

На правах рукописи



АНЦЕВ Александр Витальевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕЗВИЙНОГО
ИНСТРУМЕНТА ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ**

Специальность: 05.02.07 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Тула – 2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Пасько Николай Иванович

Официальные оппоненты: **Артамонов Евгений Владимирович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Тюменский
индустриальный университет»,
заведующий кафедрой «Станки и
инструменты»

Кузин Валерий Викторович
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»,
заведующий кафедрой
«Технологическое проектирование»

Плотников Александр Леонтьевич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Волгоградский
государственный технический
университет», профессор кафедры
«Автоматизация производственных
процессов»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Брянский
государственный технический
университет»

Защита состоится «16» июня 2020 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, ауд. 9-101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте:

http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/Antsev_AV/

Автореферат разослан «02» апреля 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Черняев Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Эффективность эксплуатации лезвийного инструмента в значительной мере определяется условиями обработки, включающими в соответствии с ГОСТ 25751, в том числе, порядок восстановления инструмента (лезвия), которое осуществляется заточкой, заменой отказавшего лезвия и т. п., и режимы резания. Для повышения эффективности эксплуатации лезвийного инструмента необходимо учитывать вариабельность (разброс) периода стойкости инструмента, которая обуславливается вариабельностью характеристик лезвийного инструмента, вариабельностью характеристик обрабатываемых заготовок и спецификой конкретного машиностроительного производства. Вариабельность периода стойкости вносит существенный вклад в неопределенность условий обработки. Технологические процессы изготовления машиностроительной продукции, проектируемые при наличии неопределенности условий обработки, содержат ошибки, приводящие к увеличению издержек производства, а, следовательно, к увеличению цены и снижению конкурентоспособности продукции вследствие:

- снижения коэффициента использования металлорежущих станков и нарушения ритмичности производственного процесса изготовления продукции из-за увеличения вспомогательного времени, требуемого на восстановление лезвийного инструмента;
- снижения эффективности использования ресурса лезвийного инструмента из-за назначения неоптимального порядка его восстановления;
- увеличения основного времени, необходимого на изготовление деталей машин, из-за назначения неоптимальных режимов резания;
- повышения уровня брака, связанного с отказом лезвийного инструмента во время обработки, из-за совместного влияния вариабельности параметров лезвийного инструмента и обрабатываемых заготовок;
- повышения себестоимости продукции из-за включения в нее затрат на брак, связанный с отказом лезвийного инструмента во время обработки;
- обработки деталей несоответствующим инструментом из-за невозможности сравнительной оценки качества лезвийного инструмента разных производителей при формировании технологических систем операций.

Таким образом, можно утверждать, что отсутствие научного обоснования методов и средств снижения неопределенности условий обработки заготовок лезвийным инструментом, связанной с вариабельностью периода стойкости лезвийного инструмента, обусловленной вариабельностью характеристик инструмента и обрабатываемых заготовок и спецификой конкретного машиностроительного производства, является актуальной научной проблемой, имеющей важное хозяйственное значение и требующей системного научно-обоснованного решения.

Степень разработанности темы. Исследованиями процессов механической обработки в целях определения условий обработки лезвийным инструментом, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, надежности, качества и экономичности обработки, занимались Албагачиев А.Ю., Артамонов Е.В., Безъязычный В.Ф., Бобров В.Ф.,

Бржозовский Б.М., Васин Л.А., Васин С.А., Гречишников В.А., Грубый С.В., Древаль А.Е., Иванов В.В., Ивахненко А.Г., Иноземцев А.Н., Кацев П.Г., Киричек А.В., Козлов А.М., Кузин В.В., Куц В.В., Лоладзе Т.Н., Макаров А.Д., Мартинов Г.М., Музыкант Я.А., Пасько Н.И., Петрухин С.С., Петухов Ю.Е., Плотников А.Л., Проников А.С., Протасьев В.Б., Суслов А.Г., Тарапанов А.С., Темчин Г.И., Хае Г.Л., Хандожко А.В., Харламов Г.А., Хлудов С.Я., Шадский Г.В., Altintas Y., Stephenson D.A., Teti R. и др. ученые.

В работах Башкова В.М., Высоковского Е.С., Грановского Г.И., Гришина С.А., Ивченко Т.Г., Кацева П.Г., Копкова С.Д., Краплина М.А., Макарова А.Д., Пасько Н.И., Темчина Г.И., Хаета Г.Л., Чернышева Н.М., Эстерзона М.А., Letot C., Salonitis K., Vagnorius Z. и др. исследователей период стойкости лезвийного инструмента рассматривался как случайная величина в процессе механической обработки. Однако, несмотря на многочисленные исследования в области лезвийной обработки, проблема снижения неопределенности условий обработки, связанной с вариабельностью периода стойкости лезвийного инструмента, при эксплуатации инструмента не нашла окончательного решения.

Цель работы: снижение затрат на механическую обработку деталей машин и повышение ее производительности на основе обеспечения эффективной эксплуатации лезвийного инструмента путем назначения оптимального порядка восстановления инструмента и оптимальных режимов резания с учетом вариабельности периода стойкости.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи:**

1. Разработка обобщенной стохастической модели отказов лезвийного инструмента, учитывающей как постепенный, так и внезапный отказы инструмента, а также вариабельность характеристик инструмента и обрабатываемых заготовок.

2. Разработка на основе обобщенной стохастической модели отказов стойкостных зависимостей одно- и многолезвийного инструмента и методики оценки их параметров, включая вариабельность периода стойкости инструмента.

3. Разработка методики назначения оптимального порядка восстановления лезвийного инструмента с учетом вариабельности его периода стойкости.

4. Разработка методики назначения оптимальных режимов резания с учетом вариабельности периода стойкости лезвийного инструмента.

5. Разработка методики сравнительной оценки качества лезвийного инструмента разных производителей.

6. Разработка программно-методического комплекса информационной поддержки эффективной эксплуатации лезвийного инструмента.

7. Практическая реализация, опытно-промышленная апробация и внедрение результатов работы.

Объект исследования – процесс эксплуатации лезвийного инструмента.

Предмет исследования – период стойкости лезвийного инструмента.

Соответствие паспорту специальности – содержание диссертации соответствует п. 1 «Теория и практика проектирования, монтажа и эксплуатации станков, станочных систем, в том числе автоматизированных цехов и заводов,

автоматических линий, а также их компонентов (приспособлений, гидравлических узлов и т.д.), оптимизация компоновки, состава комплектующего оборудования и его параметров, включая использование современных методов информационных технологий» Паспорта научной специальности 05.02.07 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» (технические науки).

Научная новизна результатов исследования заключается в раскрытии взаимосвязей между вариабельностью периода стойкости лезвийного инструмента и вариабельностью характеристик инструмента и обрабатываемых заготовок и обосновании предложенной обобщенной стохастической модели отказов одно- и многолезвийного инструмента, учитывающей стохастический характер процесса резания и постепенный и внезапный отказы инструмента.

Теоретическая значимость работы состоит в создании методологии обеспечения эффективной эксплуатации лезвийного инструмента в технологических системах операций при механической обработке заготовок путем назначения оптимального порядка восстановления инструмента и оптимальных режимов резания с учетом вариабельности периода стойкости инструмента.

Практическая значимость работы заключается в создании программно-методического комплекса информационной поддержки эффективной эксплуатации лезвийного инструмента, позволяющего с учетом вариабельности периода стойкости инструмента назначать оптимальный порядок восстановления лезвийного инструмента и оптимальные режимы резания, формировать комплект инструментов технологической системы операции и рассчитывать нормы расхода инструментов, а также производить сравнительную оценку качества лезвийного инструмента разных производителей.

Реализация работы. Результаты диссертационного исследования нашли применение в АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева», г. Тула; АО «Щегловский вал», г. Тула; ООО «ИТМ Групп К», г. Москва; АО «Дальэнергомаш», г. Хабаровск; ООО «Производственно-инжиниринговая компания «АГНИ», г. Санкт-Петербург; ЗАО «ХИМПРИБОР-1», г. Тула; ООО ПП «Мехмаш», г. Тула; АО «Ферроприбор», г. Санкт-Петербург; ООО НПО «СТАНКОИНСТРУМЕНТ», г. Москва.

Основные теоретические и практические результаты работы также используются при подготовке бакалавров и магистров направлений «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Методология и методы диссертационного исследования. При выполнении теоретических исследований использовались положения теории вероятностей, технологии машиностроения, теории резания, теории автоматического управления и искусственного интеллекта, а также обобщение опыта конструкторско-технологической подготовки и производства деталей машин на ряде машиностроительных предприятий.

Экспериментальные исследования базировались на методах математиче-

ской статистики, теории планирования экспериментов, методах робастного проектирования и методах обработки экспериментальных данных. Экспериментальные исследования проводились на токарных станках Top-Turn CNC-S16C и модернизированном CTM-100 с системой ЧПУ Fanuc 0i TD и фрезерных станках Topper TMV720AD и Fanuc Robodrill α -T21iFe, а также Heidenhain TNC 620 Programming station. Контроль износа лезвийного инструмента производился на координатно-измерительной машине портального типа Werth ScopeCheck MBZ1200 и измерительной видеосистеме Starrett MV300. Шероховатость поверхностей обработанных деталей измерялась с помощью мобильного профилометра Hommel Tester T500. Мониторинг динамических процессов при резании осуществлялся с помощью акселерометров ZETLab BC110, анализатора спектра Zet017-U4 фирмы ZETLab, а также разработанной автором диссертации экспериментальной установки для токарных станков.

Положения, выносимые на защиту:

- обобщенная стохастическая модель отказов лезвийного инструмента, учитывающая как постепенные, из-за износа лезвия, так и внезапные, из-за разрушения лезвия, отказы лезвийного инструмента, а также вариабельность характеристик инструмента и обрабатываемых заготовок;
- стойкостные зависимости одно- и многолезвийного инструмента, позволяющие определить период стойкости инструмента и вариабельность периода стойкости, а также методика оценки параметров стойкостных зависимостей во время обработки заготовок на металлорежущих станках или в ходе стойкостных испытаний;
- методика назначения оптимального порядка восстановления лезвийного инструмента с учетом вариабельности его периода стойкости, позволяющая повысить эффективность обработки резанием путем снижения вспомогательного времени, требуемого на восстановление инструмента, снижения затрат на инструментальное обеспечение на основе рационального использования ресурса инструмента, а также снижения уровня брака, связанного с отказом инструмента во время обработки;
- методика назначения оптимальных режимов резания с учетом вариабельности периода стойкости лезвийного инструмента, предусматривающая обработку заготовок на металлорежущих станках с максимально возможными подачей и глубиной резания и скоростью резания, находящейся в зоне высокой эффективности режима резания, ограниченной экономической скоростью резания и скоростью резания, обеспечивающей максимальную производительность;
- методика сравнительной оценки качества лезвийного инструмента разных производителей, позволяющая осуществлять выбор поставщика лезвийного инструмента на основе оценки вариабельности периода стойкости инструмента.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов обусловлена использованием фундаментальных теоретических положений, соответствием разработанных математических моделей реальным процессам, использованием объективных исходных данных о надежности лезвий-

ного инструмента, полученных в производственных условиях и в ходе стойкостных испытаний, положительными результатами практического использования.

Апробация результатов. По теме диссертации автором опубликованы 44 научные работы (13 единолично, остальные – в соавторстве), в том числе 20 статей в периодических изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 6 статей в изданиях, индексируемых в информационно-аналитических системах научного цитирования Web of Science и Scopus, 2 монографии и 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Основные положения работы докладывались на Международных научно-технических конференциях «Автоматизация: Проблемы, Идеи, Решения» (г. Тула, 2011, 2016, 2017 гг.), «Фундаментальные проблемы техники и технологии» (г. Орел, 2012 г.), «Машиностроение – основа технологического развития России» (г. Курск, 2013 г.), «Системы автоматизированного проектирования на транспорте» (г. Санкт-Петербург, 2014 г.), «Современные инновации в науке и технике» (г. Курск, 2014 г.), «Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование» (г. Курск, 2015 г.), «Современные проблемы формообразования сложных поверхностей деталей и сборки машин» (г. Тула, 2016 г.), «Проблемы и перспективы развития машиностроения» (г. Липецк, 2016 г.), «Современные проблемы машиностроения» (г. Томск, 2016, 2017 гг.), «Современные проблемы обработки материалов резанием, проектирования и технологии изготовления сложного режущего инструмента» (г. Тула, 2017 г.), «Инновации в машиностроении» (г. Новосибирск, 2017 г.), «Управление качеством продукции в машиностроении и авиакосмической технике (ТМ-18)» (г. Воронеж, 2018 г.), «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, 2018 г.), «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем» (г. Севастополь, 2018, 2019 гг.), «Пром-Инжиниринг-2019» (г. Сочи, 2019 г.), «Mechanical Science and Technology Update» («Проблемы машиноведения») (г. Омск, 2019 г.), «Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем» (г. Курск, 2019 г.), «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (ICMTMTE 2019) (г. Севастополь, 2019 г.); на Международном форуме «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); на Всероссийских и национальных научно-практических конференциях «Инновационные наукоемкие технологии: теория, эксперимент и практические результаты» (г. Тула, 2011 г.), «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2018 г.), «Национальная научно-техническая конференция Союза машиностроителей России» (г. Ульяновск, г. Москва, 2018 г.), «Автоматизация: Проблемы, Идеи, Решения» (г. Тула, 2018 г.), «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (г. Тула, 2019 г.); на научном семинаре «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений» (г. Брянск, 2019 г.); на научном симпозиуме технологов-машиностроителей «Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий» (п. Дивноморское, 2019 г.); на заседании кафедры тех-

нологии машиностроения ФГБОУ ВО «ВГТУ» (г. Воронеж, 2019 г.), на заседании кафедры инструментальной техники и технологии формообразования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (г. Москва, 2020 г.), на заседании кафедры МТ2 «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2020 г.), а также на научной конференции профессорско-преподавательского состава ТулГУ (г. Тула, 2011-2020 гг.).

Личный вклад соискателя заключается в формулировании цели и задач исследования, непосредственном участии в проведении теоретических исследований, разработке обобщенной стохастической модели отказов лезвийного инструмента, разработке стойкостных зависимостей одно- и многолезвийного инструмента на основе обобщенной модели отказов, разработке методик оценки параметров стойкостных зависимостей, назначения оптимальных порядка восстановления лезвийного инструмента и режимов резания при обработке заготовок на металлорежущих станках, интерпретации результатов, апробации разработанных математических моделей в производственных условиях и в ходе стойкостных испытаний с использованием лезвийных инструментов различных производителей.

Диссертационная работа выполнена в рамках грантов Российского фонда фундаментальных исследований № 15-48-03265 «Исследование фундаментальных закономерностей и разработка математической модели износа режущего инструмента с учетом стохастического характера процесса износа и разброса параметров инструмента» (исполнитель) и № 18-38-00849 «Исследование влияния износа режущего инструмента на вибрацию системы "станок - приспособление - инструмент - заготовка"» (руководитель), научного проекта ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» № 8705 «Система адаптивного управления процессом резания на станках с ЧПУ на основе применения систем искусственного интеллекта» (руководитель) и научно-исследовательской работы ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» НИР_2019_19 «Управление эксплуатацией лезвийного инструмента при неопределенности условий обработки» (руководитель).

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения, списка литературы и приложений. Содержит 236 страниц машинописного текста, 41 таблицу, 107 рисунков, список литературы из 304 наименований и приложения на 21 странице. Общий объём диссертации 370 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены актуальность избранной темы, степень ее разработанности, цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первом разделе проведен анализ методов эффективной эксплуатации лезвийного инструмента. Рассмотрены основные подходы к повышению производительности и надежности обработки резанием, влияние фактора случайности на период стойкости лезвийного инструмента, методы и модели назначения порядка восстановления лезвийного инструмента, критерии оптимальности порядка восстановления лезвийного инструмента и режимов резания.

Лезвийный инструмент в технологической системе операции среди других ее элементов, от которых зависит производительность, экономичность и надежность обработки, имеет минимальную наработку между отказами, определяемую периодом стойкости. К факторам, определяющим указанные важнейшие показатели резания, относятся инструментальный материал, размеры и геометрия лезвийного инструмента, жесткость инструмента, технология изготовления инструмента, условия обработки и др. К условиям обработки в соответствии с ГОСТ 25751 относят, в том числе, обрабатываемый материал, режим резания, порядок восстановления инструмента. Поэтому задачу повышения производительности, экономичности и надежности обработки резанием в данной работе предлагается решать как задачу комплексного применения методик назначения оптимального порядка восстановления лезвийного инструмента, назначения оптимальных режимов резания, выбора поставщика лезвийного инструмента, формирования комплекта инструментов технологической системы и расчета норм расхода инструмента. При этом состав и последовательность применения указанных методик зависят от текущей производственной ситуации и специфики машиностроительного производства.

Процесс резания имеет стохастический характер, что обуславливает вариабельность периода стойкости лезвийного инструмента (наработки инструмента с момента установки до отказа) T , на основе значений которого оптимизируются режимы резания и периодичность восстановления лезвийного инструмента. Поэтому для обеспечения эффективной эксплуатации лезвийного инструмента требуются стохастическая модель отказов лезвийного инструмента и сформированная на ее основе стойкостная зависимость, учитывающие, что стойкость лезвийного инструмента является случайным фактором в процессе резания. Повышение точности прогнозирования периода стойкости лезвийного инструмента на основе стойкостной зависимости, учитывающей стохастический характер процесса резания, позволит повысить эффективность обработки резанием путем назначения повышенных режимов резания так как, по данным фирмы Sandvik Coromant, повышение режимов резания всего на 20 % значительно снижает затраты на деталь и уменьшает её себестоимость на 15 %. При этом необходимо определение зоны высокой эффективности режима резания, ограниченной экономической скоростью резания и скоростью резания, обеспечивающей максимальную производительность.

Рассмотрены преимущества и недостатки известных стойкостных зависимостей, имеющих степенной вид. Показано, что в существующих нормативах режимов резания не учитывается, что период стойкости лезвийного инструмента в общем случае является случайной величиной, зависящей от параметров режимов резания, характеристик обрабатываемых заготовок, геометрии и материала режущей части инструмента и других факторов, т. е. $T = T(v, S, h, HB, \dots)$, где v – скорость резания, S – подача, h – глубина резания, HB – твердость обрабатываемой заготовки.

Показано, что существующие в настоящее время модели отказов лезвийного инструмента учитывают только один из двух видов отказа – внезапный или

постепенный. Поэтому для оценки variability периода стойкости лезвийного инструмента необходимо разработать математическую модель, описывающую механизм изнашивания и учитывающую оба вида отказов лезвийного инструмента. Рассмотрены методы контроля состояния лезвийного инструмента, с помощью которых предложено собирать статистические данные об его изнашивании в процессе резания, необходимые для оценки параметров стойкостной зависимости в производственных условиях.

Показано, что назначение оптимального порядка восстановления лезвийного инструмента и оптимального режима резания при обработке заготовок следует производить по критерию удельных затрат в стоимостном или временном выражении на единицу наработки лезвийного инструмента.

На основании вышеизложенного определена цель работы и сформулированы задачи исследования.

Второй раздел посвящен разработке обобщенной стохастической модели отказов лезвийного инструмента.

Для учета постепенного, из-за износа лезвия, и внезапного, из-за разрушения лезвия, видов отказа лезвийного инструмента, variability параметров инструмента, variability параметров обрабатываемых заготовок и неопределенности условий и специфики производства деталей машин разработана стохастическая модель отказа лезвийного инструмента, обобщающая простые стохастические модели износа и разрушения лезвийного инструмента – веерную, накопления, комплексную и разрушения.

В случае постепенного отказа лезвийного инструмента, когда существенно влияние variability параметров инструмента и variability параметров обрабатываемых заготовок, принято, что:

- износ в среднем растет пропорционально наработке как сумма приращений износа при обработке каждой заготовки;
- приращения износа случайны из-за variability твердости материала, припуска на обработку и других факторов, изменяющихся со сменой заготовки;
- средняя интенсивность изнашивания скачкообразно изменяется при замене лезвийного инструмента из-за variability режущих свойств лезвийных инструмента даже одной партии.

Поэтому износ лезвийного инструмента y после наработки t будет иметь асимптотически нормальное распределение с плотностью

$$\varphi_Y(y) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\Delta Y}^2}} \exp\left[-\frac{(y-at)^2}{2\sigma_{\Delta Y}^2}\right], \quad (1)$$

где a – средняя интенсивность изнашивания лезвийного инструмента (лезвия); $\sigma_{\Delta Y}$ – среднеквадратическое отклонение приращения износа на единицу наработки.

Если L – предельно допустимое значение износа лезвийного инструмента (лезвия), то вероятность безотказной работы в течение наработки t лезвийного инструмента со средней интенсивностью изнашивания a (функция надежности) $P_a(t)$ равна вероятности того, что $Y(t) < L$, т. е.

$$P_a(t) = \int_0^L \varphi_Y(y) dy.$$

Тогда с учетом выражения (1)

$$P_a(t) \approx \int_0^L \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\Delta Y}^2 t}} \exp\left[-\frac{(y-at)^2}{2\sigma_{\Delta Y}^2 t}\right] dy = \Phi^*\left(\frac{L-at}{\sigma_{\Delta Y}\sqrt{t}}\right) - \Phi^*\left(\frac{-at}{\sigma_{\Delta Y}\sqrt{t}}\right).$$

Так как с ростом t $\Phi^*\left(\frac{-at}{\sigma_{\Delta Y}\sqrt{t}}\right)$ стремится к нулю, то при $t > 10$

$$P_a(t) = \Phi^*\left(\frac{L-at}{\sigma_{\Delta Y}\sqrt{t}}\right).$$

Из-за вариабельности параметров лезвийных инструментов средняя интенсивность изнашивания a при смене лезвийного инструмента изменяется в соответствии с плотностью распределения $\xi(a)$, и плотность распределения износа лезвийного инструмента определяется как смесь плотности $\varphi_Y(y)$ по средней интенсивности изнашивания a с плотностью $\xi(a)$, т. е.

$$\varphi_{Ya}(y) = \int_0^{\infty} \xi(a) \varphi_Y(y) da = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\Delta Y}^2 t}} \int_0^{\infty} \xi(a) \exp\left[-\frac{(y-at)^2}{2\sigma_{\Delta Y}^2 t}\right] da.$$

Исходя из степенного вида стойкостной зависимости среднюю интенсивность изнашивания a предложено описывать логарифмически нормальным распределением с плотностью

$$\xi(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_a a} \exp\left[-\frac{(\ln a - \ln \hat{a})^2}{2\delta_a^2}\right],$$

где δ_a и \hat{a} параметры распределения, \hat{a} – среднегеометрическое значение средних интенсивностей изнашивания по лезвийным инструментам, δ_a – среднеквадратическое отклонение логарифма отмеченных интенсивностей изнашивания.

С учетом смеси плотности $\varphi_Y(y)$ по средней интенсивности изнашивания a функция надежности, т. е. вероятность того, что $Y(t) < L$, при постепенном отказе

$$P_H(t) = \int_0^L \varphi_{Ya}(y) dy \approx \int_0^{\infty} \xi(a) P_a(t) da = \int_0^{\infty} \xi(a) \Phi^*\left(\frac{L-at}{\sigma_{\Delta Y}\sqrt{t}}\right) da.$$

В случае внезапного отказа лезвийного инструмента при определении закона распределения периода стойкости использована следующая модель – изначально в теле режущего клина имеются микродефекты, которые в процессе резания из-за колебаний силы резания постепенно развиваются в трещины с последующим разрушением режущего клина. Пусть T_1, T_2, \dots, T_N время развития i -го микродефекта до критического размера, приводящего к разрушению режущего клина. Этих микродефектов много и фактическое разрушение клина наступит при $T = \min(T_1, T_2, \dots, T_N)$. В такой модели для T предельным является распределение Вейбулла и в этом случае функция надежности

$$P_p(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{r}\right)^\beta\right],$$

где r и β – параметры распределения.

В обобщенной стохастической модели отказов лезвийного инструмента, учитывающей как постепенный, так и внезапный отказы инструмента, принято, что вероятность безотказной работы в течение наработки t (функция надежности), то есть вероятность того, что $T \geq t$, $P(t) = P_{и}(t) \cdot P_p(t)$. Поэтому обобщенная функция надежности в соответствии с предложенной обобщенной стохастической моделью отказов лезвийного инструмента является композицией указанных трех распределений и в случае однолезвийного инструмента определяется как

$$P(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{r}\right)^\beta\right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_a} \int_0^\infty \frac{1}{a} \exp\left[-\frac{(\ln a - \ln \hat{a})^2}{2\delta_a^2}\right] \cdot \Phi^*\left(\frac{L - at}{\sigma_{\Delta Y} \sqrt{t}}\right) da, \quad (2)$$

а в случае многолезвийного инструмента с n лезвиями

$$P_M(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{r/n^{1/\beta}}\right)^\beta\right] \cdot \int_0^\infty n[F_a(a)]^{n-1} \times \\ \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_a a} \exp\left[-\frac{(\ln a - \ln \hat{a})^2}{2\delta_a^2}\right] \cdot \int_0^L \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta Y} t} \exp\left[-\frac{(y - at)^2}{2\sigma_{\Delta Y}^2 t}\right] dy da, \quad (3)$$

где y – износ лезвийного инструмента, $\Phi^*(x)$ – функция распределения нормированной нормальной случайной величины, $F_a(a)$ – функция распределения средней интенсивности изнашивания однолезвийного инструмента.

Данная обобщенная функция надежности лезвийного инструмента имеет пять параметров: \hat{a} – среднегеометрическое значение средних интенсивностей изнашивания по лезвийным инструментам; δ_a – среднеквадратическое отклонение логарифма среднегеометрического значения средних интенсивностей изнашивания по лезвийным инструментам, связанное с вариабельностью режущих свойств инструментов одной партии; $\sigma_{\Delta Y}$ – среднеквадратическое отклонение приращения износа на единицу наработки, связанное с вариабельностью твердости заготовок, вариабельностью величины припуска на обработку, стохастическим характером самого процесса износа; r – параметр обобщенной функции надежности лезвийного инструмента, связанный с наработкой лезвийного инструмента до разрушения; β – параметр обобщенной функции надежности лезвийного инструмента, связанный с вариабельностью наработки лезвийного инструмента до разрушения.

Разработана методика оценки параметров обобщенных функций надежности одно- и многолезвийного инструмента с использованием предложенного алгоритма по методу случайного поиска.

Количественно вариабельность параметров обрабатываемых заготовок предложено оценивать коэффициентом вариации износа лезвийного инструмента за единицу наработки, вариабельность параметров лезвийного инстру-

мента – коэффициентом вариации интенсивности изнашивания по всем лезвийным инструментам, вариабельность периода стойкости лезвийного инструмента – коэффициентом вариации периода стойкости лезвийного инструмента, являющимся интегральным показателем стохастичности процесса резания. В работе разработаны соответствующие зависимости для расчета значений указанных коэффициентов вариации.

В третьем разделе на основе обобщенной модели отказов определены стойкостные зависимости одно- и многолезвийного инструмента с учетом стохастического характера процесса резания и зависимости их параметров от параметров режима резания.

Стойкостные зависимости одно- и многолезвийного инструмента на основе обобщенной модели отказов формировались исходя из того, что, так как период стойкости лезвийного инструмента T является случайной величиной, то стойкостная зависимость считается заданной, если известен закон распределения периода стойкости и определены зависимости параметров данного закона распределения от параметров режима резания. При этом средний период стойкости

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{t}{r}\right)^{\beta}\right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_a} \int_0^{\infty} \frac{1}{a} \exp\left[-\frac{(\ln a - \ln \hat{a})^2}{2\delta_a^2}\right] \cdot \Phi^*\left(\frac{L-at}{\sigma_{\Delta Y}\sqrt{t}}\right) da dt$$

для однолезвийного инструмента, и

$$\begin{aligned} \bar{T}_M = & \int_0^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{t}{r/n^{1/\beta}}\right)^{\beta}\right] \int_0^{\infty} n[F_a(a)]^{n-1} \times \\ & \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_a a} \exp\left[-\frac{(\ln a - \ln \hat{a})^2}{2\delta_a^2}\right] \cdot \int_0^L \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta Y}^2 t} \exp\left[-\frac{(y-at)^2}{2\sigma_{\Delta Y}^2 t}\right] dy da dt \end{aligned}$$

для многолезвийного инструмента.

В работе установлены зависимости параметров \hat{a} , $\sigma_{\Delta Y}$, δ_a , r и β данных стойкостных зависимостей от параметров режима резания, в которых для учета нелинейного характера зависимости указанных параметров от параметров режимов резания и учета корреляции между параметрами режима резания v и S , S и h используются соответствующие полиномы, например,

$$\begin{aligned} \hat{a}(v, S, h, HB) = & \exp[c_0 + c_1 \ln v + c_2 \ln^2 v + c_3 \ln^3 v + c_4 \ln S + c_5 \ln h + \\ & + c_6 \ln v \cdot \ln S + c_7 \ln S \cdot \ln h + c_8 \ln(HB/200)]; \\ r(v, S, h) = & \exp[b_0 + b_1 \cdot \ln v + b_2 \cdot \ln^2 v + b_3 \cdot \ln^3 v + \\ & + b_4 \cdot \ln S + b_5 \cdot \ln^2 S + b_6 \cdot \ln h + b_7 \cdot \ln v \ln S], \end{aligned}$$

где c_0, \dots, c_8 и b_0, \dots, b_7 – коэффициенты, оцениваемые по статистическим данным.

Показано, что степень полиномов зависит от требуемого диапазона действия стойкостной зависимости и имеющейся статистической информации. Причем с практически достаточной точностью максимальная степень полинома для

скорости резания равна 3, для подачи – 2, для глубины резания, твердости обрабатываемого материала и членов, учитывающих корреляцию между параметрами режима резания – 1. Такое представление стойкостной зависимости позволяет легко учесть и возможные другие корреляции при наличии достаточного объема статистических данных.

Представлена разработанная методика оценки параметров стойкостных зависимостей \hat{a} , $\sigma_{\Delta Y}$, δ_a , r и β по статистическим данным типа:

$$[v_i, S_i, h_i \cdot HB_i, (t_{ij}, Y_{ij}(t_{ij})), j = 1, \dots, M_i), t_{\Pi i}, T'_i, i = 1, \dots, N],$$

которые могут быть либо собраны в производственных условиях на основе проведения специально организованных наблюдений с использованием разработанной в диссертации экспериментальной установки и диагностических возможностей современных станков с ЧПУ либо получены в результате специальных стойкостных испытаний.

Здесь предполагается, что каждый из N лезвийных инструментов наблюдается или испытывается при своей комбинации режима резания v_i , S_i , h_i , HB_i . Но для каждого лезвийного инструмента M_i раз ($M_i > 1$) контролируется износ $Y_{ij}(t_{ij})$ после наработки t_{ij} . $t_{\Pi i}$ – назначенная периодичность восстановления i -го лезвийного инструмента, а T'_i – фактическая наработка этого лезвийного инструмента. $T'_i = T_i$, если внезапный отказ произошел раньше $t_{\Pi i}$, и $T'_i = t_{\Pi i}$ если испытание этого лезвийного инструмента завершается по достижению наработки $t_{\Pi i}$ до наступления внезапного отказа.

Стойкостные зависимости одно- и многолезвийного инструмента были проверены с помощью компьютерного моделирования. Например, стойкостная зависимость многолезвийного инструмента для случая, когда отказ любого лезвия приводит к отказу всего многолезвийного инструмента, что характерно для чистовой или получистовой обработки, а также для черновой обработки многолезвийным инструментом с числом лезвий меньше пяти, проверялась для числа лезвий многолезвийного инструмента от 1 до 10 при четырех значениях коэффициента вариации периода стойкости одного лезвия K_T , равного 0,1; 0,3; 0,6 и 1,0. На рисунках 1 и 2 представлены зависимости периода стойкости многолезвийного инструмента \bar{T}_M и коэффициента вариации K_{T_M} от числа лезвий n при одной и той же подаче на зуб.

Как видно из рисунка 1, при одной и той же подаче на зуб по мере увеличения числа лезвий вероятность отказа произвольного лезвия увеличивается, соответственно период стойкости многолезвийного инструмента снижается, так как увеличивается вероятность отказа хотя бы одного лезвия из-за варибельности свойств лезвий многолезвийного инструмента. Коэффициент вариации периода стойкости (рисунок 2) с ростом числа лезвий снижается из-за снижения среднего периода стойкости. Однако зависимость коэффициента вариации K_{T_M} от числа лезвий имеет большее разнообразие вследствие того, что в зависимости от параметров модели преобладающее влияние на отказ многолезвийного инструмента оказывает либо постепенный износ, либо разрушение режущей кромки.

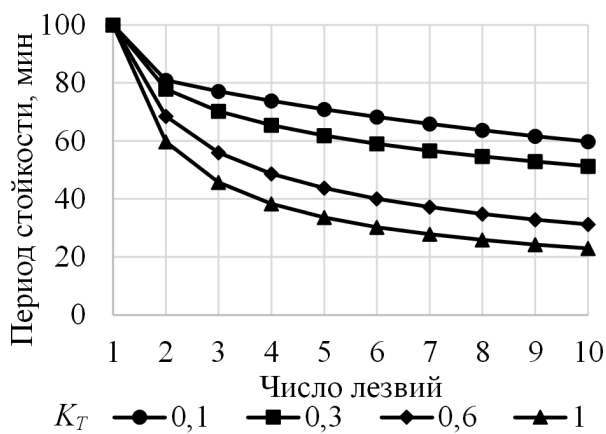


Рисунок 1 – Зависимость периода стойкости многолезвийного инструмента \bar{T}_M от числа лезвий

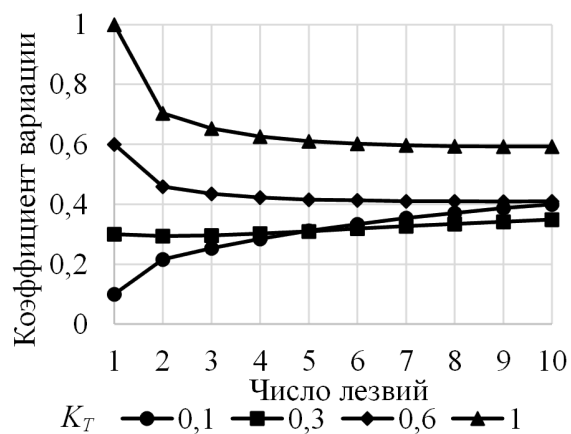


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента вариации K_{T_M} от числа лезвий

Аналогичное моделирование проведено для случая, когда отказ многолезвийного инструмента наступает после отказа i -го лезвия, что возможно при черновой обработке многолезвийным инструментом с числом лезвий n , большим пяти.

Результаты моделирования периода стойкости многолезвийного инструмента в зависимости от числа отказавших лезвий, соответствующего отказу инструмента, для инструментов с числом лезвий n приведены на рисунке 3. На рисунке 3 пунктирной линией изображен средний период стойкости одного лезвия инструмента, который для данных условий обработки равен 29,27 мин.

Как видно из рисунка 3, период стойкости многолезвийного инструмента зависит от числа лезвий. При одинаковой подаче на зуб с ростом числа лезвий инструмента увеличивается вероятность отказа лезвий, поэтому средний период стойкости многолезвийного инструмента меньше среднего периода стойкости одного лезвия. В рассматриваемом примере период стойкости всего многолезвийного инструмента до отказа первого лезвия примерно в два раза меньше чем средний период стойкости одного лезвия и становится равен ему после отказа примерно 60 % лезвий инструмента.

Зависимость коэффициента вариации периода стойкости многолезвийного инструмента от числа отказавших лезвий, соответствующего отказу инструмента, приведена на рисунке 4.

Коэффициент вариации периода стойкости практически не зависит от числа лезвий инструмента, поэтому на рисунке 4 приведен график только для инструмента с числом лезвий $n = 12$. С ростом числа отказавших лезвий коэффициент вариации резко снижается, но после 7 отказавших лезвий уже практически не изменяется.

Оценку параметров стойкостной зависимости в производственном процессе машиностроительного предприятия при обработке деталей на металлорежущих станках предложено производить на основе использования диагностических возможностей современных станков с ЧПУ. При этом в качестве основных способов контроля состояния лезвийного инструмента для сбора статистических данных в

производственном процессе машиностроительного предприятия выбраны:

- метод прямого контроля размерного износа лезвийного инструмента с использованием промышленных измерительных систем при чистовой обработке;
- метод контроля износа лезвийного инструмента путем измерения мощности приводных электродвигателей при черновой обработке;
- метод измерения вибрации в процессе резания, позволяющий обеспечивать контроль качества обработанной поверхности при чистовой обработке и прогнозировать разрушение инструмента при черновой обработке.

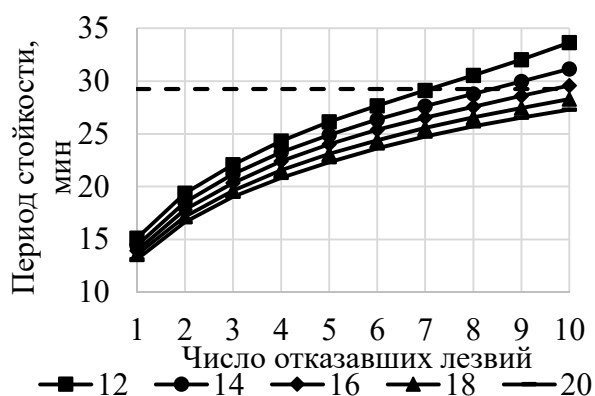


Рисунок 3 – Зависимость периода стойкости многолезвийного инструмента от числа отказавших лезвий, соответствующего отказу инструмента

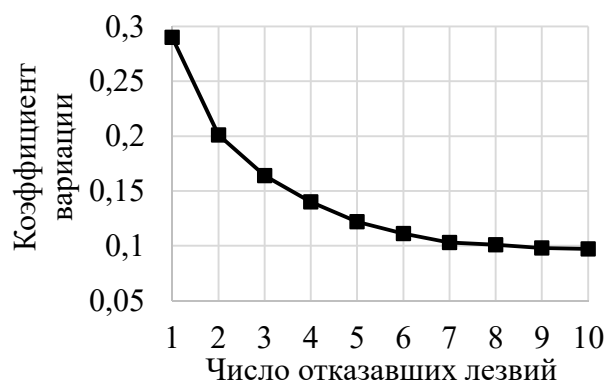


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента вариации периода стойкости многолезвийного инструмента от числа отказавших лезвий, соответствующего отказу инструмента

Для реализации метода прямого контроля износа лезвийного инструмента с использованием промышленных измерительных систем был разработан фрагмент управляющей программы для системы ЧПУ модели TNC 620 фирмы Heidenhain. Данный фрагмент предложено автоматически добавлять в управляющую программу обработки при ее генерации путем модификации постпроцессора САМ-системы. В работе был модернизирован постпроцессор системы SprutCAM и сгенерированная таким образом управляющая программа была верифицирована на системе ЧПУ модели TNC 620.

Проведена оценка метода контроля износа лезвийного инструмента путем измерения мощности приводных электродвигателей при проведении экспериментальных замеров нагрузки на шпиндель в условиях действующего производства серийно изготавливаемых деталей при токарной и фрезерной обработках.

В случае токарной обработки проводилось продольное точение резцом со сменной твердосплавной пластиной CCMT 120408-SM IC907 фирмы ISCAR на токарном обрабатывающем центре Matech MT-52 ступенчатого вала из стали 30ХГСА твердостью 36-40 HRC с Ø160 мм до Ø90h12 мм при режиме резания: скорость резания 160 м/мин, глубина резания 1,5 мм.

В случае фрезерной обработки проводилось чистовое фрезерование сборной торцевой фрезой R220.69-0080-12-7AN Ø80 мм с числом зубьев 7 фирмы SECO и с пластинами XOMX120416TR-ME08, F40M фирмы SECO плоскости

корпусной детали «Рамка» из стали 30ХГСА твердостью 36-40 НRC на вертикально-фрезерном обрабатывающем центре VMC-600 при режиме резания: скорость резания 252 м/мин, минутная подача 300 мм/мин, глубина резания 0,8 мм.

Результаты замера нагрузки на шпиндель в процессе обработки представлены для токарной и фрезерной обработки на рисунках 5, 6 соответственно. Анализ корреляционного отношения между износом по задней поверхности и увеличением мощности резания подтвердил возможность использования контроля мощности приводных электродвигателей для оценки износа лезвийного инструмента.

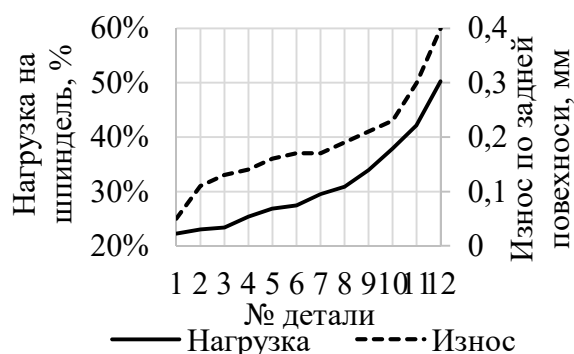


Рисунок 5 – Зависимость нагрузки на шпиндель от числа обработанных деталей по мере износа лезвийного инструмента

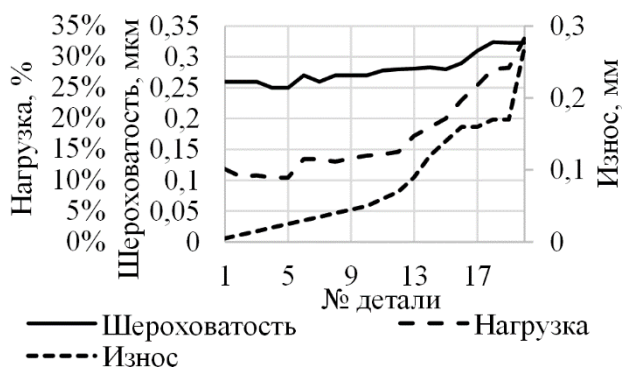


Рисунок 6 – Зависимость нагрузки на шпиндель, шероховатости обработанной поверхности и износа по задней поверхности сменных пластин от числа обработанных деталей

Для реализации метода измерения вибрации в процессе резания разработана экспериментальная установка и исследована возможность ее практического использования на примере токарной обработки. Результаты испытания экспериментальной установки представлены на рисунке 7. Рисунок 7, а) соответствует периоду нормального изнашивания инструмента, рисунок 7, б) – периоду катастрофического изнашивания инструмента. Таким образом показана возможность использования экспериментальной установки для контроля состояния лезвийного инструмента в процессе резания по уровню вибрации.

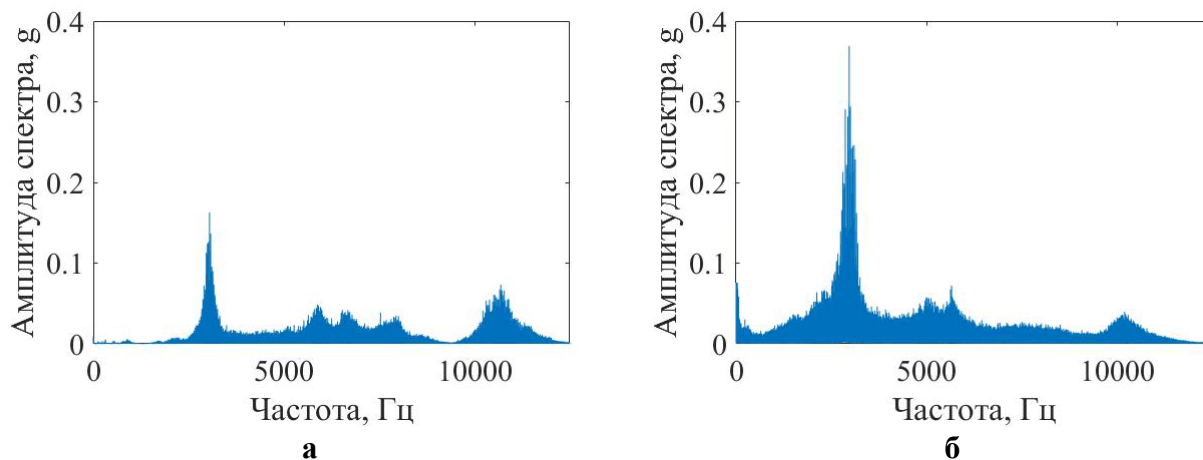


Рисунок 7 – Спектр вибрации для составляющей вибрации a_z при уровнях износа пластины по задней поверхности y_3 : а) 0,31 мм; б) 0,4 мм

С использованием рассмотренных методов контроля износа лезвийного инструмента возможно уточнение параметров предложенной стойкостной зависимости во время эксплуатации лезвийного инструмента на станках с ЧПУ. Для этого разработан алгоритм рекурсивной оценки состояния лезвийного инструмента на основе фильтра Калмана, который позволяет при оценке состояния лезвийного инструмента использовать информацию, полученную с помощью различных способов контроля.

Для контроля variability периода стойкости лезвийного инструмента в процессе его эксплуатации на машиностроительном предприятии использованы контрольные карты с переменными границами, рассмотренные в работах Протасьева В.Б. и Юдина С.В. Контрольные и предупреждающие границы контрольных карт назначаются с использованием разработанной в диссертации стойкостной зависимости.

На основе предложенных вероятностных моделей отказа лезвийного инструмента и расширенной стойкостной зависимости разработаны методики оптимизации режима резания и порядка восстановления лезвийного инструмента.

Четвертый раздел посвящен оптимизации порядка восстановления лезвийного инструмента.

Разработана классификация вариантов порядка восстановления лезвийного инструмента по следующим признакам: А – тип лезвийного инструмента; Б – мера наработки лезвийного инструмента; В – модель отказов лезвийного инструмента; Г – вариант планового восстановления лезвийного инструмента; Д – метод контроля состояния лезвийного инструмента; Е – метод оптимизации порядка восстановления лезвийного инструмента; Ж – критерий оптимальности при оптимизации периодичности восстановления лезвийного инструмента.

Разработана модель оптимизации порядка восстановления лезвийного инструмента, в которой принято, что режимы резания (v , S , h) заданы и в процессе оптимизации меняться не могут. Поэтому оптимизации подлежат следующие параметры порядка восстановления лезвийного инструмента: периодичность восстановления лезвийного инструмента t_{Π} и, при периодическом контроле состояния лезвийного инструмента, критический уровень износа Y_K . В качестве критерия оптимальности используются удельные затраты Θ , метод расчета которых зависит от выбранного порядка восстановления лезвийного инструмента. Если удельные затраты Θ измеряются единицами времени, то оптимальные значения t_{Π} и Y_K соответствуют наибольшей производительности, а если удельные затраты измеряются денежными единицами, то оптимальные значения t_{Π} и Y_K соответствуют минимуму себестоимости.

Рассмотрен случай планового периодического восстановления лезвийного инструмента с жестким графиком периодических восстановлений по достижении плановой наработки t_{Π} . Функция надежности $P(t)$ предполагается известной и ее параметры оценены по имеющимся статистическим данным.

Так как восстановление лезвийного инструмента выполняется периодически после наработки t_{Π} , то не исключено, что некоторое время обработка будет

вестись отказавшим лезвийным инструментом и это может привести к браку. С уменьшением t_{Π} вероятность брака уменьшается, но одновременно снижается коэффициент использования периода стойкости лезвийного инструмента и соответственно растут инструментальные затраты. Т. е. порядок планового восстановления определяется одним параметром t_{Π} , оптимальное значение которого необходимо определить.

В этом случае удельные затраты Θ определяются как отношение суммы затрат, связанных с возможным браком Z_{ζ} , и затрат, связанных с восстановлением лезвийного инструмента Z_B , к полезной наработке \bar{T}_{Π} (средней наработке за один период стойкости за вычетом возможного брака):

$$\Theta(t_{\Pi}) = \frac{Z_{\zeta} + Z_B}{\bar{T}_{\Pi}}.$$

\bar{T}_{Π} и компоненты затрат рассчитываются через функцию надежности (2) или (3) в случаях восстановления одно- или многолезвийного инструмента соответственно. Нарботка t_{Π} , при которой удельные затраты Θ минимальны, является оптимальной.

Рассмотрены примеры назначения оптимального порядка восстановления лезвийного инструмента для веерной модели износа, модели накопления износа, комплексной модели износа, обобщенной модели отказов, непараметрической (функция надежности не известна) оптимизации, периода стойкости, близкого ко времени резания детали для модели разрушения.

Например, для обобщенной модели отказов зависимость удельных затрат $\Theta(t_{\Pi}) = \Theta_{\zeta}(t_{\Pi}) + \Theta_B(t_{\Pi})$ и компонент затрат: удельных затрат на брак $\Theta_{\zeta}(t_{\Pi}) = Z_{\zeta} / \bar{T}_{\Pi}$ и удельных затрат на восстановление лезвийного инструмента $\Theta_B(t_{\Pi}) = Z_B / \bar{T}_{\Pi}$, от назначенной периодичности восстановления лезвийного инструмента t_{Π} показана на рисунке 8.

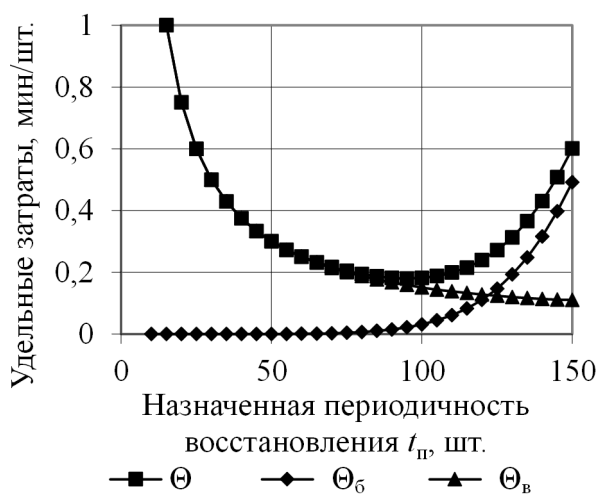


Рисунок 8 – Зависимость удельных затрат $\Theta(t_{\Pi})$ и компонент затрат $\Theta_{\zeta}(t_{\Pi})$ и $\Theta_B(t_{\Pi})$ от назначенной периодичности восстановления

Данная зависимость получена для следующих условий обработки: токарная обработка; в качестве меры наработки используется количество обработанных деталей, шт.; параметры функции надежности (2) $\hat{a} = 1,3$ мкм/шт., $\sigma_{\Delta Y} = 0,8$ мкм/шт., $\delta_a = 0,274$, $r = 152,1$, $\beta = 7,11$; предельно допустимый уровень износа лезвийного инструмента $L = 0,4$ мм; время исправления брака на единицу наработки $C_{\zeta} = 5$ мин; время одного восстановления лезвийного инструмента и подналадки металло-режущего станка $C_B = 15$ мин.

Рассмотрен случай планового восстановления лезвийного инструмента с периодическим контролем с жестким графиком периодических восстановлений.

Если есть возможность периодического контроля состояния лезвийного инструмента, то возникает задача: как часто надо контролировать и при каком состоянии следует восстанавливать лезвийный инструмент. Оптимальность данного порядка восстановления определяется двумя параметрами t_{Π} и Y_K , где t_{Π} – назначенная периодичность восстановления лезвийного инструмента, после достижения которой проводится плановый осмотр лезвийного инструмента, Y_K – критический уровень износа лезвийного инструмента, превышение которого при контрольном осмотре служит основанием для восстановления лезвийного инструмента.

Удельные затраты Θ в данном случае выражаются так:

$$\Theta(t_{\Pi}, Y_K) = \frac{Z_B + \bar{\tau} \cdot C_{\bar{b}} + n_K \cdot C_K}{n_K \cdot t_{\Pi}},$$

где n_K – среднее число периодов t_{Π} до восстановления (среднее число контрольных операций), C_K – стоимость контроля состояния лезвийного инструмента.

Рассмотрены примеры назначения оптимального порядка восстановления лезвийного инструмента для веерной модели износа, модели накопления износа, комплексной модели износа, модели разрушения, обобщенной модели отказов, в которых для принятых исходных данных определены оптимальные периодичность восстановления и критический уровень износа лезвийного инструмента, удельные затраты, доля профилактических восстановлений, полезная наработка на один инструмент, процент брака, процент инструментов с разрушением.

Рассмотрен случай, когда отказ обнаруживается немедленно и работа с отказавшим инструментом невозможна. Отказ инструмента приводит к браку одной обработанной детали. При этом для вариантов с жестким графиком восстановлений (Γ_1), со скользящим графиком восстановлений (Γ_2) и с пропуском ближайшего восстановления в случае отказа (Γ_3) оптимальный порядок планового восстановления определяется одним параметром t_{Π} , а удельные затраты

$$\Theta(t_{\Pi}) = \frac{N_o \cdot C_{\text{испр}} + (N_{\Pi} + N_o) \cdot C_B}{t_{\Sigma}},$$

где N_o – число отказов, равное числу восстановлений режущего инструмента по отказу; N_{Π} – число профилактических восстановлений, равное числу профилактических замен; C_B – стоимость одного восстановления режущего инструмента и подналадки металлорежущего станка; $C_{\text{испр}}$ – стоимость исправления брака одной детали; t_{Σ} – суммарная наработка.

Для вариантов планового восстановления с периодическим контролем лезвийного инструмента с жестким графиком плановых осмотров (Γ_4), со скользящим графиком плановых осмотров (Γ_5) и с пропуском ближайшего планового осмотра в случае отказа (Γ_6) оптимальность порядка восстановления определяется двумя параметрами t_{Π} и Y_K , а удельные затраты

$$\Theta(t_{\Pi}, Y_K) = \frac{N_o \cdot C_{\text{испр}} + (N_{\Pi} + N_o) \cdot C_B + N_{\text{ос}} \cdot C_K}{t_{\Sigma}},$$

где C_K – стоимость контроля состояния лезвийного инструмента; $N_{\text{ос}}$ – число осмотров инструмента.

С помощью разработанного программного обеспечения проведены оптимизация и сравнение данных вариантов порядка восстановления, результаты которого представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Оптимальные показатели вариантов порядка восстановления с контролем состояния инструмента после каждой обработанной детали

Вариант планового восстановления инструмента	Γ_1	Γ_2	Γ_3	Γ_4	Γ_5	Γ_6
Удельные затраты, мин/шт.	0,170	0,1646	0,1649	0,1876	0,1865	0,1864
Периодичность восстановления, мин	34	35	34	32	32	32
Критический уровень износа, мм	–	–	–	0,4	0,4	0,4
Брак, %	3,4	4,7	3,6	2,6	2,6	2,6
Наработка на один лезвийный инструмент, мин	32,5	34,6	33,6	42,8	42,8	42,8
Доля профилактических восстановлений	0,97	0,95	0,96	0,975	0,975	0,975
Коэффициент использования периода стойкости	0,541	0,577	0,560	0,713	0,713	0,713
Наработка до отказа, мин	954	744	933	1676	1678	1677
Число осмотров на один лезвийный инструмент	–	–	–	1,3	1,3	1,3

При прочих равных условиях в данном примере по удельным затратам лучше вариант Γ_2 . По коэффициенту использования периода стойкости лезвийного инструмента предпочтительнее варианты Γ_4 , Γ_5 или Γ_6 , но по удельным затратам они хуже из-за дополнительных затрат на контроль состояния лезвийного инструмента. Но если учесть, что на практике средний период стойкости и коэффициент вариации периода стойкости могут быть известны только приближенно, то варианты с контролем износа менее чувствительны к величине ошибки оценки параметров функции надежности.

В пятом разделе предложена методика назначения оптимальных режимов резания.

Разработана модель оптимизации режимов резания, в которой принято, что подача S и глубина резания h назначаются максимально возможными, исходя из технических и технологических ограничений, а скорость резания v оптимизируется. В качестве критерия оптимальности также используются удельные затраты Θ , то есть затраты, связанные с восстановлением лезвийного инструмента

и возможным браком при работе отказавшим лезвийным инструментом, приходящиеся на одну обработанную деталь.

При плановом периодическом восстановлении лезвийный инструмент восстанавливается после t_{Π} обработанных деталей или заданного времени резания. Удельные затраты Θ в этом случае

$$\Theta(v, S, h, t_{\Pi}) = \frac{Z_0 + Z_{\zeta} + Z_B}{t_{\Pi}},$$

где Z_0 – затраты на обработку партии деталей за период t_{Π} , Z_{ζ} – затраты, связанные с возможным браком за время обработки t_{Π} деталей, Z_B – затраты, связанные с восстановлением лезвийного инструмента.

При плановом восстановлении с периодическим контролем с определенной периодичностью контролируется состояние лезвийного инструмента и его восстановление выполняется по достижению нормативно установленного предельно допустимого уровня износа лезвийного инструмента L . Удельные затраты в этом случае зависят только от режима резания:

$$\Theta(v, S, h) = \frac{Z_0 + Z_{\text{КС}} + Z_B}{\bar{T}_{\Pi}},$$

где \bar{T}_{Π} – полезная наработка, т. е. средняя наработка за один период восстановления лезвийного инструмента, $Z_{\text{КС}}$ – затраты на контроль состояния инструмента за этот период. В этом случае предполагается, что из-за контроля за износом резца брак из-за несвоевременного восстановления лезвийного инструмента отсутствует, компонента затрат $Z_{\zeta} = 0$ и поэтому в данной зависимости отсутствует, а $\bar{T}_{\Pi} = \bar{T} / t_{\text{рез}}$.

При этом полезная наработка \bar{T}_{Π} и компоненты затрат определяются с использованием функций надежности лезвийного инструмента (2), (3). Если исходить только из удельных затрат времени, то оптимальные значения v и t_{Π} дают наибольшую производительность, а если исходить из затрат в рублях, то получаем минимум себестоимости.

Представлены примеры оптимизации режима резания при профилактическом восстановлении лезвийного инструмента для случаев веерной и комплексной моделей износа, а также при периодическом контроле состояния лезвийного инструмента и восстановлении по состоянию для обобщенной модели отказов. Например, в случае обобщенной модели отказов определены зоны рациональных режимов резания для случая, когда отказ обнаруживается немедленно и работа с отказавшим инструментом невозможна, шириной 14 м/мин (рисунок 9, а) и случая, когда отказ обнаруживается при плановом контроле состояния инструмента, шириной 17 м/мин (рисунок 9, б).

При этом установлено, что даже небольшая вариабельность периода стойкости лезвийного инструмента приводит к необходимости снижения режимов резания на 16-19 %, при этом зона рациональных режимов резания сужается почти в два раза. Показано, что назначение режимов резания для случая, когда от-

каз обнаруживается немедленно и работа с отказавшим инструментом невозможна, без учета стохастического характера процесса резания приведет к существенному росту удельных затрат (на 29,1 % при оптимизации по производительности и на 29,3 % при оптимизации по себестоимости), учет же стохастического характера процесса резания позволяет снизить рост удельных затрат (на 9,0 % при оптимизации по производительности и на 7,1 % при оптимизации по себестоимости).

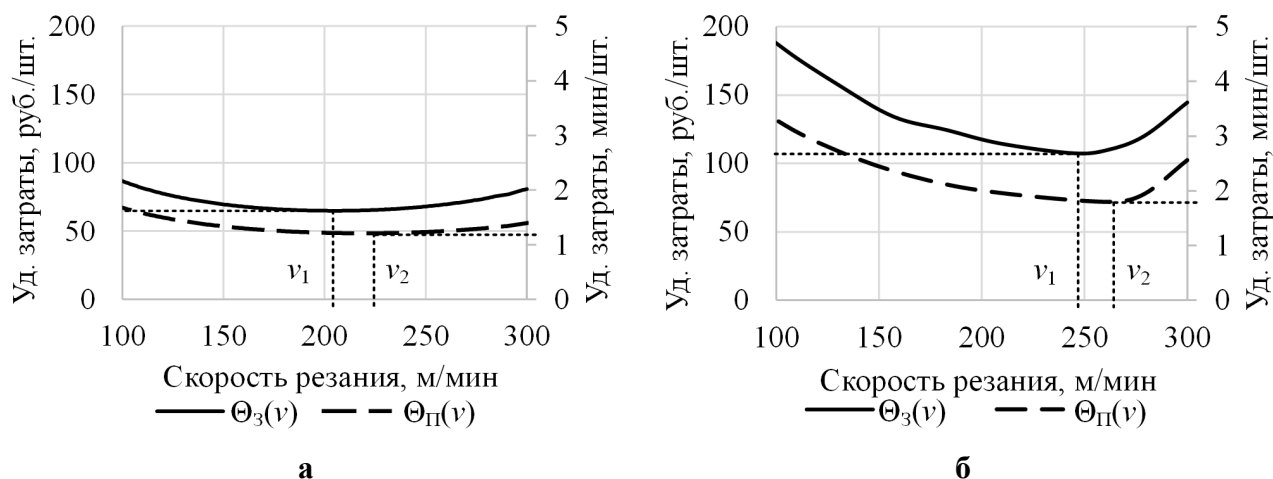


Рисунок 9 – Определение зоны рациональных режимов резания с помощью обобщенной модели отказов при: а – немедленном обнаружении отказа инструмента ($v_1 = 205$ м/мин; $v_2 = 219$ м/мин); б – обнаружении отказа инструмента при плановом контроле ($v_1 = 244$ м/мин; $v_2 = 261$ м/мин); $\Theta_3(v)$ – общие удельные затраты при минимальных затратах, $\Theta_{II}(v)$ – общие удельные затраты при максимальной производительности, v_1 – экономическая скорость резания, v_2 – скорость резания, обеспечивающая максимальную производительность

Постоянный контроль состояния лезвийного инструмента значительно снижает негативный эффект от высокой варибельности периода стойкости лезвийного инструмента. В случае отсутствия постоянного контроля состояния лезвийного инструмента для случая с высокой варибельностью периода стойкости экономическая скорость резания совпадает со скоростью резания, обеспечивающей максимальную производительность. В результате определения рационального режима эксплуатации лезвийного инструмента, включающего оптимальные режимы резания и периодичность восстановления инструмента, для случая, когда отказ обнаруживается при плановом контроле состояния инструмента, с учетом стохастического характера процесса резания удельные затраты удастся снизить на 43,96 % при оптимизации по производительности и на 32,7 % при оптимизации по себестоимости изготовления продукции.

Шестой раздел посвящен информационной поддержке эффективной эксплуатации лезвийного инструмента, реализованной в виде программно-методического комплекса, составляющие подсистемы и модули которого позволяют в режиме статистической адаптации (самообучения) назначать оптимальный порядок восстановления лезвийного инструмента, назначать оптимальные режимы

резания, производить сравнительную оценку качества лезвийного инструмента разных производителей, формировать комплект инструментов технологической системы операции и рассчитывать нормы расхода лезвийного инструмента с учетом вариабельности периода стойкости.

Представлены примеры повышения эффективности эксплуатации лезвийного инструмента при плановом восстановлении с периодическим контролем в режимах параметрической (функция надежности известна с точностью до неизвестных параметров и требуется лишь оценка ее параметров) и непараметрической (функция надежности не известна) оптимизации.

Рисунок 10 иллюстрирует процесс оптимизации периодичности восстановления лезвийного инструмента в режиме статистической адаптации при плановом периодическом восстановлении и назначенных режимах резания. Как видно из рисунка 10, оптимальная периодичность восстановления $t_{\text{опт}}$ первый раз достигла значения, близкого к глобальному оптимуму (70 шт.), после третьей итерации (после третьего восстановления лезвийного инструмента) и в дальнейшем колеблется с уменьшающейся частотой и амплитудой около этого оптимума.



Рисунок 10 – Реализации периодов стойкости лезвийного инструмента, учитываемые в процессе оптимизации, и значения оптимальной периодичности восстановления $t_{\text{опт}}$ в зависимости от номера итерации в процессе статистической адаптации

токарной обработки партии деталей. Иллюстрация сходимости процесса статистической адаптации к оптимуму представлена на рисунке 11. Как видно из рисунка 11 процесс статистической адаптации практически сходится к оптимуму после пятой итерации, то есть шестой лезвийный инструмент уже работает на квазиоптимальных режимах резания при оптимальной периодичности восстановления.

Представлена подсистема сравнительной оценки качества лезвийного инструмента разных производителей по вариабельности периода стойкости вследствие стохастического характера процесса резания потребителями лезвийного инструмента.

Пример назначения оптимальной периодичности восстановления лезвийного инструмента при плановом восстановлении с периодическим контролем показал, что также имеется сходимость к оптимуму, но эта сходимость в случае непараметрической статистической адаптации медленнее сходимости при параметрической. Это объясняется тем, что при параметрической оптимизации используется априорная информация о функции надежности.

Рассмотрен пример совместной оптимизации режимов резания и периодичности восстановления лезвийного инструмента в процессе

Представлена подсистема формирования комплекта лезвийных инструментов технологической системы операции, включающая разработанный генетический алгоритм. При этом разные комплекты лезвийных инструментов сравниваются между собой по критерию минимума удельных затрат.

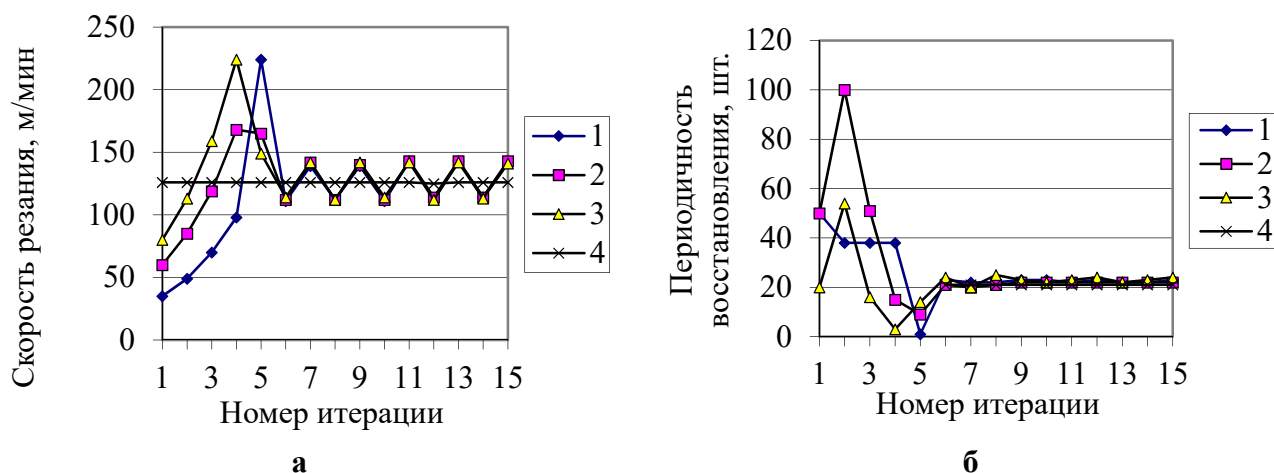


Рисунок 11 – Процесс сходимости: а – скорости резания к оптимальному $v = 126$ мм/мин; б – периодичности восстановления к оптимальному $t_{\text{ОПТ}} = 21$ шт.;
 1 – $v_0 = 35$ м/мин, $t_{\text{П0}} = 50$ шт.; 2 – $v_0 = 60$ м/мин, $t_{\text{П0}} = 50$ шт.;
 3 – $v_0 = 80$ м/мин, $t_{\text{П0}} = 50$ шт.; 4 – оптимальные уровни v и $t_{\text{П}}$

Оценка вариантов комплектов лезвийных инструментов происходит по всем инструментам комплекта для всех деталей, которые предполагается изготавливать на данном металлорежущем станке с учетом плана производства. В качестве критерия оптимальности используется критерий минимума удельных затрат, рассмотренный в разделе 5, с применением стойкостной зависимости на основе обобщенной стохастической модели отказов.

Представлена подсистема управления инструментальными запасами с учетом стохастического характера процесса резания, позволяющая определить расход лезвийного инструмента при выполнении производственной программы и объемы запасов инструмента, необходимые для обеспечения нормального снабжения производственных подразделений предприятия и рабочих мест.

Приведены результаты применения программно-методического комплекса для обеспечения эффективной эксплуатации лезвийного инструмента на примере токарной обработки деталей «Труба» из стали 12ХЗГНМФБА резцом со сменной твердосплавной пластиной Vargus 3IR2.0BUT168/026VTX, «Кольцо» из стали 30ХГСА резцом со сменной твердосплавной пластиной CCMT-09T302 SWUS 7020 фирмы Pramet, «Ось» из стали 30ХГСА резцом со сменной твердосплавной пластиной CCMT120408-SM IC907 фирмы Iscar, «Фланец» из сплава 29НК-ВИ резцом со сменной твердосплавной пластиной CCMT120404-PM5 WSM30 фирмы Walter, «Болт грузовой» из стали 40Х резцом со сменной твердосплавной пластиной CCMT120408-SM IC907 фирмы Iscar и фрезерной обработки детали «Рамка» из стали 30ХГСА сборной фрезой со сменными пластинами ХОМХ120416TR-ME08 F40M фирмы Seco. Эскизы деталей представлены на рисунке 12.

Применение программно-методического комплекса для повышения эффективности эксплуатации лезвийного инструмента при обработке рассмотренных деталей позволило снизить удельные затраты на обработку от 13,6 до 23,38 % на основе снижения трудоемкости изготовления деталей и уровня брака и более эффективного использования ресурса лезвийных инструментов.

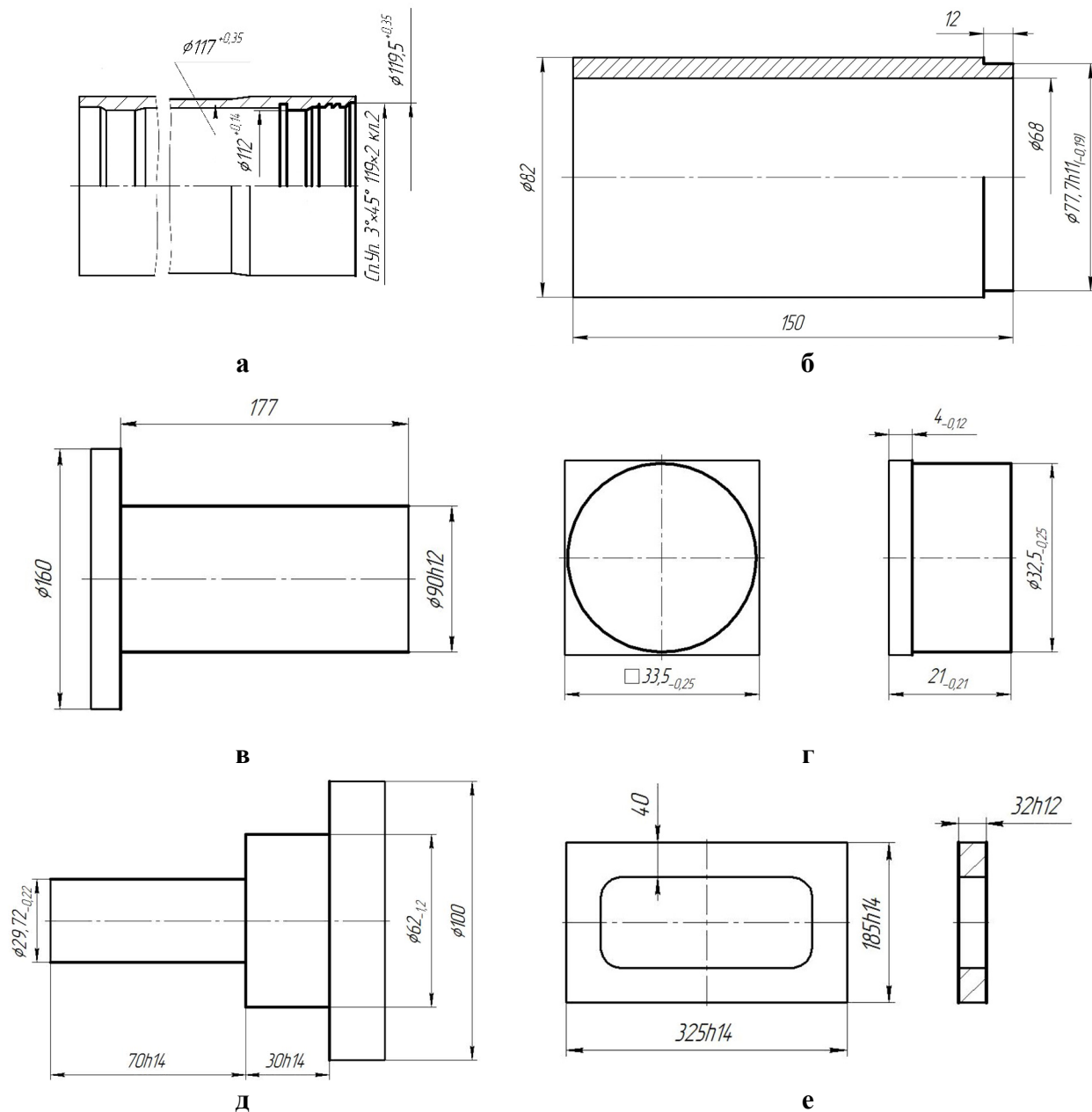


Рисунок 12 – Эскизы деталей

а – «Труба»; б – «Кольцо»; в – «Ось»; г – «Фланец»; д – «Болт грузовой»; е – «Рамка»

В заключении изложены итоги выполненного исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложении представлены исходные статистические данные по износу лезвийного инструмента в процессе работы, форма акта испытаний лезвийного инструмента в производственных условиях и акты внедрения результатов диссертационного исследования на различных машиностроительных предприятиях и в учебном процессе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основе разработанной методологии обеспечения эффективной эксплуатации лезвийного инструмента путем назначения оптимального порядка восстановления инструмента и оптимальных режимов резания решена актуальная научная проблема снижения неопределенности условий обработки заготовок лезвийным инструментом, связанной с вариабельностью периода стойкости лезвийного инструмента, обусловленной вариабельностью характеристик инструмента и обрабатываемых заготовок и спецификой конкретного машиностроительного производства, имеющая важное хозяйственное значение.

Итоги выполненного исследования:

1. Установлено, что для снижения неопределенности условий обработки, связанной с вариабельностью периода стойкости лезвийного инструмента, в обобщенной стохастической модели отказов лезвийного инструмента следует период стойкости лезвийного инструмента описывать как случайную величину с использованием комбинации из трех законов распределения (логарифмически нормального, нормального и Вейбулла), что позволит в одной модели учесть как постепенный отказ из-за вариабельности параметров инструмента и обрабатываемых заготовок, так и внезапный отказ из-за разрушения лезвия, а также взаимосвязь постепенного и внезапного отказов лезвийного инструмента.

2. Установлено, что для учета нелинейного характера зависимости от режимов резания параметров стойкостных зависимостей одно- и многолезвийных инструментов, предложенных в работе на основе обобщенной стохастической модели отказов лезвийного инструмента, а также учета корреляции между параметрами режима резания, следует использовать полиномы, степень которых зависит от требуемого диапазона действия стойкостной зависимости и имеющейся статистической информации. Показано, что с практически достаточной точностью максимальная степень полинома для скорости резания равна 3, для подачи – 2, для глубины резания, твердости обрабатываемого материала и членов, учитывающих корреляцию между параметрами режима резания – 1.

3. Разработана методика оценки параметров стойкостных зависимостей одно- и многолезвийного инструмента на основе обобщенной модели отказов по статистическим данным, собранным в производственных условиях путем проведения специально организованных наблюдений с использованием разработанной экспериментальной установки и диагностических возможностей современных станков с ЧПУ или полученным в результате стойкостных испытаний.

4. Установлено, что при назначении оптимального порядка восстановления лезвийного инструмента в качестве критерия оптимальности следует использовать удельные затраты, представляющие собой отношение суммы затрат, связанных с возможным браком, и затрат, связанных с восстановлением лезвийного инструмента, к полезной наработке (средней наработке за один период за вычетом возможного брака), рассчитываемой с учетом вариабельности периода стойкости.

5. Установлено, что в качестве критерия оптимальности при назначении режимов резания следует использовать удельные затраты, представляющие собой отношение к среднему периоду стойкости лезвийного инструмента, рассчитываемого с учетом стохастического характера процесса резания, суммы затрат на обработку, средних затрат, связанных с одним восстановлением инструмента, и, в зависимости от варианта порядка восстановления инструмента, средних затрат, связанных с возможным браком, или затрат на контроль состояния инструмента.

6. Установлена зависимость размера зоны высокой эффективности режима резания, ограниченной экономической скоростью резания и скоростью резания, обеспечивающей максимальную производительность, от величины коэффициента вариации периода стойкости лезвийного инструмента, являющегося интегральной количественной оценкой вариабельности условий обработки – с ростом коэффициента вариации периода стойкости зона высокой эффективности режима резания сужается. В рассмотренном примере оптимизации режима резания при периодическом контроле состояния лезвийного инструмента и восстановлении по состоянию и заданных условиях обработки при изменении коэффициента вариации периода стойкости от 0 до 0,7 размер зоны высокой эффективности режима резания сузился с 53 до 0 м/мин.

7. На приведенном примере показано, что назначение оптимального порядка восстановления лезвийного инструмента и оптимальных режимов резания в технологических системах операций при механической обработке заготовок с учетом вариабельности периода стойкости инструмента позволяет существенно повысить эффективность эксплуатации лезвийного инструмента. При этом в случае, когда коэффициенты вариации интенсивности изнашивания по всем лезвийным инструментам и периода стойкости лезвийного инструмента при разрушении равны 0,5, а коэффициент вариации интенсивности изнашивания лезвийного инструмента за единицу обработки равен 1,0, на основе назначения оптимального порядка восстановления лезвийного инструмента и оптимальных режимов резания удельные затраты удается снизить на 43,96 % при оптимизации по производительности и на 32,7 % при оптимизации по себестоимости.

8. Разработана система сравнительной оценки качества лезвийного инструмента разных производителей, которая позволяет осуществлять выбор поставщика лезвийного инструмента на основе учета вариабельности параметров лезвийного инструмента и обрабатываемых заготовок, а также специфики конкретного машиностроительного производства, позволяющая уменьшить влияние субъективного фактора при выборе режущего инструмента, а также выбрать наиболее эффективный инструмент по критерию себестоимости или производительности обработки резанием.

9. Разработан программно-методический комплекс информационной поддержки эффективной эксплуатации лезвийного инструмента, позволяющий снизить неопределенность условий обработки путем назначения оптимального порядка восстановления лезвийного инструмента и оптимальных режимов резания в режиме статистической адаптации (самообучения), формировать комплект лезвийных инструментов технологической системы операции, рассчитывать

нормы расхода лезвийного инструмента, а также производить сравнительную оценку качества лезвийного инструмента разных производителей.

10. Основные научные и практические результаты работы нашли применение на промышленных предприятиях, производящих машиностроительную продукцию и лезвийный инструмент, а также в учебном процессе Тульского государственного университета. Применение программно-методического комплекса для повышения эффективности эксплуатации лезвийного инструмента позволило снизить удельные затраты на обработку от 13,6 до 23,38 % на основе снижения трудоемкости изготовления деталей и уровня брака и более эффективного использования ресурса лезвийных инструментов.

Основные научные и практические результаты работы рекомендуется применять на машиностроительных предприятиях для обеспечения эффективной эксплуатации лезвийного инструмента при обработке деталей машин резанием, а также в учебном процессе подготовки бакалавров, магистров и аспирантов машиностроительных специальностей и направлений подготовки, а также при повышении квалификации инженерно-технических работников.

Перспективой дальнейшей разработки темы диссертации является применение разработанного в рамках диссертационного исследования подхода к снижению неопределенности условий обработки лезвийным инструментом для разработки стойкостных зависимостей режущих инструментов других видов.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Научные работы в рецензируемых научных журналах и изданиях.

1. Пасько, Н.И. Оптимизация планово-предупредительной замены режущего инструмента по данным об износе и наработке / Н.И. Пасько, **А.В. Анцев** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 5-2. – С. 257-265.

2. Пасько, Н.И., Оптимизация процедуры планово-предупредительной замены режущего инструмента в режиме самообучения / Н.И. Пасько, **А.В. Анцев** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 7-2. – С. 236-243.

3. Пасько, Н.И. Непараметрическая оптимизация периода профилактической замены режущего инструмента в режиме статистической адаптации / Н.И. Пасько, **А.В. Анцев** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 10. – С. 83-91.

4. Комплексная модель износа режущего инструмента и пример ее применения для оптимизации режима профилактики / Н.И. Пасько, **А.В. Анцев**, Н.В. Анцева, С.В. Сальников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 11-1. – С. 192-202.

5. Всерная модель износа режущего инструмента и оптимизация режима профилактики / Н.И. Пасько, **А.В. Анцев**, Н.В. Анцева, С.В. Сальников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 12-1. – С. 119-130.

6. **Анцев, А.В.** Повышение эффективности обработки резанием при формообразовании сложных поверхностей в условиях неопределенности производства / **А.В. Анцев** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8-1. – С. 221-229.

7. **Анцев, А.В.** Оценка стойкостной зависимости методом максимального правдоподобия / **А.В. Анцев**, Н.И. Пасько // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 8-2. – С. 129 – 138.
8. **Анцев, А.В.** Прогнозирование периода стойкости режущего инструмента на основе контроля вибрации в процессе фрезерования / **А.В. Анцев**, Х.Ч. Данг // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 7. – С. 3 – 11.
9. **Анцев, А.В.** Управление надежностью режущего инструмента с учетом фактора случайности процесса резания / **А.В. Анцев** // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – № 4-2 (330). – С. 90-102.
10. **Анцев, А.В.** Особенности оптимизации режимов резания с учетом фактора случайности / **А.В. Анцев**, Н.И. Пасько // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – № 9. – С. 15-20.
11. Сальников, В.С. Практическое применение диагностических возможностей современных многоцелевых станков / В.С. Сальников, В.В. Жмурин, **А.В. Анцев** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 10. – С. 257-264.
12. Экспериментальная установка контроля вибрации при обработке на станках с ЧПУ / **А.В. Анцев**, Ч.Х. Данг, Е.С. Янов, М.В. Полев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т. 15. – № 2. – С. 151-158.
13. **Анцев, А.В.** Расчет надежности многолезвийного инструмента / **А.В. Анцев** // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 6 (79). – С. 30-37.
14. **Анцев А.В.** Учет влияния износа режущего инструмента на разрушение режущей кромки в обобщенной модели отказов режущего инструмента / **А.В. Анцев** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 6. – С. 273-279.
15. **Анцев, А.В.** Назначение рациональных режимов резания с учетом вариабельности процесса резания / **А.В. Анцев** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 7. – С 3-12.
16. **Анцев, А.В.** Расчет надежности многолезвийного режущего инструмента при черновой обработке на основе статистического моделирования / **А.В. Анцев** // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. – № 4-2 (336). – С. 182-190.
17. **Анцев, А.В.** Оптимизация скорости резания и периода замены режущего инструмента в режиме статистической адаптации / **А.В. Анцев**, Н.И. Пасько // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т. 15. – № 4. – С. 102-110.
18. **Анцев, А.В.** Учет разброса периода стойкости при оптимизации режима резания и замены инструментов / **А.В. Анцев**, Н.И. Пасько // Вестник машиностроения. – 2019. – № 9. – С. 72-77.
19. **Анцев, А.В.** Информационная поддержка назначения стратегии эффективной эксплуатации лезвийного инструмента / **А.В. Анцев** // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т. 15. – № 5. – С. 128-136.
20. **Анцев, А.В.** Система сравнительной оценки качества режущего инструмента разных производителей / **А.В. Анцев** // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2020. – Т. 2020. – № 3(105). – С. 12-19.

Научные работы в изданиях, индексируемых в информационно-аналитических системах научного цитирования Web of Science и Scopus.

21. The generalized mathematical model of the failure of the cutting tool / N.I. Pasko, **A.V. Antsev**, N.V. Antseva, V.P. Fyodorov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – № 177. – 012052. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012052.
22. **Antsev, A.V.** Assessment of wear dependence parameters in complex model of cutting tool wear / **A.V. Antsev**, N.I. Pasko, N.V. Antseva // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – № 327. – 042005. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042005.
23. **Анцев, А.В.** Оптимизация скорости резания и замены инструмента при обработке черных металлов с учетом разброса периода стойкости / **А.В. Анцев**, Н.И. Пасько, Н.В. Анцева

// Черные металлы. – 2019. – № 5 (1049). – С. 41-46.

24. Cutting tool wear monitoring using the diagnostic capabilities of modern CNC machines / **A.V. Antsev**, V.V. Zhmurin, E.S. Yanov, T.H. Dang // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – № 1260. – 032003. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/3/032003>.

25. **Antsev A.V.** Cutting tool life prediction in case of rough machining by the fracture model / **A.V. Antsev** // Materials Today: Proceedings. – 2019. Vol. 19. – Part 5. – P. 2148-2151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.229>.

26. **Antsev, A.V.** Evaluation of tool life equation of single-point cutting tool by accumulation model / **A.V. Antsev**, N.I. Pasko, A.V. Khandozhko // Lecture Notes in Mechanical Engineering. Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Vol 2. – Cham: Springer, 2020. – P. 943-951. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_100.

Монографии.

27. Обобщенная стохастическая модель отказов режущего инструмента и ее применение / Н.И. Пасько, **А.В. Анцев**, Н.В. Анцева, С.В. Сальников. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – 174 с.

28. **Анцев, А.В.** Обеспечение эффективной эксплуатации лезвийного инструмента / **А.В. Анцев**. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. – 180 с.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

29. Программа динамической оптимизации периода профилактики режущего инструмента [Текст]: свид-во о регистрации программы для ЭВМ № 2018613028 / Пасько Н.И., **Анцев А.В.**; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». – Заявка № 2018610217; дата поступления 01.01.18; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 01.03.18.

30. Программа оценки параметров стойкостной зависимости режущего инструмента [Текст]: свид-во о регистрации программы для ЭВМ № 2018612886 / Пасько Н.И., **Анцев А.В.**; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». – Заявка № 2018610216; дата поступления 01.01.18; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 01.03.18.

31. Программа статистической оптимизации периода профилактики режущего инструмента [Текст]: свид-во о регистрации программы для ЭВМ № 2018612887 / Пасько Н.И., **Анцев А.В.**; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». – Заявка № 2018610213; дата поступления 01.01.18; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 01.03.18.

Научные работы в других изданиях.

32. **Анцев, А.В.** Использование нечеткой логики для повышения эффективности промышленных технологий / **А.В. Анцев**, Н.В. Анцева, И.В. Кривицкий // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сборник научных трудов Международной молодежной научно-практической конференции (17-18 ноября 2015 года) / редкол.: Павлов Е.В. (отв. ред.); В 2-х томах. Т.1. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т., ЗАО «Университетская книга», 2015. – С 46-49.

33. Пасько, Н.И. Информационная система непараметрической оптимизации периода профилактики режущего инструмента / Н.И. Пасько, **А.В. Анцев** // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сборник научных трудов Международной молодежной научно-практической конференции (17-18 ноября 2015 года) / редкол.: Павлов Е.В. (отв. ред.); В 2-х томах. Т.1. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т., ЗАО «Университетская книга», 2015. – С 157-160.

34. Пасько, Н.И. Классификация вариантов профилактики режущего инструмента на станках с ЧПУ / Н.И. Пасько, **А.В. Анцев** // Проблемы и перспективы развития машиностроения: сб. науч. трудов междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию Липецкого государственного технического университета. Часть 1. 17-18 ноября 2016 г. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2016. – С. 198-202.

35. **Анцев, А.В.** Прогнозирование периода стойкости режущего инструмента на

основе полиномиальной стойкостной зависимости / **А.В. Анцев** // Инновации в машиностроении: сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции / под ред. Х.М. Рахимянова. – Новосибирск: Изд – во НГТУ, 2017. С. 42 – 48.

36. **Анцев А.В.** Автоматизированная система контроля износа режущего инструмента по уровню вибрации / **А.В. Анцев**, Х.Ч. Данг, А.В. Жаднов // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Сб. научных трудов междунар. заочной научно-техн. конф. «АПИР-22», 9-10 ноября 2017 года; под ред. В.В. Прейса, Д.А. Провоторова. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – С. 182-186.

37. **Анцев, А.В.** Прогнозирование периода стойкости режущего инструмента при его износе по модели накопления / **А.В. Анцев**, Н.И. Пасько // Управление качеством продукции в машиностроении и авиакосмической технике (ТМ-18): сб. науч. тр. X Междунар. науч.-технич. конф. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2018. – С. 45-47.

38. **Анцев, А.В.** Оценка параметров обобщенной стохастической модели отказов режущего инструмента с помощью непрерывного косвенного контроля процесса резания / **А.В. Анцев**, Х.Ч. Данг, Е.С. Янов // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXV международной научно-технической конференции в г. Севастополе 10-16 сентября 2018 г. В 2-х томах. Т. 1. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – С. 17-20.

39. **Анцев, А.В.** Оценка уровня износа режущего инструмента в процессе резания по уровню вибрации системы СПИЗ / **А.В. Анцев**, Е.С. Янов, Х.Ч. Данг // Одиннадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России»: сборник докладов. 24–27 сентября 2018 г. / Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – С. 3-5.

40. **Анцев, А.В.** Контроль уровня износа режущего инструмента по уровню вибрации при токарной обработке / **А.В. Анцев**, Е.С. Янов // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сборник научных трудов национальной заочной научно-технической конференции с международным участием «АПИР-23», 8-9 ноября 2018 года / под ред. В.В. Прейса. – Тула: Издательство ТулГУ, – 2018. – С. 155-159.

41. **Анцев, А.В.** Измерительный стенд оценки уровня износа резца по уровню вибрации при токарной обработке / **А.В. Анцев**, Х.Ч. Данг, В.Ю. Губин // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: тезисы. – СПб.: ГУАП, 2019. – С. 11-13.

42. **Анцев, А.В.** Исследование вариабельности процесса резания при обработке лезвийным инструментом на станках с ЧПУ / **А.В. Анцев**, В.В. Жмурин // Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем: сборник научных трудов 7-й Международной научно-технической конференции (30-31 мая 2019 года) / редкол.: Павлов Е.В. (отв. ред.); Юго-Зап. гос. ун-т, В 2-х томах, Том 1. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2019. – С. 78-83.

43. **Анцев, А.В.** Оптимизация режима эксплуатации лезвийных инструментов с учетом стохастического характера процесса резания / **А.В. Анцев** // Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей / Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. – С. 397-404.

44. **Анцев, А.В.** Сравнение качества режущих инструментов разных производителей с учетом вариабельности их периода стойкости / **А.В. Анцев** // Всероссийская научно-техническая конференция «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении». 23-25 октября 2019 г.: сборник докладов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. – С. 110-112.

Подписано в печать 13.03.2020

Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная.

Цифровая печать. Усл. печ. л. 2,6. Тираж 100 экз. Заказ 002а.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ.

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95