

На правах рукописи



Крансуцкая Анастасия Алексеевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ АДДИТИВНЫХ И ФАЗОХРОНОМЕТРИЧЕСКИХ  
ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Специальность 2.2.10 - Метрология и метрологическое обеспечение

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических  
наук

Москва, 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Научный руководитель:

**Комшин Александр Сергеевич**

доктор технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,  
заведующий кафедрой метрологии и  
взаимозаменяемости

Официальные оппоненты:

**Минаев Владимир Леонидович**

доктор технических наук  
ФГБУ «Всероссийский научно-  
исследовательский институт оптико-физических  
измерений», начальник отделения

**Епифанцев Кирилл Валерьевич**

кандидат технических наук  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный университет аэрокосмического  
приборостроения»,  
доцент кафедры метрологического обеспечения  
инновационных технологий и промышленной  
безопасности

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.16 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru)

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Телефон для справок 8(499) 263-66-33 доб.35-58

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.331.16  
кандидат технических наук



Сырицкий Антони Борисович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современный этап развития нашей страны, отраслей экономики и ведущих отраслей требует создания, разработки и исследований сложных технических систем методами информационно-метрологического сопровождения.

Одновременно с этим с помощью аддитивных технологий (АТ) можно достичь более сложных структур, геометрии, более высокой эффективности, индивидуального дизайна, более высокой производительности и хорошей экологической устойчивости. Благодаря этому АТ выходят за рамки прототипов для производства конечной продукции и запасных частей. Возрастает также роль оценки технического состояния и метрологического обеспечения сложных технических систем на разных этапах жизненного цикла в машиностроении, учитывая внедрение новых производственных технологий.

**Степень разработанности темы.** Существенный вклад в развитие областей аддитивных технологий и метрологического обеспечения измерений, мониторинга и оценки технического состояния систем объектов машиностроения внесли зарубежные и отечественные исследователи: Sam Allen, Emmanuel M. Sachs, Michael J. Cima, John Cahn, S.Scott Crump, Jean Taylor, С.Hull, А.М. Рогалев, П.И. Неижмаков, А.В. Прокопов, С.Т. Милейко, А.А. Громов, А.И. Хаймович, В.Н. Леднев, Л.Р. Ботвина, И.В. Жирнов, А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, С.В. Резник, А.Л. Галиновский, В.В. Ключев, Н.П. Алёшин, М.И. Киселёв, Н.А. Махутов, А.И. Леонтьев, В.В. Осташев, В.И. Ерофеев, В.В. Мишакин, В.И. Пронякин и др.

**Цель диссертации** заключается в совершенствовании научно-методических подходов к метрологическому обеспечению аддитивных и фазохронометрических технологий для объектов машиностроения.

Для достижения поставленной цели были определены следующие **задачи**:

1. Провести анализ существующих подходов метрологического обеспечения в области машиностроения, включая научное обоснование применения методов и средств измерений на основе оценки информационной эффективности.

2. Разработать научно-методический подход применения фазохронометрического метода (ФХМ) в целях повышения энергоэффективности на примере электродвигателя.

3. Разработать методику определения качества сборки подшипника на базе исследования геометрии тел качения по критерию параметрической идентификации.

4. Разработать научно-обоснованный подход к обеспечению требований точности изделий, полученных аддитивными технологиями, для обеспечения качества изделий машиностроения, и исследовать влияния отдельных параметров технологического процесса на характеристики деталей аддитивного производства.

**Методы исследования.** В работе применён математический аппарат прикладной метрологии в сочетании с методами теоретической механики, теории колебаний, сопротивления материалов, теории электропривода. Исследования выполнены в лабораторных условиях с использованием современных

измерительных средств на базе оптоэлектроники. Обработка результатов измерений проведена с помощью методов обработки многократных измерений и элементов дисперсионного анализа.

**Научная новизна** результатов заключается в следующем:

1. Разработан научно-методический подход к метрологическому обеспечению машиностроительных комплексов на примере электродвигателей и подшипников качения, предложена и научно обоснована классификация использования средств измерения и измерительных систем на основе анализа информационной емкости измеряемой физической величины.

2. Научно обоснована и апробирована методика определения качества сборки подшипника на базе исследования геометрии тел качения по критерию параметрической идентификации.

3. Впервые применён фазохронометрический метод для оценки критериев повышения энергоэффективности промышленных электродвигателей.

4. Разработан и научно обоснован подход к обеспечению качества изделий машиностроения путем создания проекта системы интервалов допусков и посадок изделий для аддитивных технологий.

5. Предложен графический подход к активному контролю параметров жизненного цикла изделия аддитивного производства, основу которого составляет многопараметрическая динамическая функция состояния.

**Личный вклад** соискателя состоит во включённом участии на всех этапах процесса проведения научных исследований по разработке методов метрологического обеспечения информационно-измерительных систем для фазохронометрических и аддитивных технологий в области машиностроения. Результаты диссертации получены и сформулированы автором лично, либо при его непосредственном участии. Все научные положения, постановка задач, выводы и рекомендации сформулированы лично автором. Соискатель лично выполнил обработку и интерпретацию экспериментальных данных, полученных измерениями деталей, изготовленных аддитивными технологиями, и на разработанном стенде контроля состояния электродвигателя. Автором лично выполнена апробация и внедрение результатов диссертации в учебный процесс кафедры метрологии и взаимозаменяемости МГТУ им. Н. Э. Баумана.

**Теоретическая значимость** исследования заключается в дальнейшем развитии методов метрологического обеспечения информационно-измерительных систем для аддитивных и фазохронометрических технологий в области машиностроения.

**Практическая значимость.**

1. Отдельные результаты диссертационной работы имеют существенное теоретическое и практическое значение и отмечены в части пересмотра базы стандартизации и управления, а также реализации полного нормативного метрологического обеспечения процессов жизненного цикла изделий ООО «СИБУР» (Акт ООО «Сибур» от 29.08.2024 г.).

2. Работа поддержана в рамках проектов:

- грант РФФИ 20-38-90133 «Разработка и исследование информационно-измерительных комплексов повышения энергоэффективности в области машиностроения в условиях цифровой экономики», в котором соискатель являлся непосредственным руководителем;

- грант Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук МД-1209.2020.8 «Разработка научных и методических подходов применения интеллектуальных измерительных комплексов в области ветроэнергетики и гидроэнергетики в целях контроля качества электрической энергии и мониторинга оборудования на базе фазохронометрического метода». Срок выполнения 2020-2021 гг.;

- государственное задание 9.4968.2017/БЧ «Разработка научных основ и методов повышения точности измерительно-вычислительных фазохронометрических технологий поддержки жизненного цикла высокотехнологичных объектов машиностроения». Срок выполнения 2017-2019 гг.

3. Полученные в диссертации результаты исследований показали повышение качества поверхности изделия в продольном направлении и по периметру после лазерной обработки до 20 раз, а в поперечном направлении более чем в 10 раз. Предложенный подход к метрологическому обеспечению допусков показал, что зоны повторного нагрева материала требуют особого внимания, т.к. шероховатость поверхности ухудшается в 1,5-2 раза, как в продольном, так и в поперечном направлении.

4. Эффективность применения разработанного в диссертации подхода к формированию системы интервалов допусков и образования посадок для изделий, полученных аддитивными технологиями, доказана на примере лазерной полировки методом переплавления поверхности изделия. Применение технологии лазерной полировки переплавлением повышает качество поверхности деталей машиностроения: позволяет достигнуть уменьшения микрошероховатости в 3-5 раз и макрошероховатости в 4-5 раз.

5. На основе полученных результатов в рамках диссертации разработаны учебно-методические материалы, включённые в учебные дисциплины кафедры метрологии и взаимозаменяемости МГТУ им. Н.Э. Баумана: «Физические основы измерений и эталоны», «Информационная поддержка жизненного цикла продукции», «Основы автоматизированного проектирования», «Метрология, стандартизация и сертификация», входящими в учебный план кафедры.

**На защиту выносятся** следующие основные положения:

1. Научно-методический подход к метрологическому обеспечению машиностроительных комплексов на базе классификации использования средств измерения и измерительных систем на основе анализа информационной емкости измеряемой физической величины.

2. Методика определения качества сборки подшипника на базе исследования геометрии тел качения по критерию параметрической идентификации.

3. Проект системы допусков и посадок для аддитивных технологий в целях обеспечения качества изделий машиностроения, на основе применения многопараметрической динамической функции состояния.

4. Возможность применения фазохронометрического метода в целях повышения энергоэффективности на примере электродвигателя.

**Апробация результатов работы.** Вошедшие в диссертацию результаты докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях: Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2016 г., 2017 г., 2018 г., 2019 г., 2022 г.); Международная научной конференции «Фундаментальные и прикладные задачи механики» (Москва, 2017 г.); Всероссийской конференции с международным участием «Инженерно-физические проблемы новой техники» (Москва, 2018 г., 2020 г, 2022 г.); XXX Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2018), (Москва, 2018 г.); International Conference of Young Scientists and Students «Topical Problems of Mechanical Engineering», (Москва, 2019 г.); XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, (Москва, 2021 г.); Intelligent Manufacturing and Materials (IMM 2021), (Ялта, 2021 г.), Международной конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении (ICMTMTE 2021)» (Севастополь, 2021 г.); Всероссийский научно-практический семинар «Метрологическое обеспечение в области неразрушающего контроля», ФГУП «ВНИИФТРИ», (Солнечногорск, 2024 г); Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования», ФГАОУ ВО «СевГУ» (Севастополь, 2024 г).

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в 14 научных работах, в том числе 6 статьях в журналах, 2 из которых в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 в международных базах данных Scopus и Web of Science, общим объемом 3,83 п.л. для публикации основных результатов научных работ соискателей ученой степени кандидата и доктора наук.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка используемой литературы из 124 источников и приложение. Содержит 115 страниц, в том числе 34 рисунка и 11 таблиц.

**Область исследования.** Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.2.10. – Метрология и метрологическое обеспечение. Область исследования соответствует пунктам: 1. Создание новых научных, технических и нормативно-методических решений, обеспечивающих повышение качества продукции. 8. Создание и совершенствование системы метрологического обеспечения приборостроения, в том числе цифровых технологий.

**Обоснованность и достоверность** определяется использованием аттестованных методик и поверенных средств измерения в ходе лабораторных и стендовых испытаний, подтверждается сопоставлением результатов исследований с данными моделирования и теоретическими расчетами.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, поставлены цели и задачи работы, определено её содержание, указаны основные положения, выносимые на защиту, выделены научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** представлен анализ существующих проблем и разработок в области мониторинга объектов машиностроительного комплекса, а также тенденции развития современных технологий тяжёлого и энергетического машиностроения с учетом применяемых измерительных систем. С учётом современных тенденций резко возросла потребность в непрерывном метрологическом сопровождении жизненного цикла изделий (ЖЦИ). Реализация данного требования возможна при обеспечении измерений параметров функционирования объекта с момента его первого запуска – механического включения (Рисунок 1), хотя формально изделие ещё и не находится в эксплуатации, однако, его характеристики (свойства элементов продукции) уже претерпевают изменения.

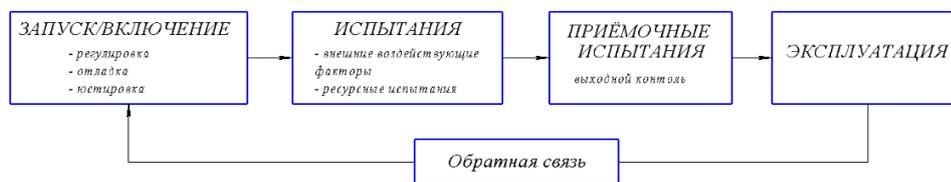


Рисунок 1. Основные этапы ЖЦИ

Таким образом, основной проблемой и задачей оценки текущего технического состояния машиностроительного оборудования является разработка адекватного для конкретных видов измерений метрологического обеспечения.

В России, согласно данным ФГИС «Аршин» (ФГИС Росстандарт), 193 государственных первичных эталона (действует 143) различных основных и производных единиц физических величин. Для сравнения эталонов по точности рассчитана относительная погрешность, выраженная через суммарную неопределённость. На основании теоремы Котельникова (Найквиста-Шеннона) проведен расчет информативности измерений различных физических величин в зависимости от класса точности применяемых средств измерения на рисунке 2.

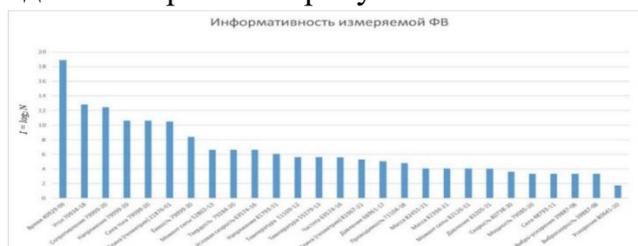


Рисунок 2. Информативность измеряемой физической величины

Из рисунка 2 следует, что к наиболее информативным физическим величинам относятся величины времени и частоты. Но цифровая модель работы механизма не может ограничиваться только одним измерением – необходим комплексный подход. Предложено обоснование выбора средств измерений на основе анализа информационной емкости для разработки методологии построения информационно-измерительных систем в целях повышения энергоэффективности машиностроительных комплексов на базе современных подходов.

**Во второй главе** представлена разработка фазохронометрической измерительной системы электродвигателя в целях совершенствования подходов к оценке его эффективности при эксплуатации. Разрабатываемая информационно-измерительная система предполагает комплексный подход для контроля работы электромеханической системы, т.к. при эксплуатации изделия вступает в силу неустраняемый фактор времени, проявляющийся в износе деталей и деградации материалов. Система чувствительная к зарождающимся дефектам, что способствует использованию меньшего количества энергии для обеспечения того же уровня энергетического обеспечения технологических процессов на производстве.

Для верификации параметров математической модели с целью получения характеристик в фазохронометрическом представлении подшипников и электромеханической системы был разработан стенд на примере электродвигателя АИР56В2. Структурная схема стенда представлена на рисунке 3: датчик угловых перемещений устанавливается на вал электродвигателя с помощью соединительной муфты и специальной оснастки. Сигнал с датчика поступает на блок обработки информации, а далее в формате временных интервалов передаётся на компьютер, где данные обрабатываются с помощью специального программного обеспечения.

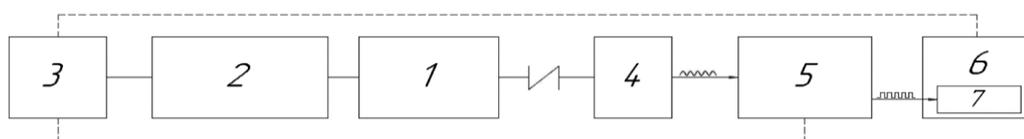


Рисунок 3. Структурная схема стенда: 1 – электродвигатель, 2 – частотный преобразователь, 3 – источник питания, 4 – датчик угловых перемещений, 5 – блок обработки информации, 6 – персональный компьютер, 7 – специальное программное обеспечение

Для создания асимметрии на валу электродвигателя и проведения исследования была изготовлена конструкция, имитирующая дисбаланс, который по теореме Гюйгенса-Штейнера, вносит дополнительный момент инерции равный  $26,218 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Хронограммами в фазохронометрическом методе называются графики изменения длительности фазы оборота в зависимости от номера фазы. По оси абсцисс указаны номера измерений (фазы), а по оси ординат – длительность фазы в секундах. Такие хронограммы позволяют оценить неравномерность вращения вала. Для сравнения приведены графики отражающие внешние воздействия на вал электродвигателя: удар (рисунок 4) и дисбаланс (рисунок 5).

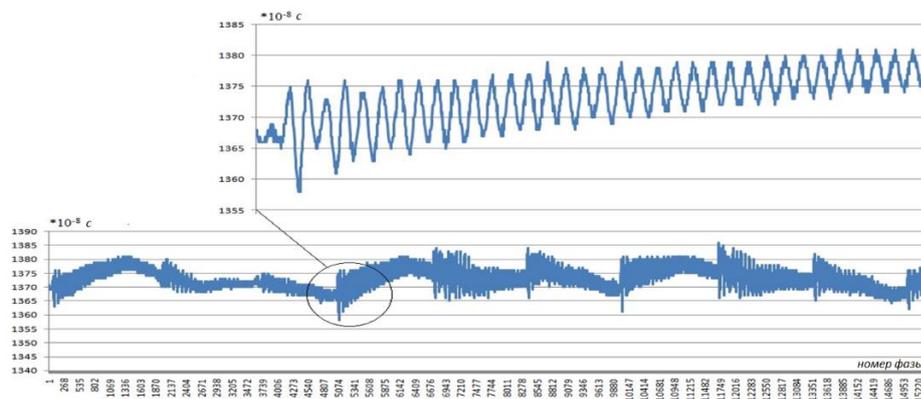


Рисунок 4. Хронограмма вращения при ударе

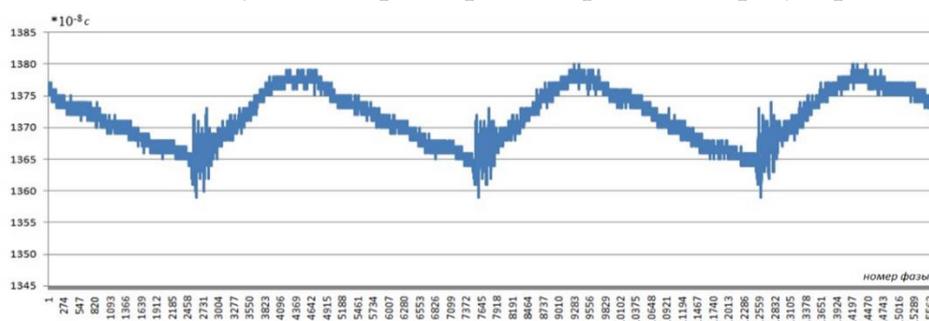


Рисунок 5. Хронограмма вращения при дисбалансе

В момент удара происходит мгновенное изменение скорости, что отображается всплесками на хронограмме. В случае сопротивления материальная точка совершает затухающее движение. Работа электродвигателя с внесённым на вал дисбалансом на хронограмме отражается как удар, но уже единичный, в точке, где суперпозиция сил тяжести  $mg$  и инерции  $\Phi$  достигает максимума. Спектральный анализ рядов интервалов времени показал наличие повторяющихся пиков в области 10 Гц и 30 Гц (Рисунок 6).

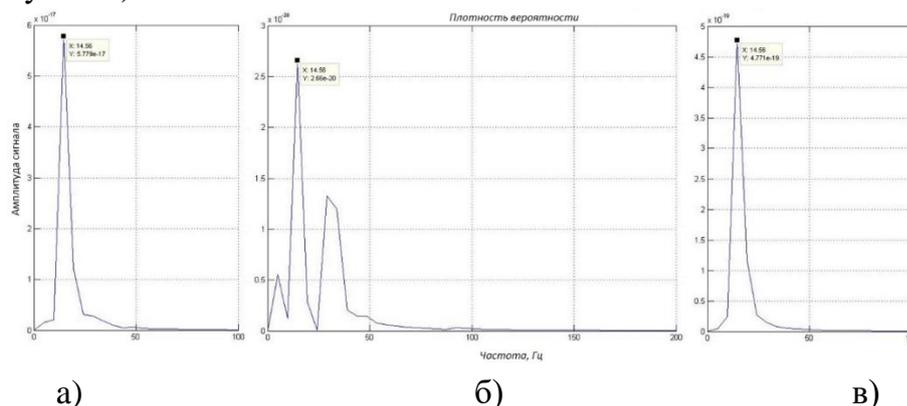


Рисунок 6. Спектральный анализ: спектр собственных частот колебаний системы а) на холостом ходу, 15Гц; б) при ударе; в) при дисбалансе

На холостом ходу проявляется только основная гармоника, совпадающая с заданной частотой на частотном преобразователе. Например, выбираем для эксперимента частоту 15 Гц, на спектрограмме видим соответствующий пик 14,56 Гц. Разница обусловлена применением недостаточно точного частотного преобразователя двигателя в составе стенда. При ударе возникает утроение пиков, т.е. появление двух



Разноразмерность тел качения подшипника является одной из основных причин сокращения ресурса работы подшипника, следовательно, и механизма в целом. Для прогноза необходимо знать закон распределения. Согласно технологии изготовления шариков для подшипников, перед селективной сборкой их подвергают сплошному контролю, и разброс диаметра не должен превышать 10 мкм. Проведены исследования рабочих поверхностей однорядного радиального подшипника качения на измерительном проекторе МР 320 (Рисунок 7).

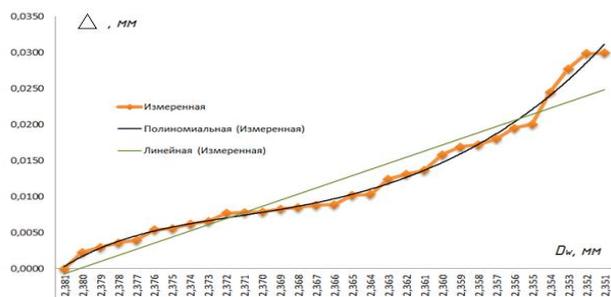


Рисунок 7. Разброс диаметра шарика, мм

Расхождение между распределениями, принятым (Гаусса или равномерного) и статистическим, является погрешностью неадекватности принятого распределения вероятностей. Для её оценивания используют контурные оценки (Рисунок 8) на основе теоремы П. Леви. На основании исследований геометрии тел качения предложена методика определения качества сборки подшипника по критерию параметрической идентификации на базе методов многократных измерений (ММИ), максимальной компактности (ММК) и наименьших квадратов (МНК).

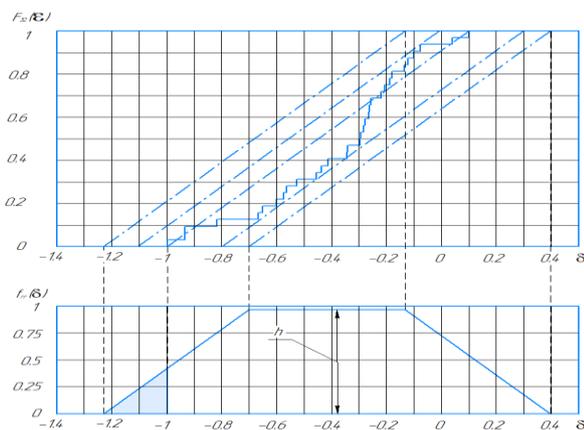


Рисунок 8. Контурной оценки распределения погрешности измерения разноразмерности шарика подшипника

**В четвертой главе** описывается современное состояние метрологического обеспечения и требований к разработке конструкторской документации изделий, полученных методом аддитивных технологий. В России существует ряд стандартов и технических условий, касающихся аддитивных технологий, например, ГОСТ Р ИСО/АСТМ 52910-2018, где устанавливаются основные термины и

определения, используемые в области производства добавлением материала. Одновременно с этим, на сегодняшний момент в России еще не существует специального ГОСТа, полностью посвященного метрологическому обеспечению аддитивных технологий.

С точки зрения контроля, жизненный цикл аддитивного производства условно можно разделить на три элемента (рисунок 9): I – изготовление каркаса детали (базовая часть), II – изготовление до достижения максимума коэффициента используемого материала (точка A), III – этап изготовления годного изделия.

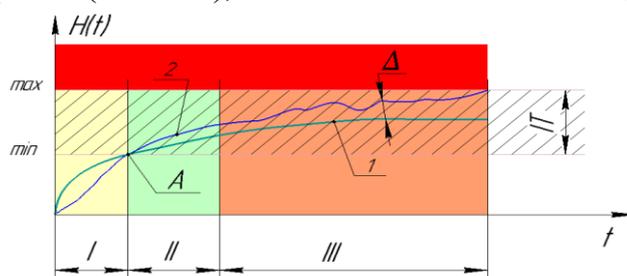


Рисунок 9. Контроль жизненного цикла аддитивного производства:  
1 – идеальный процесс, 2 – реальный процесс

Для того, чтобы получить заведомо годное изделие необходимо соответствующий набор диагностических параметров для контроля аддитивного производства. На первом этапе необходимо оценить геометрию базирования, отклонения расположения, константность подачи материала, а также стабильность мощности излучения. На втором этапе важно отслеживать линеаризацию оперативной характеристики, чтобы обеспечить функцию обратной связи и оперативно её регулировать. Заключительный третий этап требует особого внимания: чтобы готовое изделие гарантировано находилось в границах допуска  $IT$ , необходимо минимизировать функцию расхождения  $\Delta$  реального процесса с цифровой копией технологически верного процесса производства. Состояние процесса с течением времени меняется, поэтому  $\Delta$  представляет собой многопараметрическую динамическую модель:

$$\Delta = H(t) = F(t, t_1, t_2, t_3, \dots, t_n, \dots) \quad (2)$$

Аргументы функции (2) являются параметрами технологического процессов аддитивного производства: мощность и стабильность лазерного излучения, толщина и материал слоя, температуры рабочей камеры и др.

Таким образом, так как порядок формообразования изделия для различных видов аддитивных процессов отличается, то в зависимости от типа процесса на разных этапах необходим свой метрологический уровень для обеспечения структуры и размеров поверхности детали. Но есть один ключевой этап, который не зависимо от типа процесса требует особого внимания, для получения заведомо годного изделия. Многообразие изделий сложной формы, использование металлов и биметаллов с различными технологиями аддитивного формообразования приводит к тому, что необходимо пересмотреть подход к образованию системы допусков и посадок для изделий аддитивного производства. При реализации изделий

на базе аддитивных технологий допуск основного вала не должен располагаться «в тело», т.е. необходимо использовать альтернативную систему (Рисунок 10) расположения полей допусков размеров основного вала  $Td$  и основного отверстия  $TD$  традиционной из ГОСТ 25346-2013 (ISO 286-1:2010).

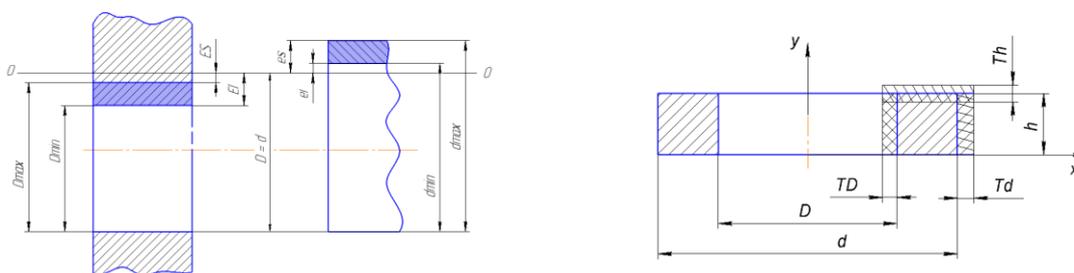


Рисунок 10. Альтернативная система интервалов допусков

С учётом разнообразия методов получения деталей и для исключения создания избыточной системы допусков и посадок предлагается широкое использование переходных посадок в соединениях деталей, полученных путем послойного наращивания и синтеза объектов. Назначения допуска «в тело» материала связано с обеспечением качества изделия, полученного традиционными технологиями формообразования. Для реализации динамической многопараметрической модели для аддитивных технологий допуск основного вала должен располагаться «в плюс», т.е. в сторону наращивания материала, а «в минус» соответствует постобработке. С учётом усадки расплавленного материала, интервал допуска каждого слоя  $h$  следует принять симметричным (Рисунок 10).

Таким образом, одним из ключевых направлений развития аддитивных технологий при производстве изделий является разработка и создание системы допусков и посадок, а также реализация полного нормативного метрологического обеспечения процессов жизненного цикла. Данные ограничения предполагают другое использование средств контроля, измерительных комплексов, т.е. пересмотр базы стандартизации и управления.

Рассмотрен пример сравнения размеров детали Кулак поворотный из материала АК7ч литьем под давлением и 3D-печатью. Сравнение внутренних и наружных размеров реальных деталей, используя 3D-модели после КТ на томографе GE m300, номинальной САПР-модели и адаптированной Netfabb модели представлены на рисунке 11.

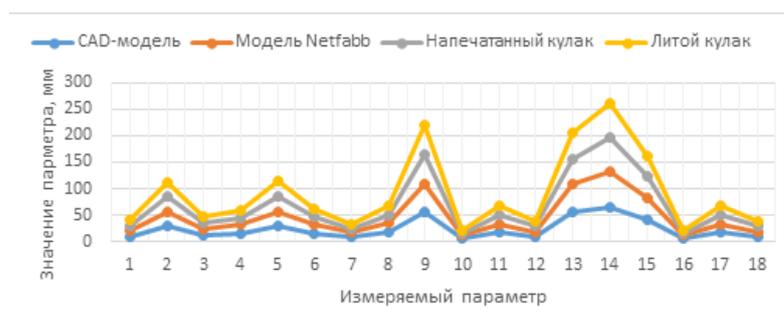


Рисунок 11. Сравнение параметров напечатанного и литого кулака

Основное преимущество процесса 3D-печати в сравнении с литьём – это возможность поднастройки параметров детали непосредственно в процессе изготовления в режиме реального времени. Применение АТ в процессе производства литейных форм и деталей в конечном итоге приводит к снижению издержек. Из результатов сравнения следует, что объем напечатанной детали меньше на 8,65%, а это экономия материала и снижение стоимости производства.

При изготовлении деталей аддитивными технологиями одной из задач является оценка качества получаемых поверхностей и анализ влияния на неё исходных характеристик процесса и исходных материалов. Представлены результаты исследования контактным и бесконтактным методами параметров шероховатости деталей, полученных лазерной полировкой с помощью лазерного технологического комплекса на базе иттербиевого волоконного лазера. Контактное исследование поверхности образцов проводилось при помощи портативного прибора MarSurf M300 для прецизионного измерения шероховатости. Оценка шероховатости (Рисунок 12) велась как в продольном, так и в поперечном направлениях до и после лазерной обработки, с особым вниманием зонам повторного нагрева, которые возникали из-за наложения траекторий обработки поверхности. Методика предполагала получение усредненного значения шероховатости поверхности по результатам измерения пяти базовых длин по 0,8 мм в каждой зоне.

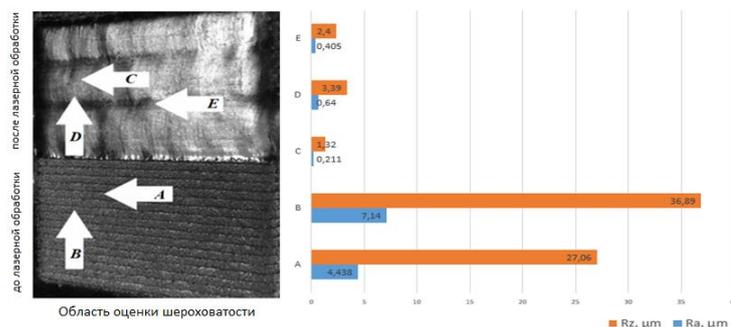


Рисунок 12. Оценка шероховатости поверхности

Результаты измерений подтвердили, что на отдельных образцах шероховатость поверхности в продольном направлении после лазерной обработки улучшилась в 20 раз по параметру Ra и более чем в 25 раз по параметру Rz, в поперечном направлении шероховатость поверхности улучшилась более чем в 10 раз по параметрам Ra, Rz. Поверхность образца после лазерной обработки имеет неравномерный характер, произошло перераспределение жидкого расплава металла по поверхности, но наблюдаются значительные отклонения параметров шероховатости в продольном и поперечном направлении. Шероховатость поверхности образца в зонах повторного нагрева ухудшается в 1,5-2 раза, относительно общей тенденции, как в продольном, так и в поперечном направлении. Полученные данные позволяют судить о том, что для получения равномерного характера распределения неровностей по поверхности образца в будущем следует выбирать стратегии обработки, которые позволяют добиться минимального перекрытия траекторий обхода поверхности изделия, а также увеличить время

пребывания металла в жидком состоянии, что позволит выровнять неравномерный характер распределения в поперечном и продольном направлении обрабатываемой области.

Бесконтактные измерения параметров поверхности, полученной методом переплавления поверхности на основе Co и на основе Ni, были проведены при помощи измерителя PGI 3D фирмы Taylor Hobson, обеспечивающего выполнение комплексной оценки погрешности формы детали и неравномерности кривизны поверхности для большинства литых, шлифованных деталей или деталей после алмазной обработки. Результаты исследования поверхности до и после лазерной полировки показаны на рисунке 13 для профилей образцов из никеля (а, б) и кобальта (в, г). Микрощероховатость поверхности никелевого образца до полировки составляла  $Rz = 7,4$  мкм, после полировки  $Rz = 1,3$  мкм, а макрошероховатость поверхности до полировки составляла  $R_{max} = 305$  мкм, после полировки  $R_{max} = 61$  мкм. Микрощероховатость поверхности образца из кобальтового сплава до полировки составляла  $Rz = 5,2$  мкм, после полировки  $Rz = 1,7$  мкм, а макрошероховатость поверхности до полировки составляла  $R_{max} = 260$  мкм, после полировки  $R_{max} = 50$  мкм.

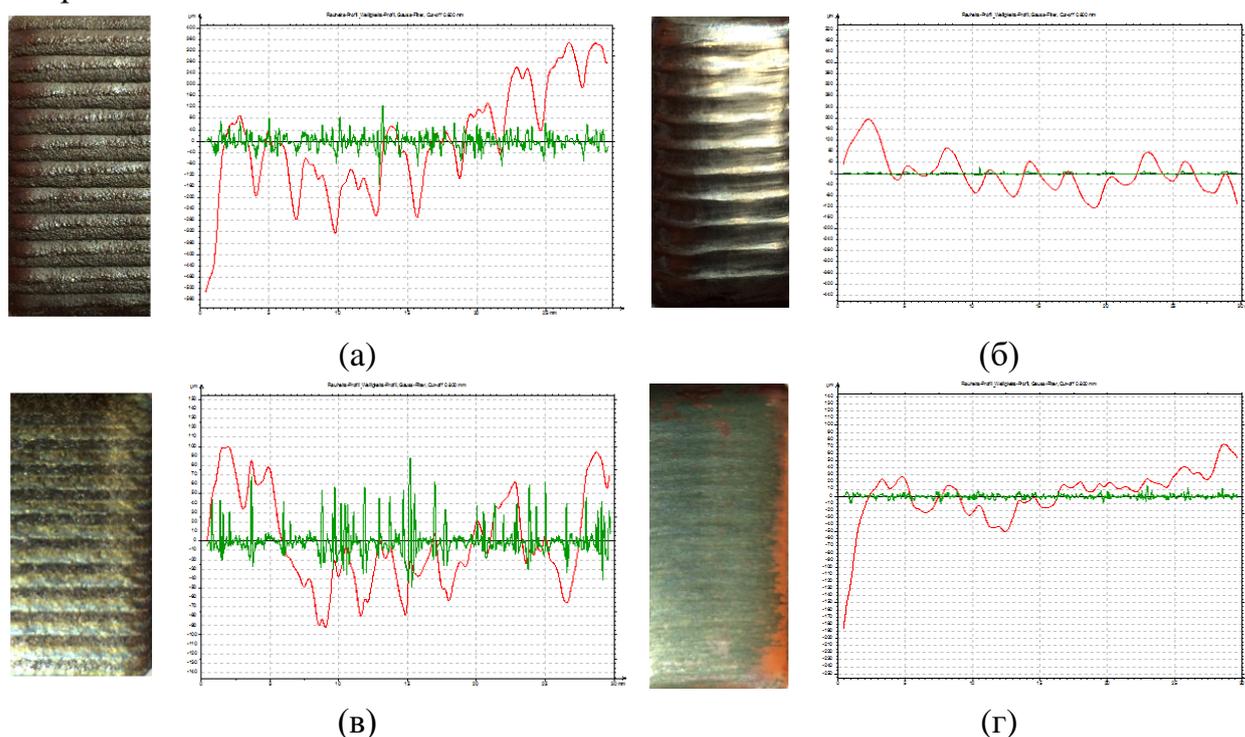


Рисунок 13. Профили поверхности образцов до (а), (в) и после (б), (г) лазерной полировки

На основании полученных результатов исследований выбраны рациональные режимы обработки поверхности образцов из никелевого сплава лазерной полировкой переплавлением, применение которых позволило достигнуть уменьшения шероховатости в 10 раз и более, минимизируя при этом воздействия ограничивающих факторов, связанных с физикой процесса. Получено, что применение такой технологии позволяет достигнуть уменьшения

микрошероховатости в 3-5 раз и макрошероховатости в 4-5 раз для исследуемых образцов, полученных из металлических порошков на основе Co и Ni.

Таким образом, в ходе работы предложен графический подход к контролю параметров жизненного цикла многообразия типов аддитивных технологий, основой которого составляет многопараметрическая динамическая функция состояния. В зависимости от типа процесса на разных этапах необходим свой метрологический уровень для обеспечения структуры и размеров поверхности детали, но есть один ключевой этап, который требует особого внимания для получения заведомого годного изделия.

**В Заключении** анализируются полученные результаты и приводятся общие выводы по работе.

**В приложении** приведены результаты расчета информативности физических величин и практический пример расчёта основной погрешности и достоверности контроля разноразмерности шариков подшипника для оценки качества его сборки методом параметрической идентификации.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

В ходе работы получены следующие результаты:

1. Проведён анализ существующих проблем и разработок в области мониторинга объектов машиностроительного комплекса, а также тенденции развития современного тяжёлого и энергетического машиностроения с учетом применяемых измерительных. Показано, что для ограничения количества средств измерений по точности для конкретного типа приборов необходимо устанавливать ограниченное количество классов точности, определяемое технико-экономическими обоснованиями. Предложен научно-методический подход выбора средств измерений на основе анализа информационной емкости физической величины, применимый в широком спектре задач метрологического обеспечения машиностроительных комплексов.

2. Научно-обосновано применение фазохронометрического метода как инструмента повышения энергоэффективности: выявлены частоты колебаний вала электродвигателя, независимых от вращения вала и вариантов нагрузки, что свидетельствует о присутствии устойчивых признаков работы механизма, которые могут быть использованы в качестве диагностических.

3. Для верификации параметров математической модели с целью получения характеристик в фазохронометрическом представлении подшипников и электромеханической системы был разработан стенд на примере электродвигателя АИР56В2. Разработана методика диагностирования дефектов опоры качения по соотношениям, измеряемых с применением фазохронометрической системы. На основании данной методики разработана математическая модель подшипников качения в фазохронометрическом представлении.

4. Проведены исследования рабочих поверхностей подшипника однорядного радиального подшипника качения. На основании исследований разработана

методика определения качества сборки подшипника на базе исследования геометрии тел качения по критерию параметрической идентификации ММК и МНК.

5. Проведены исследование геометрических характеристик деталей, изготовленных различными аддитивными технологическими процессами. Полученные результаты показали:

- применение аддитивных технологий в процессе производства литейных форм и деталей в конечном итоге приводит к снижению издержек. Объем напечатанной детали меньше на 8,65%, а это экономия материала и снижение стоимости производства;

- при бесконтактных измерениях исследуемых образцов из металлических порошков на основе Co (2537-10) и Ni (1560-00), полученные результаты, демонстрируют, что применение технологии лазерной полировки переплавлением позволяет достигнуть уменьшения микрошероховатости в 3-5 раз и макрошероховатости в 4-5 раз, а на отдельных образцах доказано повышение качества поверхности изделия в продольном направлении и по периметру после лазерной обработки в 20 раз, а в поперечном направлении более чем в 10 раз; необходимость альтернативного подхода к назначению допуска на размер поверхности в зонах повторного нагрева материала, т.к. шероховатость поверхности ухудшается в 1,5-2 раза, как в продольном, так и в поперечном направлении.

6. На основании проведенных исследований представлен графический подход к активному контролю параметров аддитивного производства, основой которого составляет динамическая функция состояния. Предложен и научно обоснован подход к формированию системы интервалов допусков и образования посадок для изделий, полученных аддитивными технологиями, что требует разработки единого стандарта по метрологическому обеспечению аддитивного производства.

#### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Modern Trends in Measurement Assurance of Additive Manufacturing / Kransutskaya A.A. [et al.] // AIP Conference Proceedings 2503, 070008 (2022), 070008-1–070008-7; <https://doi.org/10.1063/5.0099815>. (0,44 п.л./0,30 п.л.).
2. Measurement Assurance of Additive Manufacturing on the Example of Laser Surface Polishing Products by Remelting Manufacturing / Kransutskaya A.A. [et al.] // Materials Science Forum, 2021, 1037, 32-40, doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.32. (0,50 п.л./0,35 п.л.).
3. The study on external influence on the phasechronometric profile of asynchronous electric motors Manufacturing / Kransutskaya A.A. [et al.] // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 489 012019, 2019, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/489/1/012019>. (0,31 п.л./0,21 п.л.).
4. Метрологическое обеспечение аддитивных технологий в интересах развития промышленности / Крансуцкая А.А. [и др.]// Приборы. 2022. №10 С. 39-44. (0,31 п.л./0,19 п.л.).

5. Крансуцкая А.А., Ермаков К.С., Тумакова Е.В. Измерительное сопровождение и диагностика работы электромеханических систем с помощью фазохронометрического метода // Приборы, 2018. № 5. С. 33 – 38. (0,31 п.л./0,24 п.л.).
6. Крансуцкая А.А. Исследование геометрических параметров подшипников качения в целях повышения надежности эксплуатации // Молодежный научно-технический вестник. 2016. №. 5. С. 2-10. (0,50 п.л.).
7. Крансуцкая А.А. Разработка системы диагностики и аварийной защиты ответственных технических объектов на примере асинхронного электродвигателя // Сборник докладов XI Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. С.72 – 76. (0,25 п.л.).
8. Крансуцкая А.А., Тумакова Е.В. Внедрение измерительных технологий в целях повышения надёжности эксплуатации объектов машиностроения // Сборник трудов XXVIII Международной инновационно-ориентированной конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2016). 2017. С. 102-104. (0,13 п.л./0,07 п.л.).
9. Крансуцкая А.А., Тумакова Е.В. Измерительный комплекс для исследования подшипников качения // Сборник докладов X Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (с международным участием). 2017. С. 61-63. (0,13 п.л./0,07 п.л.).
10. Крансуцкая А. А. Информационно-измерительный стенд для исследования миниатюрных подшипников качения // Сборник докладов IX Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». 2016. С. 118-120. (0,13 п.л.).
11. Крансуцкая А.А. Анализ метрологического обеспечения цифрового предприятия // Сборник докладов XII Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С.158 – 160. (0,13 п.л.).
12. Крансуцкая А.А., Комшин А.С., Фунтиков В.А. Построение системы допусков и посадок деталей, полученных аддитивными технологиями при производстве космической техники // XLV Академические чтения по космонавтике: сборник тезисов, т.4, Москва, Изд-во: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, С.79-82. (0,19 п.л./0,11 п.л.).
13. Крансуцкая А.А. Метрологическое обеспечение энергоэффективности жизненного цикла в машиностроении // Сборник XV Всероссийской конференции учёных и молодых специалистов «Будущее машиностроения России» (с международным участием), Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2023. С. 87-92. (0,31 п.л.).
14. Крансуцкая А.А., Комшин А.С. Метрологическое обеспечение аддитивных технологий для реверс-инжиниринга // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования», с 13 по 15 мая 2024 г, Севастополь, Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 2024. С. 11-14. (0,19 п.л./0,12 п.л.).