

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



На правах рукописи

Лысенко Дмитрий Анатольевич

УДК 621.923

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

Специальность 2.5.6 – Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель :
доктор технических наук, профессор

Братан Сергей Михайлович

Севастополь – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. Анализ существующих исследований. Цель и задачи работы.....	12
1.1. Задача обеспечения надежности судовых валопроводов.....	12
1.2. Обзор математических моделей абразивно-алмазной обработки.....	20
1.3. Принципы построения и примеры различных вариантов систем управления металлорежущими станками.....	25
1.4. Анализ динамических моделей процессов круглого шлифования.....	49
1.5. Выводы и задачи исследований по главе 1.....	63
ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССА КРУГЛОГО НАРУЖНОГО ШЛИФОВАНИЯ ШЕЕК ВАЛОВ СУДОВЫХ ВАЛОПРОВОДОВ	65
2.1. Обеспечение стабильности обработки поверхностей на операциях круглого наружного шлифования с позиций системного анализа.....	65
2.2. Оценка изменения фактической глубины резания в процессе шлифования	74
2.3. Выбор оптимальных режимов и высокопроизводительных циклов тонкого шлифования	77
2.3.1. Выбор критерия оптимизации.....	77
2.3.2. Формирование технических ограничений.....	85
2.3.3. Пути обеспечения стабильности показателей качества при круглом шлифовании.....	93
2.4. Выводы по главе 2.....	98
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОПЕРАЦИИ КРУГЛОГО НАРУЖНОГО ШЛИФОВАНИЯ	100
3.1. Задачи и методики экспериментальных исследований.....	100
3.2. Основные результаты экспериментальных исследований	110

3.3. Выводы по главе 3.....	123
ГЛАВА 4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ВЫХОДНЫХ ПОКАЗАТЕ-	
ЛЕЙ КАЧЕСТВА ОПЕРАЦИИ КРУГЛОГО НАРУЖНОГО ШЛИФОВА-	
НИЯ.....	126
4.1. Математическая модель процесса шлифования	126
4.2. Расчет высокопроизводительных циклов шлифования и их экспери-	
ментальная проверка	137
4.3. Обеспечения стабильности параметров качества изделий за счет разра-	
ботки систем адаптивного управления	146
4.4. Выводы к главе 4.....	155
ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННЫХ МЕРО-	
ПРИЯТИЙ ПРИ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ	
ОПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ КОРАБЕЛЬНЫХ ВАЛОПРОВОДОВ.....	157
5.1. Исследование показателей надежности опорных подшипников кора-	
бельных валопроводов.....	157
5.2. Результаты промышленных испытаний системы управления процес-	
сом чистового шлифования.....	174
5.3. Оценка эффективности системы стабилизации чистового шлифования	
при опытно-промышленной эксплуатации.....	177
5.4. Выводы к главе 5.....	178
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	179
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	181
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	182
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	203
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	231
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	236
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	249

ВВЕДЕНИЕ

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 валопровода, 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-винторулевого 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-границные 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 моделей 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., Саютина 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., Янюшкина 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 компенсировать влияние возмущающих факторов на результирующие выходные параметры технологического процесса чистового и тонкого шлифования, обеспечивая 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 [51, 85, 86] автором сформулированы выбор направления, цели и задачи исследований, предложена модель внешних воздействий на процесс; в работах [23, 45] представлены модель формирования оптимальной динамической системы технологического процесса и алгоритм повышения качества деталей в процессе шлифования; в публикациях [43, 44, 46, 47, 64 – 67] 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 кругло-шлифовального 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 резуль-

татов 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 страница.

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

1.1. Задача обеспечения надежности судовых валопроводов

Основным направлением мирового экономического развития на современном этапе является повышение эффективности и качества во всех сферах материального производства. На повышение надежности и качества продукции нацелен весь механизм управления предприятиями. На решение вышеуказанной проблемы направлены усилия инженеров и конструкторов, мастерство рабочих.

Важная роль в решении поставленной задачи принадлежит судовому машиностроению, которое базируется на активном целенаправленном использовании процессов преобразования параметров качества при воздействии на сырье и заготовки средств производства и среды. Заданные параметры обеспечиваются за счет изменения размеров, формы, шероховатости поверхности, физико-механических свойств обрабатываемого материала. Достигается это применением различных способов формообразования.

Особенно актуальна эта проблема для производства судовых валопроводов (рисунок 1.1). Анализ существующих исследований показывает, что наиболее критичным элементом судна считается элемент, у которого индекс риска превышает допустимое значение $[I_R]$. К таким элементам относятся детали главного двигателя, редуктора и валов-винторулевого комплекса $I_R > [I_R]$. Очевидно, что отказ этих элементов ЭУ может привести не только к выходу из строя, но и в ряде случаев к ограничению ее работоспособности по параметрам и продолжительности. Вероятности того, что конкретный элемент энергетической установки судна приведет к ограничению ее работоспособности или выводу ее из строя достаточно высока (Таблица 1.1), так данные современных исследований показывают, что частой причиной отказа энергетической установки судна или ограничения ее работоспособности, а из всех элементов корабельного валопровода – самой частой.

Валопровод судна представляет собой конструктивный комплекс, кинематически связывающий главный двигатель с главным гребным электродвигателем и предназначенный для передачи крутящих моментов и осевых нагрузок, возникающих при работе корабельной движительной установки. На рисунке 1.1 представлена конструкция валопровода на примере судна проекта 19619. При всем своем многообразии независимо от расположения в корпусе судна валопровод содержит характерные, общие для него элементы. Они состоят из гребного вала, несущего гребной винт, дейдвудного устройства, обеспечивающего водонепроницаемый выход валопровода из корпуса судна, промежуточных валов, лежащих в опорах, и упорного вала с упорным подшипником.

Анализ существующих исследований показывает, что отказ опорных подшипников валопровода является достаточно частой причиной выхода из строя энергетической установки судна или ограничения ее работоспособности, а из всех элементов судового валопровода – самой частой.

Немаловажным фактором, приводящим к появлению дополнительных напряжений и, как следствие, реакций в опорах, является конструктивный дисбаланс. Источниками его возникновения являются технологический эксцентриситет центров сечения валов относительно оси вращения вследствие остаточных напряжений и пластических деформаций, эксцентричность расточки полых валов и др. факторы. Источником эксплуатационного дисбаланса является так называемая динамическая составляющая, возникающая вследствие действия центробежных сил при вращении вала с сосредоточенными массами – гребного винта, и др. Указанная проблема решается путем балансировки деталей корабельного валопровода.

Обеспечение работоспособности корабельного валопровода связано с сохранением жидкостного режима трения в подшипниках. Применительно к задачам обеспечения работоспособности радиальных гидродинамических подшипников одним из определяющих критериев, обеспечивающих устойчивость жидкостного режима трения, является толщина смазочного слоя между вращающимся ва-

лом и неподвижной втулкой и удовлетворяющая условию - $h_0 > h_{min}$. Предпосылками к расширению зоны безаварийного функционирования корабельного валопровода, служат следующие особенности его работы: стабилизация упругодемпфирующих свойств граничных пленок высоковязких минеральных масел при пониженных температурах в зоне трения, низкая интенсивность диффузии дисперсной фазы в пристенные слои под действием сил инерции. Последнее предусматривает обеспечение качества поверхностного слоя шеек валов после изготовления деталей на финишных операциях.

В настоящее время при изготовлении деталей на финишных операциях нужно с одной стороны выдерживать высокие требования по качеству получения геометрических размеров, шероховатости и физико-механическому состоянию поверхностного слоя, с другой стороны повышать производительность их выпуска в связи с требованиями рынка. При этом для обеспечения надежности ставится задача не только повысить точность изготовления деталей в целом, но и обеспечить стабильность их параметров.

Нестабильность параметров деталей определяется воздействием в процессе их производства на технологическую систему (ТС) изменяющихся внешних факторов, часть из которых неизвестна и не контролируется в процессе обработки.

Задача повышения надежности и обеспечения качества продукции особенно актуальна для процесса чистового и тонкого шлифования шеек валов корабельных валопроводов, так как именно на этой операции окончательно формируются параметры качества готового изделия. Операции чистового шлифования наиболее чувствительны к внешним возмущениям, нарушающим запланированный ход протекания технологического процесса.

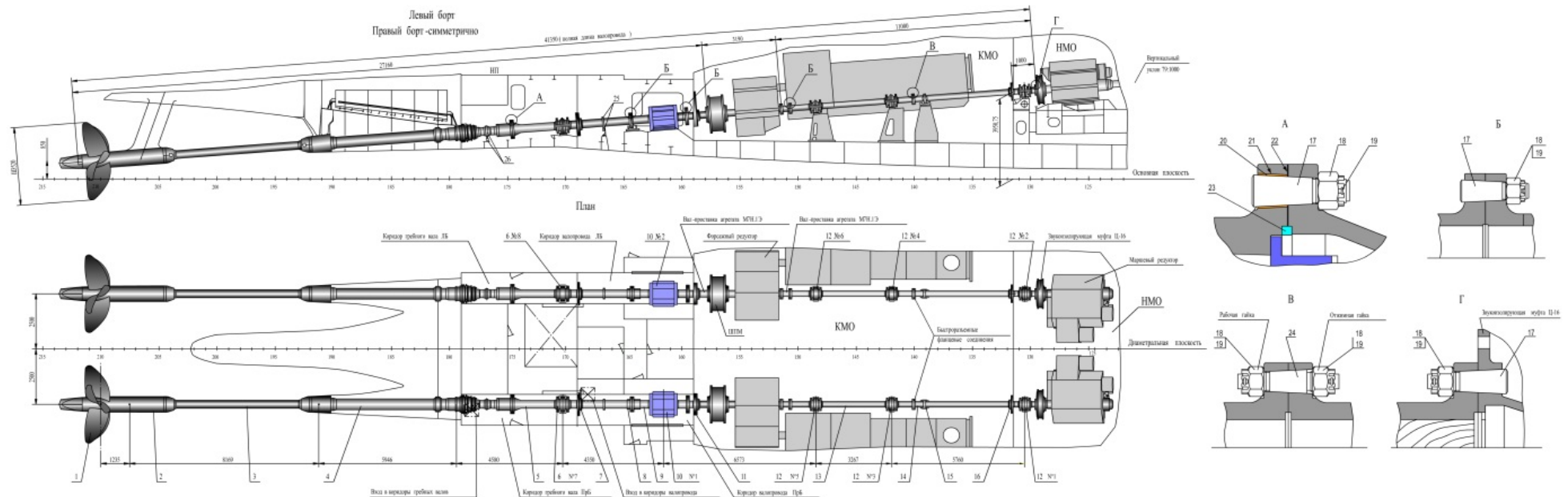


Рисунок 1.1 – Валопровод судна проекта 19619. Общее расположение:

1 – винт гребной; 2 – устройство крон штейновое; 3 – вал гребной; 4 – устройство дейдвудное; 5 – вал промежуточный № 3; 6 – подшипник опорный; 7 – устройство уплотнительное переборочное $\varnothing 360$; 8 – устройство для сдвига валопровода; 9 – вал упорный; 10 – подшипник упорный; 11 – устройство уплотнительное переборочное $\varnothing 320$; 12 – подшипник опорный; 13 – вал промежуточный № 2; 14 – вал промежуточный № 1; 15 – подшипник монтажный; 16 – устройство уплотнительное переборочное $\varnothing 260$; 17 – конический болт; 18 – гайка; 19 – шплинт; 20 – стальная коническая втулка; 21 – стеклопластик; 22 – электроизоляционная прокладка; 23 – электроизоляционное кольцо; 24 – конический болт; 25 – ротор и первичный преобразователь тахометра системы машинных телеграфов и тахометров; 26 – контактно-щеточное устройство

Таблица 1.1 – Критичные элементы судна для вида опасности «Потеря хода и управляемости»

Наименование критичного элемента (узла)	I_R	$[I_R]$
1. Главный двигатель:		
поршень – цилиндровая втулка;	8,272	6,709
шатунный подшипник;	7,329	6,533
распределительный вал;	7,414	6,533
ТНВД;	7,327	6,232
масляный насос.	7,327	6,232
2. Редуктор:		
шестерни;	7,167	6,920
подшипники.	6,919	6,823
3. Отказ валопровода (1 линия вала):	8,086	7,674
гребной вал;	7,294	6,660
промежуточный вал;	6,817	6,183
муфта гребного вала;	7,295	6,785
опорный подшипник;	7,131	6,660
упорный подшипник;	7,516	6,882
дейдвудная втулка;	7,118	6,660
дейдвудное уплотнение.	6,846	7,137
4. Винто-рулевой комплекс:		
узел крепления к гребному валу;	7,323	6,712
обшивка пера руля или насадки;	7,047	6,536
привод баллера;	7,106	6,934
лопасть ВФШ.	7,618	7,013

В настоящее время чистовое и тонкое шлифование осуществляется с применением традиционных методов, не в полной мере учитывающих влияние случайных факторов, снижающих стабильность показателей качества производимых изделий. Для стабилизации показателей качества технологические режимы назначаются исходя из неблагоприятных условий, например, возобновление режущих свойств изношенного шлифовального круга производится значительно раньше, чем того требует его действительное состояние. При прогнозировании состояния ТС используются традиционные детерминированные модели протекания технологического процесса (ТП), осуществляемые с применением традиционных режимов резания, способов диагностики и управления. То есть в большинстве случаев при проектировании технологических процессов чистового шлифования, за основу берутся детерминированные модели, по которым рассчитывается традиционные или традиционно-границные циклы, осуществляется обработка партии заготовок, после чего систему перестраивают на обработку другого типоразмера или вида [1,20,150]. В результате этого технологический процесс осуществляется с применением традиционных режимов резания, способов диагностики и управления.

Попытки усовершенствования процессов чистового шлифования привели к созданию граничных алгоритмов управления операций (рис. 1.2.), которые предусматривают протекание процесса вдоль границ допустимой области технологических переменных [9].

Для оптимизации процессов токарной обработки используют теорию оптимальных систем, которая имеет широкий спектр математических методов и подходов: классическое вариационное исчисление, динамическое программирование, принцип максимума, метод обратных задач динамики, аналитическое конструирование по критерию обобщенной работы, метод зондирования пространства параметров с использованием LP_T – последовательностей и др.

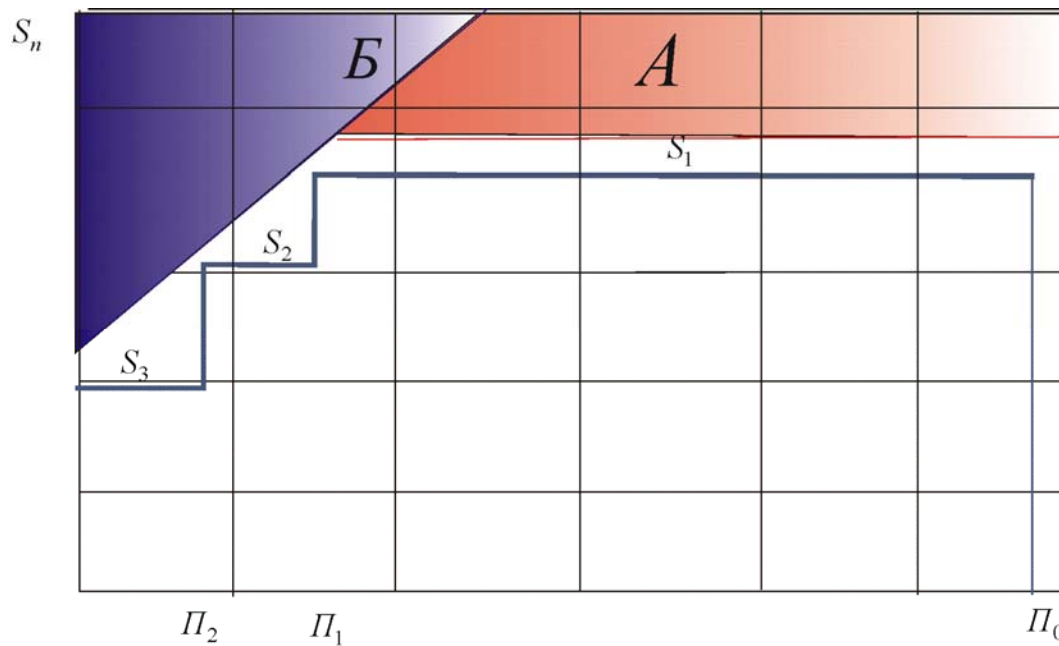


Рисунок 1.2 – Граничный алгоритм управления технологической операцией

Каждый метод имеет свою специфику и область применения характерную для определенного круга задач. В тех случаях, когда число параметров, подлежащих оптимизации равно единице, используют методы направленного поиска (например, градиентный метод). Если количество таких параметров превышает 10...12, применяют методы случайного поиска. В случае многокритериальной оптимизации пользуются методом LP_r – поиска (метод зондирования многомерного пространства точками равномерно распределенной последовательности), хотя он требует большого объема вычислений [13, 33, 147]. Для многокритериальной оптимизации применяют метод последовательного сужения многомерного пространства (множество Парето) на основе количественной информации об относительной важности критериев [90].

При реализации граничного алгоритма управления значительная часть припуска снимается с предельно допустимой скоростью съема материала. Именно за счет этого уменьшается машинное время на обработку.

Анализ существующих исследований в этой области позволяет выявить проблемы [3,14,25], возникающие при решении этой задачи. Как правило, в начальный момент времени при правильном подборе инструмента, оптимальном построении цикла шлифования, обеспечиваются заданные параметры точности и

шероховатости поверхности детали. Изменение состояния ТС оказывает существенное влияние на ход технологического процесса, приводит к изменению размерных параметров, к дополнительным возмущениям динамической системы станка и, следовательно, увеличению шероховатости и волнистости детали, образованию на ее поверхности дефектного слоя, которые в конце периода стойкости инструмента могут возрасти в несколько раз.

Применение многоступенчатых циклов при чистовом шлифовании на предприятии «91 СРЗ ЧФ» позволило повысить точность обработки на один квалитет, снизить шероховатость поверхности в 1,5...2 раза [1-3]

Однако при обработке по предложенным граничным алгоритмам, не учитывалось изменение состояния шлифовального круга с течением времени, что привело к существенному разбросу показателей качества и появлению бракованных изделий после шлифования кругом в конце периода его стойкости.

Многочисленные исследования, направленные на ликвидацию вышеуказанного недостатка, привели к созданию технологий, предусматривающих разработку граничного цикла для каждой отдельно взятой шейки вала [1, 25]. Применение вышеуказанных мер не позволило обеспечить стабильность показателей качества обработанных деталей вследствие воздействия на процесс возмущающих факторов.

В настоящее время для процессов тонкого шлифования шеек валов судовых валопроводов отсутствуют единые, научно-обоснованные рекомендации, а существующее многообразие технологических процессов на предприятиях не всегда обеспечивает стабильное получение заданных параметров шероховатости поверхности, точности и физико-механического состояния поверхностных слоев, что вынуждает в ряде случаев необоснованно вводить дополнительные финишные операции и увеличивать трудоемкость изготовления деталей.

Вместе с тем, процессы шлифования имеют сложную стохастическую природу, что приводит к разбросу показателей качества изделий и не позволяет использовать все возможности финишных методов.

Обеспечение качества и эффективности операций чистового и тонкого шлифования возможно только на основе разработки комплексных динамических моделей, учета и определения параметров протекающих стохастических процессов. Для устранения вышеуказанных недостатков необходимо использовать замкнутые системы с приборами активного контроля, позволяющими осуществлять коррекции сигнала управления при наличии возмущающих воздействий.

Необходимо комплексное решение этих вопросов, совокупность которых представляет собой нерешенную до настоящего времени задачу.

1.2. Обзор математических моделей абразивно-алмазной обработки

Фундаментальные положения обеспечения качества в теории шлифования освещены в исследованиях: Аврутина Ю.Д.[4], Анельчика В.Д. [5], Байкалова А.В. [6], Бакуля В.Н. [7], Барона Ю.М. [8], Беззубенко Н.К.[11], Богомолова Н.И. [12], Бокучава Г.В. [13], Братана С.М. [26], Евсеева Л.Г. [53], Кальченко В.И. [61], Королева А.В. [71], Корчака С.Н. [76], Лоладзе Т.Н. [82], Лурье Г.Б. [83], Макарова В.Ф. [87], Маслова Е.Н. [89], Новоселова Ю.К. [97], Носенко В.А. [102], Островского В.И. [109], Подураева В.Н. [110], Попова С.А. [111], Прилуцкого В.А. [112], Редько С.Г. [113], Резникова А.Н. [116], Рыжова Э.В. [118], Саятина Г.И. [120], Смоленцева В.П. [123], Старкова В.К. [127], Степанова Ю.С. [128], Сулова А.Г. [131], Федосеева О.Б. [141], Филимонова Л.Н. [142], Худобина Л.В. [143], Якимова А.В. [151], Янюшкина А.С. [153] и многих других [2,3, 9,10, 34-45, 47-57, 73, 90-92, 103-108, 115-135, 139-142, 142, 163-189].

Представленные работы посвящены совершенствованию процессов, технологии и оборудования для обеспечения качественной обработки деталей, позволяют решать комплекс задач, направленных на существенное повышение производительности обработки, уменьшение себестоимости производства изделий, повышение культуры производства и безопасности труда и освещают широкий спектр проблем, возникающих при шлифовании. В них показана необходимость дальнейшего повышения качества и производительности круглого шлифования

за счет совершенствования параметров технологической системы, выбора оптимальных режимов процессов обработки, управления циклом шлифования, контроля, а также рационального выбора инструментов, оборудования и приспособлений.

Этот подход использован в работах Королева А.В., Новоселова Ю.К., и других. Модели, основанные на этом подходе, более точны, но разработаны только для ограниченных областей применения и требуют дальнейшей доработки для моделирования всего многообразия процессов, протекающих при различных видах шлифования.

В ряде работ при выполнении общего анализа процессов формообразования поверхностей учитывается: а) наличие нескольких одновременно протекающих процессов формообразования, в том числе геометрического копирования, пластических и упругих деформаций, переноса материала с поверхности на инструмент и с инструмента на поверхность, физического и химического воздействия СОТС и внешней на обрабатываемый и инструментальный материалы; б) кинематика и динамика движений заготовки, инструмента и отдельных режущих кромок; в) изменение формы, числа и распределения режущих кромок за период обработки детали и период стойкости инструмента; г) изменение формы рабочей поверхности инструмента; д) качество поверхности заготовки, ее размеры, физико-механические свойства обрабатываемого материала. Описание рабочей поверхности инструмента выполнено с учетом явлений износа и разрушения режущих кромок. Проведен анализ процесса формирования обрабатываемой поверхности под воздействием формообразующего поля с учетом физических и химических явлений, возникающих при резании, вторичных и сопутствующих процессах. Предложены функционалы для расчета вероятности удаления материала, распределения ординат профиля шлифованной поверхности, параметров шероховатости и отклонений формы поверхности.

Идея использования вероятностного подхода при исследовании шероховатости поверхностей была впервые высказана американским математиком Дж. Райсом в 1937 году, в СССР – известным академиком Ю.В. Линником (первая

публикация в 1954 г.). В последствии появились публикации А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберга, И.В. Дунин-Барковского, к которым с большим вниманием относились как в СССР, так и за рубежом. Однако данные работы были направлены лишь на изучение характеристик шероховатых поверхностей, без учета условий их формирования. В них описаны математические модели рельефа, дан анализ влияния способов обработки на характеристики поверхности на основе априорной информации без учета динамических свойств процессов обработки, показаны физико-механические эффекты, связанные с шероховатостью.

В 1951 году были опубликованы имеющие огромное значение на тот период времени исследования Е.Н. Маслова в виде монографии, в которой впервые предложено аналитическое описание процесса шлифования. Теория базировалась на детерминированных статических моделях, построенных при допущении, что поверхность заготовки представляет собой идеально гладкое тело.

В начале 60-х годов профессора Н.И. Богомолов, Л.А. Глейзер и П.И. Ящерицын показали, что не все зерна участвуют в резании. «Часть зерен проходит “след в след”, вторая часть – лишь упруго и пластически деформирует материал без образования стружки, третья часть – из-за недостаточного выступа над уровнем связки вообще не контактирует с обрабатываемым материалом. Съём материала производит всего 5-12% зерен, видимых на рабочей поверхности круга». Поэтому все последующие расчетные схемы шлифования, в отличие от упрощенных геометрических, основаны на статистико-вероятностном представлении рабочей поверхности круга и процесса удаления материала. Благодаря теоретическим работам отечественных ученых, в 70-е годы появились математические модели, более адекватно отражающие процесс шлифования.

С учетом трансформации исходного закона разноразмерности зерен, Ю.Д. Аврутиным и Д.Г. Евсеевым выполнен расчет средней высоты микронеровностей в поперечном сечении заготовки. Авторам удалось математически установить влияние различных факторов на основные показатели процесса через изменение относительной опорной длины микропрофиля круга.

Достаточно широкое развитие теоретико-вероятностный подход получил в работах проф. А.Н. Резникова и О.Б. Федосеева, в которых рассматриваются вопросы аналитического расчета параметров шероховатости поверхности при обработке деталей алмазными инструментами. Показано, что «...вследствие взаимного движения круга и заготовки, исходный закон разновысотного распределения вершин зерен над связкой круга трансформируется в новый кинематический закон». Авторам не удалось раскрыть сложную закономерность съема материала и, соответственно, образования шлифованной поверхности по всей длине дуги контакта круга с заготовкой при круглом наружном, внутреннем и плоском шлифовании, а полученные ими зависимости оказались применимы лишь к врезному шлифованию прямолинейного образца.

Значительное внимание исследованию процессов шлифования уделено в работах А.И. Грабченко, В.Л. Доброскока, В.И. Кальченко, Ф.Н. Новикова, М.Д. Узуняна, В.А. Федоровича, Л.Н. Филимонова, А.В. Якимова и других авторов, которые, используя различные статистико-вероятностные методы, получили расчетные зависимости применительно к конкретным схемам и условиям шлифования. Авторами показано, что любые выводы о количестве рабочих зерен, о процентном соотношении их с зёрнами на поверхности круга могут иметь реальный смысл лишь применительно к конкретным, присущим данному процессу условиям, что связано с нестационарностью операций шлифования. Вышеуказанные работы внесли существенный вклад в развитие теории формообразования шлифованных поверхностей, однако в связи с принятыми допущениями имеют ограниченную область применения.

Первые математические модели абразивно-алмазной обработки, отражающие динамические свойства процессов их стохастическую природу, а также нестационарность состояний технологических операций, были получены и опубликованы Ю.К. Новоселовым в 1971 г. В 1975 году появились публикации А.В. Королева, в которых использовался аналогичный подход.

Анализ рассмотренных работ позволяет четко выделить два способа, связывающие процесс микрорезания со съемом припуска. К первому – относятся

подходы, основанные на принципе копирования поверхности шлифовального круга в материале заготовки. При этом на поверхности инструмента выделяются режущие профили без выделения отдельных зерен. По набору этих профилей, с учетом кинематики шлифования строится режущий профиль, который копируется на заготовке. Недостатком этого подхода является отсутствие учета упруго-пластических деформаций металла, разделение профиля на режущие, скобящие, давящие и не режущие зерна.

Ко второму – подходы, основанные на принципе моделирования поверхности инструмента как совокупности случайно расположенных зерен определенной геометрии.

Однако при форсированных технологических режимах в силу возрастания чувствительности технологических систем (ТС) к возмущающим факторам наблюдается потеря качества обработки [26, 33,49,69]. В связи с тем, что процессы шлифования имеют стохастическую природу, в процессе резания изменяются не только параметры объекта, но и самой ТС. Это приводит к нестабильности качества изделий и не позволяет в полной мере использовать значительные технологические возможности круглого шлифования. Обеспечение динамической стабильности технологического процесса и ТС в значительной мере определяет стабильность качества выпускаемой продукции. В соответствии с ИСО/ПСК 2 9000:2000 стабильность качества выпускаемой продукции определяется как гарантированность повторяемости свойств изделий. Существующие ТС и технологические процессы не позволяют уменьшить разброс параметров изделий. Так, например, по данным Hyundai WIA (г. Санкт-Петербург), в результате испытаний коленчатых и распределительных валов при снижении волнистости до 0,3 мкм и ужесточении полей допусков на 25 % их срок службы повысился в 2,5 раза. Однако, при этом, доля изделий, произведенных по традиционным технологиям, не попавших в указанные допуски, превысила 70 % [26]. Для компенсации воздействия возмущений обычно пытаются использовать замкнутые системы с приборами активного контроля. Однако, вследствие отсутствия адекватных моделей протекающих процессов, возмущений ТС, комплекса средств диагностики,

недоступности ряда параметров непосредственному измерению и контролю, они не получили широкого распространения.

Для обеспечения стабильности выходных показателей процесса необходимо использовать замкнутые системы с приборами активного контроля, что позволит осуществлять коррекции сигнала управления при наличии возмущающих воздействий.

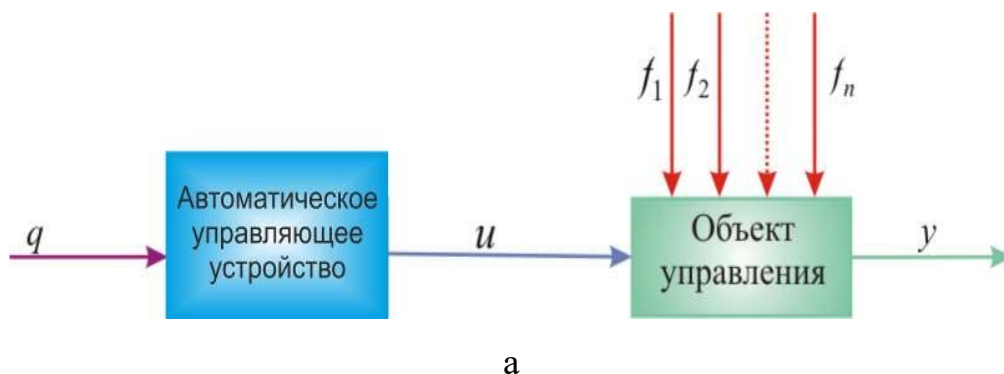
1.3. Принципы построения и примеры различных вариантов систем управления металлорежущими станками

Системы, применяемые для автоматизации производственных процессов, можно разделить на два класса: циклический и ациклический рис.1.3 [14].

Циклические системы (рис. 1.3, а) выполняют свои функции по заранее заданной программе без каких-либо изменений последовательности ее отдельных этапов или режимных параметров, несмотря на возможные изменения условий фактического протекания процесса. Примером такой системы может служить привод бесцентрово-шлифовального станка с ЧПУ (рис. 1.3, б).

Эти системы функционируют на основе априорной информации. Информация о возмущающих воздействиях и управляемых величинах не используется.

В **ациклических системах** (рис. 1.4) управление осуществляется с использованием рабочей информации о важнейших выходных величинах объекта или возмущающих воздействиях.



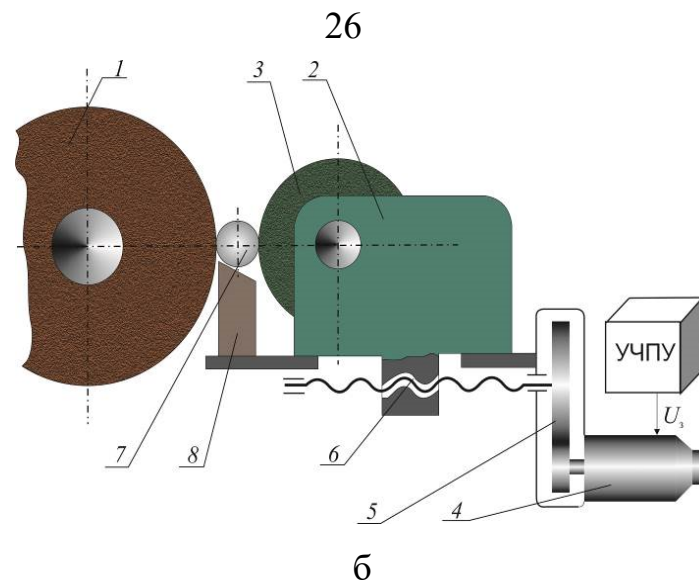
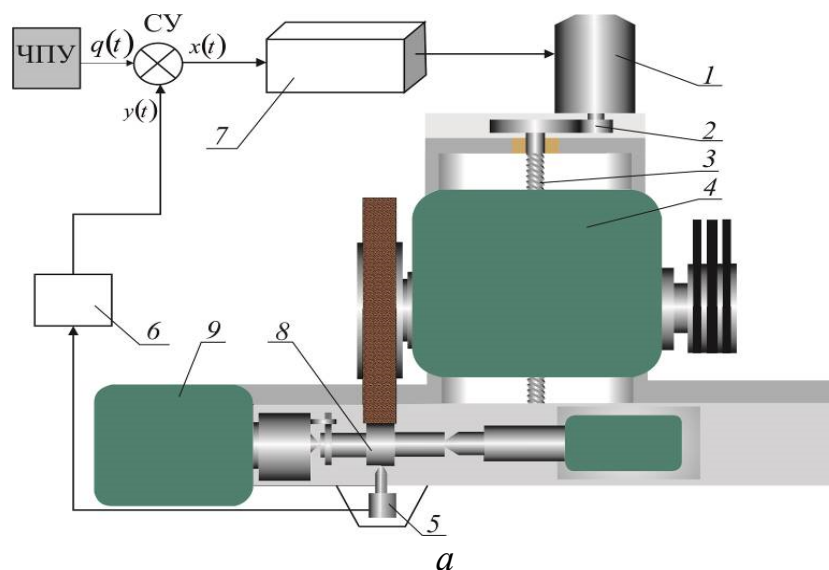


Рисунок 1.3 – Циклическая система: *а* – структура автоматической системы; *б* – привод радиальной подачи бесцентрово шлифовального станка с ЧПУ:

Программа работы не остается постоянной, структура цикла и параметры режима могут изменяться в зависимости от фактических условий протекания процесса. Примером может служить станок с системой ЧПУ, которая обладает способностью при заданном чистовом контуре детали автоматически программировать черновые проходы в зависимости от фактического распределения припуска на данном экземпляре заготовки или круглошлифовальный станок с системой ЧПУ, способной изменять циклы обработки с учетом изменения свойств круга за период его стойкости.



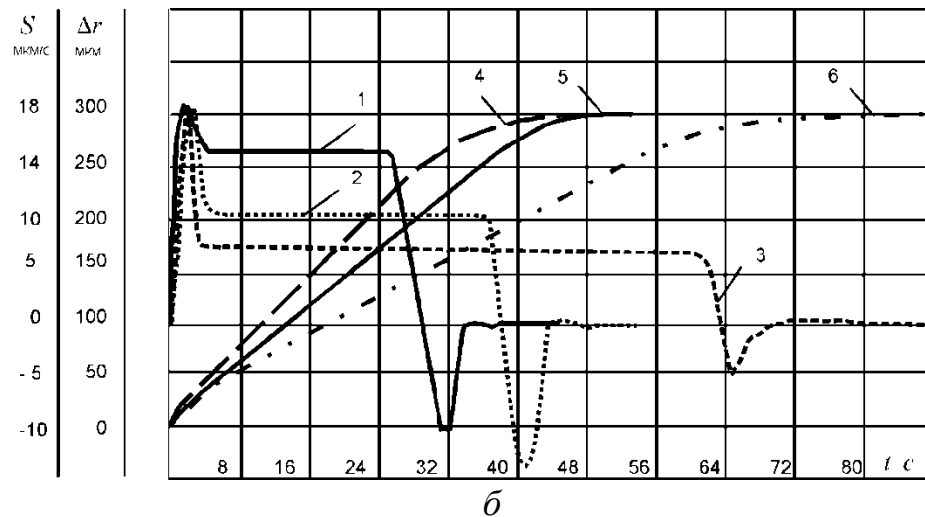


Рисунок 1.4 - Ациклическая система:

a – схема обработки шеек валов (1 – двигатель постоянного тока, 2 – редуктор, 3 – ходовой винт, 4 – шлифовальная бабка, 5 – прибор активного контроля, 6 – дифференциальный усилитель, 7 – усилитель-преобразователь, 8 – деталь, 9 – передняя бабка); *б* – циклы для обработки шеек валов с учетом изменения свойств круга за период стойкости t : (1, 2, 3 – траектории изменения S для 5-ой, 7-ой и 13-ой детали соответственно; 4, 5, 6 – траектории изменения Δr для 5-ой, 7-ой и 13-ой детали соответственно)

Характер рабочей информации, используемой для управления в автоматических системах, является одним из важнейших признаков для их классификации. По этому классификационному признаку АС делят на системы управления: 1) по возмущению; 2) по отклонению; 3) с комбинированным управлением.

При управлении по возмущению (рис. 1.5, *a*) – управляющее воздействие – U . Примером может служить токарный станок с системой ЧПУ, позволяющей вносить коррекцию подачи в зависимости от температуры в зоне резания (рис. 1.5, *б*).

Достоинством систем, использующих этот принцип управления, является их простота и быстрая реакция на возмущения. Прежде чем на выходе инерционного объекта управления появятся существенные нарушения заданного закона изменения управляемой величины, вызванные возмущающим воздействием, на его вход от АУУ подается управляющее воздействие, которое нейтрализует действие возмущения. Однако для того, чтобы система могла реагировать на несколько возмущающих факторов, необходимо соответственно увеличивать число измерительных и корректирующих устройств, что существенно усложняет АУУ.

Кроме того, не каждое возмущающее воздействие, которое может быть легко измерено, формируется в АУУ на основе контроля внешних возмущающих воздействий f . Появление непредвиденного возмущения может привести к значительным отклонениям управляемых величин. Поэтому принцип управления по отклонению успешно применяется в тех случаях, когда имеется небольшое число доминирующих возмущений (не более двух).

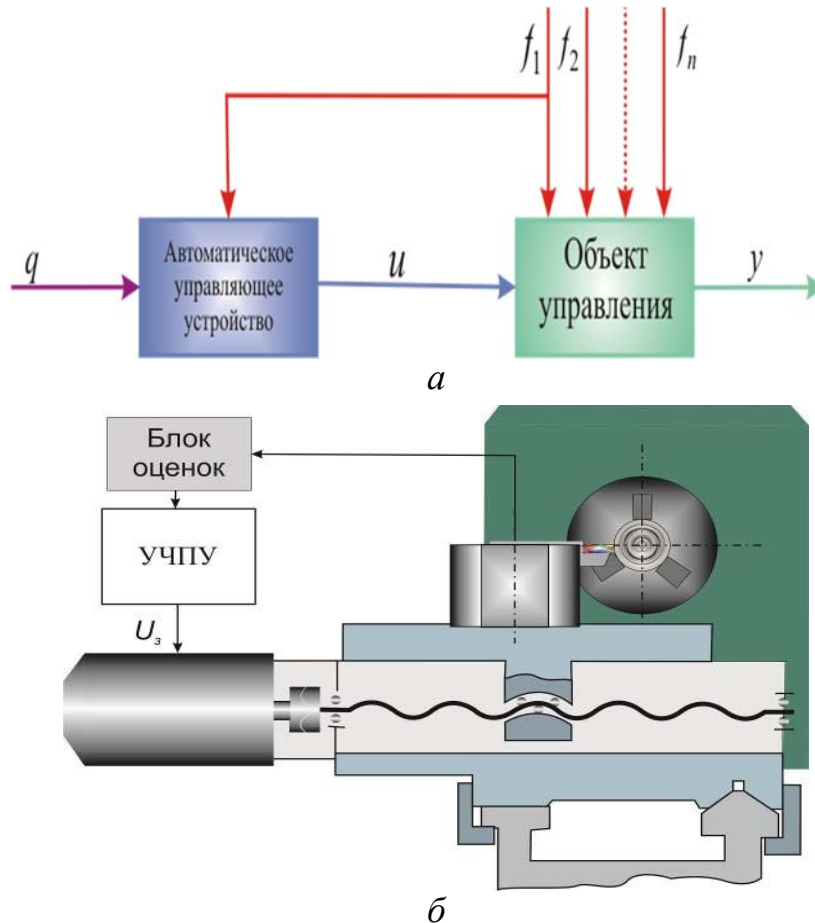


Рисунок 1.5 – Система управления по возмущению:

а – структура автоматической системы, реализующая принцип управления по возмущению; *б* – привод радиальной подачи токарного станка с ЧПУ

Другим недостатком управления по возмущению является требование строгого соответствия параметров объекта и АУУ. Изменение параметров объекта в процессе эксплуатации или неточное их определение при проектировании АС приводит к значительным отклонениям управляемой величины. Оба отмеченных недостатка обусловлены тем, что истинное значение управляемой величины не контролируется. Принцип управления по отклонению (рис. 1.6) предусматривает формирование управляющего воздействия в зависимости от знака и

величины отклонения (ошибки) – разности между заданным и действительным значениями выходной величины в каждый момент времени.

Основным преимуществом этих систем является их способность выполнять свои функции при любом числе возмущающих воздействий, поскольку ни одно из них не измеряется.

Вместо возмущений здесь измеряется управляемая величина (y), ее значение непрерывно сравнивается с заданным. Таким образом, АУУ в этом случае реагирует на любое возмущение, которое вызвало появление отклонения.

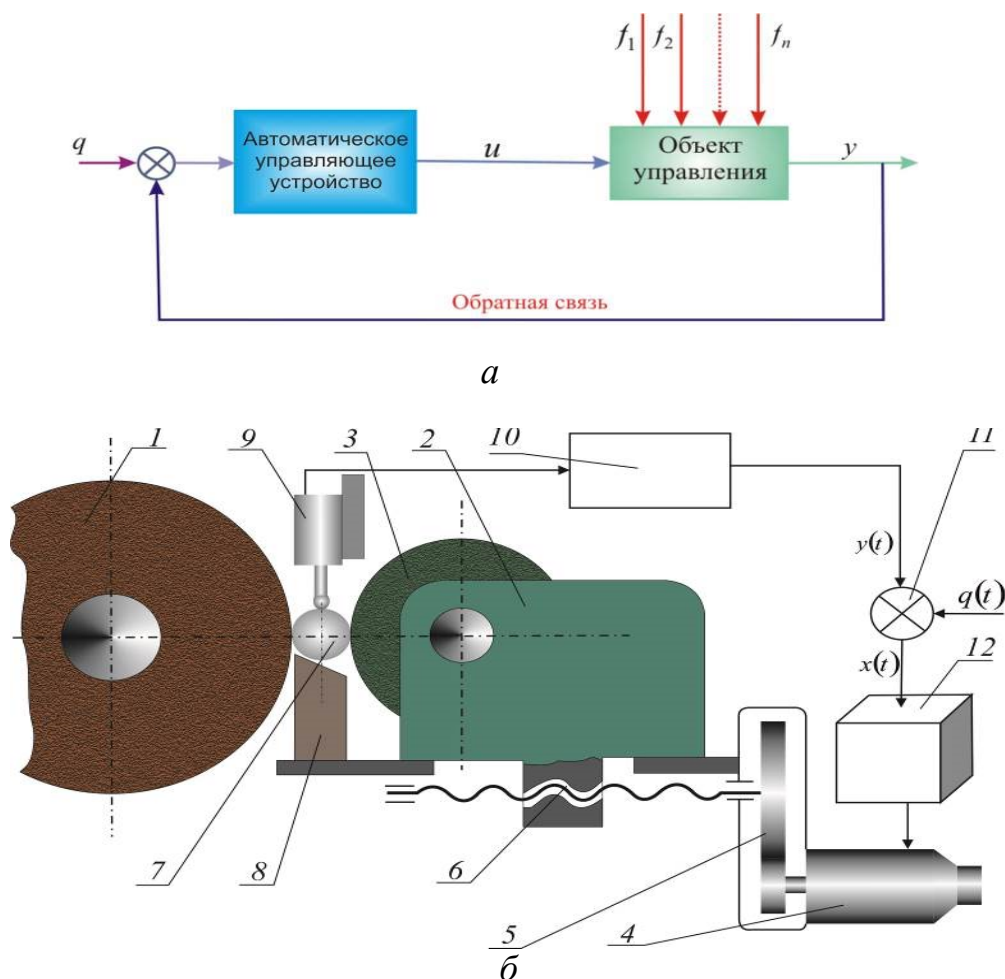


Рисунок 1.6 – Система управления по отклонению: *а* – структура автоматической системы, реализующая принцип управления по отклонению; *б* – привод радиальной подачи станка с ЧПУ с устройством активного контроля (1 –шлифовальная бабка с шлифовальным кругом, 2– подвижная бабка с ведущим кругом 3, 4 – электродвигатель, 5 – редуктор, 6 – винт-гайка качения, 7 –деталь 8 – нож, 9 –индуктивный измерительный прибор, 10– усилитель, 11– сравнивающее устройство, 12– усилитель–преобразователь)

Менее жесткие требования предъявляются и к соответствию параметров АУУ и объекта управления, поскольку появившееся в результате этого несоответствия отклонение будет ликвидировано согласно заложенному принципу управления.

Благодаря указанным преимуществам принцип управления по отклонению нашел самое широкое применение в автоматике. Однако в самом принципе заложен и основной недостаток рассматриваемых систем. Управляющее воздействие, направленное на ликвидацию отклонения, появляется лишь после того, как это отклонение появится, т.е. после того, как возмущающее воздействие «пройдет» через инерционный объект управления.

Поэтому при быстром изменении возмущающих воздействий и инерционном объекте управляющие воздействия запаздывают даже при весьма хорошем быстродействии АУУ. Таким образом, наличие отклонения (ошибки) в неустановившихся режимах работы АС заложено самим принципом управления по отклонению. Кроме того, как будет показано в дальнейшем, эти системы по своей природе склонны к колебаниям.

Отмеченные недостатки отсутствуют у систем управления по возмущению. Поэтому при высоких требованиях к качеству управления в АС одновременно используются оба рассмотренных принципа, т.е. используется АС с комбинированным управлением (рис. 1.7).

Первый контур САУ осуществляет оценку глубины резания. При шлифовании оценивается возмущение (отклонения формы шлифовального круга и заготовки), текущее расстояние между центром вращения круга и заготовки, а также рассчитывается радиальная подача. Представленная на рисунке 1.7 система управляется по двум каналам и позволяет обеспечить гарантированное качество обработки за счет поддержания на заданном уровне глубины резания и скорости перемещения стола.

Второй контур регулирования обеспечивает необходимую скорость перемещения стола станка. Напряжение U_z , в определенном масштабе соответствующее требуемому значению скорости перемещения, подается на вход сравнива-

ющего устройства, на другой вход сравнивающего устройства поступает сигнал, пропорциональный действующей скорости перемещения стола.

Величина погрешности через усилитель поступает на обмотки электро-механического преобразователя. При перемещении иглы электро-механическим преобразователем изменяется площадь проходного сечения между иглой и кромкой отверстия в плунжере.

Это приводит к изменению давления в полости A и перемещению плунже-ра, который будет перемещаться до тех пор, пока не установится прежнее про-ходное сечение между иглой и отверстием в плунжере и установится заданная скорость перемещения стола.

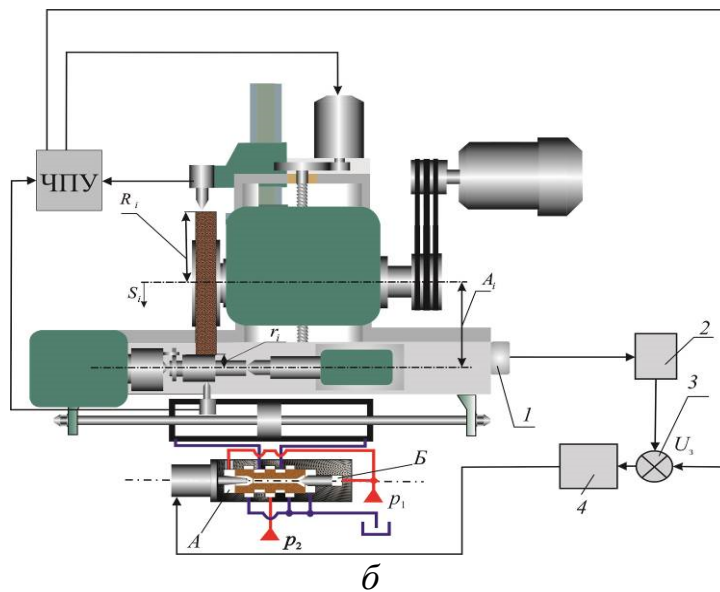
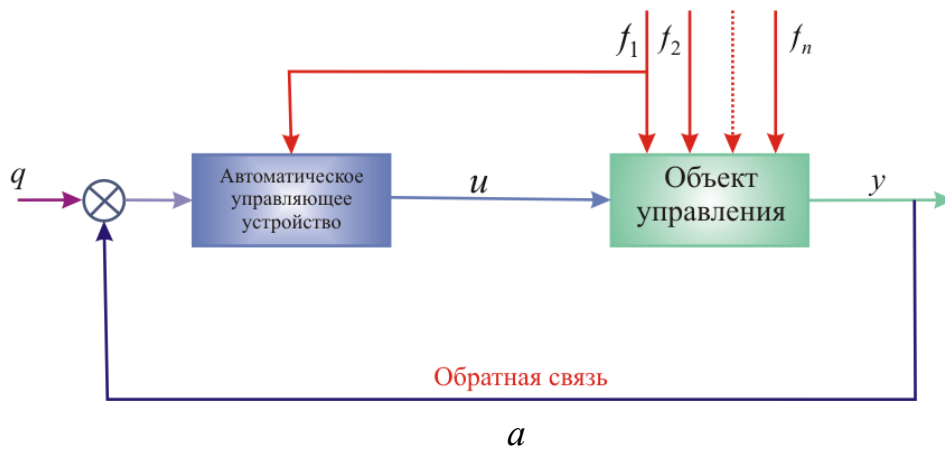


Рисунок 1.7 – Комбинированная система управления: a – структура автоматической системы, реализующая принцип управления; b – привод радиальной подачи станка с ЧПУ с устройством активного контроля (1 – измерительный прибор, 2, 4 – усилители, 3 – сравнивающее устройство)

Другим классификационным признаком является конфигурация цепей передачи воздействий (сигналов). По этому признаку автоматические системы делят на **разомкнутые** и **замкнутые**. На рисунке 1.8 приведена САУ с двумя контурами регулирования: замкнутым и разомкнутым.

Уменьшение диаметра шлифовального круга вследствие его износа приводит к уменьшению скорости резания. Для ее стабилизации необходимо регулировать частоту вращения электродвигателя 13 главного движения, которое обратно пропорционально изменению диаметра шлифовального круга 10. С целью измерения фактического диаметра круга и как задающее устройство САУ использован потенциометрический датчик 12 перемещения, бегунок которого связан с ползуном прибора для правки шлифовального круга.

В разомкнутом контуре САУ сигнал $q_i(t)$, вырабатываемый задающим датчиком перемещения 12 (ЗП), поступает на управляющий вход тиристорного преобразователя 14 (ТП), нагрузкой которого является двигатель 13 (УО) постоянного тока. Желаемая начальная скорость резания может устанавливаться предварительной настройкой потенциометра 12 по данным измерительных приборов. Главным возмущением для управляемого объекта является момент M_p от силы резания. Изменение момента приводит к изменению скорости резания в соответствии с динамическими свойствами системы и электромеханической характеристикой двигателя. Поэтому функциональное назначение системы – стабилизация скорости резания – в этом случае зависит от возмущения, которое снижает ее эксплуатационные показатели.

В замкнутых системах цепь передачи воздействий представляет собой замкнутый контур. Замыкание контура происходит за счет обратной связи. По линии обратной связи (ОС) информация о фактическом значении выходных величин объекта передается на вход системы – в суммирующее устройство (СУ). В зависимости от того, происходит ли в СУ сложение или вычитание сигналов, обратная связь называется положительной или отрицательной.

При врезном шлифовании (рис. 1.8, б) скорость снятия припуска пропорциональна радиальной подаче. На основе этого принципа построен замкнутый

контур САУ, который функционирует следующим образом. Сигнал $q(t)$, соответствующий значению заданной скорости снятия припуска от стойки ЧПУ подается на вход суммирующего устройства, на другой вход которого также поступает сигнал $y(t)$ от дифференциального усилителя 6, полученный от индуктивного измерительного прибора 5 в результате измерения размера заготовки в процессе шлифования.

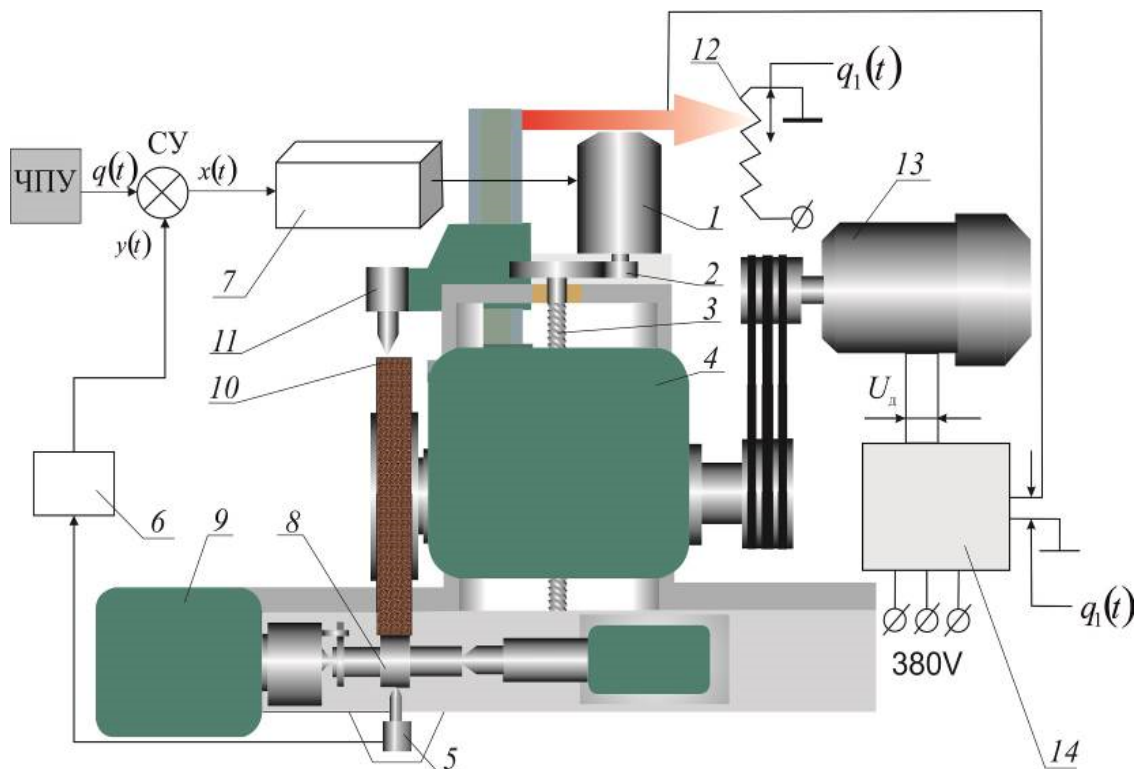


Рисунок 1.8 – САУ с замкнутым и разомкнутым контурами регулирования

Сигнал ошибки $x(t)$ подается на вход усилителя-преобразователя 7 и поступает на управляющие обмотки двигателя 1, который через редуктор посредством ходовой пары винт-гайка качения перемещает шлифовальную бабку 4 с требуемой скоростью в направлении радиальной подачи, обеспечивая заданную алгоритмом управления скорость снятия припуска.

На основании приведенного примера можно сделать заключение, что в замкнутых системах управляющее устройство воздействует на объект, который в свою очередь воздействует на управляющее устройство (этого нет в разомкнутых системах)

Системы, в которых используется принцип управления по отклонению (рис. 1.3 и рис. 1.6), являются замкнутыми системами, обратная связь в них – отрицательная. В СУ производится вычитание сигналов, т.е. находится отклонение (ошибка):

$$x(t) = q(t) - y(t).$$

Если в АС существуют только местные обратные связи, охватывающие один или несколько элементов АУУ, то в целом система является разомкнутой.

В зависимости от требуемого закона $g(t)$ изменения управляемой величины, автоматические системы принято делить на системы стабилизации, системы программного управления, следящие и экстремальные [101].

Системы стабилизации предназначены для поддержания постоянного значения управляемой величины. Задающее воздействие в этих системах постоянно ($g(t) = g_0 = const$). Основной задачей этих систем является борьба с вредным влиянием возмущающих воздействий.

Системы программного управления предназначены для изменения управляемой величины по заданному закону. Задающее воздействие представляет собой заранее известную функцию времени ($g = g_0(t)$) или какой-либо другой величины ($g = g_0(z)$) и называется программой управления (в первом случае временной, во втором – параметрической).

Следящие системы предназначены для изменения управляемой величины объекта (угла поворота, частоты вращения и т.д.) по закону, который заранее известен. В таких системах задающее воздействие $g(t)$ может рассматриваться как случайная функция времени.

Экстремальные системы поддерживают наибольшее или наименьшее значение управляемой величины, возможное при конкретных условиях протекания процесса ($g = y_{ext}$). Назначением этих систем является автоматическое отыскание управляющих воздействий, соответствующих экстремальному значению управляемой величины при неконтролируемом изменении характеристик объекта и внешних условий, влияющих на положение экстремальной точки.

В настоящее время большинство созданных систем управления токарными станками относятся к системам программного управления. К данному классу отнесены станки с ЧПУ, в которых выходные параметры процесса не контролируются (рис. 1.9). При обработке заготовок на станках с ЧПУ предполагается, что заданное качество обработки будет обеспечено за счет отработки заранее известного закона управления [101].

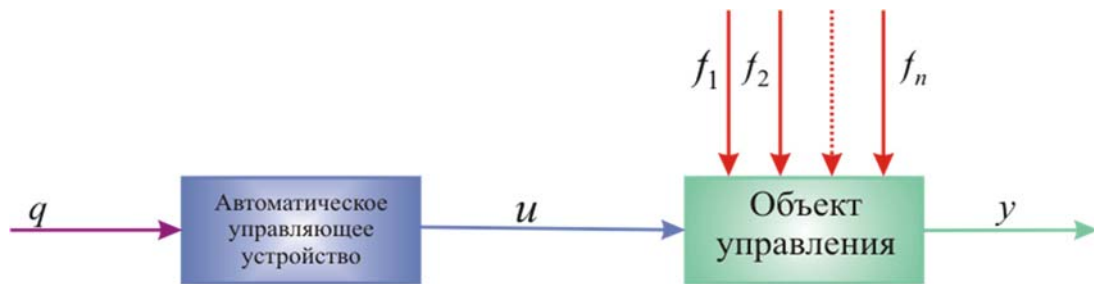


Рисунок 1.9 – Функциональная схема системы программного управления

Для управления процессом токарной обработки также нашли применение замкнутые системы, использующие дополнительную информацию о состоянии процесса, позволяющие повысить производительность и точность обработки [101].

К первым удачным опытам использования таких систем следует отнести исследования по созданию систем автоматического управления упругими перемещениями технологической системы проф. Б.С. Балакшина [8, 9], в которых показано, что изменения силы резания вызывают изменения упругих перемещений в размерных и кинематических цепях ТС, что, в свою очередь, порождает появление погрешностей размеров обрабатываемых деталей. Им были предложены два принципиально различных пути решения данной проблемы: первый путь заключается в регулировании размера статической настройки Δ_c , второй – в стабилизации размера динамической настройки A_g в процессе обработки.

Управляющим воздействием системы является упругое перемещение на замыкающем звене A_g . Регулируемым параметром – размер статической настройки Δ_c .

Регулирование размера статической настройки обуславливает необходимость осуществления малых перемещений рабочих органов станка (рис. 1.10). С целью получения более высокой точности малых перемещений в системе введена общая отрицательная обратная связь по регулируемому параметру.

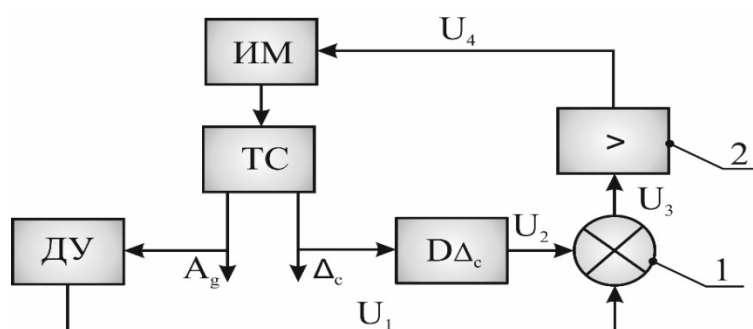


Рисунок 1.10 – Функциональная схема системы адаптивного управления статической настройкой

Динамометрический узел ДУ производит в процессе резания непрерывное измерение упругого перемещения A_g на замыкающем звене и выдает на схему сравнения 1 соответствующий электрический сигнал U_1 . На схему сравнения 1 поступает также сигнал U_2 от датчика обратной связи D_{Δ_c} , непрерывно измеряющего приращение размера статической настройки Δ_c , получаемого в результате регулирования. Получаемый на схеме сравнения сигнал рассогласования $U_3 = U_2 - U_1$ подается на электронный усилитель 2, с которого усиленный сигнал U_4 поступает на исполнительный механизм малых перемещений ИМ, обеспечивающий изменение размера статической настройки.

В процессе врезания или при переходе с обработки одной ступени на другую система автоматически выводит резец на размер статической настройки, при котором обеспечивается достижение заданной точности диаметрального размера, а в процессе резания поддерживается получение требуемой точности.

Для повышения производительности и точности обработки применяются системы управления упругими перемещениями, в которых стабилизация размера динамической настройки A_g производится путем изменения минутной подачи инструмента, при изменении припуска (или других возмущающих параметров) подача должна меняться так, чтобы максимально допустимая по точности обработки (или прочности инструмента) сила резания оставалась постоянной.

Максимально допустимую для данных условий обработки подачу определяют, исследуя силовые ограничения, налагаемые еще прочностными возможностями и жесткостью ТС. Важными силовыми ограничениями являются ограничения на подачу, допустимую жесткостью обрабатываемой заготовки, жесткостью резца, прочностью державки резца, прочностью режущих пластин резца, прочностью механизма подачи станка.

На рисунке 1.11 представлена структурная схема системы, обеспечивающей управление размером динамической настройки путем регулирования продольной подачи.

При работе САУ посредством динамометрического узла 1 непрерывно измеряется величина размера динамической настройки. С датчика динамометрического узла подается сигнал, пропорциональный размеру динамической настройки, который поступает на сравнивающее устройство 3, и сигнал с датчика 2, соответствующий величине динамической настройки A_g . Получаемый в результате сравнения сигнал рассогласования обрабатывается в блоке усиления 4, после чего приводит в действие исполнительный механизм 5, осуществляющий бесступенчатое регулирование продольной подачи [7, 100].

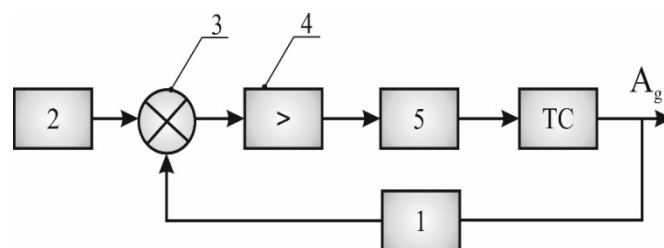


Рисунок 1.11 – Функциональная схема системы адаптивного управления размером динамической настройки

В работе [146] рассмотрена система управления, обеспечивающая постоянство силы резания при шлифовании. Согласно алгоритму работы системы управления, при обработке в каждый i -й момент времени, в систему вводится информация о фактически действующей силе $P_{\Phi i}$ и мощности $N_{\Phi i}$ резания.

Функциональная схема системы управления представлена на рисунке 1.12 САУ включает в себя датчик D1 силы резания, устройство ЗУ1, задающее силу резания, устройство СУ1, сравнивающее фактическую силу резания с заданной, и аналогичные устройства для мощности резания (D2, ЗУ2, СУ2). Система содержит генератор тактовых импульсов ГТИ и исполнительное устройство ИУ.

Сила резания определяется путем измерения упругих перемещений поворотной револьверной головки относительно поперечных салазок суппорта с помощью бесконтактного индуктивного датчика D1.

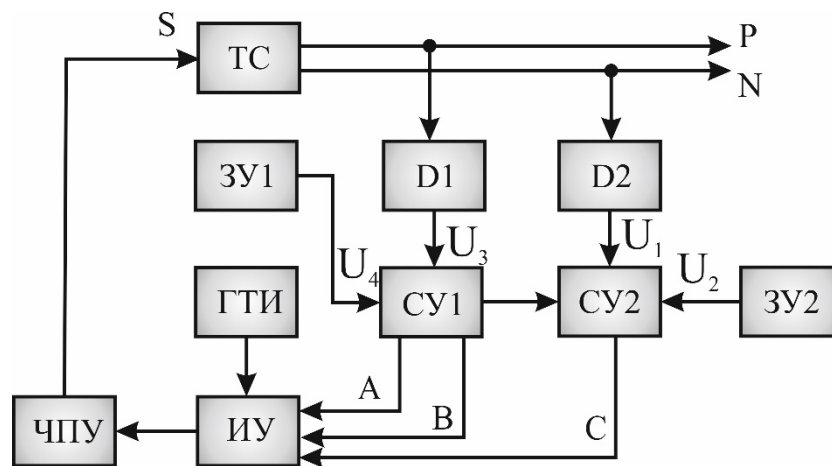


Рисунок 1.12 – Функциональная схема адаптивной системы управления к станку мод.16K20Ф3

Сигнал датчика U_1 , пропорциональный фактической силе P_{Φ} , поступает на сравнивающее устройство СУ1, куда от ЗУ1 подается сигнал U_2 , соответствующий заданной силе P_3 . В зависимости от соотношения этих сигналов устройство СУ1 выдает сигналы А и В по следующему алгоритму: если $U_1 = U_2$, то $A = 0$, $B = 0$; если $U_1 > U_2$, то $A = 1$, $B = 0$; если $U_1 < U_2$, то $A = 0$, $B = 1$.

В зависимости от значений сигналов A и B исполнительное устройство ИУ изменяет значение коэффициента K , посредством которого корректируется фактическая подача. Система воспринимает ограничения по мощности резания (при $N_{\Phi i} = N_3$ и $U_4 = U_3$), устройство СУ2 выдает сигнал $C = 0$, который поступает в ИУ и через ЧПУ запрещает дальнейшее увеличение подачи S_i .

Аналогичные системы управления разработаны также фирмой AEG-Telefunken (Германия) для оснащения токарных, фрезерных и шлифовальных станков с ЧПУ фирмы Boeringer [121], фирмой WMW (Германия) для токарного станка модели DFS 400x1250NC/AC.

В работе [71] описан ряд систем регулирования, обеспечивающих стабилизацию стоимостных характеристик процесса резания, уровня вибраций и других параметров обработки. Решаются задачи обеспечения постоянства скорости износа инструмента и регулирования в соответствии с износом скорости резания при неизменной величине подачи на оборот заготовки. На рисунке 1.13 приведена функциональная схема системы управления износом режущего инструмента по силе резания.

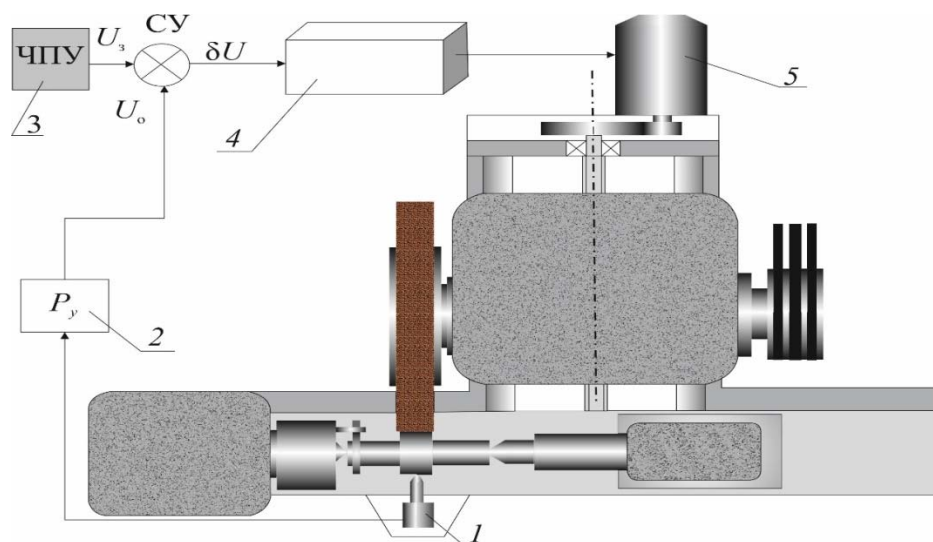


Рисунок 1.13 – Функциональная схема адаптивной системы управления износом режущего инструмента по силе резания

Сигнал, снимаемый с тензодатчика 1, поступает через тензостанцию 2 на вход сравнивающего устройства СУ для сравнения со значением, задаваемым

устройством ЧПУ 3. Из усилителя 4 результирующий сигнал подается на исполнительный механизм ИМ системы управления и изменяет регулируемый параметр таким образом, чтобы текущее значение силы резания было равно заданному.

Благодаря этому регулятор системы управления постоянно находится в режиме, способствующем устранению рассогласования между текущим и заданным значениями термо-Э.Д.С.

Для управления процессом шлифования предлагались системы экстремального регулирования [75]. Системы управления по алгоритму поиска предполагают измерение в процессе обработки всех параметров, входящих в выражение целевой функции. При этом периодически вычисляют величину показателя оптимальности и посредством организационного поиска находят сочетание элементов режима обработки, при которых обеспечивается экстремальное значение показателя оптимальности.

Для синтеза систем с обратной связью используют интегральные оценки качества, позволяющие исследовать характер протекания переходного процесса (степень колебания, коэффициент затухания) [101].

Критерии, представляют собой интегралы по времени от функций исходной величины $y_{св}(t)$ или погрешности $\varepsilon_{св}(t)$. Цель использования таких критериев заключается в том, чтобы получить общую оценку быстродействия и отклонения регулируемой величины от постоянного значения, применяя для этого линейные и квадратичные оценки. Для решения задач оптимизации в динамических системах управления со случайными параметрами больше подходят квадратичные функционалы.

Для оценки качества как колебательных, так и монотонных переходных процессов рекомендуются следующие квадратические интегральные оценки

$$I_{20} = \int_0^{\infty} y^2(t) dt ,$$

$$I_{21} = \int_0^{\infty} [y^2(t) + \tau_1^2 y^2(t)] dt,$$

$$I_{2n} = \int_0^{\infty} [y^2(t) + \tau_1^2 y^2(t) + \dots + \tau_n^2 y^{(n)2}(t)] dt,$$

где $\tau_1, \tau_2 \dots \tau_n$ – постоянные величины, которые имеют размерность времени.

При оценке переходного процесса по интегралу I_{20} , колебательный процесс с большим перерегулированием может оказаться лучше, чем монотонный, а это не всегда является правильным. Для исключения сильной колебательности следует накладывать ограничения не только на величину, но и на скорость отклонения. Это дает так называемую усовершенствованную квадратичную оценку по интегралу I_{21} . Более полную оценку качества дает старшая квадратическая оценка I_{2n} , но требует большего времени для расчета.

Интегральная квадратичная оценка при наличии случайных сигналов может быть определена таким образом

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{1}{1+W_k(j\omega)} \right|^2 S_h(\omega) d(\omega) + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{W_k(j\omega)}{1+W_k(j\omega)} \right|^2 S_3(\omega) d(\omega),$$

где $S_3(\omega)$ и $S_h(\omega)$ – спектральная плотность соответственно сигнала управления и возмущения; $W_k(j\omega) = W_k(j\omega, q_1, \dots, q_n)$ – частотная характеристика разомкнутой системы, зависящая от случайных параметров $q_1, \dots, q_n$.

К преимуществам поисковых систем можно отнести потребность в малом объеме априорной информации для управления процессом. На рисунке 1.14 представлена система экстремального регулирования токарным станком [75].

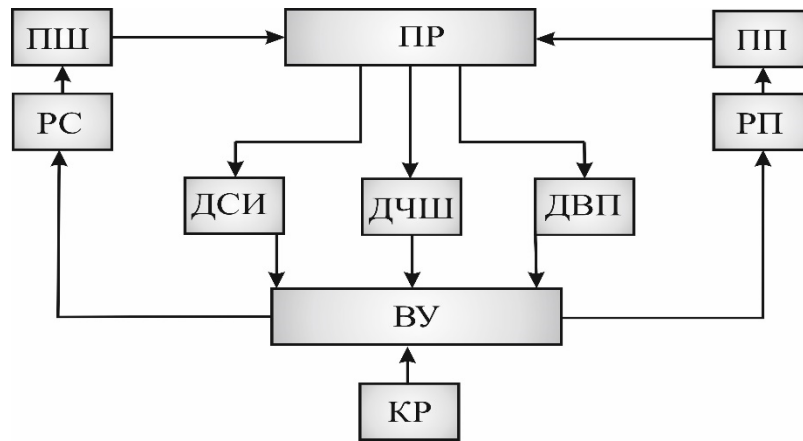


Рисунок 1.14 – Функциональная схема системы экстремального регулирования токарного станка

Система управления содержит датчики рабочей информации ДСИ, ДЧШ. Датчик ДСИ контролирует стойкость режущего инструмента путем измерения температуры в зоне резания или радиального усилия резания. Датчик ДЧШ контролирует угловую скорость привода шпинделя, а датчик ДВП – скорость привода перемещения стола станка. Вычислительное устройство ВУ помимо сигналов датчиков ДСИ, ДЧШ и ДВП получает сигнал от корректора расчета КР.

В рассмотренной САУ напряжение, вырабатываемое вычислительным устройством, пропорционально показателю оптимальности работы станка. Оно обладает экстремумом относительно скорости резания и подается на регулятор скорости и регулятор подачи. Командные сигналы управляют двигателями приводов главного движения ПШ и подач ПП станка.

В 60-70-х годах XX века появились разработки САУ, работающие на основе беспойсковых методов управления [125]. Измеряя текущее значение силы резания или мощности двигателя привода главного движения, производят ее стабилизацию изменением минутной подачи или аналогичным образом корректируют значение управляющего параметра согласно экономическим критериям. При этом используют какую-либо из обобщенных эмпирических зависимостей, связывающих один из основных выходных параметров процесса резания – стойкость инструмента с первичными параметрами, в первую очередь со скоростью резания, подачей, глубиной резания.

В настоящее время алгоритмы оптимизации достаточно легко реализуются при управлении станками как при прямом управлении (DNC) так и в станках с малой ЭВМ (CNC). С помощью таких систем осуществляется регулирование (подачи и скорости резания и т.д.) для обеспечения оптимальных условий обработки по граничным циклам.

При оптимизации по регулярному алгоритму изменения входных устанавливаемых заранее величин, которые проявляют себя через изменения характеристик процесса и выражаются в количественном изменении математической модели, не только фиксируются по изменениям выходных величин, но тотчас после появления их воздействия, выходные показатели процесса компенсируются изменением регулируемых входных величин. Своевременная количественная оценка характеристик процесса осуществляется по сигналам процесса резания.

Примером осуществления указанного принципа регулирования может служить САУ процессом шлифования (рис. 1.15) [114].

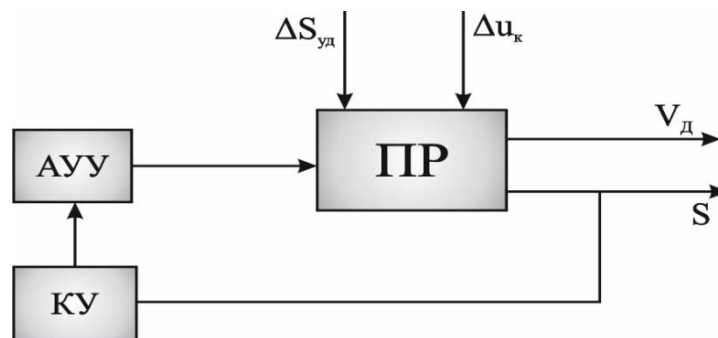


Рисунок 1.15 – Блок-схема САУ

Указанная САУ содержит автоматическое управляющее устройство (АУУ) и командное устройство (КУ). Первое обеспечивает задание требуемых уровней скоростей перемещения суппорта V_d , второе – включение, перемещение или отключение суппорта станка при заранее измеренных значениях припусков S_i .

Как видно из рисунка, система имеет обратную связь по положению суппорта. Перемещение суппорта измеряется индуктивным датчиком. В результате воздействия на процесс возмущений в виде износа инструмента Δu_k и упругих деформаций $\Delta S_{y.d}$ происходит существенный разброс показателей качества обра-

батываемых деталей.

Поскольку уровни возмущающих воздействий находятся в прямой зависимости от регулируемого параметра V_D , то при рассмотренных алгоритмах управления с помощью САУ, не могут быть одновременно получены заданные качественные показатели обработки и высокая производительность формообразования. При использовании рассмотренной САУ, высокое качество обработки обеспечивается за счет уменьшения интенсивности съема металла, т.е. за счет увеличения машинного времени обработки.

Михелькевич В.Н. [72] предложил способ устранения указанного недостатка за счет перестройки параметров цикла при вариациях постоянной времени процесса T_C

$$T_C = \frac{1}{j \times K_{PEЖ}},$$

величина которой определяется механической жесткостью технологической системы j и коэффициентом режущей способности инструмента $K_{PEЖ}$. Его характеризуют следующие параметры: начальная скорость съема припуска V_{d1} , конечная скорость съема припуска V_{d2} , начальный припуск s_h , припуск на чистовое точение s_k . Предельные значения параметров алгоритма управления ограничиваются зоной появления дефектов, а также зоной предельных упругих деформаций.

Автоматическая перестройка параметров цикла может быть осуществлена с помощью САУ, блок-схема которой представлена на рисунке 1.16.

В отличие от системы, приведенной на рисунке 1.15, здесь имеется датчик постоянной времени станка ДПВ, который осуществляет ее контроль; контроль текущего припуска S производится, с помощью датчика припуска (ДП). Сигналы с датчиков поступают на устройство самонастройки и формирования программы УСФП в виде сигнала электрического напряжения и через электронный преобразователь (ЭП) и механизм поперечных подач (МПП) в технологической системе (ТС) корректируется радиальная подача станка.

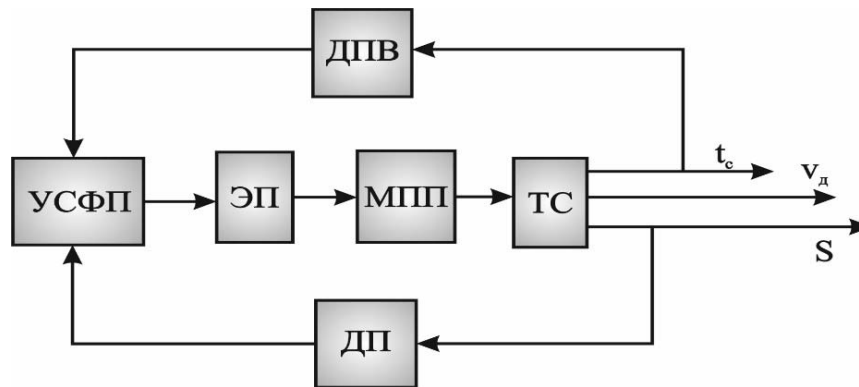


Рисунок 1.16 – Функциональная схема САУ, с автоматической перестройкой параметров цикла

В данной системе присутствует дополнительная обратная связь по фактической величине постоянной времени. Недостатком системы является погрешность измерения постоянной времени t_c , которая оказывает косвенное влияние на скорость съема материала v_d .

Известны системы с обратной связью, осуществляющие рабочий цикл резания с учетом мощности, затрачиваемой на обработку [114]. Система для реализации циклов такого типа сравнительно проста, однако стабилизация мощности шлифования при колебаниях режущего инструмента сопровождается изменением площади поверхности контакта между лезвием резца и обрабатываемой деталью, что приводит к изменению теплофизических параметров процесса. В экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков (ЭНИМС) разработана САУ для процесса обработки деталей типа ступенчатых валов.

УЧПУ производит два типа расчетов: определение технологических параметров процесса на основе текущей информации и прогнозирование величин этих параметров, что позволяет одновременно осуществить числовое программное управление станком. Такая система относится к классу систем, работающих по отклонению. К числу недостатков данного способа следует отнести погрешности, возникающие при экстраполировании сигналов и прогнозировании технологических параметров процессов. Достоинством вышерассмотренных систем, является их простота и быстрая реакция на возмущения.

Анализ рассмотренных систем управления процессами механической обработки показал, что для реализации рассмотренных структур требуются значительные изменения в существующих системах программного управления станками.

Попытки использовать замкнутые системы с приборами активного контроля, для компенсации воздействия возмущений не привели к положительному результату, вследствие отсутствия адекватных моделей протекающих процессов, моделей возмущений ТС, комплекса средств и методов диагностики, недоступности ряда параметров непосредственному измерению и контролю [26].

Решение задачи оценки неизменяемых параметров может быть обеспечено использованием подхода, основанного на применении схем со «стохастическим наблюдателем» [26], где оценка неизменяемых компонентов производится по результатам моделирования динамики технологической системы, с входным сигналом, соответствующим сигналу управления, поступающему на реальный динамический объект – технологическую систему. Для учета влияния статистических свойств текущих отклонений радиусов-векторов шлифовального круга и заготовки, необходимо дополнительно к входному сигналу подавать на вход модели системы случайный процесс с такими же стохастическими характеристиками, как у текущего отклонения радиус-вектора шлифовального круга. Соответствующий случайный входной сигнал может быть получен при помощи формирующего фильтра [26,54].

Принцип получения случайного процесса с заданными параметрами – спектральной характеристикой (корреляционной функцией) иллюстрируется на рисунке 1.17.

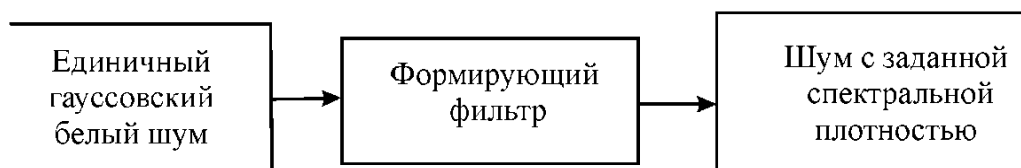


Рисунок 1.17 – Схема получения шума с заданными параметрами с помощью формирующего фильтра

Выходная координата формирующего фильтра по своим статистическим параметрам соответствует параметрам компоненты динамической системы, характеризующей процессы воздействия шлифовального круга на заготовку в процессе шлифования. Для настроек формирующего фильтра используются результаты статистической обработки профилограмм рабочей поверхности шлифовального круга

С учетом вышеизложенного, структура “наблюдателя” имеет вид (рис. 1.18.).

С течением времени, значения переменных и их оценок наблюдателем неизбежно расходятся вследствие, например, отличий действительных значений отклонений радиус-векторов и их моделей.

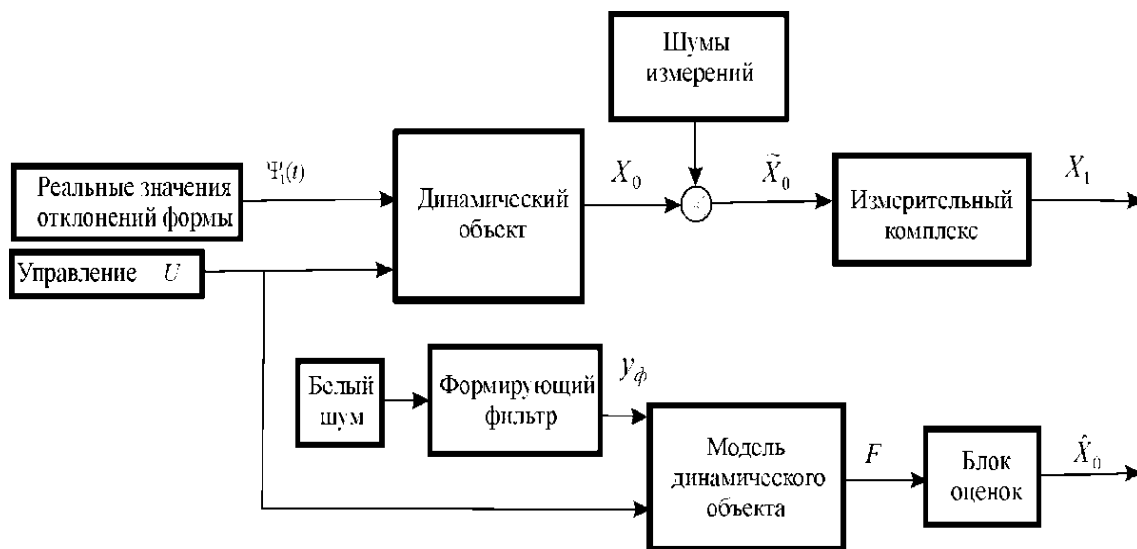


Рисунок 1.18 – Структура динамического наблюдателя

Целесообразно использование блока подстройки состояний наблюдателя в форме фильтра Калмана-Бюсси (рис. 1.19.), который осуществляет необходимую коррекцию входных сигналов, обеспечивая минимально возможное значение среднеквадратического отклонения [26,54].

Полученные оценки имеют наименьшую из возможных дисперсию (при условии гауссовских шумов измерений) и пригодны для использования в системах управления по отклонению. Такая система должна стабилизировать режимы

относительно режимов, задаваемых условиями граничного технологического цикла с минимально допустимыми запасами.

Таким образом, для решения проблемы обеспечения стабильности заданных параметров качества поверхностей при высокопроизводительном чистовом и тонком шлифовании на автоматизированном оборудовании необходимо спроектировать семейство граничных циклов для партии деталей.

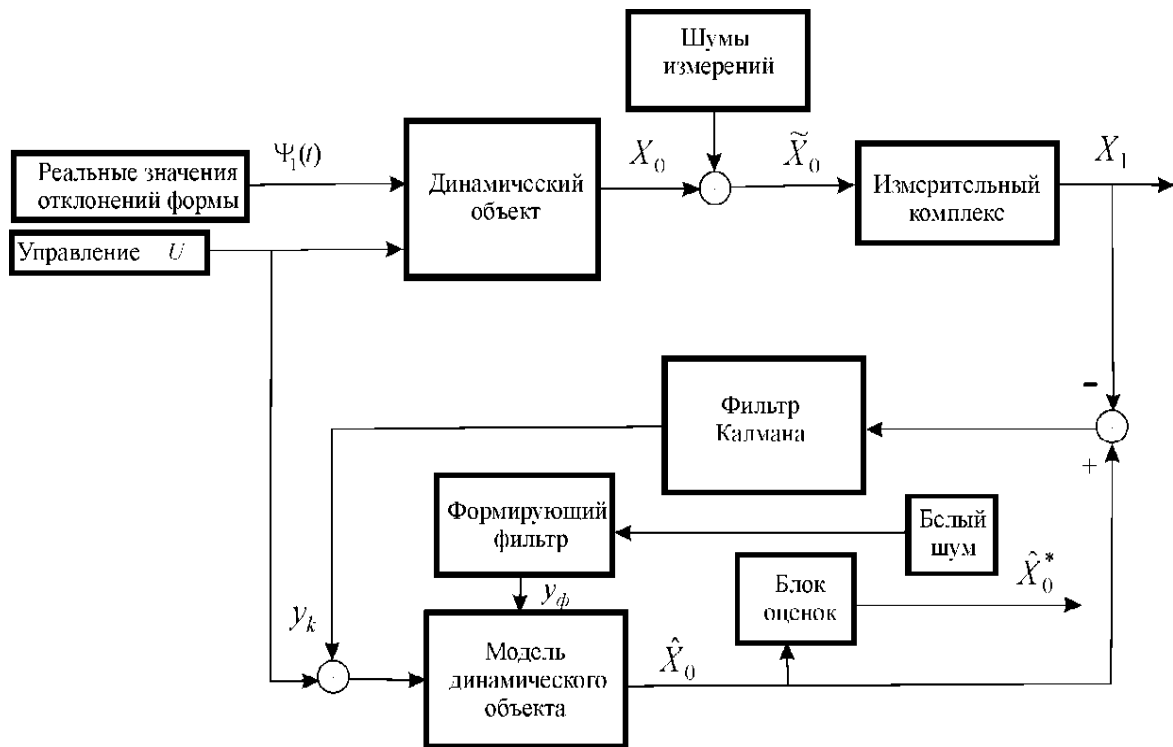


Рисунок 1.19 – Структура динамического наблюдателя для процесса шлифования с фильтром Калмана

Для обеспечения стабильности параметров качества изделий при точении вдоль предельной границы, необходимо стабилизировать параметры расчетного технологического цикла, что возможно осуществить только за счет введения систем с обратной связью, на основе стохастического наблюдения и регулирования, адекватно оценивающих текущее состояние технологической системы и осуществляющих управление процессом оптимальным образом. Для этого необходимо разработать динамическую модель процесса шлифования.

Из вышеизложенного следует, что разработка динамических моделей процессов формообразования поверхностей при обработке деталей абра-

живными инструментами является одной из основных задач на пути совершенствования технологических процессов.

1.4. Анализ динамических моделей процессов круглого шлифования

Исследованиям динамики технологического оборудования и вопросам моделирования динамических воздействий в процессе механической обработки, а также жесткости станков и причинам возникновения вибраций при резании посвящены многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых. Кудиновым В.А. комплексно рассмотрены основные динамические процессы в станках при резании. В работах Вейца В.Л., Каминской В.В., Левиной З.М., Проникова А.С., Пуша В.Э., Решетова Д.Н. и ряда других исследователей – методы расчета статических и динамических характеристик основных подсистем и элементов технологического оборудования.

При построении динамических моделей многими исследователями широко применяется методика расчета демпфирования, которая вследствие полуэмпирического характера расчета затухания не учитывает требований современных динамических подходов. При этом амплитудный расчет вынужденных колебаний также не является достаточно надежным. В отличие от жесткости, демпфирование в материале является нелинейным и зависящем в значительной степени от амплитуды. Оценивая такую нелинейность, используют приближенные зависимости, которые нуждаются в постоянном уточнении и совершенствовании.

В работах Кедрова С.С. [1] анализируются причины возникновения колебаний в отдельных подсистемах металлорежущих станков, приводится оценка влияния их конструкции на устойчивость при резании, а также имеются примеры расчетов демпферов прецизионных и шлифовальных станков. Рассматривая вынужденные колебания в устойчивой системе с одной степенью свободы, на которую действует сила резания, автор показывает, что амплитуда вынужденных резонансных колебаний (рис. 1.20, а) равна:

$$A = \frac{P}{\omega h'},$$

где h' – величина постоянного суммарного демпфирования в системе; P – статическая характеристика процесса резания; ω – изменение припуска ($\omega = \omega_0 \cdot \sin \omega t$, принято по гармоническому закону, где ω_0 – припуск в момент врезания, t – время).

Система, приближаясь к границе устойчивости, сопровождается уменьшением величины постоянного суммарного демпфирования h' и повышением амплитуды A . Под воздействием какого-либо параметра процесса резания на величину суммарного демпфирования или возбуждения (глубина резания, время непрерывной работы, величина износа) амплитуда колебаний нарастает (кривая 1, рис. 1.19, б), убывает и затем нарастает (кривая 2) или убывает (кривая 3).

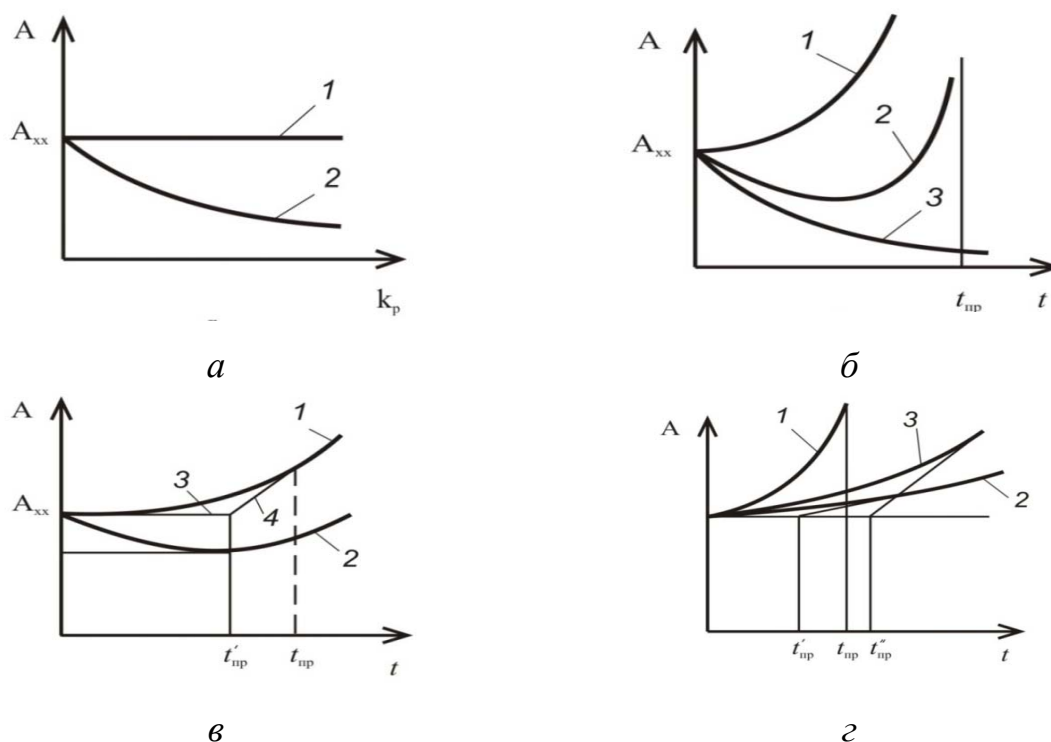


Рисунок 1.20 – Зависимость амплитуды колебаний от параметра процесса шлифования (по данным Кедрова С.С.): а – устойчивая система (k_p – коэффициент резания, $k_p = k_{y\partial} \cdot B$; где $k_{y\partial}$ – удельная сила резания, приходящаяся на единицу площади срезаемого слоя, B – ширина срезаемого слоя, A_{xx} – амплитуда резонансных колебаний на холостом ходу); б – система, теряющая устойчивость при $t = t_{np}$ (t_{np} – предельная глубина резания); в – нелинейная система; г – система с учетом вторичного возбуждения

Системы, характеризующиеся кривыми 1 и 2, теряют устойчивость при значении параметра предельной глубины резания, равном t_{np} . Для шлифовальных станков параметром, который влияет на величину возбуждения или суммарного демпфирования, является время шлифования после правки. Непосредственно после правки режущие свойства круга в течение некоторого времени повышаются, происходит приработка, затем они стабилизируются, и после начинается прогрессирующее затупление.

Экспериментальные зависимости амплитуды колебаний от времени шлифования соответствуют характеру кривых 2 (рис. 1.20, б). Такой процесс актуален для любого из режущих инструментов, однако у шлифовальных кругов из-за специфики процесса и небольшого наклона силы резания к оси Y затупление более радикально влияет на главную составляющую силы резания и величину возбуждения. Поэтому изменение уровня колебаний во времени может служить объективным критерием затупления инструмента.

Износ изменяет динамические составляющие к силе резания, которые становятся особенно заметными при высоких частотах. При попутном шлифовании ослабляются колебания на низких частотах (менее 50 Гц), при встречном – меняются мало, а на средних частотах (200...250 Гц) усиливаются в несколько раз. Резонансные колебания добавляют энергию в технологическую систему, способствуют нарастанию амплитуды колебаний, вызывая появление местных пиков на фоне монотонных зависимостей амплитуды колебаний от режимов резания.

С дальнейшим увеличением режимов шлифования уменьшается амплитуда колебаний. Если жесткость шпинделя изменяется одинаково в плоскости во всех перпендикулярных к его оси направлениях, то его неуравновешенность вызывает круговые колебания. При шлифовании в зоне контакта детали с кругом возникает дополнительное опорное взаимодействие, при этом изменяя форму траектории точек шпинделя. Даже при низких частотах (соответствующих частотам вращения шлифовальных шпинделей) расчет вынужденных колебаний в шлифовальных станках необходимо производить с учетом процесса резания [1].

Для резонансной амплитуды в системе с резанием и нелинейным затуханием выражение представляется в виде 1.1 (табл. 1.2, а).

При устойчивой системе величина демпфирования $h' < 0$, при неустойчивой – $h' > 0$, а при нахождении системы на границе устойчивости – $h' = 0$. При воздействии на систему возмущающей силы при ранее установившихся автоколебаниях, установление амплитуды сопровождается одновременным установлением и сдвигом по фазе между возмущающей силой и перемещением.

Таблица 1.2 а– Динамические модели процессов круглошлифовальной обработки

1.	1.1 – для резонансной амплитуды в системе с резанием и нелинейным затуханием: $A = \frac{1}{2} \left\{ A_0 + \frac{h'}{\left(\frac{\Delta h}{\Delta A}\right)_0} + \sqrt{\left[A_0 + \frac{h'}{\left(\frac{\Delta h}{\Delta A}\right)_0} \right]^2 + \frac{4P_0}{\omega \left(\frac{\Delta h}{\Delta A}\right)_0}} \right\}$
	1.2 – для амплитуды вынужденных колебаний в автоколебательной системе: $A = \frac{A_{авт}}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A_{вын}^2}{A_{авт}^2}} \right)$
	1.3 – при установившихся колебаниях и резании «по следу»: $A = A_0 + \frac{h'}{\left(\frac{\Delta h}{\Delta A}\right)_0} + \frac{2 \sin \frac{\phi}{2}}{\left(\frac{\Delta h}{\Delta A}\right)_0} \sqrt{\frac{k_p^2}{\omega^2} + h_p^2},$
	1.4 – на переходных участках, где колебания не установились и не являются гармоническими: $A = \frac{1}{\left(\frac{\Delta h}{\Delta A}\right)_0} \left(h' + 2 \sin \frac{\omega \tau}{2} \sqrt{\frac{k_p^2}{\omega^2} + h_p^2} \right),$ $A_0 = P_0/k$ – статическое отклонение массы m под действием силы P_0; h' – величина возбуждения (демпфирования); $(\Delta h/\Delta A)_0$ – крутизна характеристики затухания при $A = A_0$; ω – частота собственных колебаний ($\omega = \sqrt{k/m}$) при отсутствии затухания; $A_{авт}$ – амплитуда автоколебаний в отсутствие внешней силы; $A_{вын}$ – добавка к амплитуде, вносимая воздействием внешней силы; ϕ – сдвиг по фазе между колебаниями или следами колебаний для двух смежных проходов или оборотов заготовки; τ – величина запаздывания (при $\omega \tau = \pi$ механизм вторичного возбуждения усиливает колебания, при $\tau = 0$ – не оказывает никакого влияния).

Величина возбуждения непосредственно влияет на время установления амплитуды колебаний. Эта зависимость в области устойчивости характеризуется более пологим графиком с более медленным нарастанием амплитуды, чем в линейной системе. В соответствии с двумя графиками (1 и 2) линейной системы (рис. 1.20, б) выполнены два графика (1 и 2) нелинейной системы (рис. 1.20, в).

Выражение 1.2 (табл. 1.2, а) справедливо для амплитуды вынужденных колебаний в автоколебательной системе. Результатом воздействия на автоколебательную систему возмущения с частотой тех же автоколебаний (рис. 1.20, г) является вторичное возбуждение. В простейшем случае таким возмущающим воздействием может являться гармонически изменяющийся припуск (след вибраций от предыдущего прохода режущего инструмента или оборота заготовки).

Выражения для амплитуды колебаний 1.3 (табл. 1.2, а) получены в результате совместного решения уравнения упругой системы и характеристики резания при установившихся колебаниях и резании «по следу».

Амплитуда колебаний определяется из выражения 1.4 на переходных участках, где колебания не установились и не являются гармоническими, а сдвиг по фазе задан кинематическими соотношениями (табл. 1.2, а).

Степень влияния механизма вторичного возбуждения определяется соотношением между жесткостью упругой системы в зоне резания и коэффициентом резания. При наличии существенной нелинейности в системе (типа зоны нечувствительности или трения без смазки) автоколебания при возбуждении несколько выше граничного уровня могут не возникать. Имеется зона нечувствительности системы, которая преодолевается внешним импульсом при возникновении автоколебания (жесткого возбуждения).

Такое явление может вызывать разброс граничных значений предельной стружки, когда не обеспечивается стабильность уровня внешних воздействий. Однако даже вышеприведенный подробный анализ колебательных процессов не дает полной картины при работе шлифовального станка в условиях плавучей мастерской, когда воздействие внешней среды (морского волнения) на технологическую систему станка посредством вибраций через плавучее основание, а также

вибраций от другого оборудования является весьма значимым и существенным фактором.

В работах Михелькевича В.Н. [91], рассмотрена математическая модель процесса врезного шлифования как объекта управления. Она отражает взаимосвязь сил резания и регулирующих воздействий, учитывая влияние процесса резания, износа шлифовального круга, упругой технологической системы, а также «следов» обработки на динамику процесса шлифования. В полученной упрощенной физической модели 2 для процесса врезного шлифования (табл. 1.2, б) путь поперечного суппорта S_c распределен на съём припуска S_δ , компенсацию линейного износа шлифовального круга $S_{ик}$ и компенсацию упругих деформаций системы $S_{уд}$:

$$S_c = S_D + S_{ик} \pm S_{уд}.$$

Уравнение движения объекта 2.1 получено в результате дифференцирования данного выражения по времени, также автор представил передаточную функцию объекта 2.2 (табл. 1.2,б). Однако возможности влияний на упругую технологическую систему вибрационных воздействий от внешних источников данная модель не учитывает.

Прилуцкий В.А. [109] технологическую систему круглошлифовального станка заменяет эквивалентной трехмассовой системой (табл. 1.2, б). Составленное уравнение Лагранжа второго рода для координат y_1, y_2, y_3 принятого механического аналога (табл. 1.2, в) после преобразований позволяет получить уравнения вынужденных поперечных горизонтальных колебаний 3.1 (табл. 1.2, в). После необходимых преобразований удастся получить функцию динамической точности $Y(t)$.

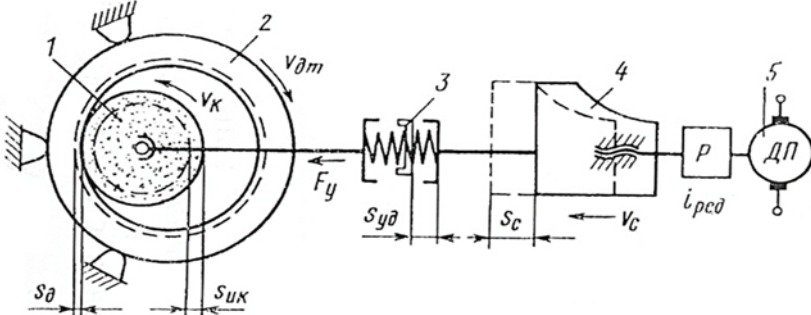
Она характеризует траекторию движения и относительные колебания инструмента и детали, а также регламентирует волнистость поверхности детали 3.2 (табл. 1.2, в).

Однако и такие модели не предусматривают возможных колебаний технологической системы от таких внешних воздействий, как соседнее работающее оборудование и морское волнение.

Процесс точного врезного шлифования цилиндрических поверхностей рассматривается Я. Буреком [2] на основе низкочастотной модели 4.1 (табл. 1.2, з), которая описывает такие основные динамические явления, как упругие деформации системы, наличие нормальной силы шлифования, съема припуска на обработку, а также радиального износа шлифовального круга.

Для анализа возникающих в динамической системе станка высокочастотных стохастических колебаний автор проводит разделение его упругой системы на ряд подсистем 4.2 (табл. 1.2, з).

Таблица 1.2б

2	 1 – шлифовальный круг; 2 – деталь; 3 – упругая система; 4 – поперечный суппорт; 5 – привод подачи; v_c – скорость перемещения суппорта поперечной подачи;
	2.1 – уравнение движения объекта: $v_c = v_d + v_{uk} \pm v_{yd},$ 2.2 – передаточная функция объекта: $\omega_c(p) = \frac{v_d(p)}{v_c(p)} = \frac{1}{1 + a_2 + a_3 p},$ v_d – скорость съема металла; v_{uk} – скорость износа шлифовального круга; v_{yd} – скорость изменения упругих деформаций системы; $v_d(p)$ и $v_c(p)$ – изображения входной и выходной переменных объекта; a_2 и a_3 – постоянные коэффициенты, определяемые параметрами объекта.

Подсистемы позволяют учитывать следующие воздействия: от поперечных высокочастотных колебаний шпинделя (1); от крутильных колебаний шпинделя (2); от движения шлифовальной бабки (3); от поперечных колебаний (4) и крутильных колебаний (5) заготовки; от крутильных колебаний промежуточного вала привода вращения заготовки (6).

Для каждой из степеней свободы составлены уравнения динамики, которые учитывают воздействие на каждую изолированную массу упругой системы всех сил.

Таблица 1.2 в

3 3.1 – уравнения вынужденных поперечных горизонтальных колебаний:

$$\begin{cases} \ddot{y}_1 + \left(\frac{k_1}{M_1} + \frac{k_1}{M_2} \right) y_1 - \frac{k_2}{M_2} y_2 - \frac{f_{ш}}{M_2} \dot{y}_2 + \frac{k_c}{M_2} y_3 = -H_1 \cos v_1 t - H_2 \cos v_2 t; \\ \ddot{y}_2 + \frac{k_2}{M_2} y_2 + \frac{f_{ш}}{M_2} \dot{y}_2 - \frac{k_1}{M_2} y_1 - \frac{k_c}{M_2} y_3 = -H_2 \cos v_2 t; \\ \ddot{y}_3 + \frac{k_3}{M_3} y_3 - \frac{k_c}{M_3} y_2 = -H_3 \cos v_3 t. \end{cases}$$

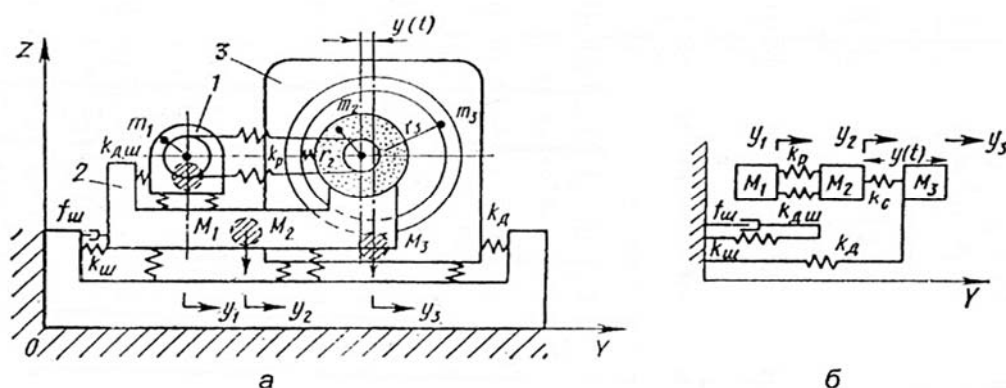


Рисунок 3.1

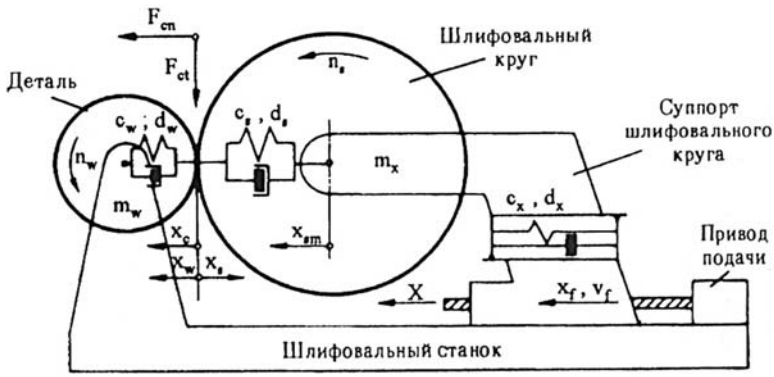
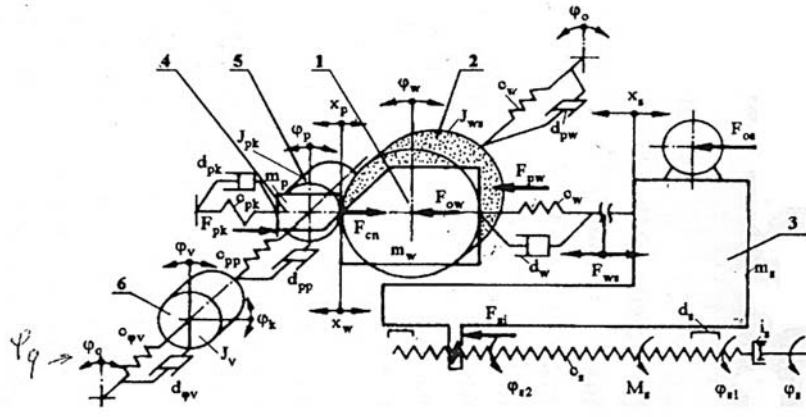
3.2 – функция динамической точности $Y(t)$, характеризующая траекторию движения и относительные колебания шлифовального круга и детали, регламентирующая волнистость поверхности детали:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^{i=3} \frac{1}{\omega_i} \exp(-h_i t) \alpha(\omega_i) \sin[\omega_i t + \phi(\omega_i)] - \sum_{i=1}^{i=3} \frac{C_i v^2}{M_1 M_2 M_3} \alpha(v_i) \cos[v_i t + \phi(v_i)],$$

1 – приведенная масса M_1 системы электродвигателя в приводе шлифовального круга; 2 – масса M_2 системы шлифовального круга; 3 – масса M_3 системы детали; центробежные силы, вызванные неуравновешенностью: $C_1 = m_1 r_1$ – ротора электродвигателя шлифовального круга; $C_2 = m_2 r_2$ – шлифовального круга и шпиндельного комплекта; $C_3 = m_3 r_3$ – шпиндельного комплекта, патрона и детали; $k_1 = k_{д.ш.} + k_{р.п.}$; $k_2 = k_{ш} + k_c$; $k_3 = k_d + k_c$; $i = 1, 2, 3$; $k_{д.ш.}$, $k_{ш}$, k_d – соответственно коэффициенты жесткости установки двигателя шлифовального круга, системы шлифовального круга, системы детали; k_c – коэффициент жесткости контакта шлифовального круга и детали; $k_{р.п.}$ – коэффициент жесткости ременной передачи; $f_{ш}$ – коэффициент сопротивления; v_1, v_2, v_3 – соответственно частоты вращения электродвигателей шлифовального круга и детали; h_i – коэффициенты затухания.

При этом проекция на направление движения шпиндельной бабки сил инерции показана в виде уравнения 4.3 (таблица 1.2, з). Автор исследовал также влияние на процесс радиального изнашивания шлифовального круга величины регулируемой нормальной силы шлифования, а также на объемную производительность и основное время шлифования, шероховатость поверхности детали при обработке кругами с различными характеристиками.

Таблица 1.2 з

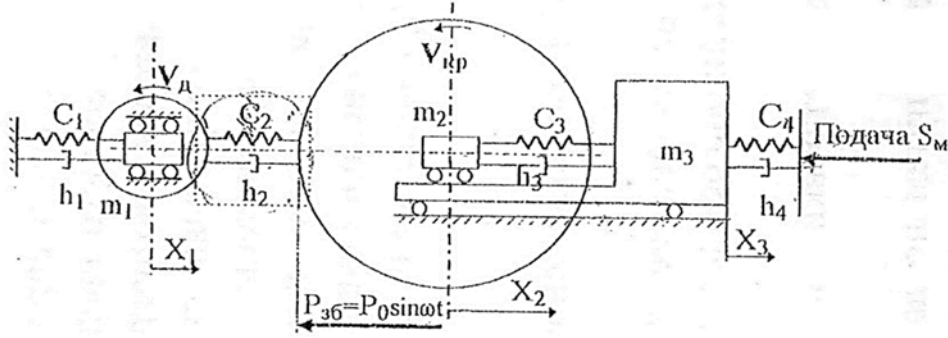
4	4.1 – низкочастотная модель процесса:  x_c – упругие деформации системы; F_{cn} – нормальная сила шлифования; x_w – съем припуска на обработку, x_s – радиальный износ круга; x_f и v_f – величина и скорость поперечной подачи; m_x – масса шпинделя круга; c_x и d_x – упруго-деформирующие элементы; x_{cm} – смещение середины круга; d_s и d_w – диаметры круга и детали;
	4.2 – высокочастотная динамическая модель системы:  4.3 – проекция сил инерции на направление движения шпиндельной бабки: $\Phi_{\omega\omega} = \mu_{\omega\omega} \omega_{\omega\omega}^2 (\varepsilon_0 + \varepsilon_{\omega}) \sigma \nu \varphi_{\omega\omega} + 2\mu_{\omega\omega} \varepsilon_{\omega} \omega_{\omega\omega} \sigma \nu \varphi_{\omega\omega} \dot{\varphi}_{\omega\omega} + \mu_{\omega\omega} \varepsilon_{\omega} \omega_{\omega\omega}^2 \sigma \nu \varphi_{\omega\omega} \ddot{\varphi}_{\omega\omega},$ F_{cn}, F_{ct} – нормальная и касательная силы шлифования; x_c – полная упругая деформация системы; c_w – параметры базирующих элементов; n_s и n_w – частоты вращения круга и детали; x_w – съем металла; x_s – радиальный износ круга; e_0, e_w – значения эксцентриситета масс шпинделя и биения в подшипниках; m_w, φ_w, ω_w – соответственно масса, угол поворота и угловая скорость шпинделя

Исследования динамики круглошлифовальных станков авторами Кудиновым В.А., Лурье Г.Б., Тодоровым М.Т., Якимовым А.В. [76,77,146] показали, что наибольшее влияние на динамику процесса оказывают колебания, вызванные дисбалансом шлифовального круга, в особенности это характерно для шлифовальных кругов большого диаметра.

Установлена также зависимость шероховатости поверхности детали от амплитуды относительных колебаний и частоты вынужденных колебаний, выявлена связь между динамическими параметрами процесса шлифования и волнистостью поверхности обработанной детали.

В работе Ушакова А.М. [29] учтено в трехмассовой динамической модели круглого врезного шлифования 5.1 (таблица 1.2, д) влияние контактной жесткости (между шлифовальным кругом и обрабатываемой деталью).

Таблица 1.2 д

5	5.1 – трехмассовая динамическая модель круглого врезного шлифования: $\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + (h_1 + h_2) \dot{x}_1 - h_2 \dot{x}_2 + (c_1 + c_2) x_1 - c_2 x_2 = 0; \\ m_2 \ddot{x}_2 - h_2 \dot{x}_1 + (h_2 + h_3) \dot{x}_2 - h_3 \dot{x}_3 - c_2 x_1 + (c_2 + c_3) x_2 - c_3 x_3 = P_0 \sin \omega t; \\ m_3 \ddot{x}_3 - h_3 \dot{x}_2 + (h_3 + h_4) \dot{x}_3 - c_3 x_2 + (c_3 + c_4) x_3 = 0. \end{cases}$  m_1, m_2, m_3 – приведенные массы соответственно детали, круга и шлифовальной бабки; c_1, c_2, c_3, c_4 – соответственно жесткость системы «деталь», контактная жесткость между деталью и кругом, подшипников скольжения в опорах круга, механизма поперечных подач; h_1, h_2, h_3, h_4 – демпфирование (вязкое трение) в перечисленных элементах; $P_{36} = P_0 \sin \omega t$ – возмущающая сила из-за неуравновешенности шлифовального круга.
---	--

На базе данной модели получен технологический алгоритм определения уровней относительных колебаний для адаптивных систем управления круглошлифовальных станков.

Исследования Новоселова Ю.К. и Братана С.М. (см. 6.1–6.5, таблица 1.2, е) [14-29] посвящены разработкам моделей круглого наружного шлифования, представляющих совокупность дифференциальных уравнений и учитывающих динамику перемещений центров круга, заготовки и изменения фактической глубины резания. В них для настроек формирующего фильтра используется схема «динамического наблюдателя», построенная на основе результатов статистической обработки профилограмм рабочей поверхности шлифовального круга. Значения переменных и их оценок наблюдателем со временем неизбежно получают расхождения по причине различий в действительных значениях отклонений радиус-векторов и их моделей. В этой связи рациональным будет использование блока подстройки состояний наблюдателя в виде фильтра Калмана-Бюсси. Он позволяет скорректировать входные сигналы для обеспечения минимально возможной величины среднеквадратического отклонения. Такой метод снижает влияние шумов измерения, а также шумов вычислительных процедур соответствующих оценок 6.6 (таблица 1.2, е). Метод целесообразно применять при процедурах стохастического наблюдения и фильтрации [26].

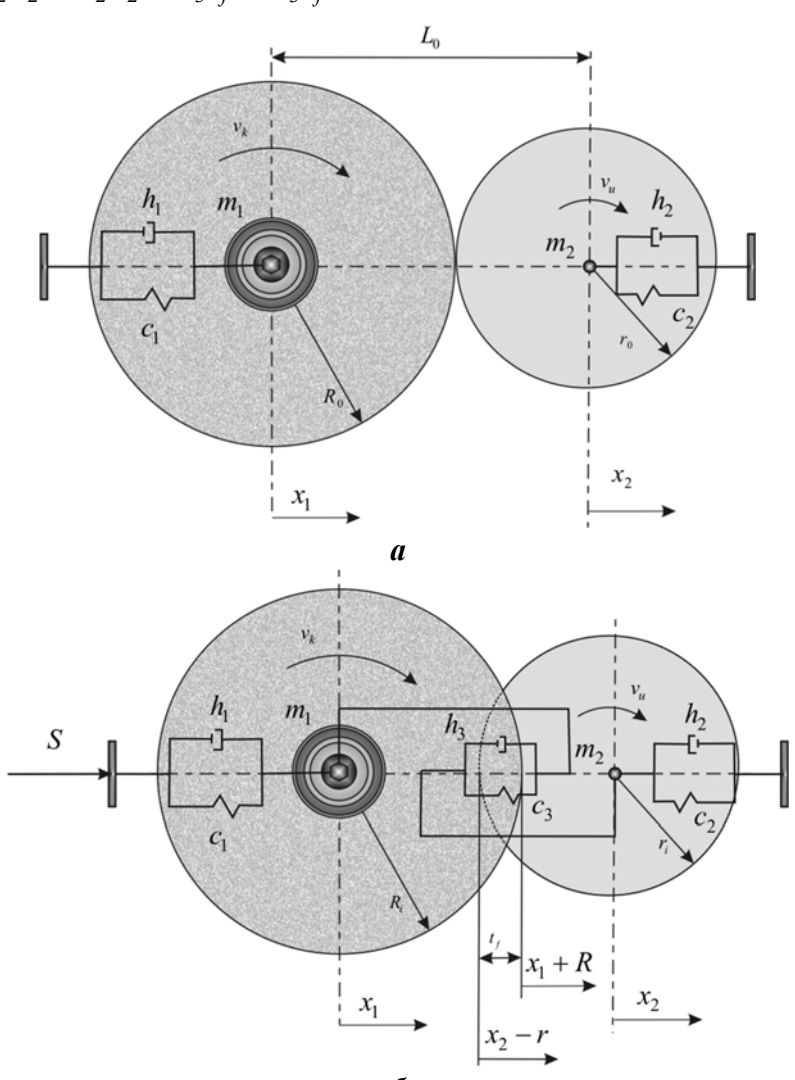
Следует отметить, что обеспечение требуемых параметров качества обрабатываемых поверхностей на шлифовальных станках, работающих в плавающих мастерских, можно осуществить лишь на основе получения новых динамических моделей и оценок с разработкой автоматической системы [11; 12; 13], стабилизирующей параметры технологической системы и учитывающей воздействия внешней среды (волнения водной поверхности) на плавучее основание.

Подсистемы позволяют учитывать следующие воздействия: от поперечных высокочастотных колебаний шпинделя (1); от крутильных колебаний шпинделя (2); от движения шлифовальной бабки (3); от поперечных колебаний (4) и крутильных колебаний (5) заготовки; от крутильных колебаний промежуточного вала привода вращения заготовки (6). Для каждой из степеней свободы составлены

уравнения динамики, которые учитывают воздействие на каждую изолированную массу упругой системы всех сил.

При этом проекция на направление движения шпиндельной бабки сил инерции показана в виде уравнения 4.3 (таблица 1.2, в). Автор исследовал также влияние на процесс радиального изнашивания шлифовального круга величины регулируемой нормальной силы шлифования, а также на объемную производительность и основное время шлифования, шероховатость поверхности детали при обработке кругами с различными характеристиками.

Таблица 1.2 е

6	6.1 – модель в виде совокупности дифференциальных уравнений, характеризующих динамику перемещений центров круга, заготовки и изменения фактической глубины резания в процессе круглого наружного шлифования: $\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 + h_3 \dot{t}_f + c_3 t_f - h_1 \dot{S} - c_1 S = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2 x_2 - h_3 \dot{t}_f - c_3 t_f = 0, \end{cases}$  а б
---	---

6.2 – с учетом $t_f = R + r - L$

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1(\dot{x}_1 - \dot{S}) + h_3(\dot{R} + \dot{r} - \dot{x}_2 + \dot{x}_1) + \\ + c_1(x_1 - S) + c_3(R_0 + \Delta R + r_0 + \Delta r - L_0 - x_2 + x_1) = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2 x_2 - h_3(\dot{R} + \dot{r} - \dot{x}_2 + \dot{x}_1) - \\ - c_3(R_0 + \Delta R + r_0 + \Delta r - L_0 - x_2 + x_1) = 0 \end{cases}$$

6.3 – для исходного положения заготовки (а) в момент начала ее контакта с инструментом $L_0 = R_0 + r_0$; $S_0 = 0$; $x_{10} = 0$; $x_{20} = 0$; $t_f = 0$

система уравнений в отклонениях запишется:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 + h_3(\dot{x}_1 + \dot{R}) + c_3(x_1 + \Delta R) - \\ - h_3(\dot{x}_2 - \dot{r}) - c_3(x_2 - \Delta r) - h_1 \dot{S} - c_1 S = 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2 x_2 + h_3(\dot{x}_2 - \dot{r}) + c_3(x_2 - \Delta r) - \\ - h_3(\dot{x}_1 + \dot{R}) - c_3(x_1 + \Delta R) = 0. \end{cases}$$

6.4 – систему целесообразно привести к форме:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1} [-(h_1 + h_3)\dot{x}_1 - (c_1 + c_3)x_1 + h_3\dot{x}_2 + c_3x_2] - \\ - \frac{1}{m_1} [h_3(\dot{R} + \dot{r}) + c_3(\Delta R + \Delta r)] + \frac{1}{m_1} [h_1\dot{S} + c_1S], \\ \ddot{x}_2 = \frac{1}{m_2} [-(h_2 + h_3)\dot{x}_2 - (c_2 + c_3)x_2 + h_3\dot{x}_1 + c_3x_1] + \\ + \frac{1}{m_2} [h_3(\dot{R} + \dot{r}) + c_3(\Delta R + \Delta r)], \end{cases}$$

6.5 – с обозначениями: $y_1 = x_1$, $y_2 = \dot{y}_1 = \dot{x}_1$, $y_3 = x_2$, $y_4 = \dot{y}_3 = \dot{x}_2$

система приведена к нормальной форме Коши:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2, \\ \dot{y}_2 = -\frac{1}{m_1} [(c_1 + c_3)y_1 + (h_1 + h_3)y_2 - c_3y_3 - h_3y_4] - \\ - \frac{1}{m_1} [c_3(\Delta R + \Delta r) + h_3(\dot{R} + \dot{r})] + \frac{1}{m_1} [h_1\dot{S} + c_1S], \\ \dot{y}_3 = y_4, \\ \dot{y}_4 = -\frac{1}{m_2} [(c_2 + c_3)y_3 + (h_2 + h_3)y_4 - c_3y_1 - h_3y_2] + \\ + \frac{1}{m_2} [c_3(\Delta R + \Delta r) + h_3(\dot{R} + \dot{r})], \end{cases}$$

6.6 – и записана в матричном виде:

$$\dot{Y}_0 = A_0 \cdot Y_0 + B_0 \cdot \Psi + C_0 \cdot U$$

m_1, m_2 – приведенные массы соответственно заготовки с центрами и круга со шпинделем; h_i – коэффициент сопротивления i – го звена; c_i – коэффициент жесткости i – го звена; x_1 и x_2 – координаты центров вращения круга и заготовки соответственно; S – путь, пройденный механизмом подачи за время t ; t_f – фактическая глубина резания; $R = R_0 + \Delta R$ – текущий радиус-вектор поверхности круга с учетом его износа и отклонений формы ΔR ; $r = r_0 + \Delta r$ – текущий радиус-вектор заготовки с учетом съема материала и откло-

	нений формы Δr ; $L = L_0 + \Delta L = L_0 + x_2 - x_1$ – текущее расстояние между центрами вращения круга и детали; Y_0 – вектор (матрица-столбец), представляющая вектор состояния системы; $\dot{Y}_0$ – вектор производных состояний системы; A_0 – матрица, характеризующая динамические свойства системы; B_0 – матрица параметров влияния отклонений формы детали и круга; Ψ – вектор состояний отклонений формы детали и круга от номинальных параметров; C_0 – матрица управления процессом; U – вектор управляющих воздействий, связанный с поперечной подачей.
--	--

Исследования динамики круглошлифовальных станков авторами Кудиновым В.А., Лурье Г.Б., Тодоровым М.Т., Якимовым А.В. показали, что наибольшее влияние на динамику процесса оказывают колебания, вызванные дисбалансом шлифовального круга, в особенности это характерно для шлифовальных кругов большого диаметра. Установлена также зависимость шероховатости поверхности детали от амплитуды относительных колебаний и частоты вынужденных колебаний, выявлена связь между динамическими параметрами процесса шлифования и волнистостью поверхности обработанной детали.

В работе Ушакова А.М. [26] учтено в трехмассовой динамической модели круглого врезного шлифования 5.1 (таблица 1.2, *д*) влияние контактной жесткости (между шлифовальным кругом и обрабатываемой деталью). На базе данной модели получен технологический алгоритм определения уровней относительных колебаний для адаптивных систем управления круглошлифовальных станков.

Исследования Новоселова Ю.К. и Братана С.М. (см. 6.1–6.5, таблица 1.2, *е*) [6; 7; 8] посвящены разработкам моделей круглого наружного шлифования, представляющих совокупность дифференциальных уравнений и учитывающих динамику перемещений центров круга, заготовки и изменения фактической глубины резания. В них для настроек формирующего фильтра используется схема «динамического наблюдателя», построенная на основе результатов статистической обработки профилограмм рабочей поверхности шлифовального круга. Значения переменных и их оценок наблюдателем со временем неизбежно получают расхождения по причине различий в действительных значениях отклонений радиус-векторов и их моделей. В этой связи рациональным будет использование блока подстройки состояний наблюдателя в виде фильтра Калмана-Бюсси. Он

позволяет скорректировать входные сигналы для обеспечения минимально возможной величины среднеквадратического отклонения. Такой метод снижает влияние шумов измерения, а также шумов вычислительных процедур соответствующих оценок 6.6 (таблица 1.2, *e*). Метод целесообразно применять при процедурах стохастического наблюдения и фильтрации [9; 10]. Следует отметить, что обеспечение требуемых параметров качества обрабатываемых поверхностей на шлифовальных станках, работающих в плавучих мастерских, можно осуществить лишь на основе получения новых динамических моделей и оценок с разработкой автоматической системы [11; 12; 13], стабилизирующей параметры технологической системы и учитывающей воздействия внешней среды (волнения водной поверхности) на плавучее основание.

Анализ рассмотренных работ исследователей показывает, что в большинстве своем разработанные динамические модели технологических систем, в частности, для шлифования, обеспечили возможность определения оптимальных режимов и свойств. При этом следует отметить, что, анализируя возможные пути снижения колебаний инструмента и детали, повышения жесткости системы, изменения схемы или способа обработки, авторы практически не рассматривают механизмы внешних возмущающих воздействий на станок. Такие воздействия неизбежно происходят от соседнего оборудования, в условиях плавучей мастерской являющегося основой участков механообработки, а также через корпус и поверхность палубы с размещенными на ней станками – в виде дополнительных вибраций от внешней среды (например, морского волнения). В дальнейших разработках следует учесть необходимость применения высокоточных станков с ЧПУ, оснащенных системами адаптивного управления, построенных на основе оптимальных моделей со стохастическим регулятором процесса.

1.5. Выводы и задачи исследований по главе 1

1. Существующие технологические процессы обработки тел вращения на тяжелых станках несовершенны и требуют доработки. Несмотря на положительные эффекты новых способов получения заготовок до сих пор не ликвидированы

недостатки, связанные с технологической наследственностью технологического процесса – наличием существенного остаточного эксцентриситета заготовки после черновой обработки и связанные с этим вопросы установки и выверки детали для выполнения финишных операций.

2. Современные станки отличаются повышенной жесткостью, надежностью, высокой производительностью и точностью, однако известные конструкции регуляторов с обратной связью по давлению и расходу смазочного материала требуют доработки, позволяющей компенсировать инерционность существующих систем питания шпиндельных узлов.

3. Для повышения эффективности процессов чистового шлифования необходимо составить модель и разработать методику построения граничных циклов – оптимальную управляющую программу.

4. Для обеспечения стабильности выходных показателей качества при работе по оптимальному управляющему циклу необходимо использовать системы адаптивного управления.

5. Существующие замкнутые системы, с приборами активного контроля, не позволяют компенсировать отрицательного влияния возмущений, вследствие отсутствия адекватных моделей протекающих процессов, моделей возмущений технологических систем, комплекса средств и методов диагностики, недоступности ряда параметров непосредственному измерению и контролю.

6. Обеспечение стабильности качества изделий при точении вдоль предельной границы при отработке управляющей программы, возможно за счет стабилизации расчетного технологического цикла путем применения САУ, адекватно оценивающих вектор параметров состояния технологической системы.

ГЛАВА 2

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССА КРУГЛОГО НАРУЖНОГО ШЛИФОВАНИЯ ШЕЕК ВАЛОВ СУДОВЫХ ВАЛОПРОВОДОВ

2.1. Обеспечение стабильности обработки поверхностей на операциях круглого наружного шлифования с позиций системного анализа

При моделировании технологических процессов обработки изделий широкое распространение в машиностроении получил метод системного анализа. На основе вскрытия внутренней структуры технологической системы, разбиения ее на элементы, осуществляется моделирование процессов и операций, позволяющее учесть большое количество воздействующих на объект факторов, то есть построить адекватную модель технологической операции, удовлетворяющую заданным потребителем требованиям. Такой подход может быть использован при разработке моделей операции круглого наружного шлифования, являющейся сложным стохастическим объектом. Системный подход позволяет рассматривать технологическую операцию как нестационарную динамическую систему, состоящую из взаимосвязанных между собой объектов, которые также состоят из множества элементов, взаимодействующих между собой, но вместе с тем обладающую свойством целостности. В процессе анализа система разбивается на подсистемы, исследуется их поведение, строятся математические модели отдельных элементов, после чего осуществляется синтез системы [94].

Разбиение системы на подсистемы получило название – декомпозиция. Для осуществления декомпозиции технологической системы на элементы необходимы критерии, на основе которых осуществляется выбор варианта разбиения. В качестве таких критериев могут выступать цели моделирования, возможность математического описания и другие.

В настоящее время отсутствует приемлемая для данного объекта исследований методика декомпозиции подсистемы, что связано с субъективностью самой процедуры и целей моделирования [3].

Для описания каждой из подсистем процесса круглого наружного шлифования необходимо задаться видом зависимостей перехода и функций входов. Зависимости перехода системы должны отображать воздействие входных факторов и параметров текущего состояния технологической системы во множество состояний системы, которые она может принимать в различные моменты времени, то есть состояние ТС в текущий момент времени τ зависит от входных факторов и параметров ее пространства состояния в предшествующий момент времени $\tau - \Delta\tau$:

$$S(\tau) = F[S(\tau - \Delta\tau), X(\tau)],$$

где $X(\tau)$ – тензор входных переменных системы; $S(\tau - \Delta\tau)$ – тензор параметров состояния системы; F – оператор отображения входов.

Функционалы выходных воздействий отображают воздействие входных факторов во множество выходных сигналов:

$$Y(\tau) = \Phi[S(\tau - \Delta\tau), X(\tau)],$$

где $Y(\tau)$ – тензор выходных переменных системы; Φ – оператор отображения выходов.

Используя системный подход, проведем декомпозицию воздействий на технологический процесс со стороны внешней среды (рис. 2.1) 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.

На основании выполненных рассуждений можно записать следующее:

$$|y_k(\tau_0) - y_k(\tau)| \leq \varepsilon_k \text{ при } \tau \in (\tau_0; \tau_f),$$

где ε_k – предельно-допустимое значение k -го показателя качества; $(\tau_0; \tau_f)$ – интервал времени, в течение которого обеспечиваются заданные значения показателей качества.

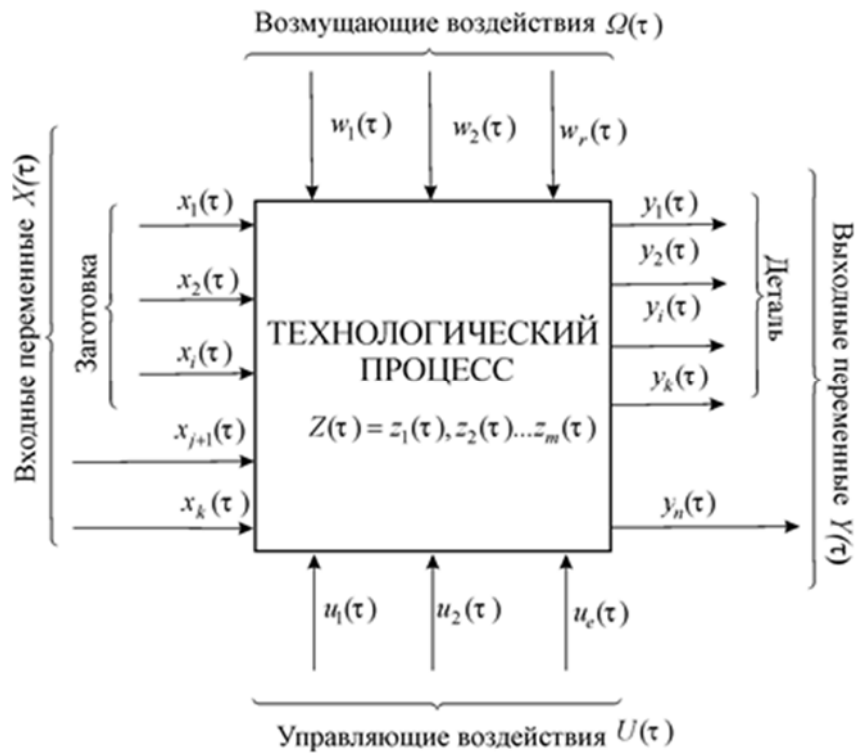


Рисунок 2.1 – Декомпозиция системы «Технологический процесс» по векторам

То есть текущие значения показателей качества должны находиться в области назначенного поля допуска:

$$y_{k \min} \leq y_k(\tau) \leq y_{k \max}.$$

Для выполнения этого условия необходимо, чтобы выполнялось ограничение:

$$\left| \frac{dy_k}{d\tau} \right| \leq \delta_k,$$

где $\delta_k = \frac{\varepsilon_k}{\tau_f - \tau_0}$ – скорость изменения показателя качества y_k .

Состояние технологического процесса не остается постоянным, а изменяется с течением времени вследствие воздействия на процесс внешних возмущений, предсказуемым и непредсказуемым образом изменяются значения выходных показателей качества y_k . Так как возмущающие воздействия не измеряются,

то компоненты вектора $\Omega(\tau)$ можно формализовать в виде случайных функций, моделирующих случайные отклонения показателей y_k от номинальных значений.

Таким образом, для оценки стабильности технологического процесса можно использовать среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра σ_{y_k} от номинального значения:

$$\sigma_{y_k} \leq \sigma_{y_k \max}.$$

То есть чем меньше отклонение, тем выше стабильность, и наоборот. Обеспечить стабильность значений выходных показателей технологического процесса можно за счет изменения значений управляющих воздействий.

На финишных операциях, к которым относится процесс круглого наружного шлифования, осуществляется стохастический съем 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.

Изменение параметров происходит в различные периоды. Так, например, количество зерен в зоне контакта изменяется за время обработки одной поверхности, изменение свойств СОТС происходит в течение смены, износ оборудования – в течение более длительного периода [25].

С целью выявления причин нарушения нормального протекания технологического процесса и поиска путей обеспечения стабильности параметров качества изделий при высокопроизводительном чистовом шлифовании. Рассмотрим операцию круглого наружного шлифования как динамическую систему. Структура и состав системы приведены на рисунке 2.2.

Разбиение динамической системы «Процесс круглого наружного шлифования» на подсистемы проведено следующим образом.

Выделены главные подсистемы: "Процесс резания", "Технологическая система" и "Внешняя среда". Подсистема "Технологическая система" реализует

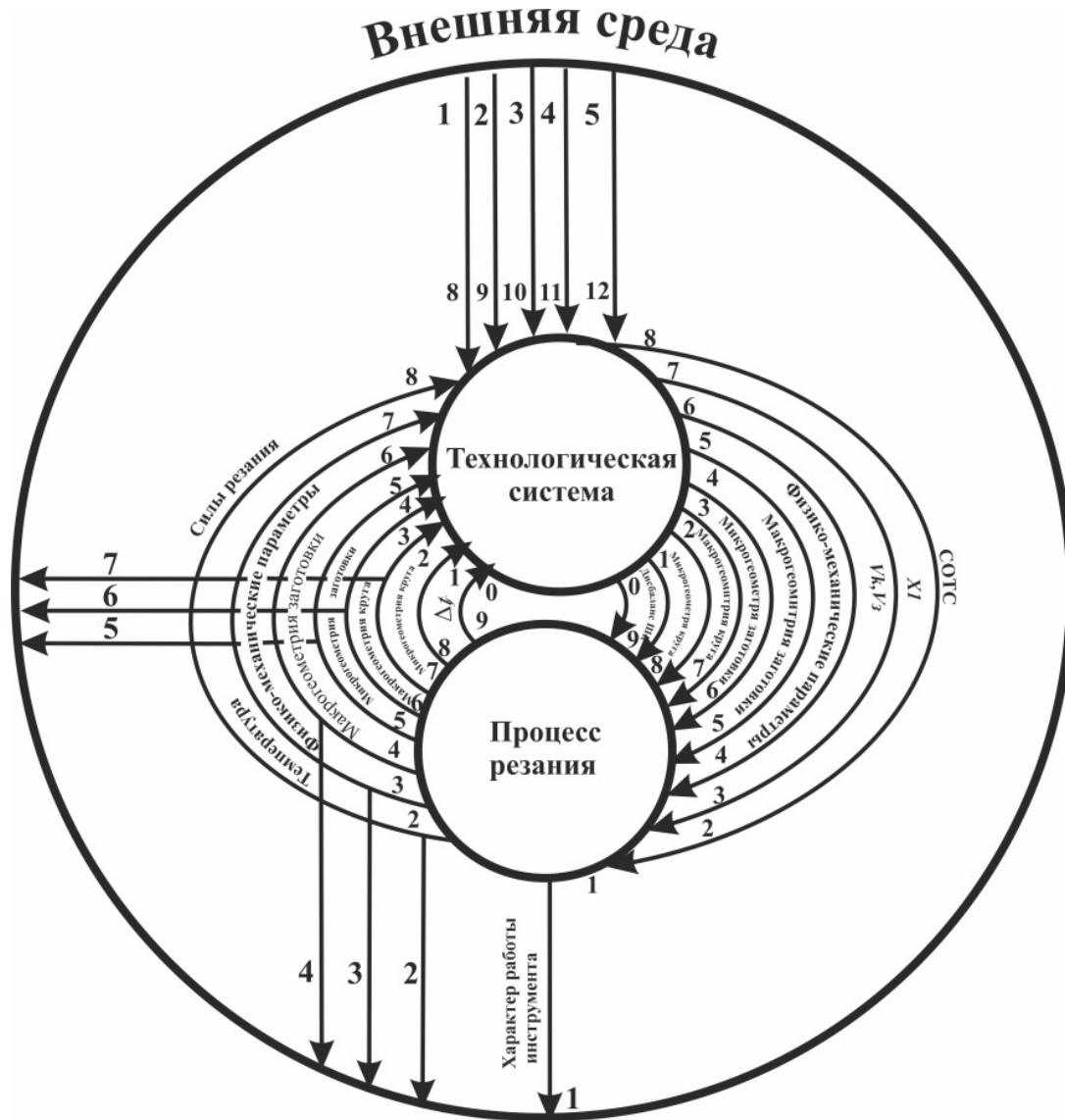


Рисунок 2.2 – Структура динамической системы процесса круглого наружного шлифования

процессы, связанные с изменениями технологических режимов, микро- и макрорельефа круга, состояния заготовки. Она является линией задержки (табл. 2.1) [74,94].

Поведение динамической системы «Процесс круглого наружного шлифования», может быть формализовано системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} Z_{(t)TC} &= \Phi_{TC} \left(X_{PP}^{TC}, X_{BC}^{TC}, Y_{TC}^{PP}, Y_{TC}^{BC}, \tau \right); \\ Z_{(t)PP} &= \Phi_{PP} \left(X_{TC}^{PP}, X_{PP}^{BC}, Y_{PP}^{TC}, Y_{PP}^{BC}, \tau \right). \end{aligned} \right\}$$

Параметры из подсистемы "Технологическая система" поступают на вход подсистемы "Процесс резания", где изменяются геометрические и физико-механические параметры поверхности заготовки:

$$\left. \begin{aligned} Y_{(t)TC} &= F_{TC}(Z_{TC}^{TP}, X_{TC}^*, \tau) \\ Y_{(t)PP} &= F_{PP}(Z_{PP}^{TC}, X_{PP}^*, \tau) \end{aligned} \right\}, \quad (2.1)$$

где $Z_{(t)TC}$ – вектор, характеризующий состояние подсистемы.

"Технологическая система"; $Z_{(t)PP}$ – вектор, характеризующий состояние подсистемы "Процесс резания"; $X_{PP}^{TC}, X_{BC}^{TC}, X_{TC}^{PP}, X_{PP}^{BC}$ – тензоры входных переменных системы; $Y_{TC}^{PP}, Y_{TC}^{BC}, Y_{PP}^{TC}, Y_{PP}^{BC}$ – тензоры выходных переменных системы; Φ_{TC}, Φ_{PP} – операторы, отображающие множество входных переменных и параметров исходного состояния, на множество параметров состояния подсистем в момент времени τ ; F_{TC}, F_{PP} – операторы, отображающие множество значений входных переменных и параметров состояния на множество выходных переменных в момент времени τ .

В таблице 2.2 приведено описание наборов входов и выходов подсистемы «Процесс резания». Описание наборов входов и выходов подсистемы «Внешняя среда» приведено в таблице 2.3.

Учитывая то, что все параметры технологического процесса, кроме внешних возмущений изменяются периодически от прохода $j-1$ к проходу j , выражение (1) можно представить в дискретной форме:

$$Z_{i(j)} = F \left[Z_{i(j-1)}, X_{i(j)}^n, W^n(\tau), U_{i(j)}^n \right],$$

$$i \in \{PP, TC\}$$

Вектор выходных параметров $Y_{i(j)}$ также может быть формализован выражениями, записанными в непрерывной и дискретной формах:

$$Y(\tau) = \Phi \left[Z(\tau), X^n(\tau) \right] = \Phi \left[Z(\tau), x^n(\tau), w^n(\tau), u^n(\tau) \right];$$

$$Y_{i(j)} = \Phi \left[Z_{i(j)}, x_{i(j)}^n, w^n(\tau), u_{i(j)}^n \right],$$

где n – номер производной; $w^n(\tau)$ – вектор возмущающих воздействий; $u^n(\tau)$ – вектор управляющих воздействий; $x^n(\tau)$ – вектор входных параметров.

Таблица 2.1 – Описание наборов входов и выходов подсистемы «Технологическая система»

Технологическая система (ТС)	
Входные параметры	Выходные параметры
0. Колебания фактической глубины резания	0. Колебания шлифовального круга
1. Состояние поверхности инструмента вне зоны резания.	1. Микрогеометрия поверхности шлифовального круга при входе в зону контакта.
2. Отклонения формы круга вне зоны резания.	2. Отклонения формы круга при входе в зону контакта.
3. Шероховатость поверхности заготовки вне зоны резания.	3. Шероховатость поверхности заготовки при входе в зону контакта.
4. Волнистость поверхности заготовки вне зоны резания.	4. Волнистость поверхности при входе в зону контакта.
5. Физико-механические параметры поверхности заготовки вне зоны резания.	5. Физико-механические параметры поверхности заготовки при входе в зону в зону контакта.
6. Текущая температура элементов технологической системы.	
7. Текущее значение силы резания.	6. Режим резания при входе в зону контакта.
8. Исходное состояние поверхностей инструмента и заготовки.	
9. Геометрические размеры инструмента после правки и начальное состояние заготовки.	7. Координаты центра вращения инструмента и заготовки.
10. Характеристика шлифовального круга и заготовки.	
11. Режимы резания.	8. Состав и параметры СОТС при входе в зону контакта.
12. Текущие параметры СОТС.	

Таблица 2.2 – Описание наборов входов и выходов подсистемы «Процесс резания»

Процесс резания	
Входные параметры	Выходные параметры
1. Текущие параметры СОТС при входе в зону контакта.	1. Режим работы инструмента.
2. Расстояние от центра вращения шлифовального круга до центра вращения заготовки.	2. Составляющие силы резания при выходе из зоны контакта.
3. Режим резания при входе в зону контакта.	3. Температура элементов ТС при выходе из зоны контакта.
4. Физико-механические параметры поверхности заготовки при входе в зону в зону контакта.	4. Физико-механические свойства заготовки при выходе из зоны контакта.
5. Волнистость поверхности при входе в зону контакта.	5. Волнистость поверхности заготовки при выходе из зоны резания.
6. Шероховатость поверхности заготовки при входе в зону контакта.	6. Шероховатость поверхности заготовки при выходе из зоны контакта.
7. Отклонения формы круга при входе в зону контакта	7. Микрогеометрия поверхности инструмента при выходе в зону резания.
8. Микрогеометрия поверхности инструмента при входе в зону резания.	8. Отклонения формы круга при выходе из зоны контакта.
9. Колебания шлифовального круга при входе в зону резания.	9. Колебания фактической глубины резания при выходе из зоны контакта.

Полученные выражения характеризуют поведение отдельных подсистем с учетом воздействия на них совокупности входных, выходных и возмущающих воздействий [10–13].

Значения выходных параметров могут меняться в определенных границах. Они могут быть представлены выражениями типа равенств в определенных границах. Например, в дискретной форме выражения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} h_{dj} &= \Phi^1(h_{dj-1}, u_j, w_j, x_j) \\ R_{aj} &= \Phi^2(R_{aj-1}, u_j, w_j, x_j) \\ P_{yj} &= \Phi^3(P_{yj-1}, u_j, w_j, x_j) \\ \sigma_{pj} &= \Phi^3(\sigma_{pj-1}, u_j, w_j, x_j) \\ d_{dj} &= \Phi^3(d_{dj-1}, u_j, w_j, x_j) \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta r_j &= \Phi^3(\Delta r_{j-1}, u_j, w_j, x_j) \end{aligned} \right\},$$

где h_{dj} , R_{aj} , P_{yj} , σ_{pj} , d_{dj} , Δr_j – на j -м обороте соответственно глубина дефектного слоя, среднее арифметическое отклонение профиля, нормальная составляющая силы резания, диаметр заготовки, радиальный съем материала.

Для снижения поля рассеивания значений выходных показателей качества необходимо обеспечить стабилизацию состояния динамической системы «Процесс круглого наружного шлифования», что позволит обеспечить нормальное функционирование системы. Таким образом, должно выполняться неравенство:

$$Z_{\min i(j)} \leq Z_{i(j)} \leq Z_{kpi(j)},$$

где $Z_{kpi(j)} = F[S_{i(j)}, Z_{kpdon}, u_{don}^n]$ – верхняя граница критического значения вектора состояния на j -м проходе; $Z_{\min i(j)} = F[S_{i(j)}, Z_{\min don}, u_{don}^n]$ – нижняя граница критического значения вектора состояния на j -м проходе.

Указанные границы определяются из технического задания, характеристик имеющегося инструмента и технических возможностей оборудования.

Таким образом, стабильность значений Z_{ij} можно рассматривать как один из показателей ее качества.

Таблица 2.3 – Описание наборов входов и выходов подсистемы «Внешняя среда»

Внешняя среда	
Входные параметры	Выходные параметры
1. Режим работы инструмента.	1. Исходное состояние поверхностей инструмента и заготовки.
2. Колебания сил резания.	2. Начальные геометрические размеры круга и заготовки.
3. Текущая температура элементов ТС.	3. Характеристика инструмента и обрабатываемого материала.
4. Физико-механические параметры.	4. Текущий режим резания.
5. Волнистость поверхности заготовки при выходе из зоны резания.	
6. Шероховатость поверхности при выходе из зоны резания.	5. Исходные параметры СОТС.
7. Отклонения формы шлифовального круга.	

С учетом вышеизложенного могут быть сформированы ограничения в форме неравенств:

$$\begin{aligned}
 h_{dj} &\leq h_{d\text{дон}} + \Pi_j; \\
 R_{aj} &\leq R_{a\text{дон}} + \Pi_j; \\
 P_{y\max j} &\leq P_{y\max\text{дон}} + \Pi_j; \\
 \sigma_{pj} &\geq \sigma_{pj\text{дон}}; \\
 &\dots\dots\dots \\
 0 \leq u^n &\leq u^n_{\text{дон}}
 \end{aligned}$$

где $u^n_{\text{дон}}$ – максимально допустимые значения управляющих воздействий, генерируемых оборудованием; Π_j – величина припуска на j -м проходе.

Для обеспечения эффективности финишных операций оптимизируют условия протекания процессов: выбирают необходимое оборудование, приспособление, СОТС, инструмент, режимы обработки, в соответствии с требованиями по точности и качеству обработки.

Анализ существующих исследований в области финишной обработки показывает, что стабильность параметров качества поверхностей при чистовом и тонком шлифовании от изменения фактической глубины микрорезания t_f , которая является динамическим звеном между режимами резания и качеством обработанной поверхности.

Таким образом, величина t_f задает следующие ограничения:

$$0 \leq t_{fi} \leq \delta_{cej},$$

где δ_{cej} – расстояние от вершины наиболее выступающего зерна до условной линии связи.

2.2. Оценка изменения фактической глубины резания в процессе шлифования

Для оценки t_{fi} необходимо определение координат центра вращения круга, что можно выполнить путем построения и решения уравнения баланса перемещений в технологической системе.

Для получения зависимости, учитывающей перемещения в технологической системе, рассмотрим процесс обработки на макроуровне. Согласно схеме, представленной на рисунке 2.3, значение фактической глубины резания в момент времени τ может быть вычислено:

$$t_f(\tau) = R_i(\tau) + r(\tau) - A(\tau), \quad (2.2)$$

где $R_i(\tau)$ – текущий радиус шлифовального круга; $A(\tau)$ – текущее межцентровое расстояние; $r(\tau)$ – текущий диаметр заготовки.

В процессе шлифования линейный размер шлифовального круга изменяется с течением времени за счет радиального износа S_R :

$$R_i(\tau) = R_0 - \int_0^{\tau} S_R d\tau,$$

где R_0 – начальное значение радиуса шлифовального круга при $\tau = t$.

Значение текущего радиуса заготовки может быть формализовано зависимостью вида:

$$r(\tau) = r_0 - \int_0^{\tau} \dot{r} d\tau,$$

где r_0 – начальное значение радиуса заготовки; $\dot{r} = Q_{\Sigma}$ – скорость радиального съема материала.

Текущее межцентровое расстояние зависит от значений суммы радиальных подач и величины упругих деформаций в зоне резания:

$$A(\tau) = A_0 - \int_0^{\tau} S_{yn} d\tau + \Delta A_y(\tau),$$

где A_0 – начальное межцентровое расстояние; S_{yn} – номинальное значение величины, отработанное приводом станка;

$\Delta A_y(\tau)$ – текущее значение величины приращений упругих и температурных деформаций в зоне резания:

$$\Delta A_y(\tau) = P_y(\tau) \cdot \sigma_{TC},$$

где P_y – текущее значение нормальной составляющей силы резания; σ_{TC} – податливость технологической системы.

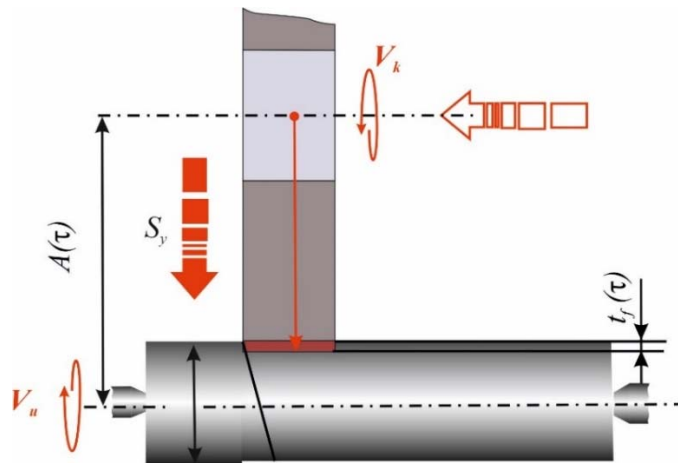


Рисунок 2.3 – Схема взаимодействия шлифовального круга и заготовки

Значение текущего радиуса заготовки может быть формализовано зависимостью вида:

$$r(\tau) = r_0 - \int_0^{\tau} \dot{r} d\tau,$$

где r_0 – начальное значение радиуса заготовки; $\dot{r} = Q_{\Sigma}$ – скорость радиального съема материала.

Текущее межцентровое расстояние зависит от значений суммы радиальных подач и величины упругих деформаций в зоне резания:

$$A(\tau) = A_0 - \int_0^{\tau} S_{yn} d\tau + \Delta A_y(\tau),$$

где A_0 – начальное межцентровое расстояние; S_{yn} – номинальное значение величины, отработанное приводом станка;

$\Delta A_y(\tau)$ – текущее значение величины приращений упругих и температурных деформаций в зоне резания:

$$\Delta A_y(\tau) = P_y(\tau) \cdot \sigma_{TC},$$

где P_y – текущее значение нормальной составляющей силы резания; σ_{TC} – податливость технологической системы.

После подстановки составляющих в выражение (2.2) получим выражение для расчета фактической глубины резания в момент времени τ :

$$t_f(\tau) = R_0 - \int_0^{\tau} S_R d\tau + r_0 - \int_0^{\tau} r d\tau - A_0 + \int_0^{\tau} S_{yn} d\tau - \Delta A_y(\tau) \quad (2.3)$$

Из практических соображений более удобно работать не с абсолютными величинами параметров, а с их приращениями. С этой целью вычтем из выражения (2.3) выражение для $t_f(\tau + l)$ в последующий момент времени:

$$S'_{yn}(\tau) = \Delta t_f(\tau) + \Delta r(\tau - 1) + \Delta R(\tau) + \Delta A_y(\tau), \quad (2.4)$$

где $S'_{yn}(\tau)$ – текущее значение радиальной подачи; ΔA_y – приращение деформаций за счет упругих и температурных эффектов; ΔR – текущий радиальный износ инструмента; Δr – радиальный съем материала; Δt_f – приращение фактической глубины резания.

Для простоты расчетов зависимость (2.4) приведена к виду:

$$\Delta A_j = \Delta t_{fj} + \Delta R_j + \Delta r_{j-1} + \Delta U_{ynj} + \Delta U_{Tj}, \quad (2.5)$$

где j – номер прохода, оборота; $\Delta A = S_y$ – изменение межцентрового расстояния, определяемое величиной перемещения шлифовального круга в направлении поперечной передачи; ΔU_{yn} – упругие деформации системы; ΔU_T – температурные деформации системы.

Анализ уравнения (2.5) показывает, что величина поперечной подачи расходуется на сумму приращений упругих и температурных эффектов, текущий радиальный износ инструмента, предшествующий радиальный съём материала и приращение фактической глубины резания. Для его решения необходимы модели всех параметров, входящих в состав уравнения. Полученные модели позволяют построить методику расчета граничных циклов (семейства номинальных траекторий движения объекта). Для решения такой задачи необходимо сформировать технические ограничения и выбрать критерий оптимизации.

2.3. Выбор оптимальных режимов и высокопроизводительных циклов тонкого шлифования

Для стабилизации выходных параметров технологического процесса необходимо осуществить выбор оптимальных режимов (семейства высокопроизводительных циклов тонкого шлифования) для шлифования шеек валов, с учетом изменения состояния технологической системы за период стойкости шлифовального круга.

2.3.1. Выбор критерия оптимизации

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

Трудоемкость чистовой обработки детали T_K при ведении процесса шлифования в одну, две, три и более операций, может быть рассчитана по общепринятой формуле:

$$T_K = T_M + T_B + T_{орг.тех.об.} + T_{отд.} + \frac{T_{н.з.}}{n_{шт}}, \quad (2.6)$$

где T_M – машинное время обработки детали, мин; T_B – вспомогательное время, мин; $T_{орг.тех.об.}$ – время на организационное и техническое обслуживание рабочего

места, мин; $T_{отд.}$ – время на отдых и естественные надобности, мин; $T_{п.з.}$ – подготовительно-заключительное время, мин; $n_{шт}$ – количество деталей в партии. Значения T_B , $T_{орг.тех.об.}$, $T_{отд.}$, $T_{п.з.}$ могут быть найдены по нормативным данным, машинное время шлифования детали может быть определено по уравнению:

$$T_M = f / Q_{\Pi}, \quad (2.7)$$

где f – площадь обрабатываемой поверхности, мм²;

Q_{Π} – производительность шлифования по площади обработки, мм²/мин.

Производительность шлифования мелкозернистыми кругами по площади, обрабатываемой в единицу времени Q_{Π} , может быть выражена через производительность шлифования по объему металла, снимаемого в единицу времени Q_M по уравнению:

$$Q_{\Pi} = Q_M / \Pi, \quad (2.8)$$

где Π – радиальный припуск на шлифование, мм.

При шлифовании металл удаляется с обрабатываемой детали единичными абразивными зернами, поэтому производительность шлифования Q_M – зависит от числа срезов и объема металла, удаляемого при единичном срезе, который определяется формой и размерами среза. Наиболее типичными срезами при чистовых процессах шлифования являются сегментообразные срезы [3].

На рисунке 2.4 приводится схема единичной риски, нанесенной алмазным конусом на полированную поверхность.

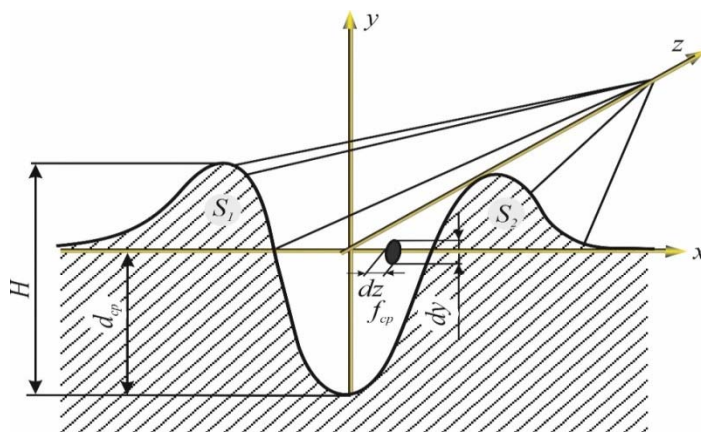


Рисунок 2.4 – Схема единичной риски, нанесенной алмазным конусом на полированную поверхность стального образца

При принятых координатах элементарный объем одной четверти сегмент образной риски определится по уравнению:

$$dV'_p = \phi(y, z) dydz, \quad (2.9)$$

где $\phi(y, z)$ - уравнение поверхности, ограничивающий объем риски.

Интегрируя уравнения (2.9) и умножая результат на четыре, получим полный объем сегмент образной риски dV_p :

$$dV_p = \int_0^y \int_0^z \phi(y, z) dydz \quad (2.10)$$

Число единичных срезов в минуту N может быть определено по уравнению:

$$N = \Psi \cdot B \cdot V_K \cdot n_z, \quad (2.11)$$

где n_z – число зерен, находящихся на единичной площадке в 1 мм^2 поверхности круга,

Ψ – масштабный коэффициент, при обработке мелкозернистыми кругами $\Psi = 6 \cdot 10^4$, B -высота круга, V_K – окружная скорость круга.

В работе [5] показано, что абразивные зерна на поверхности круга расположены на разных уровнях и поэтому внедряются в обрабатываемый металл на разную глубину. На единичной площадке, перпендикулярной к радиусу круга, распределение вершин может быть выражено зависимостью:

$$dn_z = f(y) dy, \quad (2.12)$$

где dn_z – количество зерен, заключенных между поверхностью круга по глубине y и $y + dy$ по направлению радиуса; $f(y)$ – функция распределения вершин абразивных зерен по глубине.

Объем металла, снимаемый в минуту зернами, заключенными в слое dy , учитывая уравнения (2.10), (2.11) и (2.12), определится:

$$dQ_M = 2,4 \cdot 10^5 \cdot B \cdot V_K \left[f(y) \int_0^y \int_0^z \phi(y, z) dydz \right] dy. \quad (2.13)$$

После подстановки (2.13) в уравнение (2.8), получим:

$$Q_{II} = \frac{2,4 \cdot 10^5 \cdot B \cdot V_K \left[f(y) \int_0^y \int_0^z \phi(y, z) dy dz \right] dy}{\Pi}. \quad (2.14)$$

Для использования уравнения (2.14) необходимо знать функцию распределения абразивных зерен по глубине и уравнение поверхности, ограничивающий объем риски.

По данным работы [86] в первом приближении вполне допустимо рассматривать сегментообразную риску как две равные пирамиды с общим основанием. В этом случае объем единичной риски может быть определен по уравнению:

$$V_p = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{3} \cdot f_{cp} \cdot L, \quad (2.15)$$

где f_{cp} – срединная площадь сечения риски, мкм^2 ;

L – половина дуги контакта при сегмент образном срезе, равная дуге контакта при срезе в виде запятой, мм.

По данным Маслова Е.Н. длина дуги контакта L при круглом наружном шлифовании может быть определена по уравнению [84]:

$$L = 3,16 \cdot 10^{-2} \cdot \left(1 \pm \frac{V_H}{60V_K} \right) \cdot \sqrt{\frac{D \cdot d \cdot a_{cp}}{D + d}} \quad (2.16)$$

где D – диаметр шлифовального круга, мм; a_{cp} – срединная глубина врезания абразивного зерна в обрабатываемый металл, мкм .

Срединная площадь риски, пренебрегая упругими деформациями металла, может быть определена по геометрии вершины абразивного зерна [4].

Для случая, когда толщина среза лежит в пределах [1] $a_{cp} \setminus \rho \leq 0,29$ срединная площадь сечения может быть рассчитана по приближенной зависимости:

$$f_{cp} = 1,8 a_{cp} \cdot \sqrt{\rho \cdot a_{cp}}. \quad (2.17)$$

Зависимость (12) получена обработкой математических таблиц площади сегмента при различных значениях высоты стрелки. Радиус абразивного зерна ρ зависит от величины зерна и материала зерна [5].

В работах Богомоллова Н.И. [11], Ваксера Д.В. [1], Новоселова Ю.К. [93-96] показано, что объем образующиеся риски бывает всегда больше объема ме-

талла, фактически удаляемого с детали. Часть металла вытесняется из объема риски, образуя по ее краям навалы. О соотношении объема металла V_M , удаляемого при образовании риски и объема риски V_p можно судить в первом приближении по соотношению площадей навалов к площади риски в срединном сечении (рисунок 2.4):

$$\frac{V_M}{V_p} = 1 - K_b = 1 - \frac{S_1 + S_2}{f_{cp}} \quad (2.18)$$

где K_b – коэффициент выдавливания.

Подставляя в уравнения (2.17) значение V_p на уравнения (2.15), найдем объем металла, удаляемый единичным абразивным зерном:

$$V_M = 2,1 \cdot 10^{-8} \cdot (1 - K_b) \cdot f_{cp} \cdot \left(1 \pm \frac{V_{II}}{60V_K} \right) \cdot \sqrt{\frac{D \cdot d \cdot a_{cp}}{D + d}}. \quad (2.19)$$

В первом приближении можно считать, что при шлифовании все абразивные зерна, участвующие в процессе резания, расположены на поверхности круга на одном уровне. В этом случае число срезов обрабатываемого металла абразивными зернами определяется по уравнению:

$$N = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot B \cdot V_K}{l_\phi^2}, \quad (2.20)$$

где l_ϕ^2 – расстояние между абразивными зернами, находящимися на поверхности круга и участвующими в процессе резания мм.

По данным работ [1-3]:

$$l_\phi \approx 3,5 \cdot 10^{-3} l_0, \quad (2.21)$$

где l_0 – средний и наиболее вероятный размер зерна в поперечнике, мкм.

Объем металла, удаляемый с металла в минуту N абразивными зернами, определится:

$$Q_M = \frac{10,3 \cdot (1 - K_b) \cdot f_{cp} \cdot B \cdot V_K \cdot \left(1 \pm \frac{V_{II}}{60V_K} \right) \cdot \sqrt{\frac{D \cdot d \cdot a_{cp}}{D + d}}}{l_0^2} \quad (2.22)$$

В работах [6, 7] показано, что шероховатость поверхности при шлифовании определяется совокупностью единичных рисков. Соответствие шероховато-

сти поверхности глубине единичных рисок, позволяет установить по шероховатости среднюю глубину внедрения единичных абразивных зерен в обрабатываемый металл. Данные рисунка 2.4 показывают, что образующаяся при резании – царапании шероховатость поверхности $Ra = H$ больше глубины врезания на величину навалов, по краям риски.

$$a_{cp} = K_R \cdot Ra_1, \quad (2.23)$$

где $K_R = a_{cp} / H$ – коэффициент превышения шероховатости поверхности.

Подставляя значение производительности шлифования по объему металла Q_M из уравнения (2.23) в уравнение (2.8) и учитывая возможность повышения производительности в начальный период времени за счет изменения режима коэффициентом K_Q , получим:

$$Q_{II} = \frac{103 \cdot K_Q \cdot (1 - K_b) \cdot f_{cp} \cdot B \cdot V_K \cdot \left(1 \pm \frac{V_H}{60V_K}\right) \cdot \sqrt{\frac{K_R \cdot Rz_1 \cdot D \cdot d}{D + d}}}{l_0^2 \cdot \Pi}. \quad (2.24)$$

Формула (2.24) учитывает влияние на производительность шлифования размеров абразивного зерна, режима шлифования, припуска на шлифование, размеров обрабатываемой детали и круга. Формула может быть разбита на две функциональные части:

$$Q_{II} = G \cdot S, \quad (2.25)$$

$$\text{где } G = \frac{103 \cdot K_Q \cdot (1 - K_b) \cdot f_{cp} \cdot V_K \cdot \left(1 \pm \frac{V_H}{60V_K}\right) \cdot \sqrt{K_R \cdot Rz_1}}{l_0^2 \cdot \Pi} \quad (2.26)$$

не зависит от размеров детали и круга;

$$S = B \cdot D_3, \quad (2.27)$$

где $D_3 = \sqrt{\frac{D \cdot d}{D + d}}$ – эквивалентный диаметр, параметр, учитывающий размеры обрабатываемой детали и круга.

Функциональная часть формулы (2.25), независимая от размеров обрабатываемой детали и размеров круга, может быть принята за показатель производительности чистовых процессов шлифования.

Для проведения анализа влияния условий шлифования на показатель производительности шлифования необходимо экспериментальное определение входящих в уравнение (2.24) коэффициентов K_b и K_R .

Анализ показателя производительности.

Для проведения анализа влияния числа чистовых операций на показатель производительности G необходимо выразить входящие в уравнение (2.24) значения Π и l_0 в виде функций от шероховатости поверхности Ra .

Для того, чтобы на шлифовальной поверхности не осталось следов от предшествующей обработки, необходимо с детали снять слой металла Π (рисунок 2.5):

$$\Pi = 10^{-3} \cdot (C_0 Ra_0 - C_1 Ra_1). \quad (2.28)$$

Размер абразивного зерна l_0 является не единственным фактором, определяющим шероховатость поверхности детали после шлифования, поэтому зависимость между ними нельзя представить в однозначном виде.

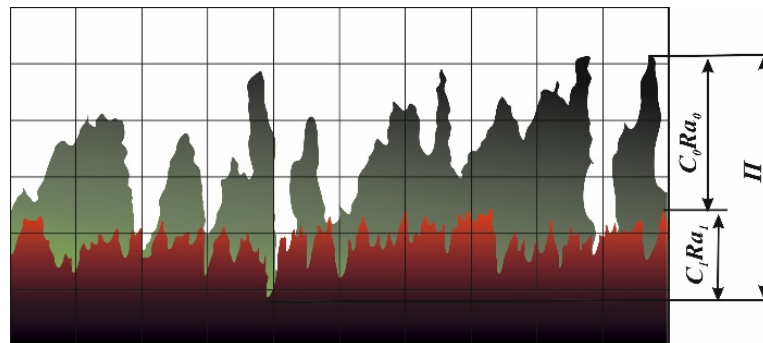


Рисунок 2.5 – Схема шероховатости поверхности до и после шлифования тонкозернистым кругом

Уменьшение шероховатости поверхности детали возможно за счет:

а) уменьшения глубины внедрения единичных зерен в металл при одной и той же зернистости круга, $l_0 = const$;

б) изменения зернистости круга, связки, режима шлифования, состава смазочно-охлаждающей жидкости. При этом зависимость l_0 от Ra может быть выражена уравнением:

$$l_0 = a_0 \cdot Ra^{a_1},$$

где a_0 и a_1 – постоянные регрессии.

Для шлифования шеек валов опорных гидростатических подшипников гребных при чистовом шлифовании кругов на вулканитовой связке, при тонком шлифовании кругов на бакелитовой связке получена зависимость:

$$l_0 = 25,5 \cdot R_a^{0,72}. \quad (2.29)$$

Рассмотрим влияние шероховатости поверхности после шлифования на показатель производительности при $l_0 = const$ и $l_0 = 25,5 \cdot R_a^{0,72}$ (рисунок 2.6).

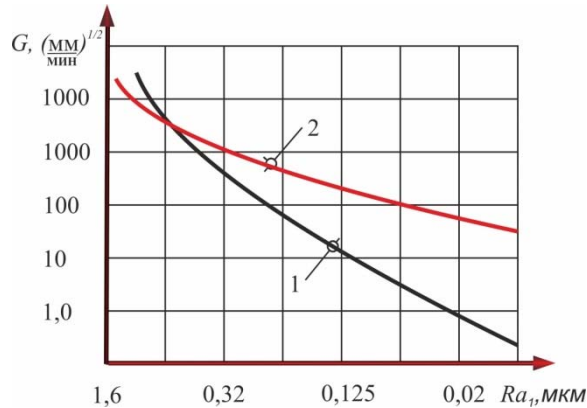


Рисунок 2.6 – Зависимость показателя производительности от шероховатости поверхности после шлифования 1 – $l_0 = const$, $V_K = 35 \text{ м/с}$; 2 – $l_0 = 25,5 \cdot R_a^{0,72}$, $V_K = 35 \text{ м/с}$;

При расчетах в соответствии с экспериментальными данными значения коэффициентов были приняты равными: $K_Q = 2$; $K_b = 0,65$; $K_R = 0,8$; $C_0 = C_1 = 2$. Радиус округления абразивных зерен был принят равным: $\rho = 0,077 \cdot l_0$ мкм [1].

Анализ рисунка 2.6 показывает, что показатель производительности уменьшается при уменьшении шероховатости поверхности после шлифования. Более высокие значения показателя производительности соответствуют случаю, когда уменьшение шероховатости достигается за счет уменьшения зернистости круга, режима шлифования и состава смазочно-охлаждающей жидкости. Следовательно, применение тонкозернистых кругов является более эффективным методом уменьшения шероховатости, чем выхаживание.

Рассмотренные зависимости Π и l_0 от предварительной и требуемой шероховатости позволяют рассчитать показатель производительности при шлифовании деталей не только при одной чистовой операции, но и при двух, трех и бо-

лее операциях. При шлифовании в несколько операций показатель производительности может быть определен по уравнению:

$$G = \frac{1}{\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} + \dots + \frac{1}{G_n}}, \quad (2.30)$$

где n – число чистовых операций шлифования;

$G_1 \dots G_n$ – показатель производительности каждой отдельной операции.

Выражая показатель производительности отдельных операций через формулу (2.26), получим:

$$G = \frac{103}{\frac{\Pi_{01} \cdot l_{01}^2}{K_Q \cdot (1 - K_b) \cdot f_{cp} \cdot V_K \cdot \left(1 \pm \frac{V_H}{60V_K}\right) \cdot \sqrt{K_R \cdot Rz_1}} + \dots + \frac{\Pi_{0n} \cdot l_{0n}^2}{K_Q \cdot (1 - K_b) \cdot f_{cp} \cdot V_K \cdot \left(1 \pm \frac{V_H}{60V_K}\right) \cdot \sqrt{K_R \cdot Rz_1}}} \quad (2.31)$$

При подстановке в уравнение (2.31) значения f_{cp} из уравнения (2.17), Π из уравнения (2.28), l_0 из уравнения (2.29) получим:

$$G = \frac{187,5}{\frac{Ra_0 - Ra_{01}}{Ra_{01}^{0,87}} + \frac{Ra_{01} - Ra_{02}}{Ra_{02}^{0,87}} + \dots + \frac{Ra_{0n-1} - Ra_1}{Ra_1^{0,87}}}, \quad (2.32)$$

где $Ra_{01}, Ra_{02}, \dots, Ra_{0n}$ – шероховатость поверхности после первой, второй и т.д. операций.

2.3.2. Формирование технических ограничений

В первом разделе диссертации было указано, что для определения оптимальных операций круглого наружного шлифования может быть использовано множество методов оптимизации режимов. Выбор метода носит субъективный характер, так, например, с целью упрощения расчетов и наглядности процесса можно использовать методы динамического программирования.

Для этого необходимо:

1) найти и выразить в виде равенства и неравенства все технические ограничения факторов режима шлифования, определяемыми возможностями станка, режущими свойствами абразивного инструмента, требованиями к точности об-

рабатываемой детали, шероховатости поверхности, качеству поверхностного слоя;

2) выбрать критерий оптимизации режима шлифования и выразить его в виде функций от факторов режима шлифования;

3) 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:

Ограничение 1. Заданная производительность станка. Продолжительность цикла шлифования детали $T_{ц}$ определяется из условия организации производства по уравнению [23]:

$$T'_{ц} = \frac{60 \cdot K_3}{R}, \quad (2.33)$$

где K_3 – коэффициент загрузки станка;

R – заданная производительность станка в штуках за час.

Время цикла шлифования детали $T_{ц}$ может быть определено как трудоемкость обработки детали на данной операции:

$$T_{ц} = T_M + T'_B, \quad (2.34)$$

где T'_B – сумма всех вспомогательных времен, мин.

Машинное время шлифования детали T_M определяется отношением объема металла, со шлифованного с детали (W) к производительности шлифования:

$$T_M = \frac{W}{Q_M} = \frac{\pi \cdot d \cdot l \cdot \Pi}{Q_M}. \quad (2.35)$$

Производительность процесса шлифования определяется факторами режима по уравнению (2.24). Значение Q_M может быть рассчитано постепенной зависимости:

$$Q_M = C_M \cdot V_K^{W_M} \cdot V_H^{X_M} \cdot S^{Y_M} \cdot t_M^{Z_M} \quad (2.36)$$

После подстановки (2.36) в (2.35) и учитывая, что время цикла шлифования детали должно быть меньше цикла станка $T'_{ц}$, после преобразования получим неравенство:

$$V_K^{W_M} \cdot V_H^{X_M} \cdot S^{Y_M} \cdot t_M^{Z_M} \geq \frac{\pi \cdot d \cdot l \cdot \Pi \cdot R}{C_M \cdot (60K_3 - R \cdot T'_B)}. \quad (2.37)$$

Ограничение 2. Заданная шероховатость поверхности. Зависимость шероховатости поверхности от параметров режима шлифования может быть записана уравнением:

$$Ra = C_R \cdot V_K^{W_R} \cdot V_H^{X_R} \cdot S^{Y_R} \cdot t_M^{Z_R}, \quad (2.38)$$

где C_R – коэффициент пропорциональности;

W_R, X_R, Y_R, Z_R – показатели степени при параметрах режима шлифования.

После шлифования шероховатость поверхности должна соответствовать шероховатости, предусмотренной техническими условиями на деталь. Это требование может быть записано неравенствами:

$$C_R \cdot V_K^{W_R} \cdot V_H^{X_R} \cdot S^{Y_R} \cdot t_M^{Z_R} \leq Ra_{\max}, \quad (2.39)$$

$$C_R \cdot V_K^{W_R} \cdot V_H^{X_R} \cdot S^{Y_R} \cdot t_M^{Z_R} \geq Ra_{\min}, \quad (2.40)$$

где $Ra_{\max}$ и $Ra_{\min}$ – максимально и минимально допустимые значения шероховатости поверхности детали, мкм.

Ограничение 3. Допустимый износ круга из условия получения заданной точности обработки.

При значительных размерах обрабатываемой детали на точность обработки может оказать влияние размерный износ шлифовального круга. Схема влияния размерного износа на конусность детали приводится на рисунок 2.7.

В крайнем правом положении круг снимает с детали слой металла δ_1 . При продвижении из крайнего правого положения в крайнее левое, круг изнашивается, вследствие чего уменьшается натяг системы СПИД с y_1 до y_2 и снижается радиальное усилие с P_{y_1} до P_{y_2} . Снижение радиального усилия вызывает уменьшение радиального съема металла.

Учитывая требования получения детали с заданной точностью $\delta_{доп}$ запи-

шем:

$$\delta_1 - \delta_2 = a_0 \left(\frac{P_{y_1}}{B} \right) - a_0 \left(\frac{P_{y_2}}{B} \right). \quad (2.41)$$

Подставляя вместо P_{y_1} и P_{y_2} их выражения построенные через жесткость системы СПИД j получим:

$$a_0 \left(\frac{j}{B} \right) (y_1 - y_2) \leq \delta_{доп}. \quad (2.42)$$

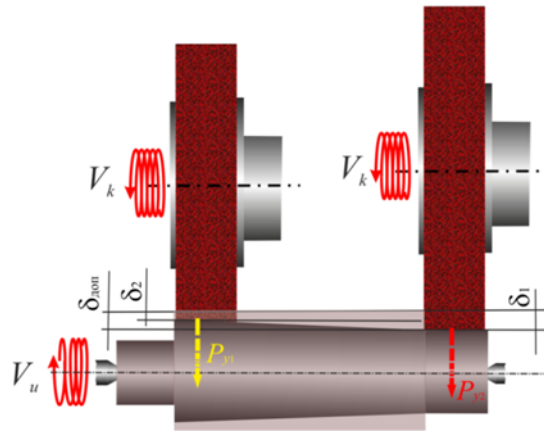


Рисунок 2.7– Радиальный износ круга, допустимый из условия получения заданной точности

Изучения натяга системы СПИД при перемещении из правого в левое положение, пренебрегая изменением радиального съема металла, соответствует радиальному износу круга и определяется по уравнению:

$$y_1 - y_2 = \frac{Q_a \cdot \tau_n}{\pi \cdot D \cdot B}, \quad (2.43)$$

где τ_n – время одного хода, мин.

Износ шлифовального круга может быть выражен через параметры режима шлифования по уравнению:

$$Q_a = C_a \cdot V_K^{W_a} \cdot V_H^{X_a} \cdot S^{Y_a} \cdot t_M^{Z_a}, \quad (2.44)$$

Подставляя в неравенство (2.42) значение $y_1 - y_2$ из уравнения (2.43), при Q_a из уравнения (2.37), после преобразования получим:

$$V_K^{W_a} \cdot V_H^{X_a} \cdot S_a^{Y_a} \cdot t_M^{Z_a} \leq \frac{\delta_{дон} \cdot \pi \cdot D \cdot B^2}{C_a \cdot a_0 \cdot j \cdot l}. \quad (2.45)$$

Ограничение 4. Радиальное усилие, допустимое прочностью закрепления абразивных зерен в круге и прочностью самих зерен.

Как показано в работе [52], интенсивность радиального усилия шлифования для обеспечения нормальной работы круга не должна быть больше допускаемой прочностью закрепления зерна в круге или прочности самого зерна $[\sigma_y]$.

Это условие математически может быть записано неравенством:

$$\frac{P_y}{l_K} \leq [\sigma_y]. \quad (2.46)$$

Радиальное усилие шлифования зависит от факторов режима и может быть определено из уравнения:

$$P_y = C_y \cdot V_K^{W_y} \cdot V_H^{X_y} \cdot S_y^{Y_y} \cdot t_M^{Z_y}, \quad (2.47)$$

где C_y – коэффициент пропорциональности;

W_y, X_y, Y_y, Z_y – показатели степени при параметрах режима шлифования.

Подставляя в неравенство (2.46) выражение P_y через параметры режима шлифования из уравнения (2.47) получим:

$$V_K^{W_y} \cdot V_H^{X_y} \cdot S_y^{Y_y} \cdot t_M^{Z_y} \leq \frac{[\sigma_y] \cdot l_K}{C_y}. \quad (2.48)$$

Ограничение 5. Допустимая скорость круга из условия его прочности.

Скорость круга при шлифовании V_K не должна превышать скорость круга, допускаемую прочностью круга $V_{K.д.}$:

$$V_K \leq V_{K.д.} \quad (2.49)$$

Для не скоростных кругов допускаемая скорость круга, как правило равна 35 м/сек.

Ограничение 6. Мощность электродвигателя привода шлифовального круга.

Мощность, развиваемая электродвигателем, должна быть больше мощности требуемой по тангенциальному усилию шлифования:

$$P_z \cdot V_K \leq N_{\text{э}} \cdot \eta, \quad (2.50)$$

где $N_{\text{э}}$ – мощность электродвигателя привода круга, кВт;

η – коэффициент полезного действия передачи.

Тангенциальное усилие шлифования может быть выражено через факторы режима шлифования уравнением:

$$P_z = C_z \cdot V_K^{W_z} \cdot V_H^{X_z} \cdot S^{Y_z} \cdot t_M^{Z_z}. \quad (2.51)$$

Подставляя в неравенство (2.50) значение из уравнения (2.51) после преобразования получим:

$$V_K^{W_{z+1}} \cdot V_H^{X_z} \cdot S^{Y_z} \cdot t_M^{Z_z} \leq \frac{N_{\text{э}} \cdot \eta}{C_z}. \quad (2.52)$$

Ограничение 7. Максимальная скорость круга.

Максимальная скорость круга должна быть меньше или равна максимально допускаемой кинематикой станка $V_{K \max} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{K \max}}{60 \cdot 1000}$:

$$V_K \leq V_{K \max}. \quad (2.53)$$

Ограничение 8. Минимальная скорость круга.

Минимальная скорость круга должна быть больше или равна максимально допускаемой кинематикой станка $V_{K \min} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{K \min}}{60 \cdot 1000}$:

$$V_K \geq V_{K \min}. \quad (2.54)$$

Ограничение 9. Максимальная скорость детали

Максимальная скорость детали должна быть меньше или равна максимально допускаемой кинематикой станка $V_{H \max} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{H \max}}{60 \cdot 1000}$:

$$V_H \leq V_{H \max} \quad (2.55)$$

Скорость детали может быть также ограничена по другим причинам: нагревом центром и люнетов, неуравновешенностью масс детали и т.д.

Ограничение 10. Минимальная скорость детали.

Минимальная скорость детали должна быть больше или равна максимально допускаемой кинематикой станка

$$V_{H\min} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{H\min}}{60 \cdot 1000} :$$

$$V_H \geq V_{H\min} . \quad (2.56)$$

Ограничение 11. Наибольшая продольная подача.

Наибольшая продольная подача при шлифовании должна быть меньше или равна максимально допускаемой кинематикой станка $S_{\max}$:

$$S \leq S_{\max} . \quad (2.57)$$

В нормативных материалах по шлифованию показано, что для получения качественной поверхности при чистовых процессах продольная подача на оборот детали не должна быть больше 0,1...0,5 высоты круга:

$$S \leq \frac{S_d \cdot B \cdot V_H}{\pi \cdot D} , \quad (2.58)$$

где S_d – продольная подача на оборот детали в долях высоты круга.

Ограничение 12. Наименьшая продольная подача.

Наименьшая продольная подача должна быть больше или равна максимально допускаемой кинематикой станка $S_{\min}$:

$$S \geq S_{\min} . \quad (2.59)$$

Ограничение 13. Наибольшая поперечная подача.

Наибольшая поперечная подача быть меньше или равна максимально допускаемой кинематикой станка $t_{\max}$:

$$t_M \leq t_{\max} . \quad (2.60)$$

Ограничение 14. Наименьшая поперечная подача.

Наименьшая поперечная подача больше или равна максимально допускаемой кинематикой станка $t_{\min}$:

$$t_M \geq t_{\min} . \quad (2.61)$$

Проведенный технико-экономический анализ показал, что за критерий оптимизации тонкого шлифования может быть принята производительность процесса. Уравнение (в этом случае будет являться функции оптимизации режима шлифования ($Q_M = C_M \cdot V_K^{W_M} \cdot V_H^{X_M} \cdot S^{Y_M} \cdot t_M^{Z_M}$).

Все рассмотренные выше равенства, соответствующие техническим ограничениям, и функция оптимизации представляют в совокупности математическую модель процесса шлифования, таблица 2.4.

Таблица 2.4 – Математическая модель процесса шлифования

№	Ограничения изменения режима шлифования	Неравенство
1	Заданная производительность станка	$V_K^{W_M} \cdot V_H^{X_M} \cdot S^{Y_M} \cdot t_M^{Z_M} \geq \frac{\pi \cdot d \cdot l \cdot \Pi \cdot R}{C_M \cdot (60K_3 - R \cdot T'_B)}$
2	Заданная шероховатость поверхности	$C_R \cdot V_K^{W_R} \cdot V_H^{X_R} \cdot S^{Y_R} \cdot t_M^{Z_R} \leq Ra_{\max}$
3	Допустимый износ круга из условия получения точности	$V_K^{W_a} \cdot V_H^{X_a} \cdot S^{Y_a} \cdot t_M^{Z_a} \leq \frac{\delta_{\text{дон}} \cdot \pi \cdot D \cdot B^2}{C_a \cdot a_0 \cdot j \cdot l}$
4	Радиальное усилие, допускаемое прочностью закрепления абразивного зерна в круге	$V_K^{W_y} \cdot V_H^{X_y} \cdot S^{Y_y} \cdot t_M^{Z_y} \leq \frac{[\sigma_y] \cdot l_K}{C_y}$
5	Скорость круга, допускаемая его прочностью	$V_K \leq V_{K.D.}$
6	Мощность электродвигателя привода круга	$V_K^{W_{z+1}} \cdot V_H^{X_z} \cdot S^{Y_z} \cdot t_M^{Z_z} \leq \frac{N_{\text{э}} \cdot \eta}{C_z}$
7	Максимальная скорость круга	$V_K \leq V_{K \max}$
8	Минимальная скорость круга	$V_K \geq V_{K \min}$
9	Максимальная скорость детали	$V_H \leq V_{H \max}$
10	Минимальная скорость детали	$V_H \geq V_{H \min}$
11	Наибольшая продольная подача	$S \leq S_{\max}; \quad S \leq \frac{S_D \cdot B \cdot V_H}{\pi \cdot D}$
12	Наименьшая продольная подача	$S \geq S_{\min}$
13	Наибольшая поперечная подача	$t_M \leq t_{\max}$
14	Наименьшая поперечная подача	$t_M \geq t_{\min}$
15	Функция оптимизации	$f_0 = Q_M = C_M \cdot V_K^{W_M} \cdot V_H^{X_M} \cdot S^{Y_M} \cdot t_M^{Z_M}$

Для проведения системы неравенства, и функция оптимизации к линейному виду достаточно прологарифмировать правые и левые части неравенства и функции оптимизации.

Однако наличие оптимальных циклов еще не гарантирует стабилизации качества выпускаемой продукции. Вследствие воздействия на процесс возмущающих факторов. Поэтому необходимо дальнейшее совершенствование алгоритмов управления процессом за счет применение систем с обратной связью, позволяющих осуществлять непрерывную оценку параметров состояния технологического процесса в реальном масштабе.

Для построения математической модели процесса необходимы экспериментальные исследования.

2.3.3. Пути обеспечения стабильности показателей качества при круглом шлифовании

Таким образом, повышение эффективности операций шлифования возможно за счет применения систем с обратной связью, компенсирующих воздействие на объект возмущающих факторов (табл. 2.5).

Таблица 2.5 – Основные возмущения на операциях шлифования

СТАНОК		
1	2	3
Возмущающие воздействия	Характер и степень влияния	Методы компенсации
Колебания жесткости	Систематические Существенно	Увеличение жесткости узлов станка
Люфт в механизме поперечной подачи	Систематические Существенно	Применение безлюфтовых передач
Упругие и температурные деформации	Систематические Не существенно	Предварительный прогрев, компенсация в комплексе текущих размерных отклонений
Изменение состава и расхода СОЖ	Случайный Не существенно за время обработки одной детали	Стабилизация состава СОЖ
ПРИСПОСОБЛЕНИЕ		
Упругие деформации	Систематические	Увеличение жесткости
Упругие деформации	Систематические	Увеличение жесткости

Продолжение таблицы 2.5

1	2	3
Неточность установки	Случайный Не существенна	Компенсация в комплексе текущих размерных отклонений
ИНСТРУМЕНТ		
Колебания твердости круга	Случайный Не существенно	Компенсация отклонений по результатам оценки
Линейный и размерный износ шлифовального круга	Систематические Не существенно	Компенсация отклонений по результатам оценки
Колебание режущей способности шлифовального круга	Случайный Существенно	Изменяются в пределах 1,5...2 раза Стабилизация режима, компенсация отклонений по результатам оценки
Отклонения формы и дисбаланс круга вследствие неравномерного износа	Периодический за время обработки одной детали Существенно	Правка круга, компенсация отклонений по результатам оценки
ДЕТАЛЬ		
Отклонение геометрии заготовки от заданной	Случайный Не существенно	Компенсация отклонений по результатам оценки
Изменение физико-химических свойств заготовки	Случайный Не существенно	Компенсация отклонений по результатам оценки
Отклонение геометрии заготовки от заданной	Случайный Не существенно	Компенсация отклонений по результатам оценки

Вышеперечисленный анализ показывает, что основной причиной неравномерного съема материала, образования волнистости и шероховатости на обработанной поверхности является нестационарность фактической глубины резания, вызванная отклонениями формы и дисбалансом шлифовального круга (рис. 2.8), которая недоступна прямому измерению. Вследствие относительной малости зоны контакта, непосредственное измерение в этой зоне фактической глубины резания t_f прямыми методами весьма затруднительно, что приводит к необходимости косвенных или совокупных измерений.

Одним из путей оценки (диагностики) t_f является определение координат центра круга относительно поверхности детали при известном начальном значении расстояния от базовой плоскости до центра вращения шлифовального круга и скорости его изменения.

Такие измерения невозможно осуществить точно вследствие того, что ряд факторов, воздействующих на процесс обработки, не имеющих закономерного характера, оказывает существенное влияние на погрешность измерений. В частности, случайным оказывается текущее отклонение радиус-вектора шлифовального круга.

Решение задачи об оценке не измеряемых параметров может быть обеспечено применением подхода, основанного на применении схем со «стохастическим наблюдателем» [26], где оценка не измеряемых компонентов производится по результатам моделирования динамики технологической системы с входным сигналом, соответствующим сигналу управления, поступающему на реальный динамический объект – технологическую систему.



Рисунок 2.8 – Формирование качества поверхностного слоя при круглом наружном шлифовании

Для учета влияния статистических свойств текущих отклонений радиус-вектора шлифовального круга и толщины заготовки необходимо дополнительно к входному сигналу подавать на вход модели системы случайный процесс с такими же стохастическими характеристиками, как у текущего отклонения радиус-

вектора шлифовального круга. Соответствующий случайный входной сигнал может быть получен при помощи формирующего фильтра (рис. 2.9.) [26].

Выходная координата формирующего фильтра по своим статистическим параметрам соответствует параметрам компоненты динамической системы, характеризующей процессы воздействия шлифовального круга на заготовку в процессе шлифования. Для настроек формирующего фильтра используются результаты статистической обработки профилограмм рабочей поверхности шлифовального круга

С течением времени, значения переменных и их оценок наблюдателем неизбежно расходятся вследствие, например, отличий действительных значений отклонений радиус-векторов и их моделей. Целесообразно использование блока подстройки состояний наблюдателя в форме фильтра Калмана-Бюсси, который осуществляет необходимую коррекцию входных сигналов, обеспечивая минимально возможное значение среднеквадратического отклонения [26].

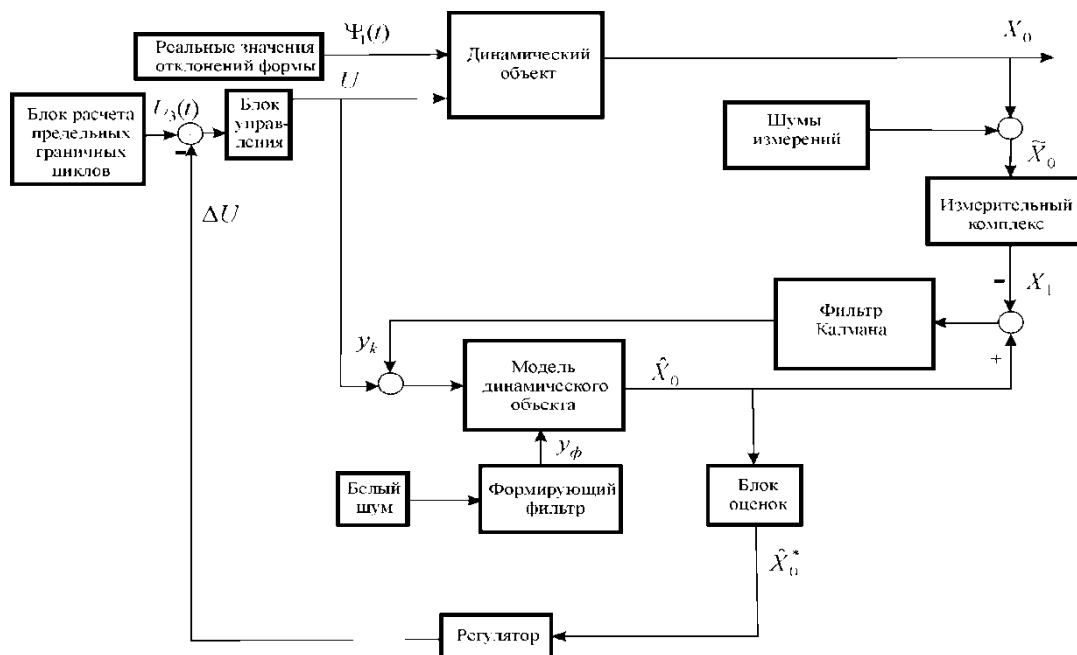


Рисунок 2.9 – Система управления, обеспечивающая реализацию предельных граничных циклов

Полученные оценки имеют наименьшую из возможных дисперсию (при условии гауссовских шумов измерений) и пригодны для использования в систе-

мах управления по отклонению. Такая система (рис. 2.9.) должна стабилизировать режимы относительно режимов, задаваемых условиями граничного технологического цикла с минимально допустимыми запасами.

Таким образом, для решения проблемы обеспечения стабильности заданных параметров качества поверхностей при высокопроизводительном чистовом и тонком шлифовании на автоматизированном оборудовании необходимо:

- выполнить формализованное описание операции шлифования, учитывающее наличие процессов формообразования, кинематику движений детали, инструмента изменение формы его рабочей поверхности, качество поверхности заготовки и осуществить проверку адекватности полученных зависимостей;

- сформировать технические ограничения, на основе полученного описания и известных методов оптимизации и критериев эффективности рассчитать предельные граничные циклы;

При расчете циклов 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, уравнение (2.5), например методом итерации. Учитывая, что на первом шаге вся поперечная подача идет на приращение глубины

микрорезания и радиальный съём 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 съём металла, износ вершин зерен, шероховатости поверхности, глубина дефектного слоя, величина не удаленной 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.

2.4. Выводы по главе 2

1. Для решения поставленных задач и целей процесс рассматривается как динамическая система, где процесс формообразования поверхности исследуется не только в пространстве, но и во времени. На основе системного подхода рассмотрена структура процесса шлифования, сформулированы основные положения и принципы анализа процесса шлифования.

2. При структурном анализе процесс шлифования расчленен по функциональным признакам на подсистемы "Процесс резания" и "Технологическая система". Определены входные, выходные переменные и параметры состояния каждой из подсистем.

3. Выявлено, что среди исследованных факторов наибольший вклад в образование волнистости вносят колебания фактической глубины резания, вызванные отклонениями формы и дисбалансом шлифовального круга.

4. Предложены методы стабилизации фактической глубины резания технологической системы за счет диагностики процесса с помощью стохастического наблюдателя.

5. Для учета статистических свойств текущих отклонений радиус-векторов шлифовального круга и заготовки предложено синтезировать формирующий фильтр.

6. Предложено использовать полученные оценки для синтеза автоматической системы управления, обеспечивающей стабилизацию параметров качества в процессе шлифования, шеек валов корабельных валопроводов в реальном масштабе времени.

ГЛАВА 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОПЕРАЦИИ КРУГЛОГО НАРУЖНОГО ШЛИФОВАНИЯ

3.1. Задачи и методика экспериментальных исследований

Основными задачами экспериментальных исследований являются:

- изучение влияния характеристик шлифовального круга на параметры точности и шероховатости деталей в ходе протекания процесса врезного шлифования;
- получение ряда коэффициентов и эмпирических формул, необходимых для выполнения численных расчетов параметров обработки;

Экспериментальные исследования выполнялись в лабораториях кафедры технологии машиностроения Севастопольского государственного университета, и на ряде машиностроительных и судоремонтных предприятий. Опыты проводили на кругло шлифовальных станках модели RSM M 500B» и BUA16 (рис. 3.1 – 3.3). Для расширения технологических возможностей станка BUA16 его привод поперечных подач был модернизирован.



a

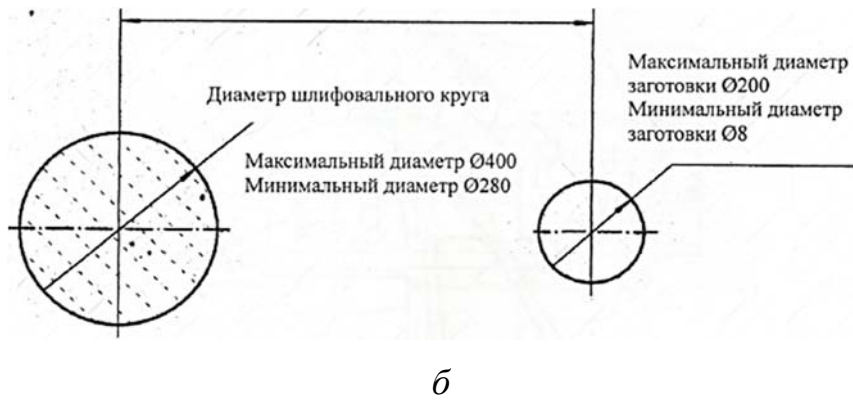
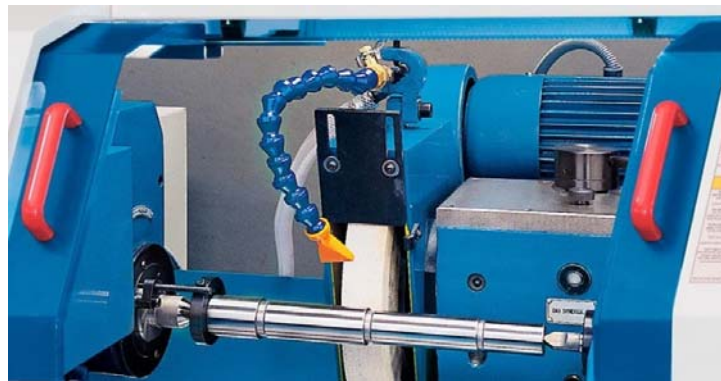


Рисунок 3.1 – Общий вид станка ЧПУ мод. RSM М 500В (а) и габариты (б) используемых инструментов и заготовок

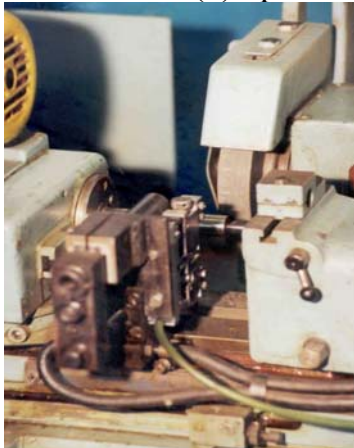


а



б

Рисунок 3.2 – Общий вид системы ЧПУ фирмы Fagor 8055i FL-TCO (а) и пример выполнения (б) простого программирования шлифовальных циклов



а



б

Рисунок 3.3 – Стенд на базе станка BU16 а) общий вид станка; б) тензометрические центра

За основные показатели процесса шлифования шеек валов корабельных валопроводов, в соответствии с данными литературного обзора, были приняты:

1) съем материала Δr , мм (производительность шлифования Q_M , мм³/мин);

- 2) шероховатость поверхности после шлифования Ra , мкм;
- 3) износ круга ΔR , мм; S_R мм/с; (Q_a , мм³/мин);
- 4) радиальное усилие шлифования P_y , Н;
- 5) тангенциальное усилие шлифования P_z , Н;
- 6) стойкость круга между правками T_{Π} , мин;
- 7) средняя высота волн на поверхности шлифовального круга $W_{кр}$, мкм;
- 8) средняя высота волн на поверхности детали $W_{дcp}$, мкм
- 9) физико-механические свойства поверхностных слоев.

Для определения показателей процесса шлифования при проведении опытов в лабораторных условиях проводились замеры: радиального съема металла Δr , мкм; шероховатости поверхности, составляющих силы резания, остаточных напряжений в поверхностных слоях заготовки, среднего износа круга шлифовального круга, по радиальному съему металла оценивали производительность процесса шлифования. В лабораторных условиях также производились исследования по определению, коэффициентов выдавливания и повышения шероховатости.

Для оценки влияния уровня вибраций шлифовальной бабки станка и жесткости станка на процесс шлифования станками в лабораторных условиях была проведена также серия опытов на станке RSM M 500B. Амплитуда вибраций шлифовальной бабки станка при двойной балансировке круга равнялась 4-6 мкм, станка BU16-14-16 мкм. Амплитуда вибраций определялась универсальным балансировочным прибором модели УБП-1.

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).

Испытание шлифовальных кругов в лабораторных условиях проводились при шлифовании образцов из стали с 40Х в состоянии поставки и стали 45, термообработанных на твердость HRC=55...60 ед., которые нашли широкое приме-

нение при изготовлении валов корабельных валопроводов. Эскизы образцов для лабораторных испытаний приводятся на рисунке 3.4.

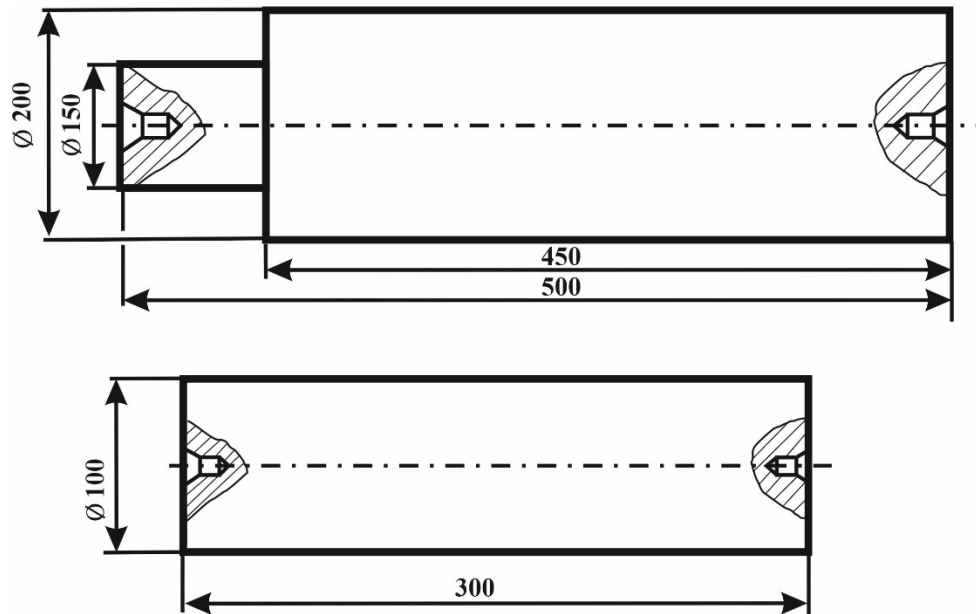


Рисунок 3.4 – Эскизы образцов для лабораторных испытаний

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/сек; скорости детали V_d , м/мин; продольной подачи S , м/мин; поперечной подачи t_m , мкм/мин. При исследовании влияния на показатели процесса использовались методы планирования экспериментов. Подробные методики и результаты исследований приводятся в списке использованных источников [295,296].

Выбор материалов и характеристик шлифовальных кругов обусловлен их широким использованием на машиностроительных предприятиях. Диапазон исследуемых режимов резания определялся по существующим рекомендациям [1]. Перед проведением экспериментов абразивные шлифовальные круги правили методом обтачивания алмазно-металлическим карандашом с продольной подачей $S_{x\text{ пр}} = 0,007$ м/с, поперечной подачей $S_{y\text{ пр}} = 0,03$ мм/дв.х, числом рабочих

проходов - 4, проходов выхаживания - 4.

Окончательно рабочую поверхность инструмента формировали шлифованием абразивного бруска на основе карбида кремния зеленого 63С F60 L аналогичных режимах.

При шлифовании в качестве СОТС использовали растворы, рекомендованные для обработки соответствующей категории материалов [1, 143, 144].

Жидкость в зону резания подавали свободно падающей струей при минутном расходе $0,2 \dots 0,25 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

Перед выполнением экспериментов оборудование прогревали, контролировали настройку измерительной аппаратуры и режимы резания.

Съем материала Δr определяли с помощью микрометра как среднее значение разности диаметров заготовки до, и после обработки, измеренных в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а также с помощью индикатора часового типа по разнице размеров диаметров заготовки до установки на станок и после обработки. Погрешность измерения составила $\pm 0,005 \text{ мм}$.

Параметры режимов резания (частота вращения инструмента и заготовки, радиальная подача) контролировали при проведении экспериментальных исследований с помощью секундомера, стрелочного тахометра и стробоскопического тахометра модели 2ТСт 32-456.

Силы резания P измеряли с помощью тензометрических датчиков (рис. 4.3б), наклеенных на центры станка по известным методикам [1, 3]. Для измерения сил резания применяли динамометрические центра (передний и задний), снабженные проволочными тензорезисторами (датчиками сопротивления), между которыми закреплена заготовка. Два динамометрических центра позволяют фиксировать силы резания в процессе шлифования при любом положении шлифовальной ленты относительно обрабатываемой детали. Проволочные датчики, наклеенные на вертикальных плоскостях переднего и заднего центров, соединены в один мост и используются для измерения силы P_y (рис. 3.5). Датчики, наклеенные на горизонтальных плоскостях обоих центров, используются для измерения силы P_z . Схема измерения включает динамометрические центра, усилитель, аналого-

цифровой преобразователь ЛА-50USB, подключенный к персональному компьютеру по известной методике. Тарировка тензометрических центров осуществлялась статическим нагружением. Масштаб тарировки определялся аппроксимацией по методу наименьших квадратов. Тарировочный график имел линейный характер. Общая погрешность при использовании данной методики составляет 10%.

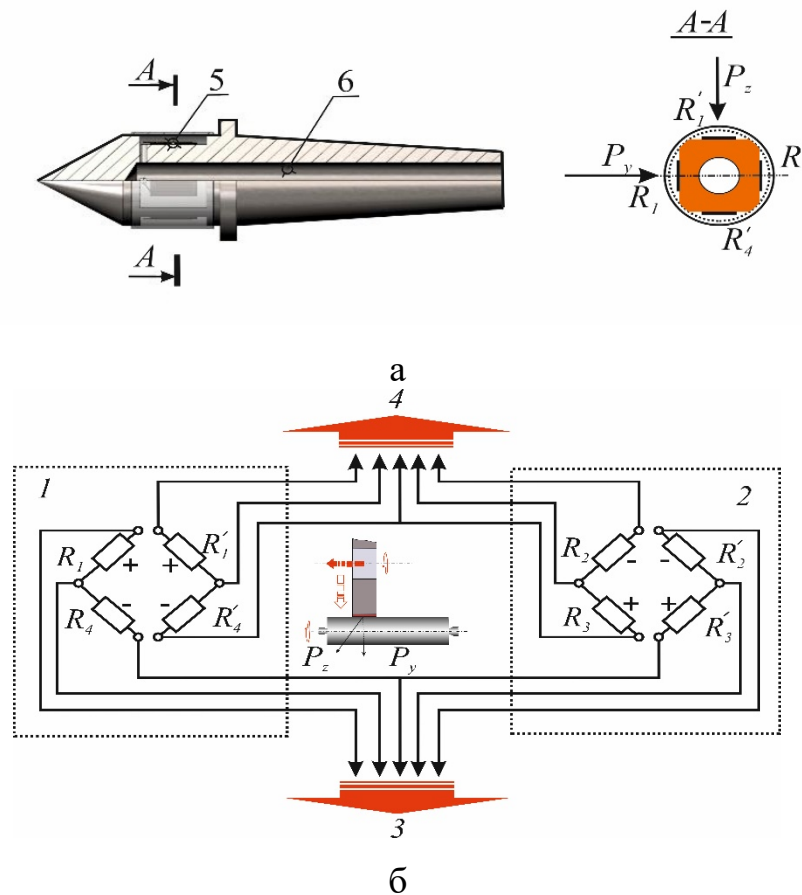


Рисунок 3.5 – Тензометрические центры: а) Схема тензометрических центров; б) схема включения проволочных датчиков сопротивления для измерения сил P_y и P_z . (1 – передний центр; 2 – задний центр; 3 – провода к прибору для измерения силы P_y ; 4 – провода к прибору для измерения силы; 5 – датчики; 6 – отверстие для вывода проводов); б) фотография тензометрических центров

Радиальный износ (ΔR) шлифовального круга оценивали по разности показаний индикатора, устанавливаемого последовательно на базовую площадку, формируемую при правке круга, и рабочую поверхность круга до и после шлифования. Замеры проводили в 8 точках индикатором с плоской головкой с ценой деления 1 мкм.

Радиальный износ в единицу времени (S_R) вычисляли как отношение радиального износа (ΔR) к времени работы инструмента.

Оценку отклонений формы круга методом основанным на изменении разности показаний индикатора последовательно устанавливаемого на поверхность круга в 8 точках, равномерно распределенных по окружности на выбранном расстоянии от оси его вращения. Настройку на исследуемое поперечное сечение выполняли с помощью рисок на столе и станине станка с точностью ± 0.5 мм.

Форму осевого сечения рабочей поверхности шлифовального круга (профиль круга) представляли в виде кривой, характеризующей изменение по высоте круга (координата X) расстояний от базовой до рабочей поверхности инструмента (координата Y). Значение координаты Y определяли традиционными методами [134, 135] в 6-10 сечениях круга, а координату X изменяли (в зависимости от требуемой точности) на 0,5-2,0 мм.

Шероховатость поверхности измеряли с помощью профилометра Mitutoyo Surftest SJ-210. Прибор предназначен для измерений параметров шероховатости поверхностей изделий, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию (образующие цилиндрических поверхностей; отверстия; плоские поверхности) или дугу окружности. Действие прибора основано на принципе ощупывания неровностей исследуемой поверхности алмазной иглой (щупом) и преобразования возникающих при этом механических колебаний щупа в изменения напряжения, пропорциональные этим колебаниям, которые усиливаются и преобразуются в микропроцессорном блоке. Результаты измерений выводятся на жидкокристаллический дисплей (в виде числовых значений параметров шероховатости, профиля поверхности, кривых распределения). В качестве щупа используется алмазный наконечник радиусом 2 мкм. Диапазон измерений, мкм: 360/0,02 (от-200 до+160). Предел допускаемой основной систематической погрешности составляет 5%.

Показатели волнистости обработанной поверхности определяли по известным методикам [147] с использованием профилометров - профилографов моде-

лей 201 и "Talisurf 5M - 120". При построении волнограмм применяли механическую фильтрацию шероховатости.

Для экспериментального определения значений коэффициентов K_b и K_R была поставлена серия опытов по резанию-царапанию полированных образцов из стали 40X HRC=55...60 алмазной пирамидой с углом при вершине 136° , радиусом при вершине 60 мкм и серия опытов по резанию-царапанию образцов зернами абразивного бруска 64С Р220 высотой 10мм, углом при вершине 45° .

Для проведения опытов алмазная пирамида (1) закреплялись в металлическом диске (2), установленном на планшайбу кругло шлифовального станка, рисунок 3.6.

Для получения рисок с разной глубиной при резании-царапании алмазной пирамидой ось детали (4) отклонялась поворотом стола от линии его движения на $1-2^\circ$. Резание-царапание алмазной пирамидой проводилось при четырех скоростях 6, 10, 20 и 38 м/сек. Резание-царапание зернами абразивного бруска проводилось при скорости бруска 35 м/сек, скорости детали 40 м/мин, $S = 1,0$ м/мин, поперечной подачи $t = 0,05$ мм/ход. В качестве СОТС применялся 3%-й раствор кальцинированной соды. Коэффициент выдавливания оценивали отношением суммы площадей сечений навалов S_1 и S_2 к площади сечения царапин S (рис. 3.6). Замер площадей S_1 , S_2 , f_{cp} определяли по результатам расшифровки профилограмм, снятых в поперечном сечении царапины и навалов.

Результаты обработки профилограмм обсчитывались по методу наименьших квадратов.

Для оценки физико-механических свойств поверхностных слоев деталей, шлифованных на оптимальных режимах, было изучено распределение в поверхностных слоях микротвердости и остаточных напряжений.

Исследования по распределению остаточных напряжений первого рода проводились на четырех партиях колец, шлифованных кругами 1 300x50x127 24А F90 L V 35м\с при $V_{II} = 20$ м/мин; $S = 0,25$ м/мин; $t_M = 4$ мкм/мин. Припуск на тонкое шлифование $П = 0,01 - 0,05$ мм. Остаточные напряжения оценивались по

деформации кольца после разрезки и после снятия слоя с наружной поверхности электрополированием.

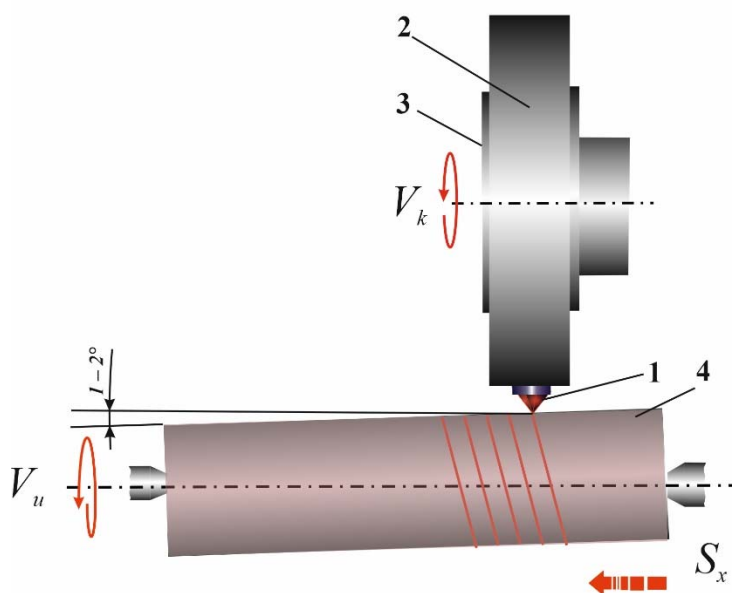


Рисунок 3.6 – Схема резания-царапания детали алмазным конусом и абразивным бруском на кругло шлифовальном станке

Для электрополирования образец, покрытый с внутренней стороны эпоксидной смолой, на специальной державке вместе с эталонным кольцом, покрытым со всех сторон эпоксидной смолой, погружался в стеклянную ванну. Ванна заполнялась электролитом состава:

ортофосфорная кислота H_3PO_4 - удельный вес $1,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 65%;

серная кислота H_2SO_4 - удельный вес $1,84 \cdot 10^3 \text{ кг/...}$ – 15%;

хромовый ангидрид – 5%;

вода – 14%.

Для стравливания поверхностного слоя к полируемому образцу и свинцовому катоду 5 подводилось напряжение постоянного тока 4 вольта. Плотность тока при электрополировании поддерживалась равной 25 А/дм^2 . Температура ванны поддерживалась в пределах $28...30^\circ\text{C}$.

Для непрерывной регистрации деформаций кольца при его полировании на рабочее и эталонное кольца наклеивались тензодатчики сопротивлением 200Ω .

Датчики подсоединялись по мостовой схеме. Остаточные напряжения определялись по методу Давиденкова Н.Н. [24].

Исследование распределения микротвердости в поверхностных слоях проводилось на четырех партиях образцов из стали 45, шлифованных кругами 1 300x50x127 24A F90 L V 35м/с, 1 300x50x127 24A F46 L V 35м/с при $V_k = 20$ м/сек; $V_{II} = 20$ м/мин; $S = 0,25$ м/мин; $t_M = 4$ мкм/мин.

Припуск на тонкое шлифование – $\Pi = 0,03 - 0,04$ мм. Микротвердость измерялась на приборе HRBV-187.5D при нагрузке 20 грамм. Повторность замеров микротвердости была принята - 10-15-ти кратной.

Для исследования микротвердости по глубине после каждого замера с образца стравливался слой 1,5-3 мкм. Химическое полирование образцов проводилось при температуре 70-75°C в растворе состава:

кислота серная уд. веса 1,84	230 г/л
кислота азотная уд. веса 1,4	40 г/л
кислота соляная уд. веса 1,19	70 мл/л
натрий хлористый	6 г/л
клей костный	12 г/л

Величина стравленного слоя a_i устанавливалась по записи полированной и неполированной поверхности на профилографе-профилометре Mitutoyo Surftest SJ-210, для чего часть поверхности покрывалась перед травлением резиновым клеем.

Степень пластической деформации поверхностного слоя оценивалась:

а) глубиной пластически деформационного слоя, определяемой значениями слоя z_i , при которых величина микротвердости становится постоянной, мкм;

б) степенью упрочнения поверхностного слоя, определяемой отношением микротвердости верхнего слоя обработанной поверхности к микротвердости исходной структуры.

3.2. Основные результаты экспериментальных исследований

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

Математическое описание зависимостей выполнили позиномом

$$\bar{y} = C_y x_1^{b_1} x_2^{b_2} x_3^{b_3} x_4^{b_4} x_5^{b_5} x_6^{b_6}, \quad (3.1)$$

$\ln Q_M = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4$ где $\bar{y}$ – среднее значение контролируемого параметра;

$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ – значения варьируемых параметров;

$C_y, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ – эмпирические коэффициенты.

Обработку результатов экспериментов проводили в соответствии с РДМУ 109-77 [67]. В таблице 3.1 приведены значения интервалов варьирования, и результаты обработки данных по исследованию износа шлифовального круга в единицу времени S_R . Порядок выполнения опытов был рандомизирован с помощью таблиц случайных чисел.

Среднее значение контролируемого параметра $\bar{y}$ в каждой из N точек плана, определяли в логарифмическом масштабе по данным трех наблюдений (повторяемость $m = 3$). Для оценки отклонения контролируемого параметра от среднего значения по данным m выполненных наблюдений вычисляли дисперсию воспроизводимости S_v^2 . При проверке гипотезы однородности дисперсий использовали G - критерий Кохрена, равный отношению максимальной дисперсии $S_{v_{\max}}^2$ к сумме дисперсии $\sum S_v^2$.

Задаваемый уровень значимости $q = 5\%$, число степеней свободы $V_{1b} = m - 1 = 2$ и $V_{2b} = N = 8$. Вследствие однородности дисперсии усредняли. Коэффициенты регрессии b_i определяли умножением данных $\bar{y}$ на данные

Таблица 3.1– Значения интервалов варьирования переменных и результаты обработки данных по исследованию износа шлифовальных кругов

Контролируемые переменные						l_0 , мкм	h_0 , мм	V , м/с	S_y , мм/мин	Аппроксимирующая зависимость						
Верхний уровень						400	3,90	0,84	0,8	$\ln S_R = 4,423 - 1,019 \ln l_0 - 0,295 \ln h_0 +$ $+ 0,272 \ln V_u + 1,401 \ln S_y$ $S_R = 1,49 l_0^{-1,019} h_0^{-0,295} V_u^{0,272} S_y^{1,401}$						
Нижний уровень						160	2,40	0,21	0,2							
Основной уровень						280	3,15	0,53	0,5							
Интервал варьирования						120	0,75	0,32	0,3							
Матрица планирования экспери- мента						Результаты эксперимента и дисперсии отклонений					Проверка одно- родности диспер- сий		Проверка адекватности			
№ точ- ки	Контролируемые параметры															
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}_1$	S_v^2	$\sum_{v=1}^N S_v^2$	0,2155	$\sum_{v=1}^N (\bar{y}_v - y_v)^2$	0,0171		
1	+	+	+	+	+	1,807	1,731	1,663	1,750	0,0059	$S_{v\max}^2$	0,0667	$S_{\text{ад}}^2$	0,0128		
2	+	-	+	+	-	-1,321	-1,078	-1,078	-1,159	0,0098	G	0,3095	F	0,48		
3	+	-	+	-	+	0,094	0,605	0,414	0,371	0,0667	$q\%$	5	$q_{\text{ад}}$	5		
4	+	+	+	-	-	-0,823	-0,381	-0,535	-0,580	0,0059	$V_{1в}$	2	$V_{1\text{ад}}$	4		
5	+	-	-	+	+	0,614	0,839	0,535	0,663	0,0503	$V_{2в}$	8	$V_{2\text{ад}}$	16		
6	+	+	-	+	-	-0,416	-0,301	-0,494	0,404	0,0249	$G_{\text{кр}}$	0,5157	$F_{\text{кр}}$	3,01		
7	+	+	-	-	+	1,412	1,008	1,171	1,197	0,0413	Вывод	$G < G_{\text{кр}}$	Вывод	$F < F_{\text{кр}}$		
8	+	-	-	-	-	-1,615	-1,576	-1,645	-1,645	0,0076						
Коэф. b_i	0,0241	0,4666	0,0713	0,1887	0,9711	Проверка значимости коэффициентов									Вывод: b_0 - незначим	
						$S^2\{b_i\}$	$S^2\{b_i\}$	$q\%$	$V_{\text{зн}}$	$t_{\text{кр}}$	t_o	t_1	t_2	t_3		t_4
						0,0011	0,0335	5	16	2,119	0,719	13,928	2,128	5,621		28,988

x_{iV} в кодовых обозначениях с последующим делением полученного произведения на общее число точек в плане матрицы N . Затем по усредненной дисперсии, общему числу точек в плане и числу параллельных наблюдений m вычисляли среднеквадратические отклонения дисперсии ошибки $S^2\{b_i\}$ и $S\{b_i\}$ полученных коэффициентов регрессии b_i . Гипотезу о значимости коэффициентов регрессии проверяли по критерию Стьюдента. задаваемый уровень значимости принимали равным $q = 5 \%$, число степеней свободы $V_{3H} = N(m-1) = 16$.

Адекватность полученной модели оценивали по F - критерию Фишера на основе вычисленной дисперсии адекватности S^2_{ad} при принятом уровне значимости $q = 5 \%$, числе степеней свободы $V_{1ad} = N - l = 4$ (l - число значимых коэффициентов) и $V_{2ad} = (m-1) = 16$.

Для получения конечных зависимостей проводили замену переменных в уравнении регрессии и приводили его к степенному виду. Полученные в результате факторного эксперимента данные изменения составляющих силы резания P_y и P_z , параметров качества детали волнистости W_{qcp} , и шероховатости R_a за период стойкости шлифовального круга, аппроксимировали зависимостью вида:

$$y = A \cdot \exp(\alpha T), \quad (3.2)$$

$$A = a_0 + a_1 l_0 + a_2 h_0 + a_3 V_u + a_4 S_y, \quad (3.3)$$

$$\alpha = b_0 + b_1 l_0 + b_2 h_0 + b_3 V_u + b_4 S_y, \quad (3.4)$$

где a_i и b_i – коэффициенты математической модели; T – время работы инструмента после правки, мин. Для этого в каждой точке плана матрицы аппроксимацией по методу наименьших квадратов определяли значения коэффициентов A_i и α_i и коэффициента корреляции r (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Значения коэффициентов модели и индекса корреляции при исследовании изменений силовых параметров и шероховатости деталей за период стойкости круга

№ точки	P_y			P_z			R_a			W_{dcp}		
	A	α	r	A	α	r	A	α	r	A	α	r
1	64,620	0,100	0,57	25,852	0,047	0,68	0,914	0,188	0,81	6,826	0,262	0,82
2	31,875	0,006	0,88	16,659	0,005	0,63	0,388	0,002	0,44	2,108	0,008	0,79
3	69,118	0,012	0,46	33,953	0,010	0,42	0,507	0,021	0,78	3,053	0,026	0,66
4	27,180	0,006	0,73	13,073	0,006	0,74	0,504	0,007	0,92	3,010	0,010	0,82
5	91,905	0,035	0,88	40,314	0,018	0,59	0,737	0,019	0,56	3,727	0,070	0,77
6	37,660	0,011	0,57	19,965	0,010	0,76	0,497	0,007	0,66	2,661	0,008	0,60
7	75,670	0,031	0,74	28,537	0,036	0,61	0,866	0,031	0,44	4,624	0,064	0,70
8	31,040	0,005	0,75	15,045	0,005	0,83	0,308	0,005	0,73	2,045	0,008	0,63

Коэффициенты a_i и b_i аппроксимирующей зависимости (3.2) – (3.4) рассчитывали по вышеизложенной методике. Результаты вычислений приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Математические модели выходных показателей процесса круглого наружного шлифования с учетом их изменения за период стойкости круга

Наименование	Вид математической зависимости	№
Нормальная составляющая силы резания	$P_y = (40,871 - 0,0220 \cdot l_0 - 7,2511 \cdot h_0 + 9,1490 \cdot V_u + 72,3211 \cdot S_y) \times$ $\times \exp \left[(-0,0733 + 0,0001 \cdot l_0 + 0,0059 \cdot h_0 + 0,0390 \cdot V_u + 72,32 \cdot S_y) \times T \right]$	(3.5)
Тангенциальная составляющая силы резания	$P_z = (21,2499 - 0,0193 \cdot l_0 - 2,3900 \cdot h_0 + 4,8299 \cdot V_u + 26,6219 \cdot S_y) \times$ $\times \exp \left[(-0,0224 + 0,0001 \cdot l_0 + 0,0003 \cdot h_0 + 0,0090 \cdot V_u + 0,0360 \cdot S_y) \times T \right]$	(3.6)
Среднее - арифметическое отклонение	$R_a = (0,5244 + 0,0009 \cdot l_0 - 0,1678 \cdot h_0 + 0,1397 \cdot V_u + 0,5529 \cdot S_y) \times$ $\times \exp \left[(-0,1818 + 0,0002 \cdot l_0 + 0,0257 \cdot h_0 + 0,0605 \cdot V_u + 0,0100 \cdot S_y) \times T \right]$	(3.7)
Средняя высота волнистости	$W_{dcp} = (-0,6144 + 0,0069 \cdot l_0 - 0,3278 \cdot h_0 + 1,0397 \cdot V_u + 3,529 \cdot S_y) \times$ $\times \exp \left[(-0,2240 + 0,0001 \cdot l_0 + 0,0263 \cdot h_0 + 0,0949 \cdot V_u + 0,1614 \cdot S_y) \times T \right]$	(3.8)

Анализ экспериментальных данных показывает, что с увеличением поперечной подачи S_y и зернистости шлифовального круга l_0 высотные параметры волнистости возрастают с большей скоростью, и период стойкости инструмента сокращается (рис. 3.7). С уменьшением твердости шлифовального круга снижается скорость волнообразования на его рабочей поверхности. Скорость изделия V_u не оказывает существенного влияния на высоту волн.

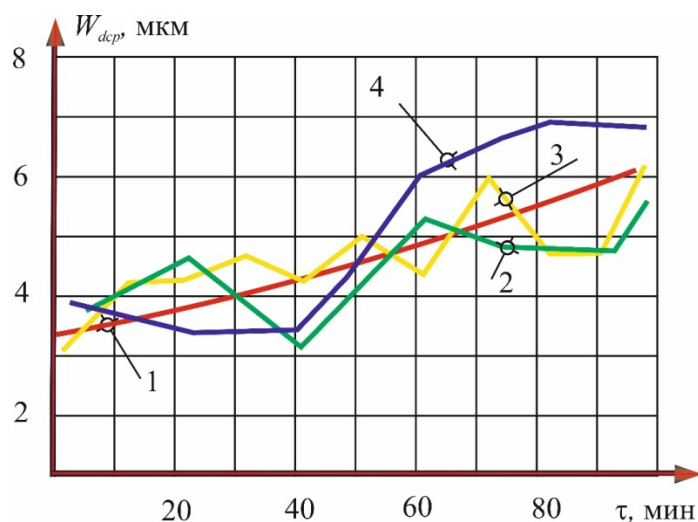


Рисунок 3.7 – Кривые изменения высоты волнистости на детали из стали 45, за период стойкости шлифовального круга ($V_k = 35$ м/с, $V_u = 0,80$ м/с, $S_0 = 0,002$ мм/об): 1 – теоретическая кривая; 2 – экспериментальная кривая 24A F60 N V 35 м/с; 3 – экспериментальная кривая 24A F60 L V 35 м/с; 4 – экспериментальная кривая 24A F60 P V 35 м/с

На рисунке 3.8 приведены графики изменения высоты волнистости $W_{кр}$ для кругов различных характеристик. Замеры $W_{кр}$ начинали после приработки инструмента в течение 2 мин.

Начальные высоты волнистости у кругов F46-ой и F54 -ой зернистости примерно равны и составляют 5...7 мкм (кривые 1 и 2). При одинаковой твердости, но различной зернистости (кривые 1 и 3 и 4) меньшую высоту волнистости после приработки и последующего шлифования наблюдали у кругов с зернистостью F70 и F90. Исходная волнистость на кругах сразу после правки в опытах практически не превышала 1 мкм.

Характер изменения рельефа рабочей поверхности инструмента во многом определяется режимом работы шлифовального круга.

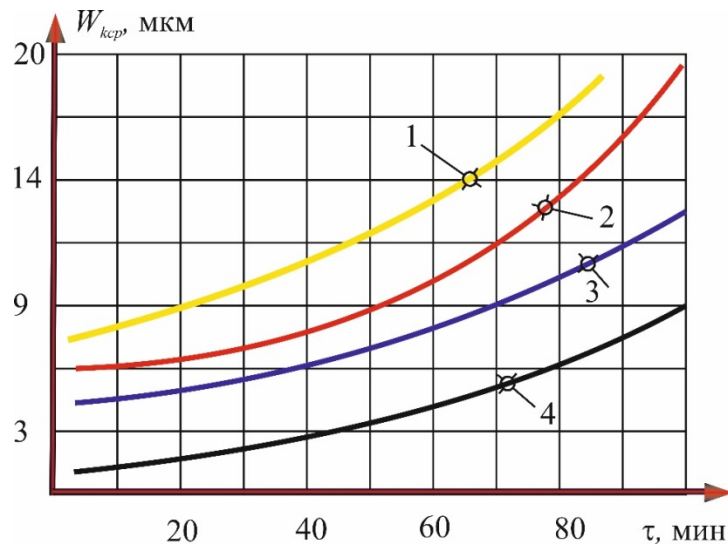


Рисунок 3.8 – Изменение высоты волнистости на кругах различных характеристик при шлифовании стали 45 (HRC 50...55): 1 – 24А F46 L V 35м/с; 2 – 24А F54 L V 35м/с; 3 – 24А F70 L V 35м/с; 4 – 24А F90 L V 35м/с ($V_k = 35$ м/с, $V_n = 0,80$ м/с, $S_0 = 0,002$ мм/об)

В режиме преимущественного затупления на выступах волн прогрессируют площадки износа, впадины постепенно углубляются в результате разрушения зерен под действием ударных нагрузок. Увеличиваются колебательные составляющие фактической глубины резания и силы. Вследствие этого возрастает амплитуда вибрации заготовки, а частота вынужденных колебаний ν_b с течением времени становится близкой частоте ее собственных колебаний ν_c . Износ рабочей поверхности инструмента неравномерен: во впадинах волн происходит выкрашивание не только отдельных зерен, но и целых блоков, высота волнистости непостоянна. Отличается износ со стороны наибольшего и наименьшего радиус-вектора круга. Большая по высоте волнистость наблюдается, как правило, со стороны большего радиус-вектора, что обусловлено явлением дисбаланса. Например, высота волнистости на отдельных участках круга 24А F90 L V 35м/с (рис. 3.8) от круга 24А F46 L V 35м/с к концу периода стойкости отличалась в 3...6 раз при средней высоте волн $W_{кр} = 17$ мкм.

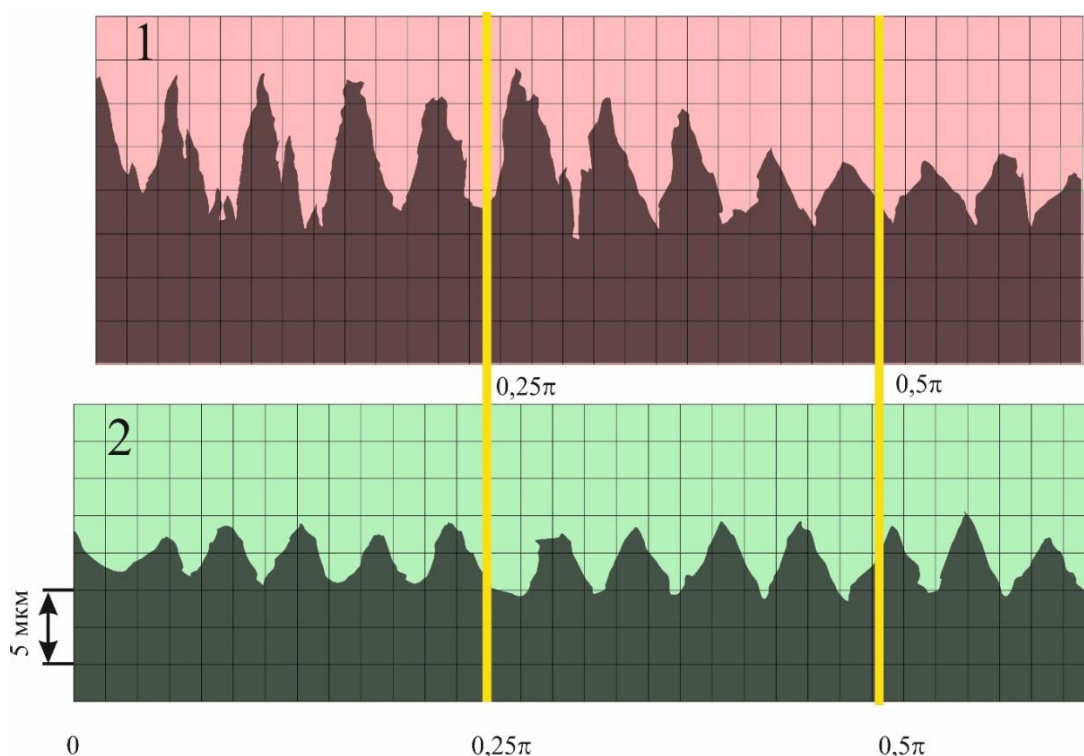


Рисунок 3.9 – Профилограммы участков поперечного сечения шлифовальных кругов, работавших в режиме затупления (1) 24A F90 L V 35м/с ($t = 12,5$ мин) и самозатачивания (2) 24A F46 L V 35м/с ($t = 40$ мин)

При режиме преимущественного самозатачивания волнистость возрастает медленнее. Это объясняется тем, что затупившиеся абразивные зерна, расположенные на выступах волн, периодически выкрашиваются из связки. Износ на впадинах и выступах волн при этом отличается незначительно, шаг волнистости (рис. 3.9) более равномерный. Вырывание зерен из инструмента наступает в тот момент, когда сила, действующая на единичное зерно, превысит прочность его закрепления в связке.

При шлифовании кругом 1 300x50x127 24A F46 P V 35 м/с стойкость составила 100 мин, а для круга 1 300x50x127 24A F46 H V - 80 мин. ($V_k = 35$ м/с, $V_u = 0,21$ м/с, $S_o = 0,0021$ мм/об). Значения силы вырывания зерен из связки P_c рассчитывались по методике [Леонов]. Рассчитанные значения P_c равнялись соответственно 25 Н и 50 Н. Самозатачивание происходило со средней периодичностью 8...10 мин. Момент "осыпания" наблюдали по звуку и показаниям прибора для регистрации сил резания. Средняя высота волнистости составила в конце периода стойкости $W_{кр} = 14$ мкм. Амплитуда колебаний шлифовальной бабки не превы-

шала 1 мкм. Работа инструмента в подобном режиме при соблюдении ограничения по требуемой производительности является наиболее благоприятной и обеспечивает высокую стабильность параметров качества. В отличие от преимущественного затупления (рис. 3.10) высота волнистости на детали $W_{гср}$ и шероховатость поверхности R_a с течением времени работы круга возрастают медленнее.

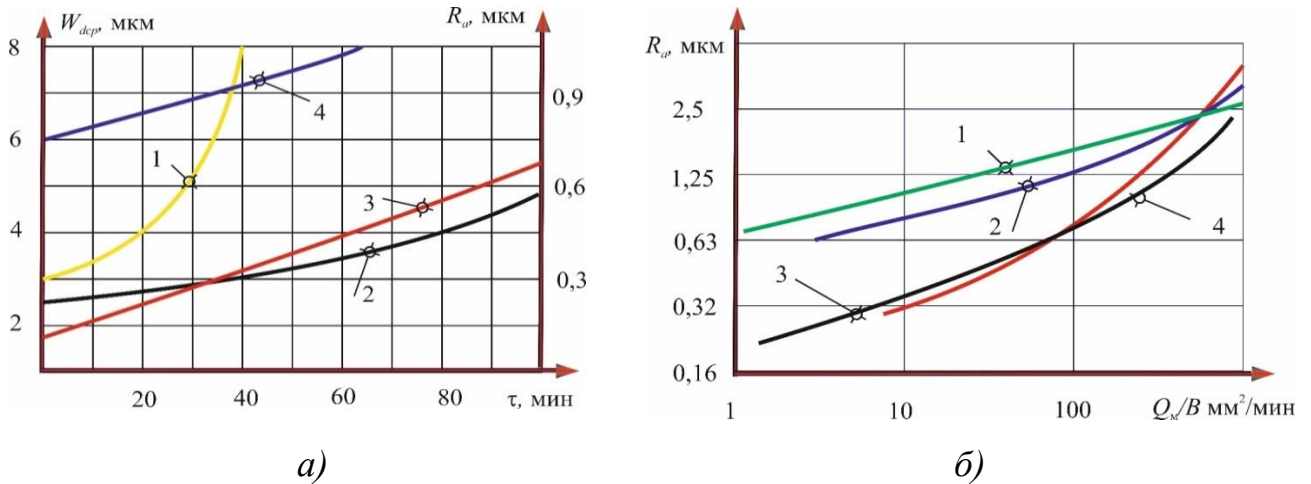


Рисунок 3.10 – Изменение в процессе шлифования: а) высоты волнистости и шероховатости поверхности при обработке стали 45 за период стойкости шлифовального круга 24A F46 L V 35м/с кривые 1, 4 – режим затупления; кривые 2, 3 – режим самозатачивания за период стойкости шлифовального круга 24A F46 P V 35м/с; б) шероховатости поверхности от удельной производительности процесса шлифования 1, 2 – 24A F46 L V 35м/с, 3, 4 – 24A F90 L V

Экспериментальные исследования по учету влияния пластических деформаций в зоне резания осуществляли по методике, представленной в пункте 3.1.

На рисунке 3.11 приводится пример зависимость изменения коэффициента выдавливания от скорости и глубины резания-царапания.

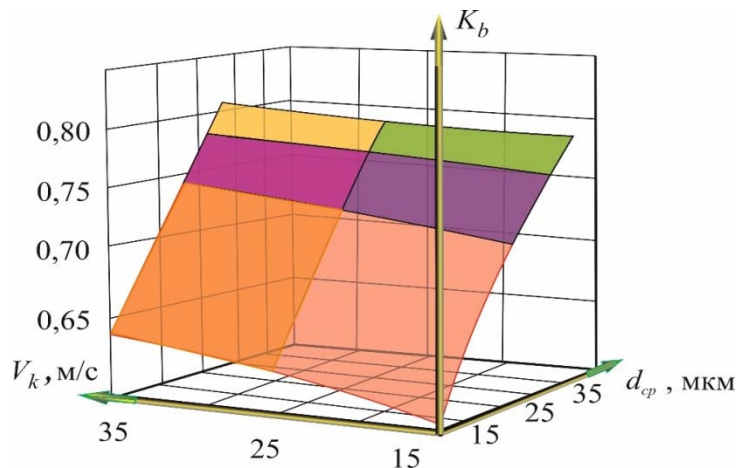


Рисунок 3.11 – Влияние скорости и глубины резания-царапания алмазным конусом на коэффициент выдавливания

Как показывают данные рисунка, коэффициент выдавливания уменьшается с увеличением глубины резания-царапания и скорости круга, при этом влияние скорости круга на коэффициент выдавливания значительно меньше влияния глубины резания-царапания.

Математической обработкой экспериментальных данных по 120 опытам была установлена следующая зависимость коэффициента выдавливания от глубины и скорости резания-царапания:

$$K_b = 1 - 0,34a_{cp}^{0,56} \cdot V^{0,06}; \quad (3.9)$$

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

где r_{ka} и r_{kV} – коэффициенты корреляции коэффициента K_b от глубины и скорости резания-царапания

Анализ уравнения (3.9) показывает, что показатель степени при скорости резания-царапания в 7 раз меньше показателя степени при глубине резания-царапания.

На рисунке 3.12 приводятся зависимости коэффициентов K_b и K_R от глубины резания-царапания зернами абразивного бруска.

Коэффициент выдавливания, как и резании-царапании алмазной пирамидой, уменьшается с увеличением глубины резания-царапания.

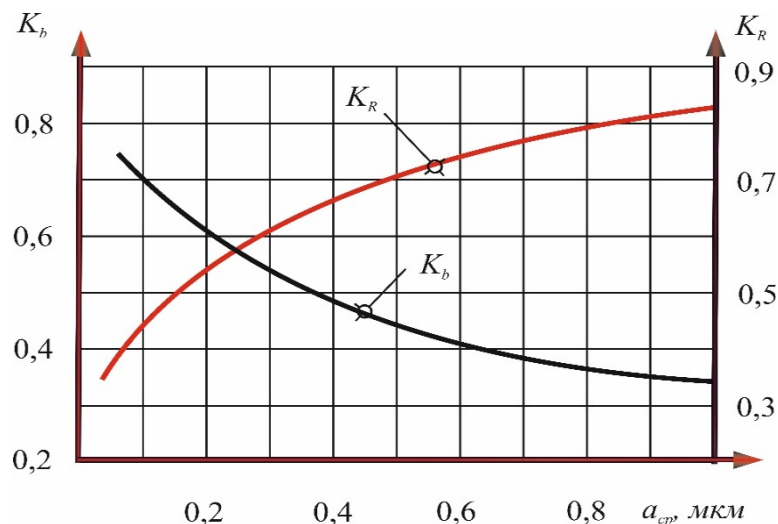


Рисунок 3.12 – Влияние глубины резания - царапания зернами абразивного бруска на K36СМ ВП на коэффициент выдавливания и коэффициент превышения шероховатости поверхности: $V_K = 35 \text{ м/мин}$; $V_H = 20 \text{ м/мин}$; $S = 1,0 \text{ м/мин}$; $t_x = 0,05 \text{ мм/ход}$

Так, с увеличением a_{cp} от 0,2 до 1 мкм коэффициент K_b уменьшается в 1,85 раза. Коэффициент превышения шероховатости поверхности с увеличением глубины резания-царапания увеличивается. Так, с увеличением a_{cp} от 0,2 до 1 мкм коэффициент K_R увеличивается от 0,42 до 0,8.

Обработкой экспериментальных данных 80-ти опытов, были установлены следующие зависимости коэффициента выдавливания и коэффициента превышения шероховатости поверхности от глубины резания-царапания:

$$K_b = 1 - 0,66a_{cp}^{0,38}; \quad r_{kb-a} = 0,44; \quad (3.10)$$

$$K_b = 0,8a_{cp}^{0,27}; \quad r_{kR-a} = 0,57; \quad (3.11)$$

где r_{kb-a} и r_{kR-a} - коэффициенты корреляции.

При шлифовании кругами 24А F90 L V 35 шероховатость поверхности в зависимости от режима находится в пределах $Ra_0 = 0,63 - 0,32$ мкм; при средней величине: $Ra = 0,32$ мкм

Для значения глубины резания-царапания $a_{cp} = 2,0$ мкм. Коэффициенты могут быть приняты равными: $K_b = 0,55$; $K_R = 0,75$.

Рассмотренные зависимости коэффициентов K_b и K_R от глубины резания-царапания свидетельствуют об улучшении условий стружкообразования при повышении глубины внедрения единичных зерен в металл. При уменьшении глубины резания-царапания уменьшается доля металла, удаляемого при образовании единичной риски. Это явление объясняется Масловым Е.Н. [56, 57] и Богомолковым Н.И. [12] тем, что вершины абразивных зерен имеют радиусы округления. При уменьшении глубины резания-царапания увеличивается передний угол резания, повышаются сопротивления складыванию деформированного слоя. При уменьшении глубины резания-царапания объем металла, удаляемого единичным зерном, становится настолько незначительным, что металл обрабатываемой поверхности практически не будет ошлифовываться, а только деформироваться.

Таким образом, при анализе процесса формообразования шлифованной поверхности нельзя пренебрегать пластической деформацией металла единичными абразивными зернами. Коэффициент выдавливания изменяется в зависимости от глубины резания-царапания в пределах от 0,2 до 0,7, коэффициент превышения шероховатости поверхности в пределах от 0,4 до 0,8.

Результаты исследований по распределению микротвердости в поверхностных слоях деталей, шлифованных кругами 24А F46 L V 35м\с, 24А F46 L В 35м\с., приводятся на рисунках 3.13, 3.14, 3.15.

Кривые распределения показывают, что в тончайших поверхностных слоях деталей наблюдается повышение микротвердости. Так, при шлифовании закаленной стали кругами 24А F46 L на керамической связке микротвердость поверхностных слоев составляет 5130 МН/м², микротвердость внутри лежащих слоев 3740МН/м².

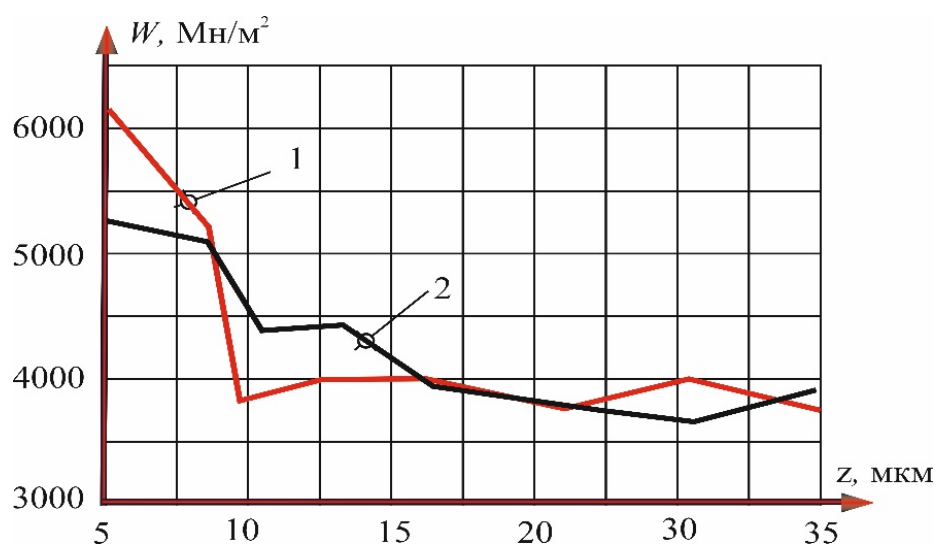


Рисунок 3.13 – Распределение микротвердости в поверхностных слоях образцов из закаленной стали 45 HRC=55-60 после шлифования кругами:
1 – 24А F46 L В 35м\с, 2 – 24А F46 L V 35м\с

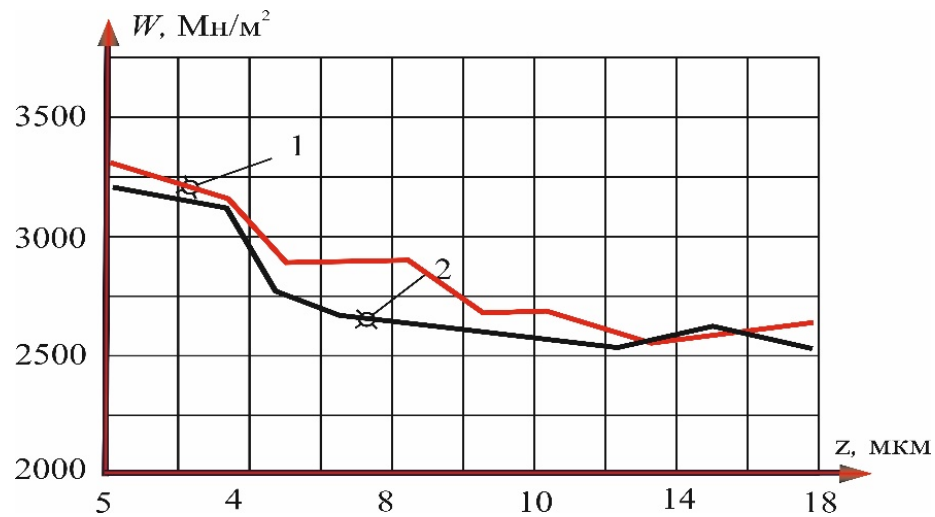


Рисунок 3.14 – Распределение микротвердости в поверхностных слоях образцов из отожженной стали 45 HRC=55-60 после шлифования кругами:
1 – 24A F46 L B 35м/с, 2 – 24A F46 L V 35м/с

С увеличением расстояния от наружной поверхности в глубину заготовки в радиальном направлении z как при шлифовании закаленной стали рисунок 3.13, так и при шлифовании отожженной стали, рисунок 3.14, микро-твердость монотонно снижается и при $z > 5...6$ мкм становится равной микротвердости исходной структуры.

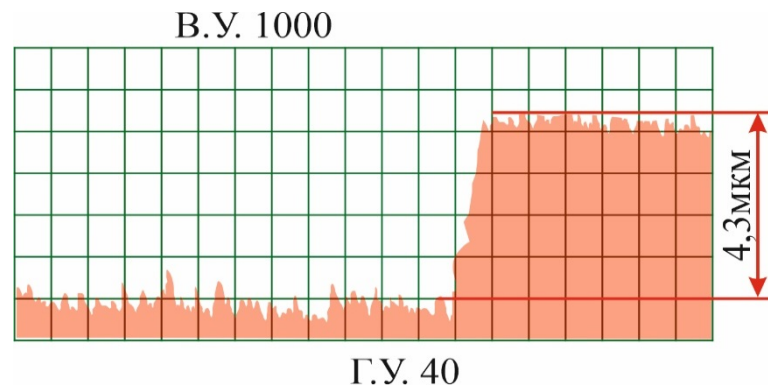


Рисунок 3.15 – Пример определения глубины стравленного слоя по профилограмме

Более высокое повышение микро твердости поверхностных слоев наблюдается при шлифовании деталей кругами на керамической связке при $V_K = 35$ м/с; $V_H = 0,25$ м/с $S_y = 0,005$ мм/об; радиальное усилие составляет 200Н, при шлифовании кругами на бакелитовой связке на этом же режиме – 150Н.

Особенностью распределения микротвердости в поверхностных слоях детали при шлифовании закаленной стали является отсутствие слоя с пониженной микротвердостью. При шлифовании кругами с более крупной зернистостью появление такого слоя обуславливается структурными превращениями стали, протекающими под действием высоких контактных температур. Особенности распределения микротвердости при шлифовании кругами зернистостью F46-F90 можно объяснить более низкими температурами поверхностных слоев и малой длительностью теплового воздействия круга на деталь.

Контактная температура при малой глубине шлифования уменьшается с уменьшением зернистости круга. При шлифовании более мелкозернистыми кругами оптимальная глубина шлифования равна 2...5 мкм. При таких значениях глубины резания при шлифовании закаленной стали кругами – 24A F90 L V 35 м/с при $V_k = 35$ м/с по данным Исаева А.И. и Силина С.С. Максимальная температура на площадке контакта круга с деталью равняется 150 °С.

Следовательно, можно ожидать, что температура при шлифовании кругами не превышает 150°С. Расчетные значения температур при шлифовании деталей кругами 24A F46 L на бакелитовой связке при $S = 0,25$ м/мин; $t_m = 4$ мкм/мин; ($P_y = 50$ Н) приводятся в табл. 3.4.

Наиболее высокая температура, соответствующая скорости круга 35 м/с, $\theta = 104$ °С ниже температуры структурных превращений стали.

При шлифовании с глубиной 2...5 мкм. наблюдается упрочнения поверхностного слоя. Степень упрочнения закаленной стали составляет 25-35% степень упрочнения отожженной стали – 20-30%.

Таблица 3.4 – Расчетные значения температур при шлифовании деталей кругами 24A F46 L на бакелитовой связке

Скорость круга м/сек	$\frac{P_z}{P_y}$	Расчетная температура по формулам	
		Исаева А.И. и Силина С.С. [30], °С	Подосеновой Н.А. [30], °С
35	0,218	104	87
20	0,192	62	54
10	0,19	41	37

При шлифовании мелкозернистыми кругами 24А с зернистостью в диапазоне F46 – F96 возникают остаточные напряжения сжатия величиной 600-1000 МН/м² при глубине залегания 4...8 мкм (рис. 3.16).

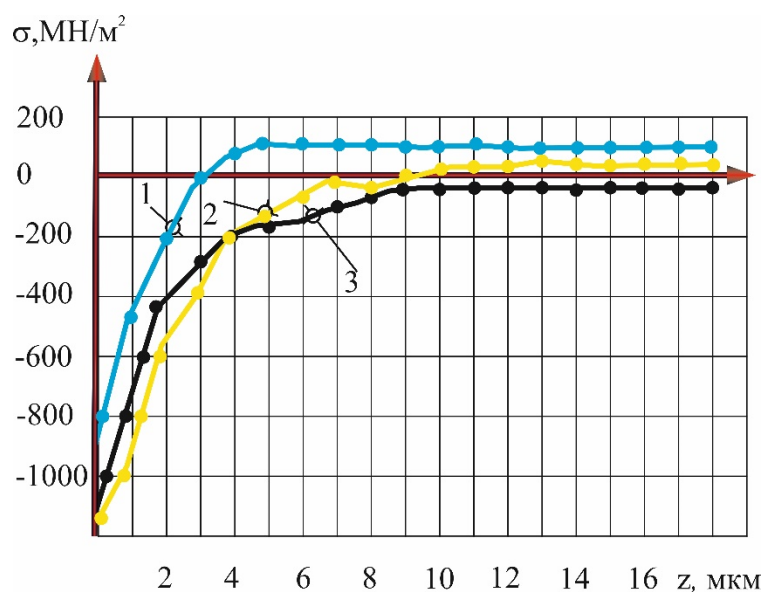


Рисунок 3.16 – Эпюры остаточных напряжений в поверхностных слоях образцов: 1 – 24А F46 L V, ($V_k=35$ м/с ; $V_u=0,25$ м/с; $S_y=0,01$ мм/об); 2 – 24А F46 L V, ($V_k=35$ м/с ; $V_u=0,25$ м/с; $S_y=0,005$ мм/об); 3–24А F4В V, ($V_k=35$ м/с; $V_u=0,25$ м/с; $S_y=0,005$ мм/об)

Упрочнения и отсутствие зоны глубоко отпущенного металла обуславливает особенности распределения в поверхностных слоях остаточных напряжений.

Упрочнение поверхностного слоя и появление остаточных напряжений сжатия благоприятно отражается на стойкости шеек валов, увеличивая срок службы подшипниковых узлов корабельных валопроводов.

3.3. Выводы по главе 3

1. 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 само перерезания волн. Возможно обра-

зование 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Полученные в ходе экспериментальных исследований математические зависимости, позволяют сформировать технические ограничения, которые необходимы для разработки методики расчета граничных циклов управления операцией круглого наружного шлифования.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ВЫХОДНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОПЕРАЦИИ КРУГЛОГО НАРУЖНОГО ШЛИФОВАНИЯ

4.1. Математическая модель процесса шлифования

Построенные в предыдущих главах работы зависимости, учитывают ряд параметров изменения состояния технологической системы в стохастической постановке, что позволяет приблизиться к границам допустимых режимов обработки и строить предельные граничные циклы управления операциями чистового и тонкого шлифования. Такое управление может осуществляться только технологическими системами с динамической стабилизацией параметров технологического цикла (см. раздел 2). Для последних предельный граничный цикл управления фактически является управляющей программой - номинальным программным управлением.

Как следует из анализа циклов, применяемых на производстве [117, 153], управляющими воздействиями для технологической системы чистового и тонкого шлифования являются: радиальная подача, окружная скорость вращения заготовки, при электроэрозионной правке круга напряжение, подводимое в зону правки. Основными характеристиками системы являются - взаимное расположение заготовки, инструмента и параметры их взаимодействия. При включении радиальной подачи абразивный инструмент приближается и входит в контакт с заготовкой. В первый период времени (этап врезания), в связи с тем, что глубина микрорезания незначительна, съём материала и износ круга минимальны. Подача почти полностью расходуется на приращение упругих деформаций системы и глубины резания. Поведение системы моделируется уравнением баланса перемещений.

Состояние заготовки, после j -го контакта с кругом задается текущим радиус-вектором $r_j(\alpha)$ (или высотой детали при плоском шлифовании), где α - поляр-

ный угол; пространственными отклонениями Δ_j ; наибольшей высотой профиля шероховатости $R_{\max j}$; глубиной дефектного слоя h_{dj} .

Текущий радиус-вектор заготовки после j -го оборота вычисляется по его значению после $j-1$ го оборота и величине радиального съема материала $\Delta r_j(\alpha)$

$$r_j(\alpha) = r_{j-1}(\alpha) - \Delta r_j(\alpha). \quad (4.1)$$

Отклонения формы заготовки после j -го контакта определяются разностью между максимальным и минимальным значениями радиусов векторов поверхности

$$\Delta_j = \frac{\max}{\alpha} r_j(\alpha) - \frac{\min}{\alpha} r_j(\alpha). \quad (4.2)$$

Текущее значение высоты профиля шероховатости поверхности детали (рис. 4.1.), отсчитываемое от линии выступов шероховатости имеет вид:

$$R_{\max j} = qR_{\max j-1} - q\Delta r - (1-q)R_{\max ff}, \quad (4.3)$$

где $q=1$, если нижняя граница слоя шероховатости поверхности после j -го прохода не изменяет своего положения; $q=0$, если нижняя граница слоя перемещается в глубь материала. $R_{\max ff}$ – шероховатость, которая формируется при j -м контакте.

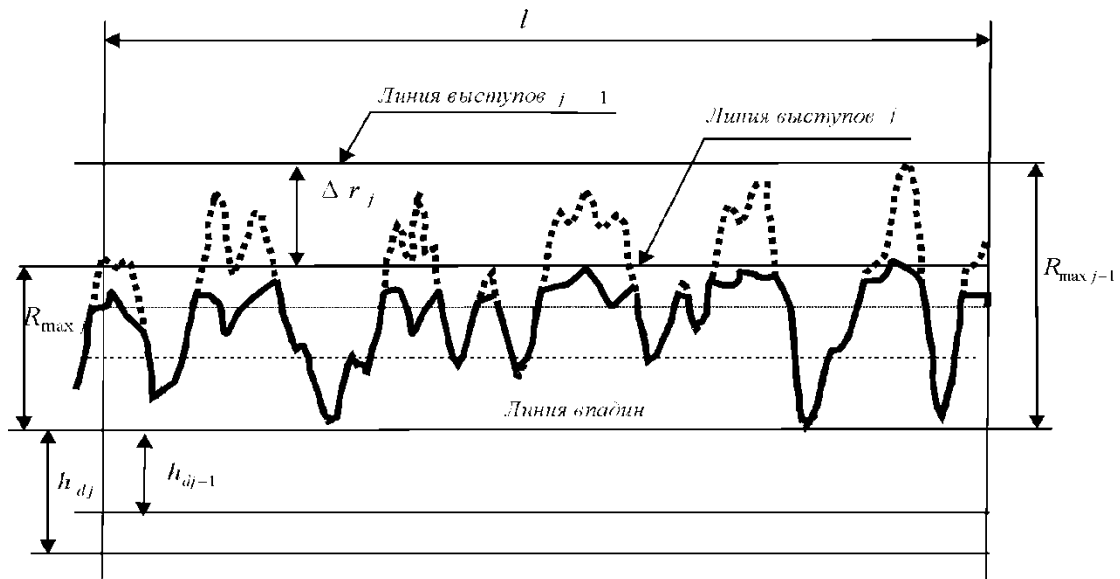


Рисунок 4.1 – К расчету ограничений по шероховатости и глубине дефектного слоя

Для глубины дефектного слоя h_d , независимо от (4.3), но с теми же обозначениями:

$$h_{dj} = (1-q)h_{diff} + (h_{dj-1} + R_{\max j-1} - R_{\max j} - \Delta r_j)q \quad (4.4)$$

где h_{diff} – дефектный слой, который формируется при j -м контакте.

При равных условиях предпочтение отдается варианту с меньшей глубиной дефектного слоя.

Текущий припуск после j -го оборота вычисляется по его значению после $j-1$ го оборота и величине радиального съема материала Δr_j

$$\Pi_j = \Pi_{j-1} - \Delta r_j. \quad (4.5)$$

Начальное состояние объекта (0) соответствует параметрам заготовки в момент ее установки на станок:

$$r_o(\alpha) = r_{\text{заг}}(\alpha); \quad \Delta_o = \Delta_{\text{заг}}; \quad R_{\max 0} = R_{\max \text{заг}}; \quad h_{d0} = h_{d\text{заг}}. \quad (4.6)$$

При работе в режиме затупления, величина размерного износа ΔR наиболее выступающих режущих кромок может быть принята равной радиальному износу круга, определяемому по зависимости (3.1).

Для расчета граничных циклов, обеспечивающих оптимальные траектории, согласно методологии изложенной во второй главе диссертации выразим в виде равенства и неравенств все технические ограничения факторов режима шлифования, определяемые возможностями станка, режущими свойствами абразивного инструмента, требованиями к точности обрабатываемой детали, шероховатости поверхности, качеству поверхностного слоя.

Проведенный технико-экономический анализ работ [23,67,99] показал, что за критерий оптимизации круглого шлифования может быть принята производительность процесса [23]:

$$Q_M = \frac{t_f^2 \left(1,478 t_f K_c (V_k \pm V_u) n_3 \sqrt{D_3 \rho_3} + 13,66 V_u \right) B}{K_c (V_k \pm V_u) \tau n_3 \sqrt{D_3 \rho_3}}, \quad (4.7)$$

где n_3 – количество зерен в единице площади шлифовального круга шт/мм² ;
 τ – время затрачиваемое на один оборот шлифовального круга; $D_3\rho_3$ –
 эквивалентный диаметр и радиус округления вершины зерна соответственно.

Уравнение (3.1) в этом случае будет являться функции оптимизации режима шлифования.

С учетом результатов выполненных в главах 2 и 3 сформируем основные технические ограничения факторов режима при шлифовании:

Ограничение 1. Заданная производительность станка.

Подставляя в уравнение (2.6), значение Q_M из уравнения (4.7) и учитывая, что время цикла шлифования детали должно быть меньше цикла станка T'_c , после преобразования получим неравенство:

$$Q_M = \frac{t_f^2 \left(1,478 t_f K_c (V_k \pm V_u) n_3 \sqrt{D_3 \rho_3} + 13,66 V_u \right) B}{K_c (V_k \pm V_u) \tau n_3 \sqrt{D_3 \rho_3}} \geq \frac{\pi \cdot d \cdot l \cdot \Pi \cdot R}{(60 K_s - R \cdot T'_B)}. \quad (4.8)$$

Ограничение 2. Заданная шероховатость и волнистость поверхности. Зависимость шероховатости поверхности от параметров режима шлифования может быть записана уравнением (3.7):

$$R_a = (0,5244 + 0,0009 \cdot l_0 - 0,1678 \cdot h_0 + 0,1397 \cdot V_u + 0,5529 \cdot S_y) \times \\ \times \exp \left[(-0,1818 + 0,0002 \cdot l_0 + 0,0257 \cdot h_0 + 0,0605 \cdot V_u + 0,0100 \cdot S_y) \times T \right].$$

После шлифования шероховатость поверхности должна соответствовать шероховатости предусмотренной техническими условиями на деталь. Это требование может быть записано неравенствами:

$$\left\{ R_a = (0,5244 + 0,0009 \cdot l_0 - 0,1678 \cdot h_0 + 0,1397 \cdot V_u + 0,5529 \cdot S_y) \times \right. \\ \left. \times \exp \left[(-0,1818 + 0,0002 \cdot l_0 + 0,0257 \cdot h_0 + 0,0605 \cdot V_u + 0,0100 \cdot S_y) \times T \right] \right\} \leq Ra_{\max}, \quad (4.9)$$

$$\left\{ R_a = (0,5244 + 0,0009 \cdot l_0 - 0,1678 \cdot h_0 + 0,1397 \cdot V_u + 0,5529 \cdot S_y) \times \right. \\ \left. \times \exp \left[(-0,1818 + 0,0002 \cdot l_0 + 0,0257 \cdot h_0 + 0,0605 \cdot V_u + 0,0100 \cdot S_y) \times T \right] \right\} \geq Ra_{\min}, \quad (4.10)$$

где $Ra_{\max}$ и $Ra_{\min}$ – максимально и минимально допустимые значения шероховатости поверхности детали, мкм.

$$\left\{ W_{\text{дср}} = \left(-0,6144 + 0,0069 \cdot l_0 - 0,3278 \cdot h_0 + 1,0397 \cdot V_u + 3,529 \cdot S_y \right) \times \right. \\ \left. \times \exp \left[\left(-0,2240 + 0,0001 \cdot l_0 + 0,0263 \cdot h_0 + 0,0949 \cdot V_u + 0,1614 \cdot S_y \right) \times T \right] \right\} \leq W_{\text{дсрmax}} ; \quad (4.11)$$

$$\left\{ W_{\text{дср}} = \left(-0,6144 + 0,0069 \cdot l_0 - 0,3278 \cdot h_0 + 1,0397 \cdot V_u + 3,529 \cdot S_y \right) \times \right. \\ \left. \times \exp \left[\left(-0,2240 + 0,0001 \cdot l_0 + 0,0263 \cdot h_0 + 0,0949 \cdot V_u + 0,1614 \cdot S_y \right) \times T \right] \right\} \geq W_{\text{дсрmin}} , \quad (4.12)$$

где $W_{\text{дсрmax}}$ и $W_{\text{дсрmin}}$ – максимально и минимально допустимые значения волнистости поверхности детали, мкм.

Ограничение 3. Допустимый износ круга из условия получения заданной точности обработки.

Подставляя в неравенство (2.45) значение S_R из уравнения (таблица 3.1), получим:

$$l_0^{-1,019} h_0^{-0,295} V_u^{0,272} S_y^{1,401} \leq \frac{S_{R\text{дон}} \cdot \pi \cdot D \cdot B^2 \cdot \tau_n}{1,49 \cdot a_0 \cdot j} . \quad (4.13)$$

где τ_n – время одного хода, мин.

Ограничение 4. Радиальное усилие, допустимое прочностью закрепления абразивных зерен в круге и прочностью самих зерен.

Подставляя в неравенство (2.48) выражение P_y через параметры режима шлифования из уравнения (3.5) получим:

$$\left\{ \left(40,871 - 0,0220 \cdot l_0 - 7,2511 \cdot h_0 + 9,1490 \cdot V_u + 72,3211 \cdot S_y \right) \times \right. \\ \left. \times \exp \left[\left(-0,0733 + 0,0001 \cdot l_0 + 0,0059 \cdot h_0 + 0,0390 \cdot V_u + 72,32 \cdot S_y \right) \times T \right] \right\} \leq [\sigma_y] \cdot l_K . \quad (4.14)$$

Ограничение 5. Допустимая скорость круга из условия его прочности.

Скорость круга при шлифовании V_K не должна превышать скорость круга, допускаемую прочностью круга $V_{K.д.}$:

$$V_K \leq V_{K.д.} . \quad (4.15)$$

Для не скоростных кругов допускаемая скорость круга, как правило равна 35 м/сек.

Ограничение 6. Мощность электродвигателя привода шлифовального круга. Мощность, развиваемая электродвигателем, должна быть больше мощности требуемой по тангенциальному усилию шлифования:

Подставляя в неравенство (2.52) значение из уравнения (3.6) после преобразования получим:

$$\left\{ \begin{aligned} & (21,2499 - 0,0193 \cdot l_0 - 2,3900 \cdot h_0 + 4,8299 \cdot V_u + 26,6219 \cdot S_y) \times \\ & \times \exp \left[(-0,0224 + 0,0001 \cdot l_0 + 0,0003 \cdot h_0 + 0,0090 \cdot V_u + 0,0360 \cdot S_y) \times T \right] \end{aligned} \right\} \leq N_3 \cdot \eta. \quad (4.16)$$

Ограничение 7. Максимальная скорость круга.

Максимальная скорость круга должна быть меньше или равна максимально допускаемой кинематикой станка

$$V_{K \max} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{K \max}}{60 \cdot 1000} \quad (4.17)$$

$$V_K \leq V_{K \max}. \quad (4.18)$$

Ограничение 8. Минимальная скорость круга.

Максимальная скорость круга должна быть больше или равна максимально допускаемой кинематикой станка $V_{K \min} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{K \min}}{60 \cdot 1000}$:

$$V_K \geq V_{K \min}. \quad (4.19)$$

Ограничение 9. Максимальная скорость круга.

Максимальная скорость круга должна быть меньше или равна максимально допускаемой кинематикой станка $V_{H \max} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{H \max}}{60 \cdot 1000}$:

$$V_H \leq V_{H \max}. \quad (4.20)$$

Скорость детали может быть также ограничена по другим причинам: нагревом центром и люнетов, неуравновешенностью масс детали и т.д.

Ограничение 10. Минимальная скорость детали.

Минимальная скорость детали должна быть больше или равна максимально допускаемой кинематикой станка

$$V_{H \min} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{H \min}}{60 \cdot 1000}, \quad (4.21)$$

$$V_H \geq V_{H \min}. \quad (4.22)$$

Ограничение 11. Наибольшая поперечная подача.

Наибольшая поперечная подача быть меньше или равна максимально допускаемой кинематикой станка $S_{y \max}$:

$$S_y \leq S_{y \max} . . \quad (4.23)$$

Ограничение 12. Наименьшая поперечная подача.

Наименьшая поперечная подача больше или равна максимально допускаемой кинематикой станка $S_{y \min}$:

$$S_y \geq S_{y \min} . \quad (4.24)$$

Ограничение 13. Начальное состояние рабочей поверхности инструмента определяется параметрами, полученными после правки круга, конечное - в конце стойкости инструмента. Последнее характеризуется максимально допустимой волнистостью $W_{k \max}$, образующейся на поверхности круга, при которой не обеспечивается заданная точность формы поверхности, либо максимально допустимой величиной износа $\Delta h_{3 \max}$ на вершинах режущих кромок, при которой начинается интенсивное разрушение рабочей поверхности инструмента. Аналитически эти условия могут быть записаны в виде неравенств:

$$W_k \leq W_{k \max} , \quad (4.25)$$

$$h_3 \leq h_{\max} . \quad (4.26)$$

Ограничение 14. Конечное состояние (k) объекта должно соответствовать техническим требованиям на деталь

$$r_k(\alpha) \leq r_{\max d}(\alpha), \quad r_k(\alpha) \geq r_{\min d}(\alpha);$$

где $r_{\max d}(\alpha) - r_{\min d}(\alpha) = \delta$, δ - допуск на изготовление детали.

$$\Delta_k \leq \Delta_d; \quad R_{\max k} \leq R_{\max d}; \quad R_{ak} \leq R_{ad}; \quad h_{dk} = h_{dd} \quad (4.27)$$

Неравенства (4.25) справедливы для конца цикла обработки детали, после того как будет снят весь припуск на шлифование. В процессе обработки параметры качества изделия могут отличаться от требований чертежа. Однако они на

протяжении всего цикла должны находиться в заданной области значений, при которых достижимы требуемые параметры качества детали.

Ограничение 15. Нижняя граница текущей шероховатости поверхности не должна опускаться глубже, чем соответствующая граница слоя шероховатости детали.

$$R_{\max j} \leq \Pi_{jd} + R_{\max d} \quad (4.28)$$

где Π_{jd} – припуск, оставшийся не удаленным после j -го контакта поверхности с кругом.

Ограничение 16. Для глубины дефектного слоя (рис. 4.2.):

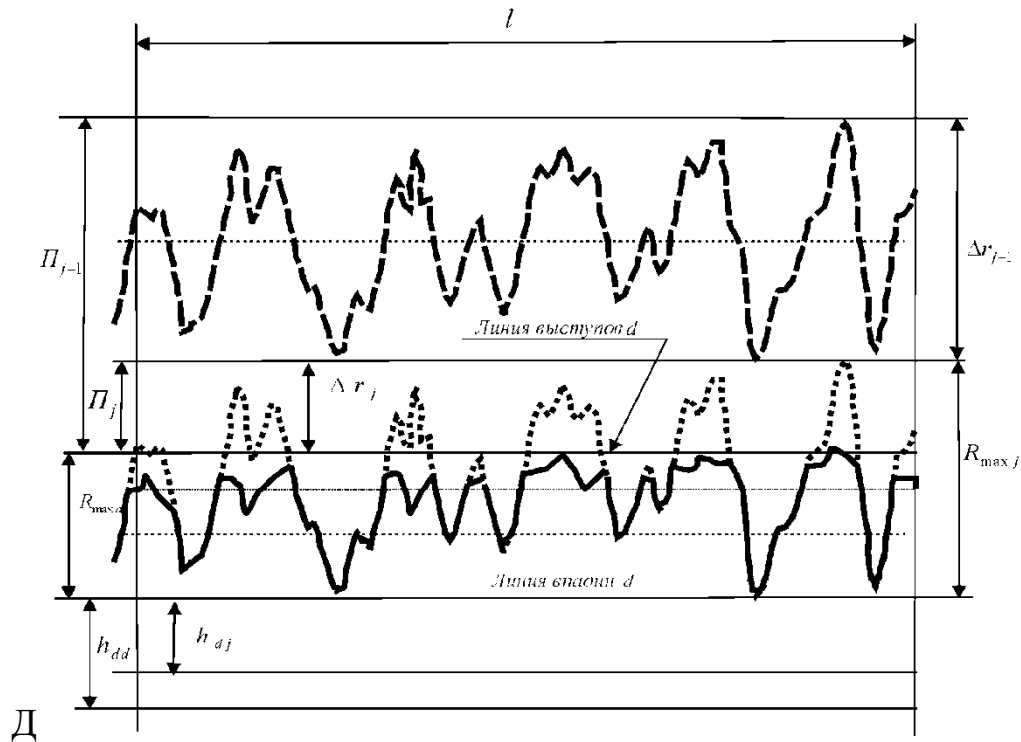


Рисунок 4.2 – Расчетная схема формирования показателей качества при шлифовании

$$h_{dj} + R_{\max j} \leq \Pi_j + h_{ddj} + R_{\max dj}, \quad (4.29)$$

Ограничение 17. Для пространственных отклонений формы заготовки

$$\Delta_j \leq \left(\max_{\alpha} r_j(\alpha) - \sum_{i=j}^n \max_{\alpha} \Delta r_j(\alpha) \right) - \left(\min_{\alpha} r_j(\alpha) - \sum_{i=j}^n \min_{\alpha} \Delta r_j(\alpha) \right) \quad (4.30)$$

Ограничение 18. Фактическая глубина резания t_f . не должна превышать расстояния, равного максимальному вылету зерна над связкой δ_{cb}

$$0 \leq t_{fi} \leq \delta_{cbj} \quad (4.31)$$

Все рассмотренные выше равенства и неравенства, соответствующие техническим ограничениям, и функция оптимизации представляют в совокупности математическую модель процесса шлифования, таблица 4.1.

Принятая математическая модель составлена с использованием экспериментальных зависимостей. При дальнейших исследованиях целесообразна замена экспериментальных зависимостей на теоретические. Кроме того, в дальнейшем целесообразно расширение модели с учетом дополнительных ограничений и влияния взаимодействий факторов режима на показатели процесса шлифования.

Таблица 4.1 – Математическая модель процессов шлифования

СОСТОЯНИЕ ОБЪЕКТА И СИСТЕМЫ	
Уравнение баланса перемещений в технологической системе $\Delta A_j = \Delta t_{fj} + \Delta R_j + \Delta r_{j-1} + \Delta V_{ynj} + \Delta U_{Tj}$,	(2.5)
Заданная производительность $Q_M = \frac{t_f^2 \left(1,478 t_f K_c (V_k \pm V_u) n_3 \sqrt{D_3 \rho_3} + 13,66 V_u \right) B}{K_c (V_k \pm V_u) \tau n_3 \sqrt{D_3 \rho_3}}$	(4.7)
Радиус округления вершины зерна $\rho_g(\tau) = K_{\rho_g} \cdot \rho_{g0} = 0,0535 \cdot K_{\rho_g} \cdot B_g^{0,955}$,	[43]:
Количество зерен в единице площади $n_g(\tau) = K_{n_g} \cdot n_{g0} = 0,62 \cdot K_{n_g} \cdot B_g^{-1,99}$	[53]:
Средний износ круга $S_R = 1,49 l_0^{-1,019} h_0^{-0,295} V_u^{0,272} S_y^{1,401}$	Таблица 3.1
Коэффициент выдавливания $K_b = 1 - 0,34 a_{cp}^{0,56} \cdot V^{0,06}$;	(3.9)
Радиальная составляющая сила резания $P_y = (40,871 - 0,0220 \cdot l_0 - 7,2511 \cdot h_0 + 9,1490 \cdot V_u + 72,3211 \cdot S_y) \times$ $\times \exp \left[(-0,0733 + 0,0001 \cdot l_0 + 0,0059 \cdot h_0 + 0,0390 \cdot V_u + 72,32 \cdot S_y) \times T \right]$	(3.5)
Касательная составляющая сила резания	(3.6)

$P_z = (21,2499 - 0,0193 \cdot l_0 - 2,3900 \cdot h_0 + 4,8299 \cdot V_u + 26,6219 \cdot S_y) \times$ $\times \exp \left[(-0,0224 + 0,0001 \cdot l_0 + 0,0003 \cdot h_0 + 0,0090 \cdot V_u + 0,0360 \cdot S_y) \times T \right]$	
Среднее арифметическое отклонение профиля $R_a = (0,5244 + 0,0009 \cdot l_0 - 0,1678 \cdot h_0 + 0,1397 \cdot V_u + 0,5529 \cdot S_y) \times$ $\times \exp \left[(-0,1818 + 0,0002 \cdot l_0 + 0,0257 \cdot h_0 + 0,0605 \cdot V_u + 0,0100 \cdot S_y) \times T \right]$	(3.7)
Средняя высот волнистости $W_{ocp} = (-0,6144 + 0,0069 \cdot l_0 - 0,3278 \cdot h_0 + 1,0397 \cdot V_u + 3,529 \cdot S_y) \times$ $\times \exp \left[(-0,2240 + 0,0001 \cdot l_0 + 0,0263 \cdot h_0 + 0,0949 \cdot V_u + 0,1614 \cdot S_y) \times T \right]$	(3.8)
Сила закрепления зерна в связке $P_c = 0,842 \cdot l_0^{0,77} h_0^{-0,55}$	[53]:
Окружная скорость круга $V_K = \frac{\pi \cdot D \cdot n_K}{60 \cdot 1000}$	(4.17)
Текущий радиус-вектор заготовки после j-го оборота $r_j(\alpha) = r_{j-1}(\alpha) - \Delta r_j(\alpha)$	(4.1)
Отклонения формы заготовки после j-го контакта $\Delta_j = \frac{\max}{\alpha} r_j(\alpha) - \frac{\min}{\alpha} r_j(\alpha)$	(4.2)
Текущее значение высоты профиля шероховатости поверхности детали $R_{\max j} = q R_{\max j-1} - q \Delta r - (1 - q) R_{\max fj},$	(4.3)
Текущий припуск после j-го оборота $\Pi_j = \Pi_{j-1} - \Delta r_j.$	(4.5)
Дефектный слой, который формируется при j-м контакт $h_{dj} = (1 - q) h_{djf} + (h_{dj-1} + R_{\max j-1} - R_{\max j} - \Delta r_j) q$	(4.4)
Окружная скорость заготовки $V_u = \frac{\pi \cdot D \cdot n_u}{60 \cdot 1000}$	(4.14)
Начальное состояние объекта $r_o(\alpha) = r_{заг}(\alpha); \quad \Delta_o = \Delta_{заг}; \quad R_{\max 0} = R_{\max заг}; \quad h_{d0} = h_{d заг}$	(4.6)
ОГРАНИЧЕНИЯ	
Ограничение производительности процесса $Q_M = \frac{t_f^2 \left(1,478 t_f K_c (V_K \pm V_u) n_3 \sqrt{D_3 \rho_3} + 13,66 V_u \right) B}{K_c (V_K \pm V_u) \tau n_3 \sqrt{D_3 \rho_3}} \geq \frac{\pi \cdot d \cdot l \cdot \Pi \cdot R}{(60 K_3 - R \cdot T'_B)}$	(4.8)
Максимальная волнистость поверхности $\left\{ \begin{aligned} &W_{ocp} = (-0,6144 + 0,0069 \cdot l_0 - 0,3278 \cdot h_0 + 1,0397 \cdot V_u + 3,529 \cdot S_y) \times \\ &\times \exp \left[(-0,2240 + 0,0001 \cdot l_0 + 0,0263 \cdot h_0 + 0,0949 \cdot V_u + 0,1614 \cdot S_y) \times T \right] \end{aligned} \right\} \leq W_{ocpmax}$	(4.11)
Минимальная волнистость поверхности $\left\{ \begin{aligned} &W_{ocp} = (-0,6144 + 0,0069 \cdot l_0 - 0,3278 \cdot h_0 + 1,0397 \cdot V_u + 3,529 \cdot S_y) \times \\ &\times \exp \left[(-0,2240 + 0,0001 \cdot l_0 + 0,0263 \cdot h_0 + 0,0949 \cdot V_u + 0,1614 \cdot S_y) \times T \right] \end{aligned} \right\} \geq W_{ocpmin}$	(4.12)
Максимальная шероховатость поверхности	(4.9)

$\left\{ R_a = (0,5244 + 0,0009 \cdot l_0 - 0,1678 \cdot h_0 + 0,1397 \cdot V_u + 0,5529 \cdot S_y) \times \right. \\ \left. \times \exp \left[(-0,1818 + 0,0002 \cdot l_0 + 0,0257 \cdot h_0 + 0,0605 \cdot V_u + 0,0100 \cdot S_y) \times T \right] \right\} \leq Ra_{\max}$	
Минимальная шероховатость поверхности $\left\{ R_a = (0,5244 + 0,0009 \cdot l_0 - 0,1678 \cdot h_0 + 0,1397 \cdot V_u + 0,5529 \cdot S_y) \times \right. \\ \left. \times \exp \left[(-0,1818 + 0,0002 \cdot l_0 + 0,0257 \cdot h_0 + 0,0605 \cdot V_u + 0,0100 \cdot S_y) \times T \right] \right\} \geq Ra_{\min}$	(4.10)
Допустимый износ круга из условия получения точности $l_0^{-1,019} h_0^{-0,295} V_u^{0,272} S_y^{1,401} \leq \frac{S_{ydon} \cdot \pi \cdot D \cdot B^2 \cdot \tau_n}{1,49 \cdot a_0 \cdot j}$	(4.13)
Радиальное усилие, допускаемое прочностью закрепления абразивного зерна в круге $\left\{ (40,871 - 0,0220 \cdot l_0 - 7,2511 \cdot h_0 + 9,1490 \cdot V_u + 72,3211 \cdot S_y) \times \right. \\ \left. \times \exp \left[(-0,0733 + 0,0001 \cdot l_0 + 0,0059 \cdot h_0 + 0,0390 \cdot V_u + 72,32 \cdot S_y) \times T \right] \right\} \leq [\sigma_y] \cdot l_K$	(4.14)
Мощность электродвигателя привода круга $\left\{ (21,2499 - 0,0193 \cdot l_0 - 2,3900 \cdot h_0 + 4,8299 \cdot V_u + 26,6219 \cdot S_y) \times \right. \\ \left. \times \exp \left[(-0,0224 + 0,0001 \cdot l_0 + 0,0003 \cdot h_0 + 0,0090 \cdot V_u + 0,0360 \cdot S_y) \times T \right] \right\} \leq N_{\varepsilon} \cdot \eta$	(4.16)
Максимальная скорость круга $V_K \leq V_{K \max}$	(4.18)
Допустимая скорость круга из условия его прочности. $V_K \leq V_{K.д.}$	(4.15)
Минимальная скорость круга $V_K \geq V_{K \min}$	(4.19)
Максимальная скорость детали $V_H \leq V_{H \max}$	(4.20)
Минимальная скорость детали $V_H \geq V_{H \min}$	(4.22)
Наибольшая поперечная подача $S_y \leq S_{y \max}$	(4.23)
Наименьшая поперечная подача $S_y \geq S_{y \min}$	(4.24)
Допустимая фактическая глубина резания $0 \leq t_{fi} \leq \delta_{cej}$	(4,31)
Допустимое конечное состояние объекта $r_k(\alpha) \leq r_{\max d}(\alpha), \quad r_k(\alpha) \geq r_{\min d}(\alpha), \quad r_{\max d}(\alpha) - r_{\min d}(\alpha) = \delta, \quad \Delta_k \leq \Delta_d;$ $R_{\max k} \leq R_{\max d}, \quad R_{ak} \leq R_{ad}, \quad h_{dk} = h_{dd}$	(4.27)
Допустимая величина границы текущей шероховатости поверхности $R_{\max j} \leq \Pi_{jd} + R_{\max d}$	(4.28)
Допустимая глубина дефектного слоя $h_{dj} + R_{\max j} \leq \Pi_j + h_{ddj} + R_{\max dj}$	(4.29)
Допустимые пространственные отклонения формы заготовки	(4.30)

$\Delta_j \leq (\frac{\max}{\alpha} r_j(\alpha) - \sum_{i=j}^n \frac{\max}{\alpha} \Delta r_j(\alpha)) - (\frac{\min}{\alpha} r_j(\alpha) - \sum_{i=j}^n \frac{\min}{\alpha} \Delta r_j(\alpha))$	
Целевые функции	
$t_{um} = \frac{\Pi}{Q_{\Sigma}} K_n + T_n + \frac{T_{c.u.} \cdot n_{c.u.}}{n_{det}}$	(2.9)
$Q_M = \frac{t_f^2 (1,478 t_f K_c (V_k \pm V_u) n_3 \sqrt{D_3 \rho_3} + 13,66 V_u) B}{K_c (V_k \pm V_u) \tau n_3 \sqrt{D_3 \rho_3}}$	(4.7)

4.2. Расчет высокопроизводительных циклов шлифования и их экспериментальная проверка

Представленная в таблице 4.1 модель содержит уравнение баланса перемещений, в виде дифференциально-разностных соотношений связывает соответствующие разности подачи инструмента и разности фактической глубины резания.

В качестве начального приближения (начальных условий для моделирования) используются справочные данные и существующие технологические рекомендации для соответствующих процессов.

Если при этом выполняются условия ненахождения технологических параметров в областях ограничений, то результат решения системы таблицы 4.1 определяет как закон изменения величины подачи инструмента, так и законы изменения величин съема материала, шероховатость поверхности заготовки, волнистости и т.д.

Указанное позволяет решать задачи оптимизации технологического процесса известными численными методами по различным формализованным критериям, например, по критерию быстродействия [146]. (критерий штучного времени производства детали), себестоимости, приведенных затрат и др. Это соответствует решению задачи построения предельных граничных циклов программного управления.

Необходимо отметить, что при решении этих задач необходимо учитывать тот факт, что состояние технологической системы несвободно от наследования

параметров, определяемых результатами обработки предыдущей детали, т.е. в качестве начальных данных при моделировании граничного цикла обработки каждой последующей детали используются как данные о начальном состоянии системы (например, параметры детали), так и финальные параметры (например, состояния шлифовального круга). Указанное определяет наличие семейства оптимальных граничных циклов.

При построении расчетных соотношений для конкретных задач модель с разностными уравнениями дополнительно дискретизировалась по времени – углам поворота инструмента и заготовки. При этом параметры рассматривались как непрерывные величины и функции. Указанное позволило применить как численные методы решения разностных уравнений, так и численные методы теории оптимизации для функций с ограничениями типа неравенств.

При построении расчетных соотношений для конкретных задач модель дискретизировалась по времени. При этом параметры рассматривались как непрерывные величины и функции. Указанное решение позволило применить как численные методы решения разностных уравнений, так и численные методы теории оптимизации для функций с ограничениями типа неравенств.

Оптимизация циклов по экономическим критериям имеет существенный недостаток в связи с непредсказуемой динамикой изменения стоимости основных фондов, расходных материалов, энергии и т.д. Поэтому более целесообразно оптимизировать процесс по критериям быстродействия и в диссертационной работе основное внимание уделялось разработке высокопроизводительных циклов шлифования по методике С.М. Братана [27]. При оптимизации по быстродействию использован алгоритм наискорейшего спуска в силу простоты реализации и достаточно высокой скорости сходимости [13].

При управлении процессами шлифования за счет изменения величины подачи, были назначены основные технические ограничения, которые учитывались при расчетах: критические значения подачи, допустимые из условия обеспечения заданной точности, шероховатости и глубины дефектного слоя, критические зна-

чения сил допускаемые жесткостью технологической системы и прочностью закрепления абразивных зерен в теле круга.

Критические значения величин подач функционально связаны с величиной не удаленной части припуска. В зависимости от марки обрабатываемого материала, размера абразивного зерна, технических требований на протяжку лимитирующими ограничениями могут быть либо ограничения по точности и глубине дефектного слоя, либо по шероховатости поверхности. При построении оптимального цикла учитываются все три ограничения. Особенности аналитического расчета высокопроизводительных циклов с обеспечением заданной точности и глубины дефектного слоя достаточно полно рассмотрены в литературе [27, 50, 83, 87, 111, 137, 141].

Данные алгоритмы позволяют решить задачу построения предельных граничных циклов управления процессом шлифования, при которых обеспечивается минимально возможное машинное время обработки деталей при ограничениях по качеству поверхности изделия [19, 23].

Указанное, позволяет решать задачи оптимизации технологического процесса известными численными методами по различным формализованным критериям, например, по критерию быстродействия [19] (критерий штучного времени производства детали), себестоимости, приведенных затрат и др. Это соответствует решению задачи построения предельных граничных циклов программного управления.

В качестве параметров, которые используются при определении конкретных значений вышеприведенных критериев, используются значения переменных, характеризующих поведение технологического процесса, и его результаты. Для конкретизации этих значений еще до выполнения соответствующих технологических операций необходимо адекватное описание поведения технологической системы и необходимых по техническим требованиям параметров качества. Погрешности описания неизбежно приводят к снижению производительности, нестабильности и потере качества изделий. Совокупность зависимостей и ограничений, сведенных в таблицу 4.1, представляют описание свойств технологической

системы. В качестве начального приближения (начальных условий для моделирования) используются справочные данные и существующие технологические рекомендации для соответствующих процессов.

Если при этом выполняются условия не нахождения технологических параметров в областях ограничений, то результат решения системы табл. 4.1 определяет как закон изменения величины подачи инструмента, так и законы изменения величин съема материала, шероховатости поверхности заготовки, волнистости и т.д. Указанное определяет наличие семейства оптимальных граничных циклов.

При оптимизации по быстродействию или нахождении наилучшего решения по себестоимости может быть использован широкий спектр методов оптимизации [86], например: метод покоординатного спуска Пауэлла или динамического программирования Беллмана.

Из рассмотренных способов оптимизации режимов обработки весьма перспективно использование метода динамического программирования. Его применение ограничивается только объемом вычислительных работ, который в значительной степени определяется числом возможных сочетаний регламентируемых параметров качества. Если качество детали задается двумя параметрами, то возможные фазовые состояния будут определяться множеством сочетаний значений координат внутренних и граничных областей прямоугольника, рис. 4.3.

	$P_0=P_{\text{заг}}$	P_1	P_2	...	P_k	...	P_{m-1}	P_m
$H=H_3$	Заготовка							
H_1								
H_2								
...								
...								
H_n								деталь

Рисунок 4.3 – Прямоугольник возможных фазовых состояний объекта производства при двух регламентируемых параметрах качества

Ограничения уменьшают число возможных фазовых координат объекта, выделяя область технически обоснованных состояний. Алгоритм вычисления циклов чистового шлифования методом динамического программирования заключается в последовательном определении возможных фазовых состояний заготовки после $N-i$ -го оборота, оценке полученных фазовых траекторий по критерию эффективности с выделением оптимального варианта. На первом этапе на основе анализа технических условий на изготовление детали устанавливаются все возможные фазовые состояния объекта после последнего прохода.

Для каждого из них намечаются допустимые сочетания элементов режима на последнем проходе, вычисляются значения критерия эффективности. По возможным значениям фазовых координат после N -го оборота и значениям элемента режима определяются все возможные фазовые состояния объекта после $N-1$ -го прохода. При этом в одну и ту же точку фазового пространства можно попасть при различном сочетании выходных значений параметров качества и значений управляющих параметров. На основании сопоставления выявляются варианты с наименьшим значением критерия эффективности, они запоминаются, формируется множество возможных состояний после $N-1$ оборота и оптимальное управление для преобразования качества на N -м обороте.

На третьем и четвертом этапе определяются для каждой полученной точки фазового пространства все возможные управления на $N-1$ -м обороте и все возможные состояния объекта после $N-2$ -го оборота детали. Формируется множество возможных фазовых состояний M_{N-i}^k , $i = 2$.

В одну и ту же точку фазового пространства после $N-i$ оборота детали ($i > 1$) можно попасть как при различном сочетании элементов режима, так и при различном количестве чисел оборотов завершающей части процесса. Поэтому на пятом этапе выделяют такие общие точки $M_{N-i}^k = M_{N-i+1}^k + \dots + M_N^k$ и выбирают траектории с минимальным значением критерия эффективности заключительной части процесса. На последующих этапах выполняется анализ возможных состояний объекта после $N-i$ -го оборота ($i = 3, 4, \dots, N$). Процесс вычисления заканчивается

после получения результата, свидетельствующего, что все возможные фазовые состояния объекта, определяемые по значениям управляющих воздействий, выходят за пределы, допустимые математической моделью, либо после получения результата, свидетельствующего, что все оставшиеся варианты имеют $\sum_{j=0}^{i+1} \tau_j$ одного из вариантов

$$P = P_{\text{заг}} \text{ и } y_{N-i}^k \geq y_{\text{заг}}^k, \quad (4.32)$$

где y_{N-i}^k – значение k -го параметра качества.

Путем сопоставления полученных вариантов, удовлетворяющих начальным условиям, выбирается вариант, обеспечивающий минимальное значение критерия эффективности. Он принимается за оптимальный, так как обеспечивает формирование заданных параметров качества детали при наименьшем значении критерия эффективности.

Для процессов шлифования определение оптимального цикла может выполняться и в прямой последовательности, начиная с первого прохода и заканчивая последним. Общая структура вычислительного алгоритма при этом сохраняется. На основе анализа технических ограничений устанавливаются все возможные сочетания элементов режима резания на первом проходе. По известным фазовым координатам заготовки и возможным сочетаниям элемента режима определяются все возможные фазовые состояния объекта после первого прохода, на основании сопоставления критерия эффективности для каждого такого состояния выбирается оптимальное сочетание элементов режима. Затем последовательно выполняется анализ второго, третьего и т.д. проходов. На каждом этапе для последующих вычислений формируется множество M^n состояний, для которых не достигнуты параметры качества детали и критерий эффективности меньше его значений законченных вариантов. При $M^n=0$ вычисления прекращаются, из полученных возможных вариантов выбирается оптимальный.

Рассмотренный алгоритм позволяет определять наиболее рациональное сочетание элементов режима резания для каждого прохода. С увеличением числа управляющих воздействий и числа возможных фазовых состояний объекта структура алгоритма сохраняется, но объем вычислительных работ возрастает в геометрической прогрессии. Поэтому метод динамического программирования целесообразно применять при оптимизации процесса, когда число этапов процесса невелико, а принцип дискретности наиболее выявлен.

Для операций с большим числом контактов поверхности с инструментом можно заменить дискретный процесс преобразования параметров качества на непрерывный, а высокопроизводительные циклы определить на основе принципа максимума Понтрягина, по методике, рассмотренной в работе М.М. Тверского.

Рассмотренные методы оптимизации позволяют решить задачу построения предельных граничных циклов управления процессом чистового шлифования на тяжелых станках, обеспечивающих минимально возможное машинное время или минимальную себестоимость обработки деталей при заданных ограничениях.

Апробация предложенной методики, осуществлялась в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве между кафедрой «Технология машиностроения» СГУ и Севастопольским предприятием «91. СРЗ.ЧФ» по обработке гребных валов.

Полученные в результате расчета циклы (рис. 4.4, 4.5) оказались состоящими из трех этапов, которые могут характеризоваться также как и в работах [40, 43]:

- этапа «форсированного режима», на котором снимается основной слой припуска;
- этапа «чистового», на котором подача и глубина резания ограничивается точностью формы изделия;
- этапа «финишного», где подача и глубина резания, лимитируется ограничениями на шероховатость поверхности.

При расчете циклов учитывалось состояние инструмента в различные периоды его стойкости, поэтому продолжительность каждого последующего цикла увеличивается.

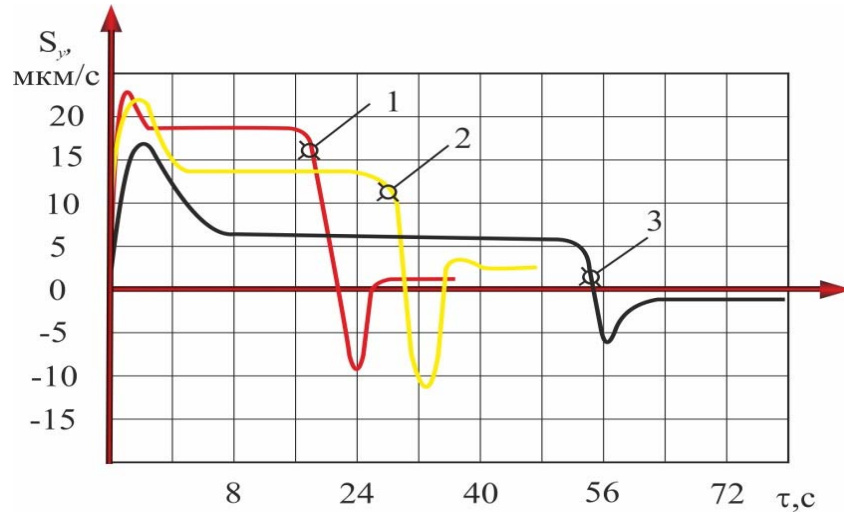


Рисунок.4.4 – Циклы программного управления операцией круглого наружного шлифования кругами 24A F46 L V 35м/с для обработки шеек гребных валов с учетом изменения свойств круга за период стойкости: 1, 2, 3 – траектории изменения S_y для 5-ой, 7-ой и 13-ой детали

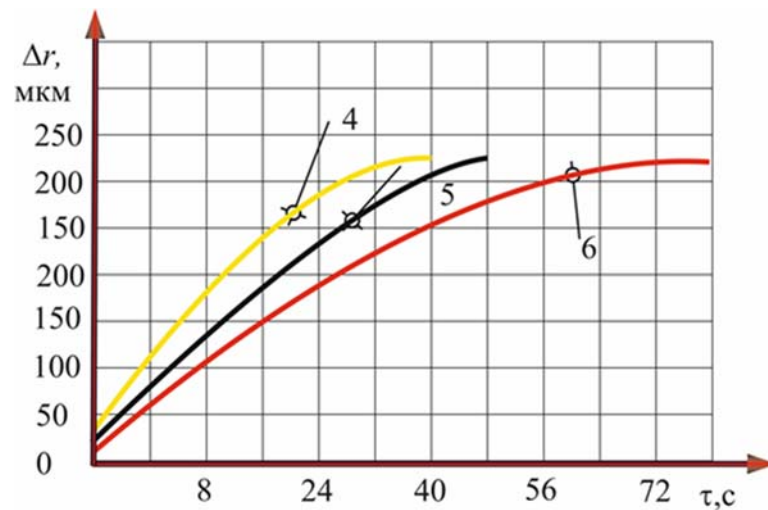


Рисунок.4.5 – Циклы программного управления операцией круглого наружного шлифования кругами 24A F46 L V 35м/с для обработки шеек гребных валов с учетом изменения свойств круга за период стойкости: 4, 5, 6 – траектории изменения Δr для 5-ой, 7-ой и 13-ой детали соответственно

При расчете циклов учитывался износ инструмента, поэтому продолжительность каждого последующего расчетного цикла оказалась больше продолжительности предшествующего.

При обработке циклов на оборудовании было установлено, 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 в 1,3; 1,2; 1,12 раза.

Однако после 10 минут работы увеличились разбросы геометрических размеров и значений показателей шероховатости поверхности, более интенсивного воздействия на процесс возмущающих факторов таблица 4.2.

Таблица 4.2 – 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 до10 мин кругом 24A 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	3,4х10 ⁻⁶	0,28	0,21	1,36х10 ⁻⁴
2	–	0,021	0,012	2,25х10 ⁻⁶	0,29	0,20	2,25х10 ⁻⁴
3	–	0,023	0,013	2,77х10 ⁻⁶	0,30	0,23	1,36х10 ⁻⁴
Σ _j	–	0,021	0,010	2,8х10 ⁻⁶	0,28	0,21	1,66х10 ⁻⁴
Σ _i /Σ _j	–	1,33	1,6	1,29	1,07	1,02	1,35
«+» – Наличие прижогов на какой-либо поверхности							
Шлифование шеек гребных валов в интервале от 10 до30 мин кругом 24A 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	3,36х10 ⁻⁶	0,32	0,22	2,25х10 ⁻⁴
2	–	0,031	0,018	4,1х10 ⁻⁶	0,31	0,22	2,25х10 ⁻⁴
3	–	0,026	0,015	3,4х10 ⁻⁶	0,29	0,20	2,25х10 ⁻⁴
Σ _i	–	0,028	0,0163	3,62х10 ⁻⁶	0,30	0,216	2,25х10 ⁻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.

4.3. Обеспечения стабильности параметров качества изделий за счет разработки систем адаптивного управления

В настоящее время при производстве деталей машин предъявляются повышенные требования качеству их поверхностного слоя [1-3]. Доминирующими факторами являются погрешности размеров, отклонения формы, шероховатость, волнистость поверхностей, обеспечивающими надежность и долговечность узлов и механизмов, точность их работы особенно актуальна эта задача при финишной обработке шеек валов корабельного вало-винторулевого комплекса, детали которого отличаются своими габаритами и весом.

Анализ отказов элементов корабельного вало-винторулевого комплекса показывает, что наиболее слабыми элементами корабельного вало-винторулевого комплекса являются подшипниковые элементы, отказ которых оказывает существенное влияние на управляемость судна, например, 15% аварийных случаев связано с отказами подшипниковых узлов.

Анализ современных исследований в данной области показывает, что обеспечение надежности корабельного вало-винторулевого комплекса возможно за счет повышения стабильности качества чистового шлифования шеек валов [4 – 7].

Отсутствие стабильности показателей качества вызвано воздействием внешних возмущений на технологическую систему (ТС), часть из которых неизвестна и не контролируется в процессе обработки.

Эта проблема особенно актуальна для операций чистового и тонкого шлифования, на которых окончательно формируются параметры качества. Повышение стабильности чистового шлифования шеек валов вало-винторулевого комплекса возможно, за счет разработки динамических моделей процесса шлифования и создания на их основе автоматической системы врезного шлифования, с замкнутым контуром регулирования.

Во второй главе диссертации путем анализа зоны контакта «инструмент–заготовка» получено уравнение характеризующее баланс перемещений при круглом наружном шлифовании

$$t_f(\tau) = R_0 - \int_0^t \dot{S}_R d\tau + r_0 - \int_0^t \dot{Q}_\Sigma d\tau - A_0 + \int_0^t \dot{S}_y d\tau + y_T - y_{yn},$$

где $t_f(\tau)$ – фактическая глубина микро резания в момент времени; $\dot{S}_R$ – интенсивность износа инструмента в единицу времени; R_0 – радиус средней окружности круга в начальный момент времени $\tau=t_0$; r_0 – исходный радиус заготовки; $\dot{Q}_\Sigma$ – интенсивность съема материала; $\dot{S}_y$ – значение подачи по лимбу станка, отсчитываемое в единицу времени; y_T – температурные деформации в технологической системе; y_{yn} – упругие отжатия, определяемые по формуле $y_{yn} = \frac{P_n}{j_{mc}}$, где P_n – нормальная составляющая силы резания при шлифовании; j_{mc} – жесткость технологической системы.

После дифференцирования (1) по τ получим зависимость, описывающую связь перемещений в технологической системе в дифференциальной форме:

$$\dot{t}_f(\tau) = \dot{S}_y - \dot{S}_R - \dot{Q}_\Sigma + \dot{y}_T - \dot{y}_{yn}, \quad (4.33)$$

Нормальная составляющая силы резания P_n рассчитывается [5] по следующей зависимости:

$$P_n = C_\kappa t_f + G_\kappa \dot{t}_f, \quad (4.34)$$

где C_κ – жесткость контакта шлифовального круга и заготовки;

G_κ – коэффициент сопротивления.

После подстановки (4.34) в (2.3) и последующего дифференцирования получим:

$$\dot{y}_{yn} = \frac{C_\kappa}{j_{mc}} \dot{t}_\phi + \frac{G_\kappa}{j_{mc}} \ddot{t}_\phi. \quad (4.35)$$

Тогда выражение (4.33) после несложных преобразований переписывается:

$$\dot{S}_y = \dot{t}_f + \dot{S}_R + \dot{Q}_\Sigma - \frac{C_\kappa}{j_{mc}} \dot{t}_\phi - \frac{G_\kappa}{j_{mc}} \ddot{t}_\phi + \dot{y}_T. \quad (4.36)$$

В свою очередь фактическую глубину резания t_ϕ можно определить по формуле:

$$t_\phi = H + Q_\Sigma, \quad (4.37)$$

где H – слой, в котором распределена шероховатость; Q_Σ – съем материала за счет механического резания.

С учетом (4.37) зависимость (4.36) примет вид:

$$\dot{S}_y = -\frac{G_\kappa}{j_{mc}}\ddot{H} + \left(I - \frac{C_\kappa}{j_{mc}}\right)\dot{H} - \frac{G_\kappa}{j_{mc}}\ddot{Q}_\Sigma + \left(2 - \frac{C_\kappa}{j_{mc}}\right)\dot{Q}_\Sigma + \dot{S}_R + \dot{y}_T. \quad (4.38)$$

Для определения величины слоя, в котором распределена шероховатость H , может быть использовано выражение:

$$H = \alpha \cdot S_y, \quad (4.39)$$

где α – коэффициент пропорциональности; S_y – значение радиального перемещения круга по лимбу станка.

После подстановки (4.39) в (4.38) получим

$$\frac{G_\kappa}{j_{mc}}\alpha\ddot{S}_y - \left(\left(I + \frac{C_\kappa}{j_{mc}}\right)\alpha - I\right)\dot{S}_y = -\frac{G_\kappa}{j_{mc}}\ddot{Q}_\Sigma + \left(2 - \frac{C_\kappa}{j_{mc}}\right)\dot{Q}_\Sigma + \dot{S}_R + \dot{y}_T. \quad (4.40)$$

Обозначим $\frac{G_\kappa}{j_{mc}}\alpha = c$; $\left(\left(I + \frac{C_\kappa}{j_{mc}}\right)\alpha - I\right) = a$; $\left(2 - \frac{C_\kappa}{j_{mc}}\right) = b$; $\frac{G_\kappa}{j_{mc}} = c_I$,

тогда уравнение (4.39) примет вид:

$$c\ddot{S}_y - a\dot{S}_y = -c_I\ddot{Q}_\Sigma + b\dot{Q}_\Sigma + \dot{S}_R + \dot{y}_T. \quad (4.41)$$

Выражение (4.41) представляет собой линейное дифференциальное уравнение второго порядка, которое необходимо для решения задач, синтеза автоматических систем с обратной связью.

Из анализа зависимости (4.41) следует, что главными факторами, влияющими на время протекания цикла обработки, являются нестационарные фазы изменения скорости съема припуска на обработку (рисунок 4.6), возникающие в начальный момент (при врезании) и при переключении подачи в процессе смены режимов обработки.

На динамику процесса влияет податливость технологической системы, интенсивности износа шлифовального круга и температурных деформаций в технологической системе, изменение значений которых в процессе обработки изделия

оказывает существенное влияние на скорость съема припуска, что в результате может привести к разбросу значений параметров качества обрабатываемых изделий.

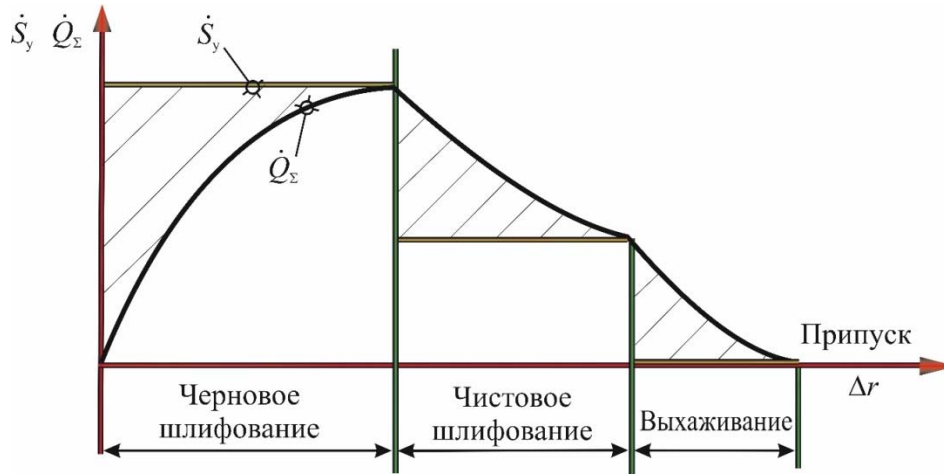


Рисунок 4.6 – Циклограмма съема припуска при врезном шлифовании

Таким образом, уравнение (4.41) устанавливает функциональную связь между величиной подачи $\dot{S}_y$ и интенсивностями съема материала $\dot{Q}_\Sigma$, износа инструмента $\dot{S}_R$ и температурных деформаций в технологической системе $\dot{y}_T$

Интенсивность съема материала $\dot{Q}_\Sigma$ является определяющим параметром процесса, характеризующим скорость его протекания, определяющим качество поверхности обрабатываемого изделия, а также время окончания его обработки.

Точное значение этого параметра может быть получено путем измерения съема материала в процессе обработки изделия. При этом, съем материала и его производные являются реакцией от подачи и скорости ее изменения.

Поэтому, с точки зрения теории оптимального управления, съем материала и его производные могут выступать в роли выходных величин, а подача в качестве входной переменной процесса.

Уравнение (4.41) содержит параметры, характеризующие интенсивности износа инструмента $\dot{S}_R$ и температурных деформаций в технологической системе

$\dot{y}_T$, которые на основании вышеизложенного могут выступать в качестве шумов системы.

Анализ исследований, выполненный в работах [5-8] показывает, что для чистового и отделочного шлифования изделий интенсивность износа инструментов $\dot{S}_R$ в пределах цикла обработки изделия незначительна, поэтому данной составляющей можно пренебречь, тогда уравнение (4.41) можно записать в виде:

$$c\ddot{S}_y - a\dot{S}_y = -c_l\ddot{Q}_s + b\dot{Q}_s + \dot{y}_T. \quad (4.42)$$

Полученное уравнение позволяет привести в соответствие значения установившихся параметров с реальными характеристиками протекающих процессов. Для этого необходимо знать среднестатистические характеристики шумов системы и шумов наблюдения. В нашем случае, в качестве шумов системы выступает интенсивность температурных деформаций $\dot{y}_T$, а в качестве шумов измерений шероховатость поверхности заготовки, которая оказывает значительное влияние на точность измерения съема материала в связи с одинаковым порядком соответствующих величин.

Выполненный анализ показывает, что при управлении операциями шлифования фазовые координаты объекта могут быть измерены с существенными случайными ошибками, а движение объекта подвержено случайным воздействиям. В этом случае, управление операцией может быть определено на основе результатов оценивания состояния системы.

Оценка состояния такой возможна за счет построения автоматической системы со стохастическим наблюдателем в форме фильтра Калмана-Бюсси. На основе полученного уравнения при использовании методике рассмотренной в работе [Братан] построена автоматическая система системы врезного шлифования шеек валов судового вало-винтового комплекса, замкнутый контур регулирования которой состоит из объекта, фильтра и регулятора (рис. 4.7):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \hat{\dot{x}}_1 \\ \hat{\dot{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -u_1 K_{C1} & -u_1 K_{C2} \\ 0 & \frac{b}{c_1} & -u_2 K_{C1} & -u_2 K_{C2} \\ K_1 & 0 & -u_1 K_{C1} - K_1 & 1 - u_1 K_{C2} \\ K_2 & 0 & -u_2 K_{C1} - K_2 & \frac{b}{c_1} - u_2 K_{C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{c_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} v, \quad (4.42)$$

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

Изображенная на структурной схеме 4.7 стохастическая система управления операциям врезного шлифования обеспечивает стабилизацию съема припуска на протяжении всего цикла.

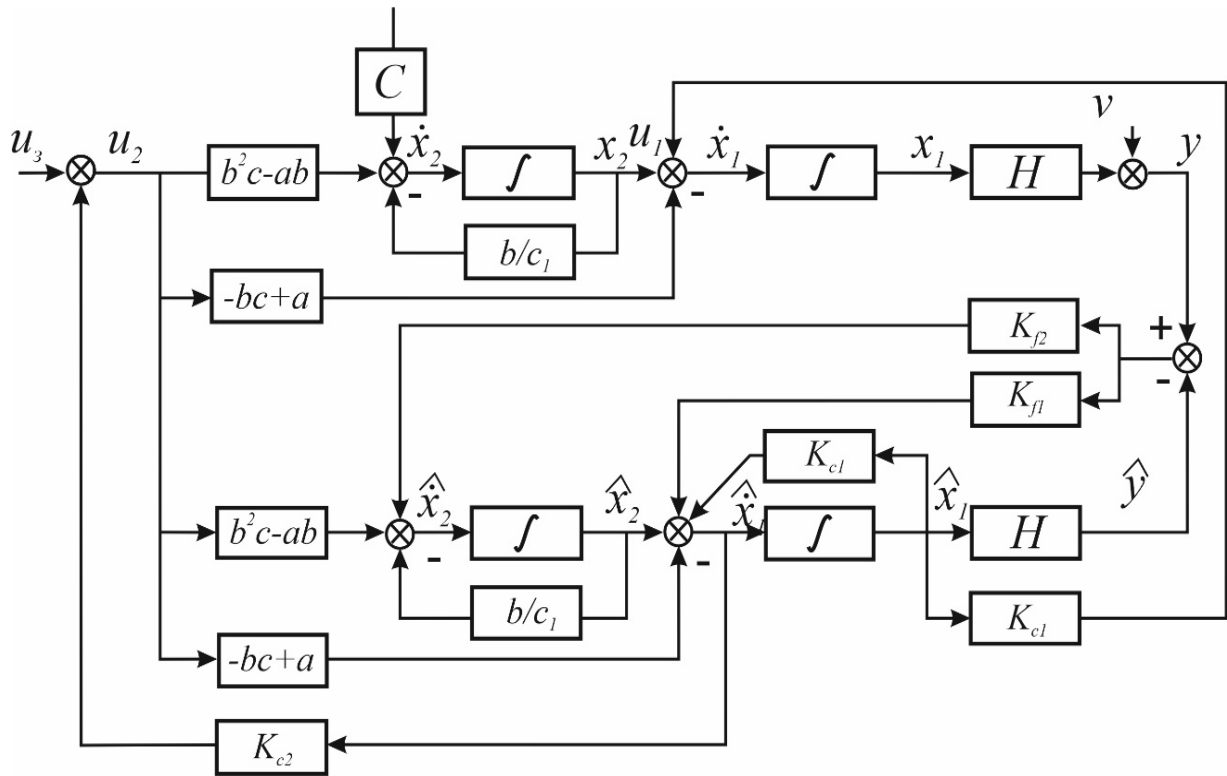


Рисунок 4.7 – Структурная схема стохастической системы управления процессом врезного шлифования

Для работы автоматической системы в память УЧПУ загружается информации о циклах, рассчитанных априорно с помощью детерминированных моделей и оптимизационных методов.

Структурная схема стохастической системы управления приведена на рисунке 4.7.

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

С целью иллюстрации работы системы проведен численный эксперимент, результаты сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Зависимость значений корректирующих коэффициентов от времени

ΔU , мкм	3,3	2,5	2,01	2,8	2,6	2,2	3,1	3,5	3,3	4,8
Δt , с	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
ΔU , мкм	4,7	4,9	5,1	4,3	3	2	1,7	3,1	3,8	2,6
Δt , с	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19
ΔU , мкм	2,5	2,6	1,6	2,2	2,1	2,1	2,8	2,6	2,4	3
Δt , с	0,20	0,21	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3
ΔU , мкм	3,3	3,2	3,2	2,7	3,3	3,6	3,7	3,5	3,6	2,2
Δt , с	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4
ΔU , мкм	3	3,3	3,5	2,5	2,2	2,7	2,9	2,6	2,7	2,7
Δt , с	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49	0,5
ΔU , мкм	2,6	2,9	3,3	2,7	2,5	2,9	2,6	2,6	2,7	3
Δt , с	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59	0,6
ΔU , мкм	2,8	3,1	3,9	3,1	3,0	1,8	2,6	2,1	2,8	3,4
Δt , с	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,7
ΔU , мкм	3	2,9	3	2,5	2,2	1,9	2,5	1,7	2,2	2,9
Δt , 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 по лимбу станка, на отклоняется от заданных значений, что приводит к отклонению выходных показателей от расчетных. автоматическая система с стохастическим наблюдателем позволяет получить оптимальные оценки выходных величин, на основе которых строится управление, обеспечивающее стабильность показателей качества обработанных изделий.

Лабораторные испытания САУ на «КЗТС» проводились на станке KWA KR 1800B при обработке шеек валов диаметром 200 мм из стали 45 инструментом 1 915x100x304,8 63C F60 K 6 B 50м/с. При шлифовании в качестве СОТС использовали составы, рекомендованные для обработки, стали 45.

В таблице 4.4 приведены результаты сравнительных испытаний процессов обработки шеек валов по заводской технологии и обработанных с помощью автоматической системы.

Таблица 4.4 – 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	$0,8 \times 10^{-3}$
С помощью автоматической системы									
		max	min	дисперсия σ^2 , мкм ²			max	min	дисперсия σ^2 , 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 4.8, 4.9 и 4.10 приведены примеры профилограмм и круглограмм снятые с поверхности шеек гребных валов, обработанных по традиционной схеме и с использованием разработанной автоматической системы управления.

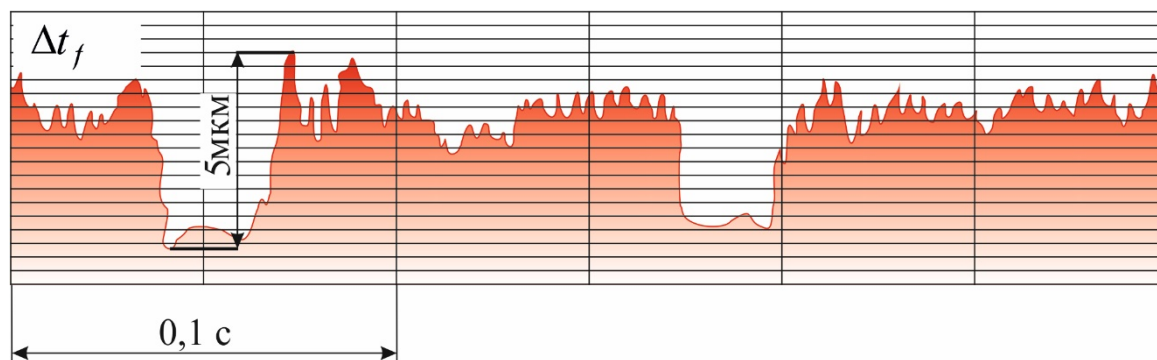


Рисунок 4.8 – Шероховатость поверхности при чистовом шлифовании по традиционной схеме (без САУТП)

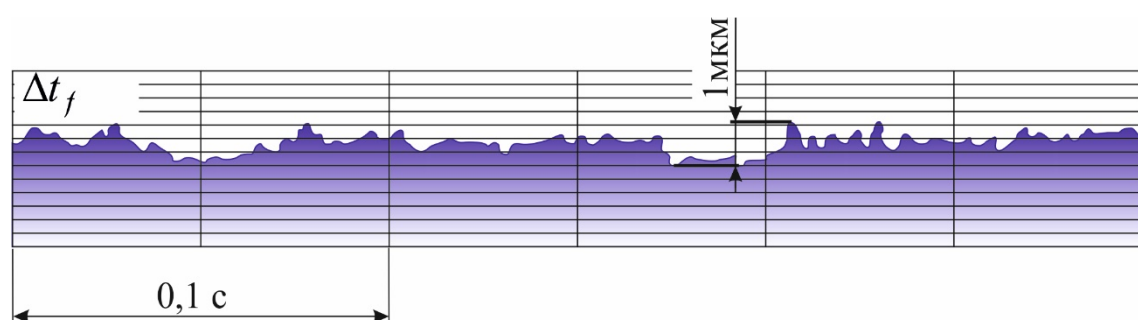


Рисунок 4.9 – Шероховатость поверхности при чистовом шлифовании с использованием предлагаемой САУТП

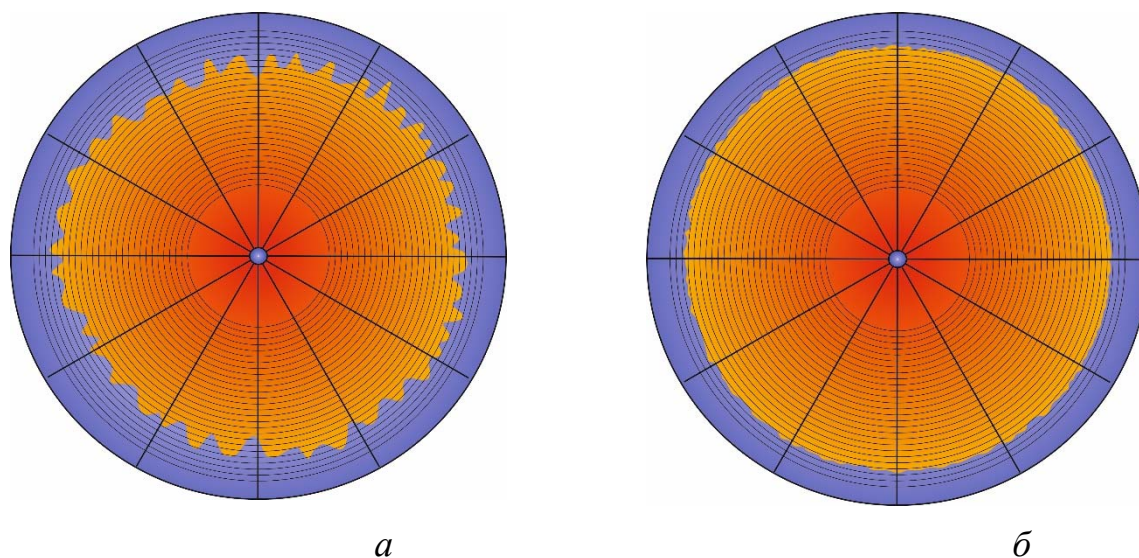


Рисунок 4.10 – Круглограмма поверхности шейки вала обработанной:
а – по заводской технологии; б – по предлагаемой технологии

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.

4.4. Выводы по главе 4

1. Разработано формализованное математическое описание операции круглого наружного шлифования, позволяющее для любого момента времени при и 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).

2. Разработанное математическое описание позволяет решить задачу построения предельных граничных циклов управления операцией шлифования, при которых обеспечивается минимально возможное машинное время при ограничениях качества поверхности изделия, не хуже требуемого по принятой технологии.

3. Выполненные расчеты позволили определить программное управление для операций шлифования опорных шеек гребного вала двигателя, относительно которого необходимо осуществлять стабилизацию параметров технологического процесса.

4. При обработке шеек валов по предложенным граничным алгоритмам без подсистемы стабилизации, увеличился разброс размеров в середине периода стойкости шлифовального круга, вследствие воздействия на процесс возмущающих факторов.

5. Для обеспечения стабильности параметров качества шеек валов при шлифовании вдоль предельной границы, необходимо стабилизировать параметры расчетного технологического цикла что, возможно, осуществить только за счет

введения систем с обратной связью, адекватно оценивающих текущее состояние технологической системы.

6. С целью обеспечения стабильности параметров качества шеек валов осуществлен синтез САУ операцией чистового круглого наружного шлифования, применение которой позволило обеспечить стабильность показателей качества при реализации системой ЧПУ предельных граничных циклов.

7. Разработанные в работе мероприятия в сравнении с традиционной обработкой обеспечивают стабильное качество обработки и снижение значения дисперсий по размеру поверхностей – в 1,85 раза, по шероховатости – в 2,5 раза.

ГЛАВА 5**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ
ПРИ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОПОРНЫХ
ПОДШИПНИКОВ КОРАБЕЛЬНЫХ ВАЛОПРОВОДОВ****5.1. Исследование показателей надежности опорных подшипников корабельных валопроводов**

Вопросы повышения надежности технических систем – машин и механизмов различного назначения являются одними из важнейших для отечественного производства. Наука о надежности, выросшая из проблемы надежности подшипников качения, в дальнейшем развивалась главным образом в применении к радиоэлектронным системам и в направлении математической теории [1]. Между тем надежность машин, например, технологических, а также судовых и корабельных систем имеет свою специфику, связанную с преобладанием износowych и усталостных отказов и влиянием большого многообразия факторов. В России и за рубежом опубликовано множество научных работ по надежности, большинство из которых имеет математическую направленность [2, 3, 4]. Однако до настоящего времени не уделяется достаточного внимания совершенствованию технических расчетов надежности с учетом потоков отказов и восстановлений подсистем и агрегатов машин, случайным процессам при их технической эксплуатации, в частности, при исследовании надежности подшипниковых опор корабельных валопроводов и взаимодействии элементов и подсистем пропульсивного комплекса судна.

С целью оценки эффективности технологических процессов финишной обработки производилась оценка надежности работы подшипников скольжения пропульсивного комплекса судна, выявления характерных причин, приводящих к выходу из строя рабочих элементов подшипниковых опор, а также поиска рациональных путей повышения надежности.

Объектом данного исследования является пропульсивный корабельный комплекс, служащий силовым механизмом передачи крутящего момента от ис-

точника энергии (главного двигателя) через валопровод на гребное винтовое устройство.

Анализ статистических данных по эксплуатационным отказам элементов пропульсивного комплекса судна (рисунок 5.1) показывает, что в общей доле отказов системы существенную долю составляют отказы подшипниковых опор редукторов и участков валопровода, испытывающие большие радиальные и осевые нагрузки.

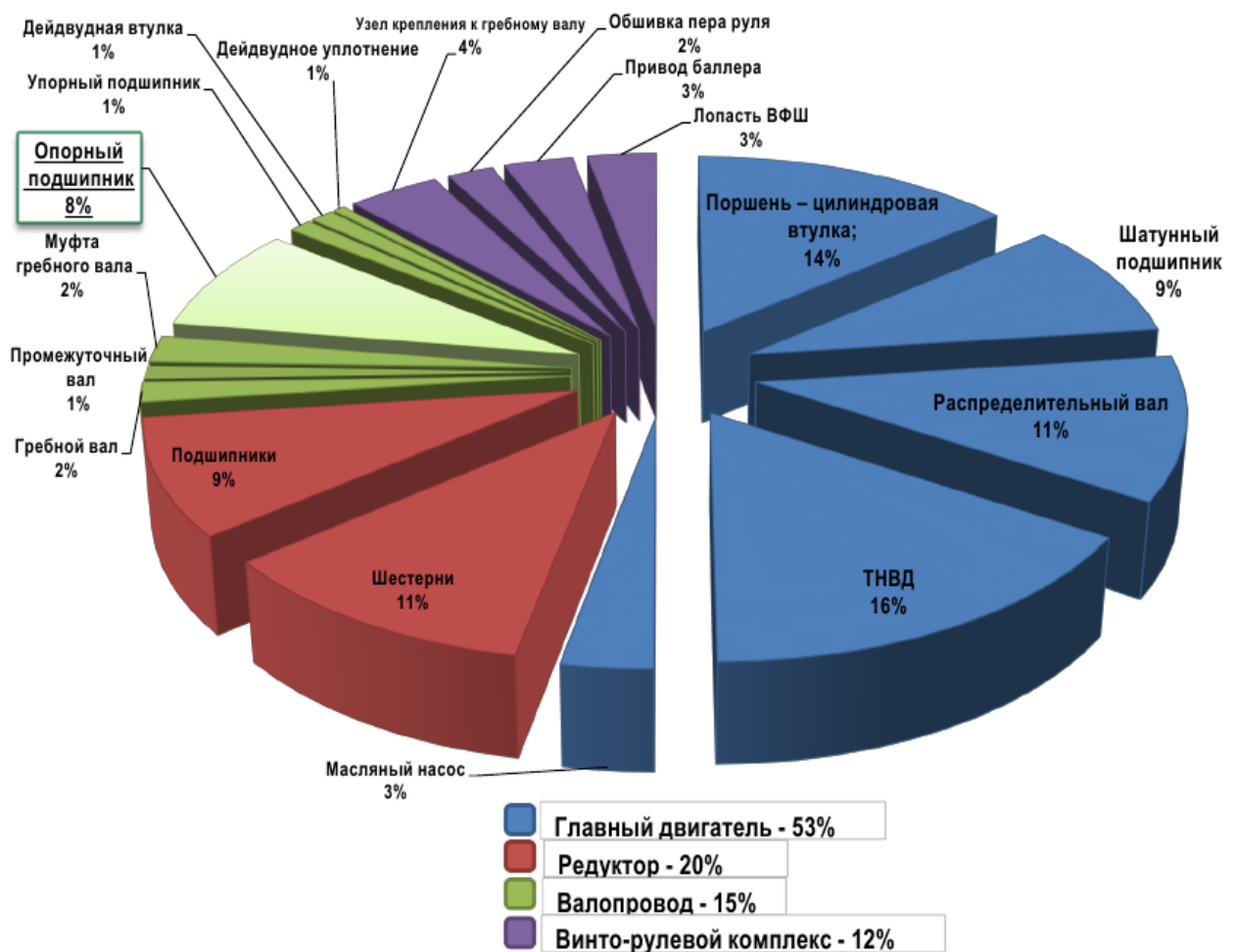


Рисунок 5.1 – Анализ эксплуатационных отказов подсистем и элементов пропульсивного комплекса судна

В подсистеме валопровода по процентному удельному весу отказов наименее надежным выступает опорный подшипник (8%). Данный подшипник является радиальным гидродинамическим, конструкция его приведена на рисунке 5.2.

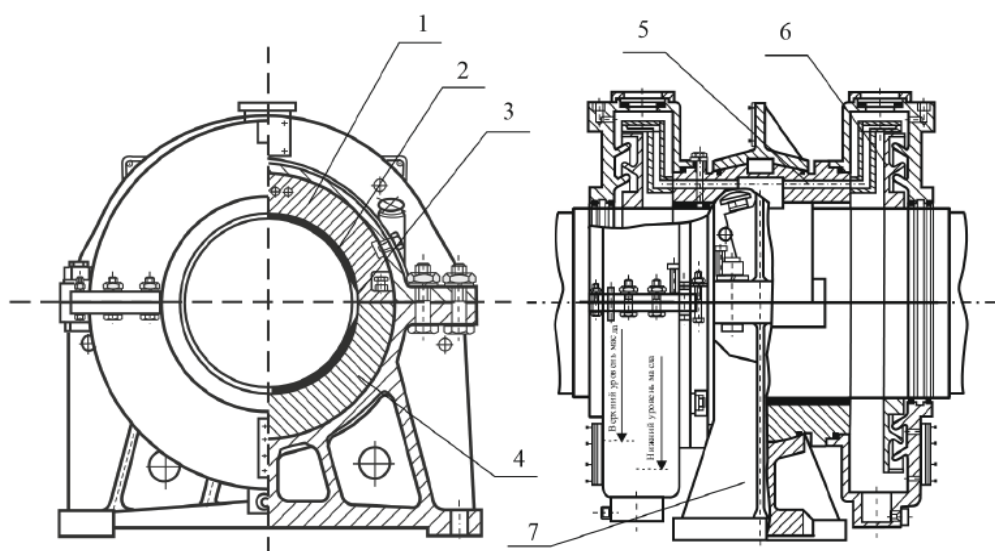


Рисунок 5.2 – Схема радиального гидродинамического подшипника:

1 – верхний вкладыш; 2 – антифрикционный слой; 3 – смазочная канавка; 4 – нижний вкладыш; 5 – маслоподающий канал; 6 – диск; 7 – корпус

В общем плане техническая система конструкции судна взаимодействует с окружающей средой, а ее подсистемы между собой в виде схемы прямого и обратного взаимодействий. На систему пропульсивного корабельного комплекса, структурная схема которого представлена на рисунке 5.3, в процессе эксплуатации накладывается совокупность воздействий (рисунок 5.4).

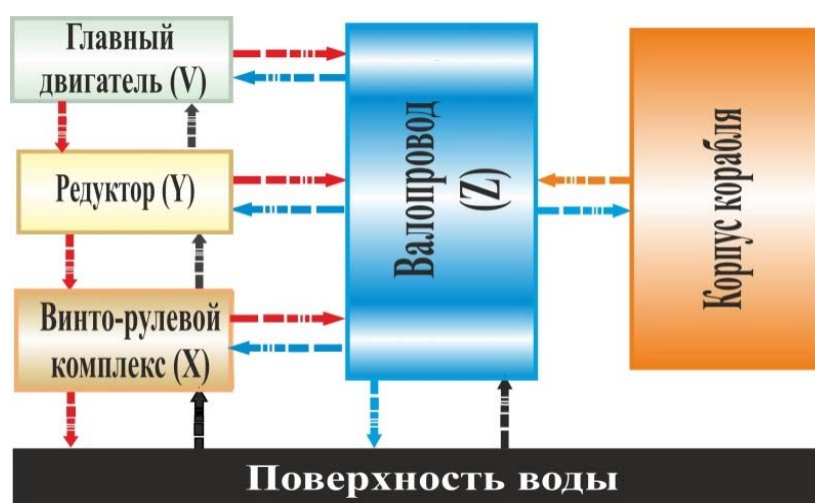


Рисунок 5.3 – Структурная схема элементов системы пропульсивного комплекса судна

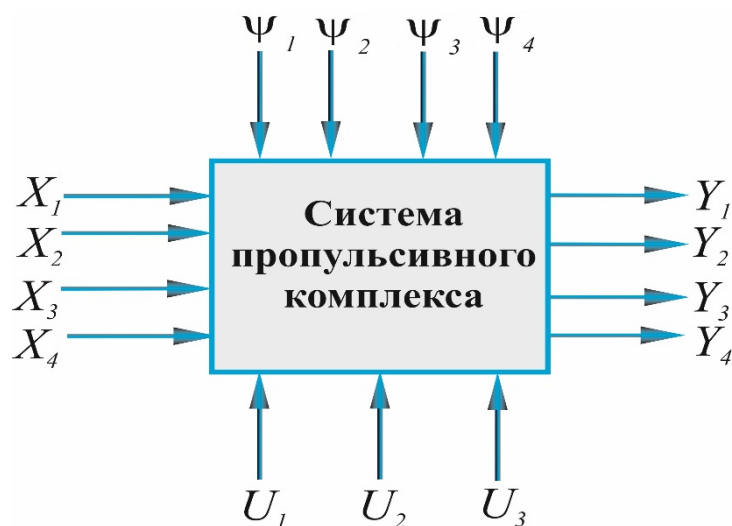


Рисунок 5.4. – Схема действия на систему переменных: X_1, X_2, X_3, X_4 – начальные состояния винто-рулевого комплекса, редуктора, главного двигателя, валопровода; $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4$ – возмущающие: амплитуда морского волнения, вибрации от других механизмов, загрязнение элементов механизма, силы сторонней нагрузки; U_1, U_2, U_3 – управляющие: поддержание мощности и скорости, охлаждение элементов, гашение вибраций; Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 – выходные: мощность, частота оборотов, производительность, величина износа элементов

Это – входные переменные X_1, X_2, X_3, X_4 – начальные состояния соответственно винто-рулевого комплекса, редуктора, главного двигателя, валопровода; возмущающие воздействия Ψ_2, Ψ_3, Ψ_4 – соответственно амплитуда морского волнения, вибрации от других механизмов, загрязнение элементов механизма, силы сторонней нагрузки; возможные управляющие воздействия U_1, U_2, U_3 – соответственно поддержание мощности и скорости, охлаждение элементов, гашение вибраций. Результатом приведенных воздействий на систему являются выходные показатели Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 – соответственно мощность, частота вращения, производительность, величина износа элементов.

Под надежностью понимают интегральное свойство объекта, обусловленное его безотказностью, ремонтпригодностью, долговечностью и сохраняемостью. Отказ является случайным событием и для расчета показателей надежности применяют методы теории вероятностей и математической статистики [5, 6, 7]. При расчетах показателей надежности используют понятие наработки – продолжительности или объема работы объекта.

Для технологического оборудования наработку измеряют в часах, для судовых систем и механизмов – в часах или моточасах. Распределение случайной величины наработки, полученной в результате испытаний или эксплуатации в реальных условиях, в зависимости от преобладающих видов отказов может быть подчинено некоторым законам, например, нормальному, экспоненциальному, Вейбулла, Эрланга и т.п. [6 – 11].

В период нормальной эксплуатации постепенные отказы еще не проявляются, поэтому надежность характеризуется внезапными отказами, которые объясняются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и имеют постоянную интенсивность, не зависящую от возраста изделия [6, 7]. При этом вероятность безотказной работы и вероятность отказа определяются по выражениям для экспоненциального закона распределения случайной величины, которыми можно аппроксимировать время безотказной работы широкого круга объектов, в том числе особо ответственных машин и агрегатов системы пропульсивного комплекса судна, эксплуатируемых в период после окончания приработки и до существенного проявления постепенных отказов; машин с последовательной заменой отказавших деталей; машин вместе с электро- и гидрооборудованием и системами управления; сложных объектов, состоящих из многих элементов, причем время безотказной работы каждого из них может не быть распределено по экспоненциальному закону (важно, чтобы отказы одного элемента, не подчиняющегося этому закону, не доминировали над другими).

Параметры потоков отказов и восстановлений могут даже равно надежные узлы при разных длительностях ремонта или восстановления заставить по-разному влиять на общую надежность системы. Эти особенности можно учесть при построении размеченных графов состояний и оценки вероятности нахождения в этих состояниях (при условии распределения случайных величин по экспоненциальному закону, подтвержденному полученной формой кривой плотности вероятности).

Для дальнейших исследований уровня надежности системы пропульсивного комплекса судна с учетом отказов функционирования его подсистем приведен

размеченный граф их состояний (рис. 5.5) при условии, что все потоки отказов и восстановлений – простейшие. Каждое такое состояние характеризуется соответственно параметрами потоков отказов λ_i и восстановлений μ_i . Для решения задачи необходимо вычислить 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:

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

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

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

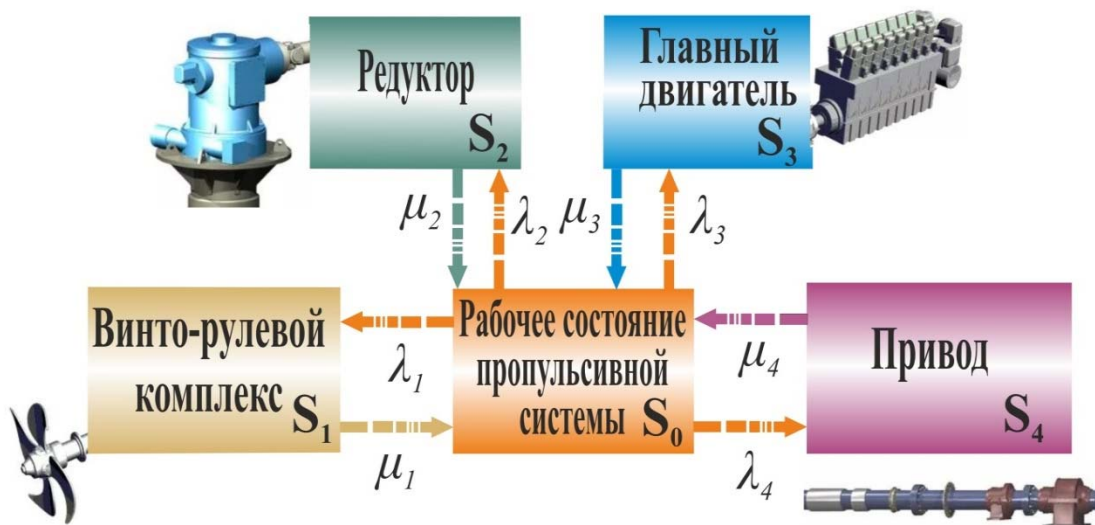


Рисунок 5.5 – Размеченный граф состояний элементов системы пропульсивного комплекса судна с учетом отказов функционирования: λ – потоки отказов; μ – потоки восстановлений; S_0 – рабочее состояние пропульсивной системы; S_1 – отказ винто-рулевого комплекса, S_2 – отказ редуктора, S_3 – отказ главного двигателя, S_4 – отказ привода (валопровода)

Нормальная работа системы пропульсивного комплекса судна определяется состоянием S_0 , а состояния $S_1 \dots S_4$ соответствуют отказам соответственно подсистем винто-рулевого комплекса, редуктора, главного двигателя, привода (вало-

провода). При выходе из строя одной из подсистем вся система переходит в нерабочее состояние. Узлы, агрегаты и детали указанных подсистем могут требовать ремонта или замены в процессе эксплуатации с учетом отказов функционирования и последующего восстановления.

Для вероятностной оценки каждого из состояний необходимо на основе построенного размеченного графа состояний (рис. 5.5) 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 [7, 8, 9].

Так, для размеченного графа состояний, изображенного на рисунке 5, система дифференциальных уравнений А.Н. Колмогорова с помощью условия нор-

мировки $\sum_{i=0}^4 P_i \approx 1$ представляется в следующем виде:

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

Решение указанной системы с помощью условия нормировки $\sum_{i=0}^4 P_i \approx 1$

представляется следующим образом:

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

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

Общий вид экспериментального стенда представлен на рисунке 5.6.



Рисунок 5.6 – Экспериментальный стенд по исследованию валопровода в радиальных подшипниках скольжения

Экспериментальный стенд представляет собой модуль, состоящий из следующих позиций: подшипник опорный; промежуточный вал; крышка картера; термометр; крышка; вкладыш верхний; устройство маслоприемное; полукольцо маслоподающее; манжета уплотнительная; крышка смотровая; корпус картера; вкладыш нижний; корпус; пробки под спускные отверстия.

Главной задачей экспериментальных исследований гидродинамических подшипников, является проверка работоспособности опорных подшипников с шейками валов обработанных по заводской и предлагаемой технологии.

Для решения поставленной задачи были проведены исследования на экспериментальном стенде по исследованию валопровода в радиальных подшипниках скольжения; проведено исследование режимов течения смазочного материала при степени обводнения $k = 0 - 70 \%$. С помощью вибродиагностической аппаратуры фиксировались изменения обводненного

смазочного материала в зазоре гидродинамического подшипника.

Для исследования радиальных подшипниках скольжения, конструктивные и режимные параметры образцов были получены перерасчетом характеристик серийно выпускаемых изделий судовых валопроводов с учетом критериев подобия. Экспериментальные исследования производились на установившемся режиме работы модельного подшипника при постоянной скорости вращения и заданной статической нагрузке. В процессе проведения экспериментальных исследований непрерывно контролировались следующие режимные параметры:

1. при визуализации – режимы течения обводненного смазочного материала;
2. при индексировании статических и динамических характеристик опытного образца с нагрузочным устройством – толщина несущего слоя в зоне минимального зазора между поверхностью вала и втулки, температуры смазки на входе в подшипник, в несущем слое и на сливе из рабочей зоны, давление в напорной магистрали и по длине несущего слоя, а также расход смазочного материала;
3. при индексировании реакции смазочного слоя подшипника на внешнее возмущение (экспериментальный стенд) – параметры виброактивности трибоузла (виброскорость), температуры смазки на входе в подшипник в несущем слое и на сливе из рабочей зоны, давление в напорной магистрали, а также расход смазочного материала.

По результатам измерений определяются параметры установившегося режима смазки эксцентриситет и угол наклона линии смещения центров вала подшипника, а также динамические отклонения от положения статического равновесия: амплитуды и частоты колебаний, обусловленных реологическими свойствами обводненного смазочного масла и нагрузочно-скоростными особенностями режима работы опытного образца.

В качестве эталонных значений амплитуд и частоты колебания принимались показания токовых датчиков, полученные при работе подшипника скольжения на «чистом» масле. Далее производилось сопоставление полученных

данных. За отказы принималась потеря устойчивости движения вала в подшипнике скольжения на водомасляном смазочном материале в диапазоне $k = 60 - 75\%$ (в зависимости от нагрузочно-скоростных характеристик узла), что объясняется постепенным увеличением размеров водяных капель, диаметр которых в процессе эксплуатации становится соизмерим с макро масштабами каналов ($\sim 1-5 \cdot 10^{-6}$ м), выделением моодисперсных струйных и пленочных течений, а также диффузией воды в адсорбционные масляные слои, вызывающей дезорганизацию их смектической структуры.

Контроль за техническим состоянием ГЭУ, осуществлялся на основе измерения и анализа вибрации (рис. 5.7).

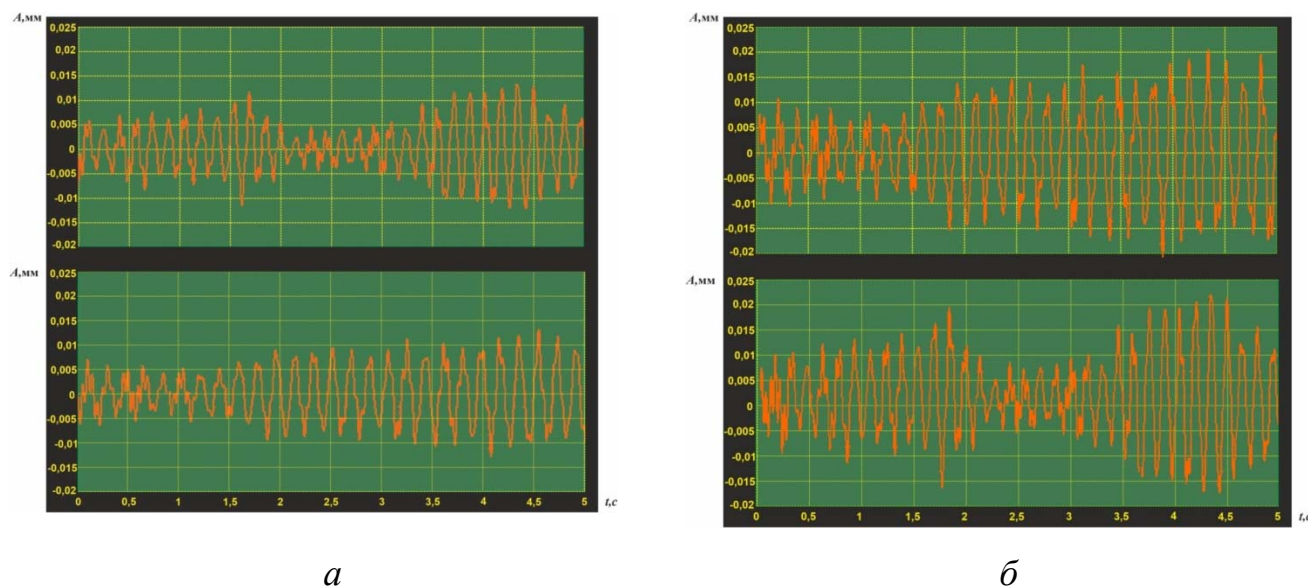


Рисунок 5.7 – Вертикальная и горизонтальная составляющие вибрации, полученная при испытаниях подшипников скольжения изготовленных а) по предлагаемой и б) заводской технологиям

Оценка технического состояния объекта исследования осуществлялась с помощью специализированного программно-диагностического комплекса, реализующего процессы вибромониторинга и вибродиагностики, дополняющие друг друга. Вибродиагностика позволяет оценивать увеличенный круг задач и применяется, в отличие от вибромониторинга, не для обнаружения и прогноза развития вибросостояния роторных систем, а для анализа технического состояния элементов систем удержания и стабилизации валов ГЭУ, для которых существует реальная вероятность отказа. Для этого измеряется не только низкочастотная и

среднечастотная вибрация, но и высокочастотная, а также используется более сложные, чем при мониторинге, методы анализа сигналов вибрации.

Структура системы вибрационного мониторинга и диагностики, реализующей требования по помехоустойчивости и надежности, скорости выполнения операций анализа и оперативности принятия решения, представлена на рисунке 5.8.

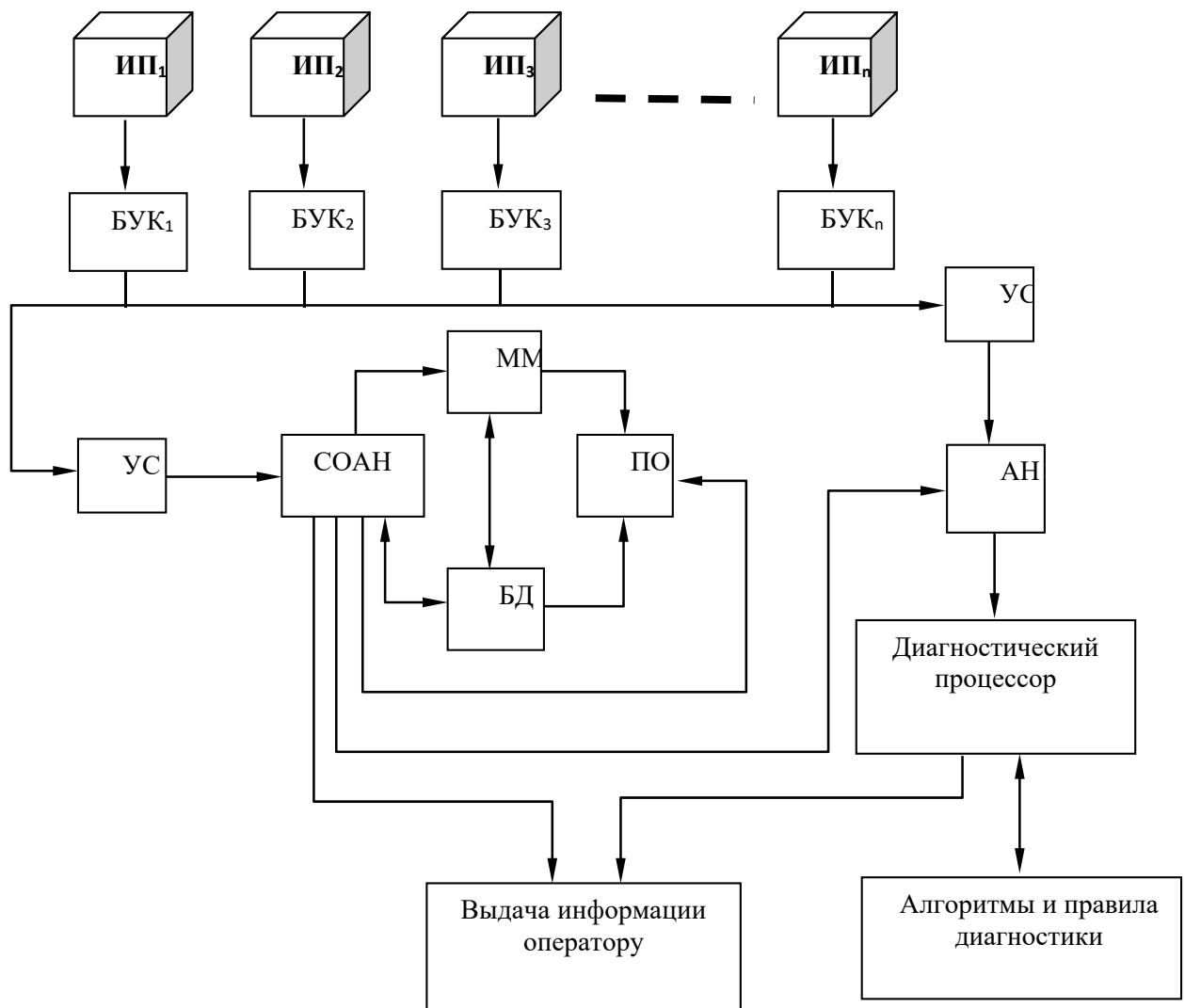


Рисунок 5.8 – Структура системы вибрационного мониторинга и диагностики: ИП – измерительный преобразователь; БУК – блок усиления и коммутации; УС – устройство согласования; СОАН – средство обработки и анализа; ММ – математическая модель; БД – база данных; ПО – программа обработки базы; АН – анализатор

Измерительный преобразователь (ИП) измеряет относительную вибрацию ротора и через блок усиления и коммутации (БУК) передает низкочастотную и среднечастотную составляющую вибрации в систему мониторинга. По запросу подсистемы диагностики он может выдавать все необходимые составляющие вибрационного сигнала. Устройство согласования (УС) позволяет согласовать входные цепи анализатора и выходные цепи БУК, что предотвратит несанкционированную потерю информации.

Средства обработки и анализа (СОАН) преобразуют произвольный вибрационный сигнал от первичных преобразователей в удобную для анализа форму, используя быстрые преобразования Фурье (БПФ).

СОАН посылает запрос в базу данных о состоянии системы удержания и стабилизации валов СТЭУ. При отсутствии в базе данных (БД) стандартного решения производится расчет по математической модели и устанавливаются функциональные связи между результатами вибрационных измерений и причинами их возникновения. Программа обработки базы добавляет результаты расчетов в БД и в дальнейшем эта ситуация будет считаться определенной. Таким образом, система накапливает опыт.

СОАН, после получения информации с базы данных или от математической модели, определяет необходимость в проведении диагностики с последующим запросом на получение более полной информации и углубленного анализа всех составляющих сигналов вибрации. Анализатор (АН) обрабатывает сигналы вибраций, используя алгоритмы время – частотного анализа, и выдает информацию диагностическому процессору, реализующему алгоритмы диагностики с целью прогноза развития вибросостояния объекта и выдачи рекомендаций оператору по обеспечению работоспособности систем удержания и стабилизации валов ГЭУ.

Преимуществами экспертной системы, основанной на принципах вибрационного мониторинга и диагностики, являются унификация диагностических параметров (сигналов вибрации), обеспечивающая оперативность оценки технического состояния объекта, возможность ранней диагностики дефектов по высокочастотной составляющей вибрации, интерактивность результатов экспертной

оценки и перспективность широкого внедрения в системы поддержки принятия решения операторами ГЭУ. Так как при анализе квазистационарных сигналов, как правило, бывает достаточно охарактеризовать частотный состав измеряемого сигнала, то для спектрального анализа в реальном масштабе времени применены процедуры пакетной обработки на основе быстрого преобразования Фурье. Полученные в ходе экспериментов результаты обрабатывались в пакете Simulink. Пример спектрального представления сигнала вибрации показан на рисунке 5.9.

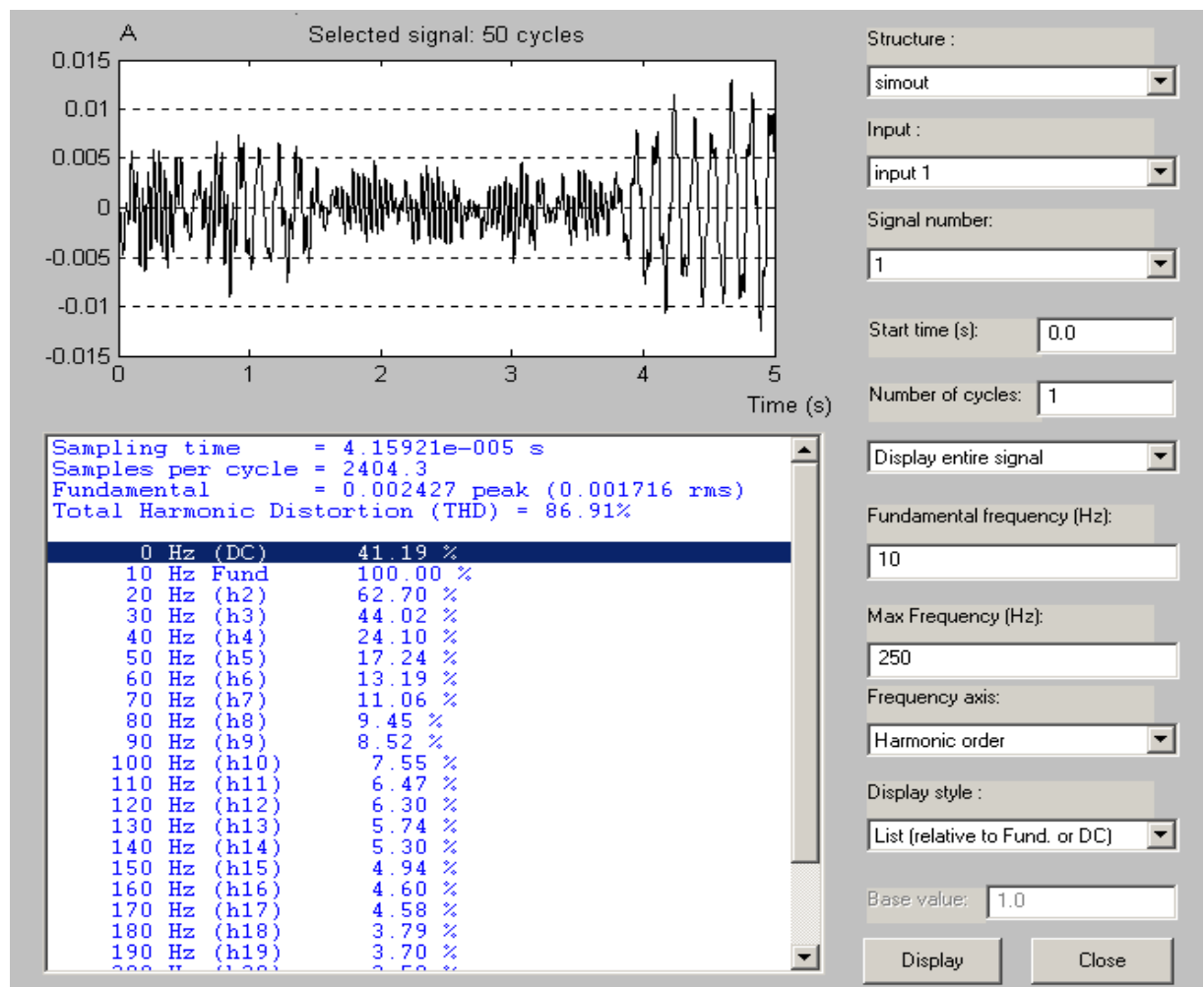


Рисунок 5.9 – Спектральное представление сигнала

Наличие в системе двух источников самовозбуждения обуславливает существование взаимного влияния колебаний – возмущения передаются от одного колебательного контура к другому. При малых отклонениях коэффициентов жесткости и демпфирования подшипников от спецификационных в системе существует два устойчивых состояния равновесия, разделенных седловой точкой. Если

причиной потери устойчивости подвижного равновесия ротора является только один из источников самовозбуждающихся колебаний, то предельным устойчивым движением в роторной системе является цикл, характеризующийся резонансными колебаниями вала.

Для исследования системы пропульсивного комплекса судна на ЭВМ с учетом параметров потоков отказов и восстановлений был использован алгоритм блок-схема программы расчета надежности рациональных вариантов которого включает следующие основные этапы:

1. Ввод названий элементов базовой системы.
2. Расчет количества подсистем (элементов).
3. Генерация матрицы исходных данных.
4. Заполнение матрицы исходными данными.
5. Формирование уравнения финальных вероятностей.
6. Расчет вероятности безотказной работы системы.
7. Расчет вероятностей отказов подсистем (элементов) системы.
8. Генерация матрицы результатов.
9. Вывод результатов моделирования.

Рассмотрим каждый этап предложенного алгоритма. Первый этап предполагает ввод названий элемента системы пользователем для идентификации их в дальнейшей работе программы и при выводе результатов. Для этого будет использоваться отдельное поле, в которое непосредственно вводится название элемента и список, в котором будут отображаться уже введенные подсистемы или элементы.

На втором этапе после окончания ввода названий элементов производится расчет количества элементов в заданной системе. Эта информация служит как для создания дальнейшего интерфейса программы (появления необходимого количества полей ввода для параметров элементов), так и для расчетов финальных вероятностей.

На третьем этапе производится генерация матрицы исходных данных, т.е. создается матрица с пустыми значениями потоков отказов и восстановлений для

каждой подсистемы (элемента), присутствующих в системе. В соответствии с этой матрицей на рабочем поле программы создается необходимое количество полей ввода для таких данных, как потоки отказов и восстановлений соответствующих подсистем (элементов) системы.

В ходе процесса, описанного на четвертом этапе, пользователь вводит данные о потоках отказов и восстановлений в поля ввода, присутствующие на рабочем поле программы. Эти данные автоматически заносятся в матрицу исходных данных.

Пятый этап предполагает составление программой системы финальных уравнений для заданной системы.

На этапах шестом и седьмом решается система уравнений финальных вероятностей (уравнений А.Н. Колмогорова). Для начала вычисляется вероятность безотказной работы P_0 системы. Затем вычисляются вероятности отказов каждой из подсистем (элементов) системы P_1, P_n .

Восьмой этап отвечает за создание матрицы результатов и запись полученных результатов в соответствующие ячейки этой матрицы.

Вывод результатов моделирования осуществляется на этапе девятом. Вывод результатов предполагается реализовать в текстовом и графическом виде. Текстовый вид представляет собой список с указанием элемента и вероятностью его отказа, в конце выводится вероятность безотказной работы системы. Графический вид выполняется в виде диаграммы, по оси X расположены элементы системы, по оси Y – вероятности отказов этих элементов. Для удобства чтения данной диаграммы вероятность безотказной работы не выводится, т.к. является несоизмеримо большей по величине. Графический алгоритм программы представлен на рисунке 5.10.

Эксплуатационные данные по параметрам потоков отказов системы с учетом совершенствования и восстановления подсистем пропульсивного комплекса судна, а также результаты моделирования приведены в таблице 5.1.

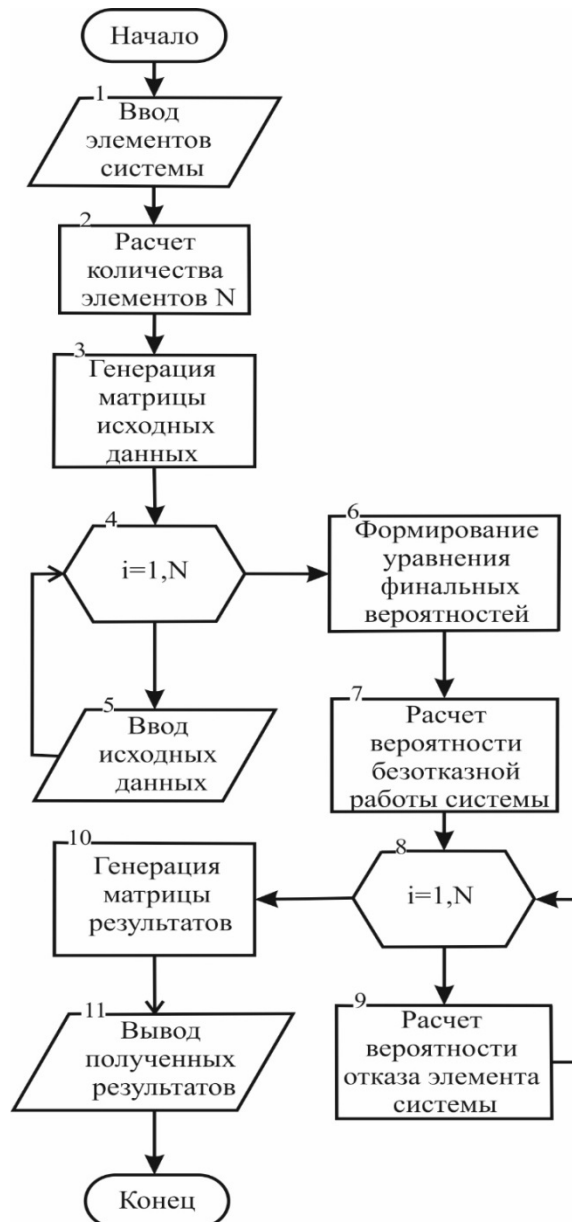


Рисунок 5.10 – Графический алгоритм расчета надежности системы ВУ

Таблица 5.1 – Результаты расчетов надежности подсистем пропульсивного комплекса (заводская технология обработки шеек валов подшипников скольжения)

Подсистема	Вероятность отказа
Винто-рулевой комплекс, P_1	0,0524
Редуктор, P_2	0,0476
Главный двигатель, P_3	0,0606
Привод (валопровод), P_4	0,1681
Вероятность безотказной работы системы пропульсивного комплекса судна, P_0	0,6713

Подсистемы главного двигателя (6,06% отказов, $P_3 = 0,095$), 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. 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). Анализируя аналогичным образом, на основе размеченного графа состояний выявленной наименее надежной подсистемы привода (валопровода) и расчетов соответствующих вероятностей состояний ее механизмов и узлов, определены наименее надежные 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 надежными 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, $P_{42} = 0,0189$).

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования показали что, разработанный в работе мероприятия позволили повысить эксплуатационную надежность пропульсивного комплекса судна за счет повышения надежности опорных подшипников на 11,2%, гребного вала на 3,5% промежуточного вала на 4%.

Мероприятия по повышению надежности должны быть направлены в первую очередь на модернизацию этих найденных уязвимых узлов валопровода, а также на усовершенствование технологического процесса их изготовления и сборки.

5.2. Результаты промышленных испытаний системы управления процессом чи-стового шлифования

Как было показано в предшествующих главах диссертации, в настоящее время чистовое шлифование осуществляется с применением традиционных методов, не в полной мере учитывающих влияние случайных факторов, снижающих стабильность показателей качества производимых изделий. Для стабилизации показателей качества технологические режимы назначаются исходя из неблагоприятных условий, например, возобновление режущих свойств изношенного инструментам производится значительно раньше, чем того требует его действительное состояние. При прогнозировании состояния ТС используются традиционные детерминированные модели протекания ТП, осуществляемые с применением традиционных режимов резания, способов диагностики и управления [13].

Таким образом, для процессов чистового шлифования возникает задача оптимальной диагностики и управления. Необходимость определения в процессе обработки значений фактической глубины резания и скорости ее изменения, которые недоступны непосредственному измерению. Задача их оценки решается с использованием автоматической системы, имеющей структуру, приведенную в главе 4.

С течением времени, значения выходных переменных и их оценок наблюдателем неизбежно расходятся вследствие, например, отличий действительных значений отклонений величин и их моделей.

При измерении фазовых координат с помощью лазерных интерферометров и датчиков положения (приложение Б) (рис. 5.11) с гауссовскими шумами, измерения оценки состояний ТС будут иметь наименьшую из возможных дисперсию [16], что позволяет их использовать в системах управления по отклонению относительно режимов, задаваемых условиями граничного цикла.

Выполненные исследования процесса чистового шлифования были использованы при решении ряда практических задач финишной обработки деталей на автоматизированном оборудовании.



Рисунок 5.11 – Датчик положения

Разработанная методика внедрена на предприятии «91 СРЗ ЧФ» (акт внедрения приведен в приложении Г).

Внедрение результатов проведенных исследований выполнено в рамках комплексного плана исследований кафедры «Технология машиностроения» Севастопольского государственного университета» по проблеме повышения качества деталей при механической обработке.

Результаты, полученные автором диссертации, использованы в учебном процессе СевГУ при изучении дисциплины Технология абразивно алмазной обработки.

При управлении CNC станка реализуются следующие задачи.

1. Системой CNC:

- Позиционирование инструмента через реализацию быстрого и ускоренного подвода;
- Включение перемещения суппорта станка с резцедержателем и системы подачи СОТС;
- Обработка сигнала для приведения в действие системы управления;
- Ожидание сигнала к «Конец обработки»;
- Реализация коррекции цикла и смена инструмента, в случае поступления сигнала «Предельный износ»;
- Реализация быстрого отвода инструмента в исходное положение после получения сигнала «Конец обработки»;
- Включение вращения шпинделя и системы смазки и охлаждения.

2. Управление процессом посредством дополнительного блока управления:

- Ожидание сигнала «Начало процесса шлифования»;
- Реализация регулируемого процесса шлифования и обратной связи;
- Обработка сигнала «Конец обработки» для системы CNC по достижении конечного размера детали;
- Обработка сигнала «Смена инструмента» для системы CNC в момент окончания периода его стойкости.

Рассмотренные задачи реализуются посредством элементов и систем аппаратного оснащения, необходимых для управления процессом шлифования, активного контроля и обмена информацией. К таким системам предъявляются следующие требования.

1) К дополнительному блоку управления:

- Наличие CPU с соответствующей операционной системой;
- Оснащение компьютера платами АЦП для цифрового преобразования аналоговых величин, измеряемых в процессе шлифования;
- Наличие декодера приращений для регистрации пути подачи инструмента и съема припуска на обработку;
- Цифровой «вход/выход» – для связи с системой CNC станка.

2) К измерительным датчикам:

- Наличие датчика измерения пути вдоль оси подачи X;
- Наличие датчиков для измерения съема припуска;

3) Система CNC станка должна воспринимать и обрабатывать:

- Цифровой сигнал старта цикла обработки.
- Цифровой сигнал для отвода резца и окончания цикла шлифования.
- Цифровой сигнал «Конец обработки» готовит измерение съема припуска.

5.3. Оценка эффективности системы стабилизации чистового шлифования при опытно-промышленной эксплуатации

Промышленные испытания системы стабилизации на «91 СРЗ ЧФ» (г. Севастополь) проводились при обработке деталей из стали 40Х. Диапазон исследуемых режимов резания определялся по существующим рекомендациям [52]. При шлифовании в качестве СОТС использовали растворы, рекомендованные для обработки соответствующей категории материалов.

Все заготовки, обработанные со стабилизацией цикла по шероховатости поверхности, допуску на изготовление, биению относительно оси соответствовали требованиям технологической документации. Отмечено улучшение качества и повышение стабильности процесса.

Предлагаемая система обеспечивает наилучшую оценку вектора состояния технологической системы, что позволяет для управления процессом кроме скоростных характеристик (например, подачи) использовать их скорости изменения, то есть реализуется управление по скорости перемещения инструмента и его ускорению.

Это позволило 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.

Использование предлагаемого способа и системы стабилизации позволило снизить время на обработку деталей. Наиболее значительно время снижается для 1-й заготовки – в 1,42–1,5 раза, для второй – в 1,38–1,40 раза. В среднем производительность процесса шлифования шеек валов повышается на 20%.

Таким образом, выполненные в производственных условиях экспериментальные исследования подтверждают высокую эффективность системы стабилизации цикла и возможность широкого применения разработанных методик в автоматизированном производстве.

Экономический эффект от внедрения результатов работы составил 6 026 000 рублей в год.

5.4. Выводы по главе 5

1. 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 валков 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%.

2. Предложенный подход к оценке надежности технических объектов на примере системы пропульсивного комплекса судна позволил описанием функционирования системы моделями случайных процессов на основе использования размеченных графов состояний получить значения вероятности безотказной работы (P_0), а также определить наименее надежные подсистемы, их узлы и элементы, оказывающие существенное влияние на общий уровень надежности системы. Полученные результаты позволяют эффективно проводить мероприятия по повышению надежности системы. В первую очередь – это совершенствование найденной уязвимой подсистемы привода (валопровода), а также ее наименее надежных узлов и элементов (опорного подшипника, гребного и промежуточного валов) на основе применения новых прогрессивных технологических процессов и операций для их изготовления и сборки.

3. Разработанные в работе мероприятия позволили повысить эксплуатационную надежность пропульсивного комплекса судна за счет повышения надежности опорных подшипников на 11,2%, гребного вала на 3,5% промежуточного вала на 4%.

4. Результаты выполненных исследований внедрены в действующее производство «91СРЗ ЧФ» (г. Севастополь). Годовой экономический эффект от внедрения результатов работы составил 6 026 000 рублей в год.

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 само перерезания 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 превалирующей высокочастотных гармоник. Они являются причинами образования на детали со-

ответственно 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 САУ операцией чистового шлифования, 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%. Разработанные в работе мероприятия позволили уменьшить коэффициент себестоимости технической эксплуатации на 26-28% и увеличить срок службы опорных узлов в 1,5-2 раза. Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составил 6 026 000 рублей в год.

Список сокращений

- ЛРШ – ленточное ротационное шлифование;
- СОТС – смазывающе-охлаждающая технологическая среда;
- ДТА – изменение теплосодержания вещества;
- DTG – скорость изменения массы вещества при нагревании;
- TG – абсолютная величина изменения массы вещества;
- ВРШ – винт регулируемого шага;
- СЭУ – судовая энергетическая установка;
- ЭУ – энергетическая установка;
- ГДП – гидродинамический подшипник;
- РГДП – радиальный гидродинамический подшипник с индивидуальной системой смазки;
- ИП – измерительный преобразователь;
- БУК – блок усиления и коммутации;
- УС – устройство согласования;
- СОАН – средство обработки и анализа;
- ММ – математическая модель;
- БД – база данных;
- ПО – программа обработки базы;
- АН – анализатор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник; под ред. д-ра техн. наук, проф. Резникова А.Н. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. Абразивно-алмазная обработка и доводочные процессы: справочник; под ред. Масловского А.А. – М.: Машиностроение, 1986. – 196 с.
3. Абразивные материалы и инструменты / В.А. Носенко [и др.]. // Справочник технолога / под. ред. А.Г. Суслова. – Инновационное машиностроение. – 2019. Гл. 8. – С. 237-323.
4. Аврутин Ю.Д. Формирование шероховатости поверхности деталей при шлифовании периферией // Станки и инструмент. – 1979. – № 1. – С. 24–27.
5. Анельчик В.Д. Повышение эффективности шлифования деталей с молибденовыми покрытиями: –Автореф. дис....канд. техн. наук:–05.02.08/ Одеск. политехн. ин–т.– Одесса, 1985. – 16с.
6. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов / А.К. Байкалов. – К.: Наукова думка, 1978. – 207 с.
7. Бакуль В.Н. Справочник по алмазной обработке металлорежущего инструмента / В.Н. Бакуль. – К.: Техника, 1971.– 208 с.
8. Барон Ю.М. Технология абразивной обработки в магнитном поле // Л.: Машиностроение, 1975. – 128 с.
9. Барон Ю.М. Улучшение характеристик режущих инструментов из быстрорежущих сталей магнитно-абразивной и магнитной обработкой// Металлообработка. – 2012. – № 5-6 (71-72). – С. 9-14.
10. Барсуков Г.В. Моделирование технологических процессов абразивной обработки: монография. [Текст] / Г.В. Барсуков, Л.Г. Вайнер, Ю.В. Василенко, А.В. Воронков, А.А. Дьяконов, А.М. Козлов, А.В. Михеев, А.В. Морозова, П.П. Переверзев, Ю.С. Степанов; Под ред. Ю.С. Степанова и А.В. Киричека - М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 256 с, ил. С.187-222, Библиогр.: с.119-222. – 500 экз. – ISBN 978-5-904270-71-1
11. Беззубенко Н.К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических

- разрядов: Автореф. дис... д-ра. техн. наук: 05.03.01/ ХГПУ. – Харьков, 1995. – 46 с.
12. Богомолов Н.И. О работе трения в абразивных процессах // Труды ВНИИАШ, – М. – Л.: Машиностроение, № I, 1965.– С.72 –78.
 13. Бокучава Г.В. О влиянии скорости шлифования на стойкость абразивного инструмента / Г.В. Бокучава // Абразивы и алмазы. – 1964. – № 1. – С.47–53.
 14. Болтянский В. Г. Математические методы оптимального управления / В. Г. Болтянский – 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1969. – 408 с.
 15. Братан С.М. Автоматическое управление процессами механической обработки: учебник / С.М.Братан, Е.А.Левченко, Н.И. Покинтелица, А.О. Харченко; Севастопольский государственный университет. – М.: Изд-во Вузовский учебник, 2017.–227 с.
 16. Братан С.М. Баланс перемещений в технологической системе при ленточном ротационном шлифовании/ С.М. Братан, Т.В. Стадник, А.Г. Колесов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – Вып. 8., ч. 1. – С. 270-275.
 17. Братан С.М. Вероятностная модель удаления поверхностного слоя при шлифовании хрупких неметаллических материалов / С.М. Братан, С.И. Рощупкин, А.О. Харченко, А.С. Часовитина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 6-16.
 18. Братан С.М. Взаимосвязь температуры с режимами резания при ленточном ротационном шлифовании титанового сплава ВТ3-1 / С.М. Братан, Т.В. Стадник, А.С. Часовитина // Вестник современных технологий: сб. науч. трудов, г. Севастополь, 2021. – № 3(23). – С. 23-29.
 19. Братан С.М. Влияние технологических режимов на тангенциальную составляющую силы резания при ленточном ротационном шлифовании заготовок из титанового сплава ВТ3-1 / С.М. Братан, Ю.К. Новоселов, Т.В Стадник, А.С. Часовитина // Вестник современных технологий: сб. науч. трудов, г. Севастополь, 2021. – №2(22). – С. 19-26.

20. Братан С.М. Исследование механизма взаимодействия СОТС с материалом заготовки при шлифовании деталей из титана в присутствии неорганических солей / С.М. Братан, С.И. Рощупкин, Т.В. Стадник // Вестник современных технологий: сб. науч. трудов, г. Севастополь, 2020. – № 4 (20). – С. 4-8.
21. Братан С.М. Моделирование микрорельефа при шлифовании деталей с износостойкими покрытиями // Вестник СевГТУ: Сер. Механика, энергетика, экология: Сб. науч. тр. - Севастополь, 1998 - Вып.15 – С. 47-51.
22. Братан С.М. Моделирование съема припуска в зоне контакта при внутреннем шлифовании хрупких неметаллических материалов / С.М. Братан, С.И. Рощупкин, А.О. Харченко, А.С. Часовитина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 31-39.
23. 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.
24. Братан С.М. Оценка эффективности смазочно-охлаждающих технологических сред при ленточном шлифовании длинномерных изделий из титановых сплавов / С.М. Братан, Т.В. Стадник // Вестник современных технологий: сб. науч. трудов, г. Севастополь, 2020. № 3 (19). – С. 10-18.
25. Братан С.М. Разработка моделей для оценки характеристик абразивного инструмента / С.М. Братан, Ю.К. Новоселов, Н.Н. Столяров, Т.В. Стадник // Вестник современных технологий: сб. науч. трудов, г. Севастополь, 2016. № 4 (4). – С. 10-19.
26. Братан С.М. Стохастический подход к моделированию процесса стружкообразования при тонком шлифовании / С.М. Братан, Д.Е. Сидоров, С.Е. Сазонов // Труды Одесского политехнического университета: научный и производственно-практический сборник по техническим и естественным наукам. – Одесса, 2007. – Вып. 1(27). – С. 46–50.

27. Братан С.М. Стратегия управления процессами ленточного шлифования в автоматизированном производстве / С.М. Братан, А.Г. Колесов, Т.В. Стадник, С.И. Рощупкин // Вестник современных технологий: сб. науч. трудов, г. Севастополь, 2017. № 8 (8). – С. 23-28.
28. Братан С.М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового тонкого шлифования: дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / С.М. Братан. – Одесса, 2006. – 550 с.
29. Братан С.М. Управление процессами шлифования путем стабилизации технологической системы в оптимально возможном состоянии //Высокие технологии в машиностроении. Сборник научных трудов ХГПУ -Харьков, 1998 - С.55-56.
30. Братан С.М., Новоселов Ю.К., Столяров Н.Н., Стадник Т.В. Разработка моделей для оценки характеристик абразивного инструмента //Вестник современных технологий: сб. науч.тр.– 2016.– № 4(4). – С. 10-19.
31. Вerezub V.N. Шлифование абразивными лентами. / В.Н. Вerezub. - М.: Машиностроение, 1972. – 104 с.
32. Витенберг Ю.Р. Применение корреляционной теории для оценки шлифованной поверхности [Текст] Ю.Р.Витенберг // Вестник машиностроения. – Вып. 1. 1969. – С. 55–57.
33. Владецкая Е.А. Обеспечение качества шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской/ Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко, Д.О. Владецкий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.– Орел: ФГБОУ ВО «ПГУ», 2015. №6 (314).– С.88-103.
34. Владецкая Е.А. Уменьшение высоты волнистости поверхности при шлифовании в условиях плавучих ремонтных мастерских / Е.А. Владецкая, С.М. Братан // «Машиностроение - глазами молодых»: матер. междунар. научн.-техн. конф., г. Кременчуг, 30 октября-1ноября 2013 г. – Кременчуг: КрНУ, 2013.– С. 143-145.

35. Волский Н.М. Поведение режущей поверхности круга в процессе чистового шлифования. Кн. 2 – М. – Л.: Машгиз, 1950. – 62 с.
36. Гичан В.В. Исследование возможности повышения производительности путем оптимизации цикла обработки круглого врезного шлифования: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.03.01 / КЭПИ– Каунас, 1975. – 27 с.
37. Глаговский Б.А. К вопросу измерения шероховатости и управления процессом шлифования / Б.А. Глаговский, С.К. Лисин, Н.Ф. Торопов // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении: Тезисы докл. Всесоюзной конф. – Л., 1981. – С. 159–160.
38. Глейзер Л.А. О сущности процесса шлифования: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – М., 1955. – 41 с.
39. Грабченко А. И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: Дис... д-ра. техн. наук в форме научного доклада: 05.03.01. – Харьков, 1995. – 259 с.
40. Грабченко А.И. Исследование процесса алмазного шлифования инструментальных материалов: Автореф. дис... канд. техн. наук. 05.03.01 / ХПИ – Харьков, 1966. – 26 с.
41. Грабченко А.И. Высокоэффективный комбинированный метод шлифования синтетических сверхтвердых материалов совместно со сталью/ А.И. Грабченко, В.В. Русанов // Резание и инструмент. 1978. – Вып. 19. – С. 131–133.
42. Грановский Г.И. О механике износа алмазных кругов/ Г.И. Грановский, С.А. Попов и др// Алмазы, НИИмаш, 1970 – № 2 – С. 17–22.
43. 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.
44. 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.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. Доброскок В.Л. Исследование взаимосвязи параметров продольного профиля кругов с выходными показателями процесса шлифования. //Резание и инструмент в технологических системах.— Межд. научн.–техн. сборник. – Харьков: ХГПУ, 1999. –Вып. – 54. – С.80–89.
49. Доброскок В.Л. Выбор параметров размеров распределения зерен шлифпорошка в соответствии с заданными требованиями по содержанию фракций / В.Л. Доброскок, Я.Н. Гаращенко // Высокие технологии в машиностроении: сб. научн. трудов ХДПУ. –Харьков, 2000. – Вып.1(3). – С. 55–63.
50. Дорофеев В.Д. Основы профильной алмазно–абразивной обработки / В.Д. Дорофеев. – Саратов: Изд–во Сарат. ун–та, 1983. – 186 с.
51. Дымченко И.А. Физико-механические свойства поверхностных слоев деталей после шлифования мелкозернистыми кругами / И.А. Дымченко, Д.А. Лысен-

- ко, С.М. Братан. // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2023. – №1 (79). – С. 223-227.
52. Дьяченко П.Е. Исследование процесса шлифования / П.Е. Дьяченко. – М.: Оборонгиз, 1941. – 147 с.
 53. Евсеев Д. Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д. Г. Евсеев. – Саратов: изд-во Саратовск. ун-та, 1975. – 127 с.: ил.
 54. Жвирблис А.В. Исследования точности, производительности обработки и алгоритмов управления процессом прецизионного шлифования на автоматизированных круглошлифовальных станках: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук/ ЭШИИМЗ. – М. 1975. – 27 с.
 55. Захаренко И.П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента / И.П. Захаренко. – К.: Наук. думка, 1981. – 300 с.
 56. Ивакин Ю.Н. Применение теории случайных функций к описанию рабочей поверхности алмазных кругов / Ю.Н. Ивакин, В.Г. Ивакина // Труды Пермского политехнического института, 1969. Вып. 54. – С.32–39.
 57. Иванов Ю.Н. Эффективность и качество обработки инструментами на гибкой основе. / Ю.Н. Иванов, Н.В. Носов. - М.: Машиностроение, 1985. – 88 с.
 58. Ипполитов Г.М. Шлифование и полирование абразивными лентами. / Г.М. Ипполитов, К.С. Митревич. – М.: Машиностроение, 1975. – 210 с.
 59. Исаев А.И. Шлифование фасонных поверхностей. / А.И. Исаев, А.Н. Филин, М.С. Злотников, В.Ф. Совкин. – М.: Машиностроение, 1980. – 152 с.
 60. Казаков В.Ф. Шлифование при повышенных скоростях резания / В.Ф. Казаков. – К.: Техника, 1971. – 171 с.
 61. Кальченко В.И. Определение составляющих силы резания при шлифовании ориентированным абразивным инструментом/ В.И. Кальченко, В.В. Кальченко, А.В. Рудик, В.И. Венжега //Резание и инструмент в технологических системах.- Меж.науч.тех.сб. - Харьков: ХГПУ, - 2005 - Вып. 69 - С. 34-39.

62. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки: учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, А.А. Якимов. – О.: ОГПУ, 1999. – 212 с.
63. Кедров С. М. Шлифование, доводка, хонингование, суперфиниширование и полирование металлов / С. М. Кедров // Справочник машиностроителя: в 6т. М.: Машиностроение, 1964. – Т.5. – С. 290–319.
64. 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.
65. 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.
66. 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.
67. 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.
68. Козлов А.А. Моделирование обработанной поверхности при шлифовании некруговым торцовым абразивным инструментом / А.А. Козлов, А.М. Козлов,

- Ю.В. Василенко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 54-62.
69. Козлов А.М. Моделирование совмещенной абразивной обработки / А.М.Козлов Д.В., Болгов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2010. – № 2. – С. 50-53.
70. Козлов А.М. Моделирование совмещенной абразивной обработки / А.М. Козлов, Д.В. Болгов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2010. – № 2 (280). – С. 50-53.
71. Королев А.В. Березняк Л.А. Исследование влияния поперечной подачи правящего инструмента на шероховатость шлифуемой поверхности / А.В. Королев, Л.А. Березняк // Чистовая обработка деталей машин. – Саратов, 1976, вып. 2. – С. 52–60.
72. Королев А.В. Выбор оптимальной геометрической формы контактирующих поверхностей деталей машин и приборов / А.В. Королев. – Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1972 – 185 с.
73. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов: 1975. – 189 с.
74. Королев А.В. Комбинированный способ шлифования – доводки качающимся кругом / А.В. Королев, С.И. Капульник, Д.Г. Евсеев. – Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1983. – 96 с.
75. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. В 2 ч. Ч. 1. Состояние рабочей поверхности абразивного инструмента [Текст] / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. – Саратов: Из-во Саратовск. Ун-та, 1987. – 158 с.
76. Корчак С.Н. Оптимизация режимов резания для операции круглого врезного шлифования на станках с автоматическим циклом управления / С.Н. Корчак, П.П. Переверзев // Резание и инструмент №34., 1985. – С. 86–89.
77. Корчак С.Н. Прогрессивная технология и автоматизация круглого шлифования / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1968. – 108 с.
78. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / М.: Машиностроение, 1974. 280 с.

79. Коряжкин А.А., Волков Д.И. Стохастическая модель износа абразивной ленты при шлифовании лопаток компрессора ГТД // Вестник РГАТА. 2011. №2. – С.132-138.
80. Кошин А.А. Исследование функциональных связей между предельными режимами и тепловыми критериями процессов абразивно-алмазной обработки дис. на соискание ученой степени канд. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения»/ А.А. Кошин. –Челябинск,1974.– 224с.
81. Кузнецов, Ю.Н. Теория технических систем / Ю.Н. Кузнецов, Ю.К. Новоселов, И.В. Луцив – Севастополь: СевНТУ, 2010. – 252с.
82. Лоладзе Т.Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава. – М.: Машиностроение, 1967. – 112 с.
83. Лурье Г.Б. Шлифование абразивными лентами. / Г.Б. Лурье. - М.: Высшая школа, 1980. – 47 с.
84. Лурье Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 173 с.
85. Лысенко Д.А. Повышение стабильности чистового шлифования шеек валов вало-винторулевого комплекса / Д.А. Лысенко, С.М. Братан, А.О. Харченко // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2023. – №1 (79). – С. 227-233.
86. 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.
87. Макаров В.Ф. Повышение эффективности профильного глубинного шлифования лопаток турбин на многокоординатных станках с ЧПУ/ В.Ф. Макаров, С.П. Никитин // Научные технологии в машиностроении. ФГБОУ ВО «Брянский ГТУ». –2018. – № 4 (82). – С. 21-29.
88. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. / Е.Н. Маслов. - М.: Машиностроение, 1974.-319 с.

89. Маслов Е.Н. Абразивная обработка металлов / Е.Н. Маслов, С.А. Попов; в кн.: Развитие науки о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1967. — С. 335–378.
90. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
91. Маталин А.А. Новые направления развития технологии чистовой обработки / А.А. Маталин. – К: Техника, 1972.
92. Митрофанов В.Г. Влияние динамических свойств системы СПИД на точность и производительность внутреннего шлифования / В.Г Митрофанов // Самоподнастраивающиеся станки. – М.: Машиностроение, 1967. – С. 340–363.
93. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием / В.И. Михелькевич. – М.: Машиностроение, 1975.– 304 с.
94. Мишнаевский Л.Л. Износ шлифовальных кругов / Л.Л. Мишнаевский. – Киев: Наук. думка, 1982. – 192 с.
95. Новиков Ф.В. Теоретические основы высокопроизводительного шлифования кругами из синтетических сверхтвердых материалов: Дис...д-ра техн. наук:05.03.01., 05.02.08. – Одесса, 1993. – 435 с.
96. Новоселов Ю.К. Влияние случайной составляющей отклонений профиля инструмента на динамику процесса круглого наружного шлифования// Ю.К.Новоселов, С.М.Братан, В.Б.Богущий // Ежемесячный научно-технический и производственный журнал «Наукоемкие технологии в машиностроении», №5 (59). – г. Брянск: Из-во Машиностроение (Москва). – 2016. – С.10-16.
97. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1979. – 232 с.
98. Новоселов Ю.К. Моделирование случайных компонент профиля абразивного круга/ Ю.К. Новоселов, С.М. Братан, Д.А. Каинов // Тр. Одесского политехнического ун-та. Науч. произв. практ. сб. по техническим и естественным наукам. –Одесса, – 2001 – Вип.5 – С. 70–74.

99. Новоселов Ю.К. Влияние случайной составляющей отклонений профиля инструмента на динамику процесса круглого наружного шлифования/ Ю.К. Новоселов, С.М. Братан, В.Б. Богущкий // Научные технологии в машиностроении: журнал, Брянск 2016. Вып. 5(59). – С. 10-16.
100. Носенко В.А. Влияние среды на показатели процесса шлифования сталей и титановых сплавов инструментом из корунда и карбида кремния / В.А. Носенко, В.Е. Пузырькова, Н.Д. Сердюков, Д.С. Слепцов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2021. – № 8 (255). – С. 34-37.
101. Носенко В.А. Технология шлифования металлов: монография / В.А. Носенко, С.В. Носенко // 2-е изд., стер. – Ст. Оскол: ТНТ, 2017. – 613с.
102. Носенко В.А. Математические модели наработки и режущей способности для различных этапов плоского глубинного шлифования горизонтальных поверхностей кругом прямого профиля / В.А. Носенко, С.В. Носенко // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2010. – № 4. – С. 92-98.
103. Носенко В.А. Плоское глубинное шлифование пазов в заготовках из титанового сплава с непрерывной правкой шлифовального круга / В.А. Носенко, С.В. Носенко // Вестник машиностроения. – 2013. – № 4. – С. 74-79.
104. Носенко В.А. Попутное и встречное глубинное шлифование титанового сплава с периодической правкой круга / В.А. Носенко, С.В. Носенко // Вестник машиностроения. – 2010. – № 10. – С. 66-71.
105. Носенко С.В. Влияние правки абразивного инструмента на состояние рельефа обработанной поверхности титанового сплава при встречном глубинном шлифовании / С.В. Носенко, В.А. Носенко, Л.Л. Кременецкий // Вестник машиностроения. – 2014. – № 7. – С. 64-68.
106. Обеспечение качества при абразивной обработке: вопросы теории и практики: [монография] / Т. А. Аскалонова, А. М. Иконников, С. Л. Леонов, Ю. К. Новоселов, А. А. Ситников, Е. Ю. Татаркин ; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2016. – 219 с.

107. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. Ч.3. [Текст] – М.: Центральное бюро нормативов по труду, 1978. – 360 с.
108. Основы теории тепловых явлений при шлифовании деталей машин: учеб. пособие / А.В. Якимов [и др.]. – О.: ОГПУ, 1997. – 272 с.
109. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования / В.И. Островский. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 144 с.
110. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.
111. Попов С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С.А. Попов, Н.П. Малевский, Л.М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с.
112. Прилуцкий В.А. Поиск перспективных схем базирования и способов шлифования сферических торцев конических роликов / В.А. Прилуцкий, В.А. Парфенов // Известия СНЦ РАН. – 2016. – Т. 18. – № 4 (2). – С. 347-351.
113. Редько С.Г. Вероятностный расчет шероховатости шлифованной поверхности / С.Г. Редько // Вероятностно–статистические основы процессов шлифования и доводки. – Л., 1974. – С. 73–79.
114. Редько С.Г. Количество абразивных зерен шлифовального круга, участвующих в резании. // Станки и инструменты, 1960, – № 12. – С.10–12.
115. Резников А.Н. Выбор режимов шлифования синтетическими сверхтвердыми материалами при заданной шероховатости поверхности изделия. / А.Н. Резников, О.Б. Федосеев // Вестник машиностроения, 1976. – № 6. – С.69–70.
116. Резников А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников. – М: Машиностроение, 1969. – 288 с.
117. Резников А.Н., Федосеев О.Б., Щипанов В.В. Вопросы теории процесса резания при шлифовании сверхтвердыми материалами. – В кн.: Синтет. алмазы – ключ в техн. проц. Ч. 1 – Киев: Наук. думка, 1977.

118. Рыжов Э.В. Качество поверхности при алмазно–абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И.Х. Чеповецкий. – Киев: Наук. думка, 1979. – 224 с.
119. Сальников А.Н. Системный анализ процессов абразивной обработки на примере шлифования: Дис...дра. техн. наук. 05.02.08 – Саратов, 1982. – 378 с.
120. Саютин Г.И. Выбор шлифовальных кругов (для обработки жаропрочных сплавов и инструментальных сталей) / Г.И. Саютин. – М.: Машиностроение, 1976. – 61 с.
121. Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 302 с.
122. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
123. Смоленцев В.П. Расчет и обоснование режимов электроабразивной чистовой обработки многогранных каналов / В.П. Смоленцев, Н.С. Поташникова, Н.Н. Ненахов // Упрочняющие технологии и покрытия. –2021.– Т. 17. – № 11 (203). – С. 503-508.
124. Справочник по алмазной обработке металлорежущего инструмента / В.Н. Бакуль [и др.] – К.: Техника, 1971. – 208 с.
125. Стадник Т.В. Взаимосвязь режимов обработки с текущими параметрами зоны контакта при ленточном ротационном шлифовании / Т.В. Стадник, С.М. Братан // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сборник материалов II международной практической конференции (03-04 октября 2018г.), г. Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева». – Кемерово, 2018. – С. 209-211.
126. Стадник Т.В. Системный анализ процесса ленточного ротационного шлифования / Т.В. Стадник, С.М. Братан // Актуальные проблемы в машиностроении. – Новосибирск: Изд-во ФГАОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», 2019. Т. 6. № 1-4. – С. 66-72.

127. Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1979. – 160 с.
128. Степанов Ю.С. Повышение эффективности шлифования применением гидробалансирующих устройств/ Ю.С. Степанов, М.А. Бурнашов, Д.К. Луговский // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2016. – № 5 (319). – С. 90-95.
129. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: Справ. изд./ З.Н. Арчакова, Г.А. Балахонцев, И.Г. Басова и др. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1984. – 408с.
130. Суслов А.Г. Научно-технические технологии в машиностроении / А.Г. Суслов [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. – М. Машиностроение, 2012. – 528 с.
131. Суслов А.Г. Обеспечение шлифованием требуемых значений комплексных параметров свойств поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов, С.Г. Бишутин // Вестник Брянского государственного технического университета. 2004. № 3 (3). – С. 5-8.
132. Узунян М.Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов. // Резание и инструмент. 1981. Вып. № 26. – С.42–47.
133. Узунян М.Д. Исследование взаимодействия режущей поверхности круга с твердыми сплавами в условиях алмазно-искрового шлифования с применением твердых связок. /М.Д. Узунян, Е.С. Крылов // Резание и инструмент в технологических системах. – Межд. научн.–техн. сборник. – Харьков: ХГПУ, 1998. – Вып. 52 – С.200 – 204.
134. Узунян М.Д. Повышение эффективности алмазного шлифования твердых сплавов путем прогнозирования и стабилизации работоспособности кругов; Автореф. дис...д-ра. техн. наук: 05.03.01.– М., 1989. –340 с.
135. Узунян М.Д. Расчет числа зерен, участвующих в резании и расстояние между ними на поверхности алмазного круга. // Станки и режущие инструменты. 1966. Вып. I. – С.81–85.

136. Узунян М.Д. Теоретический анализ и расчет количества зерен на рабочей поверхности алмазного круга. // Резание и инструмент в технологических системах 1978, вып. 19. – С. 75–82.
137. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов [и др.]. – Киев: Техника, 1983. – 182 с.
138. Федонин О.Н. Разработка технологии алмазной резки заготовок из лейкосапфира / О.Н. Федонин, А.В. Хандожко, Н.Е. Аверкина // Вестник БГТУ. – 2013. – №3. – С. 63-68.
139. Федоров Д.Г. Шлифование титановых сплавов. краткий литературный обзор / Д.Г. Федоров, Д.В. Евдокимов, А.А. Пластинин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20, № 1 (81). – С. 129-133.
140. Федорович В.А. Управление параметрами субмикрорельефа алмазных зерен при шлифовании сверхтвердых материалов. / В.А. Федорович // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: ХГПУ, 2001. – Вып. 60. – С. 235–243.
141. Федосеев О.Б. Шлифование синтетическими сверхтвердыми материалами / О.Б. Федосеев // Известия высш. учебн. заведений: Машиностроение. – 1977. – №5. – С. 104–106.
142. Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов/ Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1973.– 134с.
143. Филимонов Л.Р. Высокоскоростное шлифование. / Л.Р. Филимонов. - Л.: Машиностроение, 1979. – 238 с.
144. Хватов Б.Н. Исследование производительности шлифования абразивными лентами с самозатачивающимся зерном / Б.Н. Хватов, Д.В. Зубков, А.А. Родина // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, №4. – С. 1031-1037.
145. Химач О.В. О характере распространения срезов при шлифовании. / О.В. Химач, В.Ф. Коробка, Л.С. Григорьева // Синтет. Алмазы – 1977.– № 6. – С. 60–63.
146. Хрульков В.А. Шлифование жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1964. – 191 с.

147. Хубка В. Теория технических систем / В. Хубка. – М.: Мир, 1987. – 208 с.
148. Худобин Л.В. Анализ геометрии абразивного зерна [Текст] / Л.В. Худобин // Ульяновский политехн. ин-т: сб. науч. тр. 1966. – Вып. 1. – Ульяновск. – С.6–20.
149. Худобин Л.В. Влияние смазочно–охлаждающих жидкостей и способов их использования на динамику процесса резания–царапания отдельным абразивным зерном / Л.В. Худобин // Физика и химия обработки материалов. – 1970. – № 2. – С. 121–132.
150. Хусу А.П. Шероховатость поверхностей: теоретико- вероятностный подход [Текст]/ А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг , В.А. Пальков. – М.: Наука, 1975. – 344 с.
151. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. - М.: Машиностроение, 1975. – 174 с.
152. Якобс Г.Ю. Оптимизация резания/ Г.Ю. Якобс, Э. Якоб, Д. Кохан. -М.: Машиностроение, 1987. – 279 с.
153. Янюшкин А.С. Повышение эффективности алмазного инструмента на металлической связке при шлифовании высокопрочных материалов/ А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, В.Ю. Скиба, В.А. Гартфельдер, Л.С. Секлетина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 3 (76). – С. 17-27.
154. Bratan S. Analysis of Relation between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016 / S. Bratan, Yu.Novoselov, V. Bogutsky // Procedia Engineering, vol. 150 (2016). – P. 809-814.
155. Bratan S. Application of Combined Taps for Increasing the Shaping Accuracy of the Internal Threads in Aluminium Alloys / S. Bratan, P. Novikov, S. Roshchupkin // Procedia Engineering. – 2016. – Vol.150. – P. 802–808.
156. Bratan S. Development of mathematical model of material removal calculation for combined grinding process / Bratan, S., Bogutsky, B., Roshchupkin, S. // Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019. – P 1759–1769.

157. Bratan S. Evaluation of effectiveness of cutting fluids for belt grinding of long-length products of titanium alloys / S. Bratan, T. Stadnik, V. Golovin // *Materials Today: Proceedings*, Volume 38, Part 4, 2021. – P. 2013-2018.
158. Bratan S. Flat grinding model, considering internal dynamics of the process / Bratan, S., Vladetskaya, E. // *MATEC Web of Conferences*, 2018, 224, 01002.
159. Bratan S. Improvement of quality of details at round grinding in the conditions of a floating work-shop / S. Bratan, E. Vladetskaya, A. Kharchenko // *MATEC Web of Conferences* 129 (2017), Article Number 01083.
160. Bratan S. Investigation of the mechanism of interaction of cutting fluids with the material of the workpiece when grinding titanium parts in the presence of inorganic salt / S. Bratan, T. Stadnik, S. Roshchupkin // *Materials Today: Proceedings*, 2021, 38, pp. 2048–2051.
161. Bratan S. Modeling of cutting forces in diamond drilling / S. Bratan, Y. Novosyolov, S. Roshchupkin // *International Journal of Innovative and Information Manufacturing technologies*/ Number 2,(2015), p. 59-63.176.
162. Bratan S. Modeling the Grinding Wheel Working Surface State//*International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017*/ S. Bratan, S. Roshchupkin, P. Novikov // *Procedia Engineering* 206 (2017), Pages 1419–1425.
163. Bratan S. Synthesis of lunberger stochastic observer for estimation of the grinding operation state / Bratan, S., Roshchupkin, S. // *MATEC Web of Conferences*, 2018, 224, 01133.
164. Bratan S. Theoretical-probabilistic model of the rotary belt grinding process / S. Bratan, A. Kolesov, S. Roshchupkin, T. Stadnik // *MATEC Web of Conferences* 129 (2017), Article Number 01078.
165. Bratan S.M. Influence of the tool working surface state on evaluation of the forming filter parameters / S.M. Bratan // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 709(2), 022009.
166. Bratan, S. Quality improvement of manufacturing rolling mill rolls / S. M. Bratan, S. I. Roshchupkin, A. O. Kharchenko, S. V. Belousov // *CIS Iron and Steel Review*. –2021. – Vol. 22. – P. 26–31.

167. Brian R.W. Principles of Modern Grinding Technology / Rowe W. Brian. – Oxford: William Andrew, 2009. – 300p.
168. Brian W. Rowe, Xun Chen, Modeling surface roughness improvement in grinding, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 213 (1), 1999. – P. 93–96.
169. Chasovitina A. The cutting emulsions for grinding ceramics and sitall parts / A. Chasovitina, S. Bratan, S. Roshchupkin // Materials Today: Proceedings, 2021, 38. – P. 2083–2087
170. Dimov Y.V. Machining forces exerted by an elastic abrasive wheel/ Y.V. Dimov, D.B Podashev // Russian Engineering Research. 2018.– T. 38. № 12. – C. 932-937.
171. H. Hamdi, M. Dursapt, H. Zahouani, Characterization of abrasive grain's behavior and wear mechanisms, Wear 254/12, 2003. – P.1294–1298.
172. Ioan D Marinescu, [et al.], Tribology of abrasive machining processes, Published in the USA by Brent Beckley, William Andrew, Inc. Cover Art 2004. –764p.
173. J. Borkowski, P. Borkowski, The influence of elementary effects on grinding wheel wear, Archives of civil and mechanical engineering, Vol. II, No. 1–2, 2002, P. 21–34.
174. Jackson M.J. Machining with Abrasives. / Mark J. Jackson, J. Paulo Davim. - New York: Springer, 2011. – 435 p.
175. Kharchenko A. Modeling of regularities of change in profile sizes and wear areas of abrasive wheel grains during grinding / A. Kharchenko, A. Chasovitina, S. Bratan // Materials Today: Proceedings, 2021. – Vol. 38. – P. 2088–2091.
176. Kolesov A. Development of a Mathematical Model for a Finishing Process of Precision Surfaces of Elastic Plates Using Surface Active Substances / A. Kolesov, T. Stadnik, V. Gusev // Materials Today: Proceedings, Volume 11, Part 1, 2019. – P. 573-579.
177. Kopetskii A.A. Influence of the shift of clamping forces on elastic deformations of the bearing ring in a jaw gripper / A.A. Kopetskii, V.A. Nosenko, V.N. Tyshkevich // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2014. - Vol. 43, No. 1. – P. 55-59.

178. Modern machining technology. A practical guide. Edited by J. Paulo Davim. Woodhead Publishing, UK. – 2011. 412p.
179. N. de Souza Analysis of Diametrical Wear of Grinding Wheel and Roundness Errors in the Machining of Steel VC 131 / N. de Souza, R. E. Catai, P. R. de Aguiar, M. H. Salgado, E. C. Bianchi // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. XXVI, No. 2, April-June 2004, P. 209–212.
180. Nosenko S.V. Influence of Dressing of the Wheel on the Surface Quality of Titanium Alloy in Deep Grinding / S.V. Nosenko, V.A. Nosenko, L.L. Kremenetskii // Russian Engineering Research, 2014, Vol. 34, No. 10. – P. 632–636.
181. Nosenko V.A. Impregnation of abrasive tools with foaming agents / V.A. Nosenko, A.P. Mitrofanov, G.M. Butov, G.M. // Russian Engineering Research, 2011, Vol. 31, №11 – P.1160 – 1163.
182. Nosenko V.A. Mathematical models of operating time and cutting capacity for various stages of flat creep feed grinding of horizontal surface by circle of direct profile / V.A. Nosenko, S.V. Nosenko // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2010. – Vol.39, №4. – P.380 – 385.
183. Nosenko V.A. Unidirectional and opposing deep grinding of titanium alloy with periodic wheel adjustment / V.A. Nosenko // Russian Engineering Research, 2010, Vol. 30, №10. – P.1016 – 1021.
184. Nosenko, V.A. Deep grinding of titanium alloy with continuous wheel correction / V.A. Nosenko, S.V. Nosenko // Russian Engineering Research, 2010, Vol. 30, №11. – P.1124 – 1128.
185. P. Lozano Torrubia, J. Billingham, D. A. Axinte. Stochastic simplified modelling of abrasive waterjet footprints. Proceeding of the Royal Society A. Vol. 472, Issue 2186, 2016. – P. 193–210.
186. Salmon S. C. Modern grinding process technology. / S.C.Salmon. - New York: McGraw-Hill, 1992.-225 p.
187. Stadnik T. Effect of Process Modes on Tangential Component of Cutting Force during Belt Rotary Grinding of Aluminium Alloy Blanks D16 / T. Stadnik, D. Si-

- dorov, I. Temindarov, P. Novikov // Materials Research Proceedings, Volume 21, 2022. – P.466-472.
188. Stadnik T. Investigation of diamond elastic belts characteristics effect on rotary belt grinding process output performance / T. Stadnik, D. Sidorov, A. Kharchenko // Procedia Engineering. International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017, 2017. – P. 1415-1418.
 189. Stephen Malkin, Grinding Technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives / Stephen Malkin, Changsheng Guo. – Industrial press, New York, 2008. –372p.
 190. W. Kacalak, M. Kasprzyk, T. Krzyzynski, On Modeling of Stochastic Processes of Abrasive Wear and Durability of Grinding Wheel, PAMM (Proc. Appl. Math. Mech.) No. 2 – 2003. – P. 278–279.
 191. Warren R. DeVries, Analysis of Material Removal Processes, Springer-Verlag New York, Inc. 1992. –269 p.
 192. Wenxi Wang, Jianyong Li, [et al.]. Characteristic quantitative evaluation and stochastic modeling of surface topography for zirconia alumina abrasive belt. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.87. – 2016. – P. 1–11.
 193. Zakharov O.V. Abrasive-jet machining of large hollow components / O.V. Zakharov, L.V. Khudobin, N.I. Vetkasov, I.A. Sklyarov, A.V. Kochetkov // Russian Engineering Research. 2016. – T. 36. № 6. – P. 469-471.
 194. Zhen Bing Hou, Ranga Komanduri, On the mechanics of the grinding process – Part I. Stochastic nature of the grinding process/ International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, 2003. – P.1579–1593.

Методики оценки технического состояния опорных подшипников корабельных валопроводов в нештатных условиях эксплуатации

Анализ аварийных происшествий с НК и ПЛ при нарушении условий эксплуатации валопроводов ГЭУ

В проведенные исследования Емельяновым М.Б и работа Горб С.И разбили факторы безопасности судна, связанные с ее ЭУ на пять групп (рис. А.1):

1. неудовлетворительные качества судна: плавучесть, остойчивость, непотопляемость, ходкость, управляемость, мореходность, прочность, живучесть; неблагоприятные внешние условия: ветер, волнение, течение, плохая видимость (туман, темное время суток), температура воздуха, айсберги, подводные препятствия (риффы, скалы, отмели) и т.д.;
2. отказы технических средств и оборудования;
3. воздействия грузов, функциональных систем и устройств целевого назначения;
4. ошибки в действиях личного состава, либо бездействие лиц, обеспечивающих безопасность судна.

Обзор данных факторов позволяет определить значимость данных групп в проблеме безопасности, связанной с функционированием ЭУ и судна в целом. К одному из наиболее значимых факторов относится группа, объединяющая «неудовлетворительные свойства судна». Группа «неудовлетворительных свойств», объединяет понятия, связанные с его мореходными качествами. Условно их можно объединить в две большие группы: первая группа, связана с корпусом судна и характеристиками ее формы; ко второй группе относятся качества, связанные с необходимостью задействования ЭУ, как объекта эксплуатации. Первая группа включает в свой состав такие мореходные качества судна как плавучесть, остойчивость и непотопляемость. Эти понятия объединяются ключевым словосочетанием – способность судна, а далее в чем она заключается, а именно плавать в требуемом положении при заданной нагрузке,

возвращаться в исходное положение после прекращения действия внешних сил и сохранять первые два мореходных качества при затоплении одного или нескольких отсеков. Вторая группа включает в свой состав такие мореходные качества судна как ходкость – способность судна иметь и сохранять заданную скорость хода, соответствующей отдаваемой мощности установленных на ней двигателей, мореходность и управляемость.



Рисунок А.1 – Факторы, оказывающие влияние на безопасность судна

Их объединяет так же ключевое словосочетание – способность судна противостоять воздействию морского волнения и обеспечивать движение последнего по заданной траектории и при соответствующей мощности ЭУ.

Исходя, из вышесказанного становится очевидным, что для решения проблемы эксплуатации (безопасной эксплуатации) ЭУ в экстремальных условиях необходимо рассматривать мореходные качества судна, входящие во вторую группу.

О важности решения данной проблемы так же свидетельствуют проведенные исследования М.Б. Емельяновым и работа С.И. Горб, в которых к виду опасностей, связанных с функционированием судна, а точнее с его состоянием, при котором создается реальная угроза безопасности и потери мореходных качеств, относится – «потеря хода и управляемости». Доля данного вида опасности среди других составляет порядка 42% (рис. А.2).

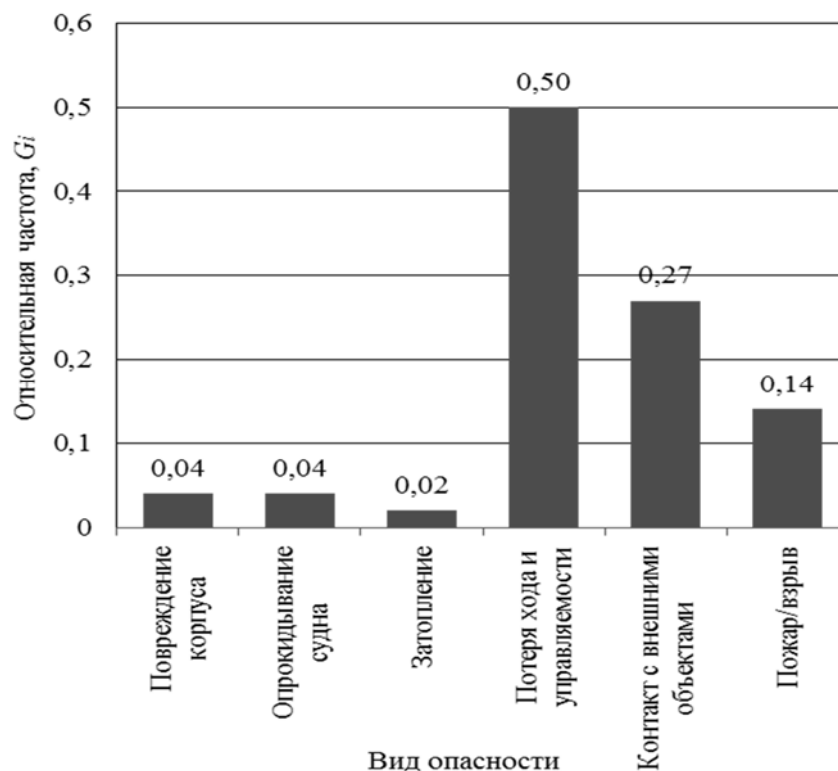


Рисунок А.2 – Распределение частоты АС по видам опасностей

Используя методологическую основу для разработки инженерных методик оценки рисков, представленную в руководстве по формализованной оценке безопасности (разработанная и принятая в 2007 году на 83-й сессии Комитета по безопасности на море ИМО), автор исследования определил и получил численные значения индекса риска I_R для элементов СЭУ, связанных с «потерей хода и

управляемости», вследствие отказа главного двигателя, редуктора или вало-винторулевого комплекса. При этом, критичным элементом считается элемент, у которого индекс риска I_R превышает допустимое значение $[I_R]$. Как видно у большинства элементов главного двигателя, редуктора и вало-винторулевого комплекса $I_R > [I_R]$. Очевидно, что отказ этих элементов ЭУ может привести не только к выходу из строя, но и в ряде случаев к ограничению ее работоспособности по параметрам и продолжительности. Вероятности того, что конкретный элемент энергетической установки судна приведет к ограничению ее работоспособности или выводу ее из строя, показаны в таблице 1. Данные таблицы показывают, что отказ опорных подшипников валопровода является достаточно частой причиной отказа энергетической установки судна или ограничения ее работоспособности, а из всех элементов корабельного валопровода – самой частой.

Таблица 1 – Критичные элементы судна для вида опасности «Потеря хода и управляемости»

Наименование критичного элемента (узла)	I_R	$[I_R]$
1. Главный двигатель:		
поршень – цилиндровая втулка;	8,272	6,709
шатунный подшипник;	7,329	6,533
распределительный вал;	7,414	6,533
ТНВД;	7,327	6,232
масляный насос.	7,327	6,232
2. Редуктор:		
шестерни;	7,167	6,920
подшипники.	6,919	6,823
3. Отказ валопровода (1 линия вала):	8,086	7,674
гребной вал;	7,294	6,660
промежуточный вал;	6,817	6,183
муфта гребного вала;	7,295	6,785
опорный подшипник;	7,131	6,660
упорный подшипник;	7,516	6,882
дейдвудная втулка;	7,118	6,660

дейдвудное уплотнение.	6,846	7,137
4. Винто-рулевой комплекс:		
узел крепления к гребному валу;	7,323	6,712
обшивка пера руля или насадки;	7,047	6,536
привод баллера;	7,106	6,934
лопасть ВФШ.	7,618	7,013

Многообразие функций, выполняемых СЭУ, ее много режимность, большое количество элементов и сложность связей между ними, а также сложность эксплуатации ЭУ в морских условиях вызывают необходимость учета особенностей ЭУ при оценке ее безопасности. Учитывая это, ЭУ судна не может рассматриваться как независимый объект; она находится в неразрывной связи с судном, зависит от условий его безопасной эксплуатации и подчинена тем задачам, для которых предназначено судно (рис. А.3).

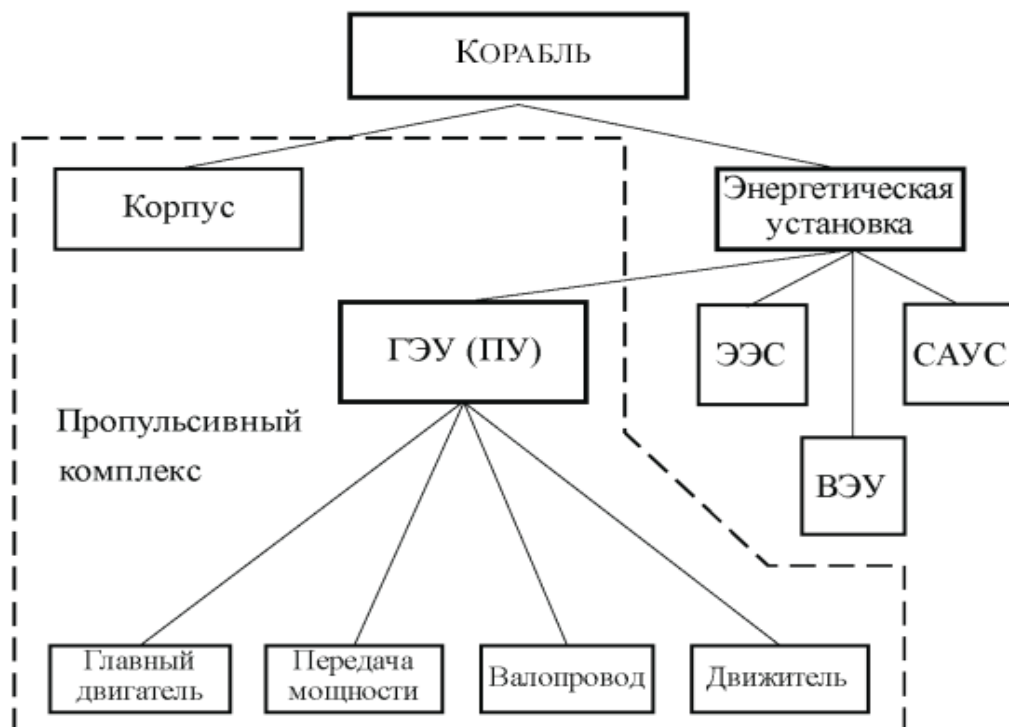


Рисунок А.3 – Схема пропульсивного комплекса судна

Таким образом, проведенный обзор факторов, влияющих на безопасность ЭУ и судно в целом, позволил: выявить наиболее значимые качества (параметры), связанные не только с конструктивными особенностями корпуса судна, а в большей мере с функционированием ее ЭУ; установить, что в настоящее время, задача, обеспечения работоспособности корабельного валопровода в экстремальных условиях плавания судна, являющимся связующим звеном между элементами главной ЭУ судна не достаточно полно формализована и требует дальнейшего детального исследования.

1.2. Обзор факторов влияющих на безопасность ГЭУ в целом

Валопровод судна представляет собой конструктивный комплекс, кинематически связывающий главный двигатель с главным гребным электродвигателем и предназначенный для передачи крутящих моментов и осевых нагрузок, возникающих при работе корабельной движительной установки. На рисунке 1.1 (глава 1) представлена конструкция валопровода на примере судна проекта 19619. При всем своем многообразии независимо от расположения в корпусе судна валопровод содержит характерные, общие для него элементы. Они состоят из гребного вала, несущего гребной винт, дейдвудного устройства, обеспечивающего водонепроницаемый выход валопровода из корпуса судна, промежуточных валов, лежащих в опорах, и упорного вала с упорным подшипником.

В процессе эксплуатации главного валопровода его элементы испытывают различные виды напряжений оказывающих неоднозначное действие на устойчивость положения вала в подшипниках скольжения. Процесс передачи мощности представляет собой сложное пространственное нагружение корабельного валопровода, обусловленное действием следующих сил и моментов: крутящим моментом от главного двигателя M_k ; упорным давлением от действия гребного винта T ; поперечными нагрузками от распределенных q_i и сосредоточенных G_i масс; опорными реакциями подшипников R_i ; силами дисбаланса от неуравновешенности вращающихся масс; изгибающим моментом

от действия на винт гидродинамической нагрузки, а также напряжениями вследствие деформации корпуса.

С целью определения наиболее напряженных элементов корабельного валопровода рассмотрим действия перечисленных выше пространственных нагружений. Точка приложения упорного давления на гребном винте относительно оси вращения валопровода имеет смещение и наклон, а сама величина силы T и ее наклон к диску вращения винта изменяются в результате неравномерности потока, набегающего на лопасти винта. При этом проекция силы упора T_x на ось X , проходящую через ось гребного винта и упорного подшипника, вызывает сжимающие усилия в корабельном валопроводе.

Вследствие действия гидродинамической нагрузки на винт к статической величине упора T добавляется знакопеременная динамическая составляющая упора – $\pm \Delta T$, релаксируемая в подшипниках валопровода. В результате деформации валопровода возникают изгибные напряжения, приводящие к появлению дополнительных реакций в опорах.

Следующим аспектом, обуславливающим возникновения дополнительных динамических реакций в опорах главного валопровода, является изгибная деформация корпуса судна. Значительное влияние оказывает местная деформация днищевого перекрытия в сторону от кормовой оконечности, то есть реакции на опорах промежуточных валов будут по величине больше.

Немаловажным фактором, приводящим к появлению дополнительных напряжений и, как следствие, реакций в опорах, является конструктивный дисбаланс. Источниками его возникновения являются технологический эксцентриситет центров сечения валов относительно оси вращения вследствие остаточных напряжений и пластических деформаций, эксцентричность расточки полых валов и др. факторы. Источником эксплуатационного дисбаланса является так называемая динамическая составляющая, возникающая вследствие действия центробежных сил при вращении вала с сосредоточенными массами – гребного винта, и др.

1.3 Характеристика задачи диагностирования

Техническая диагностика как отрасль знания, исследующая принципы, способы и средства оценки состояния технических объектов, направлена на повышение эффективности и качества работы исследуемой системы. Ее основной задачей является определение технического состояния проверяемого объекта с точки зрения правильности выполнения возложенных на нее функций.

Можно выделить три типа задач, решаемых при диагностировании: проверка исправности, работоспособности и правильности функционирования.

Объект считается исправным, если в нем нет ни одного дефекта. Проверка исправности требует проведения полного комплекса испытаний для оценки технического состояния объекта диагностирования и поэтому сложна.

Под работоспособностью сложной технической системы (СТС) понимается возможность выполнения всех ее функций во всех предусмотренных режимах. При этом допускается наличие дефектов, не приводящих к потере основных функций системы. Проверка работоспособности также достаточно трудоемкая, поскольку предполагает анализ правильности выполнения всех заданных функций во всех режимах работы системы.

Проверка правильности функционирования требует меньших затрат. Обычно она выполняется в рабочем режиме и оценивает работу системы в данный момент реального времени при конкретном рабочем входном сигнале. При этом возможно наличие дефектов, не проявляющихся в данном режиме или при данном входном сигнале (такие дефекты будут обнаружены, как только они приведут к неправильному функционированию системы). Достоинством проверки правильности функционирования является оперативность получения информации о переходе объекта в неисправное состояние, недостатком - невысокая полнота контроля. Такая проверка целесообразна для динамических объектов, работающих длительное время (например, для бортовых систем управления).

С точки зрения глубины диагностирования различают задачи контроля (обнаружения неисправности) и диагностирования (локализации дефекта).

Для решения задачи контроля множество технических состояний объекта разбиваются на два класса, один из которых включает исправное состояние, а другой - все неисправные. При решении задач диагностирования число классов соответствует заданному списку дефектов. Для того чтобы определить, к какому из классов относится текущее состояние объекта, производят измерение ряда его параметров или характеристик (диагностических признаков) и осуществляют их анализ. При этом возникают проблемы построения адекватной математической модели объекта диагностирования, выбора информативных диагностических признаков, интерпретации результатов диагностических измерений, оценки точности и достоверности диагностической информации.

Основные этапы организации и проведения диагностических экспериментов представлены на рисунке А.4.



Рисунок А.4 – Этапы диагностирования

На первом этапе формируется математическая модель объекта диагностирования, описываются основные режимы его работы и особенности функциониро-

вания. В частности, объект может быть линейным или нелинейным, стационарным или нестационарным, непрерывным или дискретным, может быть описан с помощью передаточных функций, частотных характеристик, уравнений в пространстве состояний, обыкновенных дифференциальных уравнений, уравнений в частных производных и т.д.

На втором этапе формулируется цель диагностирования. Она может состоять в определении технического состояния объекта, оценке его исправности, работоспособности, правильности функционирования, получении качественной или количественной информации о характеристиках дефектов (вид, место, величина). С точки зрения глубины диагностирования различают обнаружение дефекта, когда требуется вынести одно из двух суждений: "объект исправен" или "объект неисправен" и локализацию (поиск) дефекта, когда требуется с заданной степенью точности (глубиной поиска дефекта) указать место неисправности. При идентификации нужно дополнительно определить численные характеристики дефекта, например, указать фактические значения коэффициентов передаточной функции объекта, а при коррекции осуществить автоматическое устранение дефекта или его последствий.

В ряде случаев ставится задача прогнозирования дефектов, которая может сводиться, например, к выявлению параметра, приближающегося к своему предельно допустимому значению и продолжающему "дрейфовать" в том же направлении.

На третьем этапе осуществляется построение диагностической модели объекта, отражающей цель исследований. Диагностическая модель — это математическая модель объекта, учитывающая возможные источники дефектов и погрешностей.

При формировании диагностической модели различают дефекты устойчивые (отказы) и неустойчивые (сбои), одиночные и кратные, физические и логические, искажения параметров объекта и его входных или внутренних сигналов, внезапные и постепенные отказы, первичные и вторичные ошибки и т.д. Выбор

той или иной модели дефектов производится с учетом конкретных особенностей объекта и опыта его эксплуатации.

На четвертом этапе построенная модель используется для анализа диагностируемости, т.е. для выявления множества ненаблюдаемых дефектов, классов эквивалентных и неразличимых дефектов, оценки чувствительности диагностирования. При этом речь идет о потенциальных характеристиках диагностируемости, без привязки к конкретному методу контроля или набору диагностических признаков.

Пятый этап связан с выбором диагностических признаков. Под диагностическими признаками понимаются характеристики объекта, используемые для определения его технического состояния. К ним относятся, во-первых, характеристики и параметры объекта, определяемые целью исследования, и, во-вторых, переменные и параметры, подлежащие прямому экспериментальному измерению. В технической диагностике эти параметры называются прямыми и косвенными диагностическими признаками.

Выбор совокупности непосредственно измеряемых диагностических параметров представляет собой ответственный этап, от которого во многом зависит качество, точность и эффективность всего эксперимента. Требования, которым должны удовлетворять измеримые параметры, можно сформулировать в виде принципа "трех И" - измеримость, информативность, инвариантность.

Измеримость параметра означает, что он должен допускать возможность непосредственного измерения с помощью соответствующего датчика (частоты вращения, температуры, давления и т.д.). Информативность параметра означает, что он должен нести существенную информацию о дефектах и допускать возможность количественного определения их характеристик. Инвариантность параметра означает, что он должен иметь малую (в идеале - нулевую) чувствительность к шумам и другим мешающим воздействиям.

Одновременное выполнение перечисленных требований на практике, как правило, невозможно. Это иллюстрируется на рисунке А.5, на котором выделены множества измеримых, информативных и инвариантных параметров объекта. Ес-

ли пересечение этих трех множеств не пусто, то их общая часть содержит параметры, удовлетворяющие принципу «трех И» – именно их нужно использовать в диагностическом эксперименте.

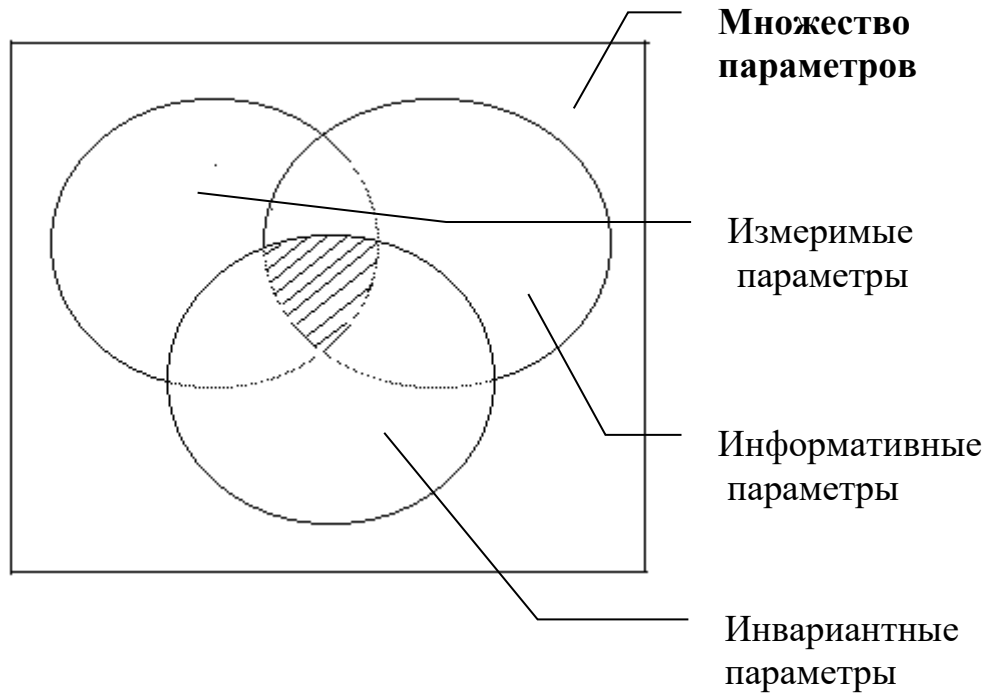


Рисунок А.5 – Взаимосвязь свойств параметров объекта

Шестой и седьмой этапы связаны с выбором метода контроля и синтеза устройства диагностирования. Традиционно в технической диагностике различают функциональное и тестовое диагностирование. Как правило, первое из них выполняется в рабочем режиме, а второе - в специальном режиме при подаче на вход системы тестовых воздействий.

Характерным примером тестового диагностирования являются методы оценивания состояния и методы аналитической избыточности. Суть диагностирования на основе аналитической избыточности состоит в проверке выполнения некоторого аналитического соотношения, связывающего переменные системы. Примером таких соотношений служат первые интегралы динамических систем, кото-

рые должны сохранять свое значение в любой момент времени. Если такие соотношения отсутствуют, их можно получить за счет введения избыточности в исходную систему.

Типичным примером тестового диагностирования являются методы оценивания параметров, развитые в теории идентификации. Диагностирование проводится путем сравнения экспериментальных оценок параметров с их эталонными значениями.

Два последних этапа (восьмой и девятый) относятся к непосредственному проведению измерений, их математической (в том числе статистической) обработке и формированию окончательного результата. Цель обработки косвенных математических признаков состоит в обработке недостоверных результатов, фильтрации помех, пересчете данных прямых измерений и оценке погрешности. Итогом является получение результата диагностирования (информация о характеристиках дефектов либо принятие решения об отнесении объекта к одному из неисправных состояний). Одновременно оценивается достоверность полученного диагноза, например, путем указания вероятности ошибок первого и второго рода (вероятностей ложного обнаружения и пропуска дефектов).

Далее по результатам диагностирования может приниматься решение о реконфигурации системы либо изменении режима ее работы, ремонте или замене неисправного блока и т.п.

1.4 Классификация методов диагностирования

В настоящее время существует большое число методов контроля и диагностирования СТС (в т.ч. энергетических установок). Можно выделить ряд признаков, которые могут быть положены в основу классификации этих методов. В частности, классификация может быть произведена:

- по виду математических моделей объекта диагностирования;
- по режиму диагностирования;
- по модели дефекта;

- по характеру диагностических признаков;
- по принципу диагностирования.

В зависимости от вида использования математических моделей различают методы диагностирования во временной и частотных областях, статические и динамические методы, детерминированные и вероятностные (статические).

В зависимости от режима диагностирования методы делятся на функциональные и тестовые. Функциональное диагностирование проводится в рабочем режиме, когда объект используется по прямому назначению. При тестовом диагностировании на вход объекта подаются специальные тестовые сигналы, и проверка проводится в контрольном режиме. Кроме того, методы можно разделить на три группы по стадии проведения проверки – априорное, текущее и апостериорное (ретроспективное) диагностирование (в авиации используют термины: предполетный, полетный и послеполетный контроль).

Следующий признак классификации – это модель дефектов. Существуют две наиболее распространенные модели дефектов: искажение сигналов и параметров объекта или, в других терминах – искажение переменных и коэффициентов математической модели объекта диагностирования. Им соответствуют две группы методов диагностирования, одна из которых основана на оценивании переменных состояния и выходных сигналов, другая – на оценивании параметров системы (коэффициентов математической модели).

По характеру диагностических признаков (сигналы или параметры) различают методы диагностирования в пространстве сигналов и пространстве параметров. В первом случае тем или иным способом измеряются текущие значения параметров диагностируемого объекта и оцениваются их отклонения от номинального значения. Во втором случае проверяются отклонения выходных сигналов от теоретических значений. В обоих случаях объект считается функционирующим неправильно, если отклонения превышают допустимые значения.

Наиболее содержательной представляется классификация по последнему из перечисленных выше признаков, а именно по принципу диагностирования. Анализ существующих методов контроля позволяет выделить три принципа, поло-

женных в их основу. Первый из них опирается на теорию инвариантов, второй – на применение моделей, третий – на введение и использование аналитической избыточности (рисунок А.6).

Первый принцип требует знания инвариантов объекта диагностирования. Его суть сводится к выявлению некоторых характеристик объекта, остающихся неизменными при нормальном функционировании объекта и изменяющихся при появлении дефектов. Далее эти характеристики (инварианты) используются в качестве прямых или косвенных диагностических признаков [20].

Они могут быть двух типов – параметрические инварианты и сигнальные или алгебраические инварианты. Основная трудность при контроле по параметрическим инвариантам связана со сложностью измерения реальных значений параметров, когда их номинальные значения бывают известны. При контроле по сигнальным инвариантам главная проблема состоит в необходимости непрерывного определения теоретических значений выходных сигналов исходя из известных текущих значений входных сигналов.

Для определения реальных значений параметрических инвариантов системы управления можно воспользоваться положениями теории идентификации. Основная задача идентификации состоит в получении или уточнении математического описания объекта по измерениям его входных и выходных сигналов. В самой общей постановке – это задача получения математического описания "черного ящика", когда априорная информация об объекте полностью отсутствует. В более типичной для теории идентификации постановке объект представляет собой "серый ящик", когда, например, требуется определить коэффициенты дифференциального уравнения, тип и порядок которого известны.

В технической диагностике обычно рассматривается "белый ящик", когда математическое описание исправного объекта считается полностью известным и требуется оценить отклонение одного или нескольких параметров от их номинальных значений.

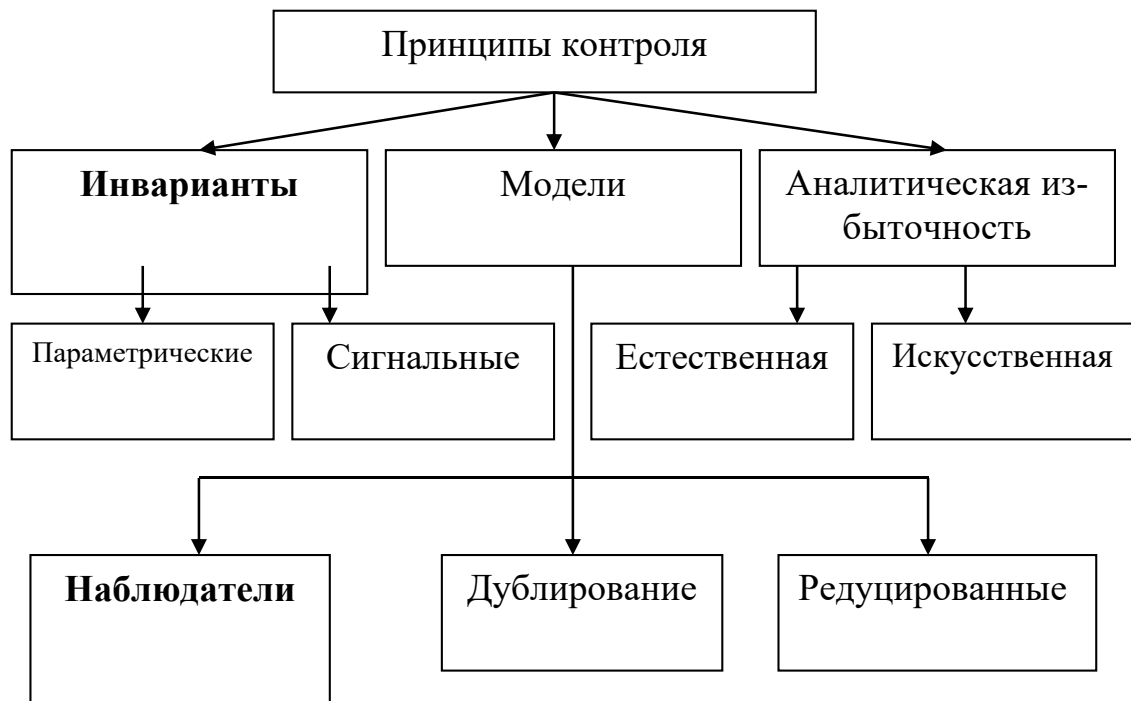


Рисунок А.6 – Принципы контроля СТС

Для решения этой задачи можно в принципе использовать любой из известных методов идентификации. Однако целесообразно по возможности упрощать применяемые методы с учетом того обстоятельства, что идентифицируемый объект в исправном состоянии является "белым ящиком".

При контроле по сигнальным (алгебраическим) инвариантам привлекать теорию идентификации не требуется. Контроль осуществляется путем проверки некоторых алгебраических соотношений (контрольных условий), которым должны удовлетворять выходные сигналы объекта при отсутствии дефектов. В качестве примеров можно назвать методы модального контроля и инвариантного диагностирования, а также методы диагностирования с помощью передаточных нулей и ганкелевых сингулярных функций.

Второй принцип контроля опирается на использование моделей проверяемого объекта [21]. Он является одним из центральных в технической диагностике и лежит в основе многих методов контроля. С наибольшей очевидностью он проявляется в таких хорошо известных методах как контроль на основе дублирования и

резервирования, представляющих собой частные случаи контроля с помощью моделей, подключаемых параллельно объекту. К достоинствам этих методов относятся их универсальность и наглядность.

Принцип контроля с помощью эталонной модели показан на рисунке А.7.



Рисунок А.7 – Принцип контроля с помощью эталонной модели

В простейшем случае дублирования в качестве моделей выступает второй экземпляр объекта (эталон), на который подаются те же входные сигналы U . Контроль производится сравнением выходов основного и дублирующего объектов в соответствии с векторным контрольным условием $\Delta = Y - Z = 0$, которое должно выполняться непрерывно в процессе функционирования объекта. Методы дублирования и резервирования получили широкое распространение в различных областях техники. Главный недостаток этих методов – большие затраты на диагностирование, связанные со значительной аппаратной избыточностью (удвоение, утроение и т.п.).

Для уменьшения аппаратной избыточности можно в качестве модели-эталона использовать не дубликат объекта, а его математическую модель. Последнюю обычно реализуют с помощью средств вычислительной техники. При этом в зависимости от требований к полноте и достоверности контроля может использоваться широкий спектр моделей.

Ряд методов контроля технических объектов основан на использовании так

называемых наблюдателей состояния [22]. В теории оптимального управления и фильтрации этим термином объединяют фильтры Калмана, наблюдатели Люенбергера и другие устройства, предназначенные для оценки вектора состояния линейных динамических систем. В общем случае наблюдатель состояния строится на основе модели объекта (Рис. А.8), подключенной параллельно объекту и охваченной дополнительной обратной связью по сигналу невязки Δ . Матричный коэффициент обратной связи K выбирается таким образом, чтобы сигнал Z как можно точнее (например, в смысле среднеквадратичного критерия) совпадал с сигналом Y .

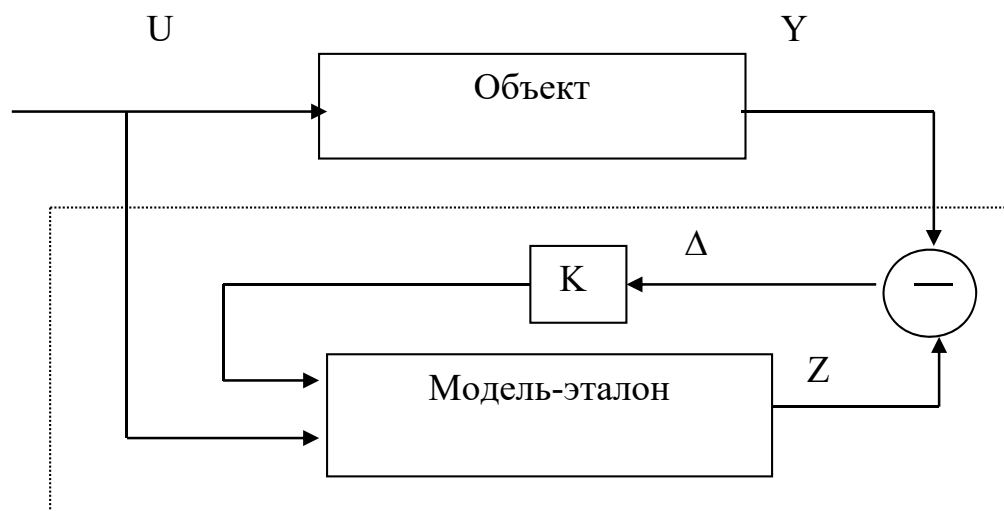


Рисунок А.8 – Построение наблюдателя состояния на основе модели объекта

Следя за величиной сигнала Δ , можно осуществить непрерывный контроль за правильностью функционирования системы. При отсутствии дефектов и шумов сигнал Δ будет близок к нулю, выход его за некоторые допустимые пределы свидетельствуют о появлении дефекта.

В ряде методов контроль осуществляется анализом статистических свойств невязки Δ , например, оценок ее математического ожидания и дисперсии. Если в качестве наблюдателя применяется фильтр Калмана, то при отсутствии дефектов сигнал Δ должен представлять собой "белый" шум. Поэтому для контроля можно использовать анализ его автокорреляционной функции, ковариационной матрицы

и других характеристик [39, 50].

Третий принцип контроля, отображенный на рисунке А.8, связан с использованием аналитической избыточности [18]. Согласно этому принципу, диагностирование технической системы осуществляется на основе проверки аналитических зависимостей, существующих между измеряемыми входами и выходами системы. Такие зависимости (их называют контрольными условиями, соотношениями паритета, контрольными уравнениями) могут связывать сигналы, относящиеся к одному и тому же моменту времени – тогда говорят об алгебраических инвариантах, либо к разным моментам – тогда говорят о динамических инвариантах или временной избыточности. Из других видов избыточности можно выделить геометрическую, которая отображает наличие кинематических соотношений между переменными механической системы; структурную (возникает при наличии избыточного числа измерительных датчиков или при резервировании с дробной кратностью); информационную (учитывает наличие априорной информации либо коррелированность измеряемых сигналов).

Частным случаем аналитической избыточности является прямая или естественная избыточность. Она выражается в том, что выходные сигналы $y_1, \dots, y_n$ проверяемого объекта могут удовлетворять известному алгебраическому соотношению вида $F(y_1, \dots, y_n) = c$, которое выполняется независимо от значений входных сигналов [23]. Тогда такое инвариантное соотношение можно использовать при диагностировании в качестве контрольного условия.

Если естественная избыточность отсутствует, то для получения инвариантных соотношений применяют введение искусственной избыточности. Существует несколько методов введения избыточности в исследуемые системы. Одним из первых и наиболее хороших разработанных методов является метод избыточных переменных рисунке А.9.

Согласно этому методу исходная совокупность переменных $y_1, \dots, y_n$ дополняется избыточной переменной z таким образом, чтобы расширенная совокупность переменных удовлетворяла заданному контрольному условию типа :

$$\Delta = y_1 + y_2 + \dots + y_n + z = 0 \quad (1.1)$$

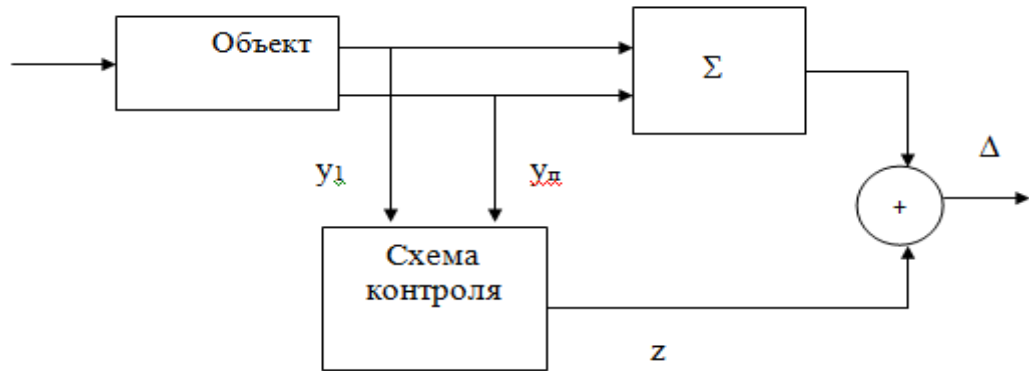


Рисунок А.9 – Контроль по методу избыточных переменных

Проведенный обзор показывает, что три выделенных принципа – использование инвариантов, применение моделей и введение избыточности играют центральную роль в технической диагностике. Важно заметить, что они являются не изолированными, а выступают в тесном взаимодействии (рисунок А.10).

Организация контроля всегда сопровождается введением и использованием аппаратной, временной или информационной избыточности. Во многих методах эта избыточность выступает в виде той или иной модели, используемой для получения контрольных соотношений, инвариантных к выходным сигналам, либо для вычисления значений диагностических признаков, которыми опять же служат те или иные инварианты (сигнальные или параметрические).

Перечисленные принципы могут служить методической основой, позволяющей с единых позиций рассматривать и исследовать типовые диагностические задачи.

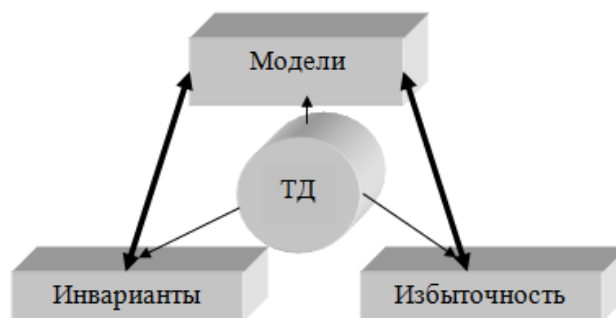


Рисунок А.10 – Взаимодействие принципов диагностирования

Ниже рассматриваются способы построения моделей объектов и формирования наборов диагностических инвариантов для статических и динамических систем.

1.5 Инварианты и диагностические модели сложных технических систем

Теория инвариантов играет важную роль на всех этапах разработки систем диагностирования и проведения диагностических экспериментов, начиная от построения диагностической модели проверяемого объекта и кончая анализом результата контроля. Теория инвариантов широко используется в математических, технических и естественных науках. Она дает методологию и конкретный математический аппарат для определения тех свойств, характеристик и параметров исследуемых объектов, которые остаются неизменными при различных преобразованиях этих объектов.

В частности, в физике инвариантность выражается в форме законов сохранения, которые связывают переменные, характеризующие состояние физической системы. Например, инвариантом консервативной динамической системы является ее полная энергия $E = E_k + E_p$, которая остается постоянной при любых изменениях кинетической и потенциальной энергий. Многочисленные инварианты, отражающие законы сохранения количества движения, вещества, тепла, заряда и т.д., часто встречаются в задачах математической физики, электро-, гидро- и аэродинамики и других областях.

Наиболее полное и законченное развитие теория инвариантов получила в классической математике, где инвариантом называется все то, что остается неизменным при некоторых преобразованиях математических объектов. Например, длина вектора инварианта к ортогональному преобразованию системы координат, собственные числа матриц инварианты к преобразованию подобия, ранг системы вектора является инвариантом по отношению к произвольному линейному преобразованию пространства и др.

Большой вклад в развитие теории инвариантов внесли Ф. Клейн и Д. Гильберт. В 1890-93 гг. Давид Гильберт доказал две фундаментальные теоремы, кото-

рые полностью решили проблему Кэли и, по существу, завершили формирование классической теории алгебраических инвариантов.

Концепция инвариантов является одной из важных в математике, поскольку изучение инвариантов непосредственно связано с задачами классификации объектов того или иного типа. По существу, целью всякой математической классификации является построение некоторой полной системы инвариантов (по возможности наиболее простой), т.е. такой системы, которая разделяет любые два эквивалентных объекта из рассматриваемой совокупности.

Применение теории инвариантов в прикладных науках обеспечивает необходимый уровень строгости и адекватности при построении математических моделей, их корректный анализ и эффективную вычислительную реализацию. Поскольку инварианты представляют собой важные характеристики системы, отражающие ее самые существенные свойства, то исследование любой системы, с какой бы целью оно не производилось (диагностирование, моделирование, метрологический анализ), следует начинать с отыскания ее инвариантов.

Понятие инвариантности достаточно широко используется в технических науках. В современной теории систем управления инвариантами называют характеристики динамических систем, остающиеся неизменными при определенных преобразованиях этих систем. Например, передаточные нули системы инвариантны по отношению к введению в систему обратных связей, марковские параметры инвариантны к изменению базиса в пространстве состояний, инвариантные показатели управляемости и наблюдаемости (инварианты Кронекера) не меняются при введении обратных связей по состоянию и произвольных линейных преобразованиях входов, выходов и переменных состояния.

Идея использования инвариантов в технической диагностике опирается на следующие факты:

- 1) Инварианты можно использовать в качестве диагностических признаков, так как они не чувствительны к базису описания объектов, но чувствительны к возникающим дефектам;

2) Использование инвариантов в качестве оцениваемых параметров в методах диагностирования, основанных на идентификационных принципах, приводит к упрощению идентификационных алгоритмов;

3) Выделение инвариантов, нечувствительных к определенным дефектам, позволяет организовать локализацию последних;

4) Применение методов теории инвариантов позволяет упростить анализ диагностируемости сложных технических систем.

1.6 Методы визуализации многомерных данных

В настоящее время развитие систем технического диагностирования идет по пути создания систем с элементами искусственного интеллекта. Одним из важнейших направлений построения таких систем является когнитивная компьютерная графика, представляющая собой эффективный технический инструмент воздействия на образное интуитивное мышление исследователя. Функция когнитивной графики заключается в наглядном изображении внутреннего содержания предмета исследования, в частности визуализация диагностических гипотез. Динамизм компьютерной графики, отсутствие принципиальных ограничений на форму, характер и структуру изображений, за которыми может стоять мощный вычислительный эксперимент, открывает дополнительные возможности для формирования обоснованного диагностического решения.

Однако существует ряд причин, осложняющих задачу требуемого представления информации. Основными из них являются:

- значительное увеличение размерности признакового пространства, что обусловлено необходимостью распознавать сложные объекты, хорошо различимые образы которых невозможно представить несколькими непосредственно определяемыми признаками;

- необходимость учета статистической природы формируемых образов объектов в целях осуществления наиболее достоверного распознавания, что вносит дополнительные сложности в процедуру распознавания;

- повышение требований к оперативности распознавания.

При этом следует учитывать, что увеличение размерности пространства признаков приводит не только к усложнению процедуры распознавания, но и к увеличению числа качественно различных технических средств, добывающих всю необходимую информацию об объектах. Это также отрицательно сказывается на эффективности системы распознавания.

В связи с вышеизложенным достаточно актуальны два перспективных направления в развитии теории распознавания, которые объединяются термином «визуализация»:

- рациональное сокращение размерности пространства признаков;
- построение систем формальных показателей, наилучшим образом представляющих имеющуюся априорную информацию (заданную в виде обучающих выборок или полученную, например, на основе экспертных оценок).

1.7 Методы представления многомерных данных при сокращении их размерности

В целях рационального сокращения размерности пространства признаков, не вызывающего существенных потерь информации об объекте распознавания, целесообразно обеспечить:

- выявление корреляций между отдельными признаками, приводящих к дублированию информации об объектах распознавания;
- выявление признаков, незначительно меняющихся при переходе от одного объекта к другому;
- агрегирование групп признаков в обобщенные показатели, представляющие собой линейные или нелинейные функции от исходных признаков.

Задачи рационального сокращения размерности пространства признаков могут быть сформулированы в виде общих оптимизационных задач, обеспечивающих максимизацию некоторой меры информативности J при ограничении на класс F преобразований, с помощью которых из исходных признаков формируют-

ся новые, обобщенные показатели. В настоящее время используются следующие основные методы рационального снижения размерности:

- метод главных компонент;
- факторный анализ;
- дискриминантный анализ;
- метод экстремальной группировки.

Данные методы отличаются выбором меры J и класса F преобразований. Обычно выделяют два больших класса мер J :

- меры авто информативности, обеспечивающие максимальное сохранение информации, которая содержится в исходном наборе признаков;
- меры внешней информативности, обеспечивающие максимальное сохранение информации относительно некоторых внешних показателей.

Применение методов рационального снижения размерности позволяет:

- осуществить предварительный анализ геометрической структуре данных;
- получить обобщенные показатели, обладающие наибольшей информативностью;
- произвести шкалирование данных, заданных в виде матрицы попарных расстояний, что дает возможность ввести между ними отношение порядка.

Следует отметить, что в задачах анализа многомерных данных широкое распространение получили попытки интерпретации результатов рационального снижения размерности как основополагающих скрытых характеристик имеющегося массива данных. В наибольшей степени эта тенденция нашла свое выражение в концепциях факторного анализа, представляющих собой обобщения анализа главных компонент. Возможности факторного анализа достаточно подробно охарактеризованы в [24]. Можно доказать, что если такие скрытые переменные в данных действительно есть и они независимы между собой, то в результате осуществления операций по рациональному снижению размерности они, как правило, обнаруживаются. При практическом пользовании методами рационального снижения размерности необходимо учитывать, что довольно часто получаемые скрытые характеристики теряют непосредственную связь с физической природой

объектов, свойственную первичным признакам. Это, естественно, вызывает определенные трудности с интерпретацией подобных результатов, но не может быть причиной для отказа от практического использования подобных процедур.

1.8 Линейные главные компоненты

Пусть исходный многомерный вектор признаков $X=(x_1, \dots, x_p)^T$ представляет собой p -мерный случайный вектор со средним $a=(a_1, \dots, a_p)^T$ и ковариационной матрицей $\Sigma=\{\sigma_{ij}\}_{i,j=1}^p$, $\sigma_{ij}=\sigma_{ji}$ для всех $i,j=1, \dots, p$. Первой главной компонентой вектора X называется линейная комбинация:

$$z_1 = \sum_{i=1}^p c_{1i} x_i = C_1^T X, C_1 = (c_{11}, \dots, c_{1p})^T, \sum_{i=1}^p c_{1i}^2 = 1, \quad (1.2)$$

где коэффициенты c_{1i} выбираются так, чтобы Z_1 имела наибольшую дисперсию среди всех нормированных линейных комбинаций исходных признаков вида (1.2). Геометрически это означает, что вектор C_1 параллелен наибольшей оси эллипсоида рассеяния вектора X , т.е. представляет собой нормированный собственный вектор, соответствующий наибольшему собственному числу матрицы Σ . Дисперсия Z_1 равна, таким образом, максимальному собственному числу матрицы Σ :

$$DZ_1 = \lambda_1, \quad (1.3)$$

где $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$ - упорядоченный набор собственных чисел Σ , т.е. корней характеристического уравнения линейного преобразования Σ :

$$\det(\Sigma - \lambda I) = 0 \quad (1.4)$$

Вектор C_1 представляет собой решение системы уравнений

$$\begin{cases} (\Sigma - \lambda_1 I)C_1 = 0 \\ \|C_1\|^2 = \sum_{i=1}^p c_{1i}^2 = C_1^T C_1 = 1 \end{cases} \quad (1.5)$$

Более формально C_1 представляет собой решение оптимизационной задачи

$$I(C) = D(C^T X) / \sum_{i=1}^p D x_i = \max, \|c\|^2 = 1 \quad (1.6)$$

Второй главной компонентой вектора X называется линейная комбинация

$$\begin{aligned} Z_2 &= C_2^T X = \sum_{i=1}^p c_{2i} x_i, c_2 = (c_{21}, \dots, c_{2p})^T; \\ \|c_2\|^2 &= \sum_{i=1}^p c_{2i}^2 = 1; C_1^T C_2 = \sum_{i=1}^p c_{1i} c_{2i} = 0, \end{aligned} \quad (1.7)$$

где коэффициенты c_{2i} выбираются так, чтобы z_2 имела наибольшую дисперсию среди всех комбинаций вида (1.5), так что c_2 – это нормированный собственный вектор, соответствующий второму собственному числу λ_2 матрицы Σ и параллельный второй по величине оси эллипсоида рассеяния. При этом $Dz_2 = \lambda_2$, а c_2 представляет собой решение системы уравнений:

$$\begin{cases} (\Sigma - \lambda_2 I) c_2 = 0 \\ \|c_2\| = 1 \end{cases} \quad (1.8)$$

Вектор c_2 можно получить также из решения оптимизационной задачи

$$I(C) = D(c^T X) / \sum_{i=1}^p D x_i = \max, \|c\| = 1, c^T c_1 = 0 \quad (1.9)$$

Аналогично определяются главные компоненты $z_3, \dots, z_p$. На практике матрица Σ обычно неизвестна, и ее заменяют оценкой $\bar{\Sigma}$, полученной по обучающей выборке $X_1, \dots, X_p$.

На рисунке А.11 приведен эллипс рассеяния для заданного случайного вектора X .

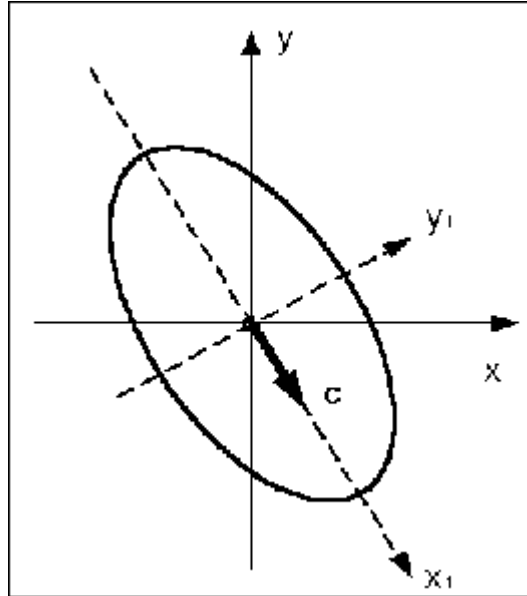


Рисунок А.11 – Геометрическая интерпретация главных компонент

Направление его главной оси задается найденным вектором C в осях x_1, y_1 данный эллипс рассеяния описывается уравнением:

$$\frac{x_1^2}{(\sqrt{\lambda_1})^2} + \frac{y_1^2}{(\sqrt{\lambda_2})^2} = 1 \quad (1.10)$$

Главная компонента вектора X_0 , $c^T X_0$ представляет собой проекцию X_0 на главную ось эллипса. Доля дисперсии, «объясняемой» первой главной компонентой составляет $\lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2)$.

Иллюстрированное руководство

**RIFTEK**
Sensors & Instruments**ТРИАНГУЛЯЦИОННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ДАТЧИКИ****Серия РФ603****Руководство по эксплуатации**

Логойский тракт, 22, г. Минск
220090, Республика Беларусь
тел/факс: +375 17 281 35 13
info@riftek.com
www.riftek.com

5. Основные технические данные

Модель РФ603-		R-X/4	X/2	X/5	X/10	X/15	X/25	X/30	X/50	X/100	X/250	X/500	X/750	X/1000	X/1250		
Базовое расстояние X, мм		39	10	15	15, 25 60	15, 30 65	25, 45 80	35, 55 95	45, 65 105	60, 90 140	80	125	145	245	260		
Диапазон, мм		4	2	5	10	15	25	30	50	100	250	500	750	1000	1250		
Линейность, %		±0.1 от диапазона														±0.15	
Разрешение, %		0.01 диапазона (только для цифрового выхода)														0.02	
Температурный дрейф		0,02% диапазона/°C															
Максимальная частота обновления данных		2 или 9,4 кГц															
Источник излучения		видимый красный полупроводниковый лазер, длина волны 660 нм видимый ультрафиолетовый полупроводниковый лазер, длина волны 405 нм (версия BLUE)															
Источник излучения	вариант исполнения	РФ603															
	мощность излучения	≤0,2	≤3 мВт									≤4,8 мВт					
	класс безопасности	1	3R (IEC60825-1)														
	вариант исполнения		РФ603L														
	мощность излучения		≤0,95 мВт														
	класс безопасности		2 (IEC60825-1)														
	вариант исполнения											РФ603P					
	мощность излучения											≤20 мВт					
	класс безопасности											3B (IEC60825-1)					
Выходной интерфейс	цифровой	RS232 (макс. 460,8 Кбит/с) или RS485 (макс. 921,6 Кбит/с) или RS232 и CAN V2.0B (макс. 1Мбит/с) или Ethernet и (RS32 или RS485)															
	аналоговый	4...20 mA (нагрузка ≤ 500 Ом) или 0... 10 В															
Вход синхронизации		2,4 – 5 В (CMOS, TTL)															
Логический выход		программируемые функции, NPN: 100 mA max; 40 В max															
Напряжение питания		9 ...36 В															
Потребляемая мощность		1,5..2 Вт															
Устойчивость к внешним воздействиям	Класс защиты	IP67 (только для датчиков с разъемом на корпусе)															
	Уровень вибраций	20g/10...1000Гц, 6 часов для каждой из XYZ осей															
	Ударные нагрузки	30 g/6 мс															
	Окружающая температура, °C	-10...+60, (-30...+60 для датчиков со встроенным нагревателем), (-30...+120 для датчиков со встроенным нагревателем и защитным корпусом)															
	Окружающая освещенность, люкс	10000 – РФ603L, 30000 – РФ603, >30000 – РФ603P															
	Относительная влажность	5-95% (без конденсации)															
	Температура хранения, °C	-20...+70															
Материал корпуса		алюминий															
Вес (без кабеля)		100 грамм															

Примечание 1: датчик РФ603-R-39/4 предназначен для контроля зеркальных объектов и стекла.

Примечание 2: датчик РФ603-10/2 с CAN и Ethernet не производится.

6. Пример обозначения при заказе

РФ603(BLUE)(L/P).F-X/D(R)-SERIAL-ANALOG-IN-AL-CC(90X)(R)-M-H-P-B

Символ	Наименование
(BLUE)	Blue (405 nm) laser option
L	L или P - признак датчика с классом лазерной безопасности 2 или 3B
F	Максимальная частота обновления, кГц (2 или 10) Примечание: датчики с CAN и Ethernet доступны только с частотой 9.4 кГц
X	Базовое расстояние (начало диапазона), мм
D	Рабочий диапазон, мм
(R)	Опция, лазерное пятно круглой формы (см. п. 19.3)

SERIAL	Тип последовательного интерфейса: RS232 - 232, или RS485 - 485, или (CAN и RS232) - CAN, или (Ethernet и RS232) – ET-232 или (Ethernet и RS485) - ET-485
ANALOG	Наличие аналогового выхода по току (I) или по напряжению (U) Примечание: 1) выход I - только для датчиков с RS232 или RS485 2) выход U – только для датчиков с RS232 или RS485 или CAN
IN	Наличие входа синхронизации
AL	Программируемый пользователем сигнал имеет несколько назначений. Может использоваться как: 1) логический выход (индикация наличия объекта в рабочем диапазоне); 2) линия взаимной синхронизации двух и более датчиков 3) линия аппаратной установки начала отсчета 4) линия аппаратного выключения/включения лазера Примечание: опция AL недоступна для датчиков со встроенным нагревателем
CC(90X)(R)	Кабельный ввод - CG, либо разъем - CC (Binder 712, IP67). Примечание 1: датчики с CAN или Ethernet интерфейсом содержат 2 разъема, опция CG недоступна. Примечание 2: опция 90X – признак углового кабельного разъема (см. приложение 19.4. с вариантами установки) Примечание 3: опция R – признак специального робототехнического кабеля
M	Длина кабеля, м
H	Наличие встроенного нагревателя
P	Датчик в защитном корпусе с воздушным охлаждением (см. п.19.1.)
B	Датчик с защитной блендой (см. п.19.2)

Пример. РФ603L.10-140/100R-232-I-IN-AL-CCR90A-3 – датчик с лазерной безопасностью класса 2, максимальная частота 9,4 кГц, базовое расстояние – 140 мм, диапазон - 100мм, лазерное пятно круглой формы, последовательный порт RS232, есть токовый выход 4...20мА, есть вход синхронизации и AL-выход, угловой кабельный разъем, вариант установки разъема "А", робот-кабель, длина кабеля 3 м.

7. Устройство и принцип работы

В основу работы датчика положен принцип оптической триангуляции, рис.1.

Излучение полупроводникового лазера 1 фокусируется объективом 2 на объекте 6. Рассеянное на объекте излучение объективом 3 собирается на CMOS-линейке 4. Перемещение объекта 6 – 6' вызывает соответствующее перемещение изображения. Процессор сигналов 5 рассчитывает расстояние до объекта по положению изображения светового пятна на линейке 4.

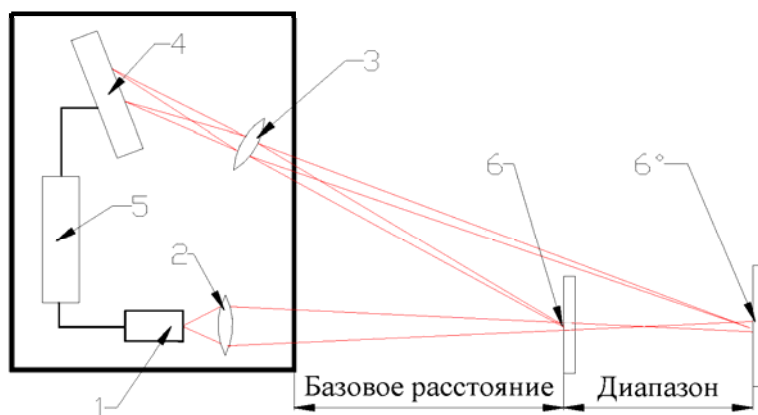


Рисунок 1

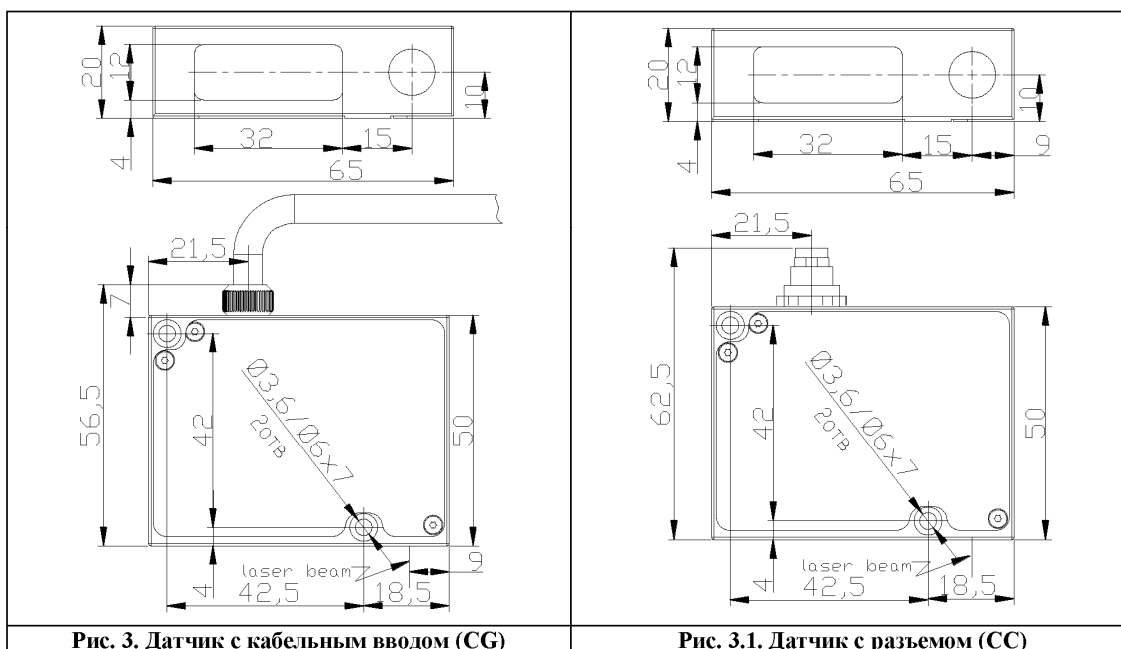
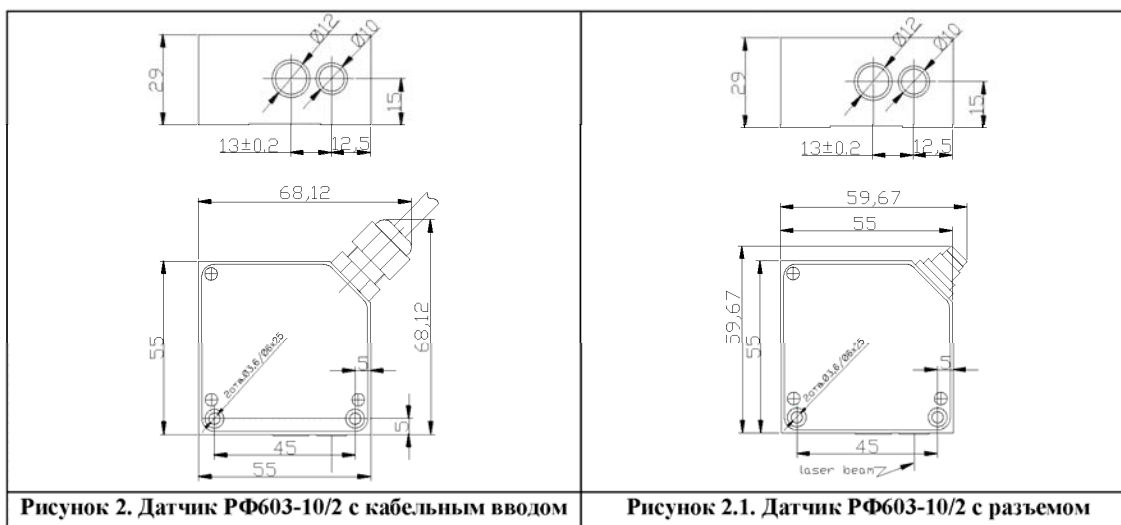
8. Габариты и установка

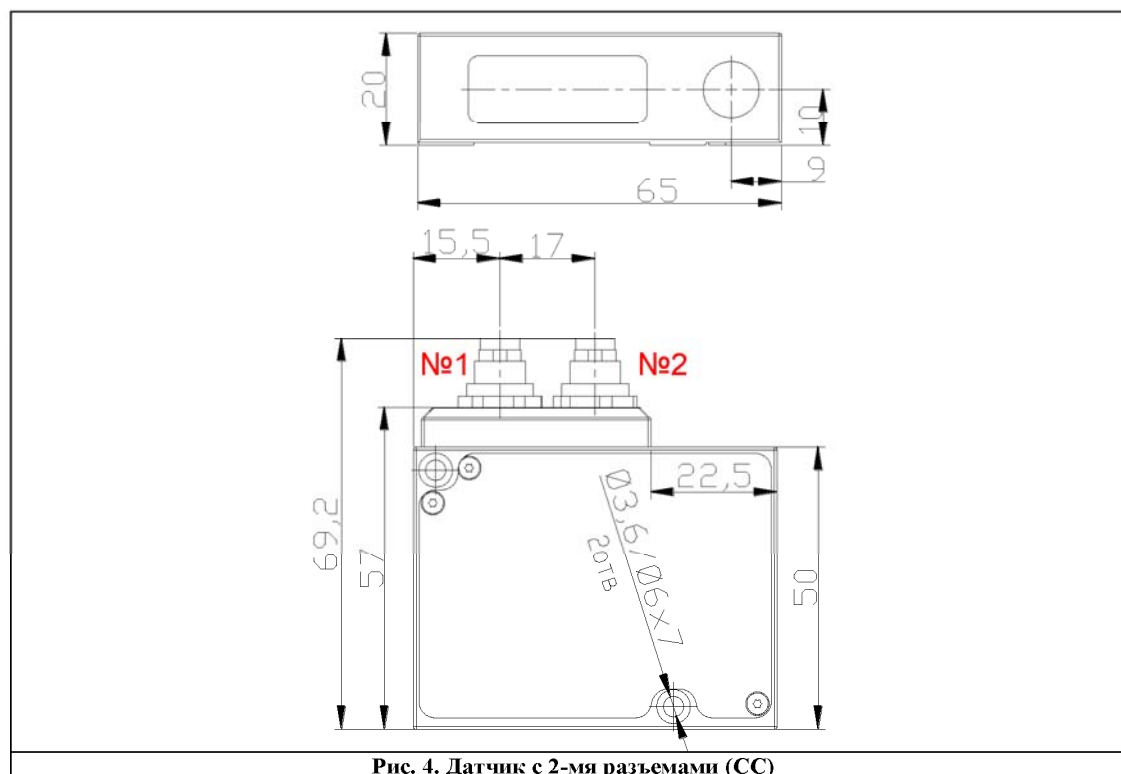
8.1. Габаритные и установочные размеры

Габаритные и установочные размеры датчика РФ603-10/2 показаны на рис. 2 и 2.1, остальных датчиков – на рис. 3 – 4. Корпус датчика выполнен из анодированного алюминия. На передней панели корпуса расположены два окна: одно – выходное, другое – для приема излучения, отраженного от контролируемого объекта. Для установки в оборудование корпус датчика содержит крепежные отверстия.

Датчик содержит разъем или кабельный ввод. Датчики с CAN или Ethernet интерфейсом содержат два разъема.

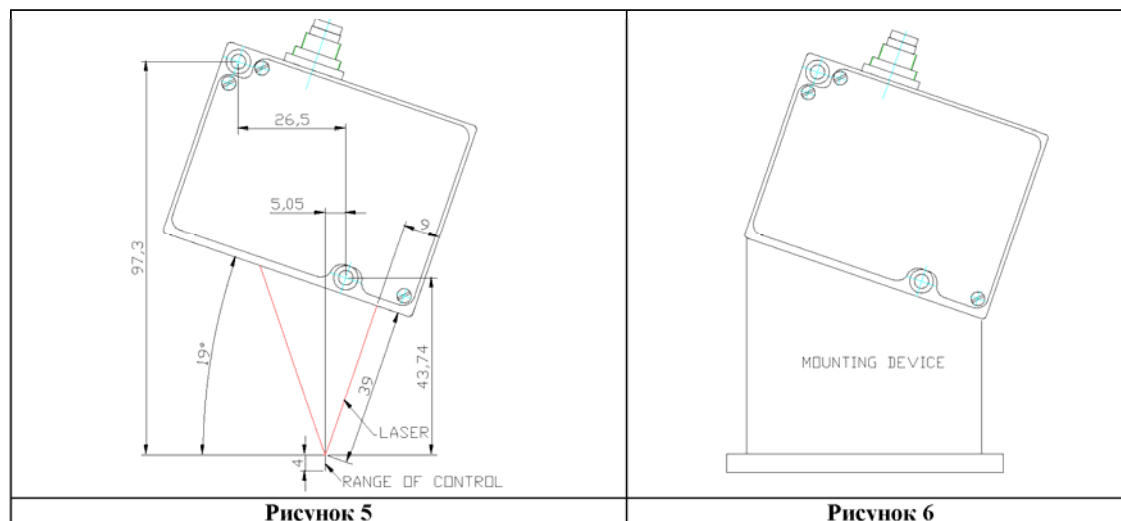
9





8.2. Установка датчика для контроля зеркальных поверхностей

На рисунке 5 показаны требования к установке датчика **РФ603-R-39/4** для контроля зеркальных объектов и стекла. Датчик поставляется с оснасткой для его установки, рис. 6.



8.3. Общие требования к установке

Датчик устанавливается таким образом, чтобы контролируемый объект располагался в зоне рабочего диапазона датчика. Кроме того, в области прохождения падающего на объект и отраженного от него излучения не должно находиться

Методика раннего обнаружения зарождающихся неисправностей опорных подшипников на основе вейвлет-преобразования вибросигнала, снимаемого с корпуса подшипника

На протяжении многих десятилетий и по настоящее время основным средством анализа реальных физических процессов являлся гармонический анализ. Математической основой анализа является преобразование Фурье.

Преобразование Фурье производит разложение произвольного колебательного процесса на гармонические колебания с различными частотами, а необходимые формулы и свойства описываются с помощью одной базовой функции $\exp(j\omega t)$ или двух действительных функций $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$. Гармонические колебания широко распространены в природе, поэтому преобразования Фурье понятно на уровне интуиции независимо от математического анализа.

Вейвлет-анализ достаточно схож с преобразованием Фурье. Но имеется ряд отличительных свойств. Вейвлеты во временной или частотной областях применяются для описания функций сигналов в виде суперпозиций вейвлетов разного уровня разложения (детализации).

Преобразование Фурье. В основании спектрального анализа сигнала - интегральное преобразование в ряды Фурье.

В пространстве функций, определенных на конечном интервале $(0, T)$, определяется, как корень из скалярного произведения:

$$\|s(t)\|^2 = \langle s(t), s(t) \rangle = \int_0^T s(t) \cdot s^*(t) dt, \quad (1)$$

В случае, если норма функции определена конечным значением (интеграл сходится), это говорит, что она принадлежит пространству функций $L^2(0, T)$, интегрируемых с квадратом, и имеющая, конечную энергию.

Любую функцию в пространстве L^2 можно представить в виде ряда Фурье:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_n \exp(jn \Delta\omega t), \quad (2)$$

$$S_n = (1/T) \int_0^T s(t) \exp(-jn \Delta\omega t) dt, \quad (3)$$

где $\Delta\omega = 2\pi/T$ - шаг частотного аргумента ряда.

Вышеуказанные уравнения (2) и (3) являются прямым и обратным преобразованием Фурье сигнала.

Ряд Фурье ограничен количеством членов ряда N . Ограничение количества членов значением N значит аппроксимацию многомерного сигнала N , определяемого мерной системой базовых функций спектра сигнала с погрешностью, зависящей от фактического спектра. Ряд Фурье равномерно сходится к $s(t)$ по норме (1):

$$\lim_{N \rightarrow \infty} ||s(t) - \sum_{n=-N}^N S_n \exp(jn \Delta\omega t)|| = 0, \quad (4)$$

Ряд Фурье является разложением сигнала $s(t)$ по базису пространства $L^2(0,T)$ ортонормированных гармонических функций $\exp(jn \Delta\omega t)$ с переменной частоты, кратной частоте первой гармоники $\omega_1 = \Delta\omega$. Следовательно ортонормированный базис пространства $L^2(0,T)$ определен из функции $v(t) = \exp(j \Delta\omega t) = \cos(\Delta\omega t) + j \sin(\Delta\omega t)$ с использованием масштабного преобразования независимой переменной, следующим образом $v_n(t) = v(nt)$.

Коэффициенты ряда Фурье определены равенством Парсеваля сохранения энергии сигнала в разнообразных проявлениях:

$$(1/T) \int_0^T |s(t)|^2 dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |S_n|^2. \quad (5)$$

Разложение в ряд Фурье любой функции $y(t)$ будет корректным, в случае, если функция $y(t)$ принадлежит данному пространству $L^2(0,T)$, соответственно квадратично интегрируема с конечной энергией:

$$\int_0^T |y(t)|^2 dt < \infty, \quad t \in (0, T), \quad (6)$$

и возможно периодически расширена и определена по всей временной оси пространства $D(-\infty, \infty)$ так, что:

$$y(t) = y(t - T), \quad t \in D, \quad (7)$$

при условии сохранения энергии в пространстве $D(-\infty, \infty)$.

Оконное преобразование Фурье, которое использует вместо одной базисной функции $\exp(-jn\Delta\omega t)$ целый набор функций $p(t-m\Delta T) \cdot \exp(-jn\Delta\omega t)$, где $p(t)$ - временное окно единичного преобразования Фурье, ΔT - интервал сдвига функции $p(t)$ по интервалу T задания сигнала. Размер функции $p(t)$ и сдвигов ΔT чаще является соизмеримым с областью стационарности сигнала. В результате данного преобразования определяется коллектив спектров, отображающий изменение спектра сигнала по интервалу ΔT . Фактически преобразование разбивает один нелокализованный базис на конечное количество базисов, определенных в пределах функции $p(t)$, и соответственно, увеличивающее количество элементов детализации. Но априори требуется иметь размер стационарности сигнала и сохранять его постоянным вне зависимости от истинного спектра сигнала по интервалам ΔT .

Функция изменения независимой частотной переменной в спектре сигнала по времени представляется растяжением (сжатием) сигнала. Для вейвлет-функции возможно выполнить функцией типа $\psi(t) \Rightarrow \psi(a^m t)$, $a = \text{const}$, $m = 0, 2, \dots, M$, соответственно путем линейного растяжения (сжатия), которое обеспечивает идентичность функции при масштабировании. Но ограниченность функции $\psi(t)$ по временной оси, вызывает необходимость независимой переменной, дополнить последовательными сдвигами функции $\psi(t)$ по оси локализации, типа $\psi(t) \Rightarrow \psi(t+k)$, для покрытия значений по всей оси пространства $D(-\infty, \infty)$. Учитывая одновременно данные условия, структуру базиса можно принять как:

$$\psi(t) \Rightarrow \psi(a^m t + k), \quad (8)$$

переменные k и m , в качестве упрощения примем целыми. После приведения

функции (8) по (1) к единичной норме имеем:

$$\psi_{mk}(t) = a^{m/2} \psi(a^m t + k). \quad (9)$$

В случае выполнения условия ортогональности для семейства функций $\psi_{mk}(t)$:

$$[\psi_{nk}(t), \psi_{lm}(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{nk}(t) \cdot \psi_{lm}^*(t) dt = \sigma_{nl} \cdot \sigma_{km}, \quad (10)$$

$\psi_{mk}(t)$ возможно использовать как ортонормированный базис пространства $L^2(D)$. И следовательно любая функция $L^2(D)$ пространства может быть разложена по базису $\psi_{mk}(t)$:

$$s(t) = \sum_{m,k=-\infty}^{\infty} S_{mk} \psi_{mk}(t), \quad (11)$$

где коэффициенты являются проекцией сигнала на новый ортогональный базис функций и определяются скалярным произведением:

$$S_{mk} = [s(t), \psi_{mk}(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{mk}(t) dt, \quad (12)$$

при равномерная сходимость ряда

$$\lim_{M,K \Rightarrow \infty} ||s(t) - \sum_{m=-M}^M \sum_{k=-K}^K S_{mk} \psi_{mk}(t)|| = 0.$$

В случае выполнения условий данная функция преобразования $W(t)$ является ортогональным вейвлетом.

Простейшим примером ортогональной функций данного типа - это вейвлеты Хаара. Базисная функция Хаара определена:

$$\psi(t) \begin{cases} 1, & 0 < t < 1/2 \\ -1, & 1/2 < t < 1 \\ 0, & t < 0, t > 1. \end{cases} \quad (13)$$

При $a = 2$, $m = 0, 1, 2, \dots$, $k = 0, 1, 2, \dots$ две произвольные функции, определенные данным вейвлетом путем детализации, имеют единичную норму и

ортогональны.

Вейвлет-преобразование представляет сигнал $f(t)$ в виде суммы поочередных приближений, аппроксимирующих $A_{j_0}(t)$ и детализирующих $D_j(t)$ коэффициентов с последующей итерацией:

$$f(t) = A_{j_0}(t) + \sum_{j=1}^{j_0} D_j(t), \quad (14)$$

где j_0 – крайний уровень разложения.

В результате данная последовательность аппроксимирующих коэффициентов $A_{j_0}(t)$, еще разлагается итерационным методом. Последующие шаги приближения, декомпозиции, относятся к определенному масштабу j_0 анализа и реконструкции сигнала. Такая детализация каждого из набора коэффициентов вейвлет-преобразования исходного сигнала может рассматриваться, и во временной, и в частотной областях.

В результате вейвлет-анализа вибросигнала опорного подшипника (рис. В.1), снятого с корабельного валопровода вибродиагностическим комплексом «АССИСТЕНТ V3RT» (рис. В.2) приведены в виде соответствующих скалограмм.

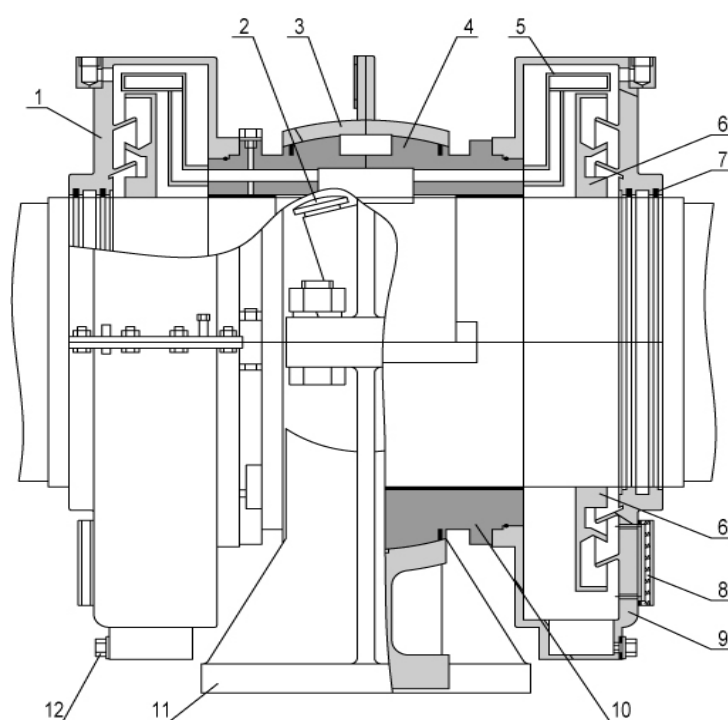


Рисунок В.1 – Подшипник опорный:

1 – крышка картера; 2 – термометр; 3 – крышка; 4 – вкладыш верхний; 5 – устройство масло приемное; 6 – полукольцо масло подающее; 7 – манжета уплотнительная; 8 – крышка смотровая; 9 – корпус картера; 10 – вкладыш нижний; 11 – корпус; 12 – пробки под спускные отверстия



Рисунок В.2 – Вибродиагностический комплекс «АССИСТЕНТ V3RT»

Таблица 1

Вид измерения:	Общая вибрация	Локальная вибрация
Диапазон	0,8-80 Гц	8-1250 Гц
Частотные коррекции, диапазон	62-170 дБ Wd, 62-170 дБ Wk 62-170 дБ Wm, Wc, We, Wj, Wb, Wm, Bw, Bwm	60-170 дБ Wh, Bh
Временные характеристики	Эквивалент, 1с, 5с, 10с, Nc, MTVV	Эквивалент, 1с, 5с, 10с, Nc, MTVV
Спектры	Октавный спектр 1 Гц-63 Гц Треть октавный спектр	Октавный спектр 8 Гц-1000 Гц Треть октавный спектр

	0,8 Гц-80 Гц	6,3 Гц-1250 Гц
Другое	MAX, MIN всех параметров. Статистическое распределение. Мониторинг	MAX, MIN всех параметров. Статистическое распределение. Мониторинг
Примечания	Соответствует ГОСТ ИСО 8041-2006, МЭК 61260, класс 1. Все параметры измеряются одновременно Специальные режимы для АРМ	
	Индикатор изменения эквивалентного уровня вектор вибрации	

На скалограмме (рисунок В.3, В.4) приведены результаты удаления высокочастотного шума с помощью вейвлета Добеши и визуализация спектра мощности после обработки DWT фильтром.

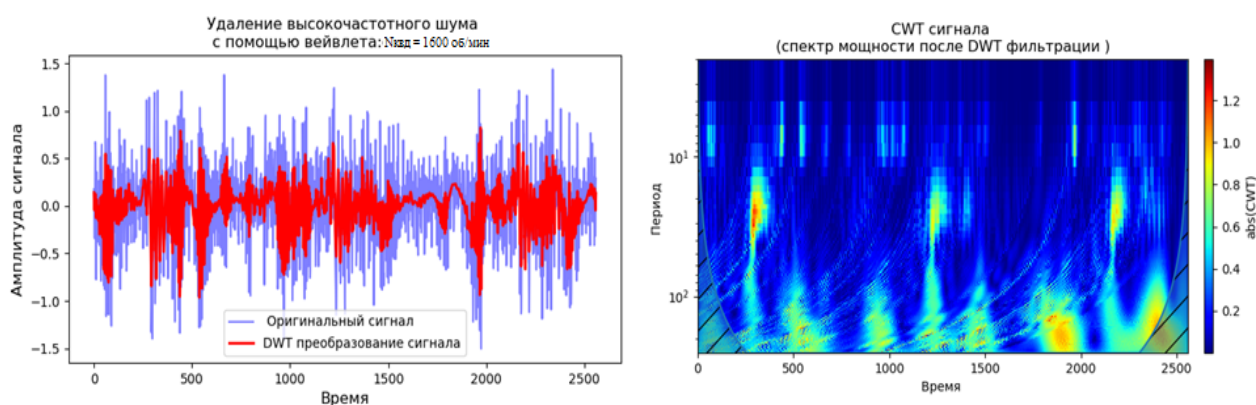


Рисунок В.3 – Удаление высокочастотного шума с помощью вейвлета Добеши

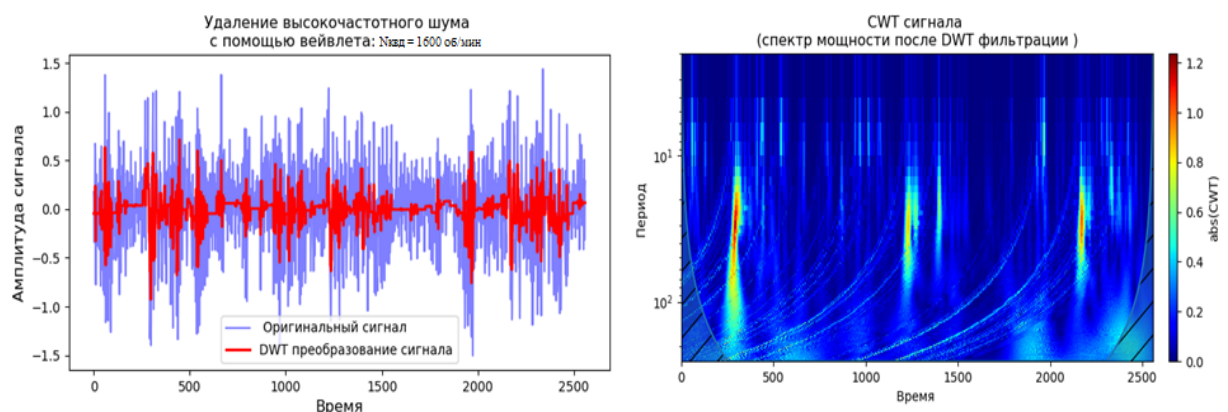


Рисунок В.4 – Удаление высокочастотного шума с помощью вейвлета Добеши

На рисунке В.4 после преобразования отчетливо различимы локальные области, свидетельствующие о наличии неисправности в опорном подшипнике, что позволяет сделать вывод о возможности применения вейвлет-преобразования для постановки диагноза.

Практические рекомендации вейвлет-преобразования вибросигнала опорного подшипника

Для реализации вейвлет-преобразования вибросигнала опорного подшипника на режимах (до 155 об/мин по частоте вращения валопровода) в работе используются вейвлет функции пакета MathLab.

Дискретный вейвлет-анализ с помощью программного обеспечения представляет собой – функции математического моделирования экспериментов (MATLAB) и систем компьютерной алгебры (MATHCAD, Mathematica, LabView фирмы National Instruments). Данные программные пакеты, специализируются на дискретное вейвлет преобразование конкретных задач, таких как очистки сигналов от помех, эффективного сжатия сигналов, стеганографии, удаления трендов и прочее. Особенностью приложений являются: сложности алгоритма вычислений, высокая точность, отсутствие принципиальных ограничений по размерам интервала анализа, большое разнообразие семейств вейвлетов, возможность объединения базисной функции, быстрота.

В MATLAB имеются режимы для получения исходной информации о вейвлетах с помощью функций:

- «centfrq» – центральная частота вейвлета;
 - «intwave» – первообразная вейвлет-функции ψ ;
 - «waveinfo» – информация о вейвлетах;
 - «wavefun» – вейвлет-функции φ и ψ ;
- и прочие.

MATLAB позволяет применять практически все популярные вейвлеты: вейвлеты Морле («morl»), вейвлеты Хаара («haar»), гауссовы вейвлеты («gaus»), семейство вейвлетов Добеши («db1», «db2», ... , «db45»), семейство биортогональных вейвлетов («bior1.1», «bior1.3», ... , «bior6.8»), вейвлеты Мейера («dmeu»), вейвлеты «мексиканская шляпа» («mexh»), комплексные гауссовы вейвлеты («sgau»), частотные В-сплайновые вейвлеты («fbasp»), вейвлеты Шеннона («shan»).

Применение вейвлет-анализа с помощью MATLAB описано обширным количеством работ.

Вейвлет-преобразование с помощью MATHCAD приложено дополнительным пакетом Mathcad Wavelets Extension Pack. Функционал дополнения включает множество вейвлет-функций, волновые дискретные преобразования и др.

Пакет Wavelets Extension Pack включает свыше 60 базовых вейвлет-функций и позволяет выполнять преобразования с помощью вейвлетов Хаара, Добеши, В-сплайнами, симлетами, а также вейвлетами Койфмана.

В программе Mathematica вейвлеты включены в пакет Wavelet Explorer. Данный пакет Wavelet Explorer схож по функционалу с модулем Wavelets Extension Pack. Описание вейвлет-анализа в системе Mathematica представлены большим количеством работ.

Программные средства дискретных вейвлет преобразований зачастую используются в виде кодеков, включенных в прикладное программное обеспечение.

Процедура разработки программного приложения, с использованием дискретного вейвлет-анализа, включает следующие этапы:

- 1) Сбор исходных данных и информации о характеристике анализируемых сигналов в рамках поставленного задания;
- 2) Анализ данных прикладными программами, выбор семейства вейвлета и уровня детализации для данных пакетов;
- 3) Выбор уровня разложения и анализ алгоритмов обработки аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов;
- 4) Использование выбранного алгоритма на программном уровне

с учетом особенностей языка программирования.

В настоящей работе к обработке вибросигнала применено вейвлет-преобразование Дебоши.

Вейвлет-преобразование представляет сигнал $f(t)$ в виде суммы поочередных приближений, аппроксимирующих $A_{j_0}(t)$ и детализирующих $D_j(t)$ коэффициентов с последующей итерацией:

$$f(t) = A_{j_0}(t) + \sum_{j=1}^{j_0} D_j(t), \quad (14)$$

где j_0 – крайний уровень разложения.

В результате данная последовательность аппроксимирующих коэффициентов $A_{j_0}(t)$, еще разлагается итерационным методом. Последующие шаги приближения, декомпозиции, относятся к определенному масштабу j_0 анализа и реконструкции сигнала. Такая детализация каждого из набора коэффициентов вейвлет-преобразования исходного сигнала может рассматриваться, и во временной, и в частотной областях (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнение методов диагностирования производилось на фиксированном диагностическом режиме 60 об/мин

п/п	Сравниваемые методики диагностирования опорных подшипников	Число исправных состояний объекта	Число неисправных состояний объекта	Число “ложных тревог”	Число “пропусков дефектов”	Вероятность правильного диагностирования
1	Пик-фактор	100	100	19	14	0,67
2	Анализ спектра огибающей	100	100	15	10	0,75
3	Анализ спектров высших порядков	100	100	14	9	0,77
	Разработанная методика					

Оценка эффективности разработанного метода вибродиагностики определялась стандартными методами, позволяющими определить вероятность

ошибок 1-го и 2-го рода или иначе вероятность «ложной» тревоги и «пропуска» дефекта.

Выбор главного валопровода НК и ПЛ в качестве объекта научного исследования обусловлен его высокой уязвимостью вследствие размещения в различных отсеках, использованием пожароопасных рабочих сред в подшипниках и опасностью потери хода судна даже при кратковременном срыве жидкостного режима трения в опорных узлах, перспективностью внедрения новых подходов к обеспечению работоспособности в нештатных условиях плавания.

В результате анализа результатов исследований, влияния обводнения смазочного масла на теплофизические и реологические характеристики смазочного слоя, установлено неоднозначное действие на устойчивость положения вала в гидродинамическом подшипнике на индивидуальной смазке и требует решения задачи, направленной на выявление закономерностей влияния обводнения смазочного масла на толщину несущего слоя.

Выполненный обзор литературных источников показал, что недостаточно полно охваченной с позиций динамики роторных систем при изменении реологических характеристик, вследствие поступления воды в систему смазки подшипника, осталась задача исследования влияния поперечных колебаний судового валопровода на толщину несущего слоя в радиальных ГДП.

Недостатки методологии формирования устойчивых режимов смазки водосодержащим смазочным материалом, сложный и специфический характер функционирования пропульсивных комплексов, позволяют определить актуальную научно-прикладную задачу обеспечения работоспособности корабельного валопровода при обводнении смазочного масла в подшипнике.

Разработанная диагностическая модель и один из подходов решения, задачи диффузии обводненного смазочного материала в масляной емкости РГДП, указывает на то, что концентрация в слоях смазочной жидкости, примыкающей к маслоподающему диску, определяются скоростью его вращения, интенсивностью поступления воды в смазку и геометрическими характеристиками самой емкости. И позволяют установить предельные значения концентрации водяной фазы в

дисперсной смазочной среде, при которых сохраняется бесперебойная подача смазочного материала в напорную линию подшипника.

Использование теоретико-вероятностный подхода, базирующегося на временном осреднении параметров течения и введении функций - индикаторов фаз, однозначно относящих конкретный элементарный объем смазочной среды к одной из взаимодействующих фаз, позволил описать влияние неоднородности дисперсной смазочной среды на расходные характеристики индивидуальной системы смазки опорного узла корабельного валопровода.

Получила дальнейшее развитие зональная модель эволюции структур эмульгированного смазочного материала в клиновидном зазоре РГДП корабельного валопровода, позволяющая уточнить расчетные схемы по определению параметров работоспособности подшипников скольжения в условиях неконтролируемого поступления воды в систему смазки ($k = 15\% - 70\%$).

Получила дальнейшее развитие методика проведения динамического анализа роторных систем, в части определения поперечных колебаний корабельного валопровода в условиях поступления воды в систему смазки РГДП, которая учитывает изменения коэффициентов жесткости и демпфирования масляной пленки с учетом процессов диффузии и массопереноса эмульгированного смазочного материала в гидравлическом тракте подшипника.

Вейвлетные базисы могут быть хорошо локализованными как по частоте, так и по времени, что делает возможным анализ нестационарной компоненты вибросигнала. При выделении в вибросигнале хорошо локализованных разно-масштабных процессов можно рассматривать только те масштабные уровни разложения, которые представляют целевой интерес.

Вейвлетные базисы, в отличие от преобразования Фурье, имеют достаточно много разнообразных базовых функций, свойства которых ориентированы на решение различных задач. Базисные вейвлеты могут иметь и конечные, и бесконечные носители, реализуемые функциями различной гладкости.

Практическое использование вейвлет-преобразований связано, в основном, с дискретными вейвлетами, как в силу повсеместного использования цифровых методов обработки данных, так и в силу ряда различий дискретного и непрерывного вейвлет-преобразований. Недостатком вейвлетных преобразований является их относительная сложность.

Материалы промышленных испытаний и внедрения диссертационной работы

Приложение Г.1



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Лысенко Дмитрия Анатольевича

«Обеспечение надежности судового вала – винторулевого комплекса путем повышения
стабильности шлифования шеек валов»

Комиссия под председательством заместителя начальника службы эксплуатации и ремонта кораблей Вакаева Б.Б. членов комиссии Тиховского Н.А., Никифорова А.П., составила настоящий акт в том, что проведено внедрение в производство методики чистового шлифования шеек валов. Представлены рекомендации, способ чистового шлифования шеек валов технологической системы круглошлифовального станка. При работе в условиях 91 СРЗ выявлено повышение стабильности показателей качества шлифования. В процессе обработки все детали, прошлифованные с учетом предложенной методики, по шероховатости поверхности, допуску на изготовление и биение относительно оси соответствовали требованиям технологической документации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложенная методика обработки позволяет получить изделие с необходимыми параметрами качества шлифования, которое в значительной степени обеспечивает надежность судового вала – винторулевого комплекса с учетом повышения стабильности качества чистового шлифования шеек валов.

2. Разработанные рекомендации, способ чистового шлифования шеек валов технологической системы круглошлифовального станка, повышают качество обработки деталей за счёт снижения погрешности, шероховатости поверхности, допуска на изготовление и биение относительно оси.

3. Планируется внедрение результатов исследования и разработок в действующее производство по шлифованию шеек валов на 91 СРЗ ЧФ. Предполагаемый годовой экономический эффект от внедрения составляет 2 462 000 рублей.

Председатель комиссии:

Заместитель начальника службы эксплуатации и ремонта кораблей

Вакаев Б.Б.

Члены комиссии:

Тиховский Н.А.

Никифоров А.П.

**АКТ**

внедрения результатов диссертационной работы

Лысенко Дмитрия Анатольевича

«Обеспечение надежности судового вала – винторулевого комплекса путем повышения стабильности шлифования шеек валов»

Комиссия под председательством заместителя начальника службы эксплуатации и ремонта кораблей Вакаева Б.Б., членов комиссии Тиховского Н.А., Никифорова А.П., составила настоящий акт в том, что проведено внедрение в производство методики чистового шлифования шеек валов. Представлены рекомендации по способу чистового шлифования шеек валов технологической системы круглошлифовального станка. При работе в условиях 91 СРЗ выявлено повышение стабильности показателей качества шлифования шеек судового вала. Данные рекомендации, алгоритм оптимизации за режимами и диагностикой технического состояния систем удержания и стабилизации шлифования шеек валов имеют перспективу широкого применения в судостроительной промышленности технологической системы круглошлифовального станка при чистовом шлифовании шеек валов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанная методика обработки позволяет получить изделия с необходимыми параметрами качества шлифования, которые в значительной степени определяется надежностью станков при чистовом шлифовании шеек валов в условиях 91 СРЗ ЧФ.

2. Результаты экспериментальных исследований шлифования шеек судового вала реализованы на стадиях монтажа, доводки и модернизации опорных узлов. Внедрение разработанных технических решений в системе шлифования шеек валов позволило уменьшить коэффициент себестоимости технической эксплуатации на 26-28%, что дает возможность ежегодно экономить более трех миллионов рублей и увеличить срок службы опорных узлов в 1.5-2 раза

3. Предполагаемый годовой экономический эффект от внедрения составляет 3 564 000 рублей.

Настоящий акт не является основанием для предъявления взаимных финансовых претензий

Председатель комиссии:

Начальник службы эксплуатации и ремонта кораблей

Вакаев Б.Б.

Члены комиссии:

Тиховский Н.А.

Никифоров А.П.