

На правах рукописи



Лысенко Дмитрий Анатольевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СУДОВОГО ВАЛО-ВИНТОРУЛЕВОГО
КОМПЛЕКСА ПУТЕМ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ
КАЧЕСТВА ШЕЕК ВАЛОВ ОПОРНЫХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ**

Специальность 2.5.6 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Севастополь – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Севастопольский государственный университет» (ФГАОУ ВО «СевГУ») на кафедре «Технология машиностроения».

Научный руководитель:

Братан Сергей Михайлович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Янюшкин Александр Сергеевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Чувашский государственный
университет имени И. Н. Ульянова»,
профессор кафедры «Технология
машиностроения» (г. Чебоксары)

Леонов Сергей Леонидович, доктор
технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова»,
профессор кафедры «Технология
машиностроения» (г. Барнаул)

Ведущая организация:

ГБОУ ВО Республики Крым «Крымский
инженерно-педагогический университет
им. Февзи Якубова» (г. Симферополь)

Защита состоится 5 октября 2023 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.2.393.01 при ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» по адресу: 299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, 14, Актный зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» и на сайте – www.sevsu.ru

Автореферат разослан «__»_____ 2023 г.

Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации) просьба высылать по адресу: 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.393.01 Новикову Павлу Анатольевичу.

E-mail: PANovikov@sevsu.ru

тел.: 8(8692) 41-77-41 (доб. 1150)

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

П.А. Новиков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современное развитие производства сопровождается повышением мощности и скоростных характеристик машин при одновременном возрастании их надежности и точности. Для этого необходимо повышение качества изготовления деталей, улучшение геометрических и физико-механических свойств их поверхностного слоя, определяющего эксплуатационные характеристики машин. Геометрические погрешности, шероховатость и волнистость обрабатываемой поверхности существенно влияют на контактную жесткость, износостойкость, герметичность соединений, шум и другие показатели.

Задачи повышения надежности и обеспечения качества продукции характерны для судового машиностроения, которое базируется на методах активного целенаправленного использования процессов преобразования параметров качества при воздействии на заготовку средств производства и факторов внешней среды. При производстве изделий судового машиностроения заданные параметры обеспечиваются за счет изменения размеров, формы, шероховатости поверхности, физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Анализ существующих исследований в области судостроения показывает, что наиболее критичным узлом современного судна являются опорные подшипники судового вала, у которых индекс риска превышает допустимое значение $[I_R]$. Выход из строя подшипников является достаточно частой причиной выхода из строя энергетической установки судна или причиной ограничения ее работоспособности.

Повышением работоспособности радиальных гидродинамических подшипников обеспечивается устойчивость жидкостного режима трения путем стабилизации толщины смазочного слоя между вращающимся валом и неподвижной втулкой.

Для стабилизации упругодемпфирующих свойств граничных пленок высоковязких минеральных масел необходимо обеспечить качество поверхностного слоя шеек валов после изготовления деталей на финишных операциях.

В качестве основного метода финишной обработки шеек валов выступают технологические процессы чистового и тонкого шлифования.

В настоящее время чистовое и тонкое шлифование осуществляется на круглошлифовальных станках с применением традиционных методов, не в полной мере учитывающих влияние случайных факторов, снижающих стабильность показателей качества производимых изделий. Большие массы и габариты обрабатываемых деталей судового вало-винторубного комплекса, их уникальность, высокая стоимость и трудоемкость механической обработки требуют обеспечения особых условий, которые существенно отличаются от традиционных решений для деталей, обрабатываемых на легких и средних станках. Повторяемости качества выпускаемых изделий препятствуют различные внешние факторы, нарушающие запланированный ход технологического процесса. Существующие технологические системы (ТС) и технологические процессы (ТП) не позволяют уменьшить разброс параметров изделий, что приводит к нестабильности эксплуатационных свойств отдельных изделий, к случайному ресурсу работы и незапланированному дорогостоящему ремонту. При проектировании технологических процессов чистового и тонкого шлифования за основу берутся детерминированные модели, по которым рассчитываются традиционные или традиционно-граничные циклы, осуществляется обработка партии заготовок, после чего систему перестраивают на обработку другого типоразмера или вида. В результате этого технологический процесс осуществляется с применением традиционных режимов резания, способов диагностики и управления. Многочисленные попытки компенсации влияния возмущающих воздействий за счет применения замкнутых систем с приборами активного контроля не привели к положительному результату вследствие отсутствия адекватных моде-

лей протекающих процессов, моделей возмущений ТС, комплекса средств и методов диагностики, недоступности ряда параметров непосредственному измерению и контролю, что обуславливает актуальность рассматриваемой задачи.

Степень разработанности. Фундаментальные положения обеспечения точности и качества в теории шлифования, в том числе чистового и тонкого, освещены в исследованиях:

Аврутина Ю.Д., Анельчика В.Д., Байкалова А.В., Бакуля В.Н., Барона Ю.М., Беззубенко Н.К., Богомолова Н.И., Бокучава Г.В., Братана С.М., Вайнера Л.Г., Димова Ю.В., Евсеева Л.Г., Кальченко В.И., Королева А.В., Корчака С.Н., Лоладзе Т.Н., Лурье Г.Б., Макарова В.Ф., Маслова Е.Н., Новоселова Ю.К., Носенко В.А., Островского В.И., Подураева В.Н., Попова С.А., Прилуцкого В.А., Редько С.Г., Резникова А.Н., Рыжова Э.В., Саяутин Г.И., Смоленцева В.П., Старкова В.К., Степанова Ю.С., Суслова А.Г., Федосеева О.Б., Филимонова Л.Н., Худобина Л.В., Якимова А.В., Янющкина А.С., и многих других.

Исходя из полученных результатов работы вышеперечисленных исследователей, обоснованы основные направления в обеспечении качества деталей при шлифовании.

Наиболее перспективными для повышения надежности радиальных гидродинамических подшипников судового водопровода являются направления и вопросы обеспечения стабильности показателей качества и повышения эффективности операций чистового и тонкого шлифования, что возможно только на основе разработки комплексных динамических моделей, а также учета и определения параметров протекающих стохастических процессов. Необходимо комплексное решение этих вопросов, совокупность которых представляют собой нерешенную до настоящего времени задачу.

Целью диссертационной работы является обеспечение надежности судового вало-винторулевого комплекса путем повышения стабильности параметров качества шеек валов опорных гидростатических подшипников на основе анализа и моделирования пространственно-временных взаимодействий шлифовального круга и заготовки, а также теоретической и экспериментальной оценки комплекса полученных технических решений.

Основные задачи исследования:

1. Выполнить анализ существующих методов и систем обеспечения стабильности показателей качества при чистовом шлифовании поверхностей на круглошлифовальных станках на основе изучения поведения технологического процесса, как системы при воздействии на нее изменяющихся входных, управляющих и возмущающих воздействий.

2. Установить взаимосвязь между входными и выходными показателями процесса чистового шлифования с учетом изменения состояния технологической системы с течением времени.

3. Для чистового шлифования разработать методику расчета высокопроизводительных граничных циклов, которая учитывает изменение состояния элементов технологической системы с течением времени.

4. На основе анализа взаимодействия инструмента и обрабатываемой заготовки провести математическое моделирование динамической системы круглошлифовального станка с построением формирующего фильтра и стохастического регулятора, моделирующих динамику внешних возмущений, воздействующих на ТС, которая выполняет операции шлифования шеек валов судовых валопроводов при работе в режимах предельных граничных циклов.

5. Провести испытание подшипниковых узлов с шейками валов, обработанных по новой технологии и оценить надежность их работы. Разработать технические рекомендации по совершенствованию процесса шлифования и осуществить внедрение полученных результатов в промышленность.

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Установлены взаимосвязи и закономерности формирования съема материала и износа инструмента, как результат одновременно протекающих процессов механического резания, нестационарного износа абразивного инструмента в зоне контакта шлифовального круга и заготовки в ходе операции чистового и тонкого шлифования с текущими параметрами технологической системы и их изменением с течением времени, а также выходными параметрами качества изделий.

2. Определены взаимосвязи, характеризующие процессы взаимодействия шлифовального круга и заготовки при чистовом и тонком шлифовании, учитывающие влияние отклонений формы шлифовального круга, которые учитывают параметры отклонений состояния технологической системы от номинального режима в реальном масштабе времени в процессе реализации предельного граничного цикла обработки.

3. Разработана система динамической стабилизации параметров ТС, использующая результаты технологической диагностики и позволяющая учесть и скомпенсировать влияние возмущающих факторов на результирующие выходные параметры технологического процесса чистового и тонкого шлифования, обеспечивающая повышение стабильности качества изделий при работе в режимах предельных граничных циклов.

4. Дана количественная оценка зависимости величины остаточных напряжений поверхностного слоя шеек валов опорных гидростатических подшипников от режимов резания и характеристик шлифовального круга, что позволяет прогнозировать формирование физико-механического состояния слоя.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в разработке теоретических основ построения предельных граничных циклов обработки для операций чистового и тонкого шлифования, реализующих максимально достижимую производительность шлифования с заданными показателями качества поверхностного слоя шлифованной поверхности;

- в построении системы автоматического управления (САУ) операцией чистового и тонкого шлифования, применение которой обеспечивает стабильность показателей качества при реализации системой ЧПУ предельных граничных циклов;

- во внедрении разработанных мероприятий по обработке шеек валов опорных гидростатических подшипников корабельного вало-винторулевого комплекса в промышленность, что позволило снизить дисперсию по размеру поверхностей в 1,85 раза, по шероховатости поверхности – в 2,50 раза, одновременно повысить производительность операций в среднем при шлифовании шеек валов – на 20%, уменьшить коэффициент себестоимости технической эксплуатации на 26...28% и увеличить срок службы опорных узлов в 1,5...2 раза.

Объектом исследования является операция шлифования шеек валов опорных гидростатических подшипников судового вало-винторулевого комплекса.

Предметом исследования являются: закономерности формирования параметров качества, формируемых в процессе чистового и тонкого шлифования шеек опорных валов при воздействиях возмущающих факторов на надежность работы гидростатических подшипников судового вало-винторулевого комплекса.

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования служат основные положения теории технических систем, теории резания металлов, теории динамики станков. Теоретические исследования, приведенные в диссертации, базируются на основах классической механики, системного и математического анализов, методах математической статистики. При оценке воздействий на станок метод системного анализа применен для описания структуры операции шлифования. Методы теории надежности, теории вероятности и теории массового обслуживания использовались при исследовании их надежности.

Экспериментальные исследования выполнялись на специально разработанных стендах с учетом физических особенностей процесса круглого шлифования с использованием современной измерительной техники и статистических методов обработки экспериментальных данных.

Личный вклад автора. Все результаты получены автором лично или при непосредственном его участии. В статьях, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора следующий: в публикациях [1, 2, 3] автором сформулированы выбор направления, цели и задачи исследований, предложена модель внешних воздействий на процесс; в работах [4, 5] представлены модель формирования оптимальной динамической системы технологического процесса и алгоритм повышения качества деталей в процессе шлифования; в публикациях [6–13] приведены методики и результаты лабораторных и промышленных испытаний объекта, авторский вклад в которых составляет 30%.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты системного анализа процесса шлифования шеек валов опорных гидростатических подшипников корабельного вало-винторулевого комплекса.

2. Общая методика расчета высокопроизводительных граничных циклов шлифования шеек валов опорных подшипников корабельного вало-винторулевого комплекса, которая учитывает изменение состояния элементов технологической системы с течением времени.

3. Комплексная модель формирования оптимальной динамической системы круглошлифовального станка и алгоритм повышения качества процесса круглого шлифования шеек валов опорных гидростатических подшипников судового вало-винторулевого комплекса, базирующийся на теории синтеза оптимальных стохастических регуляторов.

4. Результат моделирования и оценка надежности опорных гидростатических подшипников в лабораторных условиях на экспериментальном стенде.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа представляет собой новое решение актуальной научно-технической задачи – обеспечение надежности судового вало-винторулевого комплекса путем повышения стабильности параметров качества шеек валов опорных гидростатических подшипников. Содержание исследований соответствует специальности **2.5.6 Технология машиностроения**. Области исследования: №3 (математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей); №5 (методы проектирования и оптимизации технологических процессов); №7 (технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин); №8 (проблемы управления технологическими процессами в машиностроении); №9 (методы и средства повышения производительности изготовления изделий машиностроения).

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки задач при построении математических моделей, обоснованностью принятых допущений, использованием математически корректных методов. Адекватность полученных результатов подтверждена экспериментальной проверкой и результатами внедрения в производство. Результаты диссертационной работы, апробированы и внедрены в производство на 91 Судоремонтном заводе ЧФ МО РФ (г. Севастополь). Суммарный предполагаемый годовой экономический эффект от внедрения на предприятиях составил 6026 тыс. рублей.

Результаты диссертации обсуждались и получили положительную оценку на научно-технических конференциях: международной "Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2022 (ICMTMTE 2022)". (г. Севастополь, 2022 г.); межведомственной Военно-морского политехнического института (ВМПИ) (г. Санкт-Петербург, 2020 г.); межведомственной Черноморского высшего военно-морского училища (ЧВВМУ) имени П.С. Нахимова (г. Севастополь, 2020 г.).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 13 работах. В журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК, издано 4 статьи.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, содержащего 194 наименования, 4 приложений с экспериментальными данными, актами внедрения результатов работы. Диссертация содержит 66 рисунков и 21 таблицу в тексте. Общий объем работы – 250 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы и обоснована необходимость обеспечения надежности судового вало-винторулевого комплекса за счет повышения стабильности параметров качества шеек валов опорных гидростатических подшипников, определены цель и научные задачи работы; перечислены основные результаты с оценкой их научной новизны, теоретического и практического значения; указаны методология и методы исследования, описана структура работы.

Первая глава посвящена анализу современного состояния исследований и формированию задач, решение которых необходимо для достижения поставленной цели диссертационной работы, обеспечению надежности судового вало-винторулевого комплекса путем повышения стабильности параметров качества шеек валов опорных гидростатических подшипников. Анализ показал, что вопросы обеспечения показателей качества шеек валов опорных гидростатических подшипников недостаточно изучены и требуют дальнейшей детальной проработки.

Во второй главе диссертации рассматривается общая методология обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового и тонкого шлифования шеек валов опорных гидростатических подшипников валов судового вало-винторулевого комплекса с позиций системного анализа.

Используя системный подход, в работе осуществлена декомпозиция воздействий на технологический процесс со стороны внешней среды по векторам: $X(\tau)$ – вектор входных переменных; $U(\tau)$ – вектор управляющих воздействий; $\Omega(\tau)$ – вектор возмущающих воздействий; $Z(t)$ – вектор, характеризующий состояние технологического процесса в момент времени t , часть которого представляет собой вектор выходных переменных $Y(\tau)$, среди элементов которого можно выделить показатели качества $y_k(\tau)$, по которым в дальнейшем можно осуществлять оценку стабильности качества выпускаемой продукции.

Установлено, что на финишных операциях, к которым относится процесс круглого наружного шлифования, осуществляется стохастический съём припуска в условиях нестационарности состояния технологической системы. В процессе обработки происходит износ абразивного инструмента, изменяется его форма, увеличивается дисбаланс круга, меняется количество абразивных зерен в зоне контакта, их плотность распределения, изменяются свойства СОТС и значения температур в зоне резания. При этом возмущающие воздействия не измеряются. В связи с вышеизложенным предложено компоненты вектора $\Omega(\tau)$ формализовать в виде случайных функций, моделирующих случайные отклонения показателей y_k от номинальных значений.

Для решения задач диссертационных исследований процесс круглого наружного шлифования рассмотрен на базе физической модели финишной обработки металлов, как динамическая система, где процесс формообразования поверхности исследуется не только в пространстве, но и во времени.

При структурном анализе технологический процесс разделен по функциональным признакам на подсистемы: "Процесс резания", "Технологическая система" и "Внешняя среда". Подсистема "Технологическая система" реализует процессы, связанные с изменениями технологических режимов, микро- и макрорельефа круга, состояния заготовки. Она является линией задержки. Параметры из подсистемы "Технологическая

система" поступают на вход подсистемы "Процесс резания", где изменяются геометрические и физико-механические параметры поверхности заготовки.

Определены входные, выходные переменные и параметры состояния каждой из подсистем. На основании рассмотренных связей сформулирована задача моделирования подсистем с целью расчета циклов управления операцией. Математическая модель процесса должна учитывать как макроявления, так и микроявления, происходящие при взаимодействии инструмента с поверхностным слоем заготовки. К макроявлениям можно отнести упругие деформации в технологической системе: вибрации, износ абразивного инструмента, наследственность перемещений; к микроявлениям – процессы, характеризующие взаимодействие абразивных зерен с обрабатываемым материалом.

Выполненный анализ позволяет сделать заключение, что стабильность параметров качества поверхностей при чистовом шлифовании зависит от изменения фактической глубины микрорезания t_f , которая является динамическим звеном между режимами резания и качеством обработанной поверхности.

Исходя из пространственно-временного анализа зоны «инструмент-заготовка», в работе получено разностное уравнение, описывающее баланс перемещений в технологической системе, позволяющее находить величину глубины резания для любого оборота (прохода) абразивного инструмента:

$$\Delta A_j = \Delta t_{fj} + \Delta R_j + \Delta r_{j-1} + \Delta V_{ynj} + \Delta U_{Tj}, \quad (1)$$

где j – номер прохода, оборота; $\Delta A = S_y$ – изменение межцентрового расстояния, определяемое величиной перемещения шлифовального круга в направлении поперечной передачи; ΔV_{yn} – упругие деформации системы; ΔU_T – температурные деформации системы, ΔR_j – текущий износ шлифовального круга, Δr_{j-1} – съем материала на предшествующем проходе.

Анализ уравнения (1) показывает, что величина поперечной подачи расходуется на сумму приращений упругих и температурных эффектов, текущий радиальный износ инструмента, предшествующий радиальный съем материала и приращение фактической глубины резания. Для его решения необходимы модели всех параметров, входящих в состав уравнения. Полученные модели позволят построить методику расчета граничных циклов (семейства номинальных траекторий движения объекта). Для решения такой задачи необходимо сформировать технические ограничения и выбрать критерий оптимизации.

Для расчета оптимальных циклов операции круглого наружного шлифования с целью упрощения расчетов и наглядности процесса предложен метод динамического программирования.

Для проведения вычислений необходимо: найти и выразить в виде равенства и неравенства все технические ограничения факторов режима шлифования, определяемые возможностями станка, режущими свойствами абразивного инструмента, требованиями к точности обрабатываемой детали, шероховатости поверхности, качеству поверхностного слоя; выбрать критерий оптимизации режима шлифования и выразить его в виде функций от факторов режима шлифования; составить математическую модель процесса – свести все неравенства и равенства, соответствующие техническим ограничениям, к линейному виду, функцию оптимизации – к линейному виду и решить задачу оптимум.

За основные технические ограничения факторов режима при круглом наружном шлифовании можно принять следующие: заданная производительность станка, заданная шероховатость поверхности, допустимый износ круга из условия получения точности, радиальное усилие, допускаемое прочностью закрепления абразивного зерна в круге, радиальное усилие, допускаемое прочностью закрепления абразивного зерна в круге, скорость круга, допускаемая его прочностью, мощность электродвигателя привода круга, макси-

мальная скорость круга, минимальная скорость круга, максимальная скорость детали, минимальная скорость детали, наименьшая продольная подача, наибольшая поперечная подача, наименьшая поперечная подача.

При финишной обработке шеек валов корабельных валопроводов в качестве критерия оптимизации может выступать трудоемкость чистовой обработки детали T_k .

Выполненные во второй главе исследования показывают, что оптимизационные циклы неустойчивы в связи с воздействием на объект множества возмущающих факторов. Повышение эффективности операций шлифования возможно за счет применения систем с обратной связью, компенсирующих воздействие на объект возмущающих факторов.

Таким образом, для решения проблемы обеспечения стабильности заданных параметров качества поверхностей при высокопроизводительном чистовом и тонком шлифовании на автоматизированном оборудовании необходимо сформировать базу данных с априорной информацией о точности, жесткости станка, начальном положении его исполнительных механизмов, параметрах заготовки, составе СОТС, технических требованиях на деталь, начальном состоянии рабочей поверхности инструмента, режиме резания. Параметры рабочей поверхности инструмента после правки могут быть вычислены по известным зависимостям, приведенным в литературе, либо определены экспериментально.

Для осуществления расчета циклов необходимо вычислить параметры состояния подсистем после $j - 20$ прохода при обработке первой детали, установленной на станок после правки инструмента. Число проходов (оборотов) изменяется от единицы до N , где N определяется по времени обработки детали. Для выполнения расчетов необходимо задать значения элементов режима на $j - m$ проходе, коэффициенты, определяющие форму зерен и закон их распределения по глубине инструмента.

Для $j - 20$ прохода необходимо решить уравнение баланса перемещений в технологической системе. Учитывая, что на первом шаге вся поперечная подача идет на приращение глубины микрорезания и радиальный съем металла. Далее нужно рассчитать приращение Δt_{fj} и $t_{fj} = t_{fj-1} + \Delta t_{fj}$.

По глубине микрорезания определить силы резания, температуру в зоне резания и износ круга. Зависимости для их расчета необходимо получить аналитически или экспериментально. По приращениям сил и температур определить приращения упругих и температурных деформаций. На втором, третьем и т.д. этапах циклы расчета повторяются до получения требуемой точности результата.

После решения уравнения баланса перемещений нужно вычислить расстояние между центром вращения детали и круга, радиальный съем металла, износ вершин зерен, шероховатости поверхности, глубину дефектного слоя, величину неудаленной части припуска.

После окончания цикла обработки ($j = N$) необходима оценка соответствия параметров качества поверхности и эффективности операции требуемым по техническим условиям. При получении положительного результата переходят к анализу процесса обработки следующей заготовки, полагая $k = k + 1$. При получении отрицательного результата выполняется анализ причин несоответствия, даются рекомендации по их устранению.

Далее необходимо построить динамическую модель, на основе которой, построить автоматическую систему стабилизации поведения технологической системы относительно режимов задаваемых условиями граничных технологических циклов с минимально допустимыми запасами.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований по изучению влияния характеристик шлифовального круга на параметры точности и шероховатости деталей в ходе протекания процесса врезного шлифования; получению ряда коэффициентов и эмпирических формул, необходимых для выполнения численных расчетов параметров обработки.

В процессе выполнения исследований испытывали шлифовальные круги прямого профиля из электрокорунда белого 24А средней структуры (5,6) и твердости (L), зернистостью в диапазоне с $F90$ по $F46$, на керамической связке (V).

Экспериментальные исследования были проведены при шлифовании образцов из стали 40Х в состоянии поставки и стали 45, термообработанных на твердость $HRC=55\ldots 60$, которые нашли широкое применение при изготовлении валов корабельных валопроводов.

Из параметров характеристики абразивного инструмента исследовалось влияние на показатели процесса шлифования: материала абразивного зерна, материала связки, зернистости, твердости, структуры круга. Из факторов режима шлифования – скорости круга V_k , м/с; скорости детали V_d , м/мин; продольной подачи S , м/мин; поперечной подачи t_m , мкм/мин. Диапазон исследуемых режимов резания определялся по существующим рекомендациям.

При исследовании влияния на показатели процесса использовались методы планирования экспериментов.

С целью исследования основных закономерностей износа шлифовального круга в процессе шлифования были проведены эксперименты по дробно-факторному плану, с дробностью реплики 2^{4-1} .

В результате экспериментальных исследований получена эмпирические зависимости износа шлифовального круга в процессе шлифования:

$$S_R = 1,49 l_0^{-1,019} h_0^{-0,295} V_u^{0,272} S_y^{1,401}, \quad (2)$$

где l_0 – зернистость, мкм; h_0 – глубина отпечатка (твердость круга), мм; V_u – окружная скорость заготовки, м/с; S_y – радиальная подача, мм/мин.

По полученным в результате факторного эксперимента данным изменения составляющих силы резания P_y и P_z параметров качества детали волнистости W_{qcp} , и шероховатости R_a за период стойкости шлифовального круга построены эмпирические модели (таблица 1).

Таблица 1 – Математические модели выходных показателей процесса круглого наружного шлифования с учетом их изменения за период стойкости круга

Наименование	Вид математической зависимости	№
Нормальная составляющая силы резания	$P_y = (40,871 - 0,0220 \cdot l_0 - 7,2511 \cdot h_0 + 9,1490 \cdot V_u + 72,3211 \cdot S_y) \times \exp[(-0,0733 + 0,0001 \cdot l_0 + 0,0059 \cdot h_0 + 0,0390 \cdot V_u + 72,32 \cdot S_y) \times T]$	(3)
Тангенциальная составляющая силы резания	$P_z = (21,2499 - 0,0193 \cdot l_0 - 2,3900 \cdot h_0 + 4,8299 \cdot V_u + 26,6219 \cdot S_y) \times \exp[(-0,0224 + 0,0001 \cdot l_0 + 0,0003 \cdot h_0 + 0,0090 \cdot V_u + 0,0360 \cdot S_y) \times T]$	(4)
Среднее арифметическое отклонение	$R_a = (0,5244 + 0,0009 \cdot l_0 - 0,1678 \cdot h_0 + 0,1397 \cdot V_u + 0,5529 \cdot S_y) \times \exp[(-0,1818 + 0,0002 \cdot l_0 + 0,0257 \cdot h_0 + 0,0605 \cdot V_u + 0,0100 \cdot S_y) \times T]$	(5)
Средняя высота волнистости	$W_{qcp} = (-0,6144 + 0,0069 \cdot l_0 - 0,3278 \cdot h_0 + 1,0397 \cdot V_u + 3,529 \cdot S_y) \times \exp[(-0,2240 + 0,0001 \cdot l_0 + 0,0263 \cdot h_0 + 0,0949 \cdot V_u + 0,1614 \cdot S_y) \times T]$	(6)

Для учета влияния пластических деформаций на выходные показатели процесса построены экспериментальные зависимости коэффициента выдавливания от глубины и скорости резания-царапания:

$$K_b = 1 - 0,34 a_{cp}^{0,56} \cdot V^{0,06}; \quad (7)$$

$$r_{ka} = 0,58; \quad r_{kv} = 0,22,$$

где r_{ka} и r_{kv} – коэффициенты корреляции коэффициента K_b от глубины a_{cp} и скорости резания-царапания.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что основными причинами образования отклонений формы и волнистости деталей являются отклонения формы инструмента и вибрация в технологической системе. На этапе врезания в пределах участка заготовки, образованного за один оборот круга при однократном их касании, имеет место частичное отсутствие контакта; шаг волнистости соответствует числу волн на инструменте. После совершения последующих контактов периодичность отсутствует вследствие суперпозиции колебаний и самоперерезания волн. Возможно образование при шлифовании поперечных сечений поверхности, состоящих из участков с ярко выраженным повторяющимся профилем. Количество таких участков равняется отношению частот вращения инструмента и заготовки, то есть порядковому номеру огранки поперечного сечения.

Установлено, что из факторов режима шлифования на показатели процесса наибольшее влияние оказывают радиальная подача и скорость круга. С увеличением радиальной подачи повышается производительность шлифования, шероховатость поверхности, износ круга и радиальное усилие шлифования. С увеличением скорости круга повышается производительность шлифования и уменьшается и радиальное усилие шлифования, уменьшением зернистости круга уменьшается производительность процесса шлифования и шероховатость поверхности.

С увеличением поперечной подачи и зернистости круга высотные параметры волнистости на его рабочей поверхности возрастают: меньшей твердости соответствует меньшая высота волнистости. Режим преимущественного самозатачивания является более благоприятным и обеспечивает повышение стабильности параметров точности деталей и стойкости инструмента по критерию волнообразования на его рабочей поверхности.

Для исследования влияния на показатели процесса шлифования факторов режима шлифования (скорость круга, скорости детали, радиальной подачи), и исследования влияния на показатели процесса параметров характеристики круга (зернистости, твердости, материала абразивного зерна, материала связки и структуры круга), в лабораторных условиях было испытано 19 партий кругов различных характеристик. Исследования проводились с варьированием параметров характеристики круга и факторов режима по методу одновременного изменения независимых переменных. Математической обработкой получены зависимости показателей процесса от всех параметров характеристики круга и факторов режима шлифования. Полученные в результате факторного эксперимента формулы для определения отклонений формы детали, составляющих силы резания, шероховатости поверхности и износа инструмента позволяют выполнять численные расчеты выходных показателей и точности обработки деталей.

Четвертая глава посвящена обеспечению стабильности выходных показателей качества операции круглого наружного шлифования. В ней дается понятие предельного граничного цикла управления, который фактически является оптимальной управляющей программой – номинальным программным управлением и приводится методика его расчёта.

Для построения оптимального цикла в работе применен метод динамического программирования. Апробация разработанной методики осуществлялась в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве между кафедрой «Технология машиностроения» ФГАОУ ВО «СевГУ» и 91 Судоремонтным заводом ЧФ МО РФ по обработке гребных валов.

Полученные в результате расчета циклы (рисунок 1 а, б) оказались состоящими из трех этапов:

- этап форсированного режима, на котором снимается основной слой припуска;
- этап чистового режима, на котором подача и глубина резания ограничиваются точностью формы изделия;
- этап финишного режима, где подача и глубина резания лимитируются ограничениями на шероховатость поверхности.

При расчете циклов учитывалось состояние инструмента в различные периоды его стойкости, этим объясняется увеличение продолжительности каждого последующего цикла.

При обработке циклов на оборудовании было установлено, что общее время цикла обработки первой детали в 1,38 раза меньше цикла обработки детали в конце периода стойкости инструмента. При обработке 2-й, 3-й, 4-й деталей основное время снижается соответственно в 1,3; 1,2; 1,12 раза.

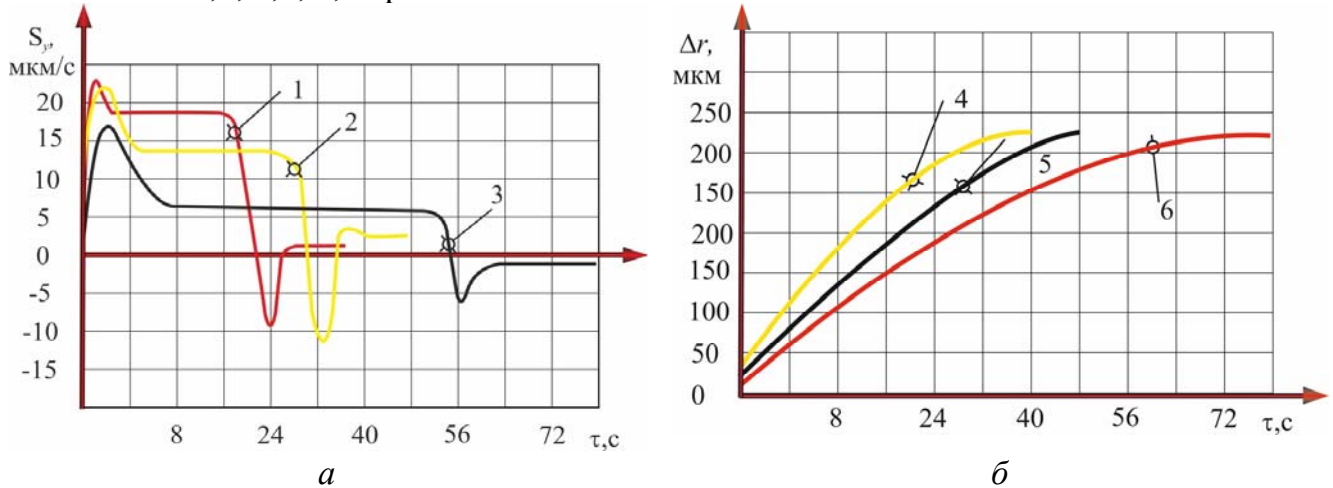


Рисунок 1 – Циклы программного управления операцией круглого наружного шлифования кругами 24A F46 L V 35м/с для обработки шеек гребных валов с учетом изменения свойств круга за период стойкости: *a* – 1, 2, 3 – траектории изменения S_u соответственно для 5-й, 7-й и 13-й детали; *б* – 4, 5, 6 – траектории изменения съема материала Δr для 5-й, 7-й и 13-й детали соответственно

Однако после 10 минут работы увеличились разбросы геометрических размеров и значений показателей шероховатости поверхности за счет более интенсивного воздействия на процесс возмущающих факторов (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнительные результаты оценки качества поверхностей шеек гребных валов, обработанных по расчётным циклам за период стойкости шлифовального круга

№ Шейки вала партии		Отклонения от номинального раз- мера – Δ , мкм			Шероховатость поверхности – R_a мкм		
Шлифование шеек гребных валов в интервале от 0 до 10 мин кругом 24А F46 L V 35 м/с							
	Наличие прижогов	max	min	Дисперсия σ^2 , мкм ²	max	min	Дисперсия σ^2 , мкм ²
1	–	0,020	0,009	$3,4 \times 10^{-6}$	0,28	0,21	$1,36 \times 10^{-4}$
2	–	0,021	0,012	$2,25 \times 10^{-6}$	0,29	0,20	$2,25 \times 10^{-4}$
3	–	0,023	0,013	$2,77 \times 10^{-6}$	0,30	0,23	$1,36 \times 10^{-4}$
Σ_j	–	0,021	0,010	$2,8 \times 10^{-6}$	0,28	0,21	$1,66 \times 10^{-4}$
Σ_i / Σ_j	–	1,33	1,6	1,29	1,07	1,02	1,35
«+» – Наличие прижогов на какой-либо поверхности							

Продолжение таблицы 2

Шлифование шеек гребных валов в интервале от 10 до 30 мин кругом 24А F46 L V 35 м/с							
	Наличие прижогов	max	min	Дисперсия σ^2 , мкм	max	min	Дисперсия σ^2 , мкм ²
1	—	0,027	0,016	$3,36 \times 10^{-6}$	0,32	0,22	$2,25 \times 10^{-4}$
2	—	0,031	0,018	$4,1 \times 10^{-6}$	0,31	0,22	$2,25 \times 10^{-4}$
3	—	0,026	0,015	$3,4 \times 10^{-6}$	0,29	0,20	$2,25 \times 10^{-4}$
Σ_i	—	0,028	0,0163	$3,62 \times 10^{-6}$	0,30	0,216	$2,25 \times 10^{-4}$

Для обеспечения стабильности параметров качества изделий необходима стабилизация параметров расчетного технологического цикла, что возможно осуществить только за счет введения систем с обратной связью, адекватно оценивающих текущее состояние технологической системы. В этом случае управление операцией может быть определено на основе результатов оценивания состояния системы.

Оценка состояния такой системы возможна за счет построения автоматической системы со стохастическим наблюдателем в форме фильтра Калмана-Бюсси. На основе полученного уравнения при использовании методики, рассмотренной в работах С.М. Братана, построена автоматическая система врезного шлифования шеек валов судового вало-винтового комплекса, замкнутый контур регулирования которой состоит из объекта, фильтра и регулятора (рисунок 2):

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \\ \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -u_1 K_{C1} & -u_1 K_{C2} \\ 0 & \frac{b}{c_1} & -u_2 K_{C1} & -u_2 K_{C2} \\ K_1 & 0 & -u_1 K_{C1} - K_1 & 1 - u_1 K_{C2} \\ K_2 & 0 & -u_2 K_{C1} - K_2 & \frac{b}{c_1} - u_2 K_{C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ c_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} v, \quad (8)$$

где K_{C1}, K_{C2}, K_1, K_2 – коэффициенты усиления стохастического регулятора и наблюдателя соответственно.

Изображенная на структурной схеме (рисунок 2) стохастическая система управления операцией врезного шлифования обеспечивает стабилизацию съема припуска на протяжении всего цикла. Для работы автоматической системы в память УЧПУ загружаются информации о циклах, рассчитанных априорно с помощью детерминированных моделей и оптимизационных методов.

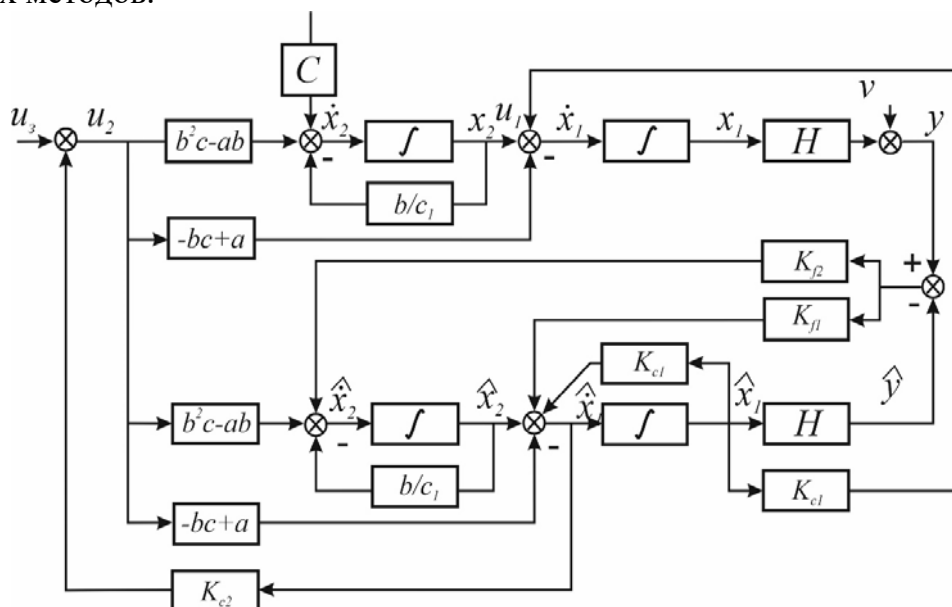


Рисунок 2 – Структурная схема стохастической системы управления процессом врезного шлифования

Предложенный подход позволяет осуществлять обработку изделий на оптимальных режимах, поэтому даже при потере режущих свойств круга затраты времени на обработку при использовании данной системы значительно меньше, чем у других систем.

С целью иллюстрации работы системы результаты численного расчета сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Зависимость значений корректирующих коэффициентов от времени

$\Delta U, \text{ мкм}$	3,3	2,5	2,01	2,8	2,6	2,2	3,1	3,5	3,3	4,8
$\Delta t, \text{ с}$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
$\Delta U, \text{ мкм}$	4,7	4,9	5,1	4,3	3	2	1,7	3,1	3,8	2,6
$\Delta t, \text{ с}$	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19
$\Delta U, \text{ мкм}$	2,5	2,6	1,6	2,2	2,1	2,1	2,8	2,6	2,4	3
$\Delta t, \text{ с}$	0,20	0,21	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3
$\Delta U, \text{ мкм}$	3,3	3,2	3,2	2,7	3,3	3,6	3,7	3,5	3,6	2,2
$\Delta t, \text{ с}$	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4
$\Delta U, \text{ мкм}$	3	3,3	3,5	2,5	2,2	2,7	2,9	2,6	2,7	2,7
$\Delta t, \text{ с}$	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49	0,5
$\Delta U, \text{ мкм}$	2,6	2,9	3,3	2,7	2,5	2,9	2,6	2,6	2,7	3
$\Delta t, \text{ с}$	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59	0,6
$\Delta U, \text{ мкм}$	2,8	3,1	3,9	3,1	3,0	1,8	2,6	2,1	2,8	3,4
$\Delta t, \text{ с}$	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,7
$\Delta U, \text{ мкм}$	3	2,9	3	2,5	2,2	1,9	2,5	1,7	2,2	2,9
$\Delta t, \text{ с}$	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79	0,8

Анализ результатов аналитического расчета показывает, что фактическая глубина резания не остается постоянной при установке постоянных значений врезной подачи станка, она отклоняется от заданных значений, что приводит к отклонению выходных показателей от расчетных. Автоматическая система со стохастическим наблюдателем позволяет получить оптимальные оценки выходных величин, на основе которых строится управление, обеспечивающее стабильность показателей качества обработанных изделий.

Лабораторные испытания проводились на станке KR-700 при обработке шеек валов диаметром 200 мм из стали 45 инструментом 700x75x304,8 63C F60 K 6 B 50м/с. При шлифовании в качестве СОТС использовали составы, рекомендованные для обработки стали 45.

В таблице 4 приведены результаты сравнительных испытаний процессов обработки шеек валов по заводской технологии и обработанных с помощью автоматической системы.

Таблица 4 – Результаты сравнительных испытаний процессов обработки шеек валов по заводской технологии и обработанных с помощью автоматической системы

Отклонение от заданного размера Δ , мкм					Шероховатость поверхности R_a , мкм				
По заводской технологии									
		max	min	дисперсия σ^2 , мкм ²			max	min	дисперсия σ^2 , мкм ²
№ партии	1	0,022	0,0130	6,5	№ партии	1	0,63	0,41	$1,3 \times 10^{-3}$
	2	0,023	0,0092	5,6		2	0,62	0,51	$0,4 \times 10^{-3}$
	3	0,024	0,0120	4,0		3	0,63	0,46	$0,7 \times 10^{-3}$
Σ_i		0,023	0,0103	5,3	Σ_i		0,62	0,46	$0,8 \times 10^{-3}$

Продолжение таблицы 4

С помощью автоматической системы									
		max	min	дисперсия $\sigma^2, \text{мкм}^2$			max	min	дисперсия $\sigma^2, \text{мкм}^2$
№ партии	1	0,020	0,0090	3,36	№ партии	1	0,41	0,30	$0,34 \times 10^{-3}$
	2	0,014	0,0050	2,3		2	0,32	0,22	$0,28 \times 10^{-3}$
	3	0,019	0,0080	2,8		3	0,40	0,29	$0,35 \times 10^{-3}$
Σ_j		0,017	0,0073	2,82	Σ_j		0,376	0,27	$0,32 \times 10^{-3}$
Σ_i / Σ_j		1,35	1,41	1,85	Σ_i / Σ_j		1,64	1,703	2,5

На рисунках 3, 4 и 5 приведены примеры профилограмм и круглограмм, снятые с поверхности шеек гребных валов, обработанных по традиционной схеме и с использованием разработанной автоматической системы управления.

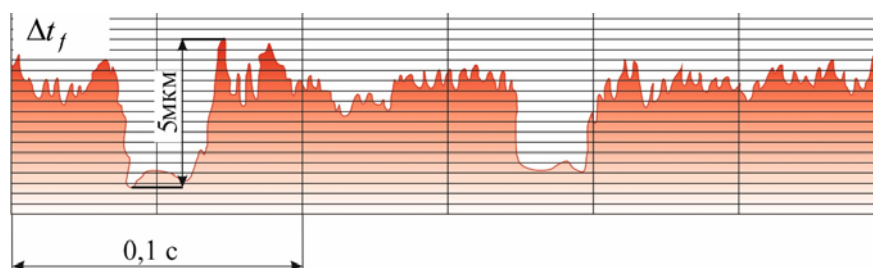


Рисунок 3 – Шероховатость поверхности при чистовом шлифовании по традиционной схеме

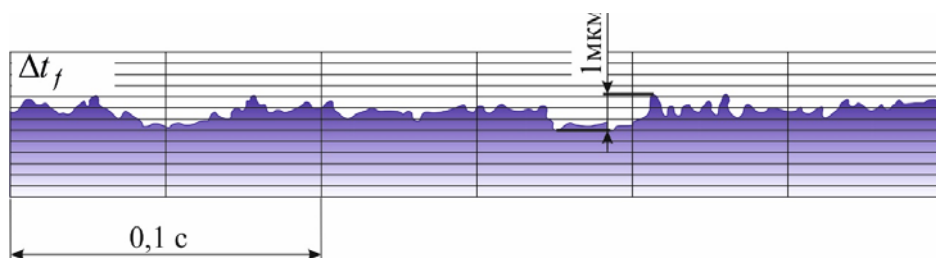


Рисунок 4 – Шероховатость поверхности при чистовом шлифовании с использованием предлагаемой автоматической системы

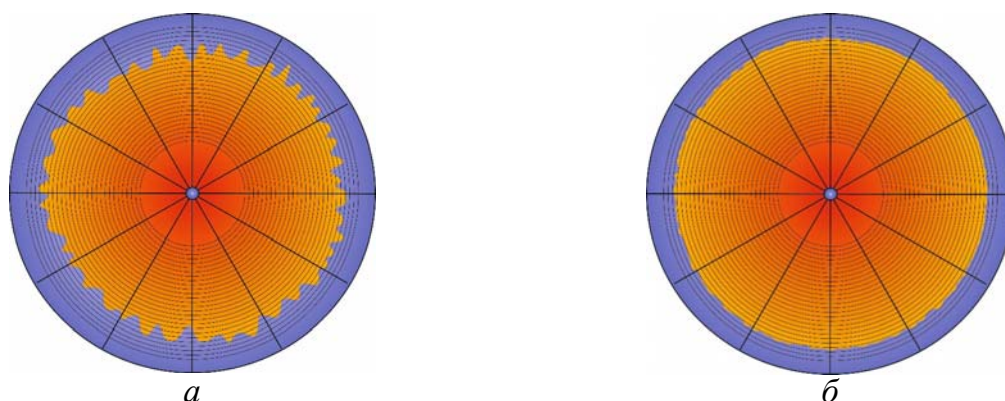


Рисунок 5 – Круглограмма поверхности обработанной шейки вала:
а – по заводской технологии; б – по предлагаемой технологии

Таким образом проведенные мероприятия позволили в сравнении с традиционной обработкой обеспечить стабильное качество обработки и снизить значения дисперсий по размеру поверхностей – в 1,85 раза, по шероховатости – в 2,5 раза.

Пятая глава диссертации посвящена оценке эффективности разработанных мероприятий при опытно-промышленной эксплуатации опорных подшипников корабельных валопроводов. В ней приведены исследования показателей надежности опорных подшипников корабельных валопроводов.

Для исследований уровня надежности системы пропульсивного комплекса судна с учетом отказов функционирования его подсистем построен размеченный граф состояний (рисунок 6) при условии, что все потоки отказов и восстановлений – простейшие.

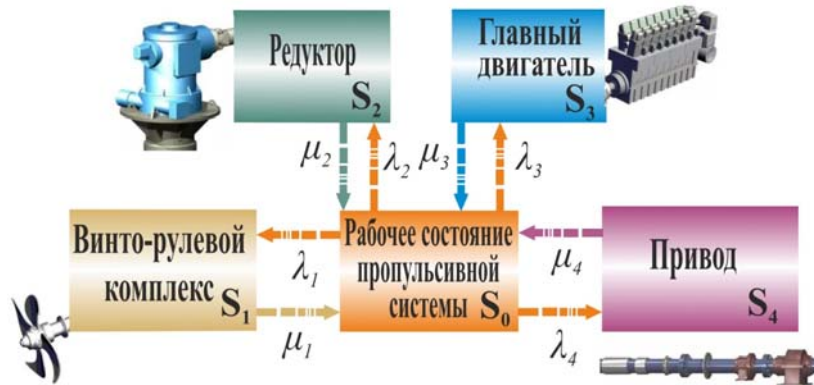


Рисунок 6 – Размеченный граф состояний подсистем пропульсивного комплекса судна с учетом отказов функционирования: λ – потоки отказов; μ – потоки восстановлений; S_0 – рабочее состояние пропульсивной системы; S_1 – отказ винто-рулевого комплекса, S_2 – отказ редуктора, S_3 – отказ главного двигателя, S_4 – отказ привода (валопровода)

Каждое такое состояние характеризуется соответственно параметрами потоков отказов λ_i и восстановлений μ_i . Для решения задачи вычислялись интенсивности потоков отказов λ_i по формуле:

$$\lambda_i = 1 / \bar{T}_i,$$

где $\bar{T}_i$ – средняя наработка на отказ (ч), а также интенсивности потоков восстановлений:

$$\mu_i = 1 / \bar{T}_{ei},$$

где $\bar{T}_{ei}$ – среднее время восстановления после отказа (ч).

Величины параметров потоков отказов и восстановлений определяют вероятность безотказной работы, которую можно считать основным показателем надёжности системы.

Для вероятностной оценки каждого из состояний необходимо на основе построенного размеченного графа состояний (рисунок 6) составить уравнения финальных вероятностей, подставить значения параметров потоков отказов и восстановлений, рассчитать вероятности безотказной работы P_0 системы пропульсивного комплекса судна и вероятности отказов P_1, P_2, P_3, P_4 соответствующих подсистем и узлов. Эти вероятности определяются из системы дифференциальных уравнений А.Н. Колмогорова, составляемых по известным правилам.

Для приведенного размеченного графа состояний решение системы дифференциальных уравнений А.Н. Колмогорова с помощью условия нормировки $\sum_{i=0}^4 P_i \approx 1$ представляется в следующем виде:

$$\begin{cases} P_0 = (1 + \lambda_1 / \mu_1 + \lambda_2 / \mu_2 + \lambda_3 / \mu_3 + \lambda_4 / \mu_4)^{-1}; \\ P_1 = P_0 \lambda_1 / \mu_1; \\ P_2 = P_0 \lambda_2 / \mu_2; \\ P_3 = P_0 \lambda_3 / \mu_3; \\ P_4 = P_0 \lambda_4 / \mu_4. \end{cases}$$

Для оценки надежности подсистем пропульсивного комплекса были выполнены экспериментальные исследования на экспериментальной установке (рисунок 7), имитирующей штатные и аварийные условия эксплуатации опорных подшипников корабельного валопровода.



Рисунок 7 – Общий вид экспериментального стенда оценки надежности подсистем пропульсивного комплекса

Эксплуатационные данные по параметрам потоков отказов системы с учетом совершенствования и параметров потоков восстановления подсистем пропульсивного комплекса судна, а также результаты моделирования показали, что подсистемы главного двигателя (6,06% отказов, $P_3 = 0,0606$), винто-рулевого комплекса (5,24% отказов, $P_1 = 0,0524$) и редуктора (4,76% отказов, $P_2 = 0,0476$) показывают достаточно низкий процент отказов и незначительно влияют на работоспособность системы пропульсивного комплекса судна, вероятность безотказной работы которой составляет $P_0 = 0,6713$. Мероприятия по повышению надежности должны быть направлены в первую очередь на совершенствование найденных уязвимых элементов и подсистем судна, к которым в данном случае следует отнести подсистему привода (валопровода) – 16,81% отказов, $P_4 = 0,1681$. Анализируя аналогичным образом, на основе размеченного графа состояний выявленной наименее надежной подсистемы привода (валопровода) и расчетов соответствующих вероятностей состояний её механизмов и узлов, определены наименее надёжные из них. Так, среди механизмов и узлов подсистемы валопровода, к которым отнесены гребной вал (P_{41}), промежуточный вал (P_{42}), муфта гребного вала (P_{43}), опорный подшипник (P_{44}), упорный подшипник (P_{45}), дейдвудная втулка (P_{46}), дейдвудное уплотнение (P_{47}), наименее надёжными показали себя опорный подшипник (16,9% отказов, $P_{44} = 0,1690$), гребной вал (8,6% отказов, $P_{41} = 0,0861$) и промежуточный вал (5,9% отказов, $P_{42} = 0,0592$).

После совершенствования технологических процессов финишной обработки шеек валов, вероятность отказов наиболее уязвимых звеньев существенно снизилась. Так, например, опорный подшипник (5,7% отказов, $P_{44} = 0,0570$), гребной вал (2,4% отказов, $P_{41} = 0,0240$) и промежуточный вал (1,89% отказов, $P_{42} = 0,0189$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для обеспечения стабильности параметров качества шлифованных поверхностей при высокопроизводительном чистовом и тонком шлифовании операция рассмотрена как динамическая система, где процесс формообразования поверхности исследуется не только в пространстве, но и во времени. На основе системного подхода рассмотрена структура операции шлифования, сформулированы основные положения и принципы анализа процесса шлифования. При структурном анализе операция шлифования расчленена по функциональным признакам на подсистемы станка, приспособления, инструмента, детали, СОТС, правящего инструмента и зоны правки, зоны контакта. Определены, входные, выходные переменные и параметры состояния каждой из подсистем. Показано, что параметры технологической системы могут изменяться с течением времени предсказуемым и непредсказуемым образом под действием различных факторов. Важным показателем качества технологических систем обработки деталей и особенно ТС финишных операций является их стабильность, отсутствие стабильности при традиционных технологиях неизбежно приводит к разбросу показателей качества выпускаемой продукции. При форсированных технологических режимах в силу возрастания чувствительности ТС к возмущающим факторам наблюдается потеря стабильности ТС и ТП.

2. Установлено, что основными причинами образования отклонений параметров качества шлифованных поверхностей являются отклонения формы инструмента и вибрации в технологической системе. На этапе врезания в пределах участка заготовки, образованного за один оборот круга при однократном их касании, имеет место частичное отсутствие контакта; шаг волнистости соответствует числу волн на инструменте. После совершения последующих контактов периодичность шага волнистости отсутствует вследствие суперпозиции колебаний и самоперерезания волн. За период стойкости инструмента увеличиваются не только средние значения, но и дисперсии отклонений от округлости и волнистости на его рабочей поверхности. У круга значимы амплитуды первой и преобладающей высокочастотных гармоник. Они являются причинами образования на детали соответственно огранки и волнистости, которые возрастают с течением времени работы инструмента.

3. Разработано формализованное математическое описание операции чистового и тонкого шлифования, позволяющее для любого момента времени при различных алгоритмах изменения режима определять фазовые координаты технологической системы (взаимное расположение инструмента и заготовки, параметры зоны контакта "инструмент - заготовка"), параметры качества обрабатываемой поверхности (шероховатость, размер, отклонения формы, физико-механическое состояние поверхностного слоя), выходные параметры процесса (скорость съема припуска, износ инструмента). Разработанное математическое описание позволяет решить задачу построения предельных граничных циклов управления операцией чистового и тонкого шлифования, при которых обеспечивается минимально возможное машинное время или минимальная себестоимость обработки деталей при ограничениях качества поверхности изделия – не хуже требуемого по принятой технологии. Выполненные расчеты позволили определить программное управление для операций чистового и тонкого шлифования опорных шеек валов корабельных валопроводов, относительно которых необходимо осуществлять стабилизацию параметров технологического процесса.

4. Синтезирована автоматическая система управления операцией чистового точения, применение которой позволяет обеспечить стабильность показателей качества при реализации системой ЧПУ предельных граничных циклов.

5. Производственные испытания показывают, что при обработке изделий на операциях чистового шлифования на тяжелых станках по сравнению с традиционными методами

стабильно обеспечивается высокое качество поверхностей. При обработке шеек валов дисперсия по размеру поверхностей уменьшается в 1,85 раза, по шероховатости поверхности – в 2,50 раза, одновременно повышается производительность операций: в среднем при точении валков – на 20%. Проведенные в работе мероприятия позволили уменьшить коэффициент себестоимости технической эксплуатации на 26-28% и увеличить срок службы опорных узлов в 1.5-2 раза. Предполагаемый годовой экономический эффект от внедрения результатов работы составил 6 026 тыс. рублей.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в рецензируемых журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК

1. Лысенко Д.А. Показатели надежности опорных подшипников корабельных валопроводов / Д.А. Лысенко, С.М. Братан, А.О. Харченко, С.В. Корчевский // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2022. – №4 (78). – С. 243-249. – (в перечне ВАК №2504 от 20.12.22).

2. Лысенко Д.А. Повышение стабильности чистового шлифования шеек валов валовинторулевого комплекса / Д.А. Лысенко, С.М. Братан, А.О. Харченко // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2023. – №1 (79). – С. 227-233. – (в перечне ВАК №2633 от 25.04.23).

3. Дымченко И.А. Физико-механические свойства поверхностных слоев деталей после шлифования мелкозернистыми кругами / И.А. Дымченко, Д.А. Лысенко, С.М. Братан // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2023. – №1 (79). – С. 223-227. – (в перечне ВАК №2633 от 25.04.23).

4. Братан С.М. Обеспечение стабильности обработки поверхностей на операциях круглого наружного шлифования с позиций системного анализа / С.М. Братан, А.О. Харченко, Д.А. Лысенко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева». – 2023. – №1(357). – С. 84-93. – (в перечне ВАК №2728 от 25.04.23).

Статьи и материалы конференций, опубликованные в других изданиях

5. Дементьев А.Н. Моделирование процессов диффузии обводненного масла в смазочной емкости подшипника скольжения / А.Н. Дементьев, И.И. Пакин, Д.А. Лысенко // Труды ВМПИ. Межведомственная научно-техническая конференция. Рецензируемый сборник статей и докладов. – СПб: ВМПИ. – 2020. – №3 (37), Часть 3. – С. 280-284.

6. Дементьев А.Н. Определение динамических характеристик смазочного слоя подшипников корабельного валопровода / А.Н. Дементьев, И.И. Пакин, Д.А. Лысенко // Труды ВМПИ. Межведомственная научно-техническая конференция. Рецензируемый сборник статей и докладов. – СПб: ВМПИ. – 2020. – №3 (37), Часть 3. – С. 272-280.

7. Кирюхин А.Л. Нормирование области допустимых режимов работы средств движения подводной лодки при обводнении смазочного материала опорных подшипников гребных электродвигателей и валопровода / А.Л. Кирюхин, Ю.М. Осадчий, Д.А. Лысенко // Сборник научных трудов ЧВВМУ имени П.С. Нахимова. – Севастополь, – 2020. – №2(26). – С. 64-72.

8. Дементьев А.Н. Конечно-элементная модель корабельного валопровода / А.Н. Дементьев, И.И. Пакин, Д.А. Лысенко // Труды ВМПИ. Межведомственная научно-техническая конференция. Рецензируемый сборник статей и докладов. – СПб: ВМПИ. – 2020. – №3 (37), Часть 3. – С. 284-292.

9. Дементьев А.Н. Влияние деформации антифрикционного материала вкладыша опорного подшипника на устойчивость вала при обводнении масла / А.Н. Дементьев, Н.Н. Попов, Д.А. Лысенко // Труды ВМПИ. Межведомственная научно-техническая конференция. Рецензируемый сборник статей и докладов. – СПб: ВМПИ. – 2020. – №3 (37), Часть 3. – С. 292-296.

10. Кирюхин А.Л. Моделирование процессов массопереноса обводненного смазочного материала к устройству съема и подачи рабочей жидкости в напорную смазочную линию подшипника / А.Л. Кирюхин, И.И. Пакин, Д.А. Лысенко // Труды ВМПИ. Межведомственная научно-техническая конференция. Рецензируемый сборник статей и докладов. – СПб: ВМПИ. – 2020. – №3 (37), Часть 3. – С. 357-363.

11. Кирюхин А.Л. Повышение эффективности использования корабельных энергетических установок в экстремальных ситуациях, связанных с поступлением воды в систему смазки подшипников скольжения / А.Л. Кирюхин, Д.А. Лысенко // Сборник научных трудов ЧВВМУ имени П.С. Нахимова. – Севастополь. – 2020. – №2 (17). – С. 263-270.

12. Кирюхин А.Л. Методика оценки и обеспечения эффективности использования энергетических установок подводных лодок в экстремальных ситуациях, связанных с поступлением воды в систему смазки подшипников скольжения / А.Л. Кирюхин, Ю.М. Осадчий, Д.А. Лысенко // Сборник научных трудов ЧВВМУ имени П.С. Нахимова. – Севастополь. – 2020. – №2 (20). – С. 118-124.

13. Дементьев А.Н. Эволюционные процессы структур обводненного смазочного материала в клиновидном зазоре радиальных гидродинамических подшипников корабельного валопровода с индивидуальной системой смазки / А.Н. Дементьев, И.И. Пакин, Д.А. Лысенко // Труды ВМПИ. Межведомственная научно-техническая конференция. Рецензируемый сборник статей и докладов. – СПб: ВМПИ. – 2020. – №3 (37), Часть 3. – С. 367-372.

Лысенко Дмитрий Анатольевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СУДОВОГО ВАЛО-ВИНТОРУЛЕВОГО
КОМПЛЕКСА ПУТЕМ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА
ШЕЕК ВАЛОВ ОПОРНЫХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ**

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.393.01

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» (протокол № 36 от 14.07. 2023 г.) Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.

Заказ № 43. Тираж 120 экз. Отпечатано на ризографе ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», адрес: ул. Университетская, 33, г. Севастополь 299053

E-mail: info@sevsu.ru