

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения  
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»  
(наименование)

15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных  
производств»  
(код и наименование направления подготовки / специальности)

Технология машиностроения  
(направленность (профиль) / специализация)

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Определение параметров процесса обработки на основе искусственного  
интеллекта с помощью нейронных сетей

---

Обучающийся	<u>А.А. Катygин</u> (Инициалы Фамилия)	<u>_____</u> (личная подпись)
Руководитель	<u>к.т.н., доцент Д.А. Расторгуев</u> (ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)	<u>_____</u>
Консультанты	<u>к.э.н., доцент О.М. Сярдова</u> (ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)	<u>_____</u>
	<u>к.т.н., доцент А.Н. Москалюк</u> (ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)	<u>_____</u>

## Аннотация

В представленной работе приведены результаты исследования износа режущего инструмента и связанные с ним изменения информационных сигналов, полученных из звукового сигнала, полученного с микрофона, который записывал шум, возникающий в ходе обработки.

Полученные данные были обработаны статистически, из них получены базовые статистические параметры, которые использовались для определения степени износа. Для верификации предложенной методики был использован метод непосредственного контроля степени износа, получаемый на изображении фаски режущего инструмента.

Фотография задней поверхности инструмента обрабатывалась с выделением контура фаски износа. Получены статистические регрессионные зависимости степени износа от входных параметров, в качестве которых выступали режимы резания, а также набор количественных характеристик звукового сигнала. Кроме этого использовались методы машинного обучения в частности, нейросетевое моделирование с использованием нейронной сети с обратным распространением сигнала для определения степени износа и классифицирующая сеть. В работе спроектирован технологический процесс изготовления длинномерного вала для условий мелкосерийного производства. Для этого был проведен анализ конструкции вала на технологичность. Выявлены основные особенности, которые приводят к снижению технологичности на этапах получения заготовки и обработки. Проведен технический анализ требований чертежа. С учетом этого спроектирована технология для выбранного по массе и годовому объему выпуска мелкосерийного типа производства. Также для разработанной технологии предложены меры по снижению влияния вредных условий труда на здоровье операторов и обеспечения экологичности.

Предложенные усовершенствования метода диагностики режущего инструмента обоснованы в экономическом разделе.

## **Annotation**

The presented graduation paper presents the results of a study of the cutting tool wear and the associated changes in information signals obtained from an audio signal received from a microphone that recorded noise arising during machining processes.

The data obtained were processed statistically, basic statistical parameters were obtained from them, which were used to determine the wear degree. To verify the proposed technique, the method of direct control of the wear degree obtained in the image of the cutting tool chamfer was used.

The photo of the tool back surface was processed with the selection of the contour of the wear chamfer. Statistical regression dependences of the degree of wear on the input technological parameters were obtained, which were the cutting modes, as well as a set of quantitative characteristics of audio signals. In addition, machine learning methods were used, in particular, neural network modeling using a neural network with back signal propagation to determine the degree of wear and a classifying network. The technological process of manufacturing a long shaft for small-scale production conditions is designed in the work. To do this, an analysis of the shaft design for manufacturability was carried out. The main features that lead to a decrease in manufacturability at the stages of obtaining the workpiece and processing are revealed. A technical analysis of the requirements of the drawing was carried out. Taking this into account, the technology has been designed for a small-scale production type selected by weight and annual output. Also, for the developed technology, measures are proposed to reduce the impact of harmful working conditions on the operators health and ensure environmental friendliness.

The proposed improvements in the diagnostic method of the cutting tool are based in the economic section.

## Содержание

Введение.....	3
1 Обзор механизмов износа и способов его контроля .....	7
1.1 Анализ механизмов износа .....	7
1.2 Анализ методов и средств контроля .....	13
1.3 Сигналы диагностики .....	16
1.4 Нейросетевое моделирование.....	20
1.5 Типы нейронных сетей .....	28
2 Методика проведения эксперимента.....	30
2.1 Описание исходных данных .....	30
2.2 Обработка сигнала .....	31
2.3 Использование для процесса диагностики нейронных сетей .....	32
3 Экспериментальное исследование износа инструмента .....	35
3.1 Изображения резца.....	35
3.2 Звуковые файлы .....	38
3.3 Анализ сигнала .....	39
3.4 Формирование нейронных сетей.....	42
4 Технология изготовления вала.....	44
4.1 Анализ исходных данных.....	44
4.2 Анализ технологичности.....	44
4.3 Выбор заготовки.....	45
4.4 Разработка маршрута.....	46
4.5 Проектирование операции .....	47
5 Безопасность и экологичность технического объекта.....	51
5.1 Конструктивно-технологическая характеристика объекта .....	51
5.2 Идентификация профессиональных рисков.....	52
5.3 Методы и технические средства снижения рисков .....	52
5.4 Обеспечение пожарной безопасности объекта .....	53
5.5 Обеспечение экологической безопасности технического объекта.....	54

6 Экономическая эффективность работы .....	56
Заключение .....	62
Список используемых источников.....	63
Приложение А. Маршрутные карты .....	67
Приложение Б. Операционная карта.....	69

## Введение

Современные технологии изготовления деталей широко используют так называемые цифровые двойники. По сути, они представляют собой математические модели элементов и процессов технологической системы. Отличительной особенностью цифрового двойника является комплексный подход к описанию процесса обработки с рассмотрением отдельных физических процессов резания, трения, нагрева, электромагнитных явлений. Добавляется параллельное моделирование с использованием разных математических методов, которое включает численное решение систем дифференциальных уравнений, в том числе методом конечных элементов, методы нейросетевого моделирования и нечеткой логики и тому подобное.

Возможности современного аппаратного и программного обеспечения позволяют проводить такое комплексное моделирование в режиме реального времени. Это обеспечивает оперативное управление и оптимизацию осуществляемых процессов обработки.

Задачи, которые при этом решаются, отличаются многообразием. Это повышение производительности, точности, снижение затрат, повышение надежности работы инструмента и оборудования. Для этого используются информационные сигналы, которые получают с различных датчиков, которые могут быть как встроенными элементами в конструкции технологической системы, так и добавлены дополнительно в ходе модернизации станков.

В результате получается многоканальная управляющая система, в рамках которой необходимо из большого количества информационных данных получить полезную информацию, на основе которой можно корректировать ход технологической операции. Для этого необходимо обеспечить поступление соответствующих данных по процессу резания с заданной периодичностью, обработку этих данных по заданному алгоритму и генерирование необходимого сигнала о смене инструмента.

# **1 Обзор механизмов износа и способов его контроля**

## **1.1 Анализ механизмов износа**

Одним из основных элементов технологической системы является режущий инструмент, который подвергается значительному силовому и температурному воздействиям [14]. Из-за этого реализуются разнообразные механизмы износа режущей части, которые могут протекать в соответствии с различными физическими процессами (диффузионными, абразивными, адгезионными, пластическим деформированием, термоциклированием) [4]. Он может преимущественно проходить по разным поверхностям режущей части (передней или задней поверхностям, режущей кромке, вершине инструмента). Этот процесс по характеру является нестационарным, зашумленным, протекает во времени неравномерно.

В процессе обработки режущая часть инструмента испытывает значительные температурные и силовые воздействия. При разрушении материала заготовки необходимо приложить значительные силы со стороны режущей кромки.

Из-за процессов трения происходит разогрев поверхности режущей части, где происходит трение. Это задняя поверхность инструмента, скользящая по уже обработанной поверхности, а также передняя поверхность, по которой происходит отвод образующейся стружки [5].

Высокие удельные давления приводят к значительному износу, который определяется особенностями физико-механических свойств контактирующих пар материалов заготовки и инструмента. Контроль износа режущей части является актуальным, так как размерный износ непосредственно приводит к изменению положения вершины режущей кромки инструмента относительно настроечных баз. Величина такого размерного износа может достигать нескольких десятых миллиметров. Кроме этого, при износе изменяется величина силы резания.

Вследствие затупления режущей кромки идет постоянный рост силы резания и это приводит к постоянному изменению упругих деформаций технологической системы. Поэтому отслеживание степени износа является одной из важнейших задач диагностики и мониторинга состояния технологической системы обработки резанием.

Кроме этого, износ инструмента влияет непосредственно на производительность обработки. Повышение режимов резания за счет увеличения подачи приводит к росту силовой составляющей процесса обработки и в процессе начинают доминировать соответствующие механизмы износа. При повышении скорости резания на первую роль выходят температурные факторы, которые изменяют механизмы резания по сравнению с силовым воздействием. Поэтому при проектировании технологической операции необходимо оптимизировать режимы обработки с целью обеспечения максимальной производительности при обеспечении максимальной стойкости режущего инструмента. Увеличение режимов резания будет приводить к снижению стойкости. Будет требоваться более частая подналадка или замена режущего инструмента. Данная составляющая времени входит в непроизводительные временные затраты и увеличивает долю времени на техническое обслуживание оборудования.

В целом износ режущего инструмента имеет комплексное влияние на эффективность обработки. Он определяет удельную производительность по объему снятого материала в единицу времени, влияет непосредственно на технологическую себестоимость и затраты на режущий инструмент, определяет точность обработки, а также качество обработанной поверхности. При увеличении износа режущего инструмента шероховатость обработанной поверхности, как правило, увеличивается.

Контроль состояния режущего инструмента и степени его износа может проводиться непосредственной оценкой при осмотре режущей пластины или зубьев. Такой визуальный осмотр отличается неточностью, не оперативностью, субъективностью и возможной ошибкой в оценке.



Использование каких-либо контактных средств типа датчиков касания определяет только размерные изменения, возникающие при износе режущей части и только в одном направлении.

Из-за разнообразия механизмов износа могут возникать различные дефекты режущего инструмента, некоторые из которых таким способом попросту не диагностируются [26].

Особенно актуальны вопросы контроля износа режущего инструмента для автоматизированного производства или, как еще называют, безлюдных технологий, где человек выполняет функцию оператора. Причем используется при этом многостаночное обслуживание. В этом случае он просто физически не может произвести контроль состояния режущей части всех используемых инструментов. В случае надлежащего состояния режущей кромки при лезвийной обработке возможно обеспечение качества поверхности по параметру  $R_a$  до 0,2 мкм.

Существует пять основных механизмов износа при резании [27]. Первый - это абразивный износ за счет истирания контактирующих поверхностей твердыми частицами стружки или отколовшимися частицами режущей части. Второй тип износа - это диффузионный, при котором происходит взаимное проникновение частиц контактирующих материалов инструмента и заготовки с последующим их разрывом, что приводит к разрушению инструмента. Особенно явно проявляют себя данные механизмы износа при родстве контактирующих материалов инструмента и заготовки. Следующий механизм износа - это окислирование поверхностного слоя инструмента при контакте с кислородом воздуха, что приводит к окислению наружной поверхности. Следующий механизм износа - это адгезионный. Прилипание контактирующих поверхностей, когда они испытывают значительные контактные нагрузки при высоких температурах. Этот механизм износа особенно ярко проявляет себя при сродстве контактирующих материалов. Четвертый механизм износа - усталостный статический или динамический. Процесс обработки является циклическим.

Особенно это ярко проявляется при формировании сегментной или элементной стружки, а также при неравномерных процессах обработки типа фрезерования, когда режущая часть испытывает значительные нагрузки, изменяющиеся во времени. Это приводит к постепенному накоплению микрповреждений в приповерхностном слое с постепенным ростом микротрещин до тех пор, пока они не сливаются в одну магистральную трещину с общим разрушением режущей части.

При обработке износ может происходить в различном виде в зависимости от способности инструментального материала сопротивляться нагрузкам или силовым или температурным [3]. Первое - это износ по задней поверхности с образованием, так называемой фаски износа. Формируется он преимущественно при абразивном механизме. В результате смещается положение вершины режущей кромки и изменяется радиус при вершине инструмента, нарушается параллельность режущей кромки первоначальной поверхности резания. Этот тип износа является самым распространенным, нормальным и позволяет, учитывая интенсивность износа, прогнозировать изменения условий обработки. Здесь можно по времени работы инструмента или по количеству обработанных заготовок определить степень износа с достаточно высокой вероятностью. Данный тип износа является, в принципе, идеальным с точки зрения прогнозирования работоспособности инструмента. С увеличением этого износа растет сила резания. При увеличении соотношения размеров фаски до 0,5 мм приводит к увеличению силы резания на 30-50%. В случае данного механизма износа можно производить под наладку положения инструмента с целью компенсации увеличивающихся упругих деформаций, возникающих от фаски износа и увеличения силы резания.

Другой тип износа связан с пластической деформацией [7]. Он характерен для условия обработки, когда действуют совместно высокие температуры и высокие давления на режущую кромку. Это типичные условия при высокоскоростной обработке с большими подачами твердого

материала, например закаленного, что приводит к высоким температурам и давлениям в зоне резания. В результате повышения температуры инструментальный материал начинает пластически деформироваться, создавая так называемый наплыв режущей кромки, что изменяет условия резания и приводит к еще более высоким температурам. Изменяется геометрия режущей части и направление схода стружки. Критическим параметром, который определяет способность сопротивляться данному типу износа, являются красностойкость инструментального материала.

Царапины тоже один из видов износа. Он проходит по адгезионному механизму совместно с оксидированием поверхности. Может возникать при воздействии на инструмент частиц с более высокой твердостью.

Термические трещины это типовой механизм усталостного износа, который возникает при термоциклировании. Особенно это актуально при неравномерных условиях обработки многозубым инструментом. Образуются трещины, перпендикулярные режущей кромки. В процессе обработки по ним может происходить разрушение с вырыванием частиц. К этому может привести изменение толщины снимаемой стружки в процессе резания, что изменяет условия обработки, в том числе температуру. Применение смазочно-охлаждающей жидкости в этом плане может ухудшать ситуацию, так как приводит к более высоким температурным перепадам на режущей части.

Хрупкое разрушение режущей пластины приводит, как правило, к катастрофическому завершению процесса резания после которого он невозможен. Поломка части или полностью режущей кромки от пластины является аварийной ситуацией, приводит к немедленной остановке процесса резания и должна быть исключена в любом случае, так как это может привести к поломке оборудования. Механизм разрушения часто возникает в конце периода стойкости инструмента вследствие накопления различных повреждений в инструментальном материале, изменение геометрии, ослабление режущего клина, повышения температуры и сил резания.

Хрупкий механизм разрушения, приводящий к такому внезапному выходу из строя, может быть результатом совместного действия различных факторов, возникающих при несоответствующих условиях обработки. Например чрезмерные режимы резания.

Износ инструмента вследствие образования нароста поверхности. Он возникает в области относительно низких скоростей резания и связан с привариванием исходящей стружки под действием высоких температур и сил к режущей части. Периодически образующийся нарост срывается с инструмента с последующим его обратным формированием. При срывании он может уносить частицы инструментального материала, что приводит постепенно к образованию лунки. Наростообразование, с одной стороны частично защищает переднюю поверхность под действия исходящей стружки, так как образуется промежуточный слой. При этом сформированный нарост выполняет функцию режущей кромки. Так как он имеет грубую неравномерную структуру, качество обработанной поверхности таким инструментом отличается в худшую сторону.

В настоящее время в связи с возрастанием скоростей резания для современных инструментальных материалов зона роста образования, как правило, не встречается, так как более высокие температуры при более высоких скоростях резания делают материал более пластичным и прилипания стружки к передней поверхности инструмента не происходит. В случае износа по задней поверхности инструмента возможной причиной может быть высокая скорость резания или недостаточно износостойкость инструментального материала. Выходом из данной ситуации является снижение режима обработки. Возможно увеличение подачи, а также выбор другого инструментального материала с более высокой относительной износостойкостью.

При пластической деформации с наплывом режущей кромки причиной является высокая температура совместно с высоким давлением. Для устранения или снижения влияния данного механизма нужно предложить

более износостойкий инструментальный материал, уменьшить скорость резания, подача, изменить геометрию режущей пластины [3].

Причинами царапанья являются окислирование и истирание поверхности. Для устранения данного недостатка предлагается использовать более прочной инструментальной материал, увеличить скорость резания и уменьшить подачу.

Образование термических трещин. Причинами возникновения являются переменные условия обработки, например многозубый инструмент, а также неравномерная подача СОЖ в зону резания. Предлагается использовать более прочный материал, уменьшить скорость резания, подачу, использовать инструмент меньшего диаметра, изменить способ подачи смазочно-охлаждающей жидкости для выравнивания его подачи.

Да усталостного износа причиной возникновения является повышение температуры, возникающее вследствие других механизмов износа, а также слишком высокие режимы резания в сочетании со свойствами материала заготовки. Предлагается использовать более прочные пластины, уменьшить подачу, повысить стабильность обработки, например, за счет повышения жесткости технологической системы, выбрать режущие пластины с большими канавками для стружколомания.

## **1.2 Анализ методов и средств контроля**

Контроль износа режущего инструмента может осуществляться двумя способами. Первый способ заключается в контроле износа между технологическими переходами. Это может быть реализовано при помощи простого позиционера – датчика, который определяет текущее положение, например, вершины режущего инструмента [7].

При износе образуется фаска по задней поверхности режущей части. Смещение вершины инструмента из-за образования этой фаски приводит к радиальному смещению настроечной точки режущего инструмента. Данные

смещения датчик касания и определяет. Далее может вноситься корректировка в положении инструмента для компенсации этого смещения.

В данном случае возникает две трудности: связанные с точностью определения данного радиального смещения фактической режущей кромки, а также необходимость точной отработки небольших расстояний. Здесь включаются ограничения, связанные с возможностью приводов станка [10].

Контроль износа может проводиться также при помощи бесконтактных средств контроля. Это может быть определение текущего контура режущей части с использованием снимков, которые получают в настоящее время преимущественно с использованием цифровых камер. На цифровом изображении выделяют контур режущей пластины или элемента инструмента и сравнивают его с предыдущим изображением. Расхождение данных контуров и будет определять смещение, связанное с износом режущего инструмента [11].

Другой подход в определении степени износа связан с получением изображения непосредственно фаски или лунки износа. Для этого необходимо на полученном снимке при помощи каких-либо методов распознавания объектов выделить данную область и определить ее параметры. Отслеживание изменения этих параметров в ходе обработки позволяет судить о степени интенсивности износа режущего инструмента.

Другой подход к определению износа связан с косвенными измерениями и, как правило, реализуется в режиме реального времени в ходе непосредственной обработки.

Как известно, износ приводит к изменению характера резания. Это сопровождается изменением величины и характера проявления силы резания, вибрации элементов технологической системы, температуры в зоне резания, электромагнитных явлений. Все эти процессы можно диагностировать при помощи датчиков.

Информация, получаемая в процессе обработки, анализируется. Из нее выделяются полезные информативные признаки, по которым с

использованием алгоритмов распознавания, определяют степень и характер износа. Могут использоваться статистические методы с построением, например, регрессионных моделей, а могут использоваться и методы машинного обучения. Для этого можно использовать какие-либо классифицирующие нейронные сети или методы кластеризации.

Например, в [20] рассматривается система активного контроля износа режущего инструмента сигналов по току привода, и звукового сигнала, получаемого с микрофона. По сигналу привода подачи из полученной зависимости силы резания от тока привода получают данные по значению силы резания. Для выделения информативных признаков из звукового сигнала проводят спектральный анализ. На основе двух параметров с использованием метода векторов определяют состояние инструмента.

Задача усложняется тем, что для надежного определения состояния инструмента, необходимо использовать множество диагностических каналов, по которым получают информацию, характеризующие процесс резания с разных сторон. Это связано с тем, что по своей природе все диагностические сигналы имеют стохастический характер, нестационарные, существенные нелинейные по зависимости от параметров износа. С другой стороны, по экономическим причинам, делать такую многопараметрическую систему контроля будет сложно и дорого.

Необходимо стремиться к формированию контрольной системы, использующей минимальное количество каналов и, при этом, обеспечивающей максимальную надежность и точность в определении степени износа инструментов. Для этого необходимо определить наиболее ценные, информативные сигналы, и выделить из них наиболее значащие параметры.

Возникает несколько задач. Это выбор количества и видов датчиков, выбор характеристик сигнала с учетом стоимости оснащения; учетом времени обработки сигнала для диагностических целей в режиме реального

времени; использование датчиков требующих минимальной модернизации оборудования и не мешающих проведению самой обработки.

Увеличение количества датчиков приводит также к снижению надежности работы оборудования, а также необходимости согласования между собой различных информационных сигналов. Использование даже уже двух параметров приводит к необходимости их согласования.

### **1.3 Сигналы диагностики**

Использование для диагностики процесса обработки только привода подачи или только привода главного движения делает задачу определения износа не решаемой. Привод главного движения, из-за большой мощности привода, а также пространственной, многоступенчатой кинематической передачи от привода на шпиндель, где действует множество возмущающих факторов, является не очень информативным. Для чистовой обработки он имеет ограниченное применение в связи с небольшими возмущениями от процесса резания в структуре сигнала нагрузки, который представляет ток привода главного движения [20].

Привод подачи, в связи с минимальной кинематической связью с процессом резания через ходовой винт гайку, приближен к зоне резания максимально. Это делает возможные возмущения на сигнале минимальными. Силу резания определяют по разности силы тока привода подачи между значением, полученным на холостом ходу и при резании.

Силу можно определять по линейной зависимости от частоты токового сигнала. Вывод значения силы резания можно использовать по методу опорных векторов, который относится к методам машинного обучения. Область его применения - классификации и прогнозирование на основе небольшого объема данных. Он имеет высокую степень обобщения и точности при решении задач классификации.



Необходимо создать обучающий набор данных, который используется для тренировки и получения параметров данного алгоритма.

Второй параметр, который можно использовать для диагностики износа, это звуковой сигнал. Его получают при помощи микрофона, направленного в зону резания. Данный способ диагностики широко применяется для анализа состояния технологического оборудования. Общий подход выглядит следующим образом.

Для нормально работающего оборудования получают эталонное значение звукового сигнала. Этот сигнал можно раскладывать по частотным компонентам в ходе частотного анализа, а можно использовать метод вейвлет-анализа [17]. При изменении характера звукового сигнала, который определяется, как правило, изменениями в работе каких-либо элементов оборудования, эта вариация диагностируется и фиксируется выход из строя того или иного компонента.

При резании наблюдается такая же картина. Для остро заточенного режущего инструмента, а также инструмента находящегося на стадии нормального рабочего износа, определяют эталонные распределения параметров звукового сигнала. При получении картинки, отличающейся от данных эталонных распределений, делают вывод о катастрофическом износе режущего инструмента [1].

Подход к данным сигналам, которые являются нестационарными и зашумленными, может отличаться разнообразием подходов. Можно использовать базовые статистические характеристики. К основным параметрам относят среднее значение сигнала, среднеквадратичное отклонение сигнала, размах, моду и медиану [2].

Можно использовать другой подход для анализа такого сигнала. Это может быть разложение сигнала на разные частотные уровни. Разные виды фильтрации для низко-, средне- и высокочастотных составляющих, выделяя соответствующие компоненты из исходного сигнала. Далее эти

составляющие можно обрабатывать отдельно, выделяя для каждой из них свой набор статистических признаков [8].

Можно использовать комплексное разложение, например, вейвлет-анализ. Тогда на нескольких частотных уровнях получим свои количественные характеристики. Здесь могут быть кроме базовых статистик еще и пиковые значения сигнала, вариация сигнала, энергетические характеристики, волновая форма, параметры эксцесса и асимметричности, характеристики энергетического спектра (распределение значений по всему спектру или в частотном диапазоне, средние значения, среднеквадратичное отклонение, асимметричность и эксцесс, пиковое значение, размах).

В некоторых случаях используют непосредственно изображение сигнала и методами машинного обучения распознают полученную картинку, которую сопоставляют с шаблонами сигналов, полученных ранее для известных условий обработки, и получают характеристику элемента анализируемого параметра [12].

Кроме косвенных измерений силы резания, можно применить непосредственное измерение данного параметра. Для этого в конструкции станка, в элементы резцедержателя или инструментального шпинделя, встраиваются силоизмерительные датчики. Они основаны на способах тензометрии и измеряют деформацию элементов технологической системы. С учетом предварительной тарировки и известной зависимости силы и смещения, по величине деформации получают значение силы резания.

Могут использоваться датчики по компонентам силы резания, то есть определяются отдельно тангенциальная, осевая, радиальная составляющие силы резания [17].

При работе инструментальным шпинделем могут определяться крутящий момент и осевая нагрузка. Трудность данного способа измерения износа заключается в том, что силы резания с износом связаны косвенно. На нее, кроме износа, влияет еще множество других характеристик. Это, в первую очередь, свойства обрабатываемой заготовки: прочность материала,

состояние поверхности, распределение припуска, общая деформация заготовки и инструмента относительно друг друга. Кроме этого включение, встройка в технологическую систему измерительных датчиков, приводит к изменению конструктивных параметров станка. Могут снижаться жесткость, вибрационная устойчивость. Включение дополнительных элементов может приводить к снижению точности.

Другим способом отслеживания нагрузочных характеристик является измерение непосредственно деформации. В отличие от предыдущего способа, датчики могут устанавливаться отдельно, вне несущих систем станка. Это будет сохранять исходные конструкторские и эксплуатационные параметры оборудования, но наличие таких датчиков в зоне резания или рядом с ней может приводить к их повреждению, или зашумлять сигнал за счет действия стружки или смазочно-охлаждающей жидкости [25].

Другим направлением измерения параметров процесса резания является контроль температуры в зоне обработки. Для этого могут встраивать в систему станка, в первую очередь в инструмент, измерительные термопары. Данный датчик может подводиться достаточно близко к зоне резания и измерять непосредственно температуру, например, режущей пластины. Но опять же, здесь возникает необходимость модернизации какого-либо элемента станка. Сама температура зависит не только от степени износа, но и, опять же, от множества других факторов (прочность и твердость материала заготовки, состояние ее поверхности, наличие и параметры смазочно-охлаждающей жидкости).

Кроме этого, температура является инерционным параметром, имеет значительное запаздывание при изменении условий обработки, в том числе износа инструмента. Это делает данный сигнал не очень подходящим для оперативного вмешательства в процесс резания в случае критического разрушения или износа режущего инструмента.

Еще один сигнал, связанный с температурой, это термо-ЭДС. Зона контакта инструмент-заготовка представляет электрическое сопротивление с

переменными параметрами. При нагреве, из-за различных характеристик контактирующих материалов, возникает термо-ЭДС. Ее можно зарегистрировать в случае электрической изоляции заготовки и инструмента. В этом случае они образуют электрическую цепь, при подключении к которой высокочувствительный вольтметр позволяет получить параметры изменения термо-ЭДС.

В данном случае использование этого способа контроля затрудняется необходимостью электрической изоляции заготовки и инструмента, соответственно, в зажимном приспособлении и в резцедержателе или инструментальном шпинделе.

Из всех проанализированных сигналов наиболее подходящим является характеристики тока привода подачи и звуковой сигнал. Возможно, подключение оптического способа контроля вне зоны обработки для периодического определения состояния режущей части инструмента методами машинного зрения.

#### **1.4 Нейросетевое моделирование**

Для моделирования процесса износа можно использовать различные нейронные сети. Это могут быть гибридные нейронные сети ANFIS [23].

Для того чтобы воспользоваться данной сетью необходимо сформировать вектор входных параметров. В данном случае используется набор характеристик звукового сигнала полученного в ходе экспериментов. Он включает в себя среднее значение, моду, медиану, среднеквадратичное отклонение, размах. На выходе такой системы мы можем получать численные значения износа или уровень износа. Он может быть выражен в степенях по мере возрастания изношенности, например, как новый инструмент, резец с нормальной, повышенной или критической степенью изношенности. В первом случае сеть выступает как регрессионная модель, во втором - как классифицирующая [6].

Для обеспечения правильного вывода в такой сети входные воздействия необходимо разделить на области принадлежности. При этом разделение производится субъективно. Нужно принять, например, для каждого из параметров три уровня. Первый назовем малые значения, второй - среднее, и третий - большие значения. Данные функции принадлежности переводят конкретные численные значения параметра в лингвистическую форму. Форма функции принадлежности может иметь разный вид. Это может быть треугольная форма, кривая Гаусса, сигмоидальная функция [9].

Для вывода численного значения применяем линейный выход, который суммирует все выходы нейронов со своими весовыми знаками, которые формируются в ходе обучения сети [15].

Отбор числа нейронов в скрытом слое определяется на этапе формирования архитектуры нейронной сети. Метод обучения, который заключается в подборе параметров нейронов и формы функций принадлежности с целью минимизации ошибки рассогласования фактических и моделируемых данных на выход сети. Например, это может быть алгоритм обратного распространения сигнала.

После обучения мы получаем так называемые правила вывода. Они формулируются в лингвистических конструкциях по принципу «Если...-то...». Их можно представить также в графической форме.

На рисунке 1 приведен вид нейронной нечеткой сети с тремя входами и одним выходом.

На рисунке 2 показан вид системы нечеткого вывода, где для трех входов слева в символической форме показаны функции принадлежности, соответствующие принятым областям малых, средних и больших значений для каждого фактора.

В центре представлен блок нечеткого вывода Сугено. Справа показан блок дефаззификации, который нужен для того, чтобы перевести из лингвистической нечеткой формы параметр в численное значение.

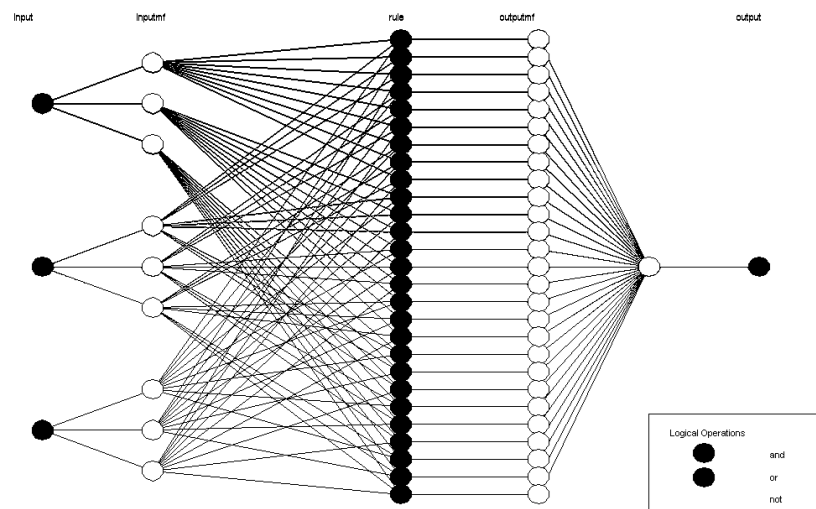


Рисунок 1 - Структура гибридной сети ANFIS

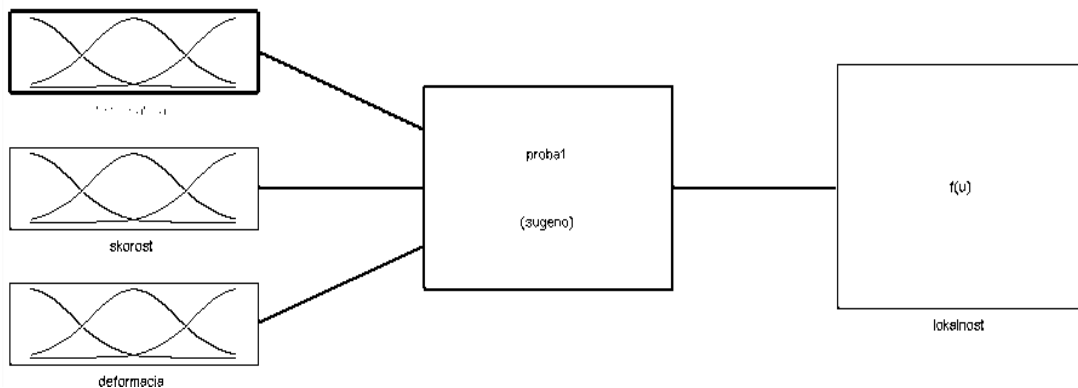


Рисунок 2 - Структура системы нечеткого вывода

В математической форме это выглядит следующим образом. Для вектора входных параметров  $X=(X_1, X_2, \dots, X_i)$  определяем вектор выхода  $Y=(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ . В случае действия внешних возмущений необходимо учесть вектор  $\varepsilon=(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_k)$ , а при обучении могут использоваться параметры системы  $U=(U_1, U_2, \dots, U_j)$ .

Соответственно для нечеткого вывода формируются лингвистические правила в виде уравнений

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \bigcap_{i=1}^n (x_i = a_{i,jp}) \Rightarrow \Rightarrow y = b_{j,0} + b_{j,1} \cdot x_1 + b_{j,2} \cdot x_2 + \dots + b_{j,n} \cdot x_n, \quad (1)$$

где  $b_{j,n}$  – коэффициенты;

$m$  – количество правил;

$k$  – количество термов в  $j$  – ом правиле, которое соответствует количеству обучающих данных;

$i$  – компонент вектора  $X$ ;

$a_{i,,pj}$  – функция принадлежности для  $x_i$ .

Окончательный вывод  $j$  – ого правила  $d_j$  базы знаний получаем при помощи уравнения:

$$d_j = b_{j,0} + \sum_{i=1}^n b_{j,i} \cdot x_i. \quad (2)$$

где  $b_{j,n}$  – коэффициенты;

$n$  – количество выходов скрытого слоя.

Нейросетевое моделирование основано на представлении о прохождении и обработке сигнала через биологический нейрон, схематичное изображение которого представлено на рисунке 3. Прохождение электрического сигнала по данной природной сети производится в одну сторону через связующие элементы [15].

Алгоритм обработки в искусственных нейронных сетях напоминают данный природный процесс со своими особенностями.

В нейронных сетях прохождение сигнала также определяется через определенное количество слоев узлов, которые называются нейронами. В них производится определенное математическое преобразование сигнала [18].

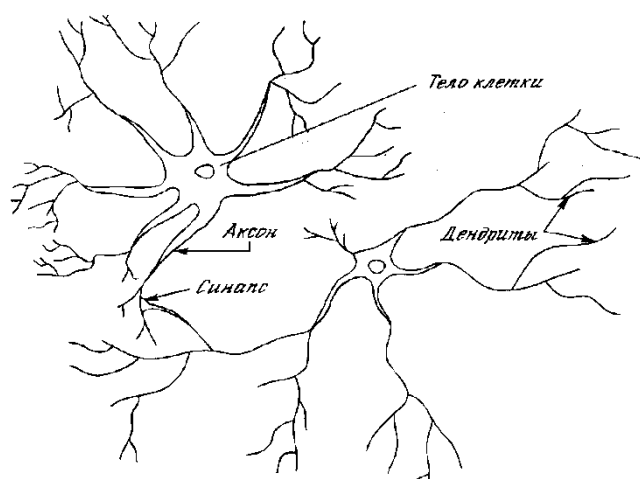


Рисунок 3 – Природный нейрон

При этом искусственные нейронные сети (рисунок 4) имеют в отличие от природных жесткую архитектуру, под которой понимают определенное и заданное число входных и выходных нейронов, количество слоев и количество нейронов в каждом слое, а также математические преобразования, который производит каждый узел-нейрон.

Математическое преобразование сигнала включает в себя сложение всех сигналов по всем связям, приходящим на данный нейрон со своими весовыми знаками [19]. Подготовка нейронной сети к работе заключается в ее обучении. Это процесс, при котором происходит определенная подстройка этих весовых коэффициентов  $w_{ij}$  из формулы, а также дополнительное, так называемое смещение, то есть величина дополнительного слагаемого в каждом нейронов

$$a_i = \sum_{j=1}^i w_{ij}x_j, \quad (3)$$

где  $w_{ij}$  – весовой коэффициент;

$x_j$  – вектор входов;

$i$  – номер нейрона;

$j$  – компонент вектора  $x_j$ .



С целью минимизации рассогласования между заданным выходом и выходом, полученным в результате моделирования нейронной сетью, производится обучение. Для этого необходимо задать на вход сети известные сигналы, на выходе сопоставить известный сигнал, сигналу полученного моделированием [21].

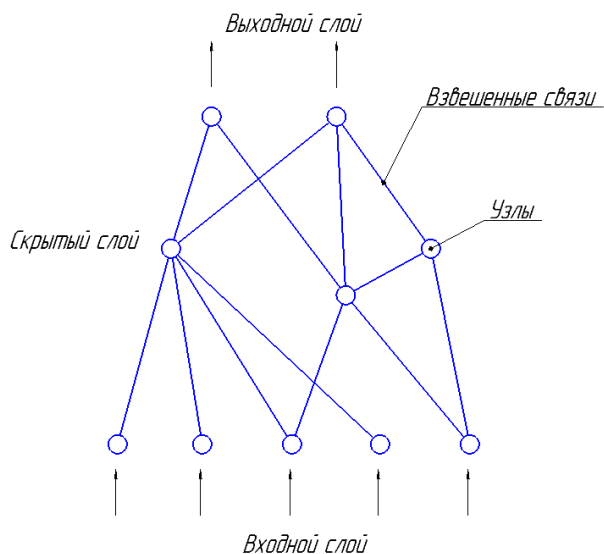


Рисунок 4 – Структурная схема нейронной сети

Нейронная сеть будет изменять свои параметры сама автоматически при помощи определенного алгоритма обучения таким образом, чтобы ошибка согласования была сведена к минимуму

$$y_i = \Phi(a_i) = \Phi(\sum_{j=1}^N w_{ij}x_j - U_i), \quad (4)$$

где  $\Phi$  – общая передаточная функция по ошибке;

$U_i$  – вектор ошибки;

$N$ – количество обучающих данных.

Математические преобразования внутри каждого нейрона производится по определенным математическим формулам, графические формы которых показаны на рисунке 5. Они могут иметь разное воплощение и могут быть линейными, ступенчатыми, сигмоидальными.

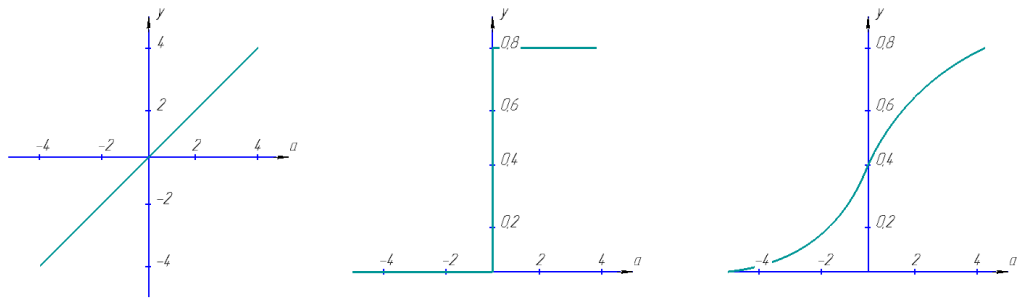


Рисунок 5 - Виды функций активации нейронов

Линейная функция

$$\Phi(a_i) = ka_i, \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент усиления.

Ступенчатая функция

$$\Phi(a_i) = \begin{cases} 1: \sum_{j=1}^N w_{ij}x_j > U_i \\ 0: \textit{Otherwise} \textit{ (остальное)} \end{cases}. \quad (6)$$

Сигмоидальная функция

$$\Phi(a_i) = \frac{1}{1+e^{-ka_i}}. \quad (7)$$

Схема преобразование сигнала в одной нейронной ячейке показана на рисунке 6 [24].

Вектор входных параметров  $X$  со своими весовыми коэффициентами  $w$  поддается на вход преобразующей функции  $F$ .

Суммарное значение  $S$  показано под схематическим изображением нейрона. Полученное значение преобразуется выбранной математической функцией  $F$  и подается на выход нейрона как сигнал  $Y$ .

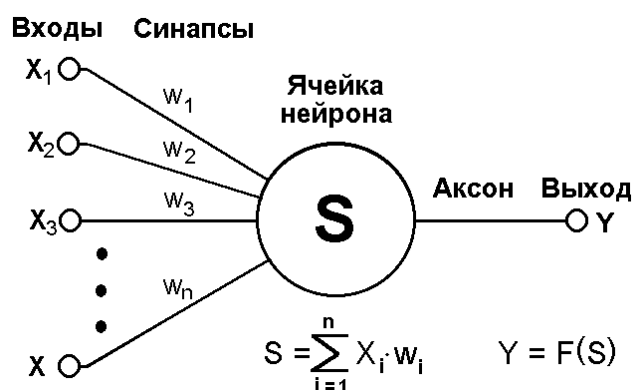


Рисунок 6 – Преобразование сигнала в нейронной сети

При формировании нейронной сети выбор необходимо сделать по количеству нейронов в скрытых слоях и по математической функции, преобразующий входной сигнал у каждого нейрона.

Модель однослойной нейронной сети с произвольным количеством входных векторов показана на рисунке 7. В качестве преобразующей функции используется сигмоидальное преобразование. После соответствующего математического вычисления производится линейное преобразование суммарного входного сигнала на выходном нейроне в данной сети. При этом значение каждого выхода промежуточного нейрона складывается со своим весовым коэффициентом.

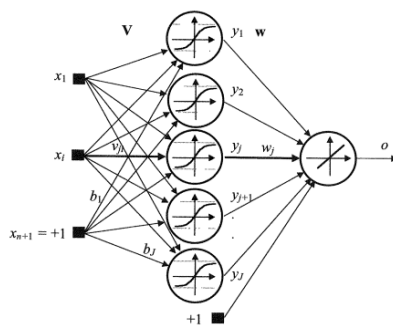


Рисунок 7 - Слой нейронов

Если преобразование, связанное с обработкой сигнала от одного выхода к другому, повторяется несколько раз, то имеем модель многослойной нейронной сети, представленной на рисунке 8.

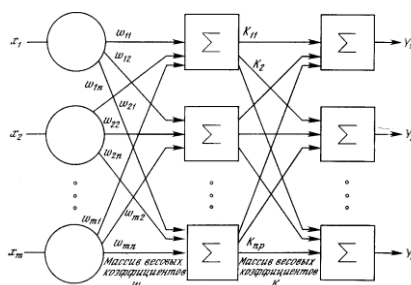


Рисунок 8 - Многослойная нейронная сеть

Особенностью нейронных сетей является то, что любую нелинейную, самую сложную зависимость можно аппроксимировать нейронной сетью имеющие всего два скрытых слоя. Точность аппроксимации будет зависеть от сложности дополнительных параметров архитектуры нейронной сети, а также от выбранного алгоритма обучения.

## 1.5 Типы нейронных сетей

Для различных задач используются различные архитектуры нейронных сетей. Например, на рисунке 9 представлена схема нейронной сети

двухслойного персептрона с двумя выходами. Задачей данной сети может являться бинарная классификация векторов входных параметров, то есть каждый выход  $y_1$  или  $y_2$  определяет тот или иной исход математического моделирования. В зависимости от набора входных параметров данная нейронная сеть будет проводить классификацию на два класса в соответствующих выходных нейронах [13]. Типом классифицирующей сети является сеть Кохонена [16].

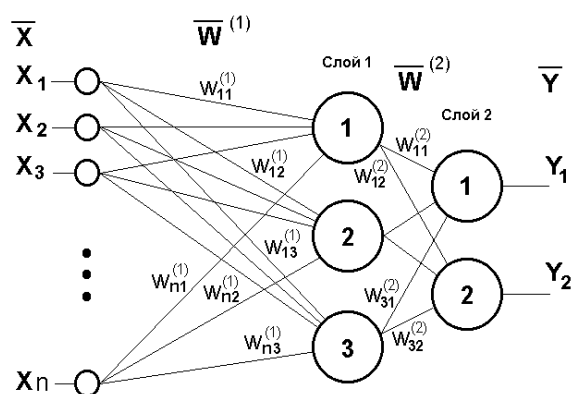


Рисунок 9 - Архитектура двухслойного персептрона с двумя выходами

### Выводы по разделу

В разделе рассмотрены различные подходы к определению величины и характера износа режущего инструмента. Рассматриваются различные причины появления износа режущей части. Приведены примеры использования различных датчиков и методик для диагностики состояния режущего инструмента. Рассмотрены различные виды нейронных сетей и задач, для которых они предназначены.

## **2 Методика проведения эксперимента**

### **2.1 Описание исходных данных**

Для определения зависимости параметров контролируемых сигналов от состояния режущего инструмента: вида и величины износа, проведено экспериментальное исследование на токарно-винторезном станке 1К62.

Обтачивалась цилиндрическая заготовка упорным токарным резцом с твердосплавной режущей пластиной Т15К6 от исходного состояния остро заточенного инструмента до полного его износа.

Режимы резания на технологических переходах не варьировались. Они выбирались по параметрам, характерным для полуставовой обработки (значительная глубина резания до 0,5 мм, незначительная величина подач до 0,084 мм/об, относительно высокая скорость резания около 94,2 м/мин при 500 об/мин).

Для контроля процесса могут использоваться бесконтактные датчики деформации Bently Nevada. Это токо вихревые датчики с рабочей частотой измерения деформации до 10000 Гц и рабочим диапазоном измерения до 3 мм. Датчик устанавливается под нижней плоскостью державки резца и измеряет ее тангенциальные деформации. Электрический сигнал поступает в электронный осциллограф Л-кард, в котором происходит регистрация сигнала в виде текстового файла. Далее этот сигнал загружается в программу Matlab, где производится его обработка. Для их использования необходимо поставить в зону резания стойку с датчиками с подключенными проводами. Это делает измерения чувствительными к возмущениям (удары, стружка).

Для решения данной проблемы использовалась замена датчика вибраций микрофоном.

Эксперимент проводился следующим образом.

Для фиксации состояния инструмента использовался только микрофон.

Обработка сигнала заключается в низко- и высокочастотной фильтрации. В первом случае мы выделяем высокочастотные компоненты, которые зависят от стружкообразования и процессов трения. Выделяя низкочастотную составляющую вибрации, получаем возмущения, которые создаются переменными условиями обработки. Это связано с переменным припуском из-за погрешностей формы заготовки и из-за деформации самой заготовки в поперечном направлении.

Износ влияет на все составляющие вибрационного сигнала. В случае высокочастотной составляющей изменяется характер распределения спектра сигнала. Для низкочастотных составляющих изменяется величина тренда сигнала.

## **2.2 Обработка сигнала**

При проведении эксперимента по исследованию влияния износа инструмента на характер различных диагностических параметров был получен звуковой сигнал процесса резания при помощи направленного электретного микрофона.

Предварительно снимались характеристики сигнала на холостом ходу, когда заготовка вращается с соответствующей частотой вращения, выбранного для данного перехода.

При обработке уровень сигнала изменяется, что и регистрируется при записи сигнала. Переведенный в соответствующий формат, файл с данными загружается в обрабатывающую математическую программу Matlab. Там сигнал раскладывается на составляющие при помощи низкочастотной и высокочастотной фильтрации. Запись сигнала на холостом ходу предварительно прогонялась через полосовой фильтр, который позволяет удалить именно те гармоники колебаний, которые возникают при отсутствии обработки. Если прогнать через такой полосовой фильтр сигнал, полученный

при резании, останется только информативная часть данных, связанных с процессом обработки.

Эти данные подвергаются частотному анализу, который заключается в построении амплитудно-частотных характеристик сигнала или спектра. Он позволяет выявить доминирующие частоты колебаний.

При сопоставлении сигналов, полученных на разных этапах эксперимента, можем отследить динамику изменения составляющих спектра, и сопоставить эти изменения с ростом износа режущей части токарного резца.

Сам износ регистрировался при помощи серии цифровых изображений, которые получали съемкой инструмента сбоку и сверху со стороны передней поверхности инструмента. Съемка сбоку позволяет за счет использования методов выделения контуров объекта, например, метода Кэнни, получить конфигурацию режущей кромки. Сопоставляя этот контур с определенной периодичностью можно отследить размерный износ режущей пластины.

Съемка резца со стороны передней поверхности инструмента позволяет при помощи той же самой методики выделить область, соответствующую фаске износа. По выделенному контуру можно определить ее размеры, площадь, расположение относительно кромки режущей пластины.

### **2.3 Использование для процесса диагностики нейронных сетей**

После того, как был проведен полный набор технологических переходов, связанный с постепенным износом инструмента, был получен набор параметров, характеризующих вибрацию и звуковой сигнал процесса обработки. Данный набор признаков формирует входной вектор данных, которому сопоставляют параметры износа.

В данном случае отслеживался размерный износ, то есть смещение вершины режущей кромки, которое приводит к изменению диаметра заготовки. Кроме этого, определялись ширина фаски износа и высота фаски



износа, форма этой фаски, а также ее площадь и центр положения относительно крайней точки режущей пластины.

Для возможности прогнозирования сигнала было построено несколько математических моделей на основе статистического подхода. Кроме регистрируемых параметров в качестве входных данных были использованы режимы обработки: глубина резания, подача и скорость резания.

Были построены регрессионные зависимости. В таблице в следующем разделе показаны параметры, полученные при выводе данных зависимостей, включая коэффициент значимости каждого из входных параметров.

Кроме статистического подхода нужно использовать методы машинного обучения. В данном случае можно применить как регрессионные нейронные сети, так и классифицирующие. Последние сети определяют степень износа по двум категориям: допустимый и недопустимый. Степень разделения можно увеличить, разбив эти две категории на подклассы в соответствующей области черновой или чистовой обработок.

Алгоритм работы с нейронной сетью следующий. Подготавливается набор обучающих данных с входным и выходным векторами. Эти данные сопоставляются между собой как известные факторы. Задача состоит в том, чтобы при обучении нейронной сети настроить ее параметры таким образом, чтобы ошибка между известным входом и выходом была минимальной. Для этого необходимо обучающую выборку разбить на три под выборки. Первая собственно представляет обучающие данные. Вторая необходима для того, чтобы исключить переобучение нейронной сети. Называется валидационной (validation) выборкой. Третья выборка – тестирующая, необходима для проверки качества обучения нейронной сети.

До начала процедуры обучения необходимо выбрать тип нейронной сети, и определиться с ее архитектурой. Это подразумевает под собой выбор количества слоев, количества нейронов в каждом слое, выбор функции активации в каждом слое, определиться с алгоритмом обучения. Кроме этого

можно задать количество циклов или итераций обучения или задать минимально необходимую ошибку обучения.

После этого начинается процедура обучение нейронной сети, которая заканчивается или через заданное количество итераций или при достижении заданной точности обучения.

Далее этот алгоритм преобразуется в самостоятельное приложение, которое загружается в управляющий контроллер металлорежущего станка. Необходимые диагностические данные поступают на вход этой программы, после чего выводится сигнал о характере износа: допустимый или недопустимый, время остаточной работы, величина и характер износа.

В перспективе данный алгоритм можно использовать для коррекции режимов обработки. В соответствии со степенью износа будет проводиться корректировка подачи или скорости резания для того, чтобы можно было обеспечить или точность и качество обработки или повысить стойкость режущего инструмента.

#### Выводы по разделу

Приведена методика экспериментальных исследований по определению возможности диагностики состояния инструмента по характеру и параметрам звукового сигнала.

### 3 Экспериментальное исследование износа инструмента

#### 3.1 Изображения резца

При проведении эксперимента использовался токарно-винторезный станок 1К62. Диаметр закрепляемой заготовки равнялся 60 мм. Вылет вала был 180 мм. Скорость резания определяется оборотами, которые были приняты равными 500 оборотов в минуту. Подача составляла 0,084 мм/об. Глубина резания принималась на всех переходах постоянной величиной, равной 0,5 мм на сторону. Регистрировались на каждом проходе три вида режущего инструмента с трехгранной пластиной: вид со стороны передней поверхности, вид со стороны главной и вспомогательной задней поверхности (рисунки 10).



Рисунок 10 - Фото резца со стороны задней поверхности

Регистрировался уровень звукового сигнала при помощи микрофона, встроенного в смартфон. Частота дискретизации равнялась 48000 Гц. Звук записывался на две звуковые дорожки, соответствующие стерео сигналу. После регистрации на временной развертке данного сигнала выделялись три характерных участка Участок холостого хода, когда заготовка вращается без перемещения режущего инструмента.

Далее заготовка приводилась во вращение, осуществлялся подвод режущего инструмента до заготовки на рабочей подаче.

Сигнал, полученный при обработке, имеет несколько участков. Последний участок, где производится сам процесс резания. Каждый из этих участков (рисунок 11) имеет набор статистических показателей: среднее значение, среднеквадратичное значение, размах, медиана, мода.

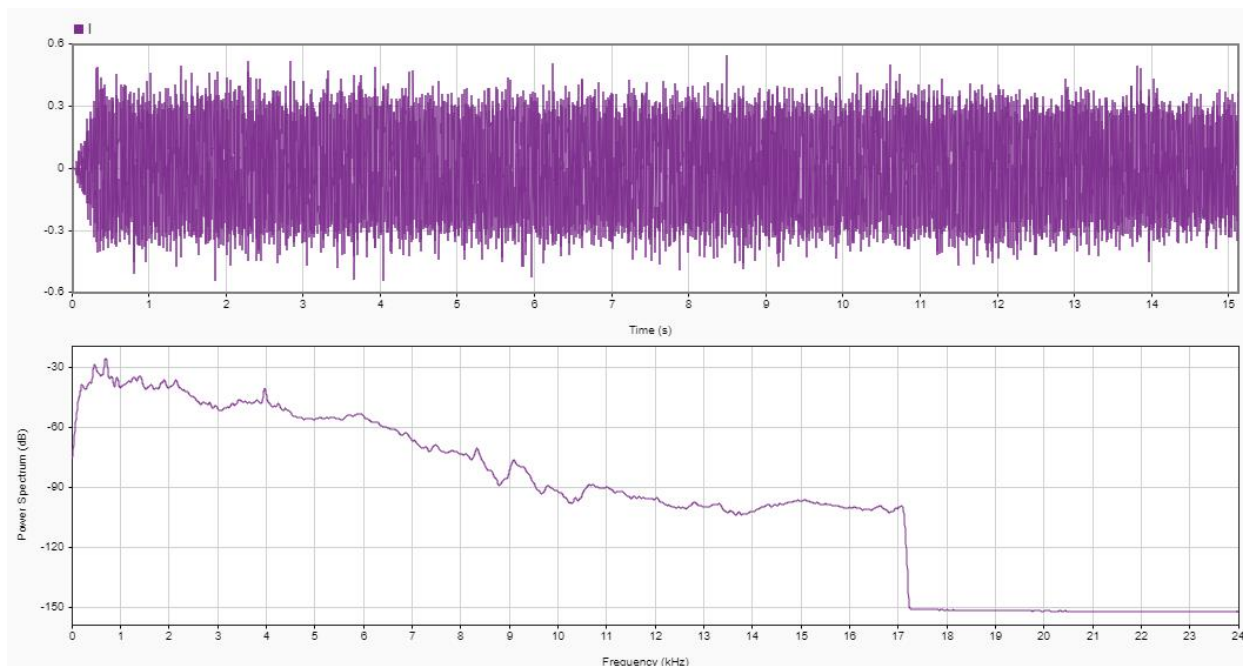


Рисунок 11 – Запись сигнала с его спектром

Каждый из таких участков подвергался спектральному анализу путем разложения в ряд Фурье на основе быстрого преобразования Фурье, а также определялся энергетический спектр колебаний (рисунок 12).

После прогона сигнала через полосовой фильтр, на котором была указана частота вынужденных колебаний, связанная с частотой вращения заготовки, сигнал очищался от вынужденных колебаний. Он представлен на следующих изображениях (рисунки 13-15).

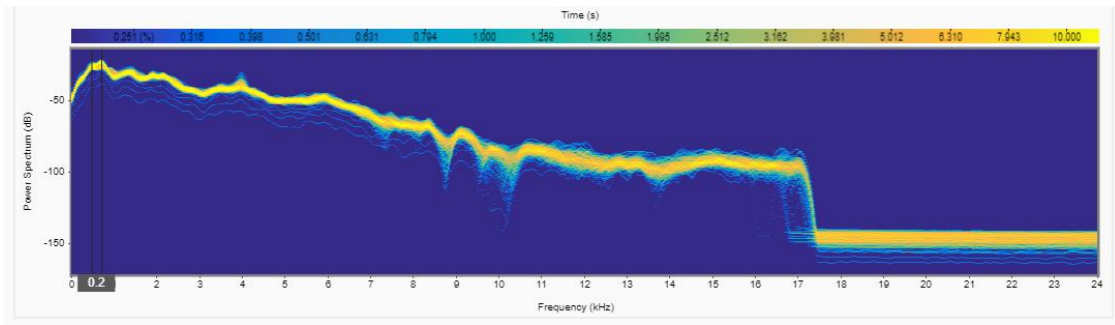


Рисунок 12 – Запись энергетического спектра сигнала

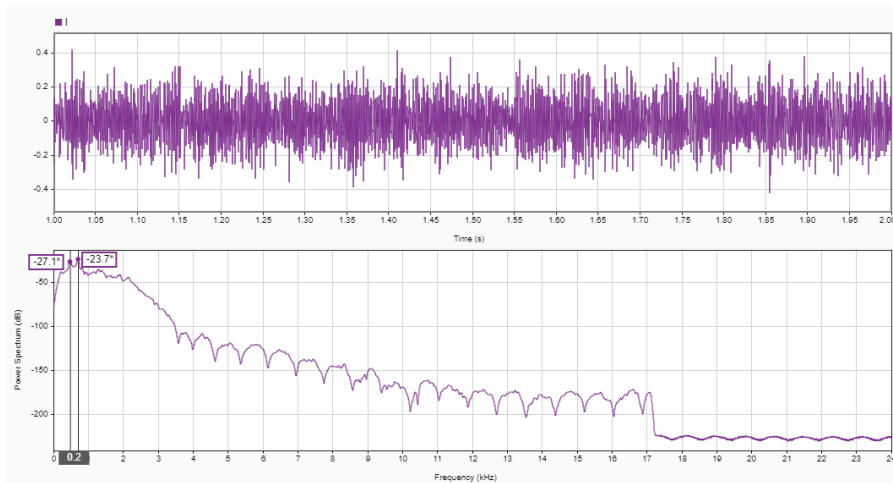


Рисунок 13 – Запись сигнала и его спектра после низкочастотного фильтра с частотой среза 100 Гц

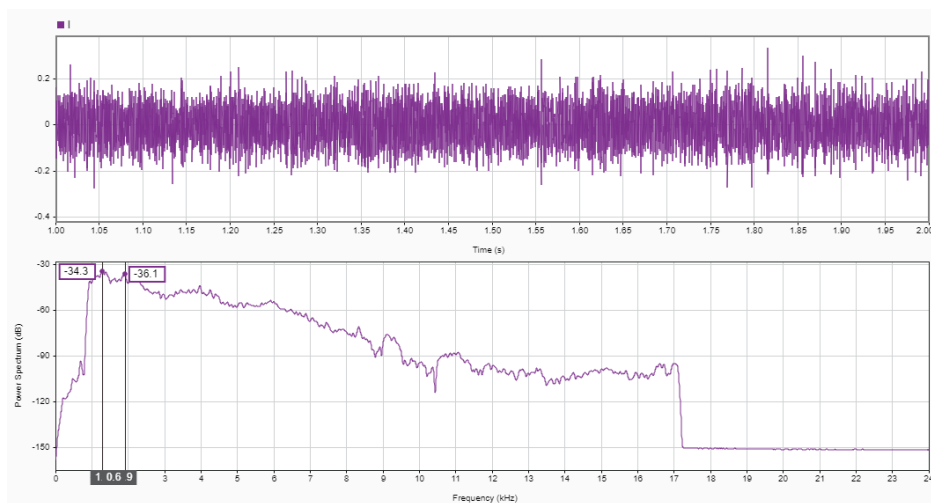


Рисунок 14 – Запись сигнала и его спектра после высокочастотного фильтра с частотой среза 1000 Гц

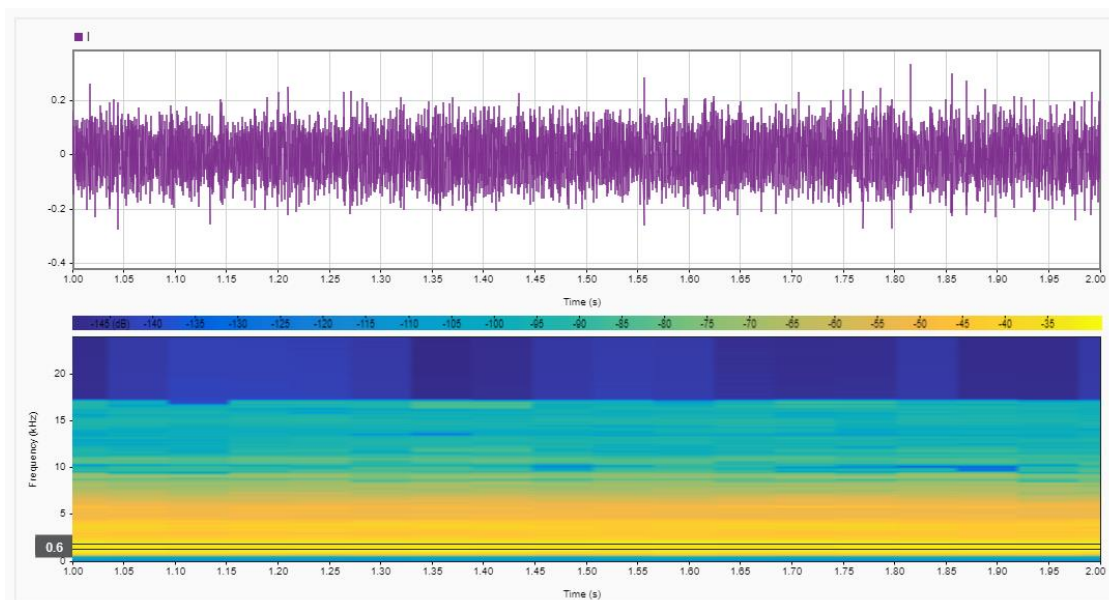


Рисунок 15 – Запись сигнала и его диаграммы частота-время после высокочастотного фильтра с частотой среза 1000 Гц

В результате анализа данного сигнала выделяются параметры, которые связаны непосредственно с процессом резания.

### 3.2 Анализ износа

Для выделения контуров изношенной области режущей части инструмента можно использовать различные фильтры, например фильтры Лапласа, Собеля или Прыюитта (рисунок 16).

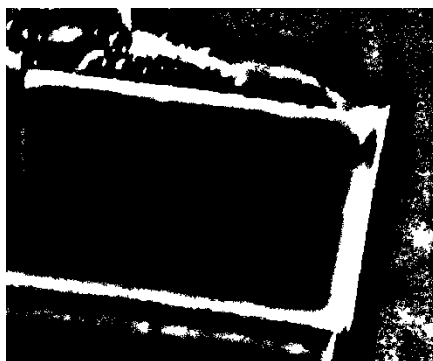


Рисунок 16 – Изображение резца после поиска границ в результате сегментирования изображения и его бинаризации

Необходимо загрузить фотографию, вырезать нужную область, провести бинаризацию. Затем определить статистику заданной области. В тоновом изображении выделить границу области и также определить статистику – площадь, размеры (высоту и ширину).

### **3.3 Анализ сигнала**

После загрузки сигнала он был обработан в математическом пакете Matlab. Дискретизация с частотой 48000 Гц. Сигнал был проанализирован методами частотного анализа.

Для каждого прохода общая структура сигнала выглядит следующим образом. Сначала идет включение станка с разгоном шпинделя. Уровень звукового сигнала увеличивается от нуля до установившегося значения. После этого включается рабочая подача, что на общем уровне звукового сигнала практически не сказывается. Врезание инструмента в заготовку и выполнение резания - третий рабочий этап.

Для соответствующих этапов были выделены участки с количеством отсчетов от 1 000 до 2000. После этого отчеты были загружены в анализатор сигнала и построены амплитудно-частотные характеристики.

Для первого прохода на рисунке 17 показан спектр сигнала холостого хода, на котором выделяются две пиковые характеристики, соответствующие 83 и 244 Гц. При учете частоты вращения заготовки, 500 об/мин, что соответствует 8,3 Гц, полученные пиковые значения соответствуют высшим гармоникам (для данных частот 10 и 29). На рисунке 18 показан спектр сигнала в процессе резания, где видно, что пиковые характеристики перемещаются в высокочастотную область. Наивысшее значение имеет частота в районе 1400 Гц.

Аналогичный анализ на других участках подтверждает данную особенность сигнала. При этом на частотах выше 3000 Гц уровень амплитуд сигнала нестабильный и значительно изменяется.

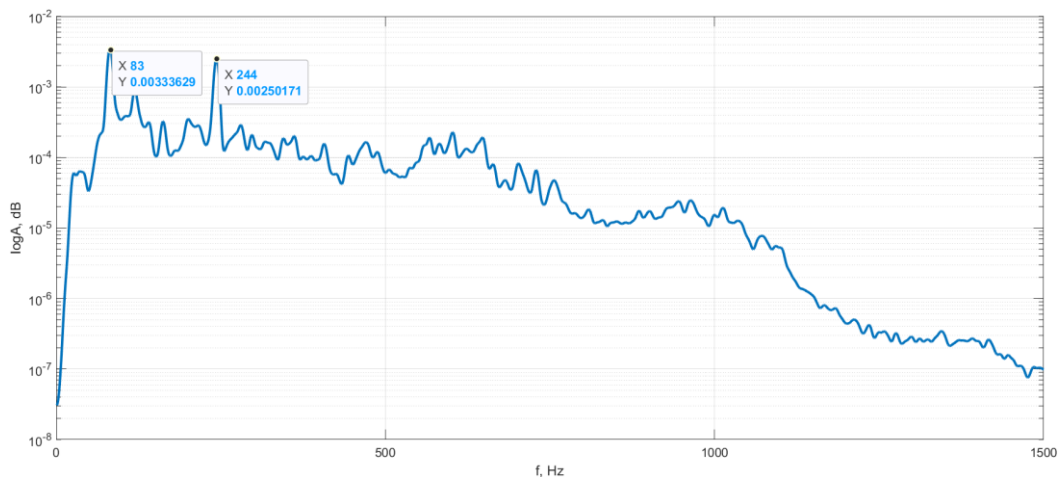


Рисунок 17 – Спектр холостого хода

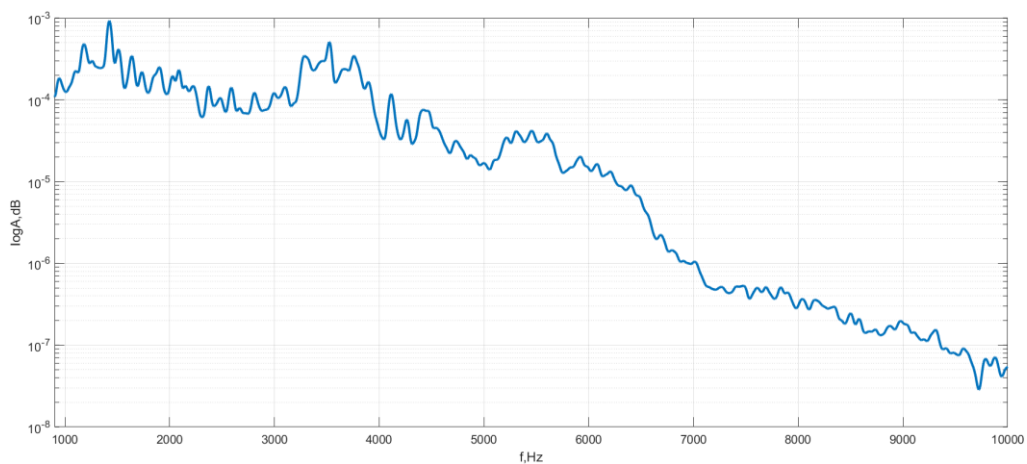


Рисунок 18 – Спектр при резании (1 проход)

Сам сигнал показан в виде временной развертки на рисунке 19. Пример спектра сигнала, выполненный на третьем парходе со значительным возрастанием уровня возмущения в высокочастотной части спектра и общим подъемом уровня звукового сигнала в том числе. Первая пиковая частота 1400 Гц незначительно снизилась по сравнению с первоначальным значением на первых проходах. Спектр также показывает качественные изменения звукового сигнала при износе инструмента [30].



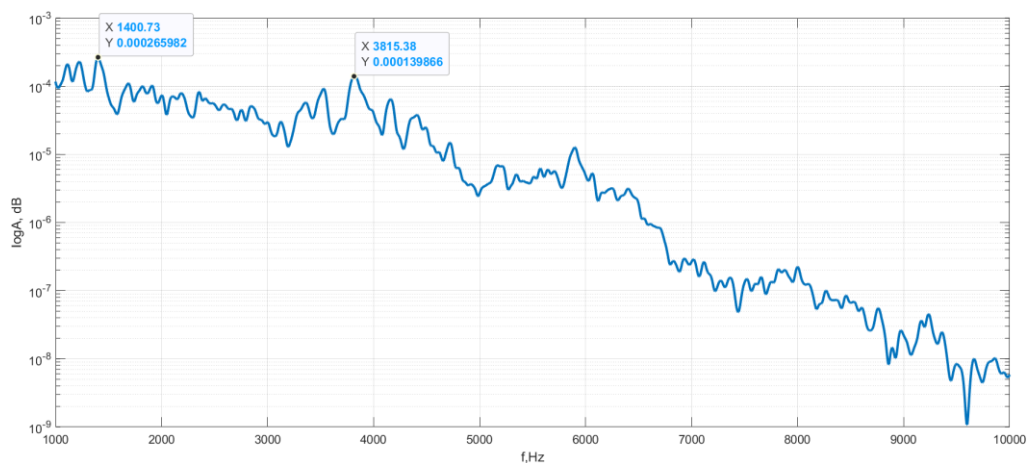


Рисунок 19 - Спектр сигнала на 3 проходе

Для ограниченных участков звукового сигнала с количеством точек от 1000 до 2000 был проведен анализ параметров сигнала. Для выделенных участков были проанализированы сигналы с формированием набора базовых статистических характеристик представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Базовые статистические характеристики

Параметр	Минимум м	Максимум м	Среднее	Медиана	Мода	std	Размах
1	2	3	4	5	6	7	6
Холостой ход 1	-0,6079	0,558	0,000001 12	0,000467	-0,3193	0,1234	1,1659
Резание 1	-0,5782	0,6272	0,000003 04	0,00124	-0,4136	0,1371	1,205
Холостой ход 2	-0,5995	0,5952	- 0,000024 6	0,000353	0,1645	0,1208	1,195
Резание 2	-0,6007	0,6205	-	-	-0,09123	0,1494	1,221
-	-	-	0,000000 63	0,000561 3	-	-	-
Холостой ход 3	-0,5062	0,5065	- 0,000011 5	- 0,000111	-0,079	0,1156	1,013
Резание 3	-0,6066	0,574	- 0,000022 5	-0,00095	-0,2498	0,1513	1,181

В статистическом пакете R были получены статистические линейные модели, которые позволяют рассчитать величину износа по параметрам значащих параметров сигнала о процессе резания. Предварительные данные значения были проверены на корреляцию с целью отбросить факторы, которые дублируют характер влияния на анализируемую характеристику.

### 3.4 Формирование нейронных сетей

Для полученных данных с использованием методов машинного обучения используются два подхода. Первый выполняет аппроксимацию по входным параметрам, в качестве которых выступают значащие характеристики анализируемого сигнала. На выходе сформированной нейронной сетью получается прогнозное значение величины износа режущего инструмента, которая в данном случае представляет размер фаски износа. Для этого используем двухслойная нейронная сеть с обратным распространением сигнала. Количество входов на данной сети равняется количеству значащих факторов сигналов (рисунок 20).

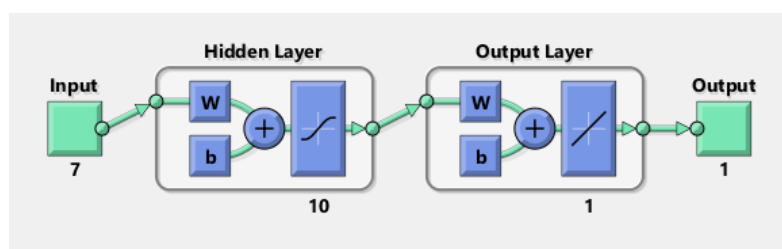


Рисунок 20 - Структура аппроксимирующей нейронной сети

Количество нейронов в скрытом слое определяется в ходе подбора параметров сети с целью минимизации величины рассогласования фактических данных, используемых при обучении, и моделируемого сигнала. В скрытом слое используется функция активации - сигмоидальная. В выходном слое для одного нейрона используется линейная функция

активации. При загрузке обучающих данных они разбиваются на 3 группы. Большая часть (70%) идет на обучение, 15% уходит на остановку обучения сети с целью не допустить ее переобучения и 15% относится к тестовым данным (рисунок 28). Метод обучения, используемый для Левенберга-Маркварта. Результаты обучения представлены на двух графиках (лист 2, 3 графической части), где показаны ошибки для каждой из групп в данных, используемых при обучении сети, и показаны итоговые результаты обучения.

Кроме этого, используется нейронная сеть для классификации степени износа по группам. В результате обучения получена нейронная сеть, представленная на рисунке 21.

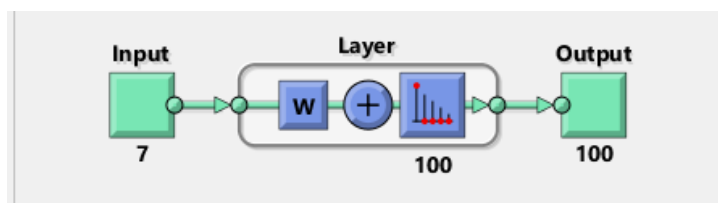


Рисунок 21 – Структура классифицирующей нейронной сети

В данном случае использовались три группы (исходный, нормальный и повышенный износ). Для этого сформировано сеть с количеством нейронов равным 30, где происходит автоматическое распределение входных данных по группам, соответствующим трем группам износа.

#### Выводы по разделу

В разделе приведены результаты исследования процесса износа по звуковому сигналу, который регистрировался на микрофон. Данный сигнал обрабатывался частотными методами с определением информативных признаков. По ним был сформирован вектор для обучения нейронной сети, которая позволяет на основе параметров вибрационного сигнала определять степень изношенности режущего инструмента.

## **4 Технология изготовления вала**

### **4.1 Анализ исходных данных**

В качестве примера использования предложенного способа диагностики состояния режущего инструмента рассмотрим технологию изготовления мало жесткого крупногабаритного ступенчатого вала ротора. Он работает в насосной установке и предназначен для создания рабочего давления за счет вращения винтовых лопаток, расположенных на центральной шейке вала.

Вал работает в условиях динамических нагрузок, значительных по величине, при действии агрессивных рабочих сред. Вследствие этого выбран материал - коррозионностойкий сплав 12X14Н10Т. Он имеет необходимые физико-механические свойства по прочности, пластичности, коррозионной стойкости.

### **4.2 Анализ технологичности**

Анализ технологичности детали выполним по конструкции, обрабатываемости, получению заготовки и базированию с закреплением.

Конструкция детали относится к маложестким из-за большой общей длины. Поэтому при установке обязательно необходимо учитывать большой пролет между опорами. Для компенсации данного недостатка необходима дополнительная опора или несколько опор - люнетов. В первом случае ее можно ставить на суппорт вместе с инструментом. Во втором случае это будет система неподвижных опор вдоль оси заготовки.

Конструктивные элементы стандартные. Фаски, канавки, галтели унифицированные и стандартные. Форма поверхностей простая и доступная для инструментов и контроля.

Протяженность обрабатываемой поверхности значительная, что будет приводить к очень сильному влиянию износа режущего инструмента на стабильность точности и качества обработанных поверхностей.

Материал имеет низкий коэффициент обрабатываемости. Кроме этого он характеризуется, из-за высокой пластичности, сливным стружкообразованием. При этом разделить стружку данного материала является сложной технологической задачей.

Заготовку данного вала можно получить и прокатом и поковкой.

По базированию и закреплению будет следующая проблема. Вал является крупногабаритным объектом со значительной массой (более 200 кг). Его трудно кантовать и необходимо использовать грузоподъемные устройства.

Манипуляции с крупным валом будут приводить к значительному вспомогательному времени на установку и снятие заготовки, а также на транспортировку ее между станками.

Данная деталь по технологичности имеет низкую оценку.

### **4.3 Выбор заготовки**

Так как конфигурация ступенчатого вала характеризуется достаточно значительными перепадами, которые достигают 20 мм на сторону на значительной длине (более 0,5 м), целесообразным считается выбор заготовки методом штамповки.

Форма заготовки делается упрощенной пяти ступенчатой симметричной формы. Из-за значительных габаритов детали припуски будут также значительными.

На самой точной ступеньке вала их величина будет равняться 3,8 мм. Отклонение размеров, припуски и остальные технические требования назначаем по ГОСТу 7505-89 на штамповки.

Параметры выбранной заготовки будут следующие. Для штамповки на прессе класс точности выбирается Т4. По конфигурации заготовки: коэффициент отношения массы детали к массе фигуры описанный вокруг нее больше 0,62 и поэтому класс сложности С1. Группа материала из-за значительного содержания легирующих добавок - МЗ.

Для массы более 200 кг определяется соответствующий диапазон данного параметра.

По совокупности исходных данных определяется исходный индекс, который в данном случае равняется 15. По нему, и с учетом нормируемых размеров, определяются припуски и допуски на поверхности.

Спроектированная штамповка представлена на листе графической части.

#### **4.4 Разработка маршрута**

Технологический маршрут обработки будет составлен из традиционных технологических переходов по обработке типовых поверхностей вала.

Для обработки шеек применим четырех ступенчатый маршрут из чернового, получистового и чистового обтачивания и финишного перехода - полирования.

В целом технология будет являться классической с точки зрения установки заготовки вала. Поэтому на первой операции подготовим чистовые технологические базы путем торцового фрезерования крайних плоскостей с зацентровкой базовых отверстий на станке 2Г942.

Далее, при установке вала в патрон и поджима задним центром с использованием самоцентрирующего люнета, производим последовательно черновую обработку за два установа на токарной операции. Используется автоматизированный станок с числовым программным управлением отечественного производства НТ500Ф3, который позволяет произвести

формирование ступенчатой формы заготовки вала со снятием напусков с максимальной производительностью.

На токарной операции установка заготовки вала производится в патроне с поджимом центром и использованием люнета. Инструментом являются контурные сборные резцы с механическим креплением режущих пластин. Далее производим чистовую обработку по контуру с обработкой канавок под выход инструмента, а также обработку фасок.

На универсальном вертикальном фрезерном станке с крестовым столом 6530К производим последовательно обработку трех шпоночных пазов. Установка заготовки производится в сборно-разборное переналаживаемое приспособление с призмами с фиксацией прижимами-прихватами. Так как точность шпоночных пазов высокая, применяем два технологических перехода: черновой и чистовой фрезерованием концевыми фрезами.

После фрезерной операции производится чистовое точение по контуру. Далее следует термическая операция для нормализации. После этого происходит правка чистовых баз в виде центровых отверстий на центрошлифовальном станке.

После правки центров происходит обработка тонкая точением по контуру. Далее полировка на последней операции шеек под подшипники для обеспечения заданной шероховатости.

Режимы резания и нормирование выполнены по справочным данным и результаты сведены в технологическую документацию, представленную в приложении А.

#### **4.5 Проектирование операции**

Для использования предложенного алгоритма диагностики состояния режущего инструмента используем токарную черновую и чистовую операции.

При выполнении технологических переходов на черновых режимах инструмент испытывает максимальные нагрузки и износ определяется преимущественно силовыми параметрами. На чистовых переходах при возрастании скорости резания преобладать начинают температурные факторы.

Из-за большой длины обрабатываемой заготовки и плохого коэффициента обрабатываемости материала, износ режущего инструмента будет значительный, а стойкость его будет невысокая.

Использование предложенного алгоритма позволит использовать ресурс режущего инструмента максимально полно. При этом обеспечивается максимальная надежность технологического процесса с точки зрения исключения брака вследствие поломки режущих пластин, так как данное состояние может быть отслежено системой диагностики.

В результате происходит повышение фактической стойкости инструмента по сравнению с нормированной стандартной на 20%, а снижение брака при изготовлении деталей с такой системой диагностики снижается на 10%.

Для токарных проходов общая длина перемещений составит

$$L_{\Sigma} = \sum(L_{i\text{ рх}} + l_{\text{вр}} + l_{\text{н}}), \quad (1)$$

где  $L_{i\text{ рх}}$  – длина рабочего хода, мм;

$l_{\text{вр}}$  – врезание резца, мм;

$l_{\text{н}}$  – недобег резца, мм.

Для первых черновых проходов общая длина перемещений составит

$$L_1 = 1140 + 6 \cdot 3,5 + 6 \cdot 3,5 + 35 + 10 \cdot 110 = 2317 \text{ мм.}$$

Для получистовых проходов общая длина перемещений составит

$$L_2 = 1140 + 2 \cdot 3,5 + 35 = 1182 \text{ мм.}$$

Для чистовых проходов общая длина перемещений составит



$$L_3 = 1140 + 2 \cdot 3,5 + 35 = 1182 \text{ мм.}$$

Тогда с учетом подачи по операциям, 0,6, 0,4 и 0,1 мм/об, скорости резания 105, 240 и 295 м\мин, оборотов 167, 382 и 470 об/мин, минутная подача составит 100, 153 и 47 мм/мин.

С учетом этого основное время

$$T_o = \frac{L}{S_{\text{мин}}}, \quad (2)$$

где  $L$  – общая длина перемещений, мм;

$S_{\text{мин}}$  – минутная подача, мм/мин.

Тогда по переходам

$$T_{o1} = \frac{2317}{100} = 23,2 \text{ мин.}$$

$$T_{o2} = \frac{1182}{153} = 7,7 \text{ мин.}$$

$$T_{o3} = \frac{1182}{47} = 25 \text{ мин.}$$

Суммарно время работы токарных резцов на всех переходах составит 56 мин.

«Штучно-калькуляционное время [14]:

$$T_{\text{шт}} = \frac{T_{\text{пз}}}{n} + T_o + T_v + T_{об} + T_{от}, \quad (3)$$

где  $T_{\text{пз}}$  – время на подготовку и завершение наладочных работ, мин;

$T_o$  – основное время;

$T_v$  – вспомогательное время;

$T_{об}$  – время на обслуживание рабочего места;

$T_{от}$  – время перерывов на отдых и личные надобности», [14].

Партия запуска 47 деталей, а время на подготовку и завершение наладочных работ 20 мин.

Суммарно:

$$T_{шт1} = \frac{20}{47} + 23,2 + 5 + 3,1 = 31,7 \text{ мин.}$$

$$T_{шт2} = \frac{20}{47} + 7,7 + 5 + 1,4 = 14,5 \text{ мин.}$$

$$T_{шт3} = \frac{20}{47} + 25 + 5 + 3,3 = 28,7 \text{ мин.}$$

Режимы обработки сведены в операционную карту в приложении Б.

Для расточной операции расчет норм времени сведен в операционную карту в приложении Б.

### Выводы по разделу

В разделе выполнено проектирование технологического процесса изготовления длинномерного вала симметричной формы со шпоночными пазами. С учетом среднесерийного типа производства была выбрана заготовка в виде штамповки. Спроектированная заготовка включает в себя назначенные припуски и допуски на размеры.

Разработан технологический маршрут, представленный в графической части и в приложениях А и Б. Выбрано высокопроизводительное автоматизированное оборудование, которое обеспечивает заданную точность и качество поверхности. Схема установки заготовки учитывает небольшую жесткость вала, обеспечивая ее повышение за счет использования дополнительных технологических опор. При проектировании технологических операций с использованием переходов точения учитывается использование системы диагностики режущего инструмента, разработанной в предыдущих разделах. Приведены технико-экономических показатели, которые характеризуют эффективность методики.

## **5 Безопасность и экологичность технического объекта**

Задача – разработка мер по безопасности труда для спроектированной технологии изготовления мало жесткого крупногабаритного ступенчатого вала ротора.

### **5.1 Конструктивно-технологическая характеристика объекта**

Технология изготовления предложенной конструкции вала из коррозионно-стойкого сплава 12Х18Н10Т включает следующие операции. На первой операции готовят чистовые технологические базы путем торцового фрезерования крайних плоскостей с зацентровкой базовых отверстий на станке 2Г942. Далее, при установке вала в патрон с поджимом задним центром и использованием самоцентрирующего люнета, производится последовательно черновая обработка за два установа на токарной операции. Используется станок НТ500Ф3. Инструментом являются контурные сборные резцы с механическим креплением режущих пластин.

Далее производится чистовая обработка. На универсальном вертикальном фрезерном станке с крестовым столом 6530К производится последовательно обработка трех шпоночных пазов. Установка заготовки производится в сборно-разборное переналаживаемое приспособление с призмами с фиксацией прижимами-прихватами. Фрезерование концевыми фрезами.

Далее следует термическая операция для нормализации. Для термической операции используется печь с индуктивным нагревом. После этого происходит правка чистовых баз на центрошлифовальном станке. Используется переход полирование на токарном станке.

Лимитирующей операцией является токарная, которая используется для обработки полного контура вала. Обработка ведется с использованием полусинтетической смазочно-охлаждающей жидкости Nocus 795 SB.

## **5.2 Идентификация профессиональных рисков**

К опасным и вредным производственным факторам в технологии изготовления вала в зависимости от выполняемой операции относятся следующие производственные риски. На лезвийных и термической операциях это будут факторы, связанные с высоким уровнем температуры заготовки и инструмента. На черновой токарной обработке, а также на полировальном переходе будет загрязнение воздушной среды в зоне дыхания вследствие запылённости из-за мелких частиц, удаляемых при обработке, а также связанные с испарением СОЖ.

Обработка проводится на технологическом оборудовании. Поэтому будут факторы, связанные с воздействием электрического тока и электромагнитных полей.

Процесс обработки происходит при высоких оборотах заготовки и инструмента, что будет вызывать повышенный шум и вибрации.

Режущий инструмент лезвийный, стружка, а также острые кромки заготовки могут привести к травмированию станочников.

Операционный контроль связан с перенапряжением анализаторов.

Выполнение вспомогательных технологических переходов для повторяющихся заготовок сопровождается психофизиологическим воздействием. Источниками данных факторов являются как сам станок, так и процесс резания и оснащение.

## **5.3 Методы и технические средства снижения рисков**

Для снижения указанных рисков при работе на технологическом оборудовании применяются средства индивидуальной защиты в виде специальной защитной одежды, обуви, перчаток, а также защитных очков.

На самом оборудовании применяется защитная экранировка с местной системой вентиляции для удаления испаряемых газов и образующейся пыли

и мелкой стружки. Кроме этого, во всём производственном цеху используется общая вентиляция вытяжного типа с системой фильтрации выходящего воздуха.

Исполнители обязательно проходят инструктаж по охране труда.

Для защиты от поражения электрическим током используется заземление и изоляция токоведущих элементов оборудования, а также предохранители.

В целях снижения психофизиологического воздействия используются перерывы в работе, а также правильная организация рабочего места с достаточным уровнем освещения и вентиляции.

#### **5.4 Обеспечение пожарной безопасности объекта**

Технология осуществляется в трёх цехах. Обработка по формообразованию проводится в механическом цехе, получение заготовки в прессовом, термообработка в термическом цеху. Для данных подразделений класс пожарной опасности будет относиться к категориям В и Е, где опасными факторами при пожаре являются пламя, искры, а также неисправности электропроводки. Это может привести при пожаре к разрушению оборудования с выносом высокого напряжения на металлические части. В случае тушения пожара может оказывать вредное воздействие огнетушащее средства.

Для тушения пожара рабочее подразделение оборудуется набором огнетушителей, пожарными гидрантами с напорными пожарными рукавами, средствами по пожарному оповещению с управление эвакуацией. Также используются автоматические извещатели, а для тушения пожара непосредственно исполнителями могут использоваться ручной инструмент – лопаты и топоры, ящики с песком.

Для защиты органов дыхания используют средства индивидуальной защиты в виде противогазов и респираторов.

Все исполнители обязательно проходят пожарный инструктаж на регулярной основе.

### **5.5 Обеспечение экологической безопасности технического объекта**

Разработанная технология с точки зрения воздействия на окружающую среду содержит следующие опасные факторы.

Воздействие на воздушную среду заключается в возможных токсических испарениях при высокотемпературной обработке (чистовое точение и термообработка).

С точки зрения вредного воздействия на сточные воды опасными факторами в данной технологии являются взвешенные вещества и нефтепродукты, а также эмульсолы.

С точки зрения загрязнения литосферы образуются отходы в виде стружки и ветоши.

Для снижения влияния вредных факторов при воздействии на воздушную среду можно использовать фильтрационные системы, для снижения воздействия на сточные воды - локальную многоступенчатую очистку сточных вод, а для снижения влияния вредных факторов на литосферу - утилизация полученных отходов на полигоне.

#### **Выводы по разделу**

В ходе выполнения раздела по безопасности и экологичности технологического процесса изготовления вала, включающей в себя штамповку, токарную, фрезерную, термическую, моечную и контрольную операции, были получены следующие результаты.

Для предложенного технологического процесса проанализированы основные операции и оборудование, а также материалы и оснащение. С учётом проведённого конструкторско-технологического описания выявлены

опасные и вредные производственные факторы, характерные для соответствующих этапов технологии изготовления вала, к которым отнесены высокотемпературные воздействия, возможные повреждения острыми кромками, поражение электрическим током, загрязнение воздушной среды, шум, вибрации и психофизиологические воздействия.

С учётом указанных факторов разработаны мероприятия по защите работников, участвующих в данной технологии в виде средств индивидуальной защиты, а также защитных мер по организации работы в виде соответствующих систем вентиляции, освещения, режима работы, а также мер по подготовке работника в виде различных инструктажей.

Проанализирована пожарная безопасность подразделений, участвующих в технологии изготовления вала и предложены меры по ее обеспечению. Данные организационно-технические меры включают в себя подбор соответствующего инструмента, мероприятий по организации работы, а также меры, необходимые в случае возникновения пожара.

Проанализированы вредные экологические факторы. Предложены меры по снижению данных вредных воздействий путём организации общей вентиляции, системы очистки сточных вод, а также утилизации отходов.

## 6 Экономическая эффективность работы

Цель раздела – рассчитать технико-экономические показатели проектируемого технологического процесса и произвести сравнительный анализ с показателями базового варианта и определить экономический эффект от предложенных в проекте технических решений.

Данный раздел, являются итоговым в написании бакалаврской работы, в ходе которой предлагается внести изменения в технологический процесс изготовления вала-шестерни, а именно внедрить систему диагностики инструмента в процесс обработки валов.

Подробное описание предложенных совершенствований описано в предыдущих разделах бакалаврской работы, а краткое их описание представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Краткое описание изменений процесса токарной обработки

Элементы технологического процесса	Базовый вариант	Проектный вариант
Оборудование	Токарный центр, модель UT-300SM	Токарный станок, модель UT-300SM
Оснастка	Центр вращающийся, люнет	Центр вращающийся, люнет, диагностическая система инструмента
Инструмент	Резец контурный сборный Т15К6	Резец контурный сборный Т15К6, увеличивается ресурс работы инструмента на 220%
Трудоемкость	$T_O = 55,9$ мин $T_{шт(шт-к)} = 74,9$ мин	$T_O = 55,9$ мин $T_{шт(шт-к)} = 74,9$ мин
Результат		Снижение брака на 10%

Для экономического обоснования предложенных совершенствований необходимо произвести расчеты ряда параметров согласно этапам алгоритму определения экономической эффективности технологических решений. Данный алгоритм состоит из 5 этапов, которые включают обязательное



выполнение соответствующих расчетов. Этапы выполнения алгоритма и сопровождающие их экономические расчеты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Этапы алгоритма определения экономической эффективности технологических решений

Номер и название этапа	Параметры, которые, собираются или определяются входе этапа	Формула расчета параметра
Этап 1. Сбор и расчет необходимых данных	<ul style="list-style-type: none"> <li>- «трудоемкость выполнения операций;</li> <li>- оборудование, оснастка и инструмент, применяемые в ТП;</li> <li>- технические характеристики оборудования (габариты и мощность);</li> <li>- количество необходимого оборудования (<math>H_{ОБ}</math>);</li> <li>- коэффициент загрузки оборудования (<math>K_3</math>)» [6]</li> </ul>	
Этап 2. Определение технологической себестоимости	<ul style="list-style-type: none"> <li>- «основной материал (<math>M</math>);</li> <li>- основная заработная плата рабочих (<math>З_{ПЛ.ОСН}</math>);</li> <li>- социальные отчисления (<math>НЗП</math>);</li> <li>- расходы на содержание и эксплуатацию оборудования (<math>P_{Э.ОБ}</math>);</li> <li>- технологическая себестоимость (<math>C_{ТЕХ}</math>)» [6]</li> </ul>	$M = M_3 \cdot Ц_M \cdot K_{ТЗ} - M_0 \cdot Ц_0$ $З_{ПЛ.ОСН} = З_{ПЛ.ОП} + З_{ПЛ.Н}$ $НЗП = З_{ПЛ.ОСН} \cdot K_C$ $P_{Э.ОБ} = P_{ОБ} + P_{ПР} + \dots + P_i$ $C_{ТЕХ} = M + З_{ПЛ.ОСН} + НЗП + P_{Э.ОБ}$
Этап 3. Определение полной себестоимости	<ul style="list-style-type: none"> <li>- «цеховая себестоимость (<math>C_{ЦЕХ}</math>);</li> <li>- производственная (заводская) себестоимость (<math>C_{ЗАВ}</math>);</li> <li>- полная себестоимость (<math>C_{ПОЛН}</math>)» [6]</li> </ul>	$C_{ЦЕХ} = C_{ТЕХ} + P_{ЦЕХ}$ $C_{ЗАВ} = C_{ЦЕХ} + P_{ЗАВ}$ $C_{ПОЛН} = C_{ЗАВ} + P_{ВН}$
Этап 4. Определение инвестиций	<ul style="list-style-type: none"> <li>- «капитальные вложения в основное технологическое оборудование (<math>K_{ОБ}</math>);</li> <li>- сопутствующие капитальные вложения (<math>K_{СОП}</math>);</li> <li>- общий объем инвестиций (<math>K_{ИНВ}</math>)» [6]</li> </ul>	$K_{ОБ} = \sum H_{ОБ} \cdot Ц_{ОБ} \cdot K_3$ $K_{СОП} = З_{ПР} + K_{ПР} + \dots + K_i$ $K_{ИНВ} = K_{ОБ} + K_{СОП}$
Этап 5. Экономическое обоснование изменений технологического процесса	<ul style="list-style-type: none"> <li>- «чистая прибыль (<math>П_{ЧИСТ}</math>);</li> <li>- срок окупаемости (<math>T</math>);</li> <li>- чистый дисконтированный доход (<math>ЧДД</math>);</li> <li>- индекс доходности (<math>ИД</math>);</li> <li>- доход на капитал (<math>Д_{КАП}</math>)» [6]</li> </ul>	$П_{ЧИСТ} = П_{ОЖ} - Н_{П}$ $T = \frac{K_{ИНВ}}{П_{ЧИСТ}}$ $ИД = \frac{Д_{ОБЩ.ДИСК}}{K_{ИНВ}}$

Этап 1. Сбор и расчет необходимых данных. Данный этап предполагает, на основе технологического процесса и его изменений, сбор таких данных, как стоимость оборудования, оснастки и инструмента, а так же площадь и мощность данного оборудования. Кроме этого необходимо произвести расчеты по определению количества оборудования и его загрузки.

Этап 2. Определение технологической себестоимости. Данный этап позволяет произвести расчеты слагаемых технологической себестоимости:

расходов на материал, заработную плату рабочих и операторов, социальных отчислений и расходов на содержание и эксплуатацию оборудования.

Этап 3. Определение полной себестоимости. В рамках данного этапа последовательно определяются такие виды себестоимости как: цеховая, производственная и полная.

Этап 4. Определение инвестиций. Этот этап позволяет определить необходимый объем инвестиций, который потребуется для осуществления предложенных совершенствований технологического процесса.

Этап 5. Экономическое обоснование изменений технологического процесса. На данном этапе выполняются все необходимые расчеты, связанные с определением срока окупаемости инвестиций и прибыльности предлагаемых мероприятий по совершенствованию технологического процесса.

Применение данного алгоритма, в совокупности с программным обеспечением Microsoft Excel позволяет получить числовые параметры всех необходимых значений для написания соответствующих выводов по этапам 2-5.

Так как этап 1 является предварительным, т.е. служит только для получения исходных данных, поэтому выводы по нему писать не будем.

Так как предложенное изменение касается только: эксплуатации инструмента, работы приспособления и системы управления работой оборудования и инструмента, то целесообразнее всего будет рассчитать расходы на инструмент ( $P_{И}$ ), приспособление ( $P_{ПР}$ ) и управляющую программу ( $P_{У.ПР}$ ). Все остальные параметры, сходящие в технологическую себестоимость, меняться по вариантам не будут, поэтому их рассчитывать и представлять на графике нет смысла. Результаты выполнения этапа 2 представлены на рисунке 22.

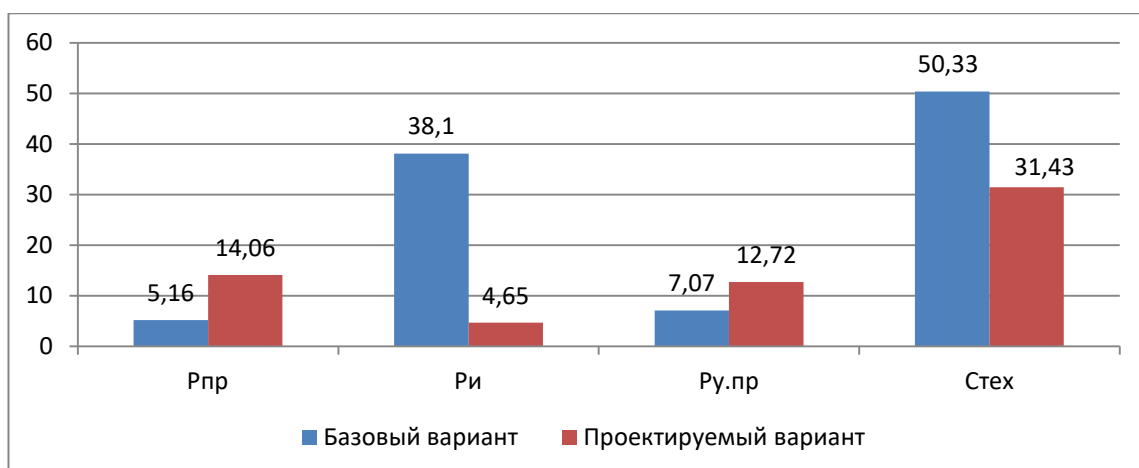


Рисунок 22 – Определение технологической себестоимости выполнения токарной операции процесса обработка по вариантам, руб.

Анализируя рисунок 22 можно сделать вывод о том, что итоговое значение технологической себестоимости уменьшается на 37,6%. Это не смотря на то, что только один параметр расходов снижаются, а остальные – имеют тенденцию к увеличению.

Результаты выполнения этапа 3 представлены на рисунке 23. Так как основой для определения полной себестоимости является технологическая себестоимость, то целесообразно данную величину включить в это графическое изображение.

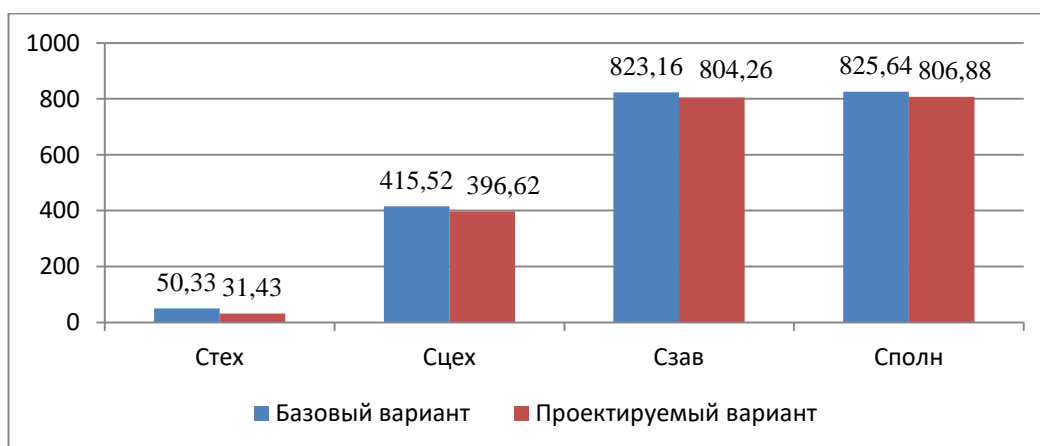


Рисунок 23– Определение полной себестоимости выполнения токарной операции процесса обработка по вариантам, руб.

Значения, представленные на рисунке 23, также имеют тенденцию к снижению в проектируемом варианте. Разница величины полной себестоимости между вариантами составляет 2,3%, т.е. в проектируемом варианте полная себестоимость меньше на 18,96 рубля.

Результаты выполнения этапа 4 представлены на рисунке 24.

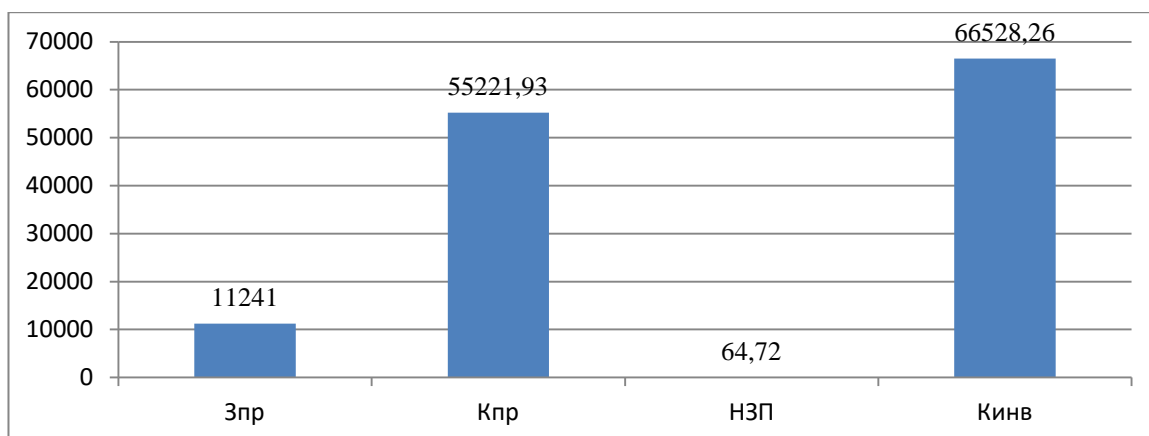


Рисунок 24 – Определение инвестиций на внедрение диагностической системы для токарной операции, руб.

Как видно из рисунка 24, инвестиций потребуют: затраты на проектирование ( $Z_{пр}$ ), затраты на приспособление ( $K_{пр}$ ), а точнее на закупку диагностической системы и незавершенное производство ( $НЗП$ ). Учитывая полученную величину перечисленных параметров, общий объем инвестиций ( $K_{инв}$ ) составит 66528,26 руб.

Результаты выполнения этапа 5 представлены в таблице 4.

При определении величины чистой прибыли использовалась формула, позволяющая учитывать изменение процента брака в процессе выполнения токарной операции, а именно его снижение на 10%. Другими словами, именно внедрение диагностической системы работы инструмента позволило получить такое значение чистой прибыли.

Таблица 4 – Экономическое обоснование изменений технологического процесса

Экономический показатель, единица измерения	Условное обозначение	Значение
Общий объем инвестиций, руб.	$K_{ИНВ}$	66528,26
Чистая прибыль, руб.	$P_{ЧИСТ}$	16684,8
Срок окупаемости, год	$T$	5
Чистый дисконтированный доход (интегральный экономический эффект), руб.	$ЧДД$	8585,1
Индекс доходности, руб. / руб.	$ИД$	1,13

Наиболее значимой величиной, из всех представленных в таблице 4, является числовое значение чистого дисконтируемого дохода, а именно то, что оно положительное. Это значит, что инвестиции вкладывать в предлагаемые изменения технологического процесса экономически целесообразно.

#### Выводы по разделу

Данные действия позволят получить дополнительную прибыль на каждый вложенный рубль в размере 1,13 рублей, что подтверждает значение индекса доходности.

## Заключение

В представленной работе приведены результаты исследования износа режущего инструмента и связанные с ним изменения информационных сигналов, полученных из звукового сигнала, снятого с микрофона, который записывал шум, возникающий в ходе обработки. Полученные данные были обработаны статистически, из них полученные базовые статистические параметры, которые использовались для определения степени износа. Для верификации предложенной методики был использован метод непосредственного контроля степени износа, получаемый на реальном объекте и на изображении фаски режущего инструмента.

Фотография задней поверхности инструмента обрабатывалась с выделением контура фаски износа.

Получены статистические регрессионные зависимости степени износа от входных параметров, в качестве которых выступали режимы резания, а также набор количественных характеристик вибрационного и звукового сигналов. Кроме этого использовались методы машинного обучения в частности, нейросетевое моделирование с использованием нейронной сети с обратным распространением сигнала. Сформированная нейронная сеть модели износа позволяет сформировать алгоритм контроля износа режущей пластины с учетом технологических параметров.

Для примера использования такой диагностической системы спроектирован процесс изготовления вала из коррозионностойкого материала. Использование системы диагностики позволит обеспечить максимальное использование ресурса инструмента со снижением процента брака. Своевременное вмешательство в ход процесса в случае критического состояния инструмента обеспечивает повышение точности и качества обработки. Это дает экономию на расходах на инструментальное обеспечение и снижает технологическую себестоимость изготовления вала.

## Список используемых источников

1. Агамалов, О.Н. Оценка технического состояния электрооборудования в реальном масштабе времени методом нейро–нечеткой идентификации/ О.Н. Агамалов// Exponenta Pro. – 2003.–№2.–С.52–58.
2. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Моделирование сил резания и определение вибродиагностических признаков дефектов концевых фрез // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 1 (33). С. 39-47.
3. Бурдо Г.Б., Адерорхо К.И. Анализ методов диагностики состояния режущей кромки инструмента // Наука, техника и образование. 2016. № 12 (30). С. 47-51.
4. Выбор состава и структуры износостойких наноструктурных покрытий для твердосплавного режущего инструмента на основе квантово-механического моделирования : учеб. пособие / Ю. Г. Кабалдин, О. В. Кретинин, Д. А. Шатагин, Е. Е. Власов. - Москва : Инновационное машиностроение, 2017. - 216 с. : ил. - (Для вузов). - URL: <https://e.lanbook.com/book/107158> (дата обращения: 02.03.2020). - Режим доступа: Электронно-библиотечная система "Лань". - ISBN 978-5-9500364-6-0. - Текст : электронный. URL: <https://e.lanbook.com/book/107158>
5. Грубый, С. В. Физические закономерности процесса изнашивания твердосплавных и алмазных инструментов : учеб. пособие / С. В. Грубый. - Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. - 128 с. : ил. - URL: <https://e.lanbook.com/book/52259> (дата обращения: 24.01.2020). - Режим доступа: Электронно-библиотечная система "Лань". - ISBN 978-5-7038-3671-2. - Текст : электронный. URL: <https://e.lanbook.com/book/52259>
6. Зубкова Н.В. Методическое указание к экономическому обоснованию курсовых и дипломных работ по совершенствованию

технологических процессов механической обработки деталей (для студентов специальностей 120100 / Н.В. Зубкова, – Тольятти : ТГУ, 2015. - 46 с.

7. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH/ А.В.Леоненков. – Спб.:БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

8. Либерман Я. Л. Диагностика состояния режущего инструмента в процессе обработки : [учебное пособие] / Я. Л. Либерман, Ю. И. Тулаев. - ВУЗ/изд. - Екатеринбург : БКИ, 2005. - 78 с. : ил. - Библиогр.: с. 76-77. - ISBN 5-7851-0555-1 : 50-00. - Текст : непосредственный.

9. Изюмов А.И., Бессонов Ф.Е. Контроль и диагностика износа режущего инструмента при фрезерной обработке // В книге: Актуальные проблемы науки и техники. 2019. Материалы национальной научно-практической конференции. 2019. С. 638-639.

10. Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Зотов В.О., Серый С.В. Диагностика износа режущего инструмента на основе фрактального и вейвлет-анализа с использованием искусственного интеллекта в режиме реального времени с возможностью удаленного доступа // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 5 (102). С. 183-189.

11. Козлов А.А., Аль-Джонид Х. Диагностика и прогнозирование износа режущего инструмента в реальном времени // Современные материалы, техника и технологии. 2017. № 4 (12). С. 17-21

12. Мамонов М.Ю. Обнаружение и предупреждение поломки инструмента на современных станках с ЧПУ // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 2-2 (286). С. 131-136.

13. Мартинова Л.И., Григорьев А.С., Соколов С.В. Диагностика и прогноз износа режущего инструмента в процессе обработки на станках с ЧПУ // Автоматизация в промышленности. 2010. № 5. С. 46-50.

14. Медведев, В.С. Нейронные сети. Matlab 6/ В.С. Медведев, В.Г.Потемкин. Издательство: Диалог МИФИ - 2002 . – 496 с.

15. Михайлов А. В. Технологические основы обеспечения качества изготовления деталей в машиностроении : учеб. пособие для вузов / А. В.



Михайлов, О. И. Драчев, А. Г. Схиртладзе ; Министерство образования РФ ; ТГУ. - Гриф УМО. - Тольятти : ТГУ, 2004. - 164 с. : ил. - Библиогр.: с. 162-164. - ISBN 5-8259-0191-4 : 81-58. - Текст : непосредственный.

16. Никищечкин А.П. Структура и алгоритм адаптации нейросетевой системы управления процессом металлообработки // Вестник МГТУ Станкин. 2015. № 1 (32). С. 87-91.

17. Оссовский, С. Нейронные сети для обработки информации/С. Оссовский - Издательство: Финансы и статистика М. 2002 .-345 с.

18. Остапчук А.К., Михалищев А.Г., Вагина А.И. Вибрационная диагностика износа режущего инструмента // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. 2017. Т. 2. № 3. С. 110-112.

19. Повышение эффективности процессов механообработки на основе подходов искусственного интеллекта и нелинейной динамики : учеб. пособие / Ю. Г. Кабалдин, О. В. Кретинин, Д. А. Шатагин, А. М. Кузьмишина. - Москва : Инновационное машиностроение, 2018. - 184 с. : ил. - (Для вузов). - URL: <https://e.lanbook.com/book/107165> (дата обращения: 05.03.2020). - Режим доступа: Электронно-библиотечная система "Лань". - ISBN 978-5-6040281-1-7. - Текст : электронный. URL: <https://e.lanbook.com/book/107165>

20. Сигеру Омату. Нейроуправление и его приложения. Кн.2/ Омату Сигеру, Марзуки Халид, Рубия Юслф. – М.: ИПРЖР, 2000. – 272 с.

21. Терехов, В.А. Нейросетевые системы управления/ В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин. – М.: Высш. шк. 2002. – 183 с.

22. Тугенгольд, А.К. Интеллектуальное управление станков по состоянию элементов технологической системы/А.К. Тугенгольд, В.А. Герасимов, Е.А. Лукьянов//СТИН. – 1997.-№3.– С.7–13.

23. Туркин И.А., Вяликов И.Л., Сыроватка В.Н. Диагностика износа инструмента по анализу спектра его деформаций // В мире научных открытий. 2010. № 4-4 (10). С. 67-69.

24. Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB/С.Д. Штовба . – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
25. Altintas Y., Weck M. Chatter stability of metal cutting and grinding, CIRP Annals 53(2), 619–642 (2004)
26. Ghosh N., Ravi Y.B., Patra A., Mukhopadhyay S. Estimation of tool wear during CNC milling using neural network-based sensor fusion, Mechanical Systems and Signal Processing 21 (1) (2007) 466–479.
27. Haber R.E., Jimenez J.E., Peres C.R., Alique J.R. An investigation of tool wear monitoring in a high-speed machining process, Sensors and Actuators A: Physical 116 (3) (2004) 539–545.
28. Scheffer C., Kratz H., Heyns P.S., Klocke F., Development of a tool wear monitoring system for hard turning, International Journal of Machine Tools and Manufacture 43 (10) (2003) 973–985.
29. Tlusty J. Manufacturing Processes and Equipment (Prentice Hall, Eglewood Cliffs 2000)
30. Tonshoff, H. K. , Wolfsberg, J. P. , Kals, H. J. J. , Konig, W., and Lutternvelt, C. A. , 1988, Developments and Trends in Monitoring and Control of Machining Process, CIRP Ann. 0007-8506, 37(2), pp. 611–622.

Приложение А

Маршрутные карты

Таблица А.1 - Маршрутная карта

ГОСТ 3.1118-82 Форма 1														
Дружб.														
Взам.														
Площ.													2	1
Разраб.	Катыгин А.А.													
Проверил	Расторгуев Д.А.													
Утвердил	Логинов Н.Ю.													
Н. контр.	Расторгуев Д.А.													
Вал														
Сталь 45 ГОСТ 1050-88														
М 01	Код	ЕВ	МД	ЕН	Н. расх.	КИМ	Код заготовки	Профиль и размеры	КД	МЗ				
М 02		кг	227	1	0,85		24	200x1260	1	254				
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции		Обозначение документа							
Б	Код, наименование оборудования		СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт.	Глз.	Тшт.	
А03	000		Штамповка заготовительная											
Б04									1	1	1	1		
А05	005		4269 Фрезерно-центровальная											
Б06			Фрезерно-центровальный 2Г942						1	1	1	1		
А07	010		4233 Токарная с ЧПУ											
Б08			Токарный центр НТ500Ф3						1	1	1	1		
А09	015		4233 Токарная с ЧПУ											
Б10			Токарный центр НТ500Ф3						1	1	1	1		
А11	020		4273 Универсально-фрезерная											
Б12			Фрезерный станок с крестовым столом 6530К						1	1	1	1		
А13	030		4233 Токарная с ЧПУ											
Б14			Токарный центр НТ500Ф3						1	1	1	1		
А15	035		5000 Термическая обработка											
Б16			Печь шахтная						1	1	1	1		
МК	Маршрутная карта													2

Продолжение Приложения А

Продолжение таблицы А.1

ГОСТ 3.1118-82 Форма																
Дубл.																
Бзам.																
Плол.										2						
									Вал							
А	Цех	Уч.	РМ	Юлер.	Код. наименование операции	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт.	Тпз	Тшт.
Б	Код. наименование оборудования															
КМ	Наименование детали, сб. единицы или материала															
Обозначение, код																
ОПП																
ЕВ																
КИ																
Н. расх.																
A01	040 Центрошлифовальная															
B02	Центрошлифовальный станок M550															
A03	045 4233 Токарная с ЧПУ															
B04	Токарный центр HT500Ф3															
A05	050 Круглошлифовальная															
B06	Круглошлифовальный станок 3M152B															
07	055 0125 Промылка															
08																
09	060 0200 Контроль															
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																
МК	Маршрутная карта															3

Приложение Б  
Операционная карта

Таблица Б.1 – Операционная карта

ГОСТ 3.1404-86 Форма 3									
Дубл.									
Взам.									
Поол.									
									1
									1
Разраб.	Катыгин А.А.					Вал			
Проверил	Расторгуев Д.А.								
Утвердил	Логинюв Н.Ю.								
Н. контр.	Расторгуев Д.А.								015
Наименование операции	Материал	Твердость	ЕВ	МД	Профиль и размеры	МЗ	КОИД		
Токарная с ЧПУ	12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72	160	кз	227	200x1240	254	1		
Оборудование, устройство ЧПУ	Обозначение программы	То	Тв	Т пз.	Тшт.	СОЖ			
НТ500Ф3		8,7	7,7	20	14,5				
Р		Д или В	L	t	i	s	n	v	
T01	Патрон ПЭК -200Ф6 ГОСТ 2675-80								
T02	Центр ДТ106-4001 ГОСТ 8742-75								
O03	1. Установить деталь								
O04	2. Точить заготовку								
T05	PDINL3225P15 Резец T15K6 ТУ 2-035-892-82	T1	200	790	0,7	1	0,4	382	153
O06	3. Переустановить и закрепить заготовку								
O07	4. Точить заготовку								
T08	PDINL3225P15 Резец T15K6 ТУ 2-035-892-82	T1	200	790	0,7	1	0,4	382	153
O09	5. Снять деталь								
10									
11									
12									
13									
OK	Операционная карта								5

Продолжение Приложения Б

Продолжение таблицы Б.1

ДУОбл. Бзам. П.Оол.		ГОСТ 3.1105-84 Форме										3	005
												КЭ	Карта эскизов