

На правах рукописи



Ладыгин Роман Владимирович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ
НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск
2026

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения, станки и инструменты» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»).

Научный руководитель: **Денисенко Александр Федорович,**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
«Технология машиностроения, станки и инструменты» ФГБОУ ВО
«Самарский государственный технический университет», г. Самара

Официальные оппоненты: **Зверев Игорь Алексеевич,**
доктор технических наук, профессор кафедры «Высокоэффективные технологии обработки» ФГАОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (г. Москва)

Игнатьев Александр Анатольевич,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
«Техническая механика и мехатроника» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (г. Саратов)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко» (г. Оренбург)

Защита диссертации состоится 8 декабря 2026 г. в 14:00 на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.001.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УлГТУ», почтовый адрес: 432700, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32) и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ», почтовый адрес: 445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14) по адресу: г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, главный учебный корпус, ауд. 211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ульяновского государственного технического университета – <https://ulstu.ru/news/18054/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 99.2.001.02
доктор технических наук



А. Н. Унянин

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Повышение точности и производительности металлорежущих станков (МРС) является ключевой задачей отечественного станкостроения в условиях реализации стратегии импортозамещения и технологического суверенитета. Установлено, что доля погрешностей, вносимых шпиндельным узлом (ШУ), в общий баланс точности станка может достигать 50 – 80%, что делает его критически важным элементом, определяющим конкурентные преимущества оборудования. Современные тенденции, такие как высокоскоростная и прецизионная обработка, предъявляют повышенные требования не только к абсолютным значениям точностных характеристик ШУ (точность вращения, жесткость, собственные частоты), но и к их стабильности в пространстве и во времени при действии комплекса силовых, тепловых и динамических нагрузок.

Несмотря на значительный научный задел, традиционные методы расчета и даже современное компьютерное моделирование с использованием метода конечных элементов (МКЭ) сталкиваются с разного рода ограничениями. Аналитические модели, как правило, решают задачи лишь одной физической природы (жесткости, тепловой или динамической), не учитывая комплексного взаимовлияния факторов. Численные модели, в свою очередь, требуют существенных вычислительных ресурсов и сложны для многовариантного анализа на ранних стадиях проектирования.

Таким образом, актуальной является задача разработки новых, более эффективных методов проектирования, позволяющих на этапе эскизного проектирования с высокой достоверностью прогнозировать основные эксплуатационные характеристики ШУ с учетом взаимного влияния проектных параметров (ПП).

Перспективным путем решения этой задачи является применение методов искусственного интеллекта, в частности, нейронных сетей (НС), обладающих высокой аппроксимирующей способностью для моделирования сложных нелинейных многопараметрических систем.

Степень разработанности темы исследования.

Фундаментальные основы проектирования ШУ заложены в трудах Н.С. Ачеркана, З.М. Левиной, А.С. Проникова, В.Э. Пуша, А.В. Пуша, Д.Н. Решетова, Ю.Н. Соколова, А.М. Фигатнера, С.С. Кедрова, В.А. Кудинова, З.М. Левиной, П.М. Чернянского, В.С. Хомякова, Н.А. Кочинева, Ф.С. Сабирова, И.А. Зверева, С.Е. Бондаря, В.А. Лизогуба и других отечественных ученых. В трудах указанных исследователей были сформулированы основные требования к шпиндельным узлам по точности, жесткости, нагрузочной способности и быстроходности.

Существующие методы проектирования (аналитические, экспериментальные, методы компьютерного моделирования (МКЭ)) в основном решают узкие, отдельные задачи, связанные с прочностными характеристиками, тепловыми деформациями, динамическими процессами и т.п. Они слабо адаптированы к моделированию комплексного взаимодействия факторов в реальных условиях эксплуатации, что снижает их прогностическую способность.

Целью диссертационной работы является повышение достоверности и обоснованности прогнозирования эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов токарных металлорежущих станков за счет использования нейросетевых моделей с расширенным количеством проектных параметров.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе требуется решить следующие задачи:

1. Провести анализ конструкций и методов проектирования современных шпиндельных узлов с целью выявления ключевых проектных параметров (ПП) и

эксплуатационных характеристик (ЭХ), определяющих их точность и производительность.

2. Сформировать репрезентативную базу данных для обучения НС путём комбинирования данных натурного эксперимента, конечно-элементного моделирования и аналитических расчетов.

3. Разработать архитектуру и методику обучения НС для установления комплексных нелинейных зависимостей между проектными параметрами ШУ и его ЭХ (жесткостью, точностью вращения, тепловыми деформациями, собственной частотой).

4. Повысить достоверность и обоснованность прогнозирования эксплуатационных характеристик ШУ по сравнению с классическими методами, использующими аналитические и регрессионные модели.

5. Разработать программное обеспечение поддержки принятия решений на основе обученной НС, интегрируемое в процесс проектирования.

6. Провести апробацию разработанной методики проектирования путем сравнения её прогнозов с результатами натурного эксперимента.

Объектом исследования является процесс комплексного проектирования шпиндельных узлов металлорежущих станков.

Предметом исследования является взаимное влияние на ЭХ расширенного количества ПП, отражающих режимы работы, настройку и конструктивное исполнение ШУ.

Методы и средства исследований.

Достижение цели и решение поставленных в работе задач обеспечены применением комплекса теоретических и экспериментальных методов исследований. В ходе натурного эксперимента определены значения данных, используемых для обучения НС. Экспериментальные данные получены на станочном оборудовании, снабженном тарированными нагружающими устройствами и измерительными средствами контроля температур и упругих перемещений. Построение и обучение НС осуществлялось в программе Statistica, в ней же выполнялась статистическая обработка данных и анализ качества полученных сетей. Для проведения аналитических расчетов использовалась программа SMath Studio, для численного моделирования – ANSYS Workbench. Модели корпусов ШУ создавались в Компас 3D.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки:

– пункт 1 «Теория и практика проектирования, монтажа и эксплуатации станков, станочных комплексов, в том числе автоматизированных цехов и заводов, автоматических линий, а также их компонентов (приспособлений, гидравлических узлов и т. д.), оптимизация компоновки, состава комплектующего оборудования и его параметров, включая использование современных методов информационных технологий»;

– пункт 4 «Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров рабочего инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки».

Научная новизна работы состоит в:

1) разработке и обосновании нейросетевой модели (НСМ) шпиндельного узла в виде многопараметрической нелинейной системы, комплексно учитывающей взаимосвязь расширенного количества ПП при прогнозировании силового, теплового и динамического воздействий;

2) разработке методики формирования репрезентативной обучающей выборки для нейронной сети прогнозирования ЭХ ШУ, основанной на комбинации методов

планирования натурного эксперимента, конечно-элементного анализа и аналитических расчетов;

3) получении количественных зависимостей влияния конструктивных параметров корпуса на жесткость шпиндельного узла;

4) использовании коэффициентов влияния и приведения распределенных и сосредоточенных масс для определения собственных частот изгибных колебаний шпинделей, имеющих массивную консольную часть.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Архитектура и процесс обучения нейронной сети для прогнозирования эксплуатационных характеристик ШУ на основе данных, полученных расчетными и экспериментальными методами и численным моделированием.

2. Результаты анализа значимости проектных параметров шпиндельного узла, полученные на основе оценки данных для обучения нейронной сети.

3. Закономерности влияния ПП корпуса на жесткость шпиндельного узла.

4. Результаты практической апробации НСМ, подтверждающие ее работоспособность и точность прогнозирования для задач проектирования.

Практическую значимость имеют:

1) программное обеспечение поддержки принятия решений, интегрируемое в процесс проектирования и позволяющее конструктору осуществлять оперативный многовариантный анализ и выбор варианта конструкции шпиндельного узла с учетом характеристик точности, жесткости, теплостойкости, собственных частот;

2) методика, сокращающая временные и финансовые затраты на проектирование ШУ за счет исключения дорогостоящих прототипов и трудоемких натурных испытаний на этапе эскизного и технического проектирования;

3) методология генеративного проектирования ШУ на основе разработанного программного обеспечения.

Достоверность полученных результатов исследования обеспечивается корректным использованием фундаментальных принципов теории проектирования металлорежущих станков, механики деформируемого твердого тела, теории искусственных нейронных сетей и математической статистики. Адекватность НСМ подтверждается верификацией ее прогнозов с результатами натурного эксперимента.

Одной из составляющих личного вклада автора является разработка алгоритма и программного модуля, защищенного свидетельством о государственной регистрации.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы использованы на предприятии ООО «Средневолжский Станкозавод» при разработке конструкций шпиндельных узлов станков токарной группы, в частности при обновлении модельного ряда SAMAT 400, и в учебном процессе при подготовке студентов по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на всероссийских и международных научно-практических конференциях и форумах: «Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация» (г. Санкт-Петербург 2024 г.); «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (г. Санкт-Петербург 2024 г.), «Высокие технологии в машиностроении» (г. Самара 2023 – 2026 гг.), «Инновационные технологии в машиностроении» (г. Ульяновск 2024 г.), «Актуальные проблемы станкостроения» (г. Пенза 2025 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 4 – в изданиях из Перечня ВАК при Минобрнауки России. Получено 1 свидетельство о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (175 источников) и 6 приложений. Объем диссертации – 214 страниц включая 96 рисунков и 43 таблицы в тексте.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено вопросам обоснования актуальности выбранной темы исследований, ее научной новизны и практической значимости, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе работы рассматриваются конструкции и ЭХ ШУ токарных металлорежущих станков, включая точность вращения шпинделя, жесткость, собственные частоты, теплостойкость и долговечность. Установлено, что эти характеристики находятся в сложной взаимосвязи с ПП (геометрия шпинделя и корпуса, компоновка опор). В свою очередь ПП ШУ формируются факторами 3-х видов: режимы эксплуатации; настроечные/регулируемые параметры; конструктивное исполнение.

Рассматриваются типовые конструкции корпусов ШУ (рисунок 1) токарных станков. И в частности – правая стенка, как наиболее нагруженная часть корпуса, параметры (высота×ширина×толщина, диаметр основной расточки) которой в значительной мере влияют на ЭХ.

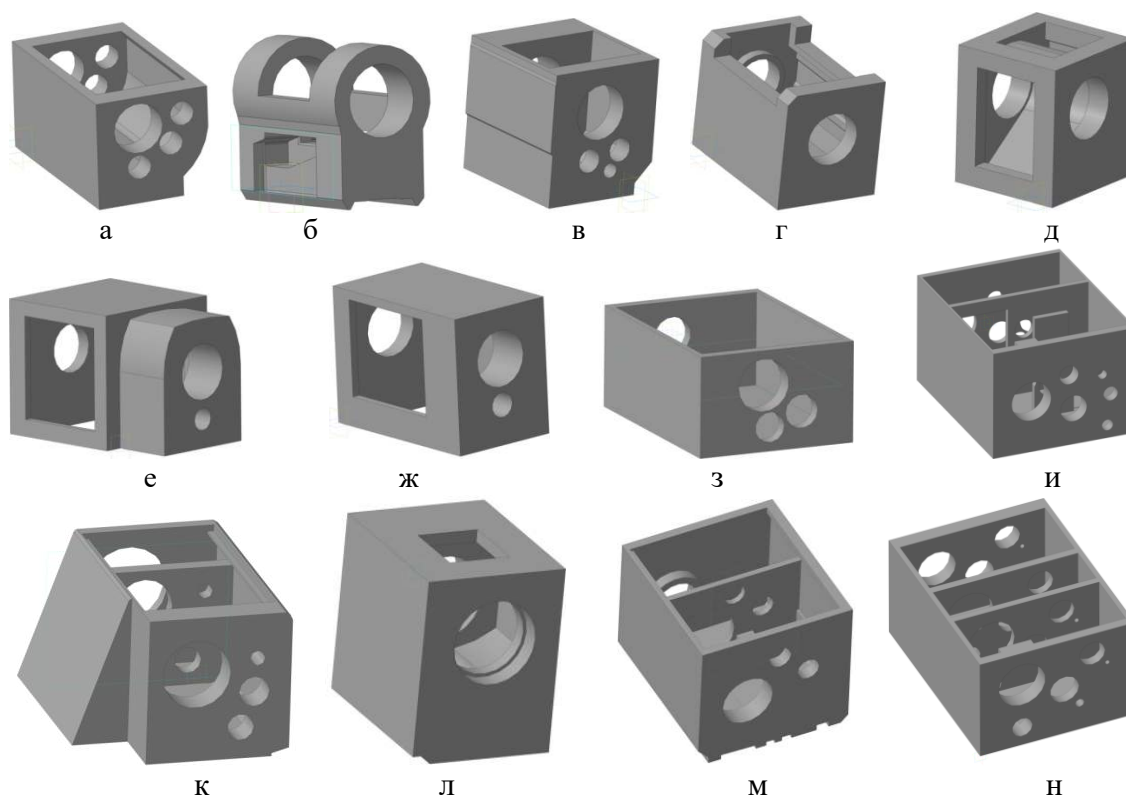


Рисунок 1. Корпуса типовых ШУ токарных станков: а – ТВ-4; б – Schaublin-102; в – ТВ-7; г – Schaublin 102N-VM ; д – Schaublin 125; е – Schaublin 135; ж – Schaublin 150; з – 1М61; и – 16к20; к – ФТ-11; л – SN50; м – 16Р25П; н – 1М63.

Анализируются существующие методы оценки ЭХ: аналитические, экспериментальные и компьютерное моделирование (МКЭ). Показано, что эти методы решают преимущественно узкие, изолированные задачи и недостаточно учитывают взаимодействие силовых, тепловых и динамических факторов, что снижает их прогностическую способность.

В качестве перспективного направления предложено использование нейронных сетей, способных моделировать сложные нелинейные многопараметрические зависимости.

Отмечена актуальность создания методологии генеративного проектирования, выражаемой в назначении ПП разрабатываемого ШУ и сочетающей применение лицом, принимающим решения (ЛПР), традиционных методов проектирования и CAD/CAE-инструментов и нейросетевую генерацию (рисунок 2).

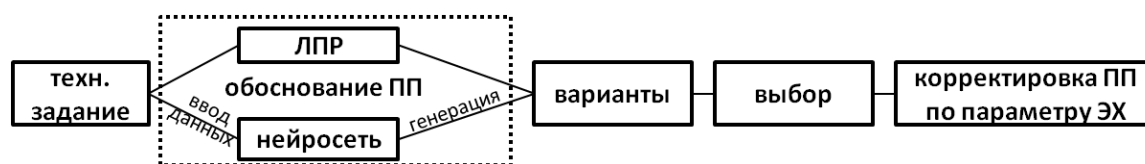


Рисунок 2. Процесс генеративного проектирования ШУ

Вторая глава посвящена формированию экспериментальной базы обучающих данных и обоснованию архитектуры нейронной сети для моделирования ЭХ ШУ металлорежущих станков. Основное внимание уделено формированию базы данных (на основе натурного эксперимента) для обучения нейросети, выбору оптимальной архитектуры сети и оценке точности прогнозирования.

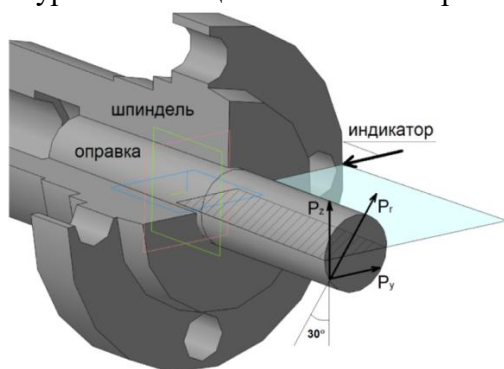


Рисунок 3. Схема сил, действующих на оправку

Для сбора данных использована комплексная методика измерения 3-х ключевых ЭХ: температуры (T , °C) корпуса ШУ в зоне наружного кольца подшипника передней опоры (с помощью пирометра DT-8833 и термопары К-типа); радиального биения (Δ , мкм) шпинделя и упругого смещения (δ , мкм) его переднего конца (индикаторами часового типа).

Упругое смещение задавалось силой (имитирующей силу резания под углом 30° к тангенциальной составляющей - P_z) от предварительно протарированного устройства ТЖ-1000, прикладываемой к оправке, установленной в отверстие шпинделя (рисунок 3). Построение и обучение нейросетей выполнялось в пакете Statistica. Сравнивались функции активации (ФА) многослойного персептрона (MLP).

Путём автоматического и ручного построения, сопровождающегося перебором числа скрытых нейронов и ФА и отбором по критериям R^2 , ошибки обучения и минимальному числу скрытых нейронов, выбрана сеть с архитектурой 3-7-3 (3 входа, 7 скрытых нейронов, 3 выхода) с ФА гиперболической на скрытом и линейной на выходном слое (рисунок 4). Обучение проводилось по алгоритму BFGS с остановкой при стабилизации ошибки. Анализ чувствительности выявил, что наибольшее влияние на выходные ЭХ (T , Δ , δ) оказывает частота вращения шпинделя (51,14), затем сила нагружения (24,16), а время работы влияет слабо, на уровне шума (5,5).

Полученная нейросеть продемонстрировала высокую точность прогнозирования. Коэффициенты корреляции составили: для температуры – 0,996, для упругого смещения шпинделя – 0,994, для биения шпинделя – 0,639.

Средние относительные ошибки (MAPE) НС MLP 3-7-3, запущенной на исполнение, составили (значения в скобках даны для тестовой выборки): T – 1,67 % (1,87 %), Δ – 6,25 % (7,78 %), δ – 9,72 % (10,7 %), с показателем $R^2 = 0,863$.

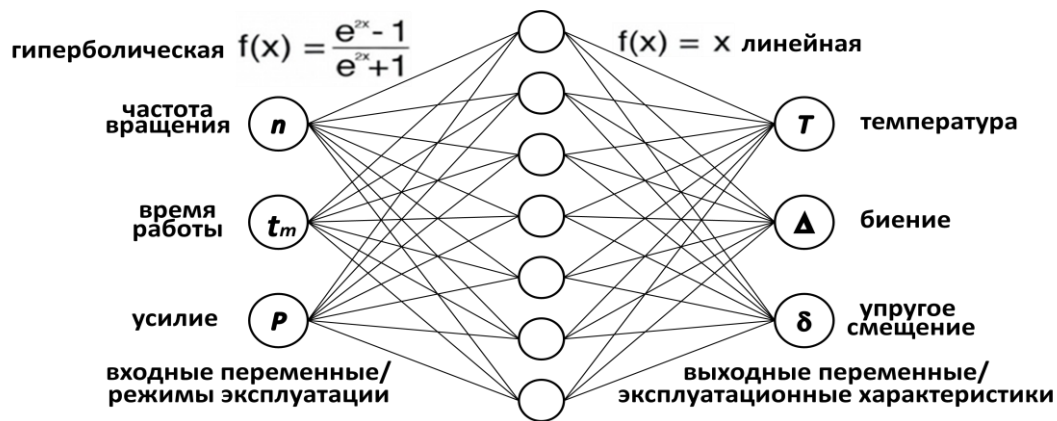


Рисунок 4. Архитектура построенной сети MLP 3-7-3

В третьей главе описывается формирование интегрированного обучающего массива данных для нейросетевого моделирования ЭХ ШУ с учетом расширенного количества ПП, объединяющего 3-и источника данных: натурные эксперименты (достоверность зависимостей), аналитические расчёты (масштабируемость и широта охвата) и численное моделирование (МКЭ) (детализация и учёт сложных конструктивных особенностей).

В экспериментальной части для учета влияния настроечных (регулируемых) параметров разработана методика определения радиального зазора в передней опоре шпинделя с двухрядным роликоподшипником 3182000, использованная на 6-и токарных станках разных типоразмеров с наибольшим диаметром обработки от 250 до 400 мм.

Аналитические зависимости использовались для расчёта: избыточной температуры переднего подшипника шпинделя; упругого смещения переднего конца шпинделя; биения переднего конца шпинделя и собственных частот изгибных колебаний шпинделя.

1. Расчёт избыточной температуры переднего подшипника шпинделя, °С, определялся на основе модели тепловыделения и теплоотвода через корпус и шпиндель, предложенной Соколовым Ю.Н., когда стенка, несущая подшипник, рассматривается как круглое ребро с внутренним диаметром, равным диаметру отверстия под наружное кольцо подшипника, и наружным диаметром, соответствующим окружности, описанной из центра подшипника через наиболее удаленный угол стенки.

2. Определение упругого смещения переднего конца шпинделя, мм, с учётом податливости опор выполнялось по зависимости, предложенной Пушем В.Э. и Глубоким В.И. для двухопорного шпинделя с разгруженной конструкцией приводного элемента:

$$\delta = P \cdot \left(\frac{a^3}{3E \cdot J_1} + \frac{a^2 \cdot l \cdot (1-\varepsilon)}{3E \cdot J_2} + \frac{j_A \cdot a^2 \cdot (1-\varepsilon) + j_B \cdot (l + a \cdot (1-\varepsilon))^2}{j_A \cdot j_B \cdot l^2} + \frac{a}{G \cdot S_1} + \frac{a^2 \cdot (1-\varepsilon)}{G \cdot l \cdot S_2} \right), \quad (1)$$

где P – результирующая сила от составляющих силы резания P_y и P_z , Н; a – вылет консоли переднего конца шпинделя, мм; l – расстояние между передней и задней опорами шпинделя, мм; J_1 и J_2 – средние осевые моменты инерции сечения консоли переднего конца шпинделя и сечения межопорной части шпинделя, мм⁴; S_1 и S_2 – средние площади сечений переднего конца шпинделя и межопорной части шпинделя, мм²; j_A и j_B – радиальные жесткости передней и задней опоры шпинделя, Н/мм; ε – коэффициент заземления в передней опоре шпиндельного узла ($\varepsilon = 0,15 \dots 0,65$); E – модуль упругости материала шпинделя, МПа; G – модуль сдвига материала шпинделя, МПа.

3. Расчёт биения шпинделя (предложен Пушем В.Э.) в зависимости от биений опор и их взаимного расположения. При расчете, места с наибольшим радиальным биением внутренних колец подшипников двухопорного шпинделя принимаются расположенными в одной плоскости и направленными в одну сторону для уменьшения величины биения его переднего конца.

4. Определение собственных частот колебаний шпинделя. В практике анализа колебаний валов широкое применение нашел метод, основанный на использовании коэффициентов влияния и приведения распределенных и сосредоточенных масс (предложен Чернянским П.М.), позволяющий определить две собственные частоты. Однако отсутствует общая методика определения коэффициентов влияния и приведения масс для шпинделей, имеющих ряд конструктивных особенностей.

Под коэффициентом влияния δ_{ij} понимается прогиб в точке i от единичной силы, приложенной в точке j .

Знание коэффициента влияния δ_{ij} , под которым понимается прогиб в точке i от единичной силы, приложенной в точке j , позволяет привести любую сосредоточенную массу m_k системы к какой-либо точке i системы по следующему правилу

$$m_{прив,i} = m_k \cdot \left(\frac{\delta_{ik}}{\delta_{ii}} \right)^2, \quad (2)$$

где δ_{ii} – прогиб в точке i (точка приведения) от единичной силы в ней; δ_{ik} – прогиб в точке i от единичной силы в точке k (место расположения массы m_k).

Вопрос по выбору точек приведения в имеющихся источниках однозначно решается только относительно межопорной части шпинделя, где точка приведения выбирается в середине пролета. На консольной части точка приведения выбирается посередине длины консоли или (при наличии массивных элементов шпинделя, необходимых для крепления приспособлений) – на конце консоли. Были рассмотрены оба варианта приведения. При этом расчетные схемы предусматривали приведение как распределенных, так и сосредоточенных масс (рисунок 5).

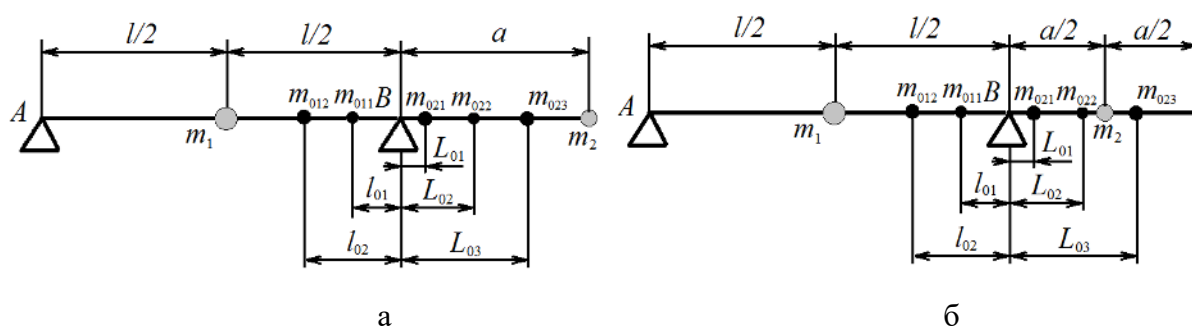


Рисунок 5. Расчетная схема для приведения распределенных и сосредоточенных масс: а – точка приведения на конце консоли; б – точка приведения в середине консоли

Получены формулы для расчета собственных частот для двух форм колебаний – изгиб пролёта и изгиб консоли для жестких и упругих опор.

Численное моделирование МКЭ шпинделя на жестких опорах (таблица 1) показало существенное превышение полученных собственных частот над опорами, в которых учитывалась их упругость: для частоты f_1 примерно на 30 %, а для частоты f_2 почти в 2 раза.

Сравнение данных таблиц 1 и 2 показывает, что учет упругости опор снижает собственные частоты почти в 2 раза. Из чего следует, что для полноты картины действующих факторов, необходимо принимать во внимание упругость опор.

Сравнение значений собственных частот шпинделя, полученных при модальном анализе МКЭ, со значениями, полученными при расчете по разработанным аналитическим зависимостям, показало, что при выборе схем приведения сосредоточенных масс предпочтение следует отдать схеме с сосредоточенной массой на конце консоли. В этом случае отличия значений собственных частот, полученных расчетом и численным моделированием, для частоты f_1 составляют 1,2 %, а для частоты f_2 – 1,6 %.

Таблица 1

Собственные частоты шпинделя на жестких опорах		
Расчетная схема	f_1 , Гц	f_2 , Гц
	1009	1048
	1073	1216

Таблица 2

Собственные частоты шпинделя на упругих опорах			
Компоновка опор	Расчетная схема	f_1 , Гц	f_2 , Гц
		574,7	629,3
		612,6	697,3
		549,8	584,3
		586,6	638,8

Обеспечение расположения первой собственной частоты шпинделя в диапазоне $f_1 \approx 250 \dots 500$ Гц достигается за счет уменьшения отношения межопорного расстояния (l) к вылету (a), которое должно составлять $2,5 \leq l/a \leq 3,5$.

Ввиду отсутствия аналитических зависимостей, учитывающих влияние многообразия конструктивных исполнений корпусов ШУ (размеров, количества вспомогательных расточек, расположение и диаметр основной расточки, внутренних перегородок, расположения опор шпинделя и др.) на его жесткостные характеристики, исследование проводилось путем численного моделирования (МКЭ) в ANSYS Workbench на расчетной модели ШУ станка мод. 16Б16П (максимальный диаметр обработки 320 мм).

Оценено влияние количества и расположения вспомогательных расточек в правой стенке, в которой расположена передняя опора (наиболее нагруженная), на упругие смещения мнимой оси шпинделя (при помощи опции "Remote point") (рисунок 6).

Установлено, что деформация корпуса практически линейно зависит от высоты центров, за исключением вариантов № 4, 6 и 8, где рост деформации с увеличением высоты несколько замедляется (таблица 3). Деформации в значительной мере зависят от толщины стенки (увеличение на 20 мм снижает деформацию на 16 – 25 %).

На основании анализа наиболее типичных условий обработки на токарных станках было показано, что имеет место значительный разброс возможных направлений вектора, составляющими которого являются силы P_z и P_y : угол θ , определяющий это направление от плоскости резания при свободном резании, может варьироваться в диапазоне $5 \dots 55^\circ$. Как показало численное моделирование, угол θ

является значимым фактором влияния на упругие деформации корпуса: при увеличении значения угла действия силы от 5° до 55° наблюдается для варианта корпуса №1 увеличение величины смещения оси расточки под передний подшипник в 1,9 раза, а для варианта № 2 – в 1,6 раза. Указанное обстоятельство объясняет значительный разброс точности обработки вследствие невозможности обеспечения постоянства условий процесса резания.

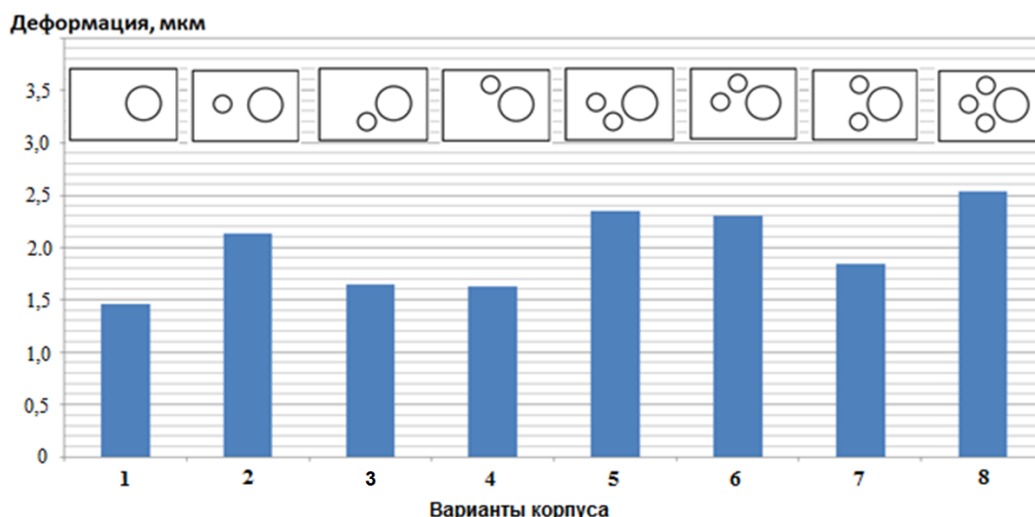


Рисунок 6. Влияние числа и расположения вспомогательных расточек на упругие смещения мнимой оси шпинделя вследствие деформации корпуса

Таблица 3

Влияние высоты центров на упругие деформации корпуса, мкм

Высота центров, мм	Вариант корпуса							
	1	2	3	4	5	6	7	8
135	1,46	2,13	1,65	1,63	2,35	2,30	1,84	2,53
155	1,63	2,30	1,83	1,82	2,54	2,48	2,01	2,70
175	1,80	2,45	2,02	1,93	2,70	2,58	2,15	2,81

В экспериментальной части работы зафиксированы следующие наблюдения: температура передней опоры растёт с увеличением частоты вращения и времени работы, стабилизируясь через 2 ... 2,5 часа; упругое смещение переднего конца шпинделя линейно зависит от нагрузки (ШУ больших размеров дают меньшие смещения при одинаковых усилиях); биение шпинделя существенно уменьшается (с 10 мкм до 1 мкм) с повышением класса точности подшипников (в особенности передней опоры с 5 до 2-го) и снижением межопорного расстояния (МР) (с 833 мм до 128 мм).

Для обучения НС использовались данные (получены численным моделированием) о смещении оси шпинделя от деформации корпуса. При этом использовались 3D модели конструкций, исполнения которых приведены на рисунке 1.

Установлено, что доля деформации корпуса в общем балансе жесткости ШУ достигает 20 ... 40 %.

На основании результатов натурных экспериментов, расчетов с применением аналитических зависимостей и численного моделирования получен интегрированный массив обучающих данных, в котором отражено влияние ПП с учетом режимов работы, настройки и конструктивного исполнения ШУ, что позволило качественно насытить экспериментальную выборку за счет множества рассмотренных конструкций ШУ.

Наиболее значимые связи натурального эксперимента, показаны коэффициентами корреляции Спирмена (ρ) (значения в скобках даны для интегрированного набора): n сильно влияет на $T - 0,82 (0,85)$; l – на $\Delta - 0,86 (0,65)$; P – на $\delta - 0,9 (0,67)$.

Четвертая глава описывает создание НСМ для прогнозирования ЭХ ШУ с учётом расширенного количества ПП на основе интегрированного обучающего массива данных (содержащего данные 19 станков) и производится сравнение ошибок прогнозирования ЭХ аналитическими, регрессионными моделями и моделью на основе нейронной сети со значениями натурального эксперимента.

После построения 1500 сетей и двухэтапного отбора выбрана оптимальная архитектура НС - MLP 26-20-4 (26 входов, 20 скрытых нейронов, 4 выхода) с гиперболической ФА на скрытом слое и логистической на выходном. Данные ФА показали свое преимущество перед другими ФА за счет: сокращения числа скрытых нейронов (упрощения архитектуры НС и предотвращения тем самым возможного её переобучения); улучшения экстраполяционных свойства модели за пределы обучающих данных (повышения достоверности прогнозов). Процесс обучения НС показал полное совпадение кривых обучающей и тестовой выборки.

Для НСМ построены квантиль-квантиль графики (Q-Q) одновременно для наблюдаемых значений выходных переменных и значений прогноза (рисунок 7).

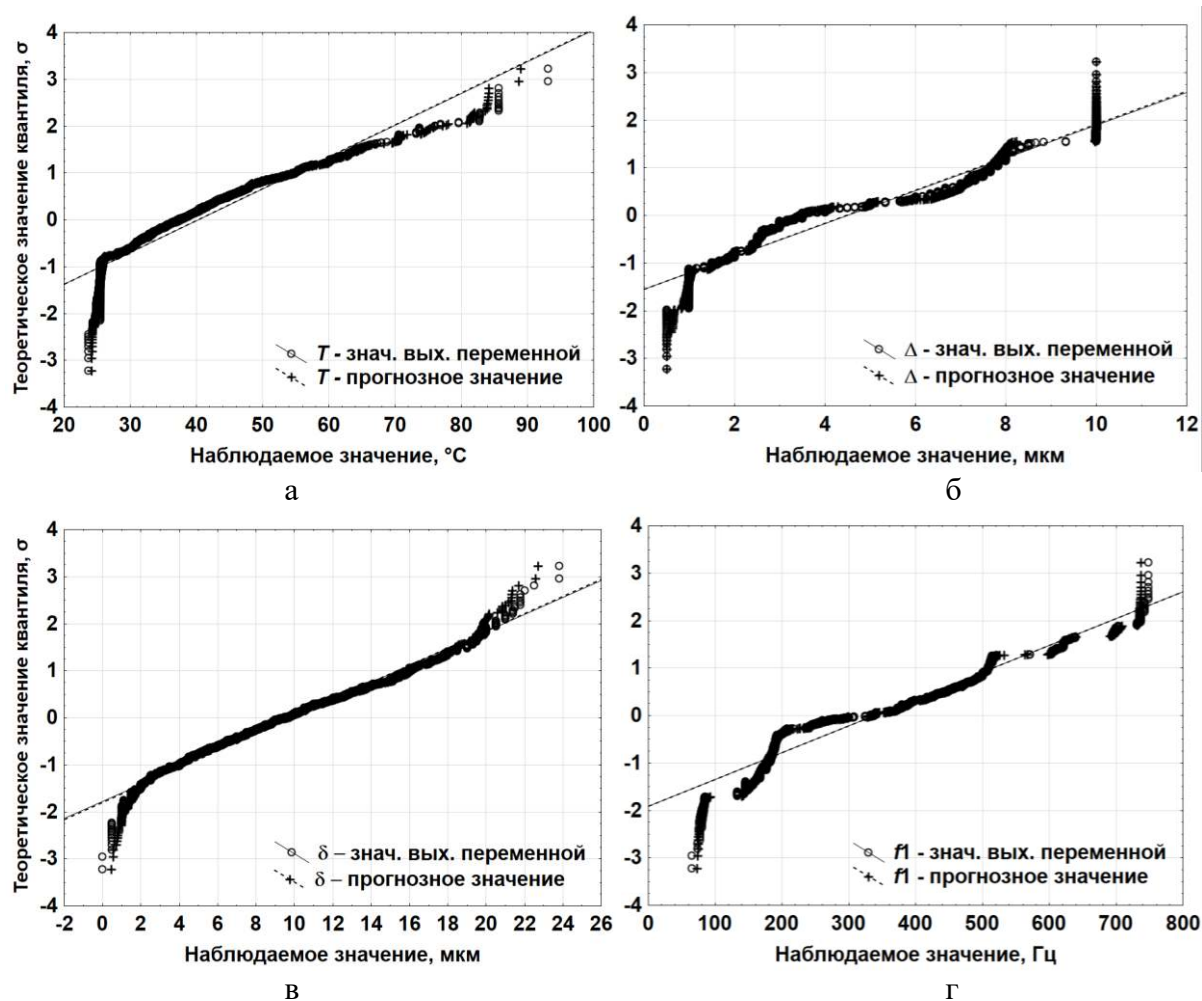


Рисунок 7. Квантиль-квантиль графики для НС MLP 26-20-4 для:
а – температура (T), б – биение шпинделя (Δ), в – упругое смещение переднего конца шпинделя (δ), г – собственная частота шпинделя ($f1$)

Установлено, что для получения HCM такого качества необходимо 15 ... 25 скрытых нейронов, 300 ... 700 эпох (циклов) обучения и объём выборки около 1000 наблюдений (строк данных).

Показана эффективность использования HCM ($R^2 = 0,996$) для прогнозирования ЭХ ШУ путём сравнения результатов её прогнозов с результатами натурного эксперимента, выполненного для группы токарных станков – 1К62 (аналог СТ16К20), 1А616, 16Б16КП, 400ХС «Вектор», 1И250В (аналог 250ИТВМ) и ЕМУ250. С данными эксперимента сравниваются и результаты расчетов по рассмотренным аналитическим зависимостям и регрессионным моделям (таблица 4).

Таблица 4

Ошибки методов прогнозирования ЭХ относительно данных эксперимента

Метод прогнозирования	Средняя относительная ошибка прогнозирования, %		
	T	Δ	δ
Расчетные зависимости	11,6	39	32,4
Линейная регрессионная модель	7,2	13,6	29,2
HCM, обученная на данных натурного эксперимента	1,7	8,2	10,4
HCM, обученная на данных интегрированного набора	2,1	8,8	10,8

Из таблицы 4 видно, что значения, спрогнозированные HCM, обученной на данных интегрированного набора, точнее для переменной: T – на 9,5 %; Δ – на 30,2 %; δ – на 21,6 %. Низкие результаты расчетных зависимостей обусловлены их ограниченностью – неспособностью прогнозировать ЭХ в зависимости от времени эксплуатации ШУ (для Δ и δ) и его настроечных параметров (для T).

Ошибки HCM на тестовой выборке составили для: T – 1,7 %; Δ – 6,05 %; δ – 7,1 %; f_1 – 1,6 %.

Пятая глава посвящена разработке программного обеспечения (на основе НС) и его применения при генеративном проектировании ШУ. Предложена методология генеративного проектирования ШУ, основанная на «сотрудничестве» лица, принимающего решения (ЛПР), и 2-х разработанных программ (рисунок 8): Neural GenSpU для обоснования (генерации) параметров конструкции ШУ (рисунок 9) и Neural SpU для прогнозирования его ЭХ (T , Δ , δ , f_1) с учетом расширенного количества ПП (рисунок 10).

Для работы Neural GenSpU требуется два интегральных параметра из технического задания: d_k – максимальный диаметр конца шпинделя и $\Delta (D)$ – требуемое биение (определяет принадлежность станка к определенному классу точности по ГОСТ 18097-2024). Задав которые (строки «Cont. Input» рисунок 9), она сгенерирует 21-о значение параметров конструкции (строки «Predicted output of»), то есть выполнит этап обоснования ПП (правая ветвь рисунок 8).

Далее ЛПР (средняя ветвь рисунок 8), используя полученные результаты, проводит их анализ и корректировку. Поскольку генерация параметров выполнялась нейросетью регрессии, то отдельные параметры требуют округления до целого (n_{ow} , n_1 , n_2 , s_{b11}), а другие, отвечающие за размеры и точность подшипника – до стандартного значения из ряда (d_{ow} , KT_1 , KT_2 , d) (рисунок 9). ЛПР может также использовать значения из своего собственного расчета.

На следующем шаге (левая ветвь рисунок 8) ЛПР моделирует ЭХ с учётом влияния режимов эксплуатации и настройки ШУ (рисунок 10), используя свои значения или ранее сгенерированные Neural GenSpU (рисунок 9).

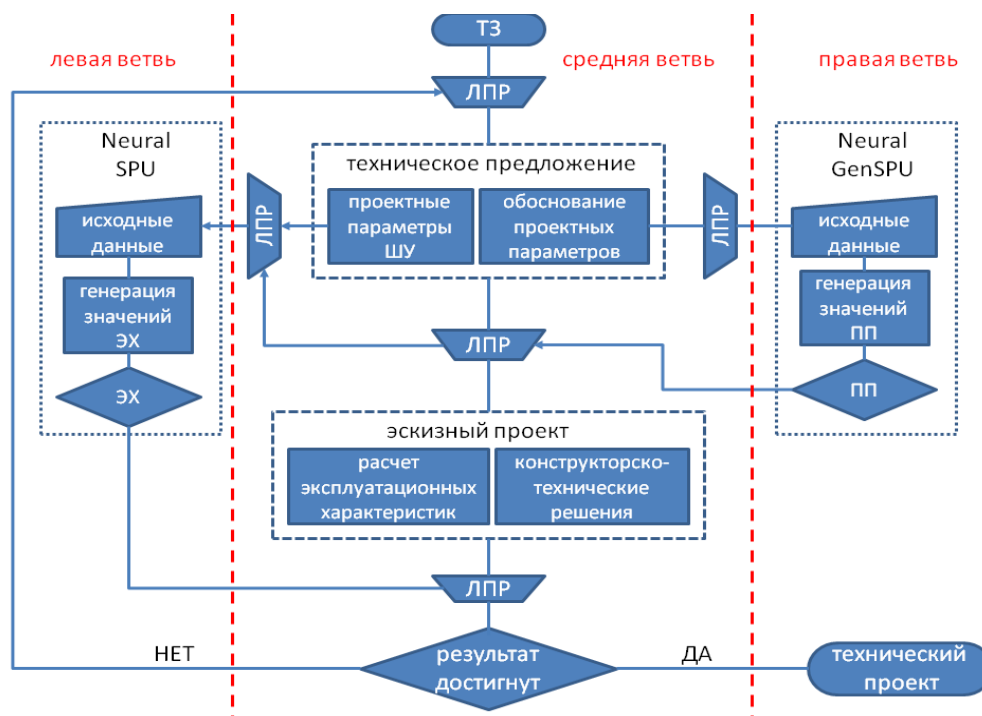


Рисунок 8. Схема генеративного проектирования ШУ

C:\Neural GenSpU v1.0 Spindle Unit Design Parameter Generator (using) Neural Networks.exe			
Enter values for Continuous inputs (To skip a continuous input please enter -9999)		исходные данные ТЗ	
Cont. Input-0(D [micron]): 4			
Cont. Input-1(dk [mm]): 220			
Predicted Output of Hw [mm]	= 3.95199744455098e+002	- высота правой стенки	параметры корпуса
Predicted Output of Ww [mm]	= 4.07752335875618e+002	- ширина правой стенки	
Predicted Output of Bw [mm]	= 8.22741049209745e+001	- высота правой стенки	
Predicted Output of Xcw [mm]	= 1.33134270215437e+002	- коорд. осн. расточки по X	
Predicted Output of Ycw [mm]	= 2.58341983895526e+002	- коорд. осн. расточки по Y	
Predicted Output of dow [mm]	= 1.82654619401675e+002	- диаметр основной расточки	
Predicted Output of now [number]	= 3.15722847396837e+000	- кол-во доп. расточек	
Predicted Output of n2 [number]	= 1.03364760335054e+000	- кол-во подш. в зад. опоре	параметры опор
Predicted Output of n1 [number]	= 2.96469743061364e+000	- кол-во подш. в пер. опоре	
Predicted Output of KT2 [number]	= 2.09584552953360e+000	- класс точн. подш. зад. опоры	
Predicted Output of KT1 [number]	= 1.98337484395731e+000	- класс точн. подш. пер. опоры	
Predicted Output of sbt1	= 2.98637878919359e+000	- тип подш. опоры (1 рад. + 2 рад. уп.)	
Predicted Output of l1 [mm]	= 5.81238087367848e+002	- коорд. расп. прив. эл. (от пер. опоры)	
Predicted Output of l [mm]	= 5.29271333392351e+002	- межопорное расстояние	
Predicted Output of a [mm]	= 1.41985952061445e+002	- вылет	
Predicted Output of n_max [rpm]	= 1.62302245595930e+003	- макс. част. вращения шпинделя	параметры тела шпинделя
Predicted Output of d0 [mm]	= 6.38478050335379e+001	- диам. сквоз. отв. шпинделя	
Predicted Output of d3 [mm]	= 1.01254822511483e+002	- диам. шпинделя в зад. опоре	
Predicted Output of d1 [mm]	= 1.13233609401795e+002	- диам. шпинделя между опорами	
Predicted Output of d' [mm]	= 1.22036002554041e+002	- диам. шпинделя в пер. опоре	
Predicted Output of d2 [mm]	= 1.20259045204505e+002	- диам. шпинделя на консоли	

Рисунок 9. Пример работы программы Neural GenSpU

Из окна программы Neural SpU (рисунок 10) видно, что спрогнозированы значения ЭХ: $T - 49,9^\circ\text{C}$, $\Delta - 5,2\text{ мкм}$, $\delta - 5,9\text{ мкм}$, $f_1 - 364\text{ Гц}$. Значения соответствуют режимам повседневной эксплуатации станка.

При генеративном проектировании ЛПР выступает как куратор, задающий цели (значения ЭХ) и выбирающий вариант конструктивного исполнения ШУ, сгенерированного НС. Работоспособность подхода продемонстрирована на примере проектирования ШУ для станков классов точности П и В с максимальным диаметром обработки 320 мм.

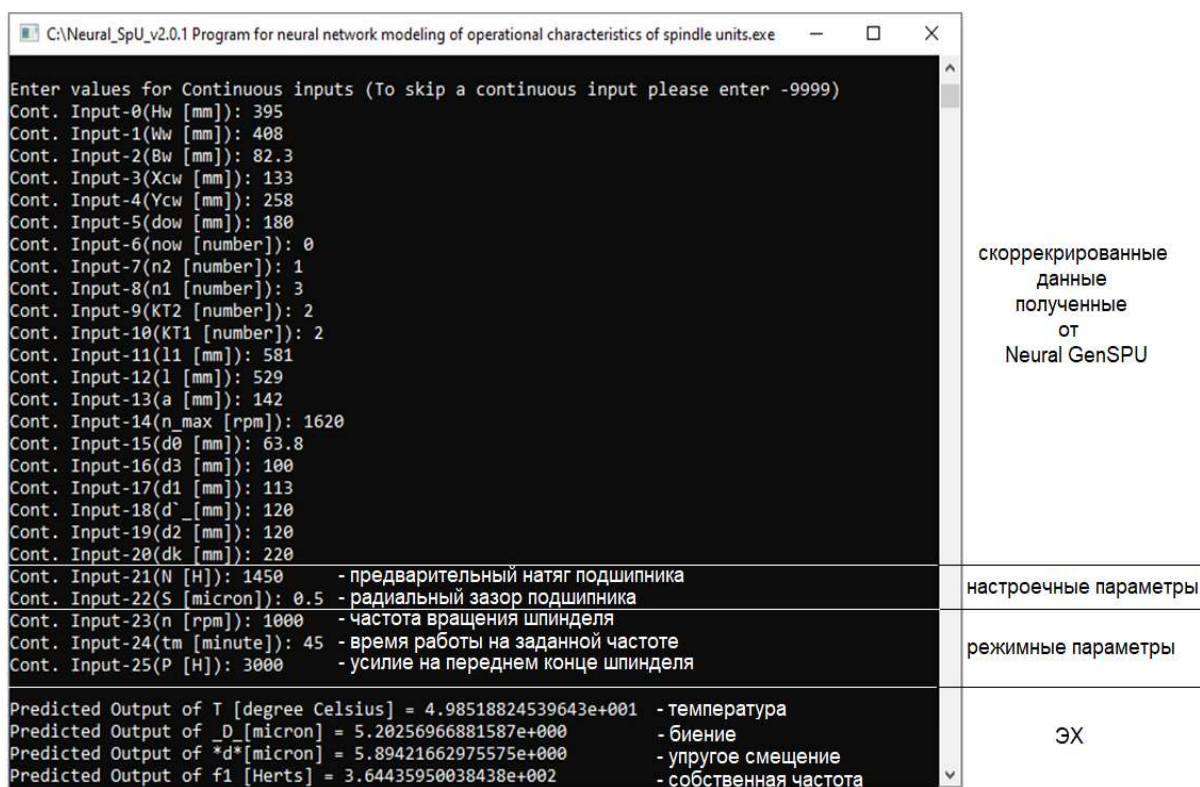


Рисунок 10. Работа программы Neural SpU по прогнозу ЭХ на основе сгенерированных ПП

Результаты диссертационной работы в виде методики проектирования на основе НС использованы ООО «Средневожский Станкозавод» при обновлении модельного ряда токарных станков SAMAT 400.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обоснована ключевая роль ШУ в формообразовании деталей на металлорежущих станках. Показано, что ЭХ ШУ находятся в сложной взаимозависимости между собой и режимными, настройными и конструктивными ПП, что требует комплексного подхода при проектировании. Такой подход может быть реализован применением нейросетевых моделей, способных обрабатывать нелинейные зависимости и работать в условиях неполной информации.

2. Разработана и экспериментально апробирована комплексная методика определения ЭХ ШУ, включающая измерение температуры стенки корпуса, радиального биения шпинделя и его жесткости. Методика базируется на стандартах и нормативных документах, что обеспечивает достоверность формируемой базы данных для обучения НС.

3. Разработана методика объединения экспериментальных, аналитических и численных методов для формирования репрезентативной (интегрированной) обучающей выборки, в которой экспериментальные данные обеспечивают достоверность, аналитические расчеты – масштабируемость и широту охвата параметров, численное моделирование (МКЭ) – детализацию и учет сложных конструктивных особенностей.

4. Доказано преимущество НС при прогнозировании ЭХ ШУ перед аналитическими моделями. Значения, спрогнозированные нейросетевой моделью, точнее для переменных: T (температура) – на 9,5 %; Δ (радиальное биение) – на 30,2 %; δ (упругое смещение) – на 21,6 %. А сравнение НС и регрессионных моделей показало, что НС обеспечивают стабильно низкую среднюю относительную ошибку

при прогнозировании ЭХ (менее 10,8 %), практически не зависящую от объема наблюдений и числа входных переменных.

5. Создана и получила государственную регистрацию программа Neural SpU на основе обученной нейросети MLP 26-20-4, позволяющая ЛПР, оперативно прогнозировать комплекс ключевых ЭХ ШУ (температуру, биение, упругое смещение, собственную частоту) по заданным конструктивным, настроечным и режимным параметрам. Точность нейросетевой модели оценена ошибкой прогноза на тестовой выборке и составила для: $T - 1,7 \%$; $\Delta - 6,05 \%$; $\delta - 7,1 \%$; $f_1 - 1,6 \%$.

6. Разработана и обоснована методология генеративного проектирования ШУ, основанная на взаимодействии ЛПР и двух нейросетевых программ: Neural GenSpU - для генерации вариантов конструктивных параметров (структурный синтез) по исходным данным технического задания и Neural SpU – для прогнозирования ЭХ ШУ, и обеспечения более тонкой корректировки ПП с учетом режимов эксплуатации станка. Роль ЛПР при генеративном проектировании – задание цели и выбор конструкции ШУ (набор ПП) из множества сгенерированных вариантов.

7. Работоспособность предложенной методологии генеративного проектирования ШУ продемонстрирована на примере проектирования ШУ для станков классов точности П и В, где на основе сгенерированных вариантов выбраны и назначены ПП, при которых получены предпочтительные ЭХ.

8. Результаты диссертационной работы в виде методики проектирования на основе нейронных сетей использованы ООО «Средневолжский Станкозавод» при обновлении модельного ряда SAMAT 400. Полученные нейросетевые зависимости дают возможность прогнозировать эксплуатационные характеристики и назначать проектные параметры без использования дорогостоящих прототипов для отработки разрабатываемой конструкции ШУ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Денисенко, А. Ф. Применение нейронных сетей для моделирования эксплуатационных характеристик шпиндельного узла / А. Ф. Денисенко, **Р. В. Ладыгин**, М. В. Якимов // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – № 2(62). – С. 78-86.
2. Денисенко, А. Ф. Настройки процесса построения и обучения нейросетей при решении задач по прогнозированию эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов / А. Ф. Денисенко, **Р. В. Ладыгин** // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2025. – № 6. – С. 116-129.
3. Денисенко, А. Ф. Сравнение математического и нейросетевого моделирования эксплуатационных свойств шпиндельного узла / А. Ф. Денисенко, **Р. В. Ладыгин** // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27, № 3-2(125). – С. 221-230.
4. Денисенко А.Ф., **Ладыгин Р.В.** Определение собственных частот шпинделя металлорежущего станка с использованием приведения масс и коэффициентов влияния // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2026. – №1 (173). – С. 15-25.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025684072 Российская Федерация. *Neural SpU* Программа нейросетевого моделирования эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов: заявл. 16.07.2025; опублик. 11.09.2025 / А. Ф. Денисенко, **Р. В. Ладыгин**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет».

Статьи, опубликованные в иных научных изданиях

6. **Ладыгин, Р. В.** Анализ нейронных сетей для решения задач отраслей промышленности / Р. В. Ладыгин // Высокие технологии в машиностроении : Материалы XX всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 2023. – С. 140-141.
7. Денисенко, А. Ф. Выбор и применение нейронных сетей для моделирования эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов / А. Ф. Денисенко, **Р. В. Ладыгин** // Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: Материалы международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург: ИП Жукова Е.В., 2024. – С. 18-20.
8. Определение рационального размера выборки нейросети для прогнозирования эксплуатационных характеристик шпиндельного узла / М. Д. Гуарна, А. Ф. Денисенко, **Р. В. Ладыгин**, М. В. Якимов // Высокие технологии в машиностроении: Материалы XXI всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 2024. – С. 151-155.
9. Денисенко, А. Ф. Нейросетевое прогнозирование эксплуатационных свойств шпиндельных узлов / А. Ф. Денисенко, **Р. В. Ладыгин** // Вестник

- Саратовского государственного технического университета. – 2024. – № 2(101). – С. 37-44.
10. Денисенко, А. Ф. Получение экспериментальных данных для нейросетевой оценки эксплуатационных характеристик шпиндельного узла / А. Ф. Денисенко, **Р. В. Ладягин**, М. В. Якимов // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей VI Международного форума, Санкт-Петербург, 2024. – С. 425.
 11. Денисенко, А. Ф. Нейросетевое обоснование выбора регулируемых параметров при сборке шпиндельного узла / А. Ф. Денисенко, **Р. В. Ладягин** // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2024. – № 14. – С. 25-29.
 12. Денисенко, А. Ф. Методика определения радиального зазора подшипника передней опоры шпиндельного узла для формирования входного слоя нейросети / А. Ф. Денисенко, **Р. В. Ладягин** // Инновационные технологии в машиностроении : Сборник научных трудов Международной научно-практической заочной конференции, Ульяновск, 2024. – С. 231-236.
 13. Денисенко, А. Ф. Сравнение методов обучения нейросети для проектирования шпиндельных узлов / А. Ф. Денисенко, **Р. В. Ладягин** // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2024. – № 4(103). – С. 48-54.
 14. **Ладягин, Р. В.** Моделирование эксплуатационных характеристик и конструктивных параметров шпиндельного узла путем построения нейросетей прямого и обратного действия / Р. В. Ладягин // Высокие технологии в машиностроении: Материалы XXII всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 2025. – С. 44-48
 15. Денисенко А.Ф. Генеративное проектирование шпиндельных узлов / А.Ф. Денисенко, **Р. В. Ладягин** // Высокие технологии в машиностроении: Материалы XXIII всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, , 2026. – С. 16-19.

Ладягин Роман Владимирович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ
НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Автореферат

Формат 6084 1/16. Печать офсетная. □

Подписано в печать «_____» _____ 2026 г.

Тираж 100 экз.

Заказ № типография ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический
университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)