

**Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
“Донецкий национальный технический университет”**

На правах рукописи

Сидоров Владимир Анатольевич

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ БЕЗОТКАЗНОСТИ**

Специальность 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы
(металлургия)»

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук**

Донецк - 2016

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, г. Донецк.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
СЕДУШ Виктор Яковлевич

Официальные оппоненты: АРТЮХ Виктор Геннадиевич,
доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, профессор кафедры «Сопроотивление материалов».

ГОРИН Александр Николаевич,
доктор технических наук, профессор
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского», заведующий кафедрой «Холодильная и торговая техника»;

ПЕНЧУК Валентин Алексеевич,
доктор технических наук, профессор
ГОУ ВПО «Донецкая национальная академия строительства и архитектуры», заведующий кафедрой «Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование»;

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Донбасский государственный технический университет».

Защита состоится «___» _____ 2016 года в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 01.019.03 при ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, I учебный корпус, малый актовый зал.

Тел. факс: +380 (62) 304-30-55, эл. почта: vchenarada@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке организации по адресу: ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, II учебный корпус, интернет <http://donntu.org>.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 01.019.03, д.т.н., проф. А.В. Яковченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Современный этап развития черной металлургии характеризуется появлением новых технологических агрегатов и линий. Совмещение возможностей электродуговых печей и литейно-прокатных агрегатов при помощи установки «печь-ковш» позволяет получить практически непрерывный технологический процесс. Непрерывность данного технологического процесса во многом обеспечивается безотказностью работы комплекса металлургических машин. На этапе эксплуатации безотказность работы металлургических машин достигается путём своевременного проведения технического обслуживания и обоснованных ремонтов во время плановых остановок. Следовательно, проблема обеспечения безотказности металлургических машин на этапе эксплуатации становится наиболее актуальной и требует решения в рамках существующей структуры ремонтных служб для достижения эффективной работы металлургических агрегатов.

Эффективное решение данной проблемы возможно на основе информации о техническом состоянии, получаемой путём технического диагностирования. Наличие данной информации обеспечивает возможность перехода на ремонты по состоянию, предполагая своевременное проведение ремонтов в необходимом объёме. Развитие теории технического диагностирования с учётом специфических особенностей эксплуатации металлургических машин для обеспечения непрерывности технологического процесса электросталеплавильных и литейно-прокатных комплексов является основным содержанием данной работы.

Степень разработанности темы. Современная мировая тенденция совершенствования технического обслуживания и ремонта оборудования предполагает использование информации о техническом состоянии оборудования, полученной методами технической диагностики, для повышения эффективности восстановления работоспособного состояния механизмов с минимальными затратами материальных ресурсов и времени. Повышение эффективности восстановления происходит за счет более полного использования ресурса, своевременного проведения ремонта и оценки качества выполненных ремонтных работ. Исключение внеплановых простоев повышает эффективность работы комплекса металлургических машин.

В открытых зарубежных и отечественных источниках информации присутствуют данные о работах по техническому диагностированию машин металлургического комплекса, работающих в непрерывном режиме. Вопросам, диагностирования металлургических машин посвящены труды Большакова В.И., Веренева В.В., Кияновского Н.В. Работы связанные с комплексными исследованиями, общими подходами к решению проблемы технического диагностирования металлургических машин практически отсутствуют.

Цель работы. Цель диссертационной работы заключается в определении форм проявления технических состояний, специфических для металлургических машин, определении закономерностей развития повреждений элементов механизмов и разработке правил оценки технического состояния для обеспечения безотказности металлургических машин в процессе эксплуатации, разноплановых относительно ди-

агностирования технического состояния, имеющих различные условия эксплуатации и работающих в составе электросталеплавильных и литейно-прокатных комплексов.

Задачи исследования:

- определить научные основы технической диагностики машин, требующие развития для оценки технического состояния металлургических машин с учётом особенностей конструкции и условий эксплуатации;
- оценить эффективность диагностических признаков технического состояния низкооборотных тяжело нагруженных опорных колец механизмов;
- выявить методы определения технического состояния реверсивных механизмов, работающих в кратковременном и повторно-кратковременном режиме;
- установить диагностические признаки и границы работоспособного состояния шарнирных механизмов, работающих в колебательном режиме;
- развить теоретические основы виброметрии для оценки состояния комбинированных редукторов привода прокатных клетей непрерывных станов;
- развить теоретические представления о техническом диагностировании металлургических машин путём синтеза технического состояния сопрягаемых деталей металлургических машин в универсальной диагностической матрице и уточнении содержания термина «техническое состояние»;
- разработать теоретические принципы обеспечения безотказности металлургических машин в процессе эксплуатации путём использования информации о техническом состоянии с оценкой эффективности при практическом использовании ремонтными службами металлургических предприятий.

Объект исследования. Техническое состояние металлургических машин, определяющих непрерывность технологического процесса электросталеплавильных и литейно-прокатных комплексов.

Предмет исследования. Диагностические параметры технического состояния металлургических машин.

Научная новизна полученных результатов. Научную новизну диссертации представляют следующие ее положения:

1. Впервые разработаны теоретические положения метода оценки технического состояния металлургических машин по комплексу диагностических параметров, для которых определены допустимые диапазоны изменения. Техническое состояние относительно действующих режимов работы определено как степень соответствия уровней внутренних параметров механической системы внешним воздействиям и необходимости компенсации потери работоспособности путём проведения ремонтных операций, проявляемое при изменении внешних параметров. В качестве таких параметров предложено использовать комплексные диагностические показатели: коэффициент увеличения параметров вибрации рабочего и холостого хода, единичный показатель вибропараметров, отношение давлений в полостях гидроцилиндра при их последовательной работе. Метод учитывает отклонения диагностических параметров от средних значений и соотношения параметров при режимах холостого и рабочего хода, а также при последовательной работе элементов механизма.

2. Впервые установлены значения диагностических параметров, определяющих границы категорий технического состояния, и допустимых диапазонов их изменения в соответствии с необходимостью проведения работ по ремонту или техническому обслуживанию для элементов машин, определяющих непрерывность технологического процесса электросталеплавильных и литейно-прокатных комплексов: опорного кольца механизма поворота свода электродуговой печи, механизма подъема литейного крана, привода столов качания машины непрерывного литья заготовки, комбинированных редукторов привода прокатных клетей непрерывных станов.

3. Впервые предложен метод диагностирования и локализации мест повреждений элементов механизма подъема литейного крана при совместном анализе: отклонений значений коэффициента полезного действия при изменении скоростного режима и степени загрузки механизма от эталонного значения; отклонений комплексного параметра вибрации, учитывающего значения виброперемещения, виброскорости и виброускорения от установленных границ единичных показателей, позволяющих определить категорию технического состояния, изменения характерной картины спектральных составляющих и визуального определения характера повреждения, на основании установленных соответствий между признаками повреждений и необходимыми ремонтными операциями. Предложено использовать два уровня контроля: предварительного предупреждения и диагностирования повреждений.

4. Впервые установлены количественные и качественные закономерности возникновения и развития ускоренного износа опорного кольца механизма поворота свода электродуговой печи, приводящие к внезапным отказам. Установлено одновременное действие нескольких причин: интенсивное окисление смазочного материала в результате повышенной температуры в поворотной колонне; образование застойных зон в конструкции подшипника, недоступных для эффективного смазывания; осповидный износ, возникающий при работе электрической дуги в процессе плавки; накопление продуктов износа в смазочном материале и как следствие интенсивного абразивного изнашивания.

5. Впервые разработан новый метод синтеза технического состояния сопрягаемых деталей металлургических машин на базе установленных диагностических признаков развития повреждений и закономерностей изменения соответствующих диагностических параметров. Вначале выбираются факторы, определяющие работоспособное состояние конкретного элемента из следующего перечня: неподвижность соединения; вид узла трения; взаимное расположение деталей; характер распределения сил; накопление усталостных повреждений. Затем, устанавливается уровень работоспособного состояния: исправного, малых отклонений, необходимости проведения ремонтных операций и предотказного, определяемого как потеря контроля над техническим состоянием.

Уровни работоспособного состояния определяются процессами изнашивания, что приводит к ступенчатому изменению диагностических параметров при изменении технического состояния. Факторы и уровни факторов, определяющих работоспособное состояние сопрягаемых деталей металлургических машин представлены

в виде универсальной диагностической матрицы синтеза технического состояния элементов механизмов.

6. Впервые дана формулировка современной стратегии технического обслуживания и ремонта, определяющая целевую функцию ремонтной службы металлургического предприятия как стабилизацию технического состояния оборудования в рассматриваемом временном интервале, которую предложено реализовывать путём проведения упреждающих технического обслуживания и ремонта, соответствующих фактическому состоянию механизма.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость заключается в следующем:

- получили развитие теоретические положения метода оценки технического состояния металлургических машин по комплексу диагностических параметров, для которых определены допустимые диапазоны изменения;

- установлены значения диагностических параметров, определяющих границы категорий технического состояния и допустимых диапазонов их изменения, соответственно к необходимости проведения работ по ремонту или техническому обслуживанию для элементов машин. Полученные данные предоставляют возможность усовершенствования моделей развития повреждений и прогнозирования отказа;

- установленные количественные и качественные закономерности возникновения и развития ускоренного износа опорного кольца механизма поворота свода электродуговой печи. Полученные закономерности дают возможность выявить направления изменения конструкции механизма поворота для повышения долговечности и усовершенствовать методы расчёта элементов механизмов по параметрам эксплуатационной надёжности при использовании моделей развития повреждений относительно действия нескольких причин;

- метод синтеза технического состояния сопрягаемых деталей металлургических машин на базе установленных диагностических признаков развития повреждений и закономерностей изменения соответствующих диагностических параметров. Усовершенствование метода позволяет обеспечить решение вопросов разработки обоснованных нормативов технического обслуживания и ремонта механического оборудования, эксплуатируемого с учетом фактического состояния механизмов.

Практическая значимость полученных результатов подтверждена повышением безотказности металлургических машин на предприятиях чёрной металлургии, использованием результатов работы при формировании службы технического диагностирования и обучении специалистов промышленных предприятий методам безразборного технического диагностирования: ОАО «Миттал Стил Кривой Рог», ОАО «ММК им. Ильича», ЗАО «Донецксталь - МЗ», ЗАО «Макеевский МЗ», ОАО «Харьковский трубный завод», ОАО «Восточный ГОК», ОАО «Крымский титан», ЗАО «Укрграфит», ОАО «Авдеевский коксохимический завод», ОАО «Алчевсккокс». Положение информационных основ виброметрии, представленные в диссертации, использовались при разработке стационарной системы контроля вибрационных параметров прокатных станков 390 Макеевский филиал ПАО «ЕМЗ» и чистового блока 150 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог».

Результаты проведенных исследований использовались при разработке алгоритмов диагностирования для определения технического состояния элементов ма-

шин, которые определяют непрерывность технологического процесса электросталеплавильных и литейно-прокатных комплексов:

- низкооборотных тяжелонагруженных опорных колец механизмов поворота свода электродуговой печи и стенда машины непрерывного литья слитков;
- механизмов, работающих в кратковременном и повторно-кратковременном режимах – механизмов подъема литейного крана, скиповой лебедки;
- шарнирных механизмов, работающих в колебательном режиме - стола качания машины непрерывного литья слитков;
- механизмов с переменными нагрузками и переменной частотой вращения - комбинированных редукторов привода прокатных клетей непрерывного прокатного стана, шестеренных клетей.

Полученные результаты стали основой методик переданных для использования службам технического диагностирования металлургических предприятий при оценке технического состояния и обучении специалистов предприятий методам безразборного технического диагностирования.

Методология и методы исследования. Теоретической и методической основой исследований послужили современные достижения в области технической диагностики, теории распознавания и контролепригодности. В экспериментальных исследованиях использовалась современная виброизмерительная аппаратура и тепловизоры. Обработка результатов исследований проводилась с применением методов математической статистики. Для исследования диагностических параметров технического состояния использовались: методы ваттметрии, виброметрии (включая: измерение общего уровня вибрации, спектральный анализ, анализ временного сигнала вибрации), термометрии. При определении закономерностей развития и идентификации причин повреждений использовались методы фрактографии.

Основные положения, выносимые на защиту.

- значения диагностических параметров, определяющих границы категорий технического состояния и допустимых диапазонов их изменения, соответственно к необходимости проведения работ по ремонту или техническому обслуживанию для элементов машин;
- количественные и качественные закономерности возникновения и развития износа опорного кольца механизма поворота свода электродуговой печи;
- метод диагностирования и локализации мест повреждений элементов механизма подъема литейного крана при совместном анализе: отклонений значений коэффициента полезного действия при изменении скоростного режима и степени загрузки механизма от эталонного значения; отклонений комплексного параметра вибрации, учитывающего значения виброперемещения, виброскорости и виброускорения от установленных границ единичных показателей, позволяющих определить категорию технического состояния, изменения характерной картины спектральных составляющих и визуального определения характера повреждения, на основании установленных соответствий между признаками повреждений и необходимыми ремонтными операциями;
- метод диагностирования технического состояния привода столов качания машины непрерывного литья заготовок на основании: контроля параметров механических колебаний стола качания и кристаллизатора в одной контрольной точке в вер-

тикальном направлении, контроля продольных и поперечных колебаний стола качания, анализа временных форм вибрации: виброперемещения и виброускорения, использования комплексных показателей: определение радиуса качания кристаллизатора, синхронности работы пневмоамортизаторов;

- метод синтеза технического состояния сопрягаемых деталей металлургических машин на базе установленных диагностических признаков развития повреждений и закономерностей изменения соответствующих диагностических параметров. Усовершенствование метода позволяет обеспечить решение вопросов разработки обоснованных нормативов технического обслуживания и ремонта оборудования, эксплуатируемого с учетом фактического состояния элементов механизмов.

Степень достоверности и апробация результатов работы.

Исследования выполнены с использованием современной измерительной аппаратуры. Для исследования диагностических параметров технического состояния использовались: методы ватметрии, виброметрии (включая: измерение общего уровня вибрации, спектральный анализ и анализ временного сигнала вибрации), термометрии. Достоверность полученных научных положений, выводов и рекомендаций основана на использовании классических подходов к определению технического состояния механического оборудования; обоснованности примененных методов технического диагностирования; совпадения установленных диагнозов с результатами фактического состояния промышленного оборудования.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на: научно-практической отраслевой конференции «Системы автоматизированного управления производствами, предприятиями и организациями горно-металлургического комплекса» (г. Старый Оскол, 2003); 2-й международной научно-технической конференции «Вибрация машин: измерение, снижение, защита» (г. Донецк, 2004); международной научно-технической конференции «Проблемы механики горно-металлургического комплекса» (г. Днепропетровск, 2004); международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, 2003, 2005, 2007, 2011 г.); международной конференции «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях» (п. Славское, 2005, 2006, 2007, 2009, 2010); международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» (г. Ялта, 2004, 2005, 2006, 2009, 2010, 2012); международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (г. Севастополь, 2011, 2012, 2013); всеукраинский форум «Стратегия оптимизации ТОиР механического оборудования в ГМК: идеологии, практика повышения эффективности, инструменты» (г. Киев, 2008, 2011, 2012, 2013); международной научно-технической конференции «Теория и практика технического диагностирования оборудования предприятий горно-металлургического и энергетического комплексов» (г. Мариуполь, 2012); международной научно-технической конференции «Современные тенденции ТОиР. Диагностика оборудования горно-металлургических и энергетических комплексов» (г. Мариуполь, 2013); I международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в чёрной металлургии» (г. Череповец, 2013 г.); международной научно-технической конференции «Надійність металургійного обладнання»

(г. Днепропетровск, 2013), ежегодных научно-практических семинарах «Теория и практика ремонтного производства промышленного предприятия» проводимых на факультете инженерной механики и машиностроения; на научно-технических семинарах кафедр ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк. 2000 - 2013 г.г.).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе «Состояние научно-технической проблемы обеспечения безотказности и теоретические основы технического диагностирования металлургических машин» последовательно рассмотрены основные направления в исследовании надёжности и повышении безотказности металлургических машин, стратегии ремонта металлургического оборудования, особенности металлургических машин и выбор объектов исследования, приведено содержание основных теорий технической диагностики, выполнен обзор методов и средств технического диагностирования, проанализированы теоретические основы диагностирования механического оборудования, сформулированы методологические требования к диагностированию технического состояния металлургических машин.

Вопросы надёжности механического оборудования металлургических предприятий, как неотъемлемого элемента технологического процесса, особый интерес вызвали в 60-х...70-х годах прошлого века. Это связано с техническим перевооружением металлургической отрасли, появлением новых технологий и разработкой уникального оборудования для реализации технологического процесса.

В работах Гребеника В.М., Гордиенко А.В., Цапко В.К., Седуша В.Я. того времени формулируются принципы сбора, цифрового кодирования и анализа отказов. Работы Большакова В.И., Белодеденко С.В., Веренева В.В., Артюха В.Г., Ловчиновского Э.В., Плахтина В.Д., Сопилкина Г.В., Кравченко В.М., Кияновского Н.В., Учителя А.Д. посвящены различным аспектам повышения безотказности механического оборудования. В первую очередь выделяются вопросы технического диагностирования, изучения вопросов надёжности и защиты от поломок металлургических машин.

Знание фактического состояния объекта создает принципиально новые предпосылки управления работоспособным состоянием оборудования, существенно меняет стратегию ремонтных служб, ориентируя её не только на своевременную замену, а на преобладание качественного технического обслуживания.

В качестве объектов исследования для изучения закономерностей изменения технического состояния в процессе эксплуатации и возможности повышения их безотказности, выбраны машины, обладающие различными, но характерными для комплекса металлургических машин параметрами. В частности: определялись диагностические признаки и причины повреждений низкооборотных тяжело нагруженных опорных колец механизмов; проводилась оценка технического состояния реверсивных механизмов, работающих в кратковременном и повторно-кратковременном режиме; устанавливались диагностические признаки и границы работоспособного состояния шарнирных механизмов, работающих в колебательном режиме; определялась возможность использования вибрационных параметров для диагностирования механизмов, работающих при переменных нагрузках. Выбраны: механизм поворота

свода электродуговой печи; механизм подъема литейных кранов, столы качания кристаллизаторов МНЛЗ, комбинированные редукторы привода прокатных клетей.

Объект диагностирования при решении задачи распознавания технического состояния объекта рассматривается как преобразователь входных параметров в выходные, определяющие возможность выполнения возложенных на объект функций. Преобразование входных параметров в выходные происходит благодаря внутренним параметрам механизма. Функционирование механизма сопровождается изменением и проявлением физических полей (тепловых, акустических, вибрационных), косвенно связанных с внутренними параметрами механизма.

Представим n входных параметров x_1, x_2, \dots, x_n n -мерным вектором X , аналогично m входных параметров y_1, y_2, \dots, y_m m -мерным вектором Y , а k входных параметров z_1, z_2, \dots, z_k k -мерным вектором Z . Тогда, преобразование входных параметров в выходные может быть рассмотрено в виде уравнения:

$$Z = f(Y, t)X, (1)$$

где $f(Y, t)$ - оператор, характеризующий преобразования, осуществляемые в системе с величинами X для получения величин Z при значениях величин Y на момент времени t . Фактически оператор $f(Y, t)$ является диагностической моделью, которая может быть представлена в аналитическом, графическом или табличном виде.

Наибольшее распространение при диагностировании механического оборудования получило использование матриц неисправностей, объединяющих представление знаний о состоянии объекта в виде диагностических правил и логических выводов типа «если ..., то...». Диагностическая модель объекта представляется матрицей, определяющей соответствие между значениями диагностических параметров (симптомов) S_1, S_2, \dots, S_i и возможными неисправностями E_1, E_2, \dots, E_j (рисунок 1).

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
E_1	0	0	1	0	1	1	0
E_2	1	1	0	1	1	0	1
E_3	0	1	1	1	0	0	0
E_4	0	0	0	0	1	1	1
E_5	1	0	1	0	1	0	1
E_6	0	1	0	1	0	1	0
E_7	1	0	0	1	1	0	1

Рисунок 1 -Диагностическая модель объекта, представленная матрицей

Разработка принципов диагностирования механизмов роторного типа, работающих в длительном режиме, по параметрам вибрации выполнено в работах Русова В.А., Ширмана А.Р., Соловьева А.Б., Лукьянова А.В., Гольдина А.С., Баркова А.В., Барковой Н.А. В работах Макарова Р.А., Коллакота Р.А., Голуба Е.С., Мадорско-

го Е.З. рассматривается необходимость комплексного подхода к оценке технического состояния механического оборудования при использовании взаимодополняющих диагностических параметров. Относительно диагностирования металлургических машин обобщающие принципы оценки технического состояния отсутствуют.

На основании проведенного обзора сформулированы методологические требования к диагностированию технического состояния металлургических машин.

1. Реализация при помощи существующих методов и средств диагностирования.
2. Оценка технического состояния по комплексу параметров с учётом особенностей конструкции и условий эксплуатации металлургических машин.
3. Определение допустимых диапазонов изменения значений диагностических параметров и границ категорий технического состояния металлургических машин.
4. Определение признаков развития повреждений типовых узлов для синтеза технического состояния существующих и разрабатываемых конструкций.
5. Обеспечение использования данных о техническом состоянии при организации и контроле качества проводимых ремонтов.

Во втором разделе «Определение диагностических признаков и причин повреждений низкооборотных тяжело нагруженных опорных колец механизмов» проведены: определение диагностических признаков технического состояния опорного кольца механизма поворота свода электродуговой печи, определение причин ускоренного износа опорного кольца, последовательность диагностирования опорного кольца поворотного стенда машины непрерывного литья заготовок.

Механизм поворота свода - один из основных механизмов современной электродуговой печи. Работа опорного кольца связана с частыми поворотами, односторонним воздействием высокой температуры раскаленного свода, консольной и вертикальной нагрузки. Во время проведения плавки осуществляется 2...3 цикла по отвороту и навороту свода печи для загрузки металлолома.

Для исключения внезапных отказов, прогнозирования износа и контроля технического состояния проведены исследования ряда диагностических параметров: линейного износа, давления в полостях приводного гидроцилиндра, вибрационных параметров опорного кольца, температуры опорного кольца.

Определение скорости износа выполнялось при измерении расстояния от поворотного кольца до неподвижных фиксированных баз. Допустимый износ опорного кольца определяется допустимым перекосом колец из-за износа беговых дорожек - не более 0,002 их диаметра (0,2 мм на 0,1 м). Фактический износ - выше в 2,0 раза. Скорость износа при длительной эксплуатации - 0...0,1 мм/месяц. Скорость износа в зоне ускоренного износа - 0,5...1,5 мм/месяц и зависит от состояния контактирующих поверхностей, действующих сил и качества смазывания.

Анализ давления в полостях гидроцилиндра осуществлялся на основании графиков параметров движения свода. Предложено использовать комплексный диагностический параметр - отношение давления при отвороте P_O к давлению при навороте P_H за цикл движения. Стабилизация данного параметра в границах 1,2...1,35 при теоретическом значении 1,69 определяет зону удовлетворительного состояния. При ухудшении состояния теряется стабильность параметра (рисунок 2).

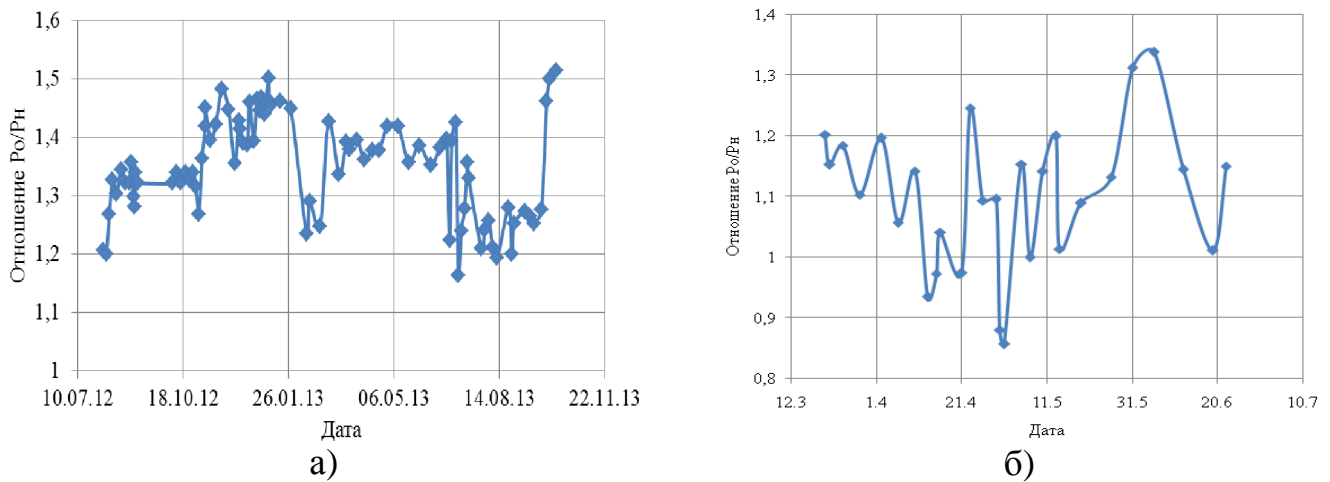


Рисунок 2 – График изменения диагностического параметра P_O/P_H для опорного кольца: а) исправного; б) неисправного

Осмотр поврежденных элементов опорного кольца проводился после демонтажа. Установлено преобладание абразивного износа при наличии осповидного выкрашивания. Износ верхнего поворотного кольца опорного подшипника больше, чем износ неподвижного кольца. Зависимость между износом и удалением от наиболее нагруженной зоны носит линейный характер и выражается функцией:

$$y_B = 0,176x + 17,1 \text{ с коэффициентом корреляции } R = 0,966; (2)$$

$$y_H = -0,031x + 5,275 \text{ с коэффициентом корреляции } R = 0,972; (3)$$

где y_B , y_H – износ верхнего и нижнего колец; x – угловая координата.

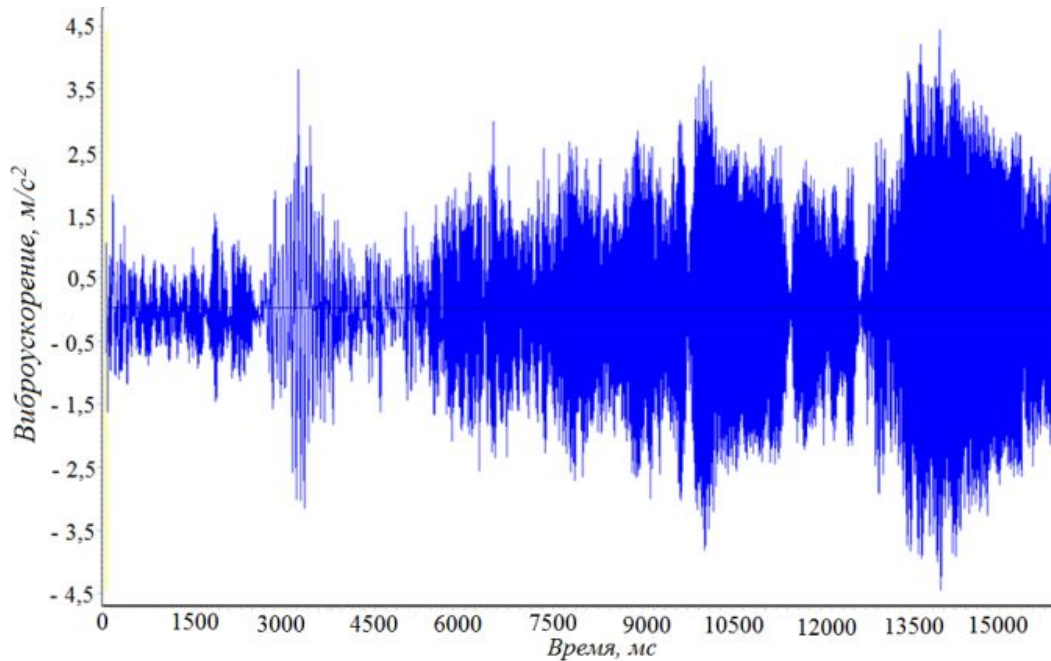
Измерения вибрационных параметров опорного кольца проведены для оценки состояния опорного кольца и действующих сил во время плавки.

На *первом этапе* целью измерения вибрационных параметров являлась оценка технического состояния опорного кольца. Проводились измерения временного сигнала виброускорения при помощи спектроанализатора вибрации на опорном кольце механизма поворота при открытии и закрытии свода. Полученные результаты:

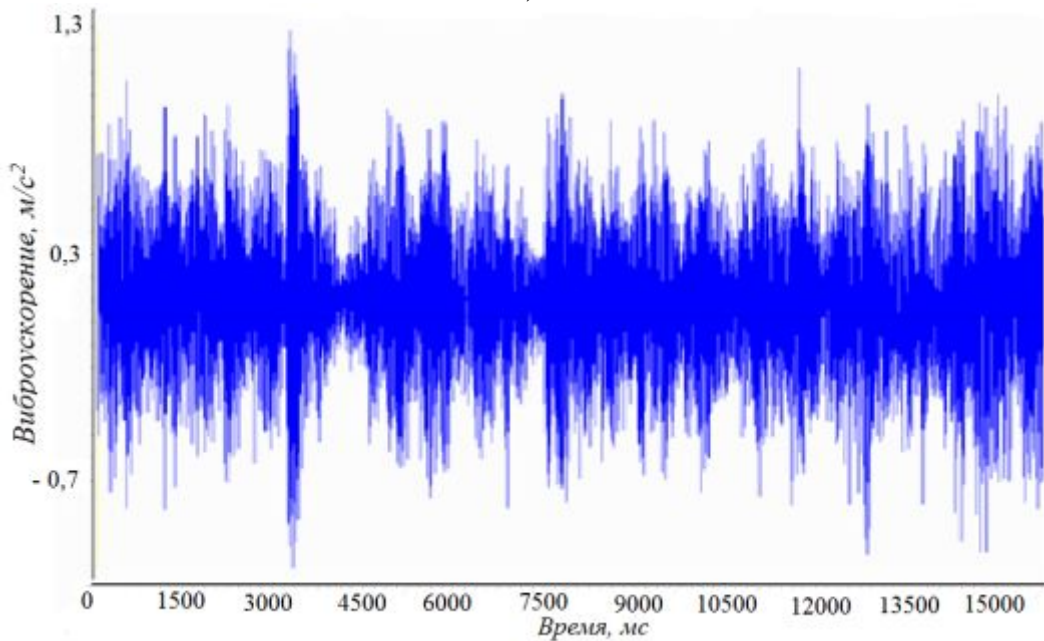
- малый размах значений виброускорения – до $1,0 \text{ м/с}^2$;
- форма вибрационного сигнала позволяет фиксировать: задевания при повороте металлоконструкций, движение исправного и неисправного опорного кольца;
- временная реализация вибрационного сигнала виброускорения, соответствующая удовлетворительному состоянию, имеет стабильный характер с частотой $6,7 \dots 6,9 \text{ Гц}$ ($145 \dots 149 \text{ мс}$) с малыми амплитудными значениями (размах $0,79 \text{ м/с}^2$).

Второй этап связан с измерением вибрационных параметров на опорном кольце во время плавки и воздействия электрической дуги. Силы, возникающие при работе электрической дуги, возбуждают колебания поворотной колонны, люльки и передаются на фундамент. Спектральный состав вибрационных колебаний включает составляющие определяемые состоянием металлических конструкций печи и работой электрической дуги. Временная форма сигнала позволила определить наличие нескольких режимов работы, отличающихся частотой и формой колебаний (рисунок 3). Реализации по этапам плавки отличаются изменением амплитудных значений

от $1,8...3,0 \text{ м/с}^2$ в режиме доводки до $5,5...14,2 \text{ м/с}^2$ при начале плавки. При работе электрической дуги зафиксированы значения виброскорости 73 мм/с в размахе.



а)



б)

Рисунок 3 – Временная реализация сигнала виброускорения:
а) при начале плавки; б) режим доводки

Снижение срока службы опорного кольца по сравнению с расчётным значением связано с увеличенной вибрацией и появлением динамической нагрузки. В результате проведенных исследований и анализа причин механического износа повреждённого опорного кольца механизма поворота свода установлены факторы, определяющие скорость развития повреждений (таблица 1).

Таблица 1 – Факторы, определяющие скорость развития повреждений опорного кольца механизма поворота свода

Эксплуатационные воздействия	Температура	Вибрация	Трение	Силы
Условия эксплуатации	Повышенная температура до 60...70 ⁰ С.	Амплитудные значения: 1,8...3,0 м/с ² в режиме доводки; 5,5...14,2 м/с ² при начале плавки.	Повторно-кратковременный режим работы: угол поворота 70 ⁰ – 2...3 цикла на плавку	Воздействий вертикальной силы и опрокидывающего момента
Начальные отклонения	Уменьшение демпфирующей способности масляной плёнки.	Усталостные повреждения на поверхности тел качения и беговых дорожках.	Повышение коэффициента трения в опорном кольце.	Ослабление резьбовых соединений.
Последствия	Снижение срока службы из-за окисления смазочного материала.	Возникновение осповидного выкрашивания.	Неравномерное распределение сил между телами качения.	Разрыв сепаратора – разворот тел качения.
	Ускорение абразивного износа.			
Дополнительный фактор		Износ направляющих механизма перемещения электродов.		

На основании проведенных исследований разработана последовательность диагностирования опорного кольца поворотного стенда машины непрерывного литья заготовок по комплексу взаимодополняющих диагностических параметров: измерению линейного износа; анализу износа зубчатого венца и расположения пятна контакта зубчатой передачи; измерению параметров вибрационного сигнала; анализу токовых характеристик приводного двигателя; анализу продуктов износа в смазочном материале; контролю затяжки резьбовых соединений; анализу характера шума возникающего при работе механизма.

В третьем разделе «Оценка технического состояния реверсивных механизмов, работающих в кратковременном и повторно-кратковременном режиме» проведен анализ конструкции и характерные отказы механизма подъема литейных кранов, рассмотрены основные положения технического диагностирования, приведены результаты диагностирования механизма подъема по вибрационным параметрам, выполнено математическое моделирование неисправных состояний и получена комплексная оценка технического состояния механизма подъема литейного крана.

В настоящее время уровни вибрации мостовых кранов не нормируются. Особенностью решения задач диагностирования при оценке технического состояния механизмов металлургических кранов является двухуровневая последовательность решения задач распознавания. Первый уровень должен определить возникновение отклонений в работе механизма. Второй уровень должен обеспечить возможность определения места и характера повреждения, а также контроля развития повреждения до момента проведения необходимого ремонтного воздействия.

Для получения границ категорий технического состояния механизма подъёма проведена интерпретация полученных результатов измерения вибропараметров на основании разработанных способов обработки. Исходные данные – массивы значений вибропараметров, полученные в результате диагностирования (рисунок 4).

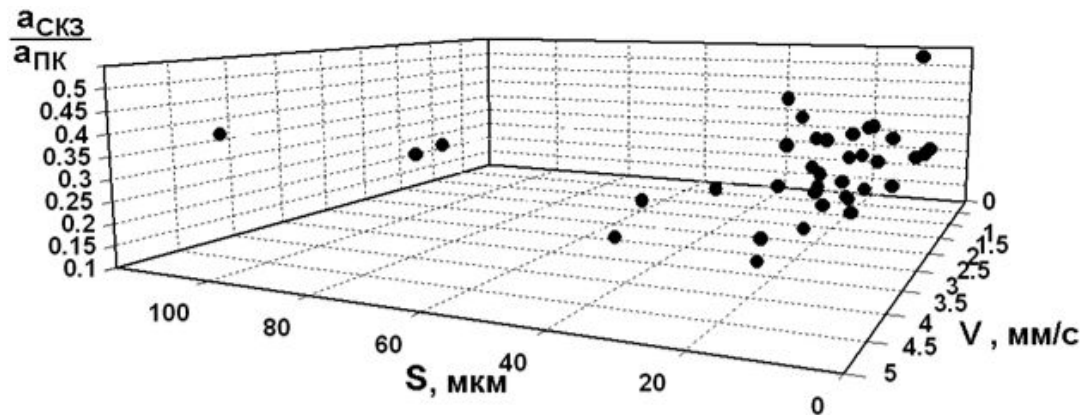


Рисунок 4 – Зафиксированные реализации вибропараметров

В процессе измерения фиксировались: среднеквадратичное значение виброперемещения S (мкм), среднеквадратичное значение виброскорости V (мм/с), среднеквадратичное $a_{СКЗ}$ и пиковое $a_{ПК}$ значения виброускорения (м/с^2). По каждому параметру были известны допустимые значения. Для формирования единичного показателя получены: обобщенная характеристика, абсолютный и относительный вклад вибропараметров, построены результирующие векторы. Представив полученный результат графически (рисунок 5), выделены четыре группы реализаций с близкими приоритетами, которые определили категории технических состояний.

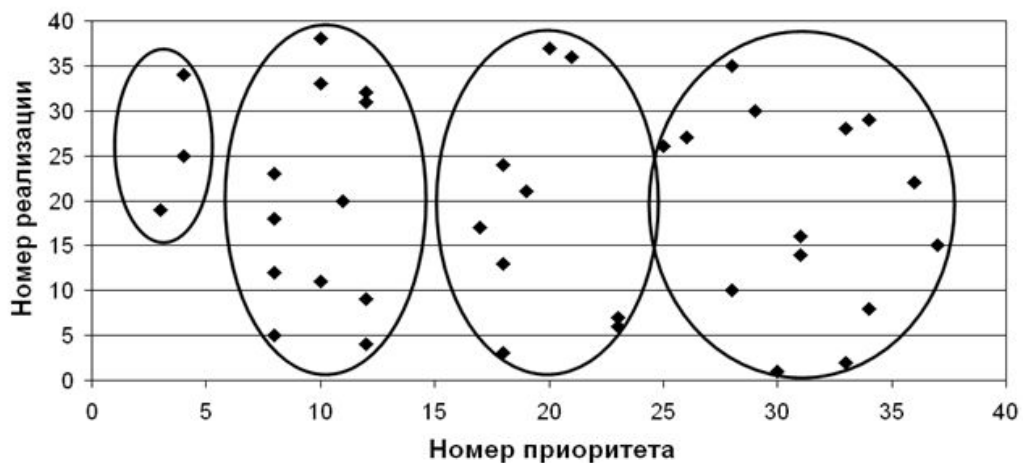


Рисунок 5 – Группировка реализаций вибропараметров

Известным фактом является уменьшение значений коэффициента полезного действия (КПД) механизма подъёма при снижении нагрузки. В ходе промышленных испытаний исправного механизма подъёма 275-тонного литейного крана при подъёме грузов разной массы Q с различной скоростью V дополнительно определено уве-

личение КПД при снижении частоты вращения (рисунок 6). Полученные данные аппроксимированы зависимостью с коэффициентом корреляции $R=0,992$:

$$\eta_{\phi} = 0,614 + 0,154 \cdot \ln(Q/Q_n) + 0,04 / (V/V_n), \quad (4)$$

Индекс « n » соответствует номинальному значению параметра.

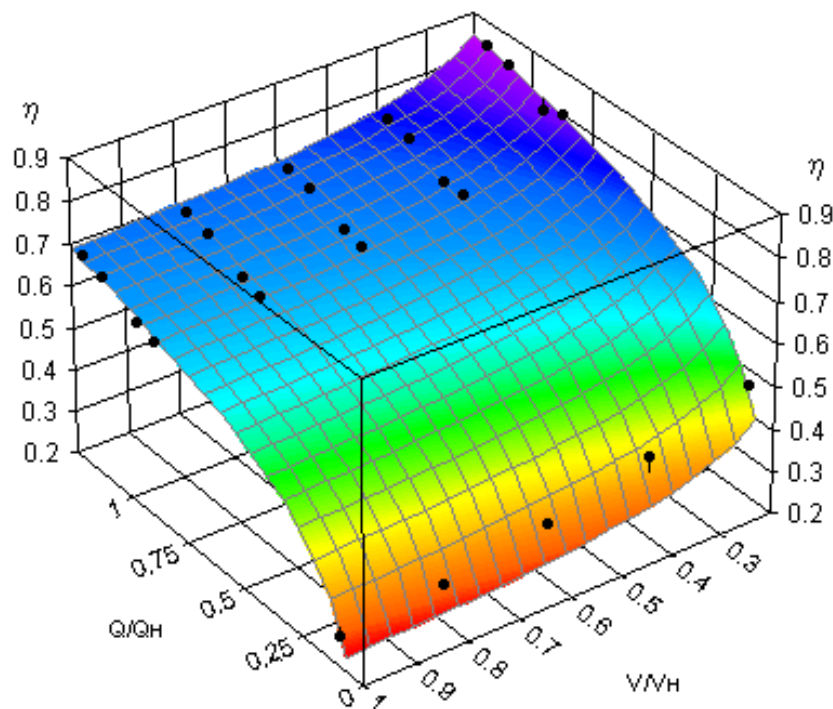


Рисунок 6 - Зависимость фактического КПД механизма подъема литейного крана от массы поднимаемого груза и скорости подъема

Предлагаемая последовательность оценки технического состояния механизма подъема литейного крана - периодически с помощью средств автоматизации выполняется сбор данных, необходимых для расчета фактического значения КПД. Для этих же условий по зависимости (4), вычисляется значение КПД, соответствующее исправному состоянию механизма. Расхождение более 10% между полученными значениями КПД является признаком ухудшения технического состояния и необходимости его дальнейшего уточнения по параметрам вибрации.

На основании проведенных исследований предложен комплексный подход с последовательным увеличением глубины диагноза включающий следующие этапы: расчёт фактического КПД и сравнение с эталонными значениями исправного механизма; измерение общего уровня вибрации для локализации мест повреждений; расчёт единичного показателя вибропараметров и сравнение с граничными значениями категорий технического состояния; относительная оценка изменения спектральной картины виброускорения; уточнение степени повреждения при визуальном осмотре.

Использование полученных закономерностей позволило разработать алгоритм диагностирования скиповых лебедок доменных печей, как металлургических машин, работающих в реверсивном повторно-кратковременном режиме.

В четвёртом разделе «Диагностические признаки и границы работоспособного состояния шарнирных механизмов работающих в колебательном режиме», исходя из особенностей конструкции столов качания сортовых МНЛЗ и проведенного анализа характерных повреждений, определены их параметры движения и границы работоспособного состояния, проведен анализ временной формы вибрационного сигнала совместно с идентификацией возможных повреждений.

Установлено, что при работе механизма качания возможны три режима работы шарниров – два устойчивых и неустойчивый.

1. Если при регулировке давления в пневмоамортизаторах стол и кристаллизатор полностью не уравниваются, то в этом случае условие возникновения первого устойчивого режима имеет следующий вид:

$$F_a X_a < F_k X_k + F_c X_c - F_w X_w, (5)$$

где F_k, F_c – вес кристаллизатора и стола качания, Н; F_a, F_w – сила, создаваемая пневмоамортизатором и шатуном; X_k, X_c, X_a, X_w – плечи сил.

Недостаточное давление в пневмоамортизаторах приводит к нештатному режиму работы стола, при котором демпфирующим элементом становится материал пневмоамортизатора, а не воздушная подушка.

2. Если при регулировке давления в пневмоамортизаторах стол и кристаллизатор переуравниваются, то условие возникновения второго устойчивого режима:

$$F_a X_a > F_k X_k + F_c X_c - F_w X_w. (6)$$

Избыточное давление в пневмоамортизаторах приводит к режиму работы стола, при котором демпфирующие свойства воздушной подушки снижаются.

3. Если при регулировке давления в пневмоамортизаторах стол и кристаллизатор несколько переуравниваются в режиме имитации, то при разливке, при воздействии переменной силы трения от разливаемого слитка возникает режим неустойчивого равновесия. Данный режим является переходным между устойчивыми режимами и приводит к ударам в шарнирах стола качания.

Проведено измерение временной формы вибрационного сигнала при различном давлении воздуха в пневмоамортизаторах. Получены зависимости виброускорения, виброскорости от давления воздуха в пневмоамортизаторах, приведенные на рисунке 7. При диагностировании стола качания определяются расчётные границы работоспособного состояния. Диагностические признаки повреждений и границы работоспособного состояния столов качания определяются отношением расчётных и фактических значений параметров колебаний для заданного технологического режима. Расчётные значения определяются по формулам:

$$V = 2\pi \cdot f \cdot S; a = 2\pi \cdot f \cdot V, (7)$$

где S – амплитуда качания стола, мм; f – частота колебаний, Гц.

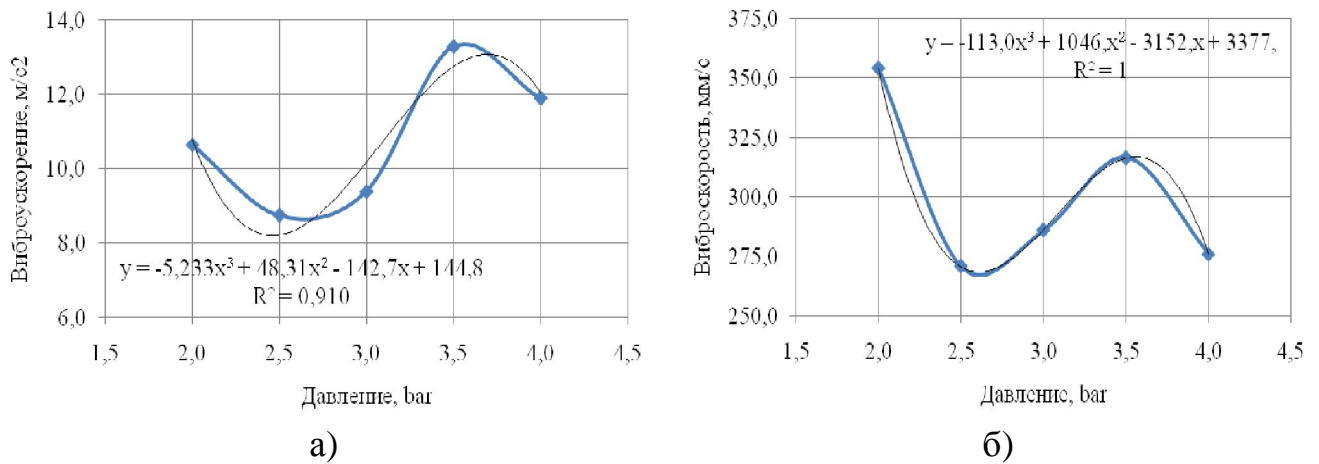


Рисунок 7 – Зависимость размаха виброускорения (а) и виброскорости (б) от давления воздуха в пневмоамортизаторах

Границы категорий технического состояния определяются из условий.

Хорошее состояние – фактические значения виброскорости, виброускорения соответствуют расчётному значению, имея отклонения, не превышающие точность измерительного прибора:

$$V_{ФАКТ.} = V_{РАСЧЕТ.} \cdot (\pm 10\%); a_{ФАКТ.} = a_{РАСЧЕТ.} \cdot (\pm 10\%). (8)$$

Удовлетворительное состояние - измеренные значения виброскорости, виброускорения не превышают расчетных значений более, чем в 1,6 раза:

$$V_{ФАКТ.} < V_{РАСЧЕТ.} \cdot 1,6; a_{ФАКТ.} < a_{РАСЧЕТ.} \cdot 1,6. (9)$$

Плохое состояние - измеренные значения виброскорости, виброускорения превышают расчетные значения более, чем в 1,6 раза:

$$V_{ФАКТ.} > V_{РАСЧЕТ.} \cdot 1,6; a_{ФАКТ.} > a_{РАСЧЕТ.} \cdot 1,6. (10)$$

Аварийное состояние - измеренные значения виброскорости, виброускорения превышают расчётные значения более, чем в 2,56 раза:

$$V_{ФАКТ.} > V_{РАСЧЕТ.} \cdot 2,56; a_{ФАКТ.} > a_{РАСЧЕТ.} \cdot 2,56. (11)$$

Среднеквадратичное значение виброускорения не должно превышать $9,8 \text{ м/с}^2$, что приводит к возникновению ударов в узлах механизма.

Для определения степени влияния давления в пневмоамортизаторах на продольные и поперечные колебания столов качения, проведены серии экспериментов по изменению давления в пневмоамортизаторах с контролем значений колебаний и параметров движения стола. Анализ результатов измерений биений столов качения (выборка 950 измерений) позволил установить границы работоспособного состояния, используя метод статистической классификации. Предложена гипотеза о том,

что механизм занимает устойчивое положение в реализации конкретного технического состояния. Это выражается в снижении количества зафиксированных значений в переходных или граничных зонах (рисунок 8). Установлены интервалы значений продольных и поперечных колебаний для технических состояний столов.

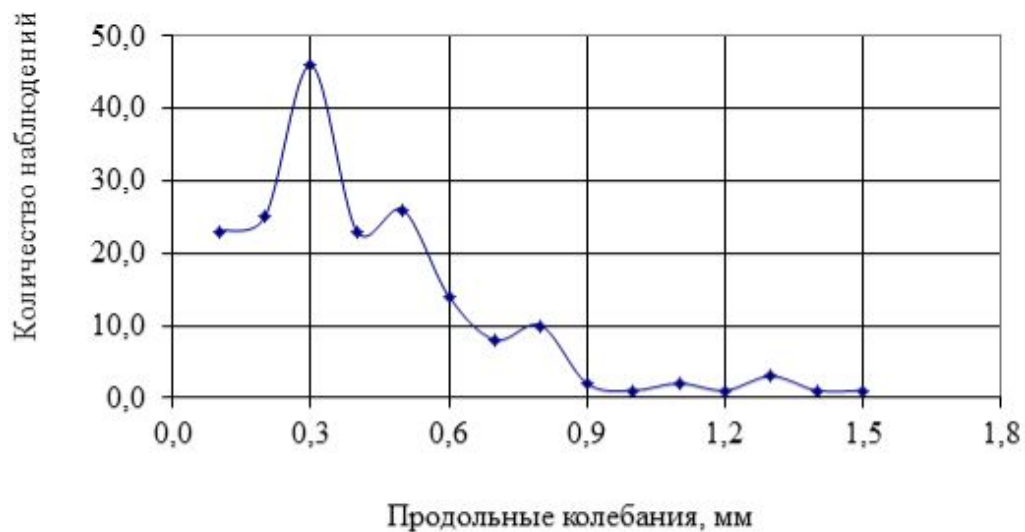


Рисунок 8 – Гистограмма распределения продольных колебаний и количества наблюдений

Временная форма вибрационного сигнала предоставляет информацию об отклонении закона движения от синусоидального и является наиболее наглядным способом предоставления информации о характере колебаний. Проведенные исследования позволили сформировать относительно наблюдаемого временного сигнала виброускорения справочник основных повреждений и отклонений в работе столов качания. Отклонения, наблюдаемые на холостом ходу (в режиме имитации), усиливаются при работе под нагрузкой (рисунок 9).

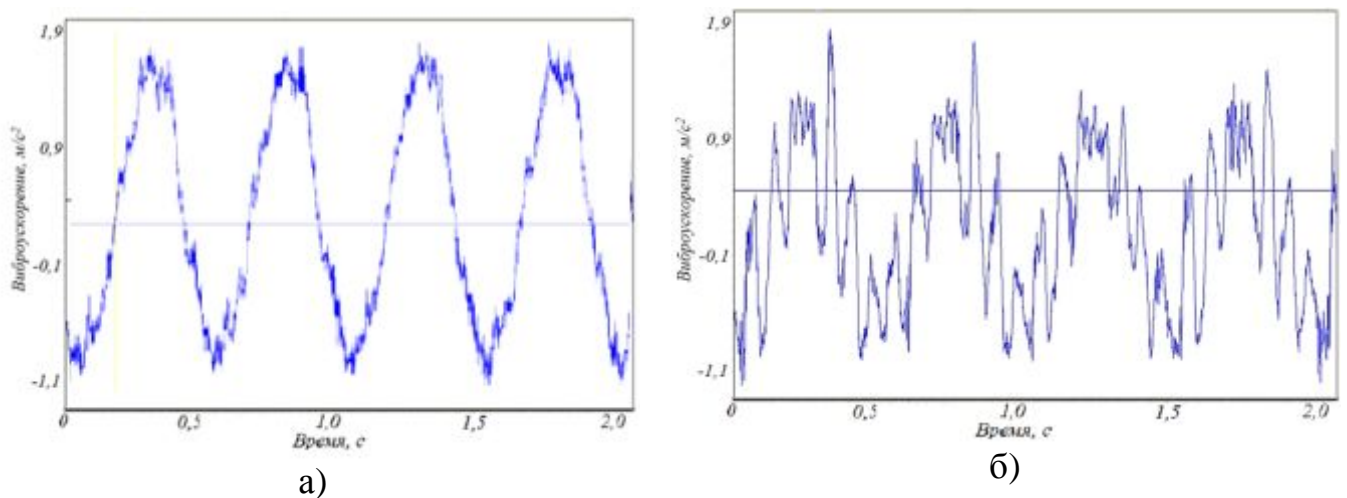


Рисунок 9 – Временная форма виброускорения стола качания:
а) холостой ход; б) рабочий ход

В пятом разделе «Теоретические основы виброметрии для оценки состояния комбинированных редукторов привода прокатных клетей непрерывных станов» рассмотрены вопросы конструкции и характерных повреждений комбинированных редукторов привода прокатных клетей непрерывных станов, выполнен анализ токовых и скоростных характеристик при диагностировании комбинированных редукторов привода прокатных клетей, приведены результаты исследований вибрационных параметров и экспериментов по определению возможности повышения частоты вращения двигателей привода прокатных клетей стана 390.

Прекращение подачи смазочного материала к узлам комбинированного редуктора привода вертикальных валков прокатной клетки сортового стана привело к внеплановой остановке стана. По результатам анализа токовых характеристик и графиков частоты вращения при развитии повреждений отмечены два периода: период устойчивой работы в течение часа и период развития повреждения в течение 3-х минут. Установлены признаки переходов от удовлетворительного к плохому и далее к аварийному состоянию.

Неисправности деталей и узлов механизма имеют тенденцию проявляться при воздействии больших усилий. Для определения технического состояния привода прокатных клетей необходимо учитывать поведение механизма в режимах холостого хода и под нагрузкой. В качестве параметра контроля предлагается коэффициент увеличения параметров вибрации рабочего и холостого хода:

$$k = V_{раб} / V_{хол} , (12)$$

где $V_{раб}$ – значения вибрации корпусных деталей под нагрузкой; $V_{хол}$ – значения вибрации корпусных деталей в режиме холостого хода.

Проведено вибрационное обследование редукторов привода прокатных клетей стана 390 при частоте вращения двигателей – 1000 об/мин в режиме холостого хода. Определены допустимые значения вибрационных параметров подшипниковых узлов редукторов прокатных клетей для категорий технических состояний (таблица 2).

Таблица 2 – Значения параметров вибрации принятые при оценке технического состояния механизма

Категория технического состояния	Значения виброскорости, мм/с	Значения виброускорения, м/с ²
Хорошее	0,45...1,12 (0,28...0,71)	ПИК до 10
Удовлетворительное	1,12...2,8 (0,71...1,8)	СКЗ менее 10; ПИК свыше 10
Плохое	2,8...7,1 (1,8...4,5)	СКЗ свыше 10
Аварийное	свыше 7,1 (свыше 4,5)	ПИК более 100

Примечание: в скобках приведены допустимые значения для клетей с горизонтальным расположением валков.

По каждому приводу сделаны выводы о возможности повышения частоты вращения и необходимых ремонтных воздействиях. Разработаны рекомендации по ремонту привода прокатных клетей стана 390. Следующий этап исследований – про-

верка возможности работы оборудования под нагрузкой, осуществлен поэтапно в технологическом процессе прокатки индивидуально по каждой клетке. После обработки параметров вибрации механизмов при работе под нагрузкой получены зависимости изменения виброскорости по контрольным точкам редуктора и суммарных векторов виброскорости от частоты вращения (рисунок 10).

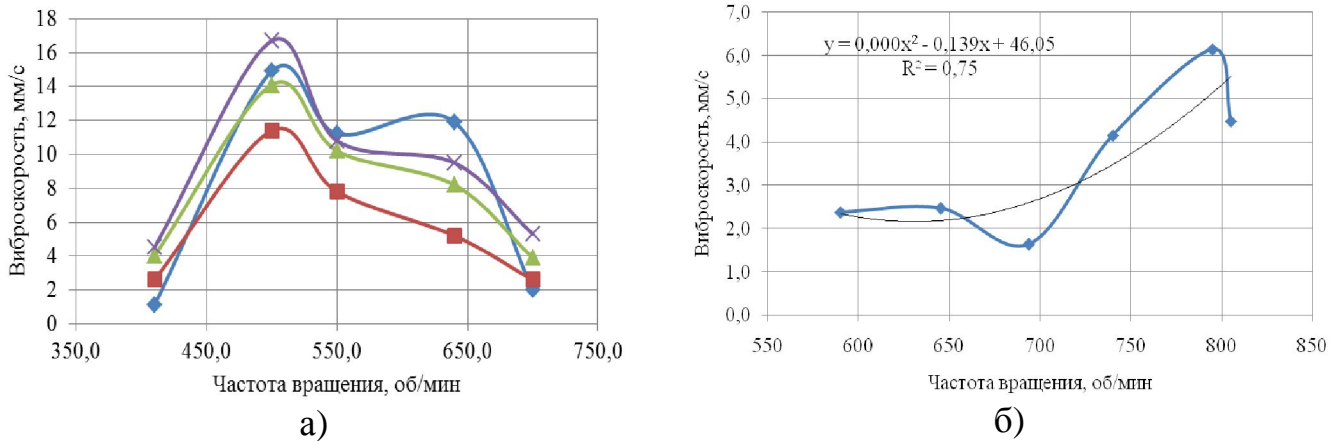


Рисунок 10 – Зависимость виброскорости от частоты вращения по точкам контроля редуктора клетки №18 (а) и зависимость суммарного вектора виброскорости по контрольным точкам редуктора клетки №6 от частоты вращения (б)

В шестом разделе «Развитие теории технического диагностирования металлургических машин» рассматривается совокупность вопросов: обеспечение работоспособности механизмов металлургических машин и выбора диагностических параметров технического состояния, возможные модели развития отказов металлургических машин, синтез технического состояния сопрягаемых деталей металлургических машин в диагностической матрице, уточнение содержания термина «техническое состояние», обоснование необходимости проведения ремонтных операций для восстановления работоспособности металлургического оборудования.

Основные требования к безотказной работе механизмов металлургических машин представлены в виде условий работоспособного состояния: выполнение всех функций в пределах заданных параметров, низкий уровень шума, низкий уровень вибрации, минимизация динамических, в частности ударных процессов, допустимые значения температуры деталей механизма, отсутствие трещин, подтеканий масла, недопустимых внешних нагрузок.

Это позволило определить комплекс взаимодополняющих методов технической диагностики: контроль параметров технологического процесса, анализ шумов механизма, виброметрия, термометрия, визуальный осмотр, неразрушающий контроль, анализ токовых и нагрузочных характеристик, анализ смазки.

Анализ функционального назначения элементов механического оборудования, требований к работоспособности деталей и узлов, условий работоспособного состояния позволил определить факторы, обеспечивающие работоспособность отдельных элементов и механизма в целом: состояние неподвижных соединений; вид трения; взаимное расположение деталей; характер распределения сил; накопление уста-

лостных повреждений. Для каждого из факторов, определены четыре уровня: исправного состояния, малых отклонений, необходимости проведения ремонтных воздействий и предотказный. Уровни факторов установлены по изменениям качественных параметров взаимодействия элементов. Границы уровней соответствуют изменению скорости износа, разделяя границы естественного и патологического старения, определяя техническое состояние механизма: хорошее, удовлетворительное, плохое и аварийное. На основании проведенных исследований сформирована диагностическая матрица технических состояний (таблица 3).

Таблица 3 - Синтез технического состояния сопрягаемых узлов металлургических машин в диагностической матрице

Уровни состояния	Состояние неподвижных соединений	Вид трения	Характер распределения сил	Взаимное расположение деталей	Накопление усталостных повреждений
Исправное состояние	Неподвижность сопрягаемых поверхностей.	Жидкостное трение.	Равномерное распределение нагрузки между элементами.	Пятно контакта соответствует требованиям.	Отсутствие трещин.
Малые отклонения	Малые перемещения сопрягаемых деталей.	Граничное трение.	-	Изменение положения пятна контакта.	Зарождение трещин.
Необходимость проведения ремонтных воздействий	Смещения сопрягаемых деталей относительно друг друга.	Сухое трение.	-	Уменьшение площади пятна контакта до 30% от норматива.	Развитие фарфоровидной зоны усталостной трещины.
Предотказный	Возникновение ударов.	Схватывание поверхностей.	Нагрузка воспринимается одним элементом.	Снижение размеров пятна контакта до 10...20% норматива.	Развитие зоны ускоренного разрушения усталостной трещины.

Предложена гипотеза о том, что переход от одного уровня технического состояния к другому осуществляется ступенчато. Определение ступенчатого изменения значений диагностических параметров при изменении технического состояния позволяет определить причину возникновения данного вида технического состояния, а не его частное проявление в виде неисправности узлов.

Объект диагностирования, при решении задачи распознавания его технического состояния рассматривается как преобразователь входных параметров в выходные.

Преобразование входных параметров в выходные происходит благодаря внутренним параметрам механизма объекта, которые можно представить, используя диагностическую матрицу, в виде трехмерной матрицы состояний, объединив функциональные элементы механизма R_1, R_2, \dots, R_8 , факторы работоспособного состояния F_1, F_2, \dots, F_5 и уровни факторов P_1, P_2, \dots, P_4 (рисунок 11).

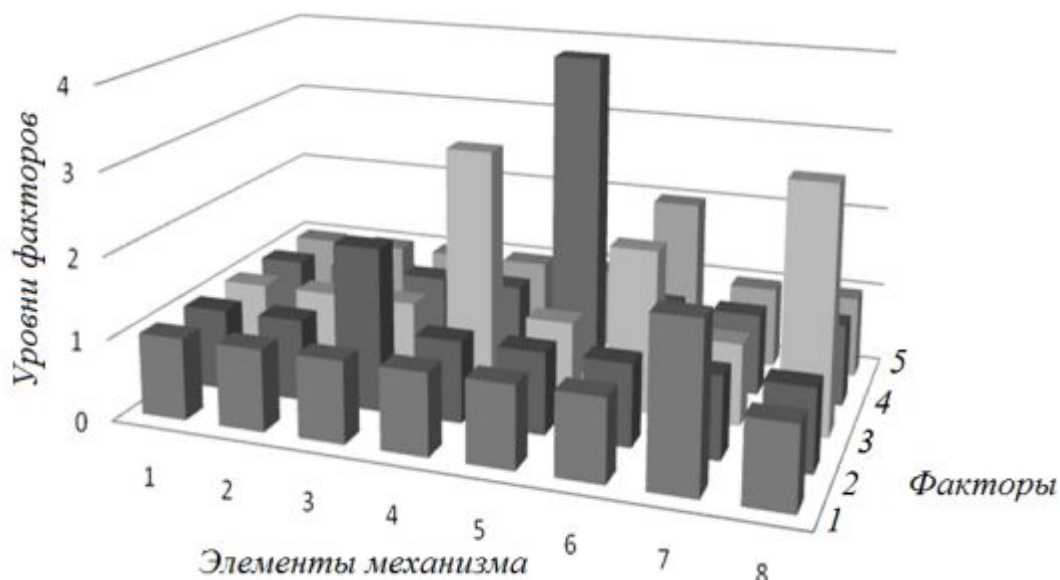


Рисунок 11 – Трехмерное представление технического состояния металлургической машины как оценка уровней (P_1, P_2, \dots, P_4) факторов работоспособного состояния (F_1, F_2, \dots, F_5) функциональных элементов механизма (R_1, R_2, \dots, R_8)

Наиболее употребляемый в технической диагностике термин «техническое состояние», в настоящее время, не имеет однозначного прочтения. Это обуславливает недостаточную точность при решении практических диагностических задач и не позволяет сформировать основы технической диагностики как науки.

Предлагается следующее определение для термина «техническое состояние». *Техническое состояние* – степень соответствия внутренних параметров системы внешним воздействиям и необходимости компенсации потери работоспособности путём проведения ремонтных операций, которые проявляются при изменении выходных параметров (физических полей). Это позволяет сформулировать целевую функцию деятельности ремонтной службы, как стабилизацию технического состояния оборудования в рассматриваемом временном интервале:

$$dY \rightarrow 0, (13)$$

где: dY – изменение технического состояния объекта.

Перечень операций при техническом обслуживании и ремонтах ограничен определенными временными границами. Каждому из этапов износа соответствуют рациональные виды ремонтных операций. Трудность в практическом применении этого заключения состоит в том, что индивидуальность характеристик элементов приводит к тому, что одновременно установленные детали находятся на различных ста-

дях жизненного цикла. Необходимость ремонтной операции определяется решающими правилами. Изменение свойств механизма в процессе эксплуатации, требует изменения периодичности и видов технического обслуживания и ремонта.

В седьмом разделе «Обеспечение безотказности металлургических машин путём использования информации о техническом состоянии» рассматриваются: содержание термина «информация», источники информации о техническом состоянии механизмов, восстановление работоспособности подшипников роликов рольгангов после дополнительного смазывания, цели и задачи стационарных систем вибрационного контроля, информационное обеспечение решения задач генезиса на примере разработки классификации повреждений подшипников качения и зубчатых передач, использование результатов работы на промышленных предприятиях.

Процессы управления, рассматриваемые кибернетикой, представляют собой получение, хранение и переработку информации. При этом информация понимается не просто как любые сведения и данные о системе, а как сведения, которые бы одновременно характеризовали степень неопределенности системы (синтаксический уровень), имели бы определенное содержание, смысл (семантический уровень), были бы полезны потребителю информации (прагматический уровень). Эти данные должны быть обработаны по определенным правилам и использованы для выработки управляющих решений, с реализацией в конкретное действие.

Предлагается рассматривать информацию как результат преобразования исходных данных для уменьшения степени неопределенности технического состояния системы. Полученное информационное сообщение позволяет обоснованно принять решение о необходимости проведения мероприятий по поддержанию или восстановлению работоспособного состояния механизма.

Таким образом, некоторая совокупность данных $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, преобразуется при помощи алгоритма A_i , использующего решающие правила R_i , в информационное сообщение $I(x_i)$:

$$(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \rightarrow A_i = f(R_i) \rightarrow I(x_i). (14)$$

Совокупность информационных сообщений $I(x_i)$ должна полностью раскрыть неопределенность технического состояния $ТС$ в данный момент времени:

$$I(ТС) = \sum_{i=1}^m I(x_i). (15)$$

Основные источники информации о техническом состоянии металлургических машин возникают в результате: анализа отказов механизмов, технического диагностирования и осмотра поврежденных деталей для определения причин поломки.

Предложенная классификация повреждений подшипников качения и зубчатых передач направлена на решение вопросов повышения безотказности механизмов, однозначно определяя причины возникновения неисправностей и необходимые ремонтные воздействия для устранения причин отказа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная **научная проблема** развития теории технической диагностики металлургических машин путём создания диагностической матрицы синтеза технического состояния элементов механизмов на базе установленных диагностических признаков развития повреждений и закономерностей изменения соответствующих диагностических параметров, а так-же определения допустимых диапазонов их изменения, разработки на этой основе метода оценки технического состояния металлургических машин с учётом особенностей эксплуатации, **имеющая важное хозяйственное значение** за счёт повышения точности сроков и содержания своевременного технического обслуживания и ремонта, обеспечения безотказности электросталеплавильных и литейно-прокатных комплексов.

Основные научные и практические результаты работы.

1. В результате анализа основ технической диагностики машин установлено, что особенности конструкции и условия эксплуатации металлургических машин не позволяют использовать традиционные решения, применяемые для машин роторного типа, работающих в длительном режиме. Характерным для эксплуатации металлургических машин является изменение действующих сил, направления и частоты вращения. Сохранить работоспособное состояние в данном случае возможно лишь при чётко определённых категориях технического состояния, позволяющих отслеживать и ликвидировать начальные повреждения в узлах и деталях. Необходимым является разработка теоретических положений метода оценки технического состояния металлургических машин по комплексу диагностических параметров, определение допустимых диапазонов изменения значений параметров и обоснованных подходов при нормировании границ категорий технического состояния.

2. На основании промышленных исследований технического состояния опорных колец механизма поворота свода электродуговой печи определены следующие диагностические признаки: линейный износ, параметры вибрации опорного кольца и металлоконструкций - временная реализация сигнала виброускорения, температура в поворотной колонне, давление в полостях приводного гидроцилиндра. Установлены причины ускоренного износа, возможная скорость развития повреждений и предельные границы износа. Показана необходимость использования указанного комплекса диагностических параметров для постановки диагноза.

Установлены диапазоны значений диагностических параметров: температура 30...80⁰С; амплитудные значения виброускорения в процессе плавки составляют: 1,8...3,0 м/с²- режим доводки; 5,5...14,2 м/с²- начало плавки; значения виброускорения при движении свода: до 1,0 м/с² – работоспособное состояние; 6,0...9,0 м/с² – значительные повреждения, требующие замены кольца; скорость естественного износа 0...0,1 мм/месяц; скорость ускоренного износа увеличивается более, чем в 10 раз и может составлять 0,5...1,5 мм/месяц.

Для оперативного контроля технического состояния опорного кольца определён комплексный диагностический параметр - отношение давления в штоковой полости гидроцилиндра при отвороте свода печи к давлению в поршневой полости при навороте в течение одного цикла движения. Стабилизация параметра в границах

1,2...1,35 при теоретическом значении 1,69 определяет зону работоспособного состояния.

3. Определение технического состояния реверсируемых механизмов, работающих в кратковременном и повторно-кратковременном режиме, выполнено для механизма подъёма литейного крана и предполагает реализацию комплексного подхода с последовательным увеличением глубины диагноза.

Общая оценка состояния проводится по степени отклонения фактических значений КПД при различной степени загрузки и скорости подъёма от исходных значений исправного механизма. Для исправного состояния получена зависимость $\eta_{\phi} = 0,614 + 0,154 \cdot \ln(Q/Q_n) + 0,04 / (V/V_n)$, включающая отношения Q/Q_n массы поднимаемого груза к номинальной грузоподъёмности и V/V_n – значения фактической скорости к номинальному значению. Расхождение более 10% между полученными значениями КПД является признаком ухудшения технического состояния и необходимости его дальнейшего уточнения по параметрам вибрации.

Подробный мониторинг технического состояния проводится по единичному показателю вибропараметров, включая измерение значений виброперемещения, виброскорости и виброускорения. Полученное значение сравнивается с граничными значениями показателя, после чего делается вывод о категории технического состояния. Установлено, что при диагностировании механизма подъёма использование абсолютных методов оценки технического состояния ограничено конструктивными и эксплуатационными особенностями. В этом случае, наиболее информативен метод относительной оценки изменения спектральной картины виброускорения в частотном диапазоне 2...2000 Гц и визуальный осмотр.

4. Разработаны алгоритмы диагностирования технического состояния столов качания сортовых МНЛЗ, как шарнирных механизмов, работающих в колебательном режиме, на основании анализа вибрационных параметров значений общего уровня и временной формы сигнала. Показано, что в процессе работы столов качания возможны три режима работы шарниров – два устойчивых и неустойчивый. Определены диагностические признаки повреждений и границы работоспособного состояния столов качания методом статистической классификации, связанные с увеличением значений диагностических параметров в 1,6 раза относительно расчётного значения.

Диагностические признаки повреждений и границы работоспособного состояния столов качания определяются соотношением расчётных и фактических значений параметров колебаний для заданного технологического режима. Расчётные значения виброскорости V и виброускорения a определяются по формулам:

$$V = 2\pi \cdot f \cdot S; a = 2\pi \cdot f \cdot V,$$

где S – амплитуда качания стола, мм; f – частота колебаний, Гц.

Хорошее состояние – фактические значения виброскорости, виброускорения соответствуют расчётному значению, имея отклонения, не превышающие точность измерительного прибора: $V_{\text{ФАКТ.}} = V_{\text{РАСЧЕТ.}} \cdot (\pm 10\%)$; $a_{\text{ФАКТ.}} = a_{\text{РАСЧЕТ.}} \cdot (\pm 10\%)$.

Удовлетворительное состояние - измеренные значения виброскорости, виброускорения не превышают расчётных значений более, чем в 1,6 раза:

$$V_{\text{ФАКТ.}} < V_{\text{РАСЧЕТ.}} \cdot 1,6; a_{\text{ФАКТ.}} < a_{\text{РАСЧЕТ.}} \cdot 1,6.$$

Плохое состояние - измеренные значения виброскорости, виброускорения превышают расчётные значения более, чем в 1,6 раза:

$$V_{\text{ФАКТ.}} > V_{\text{РАСЧЕТ.}} \cdot 1,6; a_{\text{ФАКТ.}} > a_{\text{РАСЧЕТ.}} \cdot 1,6.$$

Аварийное состояние - измеренные значения виброскорости, виброускорения превышают расчётные значения более, чем в 2,56 раза:

$$V_{\text{ФАКТ.}} > V_{\text{РАСЧЕТ.}} \cdot 2,56; a_{\text{ФАКТ.}} > a_{\text{РАСЧЕТ.}} \cdot 2,56.$$

Значения виброускорения не должны превышать $9,8 \text{ м/с}^2$.

5. Развитие теоретических основ виброметрии для оценки состояния комбинированных редукторов привода прокатных клетей непрерывных станов выполнено путём разработки решающих правил обработки данных вибрационных параметров относительно общего уровня вибрации и спектрального анализа составляющих вибрационного сигнала. Установлены закономерности изменения спектрограмм виброскорости и виброускорения при развитии повреждений. Получены новые результаты о проявлении неисправностей комбинированных редукторов прокатных станов.

Показано, что наиболее целесообразно в условиях непрерывного прокатного стана использовать стационарную систему для текущего контроля и диагностирования технического состояния механизмов с целью предотвращения внезапных отказов и обеспечения целостности базовых и корпусных деталей и узлов механизмов. Предложено использовать комплексный показатель – зависимость суммарного вектора виброскорости комбинированного редуктора от частоты вращения входного вала. Для комбинированных редукторов привода прокатных клетей стана 390 установлены значения виброскорости, определяющие границы состояний:

- до 2,8 мм/с – функционирование без ограничения сроков;
- 2,8...7,1 мм/с – функционирование в ограниченном периоде времени;
- свыше 7,1 мм/с – возможны повреждения машины.

Признаком наличия значительных повреждений является присутствие в спектре виброускорения составляющих со значениями свыше $9,8 \text{ м/с}^2$.

6. Развитие теоретических представлений о техническом диагностировании металлургических машин проведено путём синтеза технического состояния сопрягаемых деталей металлургических машин в универсальной диагностической матрице. Определены факторы определяющие работоспособность элементов механизма: неподвижность соединений, вид трения, характер распределения сил, взаимное расположение деталей и накопление усталостных повреждений. Установлены уровни факторов: исправного состояния, малых отклонений, необходимости проведения ремонта, предотказный. Данные уровни определяются изменением процессов развития повреждений, что предполагает возможность ступенчатого изменения технического состояния при эксплуатации механизма.

Техническое состояние для действующих режимов работы определено как степень соответствия уровней внутренних параметров механической системы внешним

воздействиям и необходимости компенсации потери работоспособности путём проведения ремонтных операций, проявляемое при изменении внешних параметров. Необходимость ремонта устанавливается по изменению значений составляющих вибрационных и дополнительных диагностических параметров, что позволяет обоснованно проводить ремонт или техническое обслуживание.

7. Разработка теоретических принципов обеспечения безотказности металлургических машин выполнена путём использования информации о техническом состоянии с оценкой эффективности и проверена при практическом использовании.

Эффективность от внедрения результатов работы достигается за счет своевременного выявления механизмов, находящихся в плохом техническом состоянии, определения и устранения при проведении ремонтов причин неисправностей. Это обеспечивает безотказность и стабильность работы механического оборудования, в частности, использование информации о техническом состоянии оборудования позволило организовать безотказную работу:

- привода прокатных клетей стана 150 и сократить объёмы ремонтных работ на 20%, в результате капитальный ремонт комбинированных редукторов привода прокатных клетей впервые проведен через 13 лет (в 2007 г.) после начала эксплуатации стана в 1994 г.;

- насосов вакууматора при отсутствии резервирования в течение 3-х месяцев, это обеспечило вакуумирование 31000 тонн стали с уровнем брака 3%, возможные потери - 8370 тонн стали.

Результаты работы использовались при формировании службы технического диагностирования и обучении методам технического диагностирования специалистов предприятий: ОАО «Миттал Стил Кривой Рог», ОАО «ММК им.Ильича», ЗАО «Донецксталь – МЗ», ЗАО «Макеевский МЗ», ОАО «Харцызский трубный завод», ОАО «Восточный ГОК», ОАО «Крымский титан», ЗАО «Укрграфит», ОАО «Авдеевский коксохимический завод», ОАО «Алчевсккокс», ОАО «Баглейкокс».

Положения информационных основ виброметрии, представленные в диссертации, использовались при разработке стационарной системы контроля вибрационных параметров прокатных станов 390 Макеевский филиал ПАО «ЕМЗ» и чистового блока стана 150 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Определены требования к системе, технические характеристики измеряемых параметров, количество и расположение датчиков вибрации. Учтены рекомендации по визуализации диагностических параметров и распознаванию категорий технического состояния механического оборудования стана 390: двигателей и редукторов привода; прокатных клетей.

Предоставленная информация по оценке технического состояния использовалась для обеспечения безотказной работы механизмов электросталеплавильного комплекса при планировании и проведении ремонтов: опорного кольца механизма поворота свода ДСП-50, столов качания МНЛЗ, механизмов главного подъёма завалочного и разливочного кранов.

Среднегодовой экономический эффект, за счёт применения методов технического диагностирования машин, с целью обеспечения безотказной работы оборудования в течение года, предотвращения простоя в случае внеплановой замены узлов механизмов, на примере внеплановой замены опорного кольца механизма поворота свода ДСП-50, составил 11 114 960,00 грн.

Результаты докторской диссертации переданы службам технического диагностирования для использования при оценке технического состояния и обучения методам технического диагностирования специалистов предприятий: ПАО «ЕМЗ», ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог», ПАО «ММК им. Ильича».

Результаты работы используются в учебном процессе ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» при обучении студентов по специальности «Металлургическое оборудование» при чтении курса лекций «Техническая диагностика металлургического оборудования» на кафедре «Механическое оборудование заводов черной металлургии».

8. Направление дальнейших исследований и полученных результатов по синтезу технического состояния металлургических машин связано с формированием оптимальных информационных потоков и использованием компьютерной сети предприятия. Для успешного решения задач практического диагностирования необходима информационная система – универсальная единая диагностическая среда для полноценной работы подразделений диагностики, сопутствующих (ремонтных, цеховых) и контролирующих (техническое руководство) служб. Данная среда, должна в удобном виде обеспечивать хранение, отображение и анализ всех необходимых данных (результаты измерений, сведения об оборудовании, режимах его работы, техническом обслуживании, ремонтах и пр.) и поддерживать интегрируемость в существующие на предприятии информационные системы (например, при формировании списка необходимых запчастей (узлов для закупки) по результатам обработки измеренных данных при помощи экспертной системы).

СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

– публикации в специализированных научных изданиях:

1. Оценка состояния насосов и вентиляторов средствами технической диагностики / В.Я. Седуш [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1987. - №3. - С. 53 - 54. *(Использование методов и средств технической диагностики на металлургических предприятиях)*.

2. Сопилкин, Г.В. Построение карт поиска дефектов гидросистем / Г.В. Сопилкин, **В.А. Сидоров**, С.А. Нестеренко // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1990. - №1. - С.46-48. *(Анализ отказов элементов металлургических машин)*.

3. Опыт диагностирования приводов трубопрокатных станов / В.Я. Седуш [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1993. - №4. - С. 67 – 69. *(Обобщение опыта определения диагностических признаков развития повреждений металлургических машин)*.

4. Седуш, В.Я. Определение допустимых вибраций редукторов металлургических машин / В.Я. Седуш, **В.А. Сидоров**, Е.В. Ошовская // Защита металлургических машин от поломок: сб. научн. тр. – Мариуполь: ПГТУ, 1997.- Вып. 2. - С. 151 – 154. *(Определение допустимых диапазонов изменения диагностических параметров)*.

5. **Сидоров, В.А.** Особенности проявления и выявления поломок металлургических машин / **В.А. Сидоров**, Е.В. Ошовская // Захист металургійних машин від поломок: зб. наук.пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2000.– Вип. 5. - С.14–19. *(Разработка ме-*

тодов оценки технического состояния металлургических машин с учётом особенностей эксплуатации).

6. Аввакумов, С.И. Особенности диагностирования металлургического оборудования / С.И. Аввакумов, **В.А. Сидоров**, А.Л. Сотников // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – №3. – С. 96–99. (Использование методов и средств технической диагностики на металлургических предприятиях).

7. Седуш, В.Я. Анализ отказов турбокомпрессоров / В.Я. Седуш, **В.А. Сидоров**, А.В. Сидоров // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – №4. – С. 89-91. (Анализ отказов элементов металлургических машин).

8. Кравченко, В.М. Эффективность диагностирования механического оборудования металлургических предприятий / В.М. Кравченко, **В.А. Сидоров** // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005. – № 5. – С. 70-72. (Вопросы формирования служб диагностирования металлургических предприятий).

9. **Сидоров, В.А.** Закономерность износа вкладышей универсальных шпинделей прокатных станов / **В.А. Сидоров**, Н.В. Нижник // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005. – № 3. – С. 94-96. (Обобщение опыта определения диагностических признаков развития повреждений металлургических машин).

10. Кравченко, В.М. Техническое состояние механической системы / В.М. Кравченко, **В.А. Сидоров** // Сб. научн. тр. Донбасского государственного технического университета. – Алчевск:ДонГТУ, 2007. – Вып.24. – С. 140 – 146. (Использование методов и средств технической диагностики на металлургических предприятиях).

11. Седуш, В.Я. Снижение ресурса подшипников ходовых колес разливочных кранов при неравномерной нагрузке / В.Я. Седуш, В.М. Кравченко, **В.А. Сидоров** // Захист металургійних машин від поломок: зб. наук. пр. – Маріуполь, ПДТУ, 2008. – Вип. 10. – С. 181 – 186. (Обобщение опыта определения диагностических признаков развития повреждений металлургических машин).

12. Кравченко, В.М. Расчет фактического ресурса подшипников качения действующего оборудования / В.М. Кравченко, В.Я. Седуш, **В.А. Сидоров** // Захист металургійних машин від поломок: зб. наук. пр. – Маріуполь, 2008. – Вип. 10.– С. 120 – 125. (Разработка методов оценки технического состояния металлургических машин с учётом особенностей эксплуатации)

13. **Сидоров, В.А.** Последовательность анализа отказов при определении причин снижения ресурса подшипников ходовых колес разливочных кранов // Науково-технічний та виробничий журнал «Підйомно-транспортна техніка». - 2009. - №3(31) - С. 63 – 69.

14. Раннее диагностирование электромеханических систем / В.Я. Седуш[и др.] // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб.наук.пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2009.– Вип. 19. – С. 152-156. (Определение допустимых диапазонов изменения диагностических параметров).

15. Седуш, В.Я. Изменения в ремонтных структурах металлургических предприятий / В.Я. Седуш, **В.А. Сидоров** // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – №6 (258). – С. 76 – 78. (Вопросы формирования служб диагностирования металлургических предприятий).

16. Математическое моделирование причин разрушения вала двигателя привода прокатной клетки / В.М. Кравченко[и др.] // Захист металургійних машин від поломок: зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2009. – Вип. 11.– С. 7 – 14. (*Анализ отказов элементов металлургических машин*).

17. **Сидоров, В.А.** Організація технічного обслуговування і ремонту механізму хитання кристалізатора МБЛЗ / **В.А. Сидоров**, О.Л. Сотніков, В.С. Птуха // Захист металургійних машин від поломок: зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2009.– Вип. 11. - С. 125 – 129. (*Вопросы формирования служб диагностирования металлургических предприятий*).

18. Ніщета, В.В. Класифікація вібросистем / В.В. Ніщета, **В.А. Сидоров** // Нафтова та газова промисловість. – 2009. – №1. – С. 47-50. (*Использование методов и средств технической диагностики на металлургических предприятиях*).

19. **Сидоров, В.А.** Інформаційне забезпечення управління безотказністю механічного обладнання // Наук.пр. Донецького національного технічного університету. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. –Вип.11 (159).– С. 220 – 228. (сер.: металургія).

20. Седуш, В.Я. Теоретическіе основи ремонту механічного обладнання / В.Я. Седуш, **В.А. Сидоров** // Наук.пр. Донецького національного технічного університету. – Донецьк: ДонНТУ, 2009.–Вип.12. – С. 322 – 333. (сер.: металургія). (*Разработка методов оценки технического состояния металлургических машин с учётом особенностей эксплуатации*).

21. **Сидоров, В.А.** Современныe задачи диагностирования технического состояния механического оборудования // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. Ежеквартальный научно-технический и производственный журнал. – 2010. – №3. - С.47 – 52.

22. Совершенствование структуры и функций ремонтных служб металлургических предприятий / В.И. Бобровицкий[и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – №4. – С. 107 – 109. (*Вопросы формирования служб диагностирования металлургических предприятий*).

23. **Сидоров, В.А.** Результаты вибрационного обследования двигателей и редукторов привода главного подъема электромостового крана грузоподъемностью 275 т // Науково-технічний та виробничий журнал «Підйомно-транспортна техніка». – 2010. – №1(10). - С. 81 – 89. (сер.: машинобудування і машинознавство).

24. **Сидоров, В.А.** Анализ вибрационного сигнала / Наук.пр. Донецького національного технічного університету.. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. –Вип. 7 (166).– С. 195 – 203.

25. **Сидоров, В.А.** Анализ режимов работы столов качания сортовых МНЛЗ // Металлургическая и горнорудная промышленность. –2010. – №6 (264). - С. 90 – 93.

26. Кравченко, В.М. Особенности износа подшипниковых узлов рабочих валков блюминга / В.М. Кравченко, **В.А. Сидоров**, В.В. Буцукин // Захист металургійних машин від поломок: зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2010.– Вип. 12. – С. 90 – 92. (*Анализ отказов элементов металлургических машин*).

27. **Сидоров, В.А.** Анализ состояния элементов гидропривода металлургических машин. / **В.А. Сидоров**, Е.В. Ошовская // Наук. пр. Донецького національного технічного університету.– Донецьк: ДонНТУ, 2011.– Вип. 22 (195). - С. 226 – 235.

(сер: Гірничо-електромеханічна). *(Анализ отказов элементов металлургических машин)*.

28. **Сидоров, В.А.** Информационные основы виброметрии / Вісник СевНТУ: зб.наук. пр. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – Вип. 117. - С. 157 -165. (сер.: машиноприладобудування та транспорт).

29. **Сидоров, В.А.** Последовательность решения задач диагностирования механических систем / Наук. пр. Донецького національного технічного університету. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. - Выпуск 8 (190). – С. 171 – 181.(сер.: машинобудування і машинознавство).

30. **Сидоров, В.А.** Оценка технического состояния механизмов подъёма металлургических кранов / **В.А. Сидоров, Е.В. Ошовская** // Наук. пр. Донецького національного технічного університету. Донецьк: ДонНТУ, 2012. – Вип. 23 (196). - С. 226 – 239.(сер.: гірничо-електромеханічна). *(Определение допустимых диапазонов изменения диагностических параметров)*.

31. **Сидоров, В.А.** Обеспечение работоспособного состояния механизма на этапе эксплуатации / Вісник СевНТУ: зб.наук. пр. - Севастополь: СевНТУ, 2012. – Вип. 129. - С. 199 – 206.(сер.: машиноприладобудування та транспорт).

32. **Сидоров, В.А.** Практика анализа отказов оборудования / **В.А. Сидоров, Е.В. Ошовская** // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – №4 (283). - С. 100 – 103. *(Определение допустимых диапазонов изменения диагностических параметров)*.

33. **Сидоров, В.А.** Исследования причин износа опорного кольца механизма поворота свода электродуговой печи // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – №5 (284). - С. 88 – 92.

– **публикации в рецензируемых периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

34. Контроль герметичности вакууматора / В.Я. Седуш [и др.] // Металлург. - 1987. - №7. - С. 26. *(Использование методов и средств технической диагностики на металлургических предприятиях)*.

35. Седуш, В.Я. Современные методы и средства диагностики механического оборудования / В.Я. Седуш, Г.В. Сопилкин, **В.А. Сидоров**// БНТИ. Черная металлургия. - 1991. – №10. - С. 41-47. *(Использование методов и средств технической диагностики на металлургических предприятиях)*.

36. Диагностика механического оборудования трубопрессового цеха / Г.В. Сопилкин[и др.] // Металлург. - 1991. - №5. - С.18. *(Использование методов и средств технической диагностики на металлургических предприятиях)*.

37. Диагностика узлов привода БЗУ типа "воронка - склиз" / В.Я. Седуш[и др.] // Сталь. - 1993. - №1. - С. 20 - 21. *(Обобщение опыта определения диагностических признаков развития поврежденных металлургических машин)*.

38. **Сидоров, В.А.** Оценка состояния механизма поворота свода электродуговой печи // Производственно-технический журнал «Главный механик». – 2010. – №2. - С. 39-47.

– **публикации в других изданиях:**

39. Техническая диагностика механического оборудования/ **В.А. Сидоров**[идр.]. - Донецк: Новый мир, 2003. – 125 с. (*Использование методов и средств технической диагностики на металлургических предприятиях*).
40. Диагностирование механического оборудования металлургических предприятий / В.Я. Седуш[идр.]. – Донецк: Юго-Восток, Лтд, 2004. – 100 с. (*Определение допустимых диапазонов изменения диагностических параметров*).
41. Кравченко, В.М. Визуальное диагностирование механического оборудования / В.М. Кравченко, **В.А. Сидоров** – Донецк: Юго-Восток, Лтд, 2004.– 120с. (*Использование методов и средств технической диагностики на металлургических предприятиях*).
42. Электромеханические системы транспортирующих механизмов / В.Ф. Борисенко [и др.] ; под общ. ред. В.Ф. Борисенко. – Донецк: Вебер (Донецкое отделение), 2007. – 332 с. (*Использование методов и средств технической диагностики на металлургических предприятиях*).
43. **Сидоров, В.А.** Повреждения зубчатых передач: классификация // Международный информационно-технический журнал «Оборудование и инструмент для профессионалов, серия Металлообработка». – 2010. – №3.- С. 28–34.
44. **Сидоров, В.А.** Нарушение смазывания как причина отказов подшипников качения // Международный информационно-технический журнал «Оборудование и инструмент для профессионалов, серия Металлообработка». – 2010. – №4. - С. 72 - 76. №5. – С. 76 - 78.
45. Бобровицкий, В.И. Механическое оборудование: техническое обслуживание и ремонт. / В.И. Бобровицкий, **В.А. Сидоров**. – Донецк: Юго-Восток, 2011.– 238 с. (*Разработка методов оценки технического состояния металлургических машин с учётом особенностей эксплуатации*).
46. **Сидоров, В.А.** Информационные основы повышения безотказности металлургических машин // Международный научно-технический и производственный журнал «Вибрация машин: измерение, снижение, защита». – 2011. – №1 (24). - С. 36 – 45.
47. **Сидоров, В.А.** Границы различия технических состояний машин / **В.А. Сидоров, А.В. Сидоров** // Вибрация машин: измерение, снижение, защита: материалы Межд.науч.-техн. конф.,Донецк. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – С. 31-37. (*Определение допустимых диапазонов изменения диагностических параметров*).
48. **Сидоров, В.А.** Вибрационные характеристики трещин металлоконструкций // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: материалы Седьмой ежегодной межд.конф., 12-16 февраля 2007 г., п. Славское, Карпаты. - Киев: УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА, ТЕХНОЛОГИЯ», 2006. - С.336 – 339.
49. **Сидоров, В.А.** Изменение работоспособности механического оборудования как восстанавливаемой системы // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: материалы Семнадцатой межд. конф., 5 – 9 октября 2009 г., Ялта. – Киев: УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ», 2009. - С. 21–23.
50. **Сидоров, В.А.** Категории технического состояния механического оборудования металлургических предприятий // Современные методы и средства неразру-

шающего контроля и технической диагностики: материалы Восемнадцатой межд. конф., 4– 8 октября 2010 г., Ялта. – Киев: УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ», 2010 г. - С. 37 – 39.

51. **Сидоров, В.А.** Особенности оценки технического состояния вертикальных комбинированных редукторов среднесортного прокатного стана / **В.А. Сидоров, А.Л. Серебров**; відповідальний редактор В.І. Большаков // Надійність металургійного обладнання: зб. наук. пр. за матеріалами Міжн.наук.-техн.конф., 28-31 жовтня 2013 р., Дніпропетровськ (Україна). – Дніпропетровськ: ІМА-прес, 2013. - С. 245 – 251. (*Обобщение опыта определения диагностических признаков развития поврежденных металлургических машин*).

52. **Сидоров, В.А.** Исследование диагностических параметров технического состояния механизмов подъёма литейных кранов / **В.А. Сидоров, Е.В. Ошовская** // Надійність металургійного обладнання: зб. наук. пр. за матеріалами Міжн.наук.-техн.конф., 28-31 жовтня 2013 р., Дніпропетровськ (Україна). Відповідальний редактор В.І. Большаков. – Дніпропетровськ: ІМА-прес, 2013. - С. 239 – 244.

53. **Сидоров, В.А.** Диагностические параметры для оценки технического состояния механизмов подъёма литейных кранов / **В.А. Сидоров, Е.В. Ошовская**; отв. ред. А.Л. Кузьминов // Научно-технический прогресс в чёрной металлургии: материалы I Межд. научн.-техн. конф., 2–4 октября 2013 г. – Череповец: ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет», 2013. -С. 291–297. (*Обобщение опыта определения диагностических признаков развития поврежденных металлургических машин*).

Подписано к печати _____.____.2016 г. Формат 60×84^{1/16}. Бумага мелованная. Гарнитура»Newton». Печать – лазерная. Ус. печ. л. 2,0. Заказ №0916. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии Издательства «Донецкая политехника»
на цифровом лазерном издательском комплексе Xerox DocuColor 2060
Тел.: +380 (62) 304-60-82