
288,00	0,00006135	41	292,33	0,00002897	38
288,17	0,00002522	41	292,50	0,00003224	38
288,33	0,00001142	43	292,67	0,00002514	35
288,50	0,0000233	44	292,83	0,00001552	38
288,67	0,00002716	43	293,00	0,00001425	36
288,83	0,00001874	44	293,17	0,00001718	38
289,00	0,00003004	42	293,33	0,00006087	43
289,17	0,00002973	42	293,50	0,00002528	42
289,33	0,00001543	43	293,67	0,00002361	43
289,50	0,0000253	42	293,83	0,00003792	43
289,67	0,00001094	46	294,00	0,00003699	40
289,83	0,00004049	45	294,17	0,00000899	44
290,00	0,00003007	45	294,33	0,0000284	45
290,17	0,00005134	47	294,50	0,00003822	43
290,33	0,0000361	44	294,67	0,00002727	42
290,50	0,00003596	44	294,83	0,00001963	44
290,67	0,000014	46	295,00	0,00004042	42
290,83	0,00003176	45	295,17	0,00003274	41

Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %	Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %
295,33	0,00003901	41	297,83	0,00002582	34
295,50	0,00004762	41	298,00	0,00004976	36
295,67	0,0000277	41	298,17	0,00001717	36
295,83	0,00001277	45	298,33	0,0000283	36
296,00	0,00003901	44	298,50	0,00001994	38
296,17	0,00002275	43	298,67	0,00002726	38
296,33	0,00004766	40	298,83	0,00001585	39
296,50	0,00002205	39	299,00	0,00002413	39
296,67	0,00002432	35	299,17	0,00000844	41
296,83	0,00003827	35	299,33	0,00001663	43
297,00	0,00003284	34	299,50	0,00003056	42
297,17	0,00003684	34	299,67	0,00002578	40
297,33	0,00001031	38	299,83	0,00003066	39
297,50	0,00004262	34	300,00	0,00001977	40
297,67	0,0000281	34			

Таблица Г.2 – Изменение значений параметра НИВ в процессе ремонтного восстановления

Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %	Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %
280,00	0,00000469	102	284,00	0,00000506	75
280,17	0,00000001	113	284,17	0,00000388	68
280,33	0,00000001	124	284,33	0,00000001	75
280,50	0,000002	99	284,50	0,00000894	72
280,67	0,00000458	98	284,67	0,00000438	65
280,83	0,00000001	109	284,83	0,0000071	57
281,00	0,00000784	105	285,00	0,00000072	62
281,17	0,00000122	101	285,17	0,00000307	60
281,33	0,00000001	108	285,33	0,00000534	53
281,50	0,00000001	119	285,50	0,00000001	60
281,67	0,00000362	111	285,67	0,00001218	66
281,83	0,00000196	115	285,83	0,0000025	65
282,00	0,00000001	126	286,00	0,00000457	66
282,17	0,00000684	114	286,17	0,00000001	74
282,33	0,000004	105	286,33	0,00000001	81
282,50	0,00000184	94	286,50	0,00000535	82
282,67	0,0000051	87	286,67	0,00000001	85
282,83	0,00000624	87	286,83	0,00000072	91
283,00	0,00000503	87	287,00	0,0000098	93
283,17	0,00000762	88	287,17	0,00000323	93
283,33	0,00000132	93	287,33	0,00000001	102
283,50	0,00000829	86	287,50	0,00000331	103
283,67	0,00000534	78	287,67	0,00000178	99
283,83	0,00000362	75	287,83	0,0000048	99

Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %	Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %
288,00	0,00000121	104	292,33	0,00000973	89
288,17	0,00000098	112	292,50	0,00000462	86
288,33	0,00000001	114	292,67	0,00000001	91
288,50	0,00000001	123	292,83	0,00000224	89
288,67	0,00000001	136	293,00	0,00000001	97
288,83	0,0000165	137	293,17	0,00000001	104
289,00	0,00000402	139	293,33	0,00000349	106
289,17	0,00000182	141	293,50	0,00000788	105
289,33	0,00000352	143	293,67	0,00000266	111
289,50	0,00000076	140	293,83	0,00001012	111
289,67	0,00000717	126	294,00	0,00000001	117
289,83	0,0000045	127	294,17	0,00000331	111
290,00	0,00001567	122	294,33	0,00000001	122
290,17	0,00000724	112	294,50	0,00000767	122
290,33	0,00000953	112	294,67	0,00000658	111
290,50	0,00000954	108	294,83	0,00000802	90
290,67	0,00000293	102	295,00	0,00000001	100
290,83	0,00000001	108	295,17	0,00000356	98
291,00	0,00000943	101	295,33	0,00000746	88
291,17	0,00000669	100	295,50	0,00000167	90
291,33	0,00000001	102	295,67	0,00001006	90
291,50	0,0000201	101	295,83	0,00000332	92
291,67	0,00000607	93	296,00	0,00000675	83
291,83	0,00000235	90	296,17	0,00000785	79
292,00	0,00000001	90	296,33	0,00000001	79
292,17	0,00000261	93	296,50	0,00000053	78

Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %	Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %
296,67	0,00000258	79	298,50	0,00000001	103
296,83	0,00000001	88	298,67	0,00000728	103
297,00	0,00000836	84	298,83	0,00000001	107
297,17	0,00000001	92	299,00	0,00000325	109
297,33	0,00000001	92	299,17	0,00000633	106
297,50	0,00001209	93	299,33	0,00000257	111
297,67	0,00000587	84	299,50	0,00000001	123
297,83	0,00000344	87	299,67	0,00000194	117
298,00	0,00000001	96	299,83	0,00000087	116
298,17	0,00000684	96	300,00	0,00000114	120
298,33	0,00000001	96			

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Методика стендового и функционального трибомониторинга восстановления рабочих поверхностей подшипников качения ремонтно-восстановительными составами

Д.1. Диагностический параметр для трибомониторинга

В качестве диагностического используется следующий параметр: нормированное интегральное время микроконтактирования (НИВ), являющееся оценкой среднего значения вероятности электрического микроконтактирования и численно равное отношению суммарной длительности микроконтактирований в зоне трения за некоторый интервал времени измерения параметра к значению этого интервала времени [49]:

$$K = \frac{1}{T_{И}} \sum_{1}^{n_T} (t_{ki} - t_{ni}), \quad (\text{Д.1})$$

где $T_{И}$ – время измерения;

n_T – число импульсов микроконтактирования за время $T_{И}$;

$t_{n(k)i}$ – время начала (конца) i -го импульса проводимости.

Д.2 Условия проведения трибомониторинга

При стендовом трибомониторинге все связанные с ним операции проводятся в лабораторных помещениях при нормальных климатических условиях:

- температура $15 \div 35$ °С;
- относительная влажность не более 80 % при 25 °С;
- атмосферное давление $84,0 \div 106,7$ кПа (630-800 мм. рт. ст.).

При функциональном трибомониторинге все связанные с ним операции проводятся при рабочих условиях эксплуатации.

Д.3 Оборудование для трибомониторинга

При стендовом трибомониторинге: универсальный стенд для диагностики подшипников [66], измеритель параметров электрического контактирования ИПЭК-1 [67], персональный компьютер.

При функциональном трибомониторинге: измеритель параметров электрического контактирования ИПЭК-1 [67], персональный компьютер.

Оборудование при стендовом трибомониторинге включает в себя электропривод, устройства нагружения подшипника, средства коммутации с объектом мониторинга (токосъемники), электронные средства диагностики.

Оборудование при функциональном трибомониторинге включает в себя средства коммутации с объектом мониторинга (токосъемники), электронные средства диагностики.

Общие требования к оборудованию: электропривод предназначен для вращения вала узла с определенной скоростью. Устройство нагружения должно создавать местное радиальное нагружение нужной величины хотя бы одного из колец подшипника. Средства коммутации необходимы для обеспечения надежного электрического контакта электронных средств трибомониторинга с элементами узла, электрически связанными с наружным и внутренним кольцами подшипника (корпусом и валом узла). Электронные средства трибомониторинга предназначены для измерения электрического диагностического параметра. А также для сбора и хранения данных.

Требования к электроприводу:

– электропривод должен обеспечивать вращение в диапазоне частот, перекрывающем диапазон эксплуатационных частот работы подшипников, для которых проводится трибомониторинг;

– наличие электроизоляционной муфты для присоединения вала подшипника для обеспечения электрической изоляции.

Требования к устройству нагружения: создание местного радиального

нагрузки нужной величины хотя бы одного из колец подшипника с регулированием F до значений, определяемых как:

$$F \leq C_{\delta} \left[0,5 \cdot G_{r \min} \cdot \left(\frac{1}{\cos(2\pi / Z)} - 1 \right) \right]^{1,5}, \quad (\text{Д.2})$$

где $G_{r \min}$ – минимальное значение радиального зазора подшипников;

Z – число тел качения в подшипнике;

C_{δ} – конструктивный коэффициент подшипника.

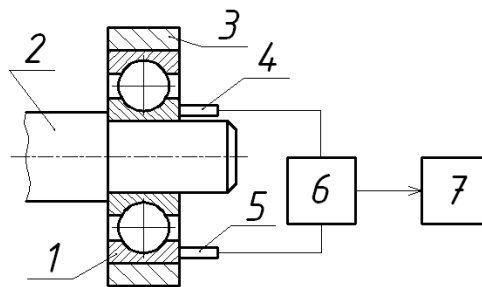
Требования к электронным средствам трибомониторинга:

– диагностическая система для измерения параметра НИВ приведена на рисунке Д.1, она включает измеритель параметров электрического контактирования ИПЭК-1 и персональный компьютер;

– электронные средства диагностики должны осуществлять измерение параметра согласно выражению Д.1;

– диапазон измерения K должен быть от 0 до 1;

– устройство для измерения параметра НИВ должно обеспечивать учет импульсов микроконтактирования с длительностью от 1 мкс.



1 – диагностируемый подшипник; 2 – вал узла; 3 – корпус узла;

4, 5 – средства коммутации; 6 – ИПЭК-1; 7 – ПК

Рисунок Д.1 – Схема подключения диагностической системы для оценки параметра НИВ

Требования к средствам коммутации:

– обеспечение надежного электрического контакта электронных средств ди-

агностики с элементами узла (например, корпусом и валом). Уровень флуктуаций переходного сопротивления не должен превышать 1 Ом;

– для обеспечения контакта с неподвижными элементами узла использовать винтовые соединения, либо пружинные зажимы;

– для обеспечения контакта с подвижным элементом узла рекомендуется использовать скользящий токосъемник. Для повышения надежности применять две или четыре параллельно подключенные щетки, расположенные диаметрально противоположно.

Д.4 Подготовка к трибомониторингу

Подготовка при стендовом трибомониторинге включает в себя следующее:

– узел (подшипник) устанавливают на стенд;

– с помощью устройства нагружения создают необходимую нагрузку;

– с помощью средств коммутации подключают электронные средства трибомониторинга к элементам узла. Данные элементы электрически связаны с кольцами контролируемого подшипника;

– используя эксплуатационную документацию, подготавливают электропривод и электронные средства трибомониторинга.

Подготовка при функциональном трибомониторинге включает в себя следующее:

– с помощью средств коммутации подключают электронные средства трибомониторинга к элементам узла. Данные элементы электрически связаны с кольцами контролируемого подшипника;

– используя эксплуатационную документацию, подготавливают электронные средства трибомониторинга.

Д.5 Предварительный трибомониторинг состояния поверхности подшипника с использованием стандартного смазочного материала

При стендовом трибомониторинге включает в себя следующие процедуры:

– после промывки и обсушки в подшипник помещают стандартный смазочный материал, в количестве, соответствующем нормальному режиму эксплуатации;

– подшипник устанавливают на стенд;

– подключают устройства нагружения и электронные средства трибомониторинга;

– устанавливают требуемые значения нагрузки и частот вращения колец (они должны соответствовать эксплуатационным);

– производят технологическую обкатку подшипника в течение заданного времени t_1 с непрерывной регистрацией значений диагностического параметра НИВ – K_1 .

При функциональном трибомониторинге включает в себя следующие процедуры:

– подключают электронные средства трибомониторинга;

– устанавливают требуемые значения нагрузки и частот вращения колец (эксплуатационные);

– производят технологическую обкатку подшипника в течение заданного времени t_1 с непрерывной регистрацией значений диагностического параметра НИВ – K_1 .

Д.6 Трибомониторинг состояния поверхности подшипника с добавлением к стандартному смазочному материалу ремонтно-восстановительного состава

При стендовом трибомониторинге включает в себя следующие процедуры:

– промывают и обсушивают подшипник;

- смешивают в соотношении 1:10 РВС и стандартный смазочный материал;
- помещают полученную смазочную композицию в подшипник в количестве, соответствующем нормальному режиму эксплуатации;
- подшипник устанавливают на стенд;
- подключают устройства нагружения и электронные средства трибомониторинга;
- устанавливают требуемые значения нагрузки и частот вращения колец (они должны соответствовать эксплуатационным);
- производят обкатку подшипника в течение времени t_2 с непрерывным мониторингом значений диагностического параметра НИВ – K_2 ;
- полученные результаты измерения диагностического параметра K_1 и K_2 обрабатывают следующим образом: вычисляют коэффициенты вариации v_1 и v_2 по 20-ти точкам;
- по результатам сравнения коэффициентов вариации v_1 и v_2 делается вывод об эффективности ремонтного восстановления.

При функциональном трибомониторинге включает в себя следующие процедуры:

- добавляют в смазочную систему узла РВС в количестве 10 % от количества стандартного смазочного материала;
- подключают электронные средства трибомониторинга;
- устанавливают требуемые значения нагрузки и частот вращения колец (эксплуатационные);
- производят обкатку подшипника в течение времени t_2 с непрерывным мониторингом значений диагностического параметра НИВ – K_2 ;
- полученные результаты измерения диагностического параметра K_1 и K_2 обрабатывают следующим образом: вычисляют коэффициенты вариации v_1 и v_2 по 20-ти точкам;
- по результатам сравнения коэффициентов вариации v_1 и v_2 делается вывод об эффективности ремонтного восстановления.

Д.7 Требования к представлению результатов трибомониторинга

Результаты должны содержать следующие данные:

- дату проведения трибомониторинга;
- наименование подшипника, подлежащего ремонтному восстановлению:
условное обозначение, стандарт;
- конструктивные параметры подшипника: диаметр отверстия внутреннего кольца d , наружный диаметр наружного кольца D , диаметр тел качения D_w , число тел качения Z ;
- вид и количество (объем V) смазочного материала;
- вид и количество используемого РВС;
- нагрузка F ;
- наименование электронных средств диагностики;
- режимы мониторинга подшипника: частоты вращения вала ω_s , время t_1 и t_2 , время измерения контролируемого параметра $T_{и}$;
- значения измеряемого параметра, представленные в виде диаграмм;
- значения коэффициентов вариации измеряемого параметра, представленные в виде диаграмм;
- заключение о результатах.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Результаты экспериментальных исследований процессов восстановления
подшипников типоразмера 208

Таблица Е.1 – Изменение значений параметра НИВ в процессе
предварительной обкатки с литол-24

Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %	Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %
700,17	0,00001173	112	703,50	0,00001118	110
700,33	0,00001086	111	703,67	0,00000580	114
700,50	0,00003523	107	703,83	0,00000988	120
700,67	0,00022227	137	704,00	0,00002214	126
700,83	0,00007393	132	704,17	0,00017455	119
701,00	0,00005100	131	704,33	0,00002367	117
701,17	0,00000876	131	704,50	0,00001839	117
701,33	0,00003076	128	704,67	0,00004870	114
701,50	0,00018543	129	704,83	0,00007888	108
701,67	0,00008131	127	705,00	0,00001348	108
701,83	0,00001338	127	705,17	0,00001191	107
702,00	0,00018501	123	705,33	0,00002452	106
702,17	0,00005506	120	705,50	0,00001085	108
702,33	0,00025940	123	705,67	0,00001843	112
702,50	0,00017637	117	705,83	0,00003886	114
702,67	0,00017766	111	706,00	0,00003161	116
702,83	0,00012312	107	706,17	0,00004543	113
703,00	0,00001272	107	706,33	0,00003311	112
703,17	0,00002171	106	706,50	0,00009255	112
703,33	0,00000386	106	706,67	0,00013655	111

Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %	Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %
706,83	0,00003014	110	711,17	0,00012027	68
707,00	0,00002247	114	711,33	0,00003065	68
707,17	0,00008000	112	711,50	0,00001212	72
707,33	0,00002152	107	711,67	0,00001317	76
707,50	0,00002700	107	711,83	0,00001922	77
707,67	0,00023310	115	712,00	0,00002023	77
707,83	0,00013070	115	712,17	0,00004104	79
708,00	0,00001440	115	712,33	0,00007990	76
708,17	0,00013910	110	712,50	0,00014000	73
708,33	0,00007564	104	712,67	0,00017920	69
708,50	0,00005331	101	712,83	0,00008150	70
708,67	0,00009369	95	713,00	0,00002113	69
708,83	0,00003225	93	713,17	0,00018630	71
709,00	0,00001576	94	713,33	0,00001362	74
709,17	0,00016485	93	713,50	0,00002224	76
709,33	0,00021291	94	713,67	0,00001739	80
709,50	0,00016939	90	713,83	0,00002543	81
709,67	0,00009783	88	714,00	0,00003476	79
709,83	0,00010099	88	714,17	0,00004442	81
710,00	0,00005987	84	714,33	0,00000695	81
710,17	0,00006062	81	714,50	0,00002204	82
710,33	0,00008252	78	714,67	0,00001425	86
710,50	0,00009840	74	714,83	0,00002256	90
710,67	0,00008590	70	715,00	0,00002700	92
710,83	0,00003287	71	715,17	0,00003285	94
711,00	0,00004632	70	715,33	0,00001099	99

Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %	Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %
715,50	0,00000721	105	717,83	0,00003666	137
715,67	0,00006769	105	718,00	0,00001063	137
715,83	0,00001864	107	718,17	0,00008890	130
716,00	0,00001015	111	718,33	0,00020100	127
716,17	0,00000983	116	718,50	0,00002327	126
716,33	0,00000859	119	718,67	0,00001847	127
716,50	0,00002804	117	718,83	0,00006433	125
716,67	0,00002388	116	719,00	0,00006308	123
716,83	0,00002540	115	719,17	0,00001074	123
717,00	0,00000750	117	719,33	0,00001373	124
717,17	0,00012340	115	719,50	0,00000730	125
717,33	0,00005500	116	719,67	0,00011270	119
717,50	0,00017390	119	719,83	0,00006148	116
717,67	0,00028000	134	720,00	0,00001063	137

Таблица Е.2 – Изменение значений параметра НИВ в процессе ремонтного восстановления

Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %	Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %
700,17	0,00000001	174	704,17	0,00000107	145
700,33	0,00000056	170	704,33	0,00000001	155
700,50	0,00000001	170	704,50	0,00000347	144
700,67	0,00000040	174	704,67	0,00000083	139
700,83	0,00000001	174	704,83	0,00000001	139
701,00	0,00000225	162	705,00	0,00000001	149
701,17	0,00000109	167	705,17	0,00000125	142
701,33	0,00000300	158	705,33	0,00000074	141
701,50	0,00000001	158	705,50	0,00000001	141
701,67	0,00000105	151	705,67	0,00000194	134
701,83	0,00000001	151	705,83	0,00000304	125
702,00	0,00000001	152	706,00	0,00000001	134
702,17	0,00000215	141	706,17	0,00000001	140
702,33	0,00000066	139	706,33	0,00000019	150
702,50	0,00000204	130	706,50	0,00000574	146
702,67	0,00000502	127	706,67	0,00000001	152
702,83	0,00000001	136	706,83	0,00000001	152
703,00	0,00000001	136	707,00	0,00000001	152
703,17	0,00000001	142	707,17	0,00000025	161
703,33	0,00000001	142	707,33	0,00000001	165
703,50	0,00000389	141	707,50	0,00000001	177
703,67	0,00000001	141	707,67	0,00000001	191
703,83	0,00000001	141	707,83	0,00000001	191
704,00	0,00000001	141	708,00	0,00000001	191

Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %	Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %
708,17	0,00000001	191	712,50	0,00000055	147
708,33	0,00000001	191	712,67	0,00000001	147
708,50	0,00000001	211	712,83	0,00000001	147
708,67	0,00000227	192	713,00	0,00000001	147
708,83	0,00000029	189	713,17	0,00000001	147
709,00	0,00000001	189	713,33	0,00000001	147
709,17	0,00000001	200	713,50	0,00000279	141
709,33	0,00000139	187	713,67	0,00000001	151
709,50	0,00000001	206	713,83	0,00000015	153
709,67	0,00000094	205	714,00	0,00000124	142
709,83	0,00000001	205	714,17	0,00000001	142
710,00	0,00000001	205	714,33	0,00000365	152
710,17	0,00000001	220	714,50	0,00000467	153
710,33	0,00000020	227	714,67	0,00000001	160
710,50	0,00000135	211	714,83	0,00000001	160
710,67	0,00000157	213	715,00	0,00000030	157
710,83	0,00000084	227	715,17	0,00000001	157
711,00	0,00000001	227	715,33	0,00000250	147
711,17	0,00000001	227	715,50	0,00000001	156
711,33	0,00000264	206	715,67	0,00000001	167
711,50	0,00000076	172	715,83	0,00000020	172
711,67	0,00000157	158	716,00	0,00000001	172
711,83	0,00000001	158	716,17	0,00000001	172
712,00	0,00000070	150	716,33	0,00000144	176
712,17	0,00000001	153	716,50	0,00000042	179
712,33	0,00000001	153	716,67	0,00000001	192

Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %	Время, мин	НИВ	Коэффициент вариации, %
716,83	0,00000001	192	718,50	0,00000001	167
717,00	0,00000001	201	718,67	0,00000001	167
717,17	0,00000105	189	718,83	0,00000001	168
717,33	0,00000014	188	719,00	0,00000001	177
717,50	0,00000282	177	719,17	0,00000335	162
717,67	0,00000572	171	719,33	0,00000001	177
717,83	0,00000223	159	719,50	0,00000564	181
718,00	0,00000076	154	719,67	0,00000001	181
718,17	0,00000001	154	719,83	0,00000215	168
718,33	0,00000001	154	720,00	0,00000001	170