

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО СамГТУ)

На правах рукописи



Ладягин 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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Денисенко Александр Федорович

Самара – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1. Обеспечение эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов при проектировании.....	12
1.1. Конструкции и эксплуатационные свойства современных шпиндельных узлов.....	12
1.1.1. Конструкции и компоновочные схемы современных шпиндельных узлов.....	12
1.1.2. Эксплуатационные свойства и проектные параметры шпиндельных узлов.....	19
1.1.2.1. Точность вращения шпинделей.....	19
1.1.2.2. Быстроходность шпиндельных узлов.....	20
1.1.2.3. Жесткость шпиндельных узлов.....	21
1.1.2.4. Собственные частоты изгибных колебаний шпинделя.....	23
1.1.2.5. Допустимый нагрев деталей шпиндельного узла.....	23
1.1.2.6. Требования к несущей и нагрузочной способности.....	25
1.1.2.7. Требования к долговечности.....	25
1.1.2.8. Проектные параметры шпиндельных узлов.....	26
1.2. Методологические основы инженерного анализа при проектировании шпиндельных узлов.....	28
1.2.1. Аналитические методы.....	29
1.2.2. Экспериментальные методы.....	30
1.2.3. Методы компьютерного моделирования.....	31
1.3. Нейронные сети и их возможности при проектировании.....	33
1.3.1. Строение и принципы работы нейронных сетей.....	34
1.3.2. Моделирование с помощью нейронных сетей	40
1.4. Выводы по главе 1.....	43

ГЛАВА 2. Обоснование структуры нейросети для моделирования эксплуатационных характеристик ШУ на основе сформированной экспериментальной базы обучающих данных.....	45
2.1. Экспериментальное определение базы данных для обучения НС.....	45
2.1.1. Методика определения ЭХ ШУ станков токарной группы.....	45
2.1.1.1. Методика определения температуры в зоне передней опоры шпинделя.....	45
2.1.1.2. Методика определения биения шпинделя.....	48
2.1.1.3. Методика определения жесткости ШУ.....	49
2.1.2. Применение генератора случайных чисел при планировании эксперимента с большим числом переменных.....	53
2.2. Обоснование структуры НС для моделирования эксплуатационных характеристик ШУ в зависимости от режимов эксплуатации.....	56
2.2.1. Настройки и процесс построения нейросети прогнозирования эксплуатационных характеристик ШУ в зависимости от режимов эксплуатации.....	56
2.2.2. Анализ нейросети прогнозирования эксплуатационных характеристик ШУ.....	65
2.3. Выводы по главе 2.....	73
ГЛАВА 3. Формирование интегрированного обучающего массива данных для моделирования эксплуатационных характеристик ШУ с учетом расширенного количества проектных параметров.....	74
3.1. Методология получения интегрированной обучающей выборки.....	74
3.1.1. Методика экспериментального определения радиального зазора подшипников передней опоры ШУ.....	75
3.2. Методология определения обучающих данных для НС на основе аналитических расчетов.....	79
3.2.1. Определение избыточной температуры переднего подшипника шпинделя	79
3.2.2. Определение упругого смещения переднего конца шпинделя.....	79

3.2.3. Определение биения переднего конца шпинделя.....	81
3.2.4. Методика определения динамических характеристик ШУ.....	82
3.3. Применение численного моделирования при формировании набора обучающих данных.....	88
3.3.1. Обоснование выбора направления действия нагружающей силы.....	88
3.3.2. Численное моделирование деформации корпуса ШУ под действием нагружающей силы.....	91
3.4. Получение интегрированного обучающего массива данных.....	98
3.4.1. Результаты экспериментальных исследований.....	98
3.4.2. Результаты аналитических расчетов и численного моделирования.....	102
3.4.3. Валидация экспериментальным данным результатов аналитических расчетов.....	105
3.4.4. Верификация результатов аналитических расчетов динамических характеристик результатам численного моделирования.....	107
3.5. Выводы по главе 3.....	110
ГЛАВА 4. Моделирование эксплуатационных характеристик ШУ с учетом расширенного количества проектных параметров на основе интегрированного обучающего массива данных и оценка модели.....	112
4.1. Обоснование архитектуры нейросети для моделирования эксплуатационных характеристик ШУ с учетом расширенного количества проектных параметров.....	112
4.1.1. Настройки процесса построения нейросети моделирования эксплуатационных характеристик ШУ при расширенном количестве проектных параметров.....	112
4.1.1.1. Влияние количества нейронов скрытого слоя на прогнозирование эксплуатационных характеристик ШУ с учетом интегральных показателей проектных параметров.....	112
4.1.1.2. Влияние ФА нейронов выходного слоя на качество моделирования эксплуатационных характеристик ШУ.....	114

4.1.2. Анализ результатов нейросетевого моделирования эксплуатационных характеристик ШУ с учетом расширенного количества проектных параметров.....	117
4.2. Оценка использования нейросетевой модели для прогнозирования эксплуатационных характеристик ШУ.....	124
4.3. Выводы по главе 4.....	135
ГЛАВА 5. Реализация генеративного проектирования шпиндельных узлов путем применения программного обеспечения на основе нейронных сетей	137
5.1. Моделирование проектных параметров ШУ с помощью нейронных сетей.....	137
5.2. Методика генеративного проектирования ШУ на основе нейронных сетей.....	141
5.3. Реализация генеративного проектирования ШУ	143
5.4. Выводы по главе 5.....	159
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	161
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	163
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	179

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ШУ – шпиндельный узел;

ТЗ – техническое задание;

ЭХ – эксплуатационные характеристики;

ПП – проектные параметры;

МКЭ – метод конечных элементов;

ЛПР – лицо принимающее решение;

ПФЭ – полный факторный эксперимент;

ДФЭ – дробный факторный эксперимент;

ГПСЧ – генератор псевдослучайных чисел;

МР – межопорное расстояние;

НС – нейронная сеть;

НСМ – нейросетевая модель;

MLP – многослойный персептрон;

RBF – радиальные базисные функции;

ФА – функция активации;

BFGS – метод оптимизации функции ошибок (Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno);

SOS – функция ошибок (сумма квадратов отклонений);

MAPE – относительная ошибка;

ρ – коэффициент корреляции Спирмена;

r – коэффициент корреляции Пирсона;

ЛМ – линейная модель;

НМ – нелинейная модель.

ВВЕДЕНИЕ

По данным Института статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ в ходе анализа развития станкостроения по итогам 2024 г сводная стратегия развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2030 г. и на период до 2035 г. задает следующие ориентиры: целевой объем внутреннего выпуска станкоинструментальной продукции должен превысить 150 млрд. руб. к 2035 г. [42].

Для выхода на такой результат среднегодовой прирост производства в отрасли должен составлять не менее 5 %, а доля российских станков на внутреннем рынке достичь 38 %. Темп прироста на уровне 5 % в год не выглядит сверхъестественным, но для его достижения за 11 лет отрасль должна увеличить выпуск продукции более чем на 70 %.

В то же время анонсированный в 2023 г. федеральный проект «Развитие станкоинструментальной промышленности» - ключевой инструмент модернизации экономики России, направленный на обеспечение устойчивости и технологического лидерства [123] ставит перед отраслью еще более амбициозные задачи. Согласно одной из его целей, прирост производства за период 2022–2030 гг. должен составить 103 %, что требует ежегодного увеличения производства в среднем на 9.3 %.

В 2024 г. отрасль сохраняет положительную динамику роста объемов производства, однако темпы прироста снизились после резкого подъема в 2023 г.

По итогам декабря 2024 г. индекс промышленного производства станков, машин и оборудования для обработки металлов составил 101.6 % по сравнению с аналогичным периодом 2023 г., а совокупный прирост за весь 2024 г. достиг 126.1 %. Таким образом, за два года (к декабрю 2022 г.) выпуск увеличился более чем на 70 % (таблица).

Таблица - Динамика индекса промышленного производства станков, машин и оборудования*, %

Федеральные округа	дек 2024*	Накопительный прирост" в дек к янв 2024	Прирост дек 2024	
			к декабрю 2022	к декабрю 2021
РФ	101.6	126.1	73.2	67.5
СФО	120.4	95.8	69.4	2.5
ЮФО	120.0	161.1	71.1	257.5
ПФО	108.3	74.4	35.4	19.6
ЦФО	101.5	132.5	56.5	192.8
УФО	90.5	87.6	-15.7	129
СЗФО	81.4	110.2	30.7	-19.7

ДФО	786	—	—	—
-----	-----	---	---	---

*Индексы промышленного производства (ИПП) рассчитаны к соответствующему периоду предыдущего года "

**Использовался базисный темп прироста, рассчитанный на основе данных ИПП Росстата (в % к предыдущему периоду)

Источник: расчеты ИСИЭЗ НИУ ВШЭ на основе данных Росстата

При этом по данным консалтинговой компании АТК+ собственное производство станков в стране за пять лет (с 2020 к 2024 г.) выросло более чем вдвое – с 5300 до 11360 штук [17].

Основные производители отечественных металлорежущих станков представлены следующими предприятиями:

Крупные:

- Южный завод тяжелого станкостроения (ЮЗТС) г. Краснодар;
- Ульяновский завод тяжелых и уникальных станков (УЗТС) г. Ульяновск;
- «Станкозавод «ТБС» г. Санкт-Петербург;
- Сасовский станкостроительный завод (САСТА) г. Сасово, Рязанская область.

Средние:

- Липецкое станкостроительное предприятие (ЛСП) г. Липецк;
- «Вятский Станкостроительный Завод» г. Киров.

Малые:

- Рязанская станкостроительная производственная компания (РСПК) г. Рязань
- Рязанский завод токарных станков (РЗТС) г. Рязань
- «СтанкоМашКомплекс» г. Тверь
- Средневожжский станкостроительный завод (СВСЗ) и другие.

Отечественные станкостроительные предприятия находятся в жесткой конкуренции с импортными производителями, занимающими до 98 % рынка металлообрабатывающего оборудования (по данным консалтинговой компании АТК+).

Для увеличения доли рынка отечественным предприятиям требуется наладить выпуск конкурентно-способных станков с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Повышение точности и производительности металлорежущих станков (МРС) является ключевой задачей отечественного станкостроения в условиях реализации стратегии импортозамещения и технологического суверенитета. 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.

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. 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 их взаимного влияния. 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.

Цель диссертационной работы – 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 необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ конструкций и методов проектирования современных шпиндельных узлов для выявления ключевых проектных параметров (ПП) и эксплуатационных характеристик (ЭХ), определяющих их точность и производительность.

2. Сформировать репрезентативную базу данных для обучения нейронной сети, комбинируя данные натурного эксперимента, конечно-элементного моделирования и аналитических расчетов.

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

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

5. Разработать программное обеспечение поддержки принятия решений на основе обученной нейронной сети, 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.

Научная новизна работы заключается в:

- 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;
- разработке методики формирования репрезентативной обучающей выборки для нейронной сети прогнозирования ЭХ ШУ, основанная на комбинации методов планирования натурного эксперимента, конечно-элементного анализа и аналитических расчетов;
- получении количественных зависимостей влияния конструктивных параметров корпуса на жесткость шпиндельного узла;

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

Практическую значимость имеют:

- 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;

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

- методология генеративного проектирования ШУ на основе разработанного программного обеспечения.

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 нейросетевой модели, подтверждающие ее работоспособность и точность прогнозирования для задач проектирования.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность научных положений и результатов 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.

ГЛАВА 1. Обеспечение эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов при проектировании

1.1. Конструкция и эксплуатационные свойства шпиндельных узлов

С целью выделения конкурентных преимуществ производителям станков необходимо в первую очередь обратить внимание на подсистемы станка, максимально влияющие на точность и производительность обработки. Основным узлом станка, оказывающим наибольшее влияние на качество полученных деталей, является шпиндельный узел, который представляет собой сложную многокомпонентную систему, и от его характеристик во многом зависят эксплуатационные характеристики всего станка в целом.

Требования к эксплуатационным характеристикам шпиндельных узлов могут быть сформулированы на основе общих требований, предъявляемых к металлорежущим станкам: точность, жесткость, нагрузочная способность и быстроходность. Они были проанализированы и изложены в работе [109].

В целом, ШУ должны обеспечивать заданную мощность в сочетании с высокой быстроходностью, а также иметь высокую точность вращения, жесткость, несущую способность и долговечность, ограниченное тепловыделение в опорах и, соответственно, малые температурные деформации. ШУ, таким образом, должны быть технологичными, экономичными и надежными [48]

1.1.1. Конструкция и компоновочные схемы современных шпиндельных узлов

ШУ станков токарной группы и обрабатывающих центров имеют разные варианты сопряжения с элементами станка: на горизонтальной (рисунок 1.1) или наклонной (рисунок 1.2) станине.



Рисунок 1.1. ШУ на горизонтальной станине

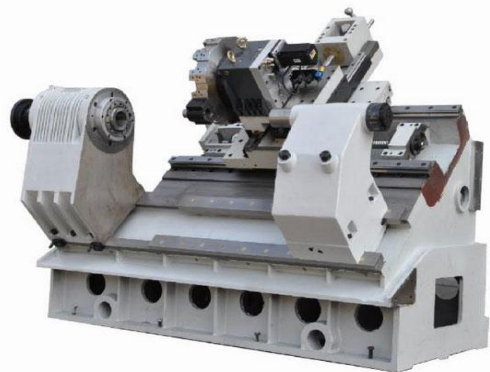


Рисунок 1.2. ШУ на наклонной станине

При модульном принципе компоновки станка может быть несколько конструктивных исполнений ШУ [160], к примеру, одна конструкция ШУ для реализации концепции скоростного резания (рисунок 1.3, а) на шариковых подшипниках, а для силовой – другая - на роликовых (рисунок 1.3, б).

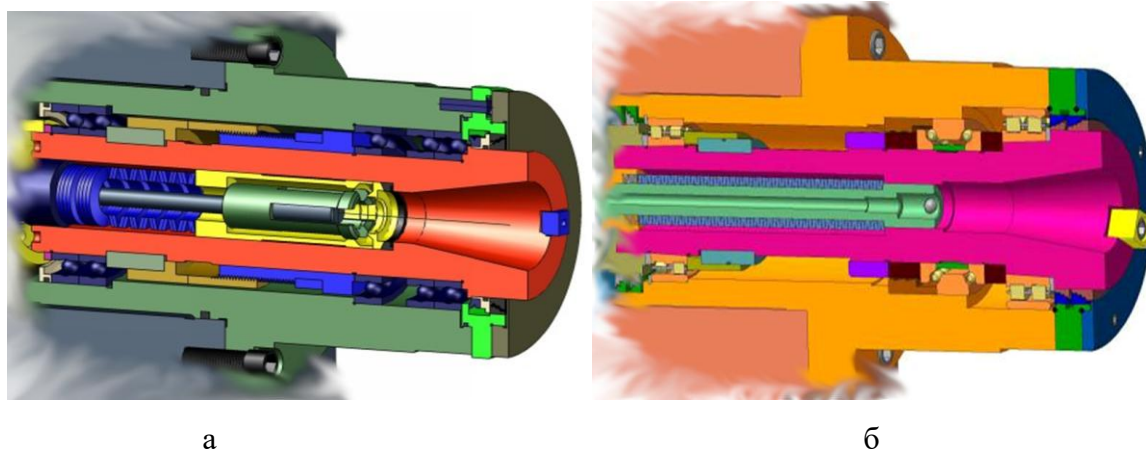


Рисунок 1.3. Набор комплектных, взаимозаменяемых исполнений ШУ обрабатывающего центра IP500ПМФ4: а – скоростное; б – силовое

Корпуса шпиндельных бабок относятся к тонкостенным деталям, все три габаритных размера которых – величины одного порядка. Форма и размеры корпусов ШУ определяются условиями размещения в них необходимых механизмов, а также технологическими соображениями. Основные размеры шпиндельных бабок в значительной степени определяются условиями требуемой ориентации шпинделей. Шпиндельные бабки снабжаются перегородками для концевых опор коротких валов и для промежуточных опор длинных валов. Для повышения жесткости в направлении, перпендикулярном к стенкам, применяются специальные ребра, двойные стенки под передним подшипником шпинделя. Для увеличения радиальной жесткости используются бобышки для подшипников валов, которые обычно размещаются внутри корпуса.

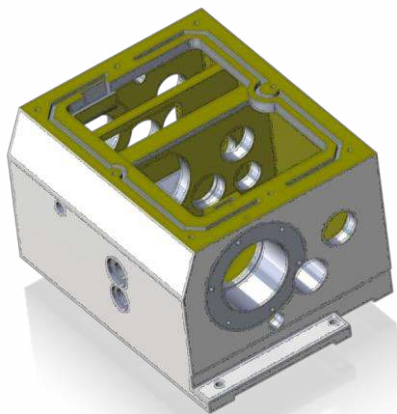


Рисунок 1.4. Корпус шпиндельной бабки станка с ЧПУ TC1625Ф3 (Россия)

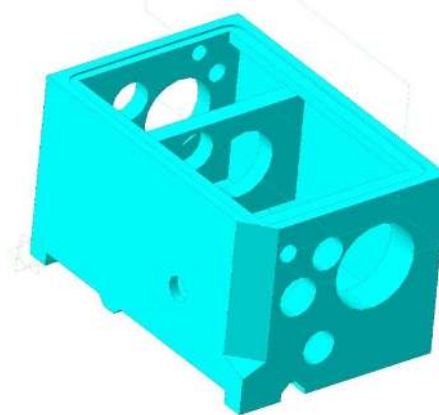


Рисунок 1.5. Корпус шпиндельной бабки станка с ЧПУ 16Б16Т1 (Россия)

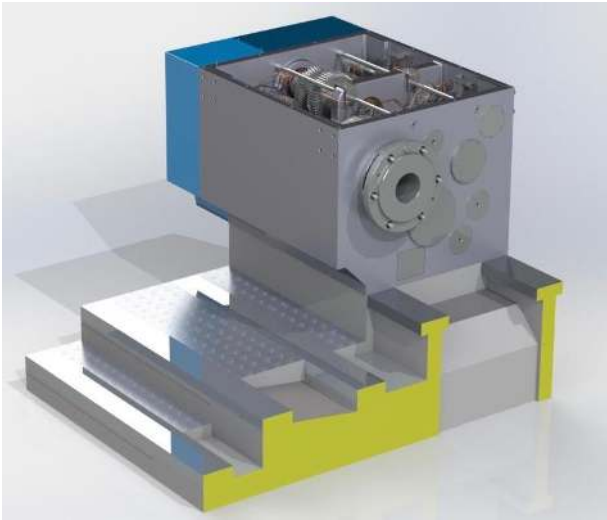


Рисунок 1.6. Шпиндельный узел тяжелого станка с ЧПУ СА1600Ф4П (Россия)

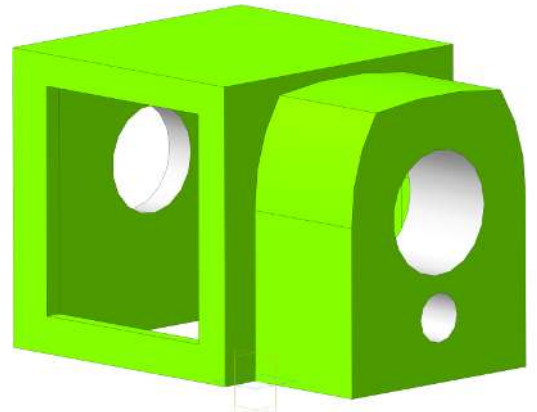


Рисунок 1.7. Корпус шпиндельной бабки станка Schaublin 135 (Швейцария)

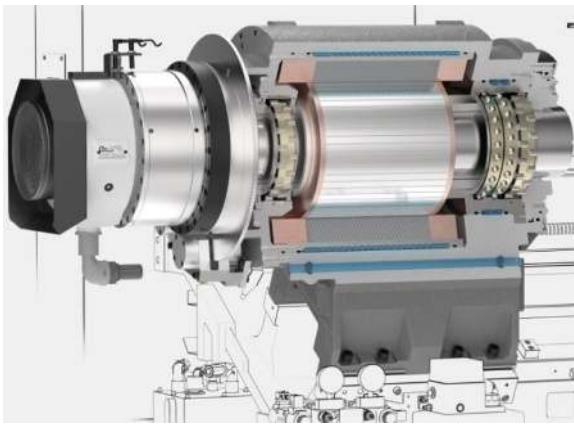


Рисунок 1.8. Корпус мотор-шпинделя станка TD Z2200 (Италия)

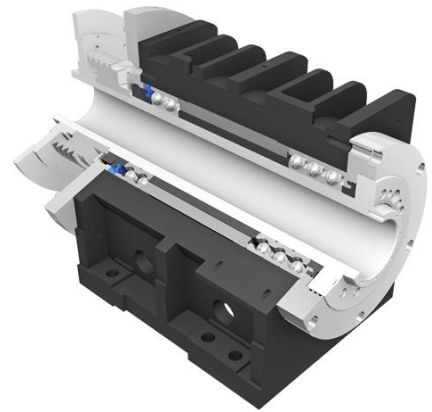


Рисунок 1.9. Корпус шпиндельной бабки станка с ЧПУ WIA Machine Tool L230LMSA (Корея)

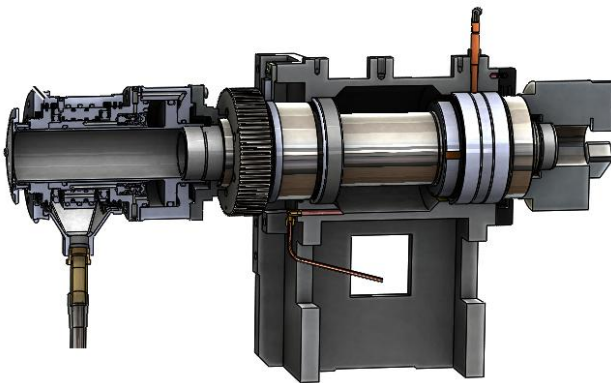


Рисунок 1.10. Корпус шпиндельной бабки станка с ЧПУ HAAS ST-25 (США)



Рисунок 1.11. Шпиндельный узел станка с ЧПУ SCK-46CY (Китай)

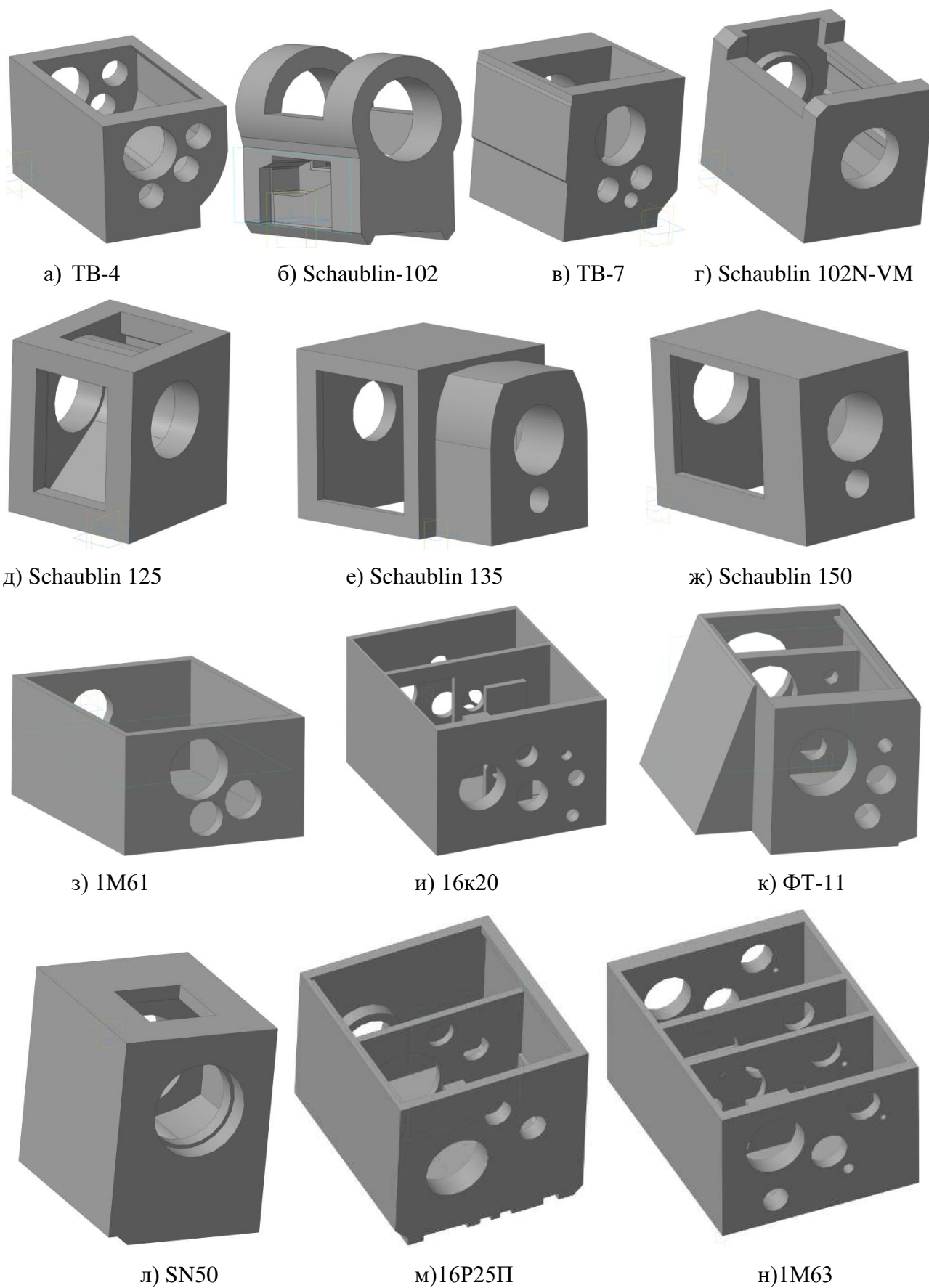


Рисунок 1.12. Модели ШУ для численного моделирования

Анализ существующих ШУ токарных станков показал, что конструкцию корпуса определяет реализуемая модель резания – силовая или скоростная, вследствие чего радиальные нагрузки от сил резания, передаваемые через подшипники качения, воспринимаются стенкой корпуса (рисунок 1.4 - 1.7, силовое резание) или гильзой (рисунок 1.9 - 1.11, скоростное). Как правило, для первого вида характерен корпус в виде параллелепипеда с расположением на опорных стенках дополнительных расточек под валы перебора и вилки его включения. Примеры исполнения корпусов такого вида представлены на рисунок 1.12. Как видно из этого рисунка зачастую отверстие основной расточки у этих корпусов смещено относительно осей симметрии передней стенки. Корпуса таких конструкций (рисунок 1.4 - 1.6, и 1.12, а, в, з, и, к, м, н) вызывают анизотропию свойств при действии на шпиндель силового нагружения – в первую очередь это сказывается на неодинаковом упругом смещении переднего конца шпинделя в плоскости стенки. Конструкции же при отсутствии или минимальном количестве дополнительных расточек на передней стенке, когда отверстие под передний подшипник шпинделя расположено максимально близко к осям её симметрии (рисунок 1.7, и 1.12, г, д, ж, л), имеют более изотропные характеристики. Для достижения высоких частот вращения в конструкции рисунок 1.8 используется мотор-шпиндель, у которого применяется принудительное охлаждение подшипников опор и корпуса статора, что необходимо для обеспечения теплоустойчивости ШУ.

Для конструкций корпусов ШУ с гильзой характерны сравнительно малые габариты, в отдельных случаях (рисунок 1.9) с наличием ребрения для увеличения его жесткости и улучшения теплоотдачи. В корпусе имеется одно большое отверстие для установки в него гильзы, в которой на подшипниках уже предварительно смонтирован шпиндель. Гильза обеспечивает дополнительную жесткость ШУ, кроме того в компоновках с её использованием проще обеспечить требуемую точность и простоту сборки узла. Приводной элемент в таких ШУ, как правило, расположен за задней опорой.

Наибольшее применение на практике нашли двухопорные шпиндельные узлы на опорах качения. Трехопорные узлы имеют более высокую жесткость и точность, но дороже двухопорных. Как правило, передняя опора воспринимает не только радиальную, но и осевую нагрузку. При этом задняя опора имеет возможность перемещения в осевом направлении («плавать»), не препятствуя тепловому удлинению шпинделя. Для упрощения конструкции, сборки и обслуживания шпинделя иногда плавающей выполняют переднюю опору. Передняя опора нагружена больше задней, поэтому ее делают более жесткой, для чего komponуют из нескольких подшипников. Погрешности передней опоры влияют на точность обработанных на станке деталей в большей степени, чем погрешность задней. В связи с этим в передней опоре устанавливают

подшипники более точные (2 и 4 класса) по сравнению с подшипниками задней опоры (4-5 класса) [61]

Исполнение правой стенки корпуса (месторасположение передней опоры) для конструкций показанных на рисунке 1.12 приведено в таблице 1.1, в которой отражены величины наиболее значимых параметров – её габаритов, координат и диаметральных размеров основной расточки под передний подшипник шпинделя, то есть параметров предопределяющих типоразмер всего корпуса и влияющих на размеры обрабатываемых деталей.

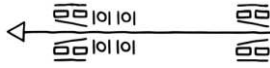
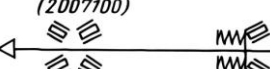
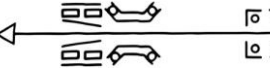
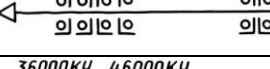
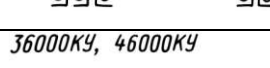
Таблица 1.1 - Конструкция правой стенки ШУ

позиция рисунок	Марка станка	Габариты правой стенки, (выс×шир×тол) мм:	Координаты основ- ной расточки, (от левого нижнего га- барита X,Y), мм:	Диаметр ос- новной рас- точка, Ø мм
а	TB-4	154×165×38	61×108	72,0
б	Schaublin-102	160×112×50	55×104	75
в	TB-7	194×180×31	79×130	80
г	Schaublin 102N-VM	199×180×33	90×111	90
д	Schaublin 125	201×180×34	80×125	90
е	Schaublin 135	252×210×90	105×149	110
ж	Schaublin 150	265×214×85	105×168	110
з	1M61	240×380×42	157×170	125
и	16к20	414×545×64	146×215	152,4
к	ФТ-11	386×380×82	128×250	180
л	SN50	396×304×71	160×250	180
м	16P25П	555×633×51	200×256	210
н	1M63	480×700×71	190×315	210

В жестких конструкциях ШУ используются роликовые (цилиндрические и конические) подшипники качения, в жестких и одновременно быстроходных ШУ применяются шариковые радиально-упорные подшипники (до 4-х в передней опоре), быстроходные же ШУ комплектуются 3-я и менее подшипниками.

Типовые компоновки опор ШУ в зависимости от параметра быстроходности приведены в таблице 1.2 [107].

Таблица 1.2 - Схемы компоновки опор шпиндельных узлов

Узлы	Конструктивная схема		Параметр быстроходности $dn \cdot 10^{-5}$, мм·мин ⁻¹	
			Пластичная смазка	Жидкая смазка или смазка масляным ту- маном
Низкоскоростные	1	<i>3182100 + 8100</i> 	1,5	1,8
	2	<i>697000 + 17000 (2007100)</i> 	2,0	2,5
	3	<i>67000 + 17000</i> 	2,5	3,0
Среднескоростные	4	<i>3182100 + 178000</i> 	2,5	3,5
	5	<i>3182100 + 178000 + 46000КУ</i> 	2,5	3,5
	6	<i>36000КУ, 46000КУ</i> 	3,0	4,5
	7	<i>36000КУ, 46000КУ</i> 	4,0	5,0
Высокоскоростные	8	<i>36000КУ, 46000КУ</i> 	5,0	6,0
	9	<i>36000КУ, 46000КУ</i> 	6,0	8,0
	10	<i>36000КУ, 46000КУ</i> 	6,0	8,0
	11	<i>36000КУ, 46000КУ</i> 	7,0	11,0

1.1.2. Эксплуатационные характеристики и проектные параметры шпиндельных узлов

1.1.2.1. Точность вращения шпинделей

Общим и частным вопросам проектирования, исследования и эксплуатации ШУ с различными типами опор посвящены труды 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, П.М. Чернянского, В.С. Хомякова, Н.А. Кочинева, Ф.С. Сабирова, И.А. Зверева, С.Е. Бондаря, В.А. Лизогуба и других отечественных и зарубежных ученых [110]. В трудах указанных исследователей были сформулированы основные требования к шпиндельным узлам, а также было отмечено, что точность вращения шпинделей является важнейшей характеристикой шпиндельного узла, в значительной мере определяющей точность обработки деталей на станке. Она зависит от точности изготовления и сборки подшипников и сопряженных с подшипниками деталей ШУ, от регулировки подшипников и от частоты вращения шпинделя [5].

Точность вращения шпинделя определяется двумя показателями: радиальным и осевым биениями, а также смещением оси вращения, называемым погрешностью вращения [118, 142]. Первый показатель характеризует эксцентриситет рабочих и посадочных поверхностей подшипников корпуса шпиндельной бабки и шпинделя, второй – процесс упругого их взаимодействия. Исследования [118, 142] показали, что радиальное биение определяется удвоенной амплитудой биения на частоте вращения шпинделя, а погрешность – удвоенным квадратным корнем из суммы квадратов амплитуд всех частотных (спектральных) составляющих биения шпинделя, отличных от частоты вращения шпинделя.

Таким образом, радиальное биение является результатом совместного проявления отклонения от круглости профиля рассматриваемого сечения и отклонения его центра относительно базовой оси. Оно не включает в себя отклонения формы и расположения образующей поверхности вращения [20].

Квазистатическая точность вращения шпинделей (при медленном вращении) регламентируется стандартами на станки. Регламентируются следующие параметры: радиальное биение центрирующей (базирующей) шейки шпинделя; радиальное биение конического отверстия шпинделя; радиальное биение контрольной оправки, установленной в коническом (базирующем) отверстии шпинделя; осевое биение шпинделя; торцовое биение опорного (базирующего) бурта шпинделя.

Для токарно-винторезных станков по ГОСТ 18097-2024 допуск на биение шпинделя для

станков классов точности Н составляет для $D_a \leq 800$ мм 10 мкм, для $D_a > 800$ мм - 15 мкм; для станков классов точности П, В и А - 7 мкм; 5 мкм и 3 мкм соответственно (D_a - наибольший диаметр заготовки).

Экспериментальные исследования [140] показали, что при низких частотах вращения шпинделя отклонение от круглости близко к величине биения оси шпинделя, при максимальных частотах разница между отклонением от круглости изделий и биением шпинделя увеличивается. Это объясняется тем, что точность обработки будет определяться точностью вращения шпинделя (биением оси в зоне обработки), связанным с точностью изготовления подшипников и сопряженных с подшипниками деталей шпиндельного узла, зависеть от качества монтажа, от регулировки подшипников (величины зазора-натяга) и от упругих деформаций опор.

Динамические смещения мгновенной оси вращения шпинделя под действием возмущений от опор и привода формируют динамическую точность вращения шпинделя, которая в настоящее время не регламентируется, что связано, в первую очередь, с высокими требованиями к техническим средствам для ее измерения. Спектральный анализ динамической точности вращения шпинделя позволяет давать дифференцированную оценку частотным составляющим, различно влияющим на формирование погрешностей обрабатываемой детали [129]. Так, составляющая с частотой вращения шпинделя (биение шпинделя) вызывает в основном погрешности размеров и взаимного расположения обрабатываемых поверхностей. Другие частотные составляющие вызывают погрешности формы и микропрофиля обрабатываемых поверхностей (волнистость, шероховатость).

1.1.2.2. Быстроходность шпиндельных узлов

Требования к быстроходности шпинделей определяются целевым назначением и особенностями станков. Показателем быстроходности шпинделя служит произведение $(d \times n)$, где: d – диаметр шейки шпинделя под передний подшипник [14, 112, 107]; n – максимальная частота вращения шпинделя. Быстроходность зависит от типа шпиндельных подшипников, вида и способа их смазки, наличия (отсутствия) их охлаждения. В среднескоростных ШУ не принимают специальных мер для достижения высоких скоростей и показатель $d \times n \leq 0,5 \cdot 10^6$ мм · мин⁻¹. При применении более совершенной смазки, модернизации охлаждения, сверх точной балансировки шпинделя и других мер значения $d \times n$ могут быть увеличены до $1,5 - 2,5 \cdot 10^6$ мм · мин⁻¹ [104, 105].

Большое влияние на работу ШУ оказывает диапазон регулирования частоты вращения шпинделя. При конструировании ШУ, работающих в широком диапазоне частот вращения,

возникают проблемы, связанные с нестабильностью температуры подшипниковых опор и, соответственно, изменениями величины зазора-натяга подшипников [143].

С ростом частот вращения в опорах качения возрастают энергетические потери и в высокоскоростных ШУ они оказываются соизмеримыми с затратами энергии на сам процесс резания [73].

1.1.2.3. Жесткость шпиндельных узлов

Необходимость повышения жесткости ШУ вызвана возрастающими требованиями к динамическому качеству станков в условиях работы на тяжелых или скоростных режимах обработки и к точности обработки.

Общий баланс жесткости ШУ складывается из трех составляющих: жесткостей тела шпинделя, опор и корпуса. Требования к жесткости ШУ в связи с многообразием влияющих факторов и конструктивных особенностей не регламентированы.

Различают статическую и динамическую жесткости ШУ. Статическая жесткость - это способность шпиндельного узла сопротивляться упругим деформациям под действием постоянной или медленно изменяющейся нагрузки. Она характеризуется отношением приложенной силы к вызванной ею деформации.

Наряду со статической жесткостью для оценки силовых смещений, которые определяют точность ШУ станка под действием приложенных к ней сил F , используют характеристику податливости - величину, обратную жесткости [157]:

$$W(F) = \frac{y_F}{F}, \quad (1.1)$$

где y_F - смещение под воздействием возникших сил, мкм; F - сила, приложенная к переднему концу шпинделя, Н.

Динамическая жесткость описывает сопротивление деформации под действием динамической нагрузки. Она характеризуется отношением амплитуды гармонической вынуждающей силы к амплитуде гармонических вынужденных колебаний.

Статическая и динамическая жесткости ШУ зависят от многих факторов: типа опор, способа создания и величины предварительного натяга, демпфирования в подшипниковых опорах, частоты вращения шпинделя, конструктивных размеров шпинделя и др. [49, 72, 73]. Так, например, при равных наружных диаметрах у подшипников с большим внутренним диаметром жесткость ШУ выше за счет большего диаметра шпинделя и большего числа тел качения. Это особенно заметно для небольших диаметров шпинделей (10...45 мм), у которых в балансе сум-

марной жесткости ШУ, в которую вносит свой вклад жесткость самого шпинделя и жесткость подшипниковых опор, преобладает составляющая от жесткости шпинделя, и малозначимо для шпинделей диаметром 100 мм и более, т.к. в балансе суммарной жесткости ШУ начинает преобладать составляющая от жесткости подшипниковых опор.

С увеличением предварительного натяга подшипников опор шпинделя жесткость ШУ сначала возрастает быстро, а затем рост ее замедляется, и дальнейшее увеличение натяга становится малоэффективным и даже приводит к недопустимому тепловыделению в подшипниковых опорах.

Выбор величины предварительного натяга зависит от частоты вращения шпинделя и величины нагрузок на шпиндель: при любых нагрузках в работе должны принимать участие все тела качения. Раскрытие стыка подшипника от сил резания недопустимо, так как в случае раскрытия стыка скачком падает точность вращения ШУ, начинается проскальзывание шаров, и в результате наблюдается катастрофически быстрый рост температуры подшипника, ухудшение трибологических свойств смазки и даже быстрый и необратимый выход из строя ШУ.

Корпус вносит существенную долю в баланс общей жесткости ШУ. Его жесткость будет зависеть от: толщины стенок; положения и диаметров основной расточки (под шпиндель) и дополнительных (под валы переборной группы); наличия ребер и перегородок и т.д. Однако, в сложившейся отечественной практике проектирования ШУ сравнительно малое внимание уделяется учету конструктивных параметров корпуса шпиндельного узла при оценке его жесткости, что нашло отражение в незначительном числе публикаций [57, 119, 156], которые были сосредоточены в основном на определении деформаций стенок корпусов коробчатого типа в направлении, перпендикулярном стенке. В этих работах приведены общие рекомендации по выбору толщин стенок, влиянию отверстий на жесткость и способам ее повышения с помощью бобышек. Вместе с тем по результатам экспериментальных исследований, проведенных в МВТУ им. Баумана на базе токарного станка АТ-320, вклад корпуса в упругих деформациях ШУ для радиального направления достигал 36 %.

Многие традиционные решения, такие, например, как увеличение толщины стенок, не всегда приводят к желаемому повышению жесткости. В то же время, как показано в работе [132], оптимизация распределения массы корпуса (на примере станка 1К62) позволила снизить влияние деформаций на точность ШУ на 35 %.

Перспективным направлением стало применение численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ) для анализа деформаций под нагрузкой. Результаты исследований [132, 65, 58, 102, 3, 103] подтверждают эффективность этого подхода. МКЭ особенно успешно

применяется для моделирования упругих деформаций крупногабаритных деталей сложной формы, в том числе корпусных элементов станков [137, 153].

1.1.2.4. Собственные частоты изгибных колебаний шпинделя

Жесткость ШУ непосредственно влияет на другую важную эксплуатационную характеристику, определяющую его точность в динамическом режиме – собственную частоту изгибных колебаний шпинделя.

В работе [60] перечислены основные параметры, характеризующие динамические свойства шпиндельных узлов: собственная частота (резонансная частота); демпфирование системы; амплитуда вибраций с собственной частотой (резонансная амплитуда). Большое влияние на динамические свойства шпиндельных узлов оказывает жесткость системы шпиндель-подшипники, которая при моделировании рассматривается как блок параллельно включенных пружин. Резонансная амплитуда и динамическая жесткость зависят от статической жесткости. Формы колебаний дают представление об участках шпинделей, размах колебаний которых на тех или иных частотах наибольший, что важно для правильного конструирования ШУ, в частности размещения масс.

Низшие собственные частоты шпинделей - важные самостоятельные характеристики ШУ, так как работа шпинделей в резонансной зоне с частотой вращения, близкой к собственной частоте (в диапазоне $(0,8...1,2)f_c$, где f_c - собственная частота), невозможна.

Большинство шпинделей работает в дорезонансной зоне (т.е. с частотой вращения меньшей, чем первая собственная частота). Для высокоскоростных шпинделей, в частности для высокоскоростного фрезерования или шлифования, работающих в зарезонансной зоне, необходимо применение специальных устройств для безопасного перехода через резонанс при разгоне и торможении. Таким образом, расчет собственных частот при проектировании высокоскоростных ШУ обязателен.

Обеспечение расположения собственных частот изгибных колебаний исходят из рекомендаций и в зависимости от класса точности станка составляют: $f_c \geq 250$ Гц - для станков нормальной точности; $f_c \geq 500$ Гц - для станков повышенной точности [41].

1.1.2.5. Допустимый нагрев деталей шпиндельного узла

Новые инструментальные материалы позволяют существенно повысить принятые сегодня скорости резания. Но уже при существующем уровне скоростей теплоотдача в станке и со-

проводящие ее тепловые деформации деталей и узлов станка, ведут к изменению их геометрических размеров и формы (растяжение, изгиб или скручивание) и, как следствие, к их линейным и угловым смещениям в пространстве [1, 2].

Следствием этого является изменение расчетного положения оси шпинделя относительно направляющих; изменение координат нулевой точки; отклонение от прямолинейности, параллельности и перпендикулярности перемещения подвижных органов станка; нарушение стабильности работы систем обратной связи и др. [19, 8, 9, 43, 66, 67, 167, 168, 169, 171, 175]. Характеристику тепловых смещений, определяющую точность ШУ станка под действием тепловых воздействий, можно представить в виде [157]:

$$W(t) = \frac{y_t}{t}, \quad (1.2)$$

где y_t – смещение под воздействием тепловых возмущений, мкм; t – тепловое воздействие, °C.

Нагрев в опорах качения обусловлен энергетическими потерями, которые зависят от типа опор, вида смазочного материала, его количества и вязкости. Уменьшение потерь достигается при «минимальном» количестве смазочного материала. Требование снижения потерь на трение и соответствующего нагрева подшипников обусловлено тем, что при высоких скоростях шпиндельные опоры работают в условиях нагрева, близкого к предельно допустимому. Нагрев шпиндельных опор и температурные деформации шпинделя в результате нагрева в значительной мере ограничивают форсирование режимов обработки.

В настоящее время норма предельно допустимого нагрева подшипников ШУ установлена только для станков нормальной точности. Допустимый нагрев (избыточная температура) на наружном кольце принят за 50 °C. В соответствии со сложившейся практикой конструирования и производства ШУ станков, рекомендованы примерные величины температуры допустимого нагрева наружных колец подшипников, указанные в таблице 1.3 [145].

Таблица 1.3 - Допустимый нагрев подшипников

Класс точности станка	Н	П	В	А	С
Допустимая избыточная температура наружного кольца, °C	50	30-35	20-25	15-20	8-10

Исследования [18] показали, что в станках с несимметричной шпиндельной бабкой и смещенной от плоскости симметрии фиксирующей поверхности (осью фиксирующего шипа) поперечные тепловые смещения бабки (определялись по смещению шпинделя) больше и дости-

гают 7,5...35 мкм у отечественных и импортных станков после работы на холостом ходу в течение 2,5...3,0 ч при частоте вращения шпинделя $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$.

1.1.2.6. Требования к несущей и нагрузочной способности

Под нагрузочной способностью ШУ понимаются допускаемый крутящий момент или мощность на шпинделе, которые определяются возможностями привода и несущей способностью подшипниковых опор.

Несущая и нагрузочная способности ШУ характеризуется соответственно динамической (С) и статической (C_0) грузоподъемностью подшипников, которые указываются в каталогах производителей подшипников. Допускаемые опорными качения нагрузки ограничены в основном выносливостью поверхностных слоев колец и тел качения и определяются расчетом на выносливость.

Несущая способность опор ШУ, выбранных по критерию жесткости, как правило, соответствует требованиям, предъявляемым к шпиндельным опорам станков.

В качестве показателя нагрузочной способности принимается отношение N/d , где: N - мощность привода ШУ, кВт; d - диаметр шейки шпинделя в передней подшипниковой опоре, мм. Для высокоскоростных электрошпинделей (моторшпинделей) этот показатель составляет 0,7...0,8 кВт/мм, в ШУ токарных и фрезерных станков отношение N/d обычно находится в интервале 0,2...0,3 кВт/мм [105].

1.1.2.7. Требования к долговечности

Поскольку размеры шпинделей выбирают в основном по критерию жесткости, расчетная долговечность опор по усталости многократно превышает допускаемую, и, как правило, расчет на долговечность имеет условный характер. Ресурс прецизионных подшипников качения в составе ШУ обусловлен, в наибольшей степени и в большинстве случаев, потерей точности вращения шпинделя в связи с абразивным износом (микрочастицами загрязнений, попавшими в ШУ при сборке и эксплуатации, а также микрочастицами абразивов, внедренными в поверхностные слои деталей ШУ при их финишной обработке и со временем вышедшими на их поверхность) дорожек качения подшипников и разрегулировкой опор (по данным фирмы FAG [141], выход подшипников из строя из-за усталостного разрушения наблюдается в 10–15 % случаев). В настоящее время оценка долговечности подшипников по их абразивному износу и методика их ускоренных испытаний – нерешенная научная проблема. Ресурс подшипников зависит также

от качества их изготовления и особенно – от качества их монтажа в ШУ, однако этот вопрос также изучен недостаточно.

В связи со сказанным, специальной регламентации по критериям усталостных повреждений и по износу долговечность опор качения ШУ не подвергается. Однако, в связи с ростом частот вращения и, как следствие, значительными инерционными нагрузками на тела качения в подшипниках (соизмеримыми с нагрузками от резания), в некоторых случаях обеспечение долговечности шпиндельных опор может стать проблемой [136].

К настоящему времени, практикой проектирования и производства ШУ принята расчетная долговечность опор обычных узлов порядка 20 тыс. ч, быстроходных - 10...12 тыс. ч, сверхбыстроходных - 5 тыс. ч.

Практически используемая граница усталостной долговечности зависит от конструкции и размеров подшипников. По данным исследований фирмы FAG, ей соответствует контактное напряжение на дорожках качения порядка 2000 Н/мм^2 (для точечного контакта) и 1500 Н/мм^2 (для линейного контакта). Эти значения рассматриваются как надежные при условии отсутствия загрязнения смазки [141]. Рабочие нагрузки на подшипники ШУ даже для подшипников легких серий в большинстве случаев ниже указанных величин.

1.1.2.8. Проектные параметры шпиндельных узлов

Проектные параметры ШУ напрямую влияют на то, какими будут их эксплуатационные характеристики. ПП назначает ЛПР после этапа обоснования технических характеристик. При проектировании ШУ необходимо определить 3-и основных группы параметров: тела шпинделя, опор и корпуса (рисунок 1.13 и рисунок 1.14), с учетом которых будет сформирована его будущая конструкция [107, 111, 14, 57]:

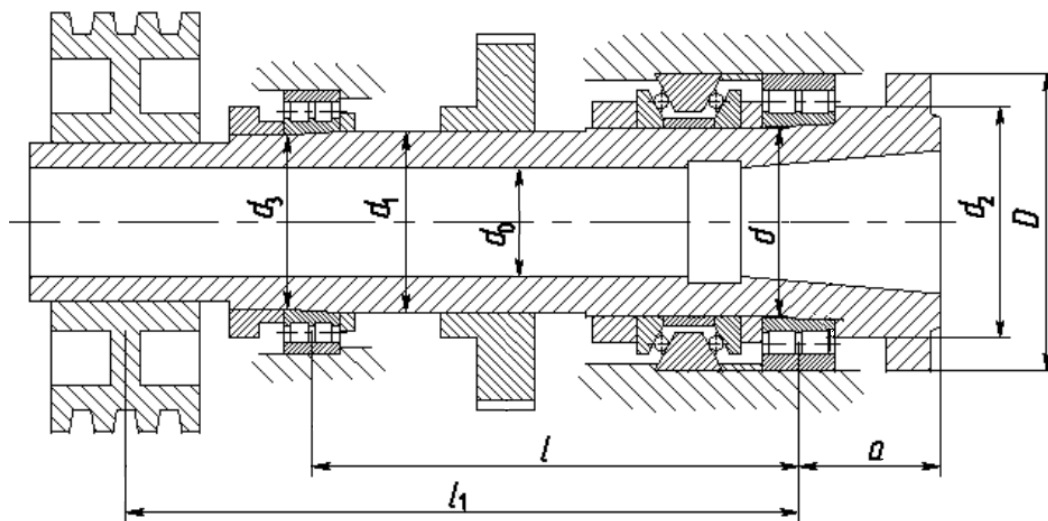


Рисунок 1.13. Проектные параметры шпинделя



Рисунок 1.14. Проектные параметры ШУ

В свою очередь проектные параметры ШУ формируются факторами 3-х видов: режимы эксплуатации; настроечные/регулируемые характеристики; конструктивное исполнение (рисунок 1.15)

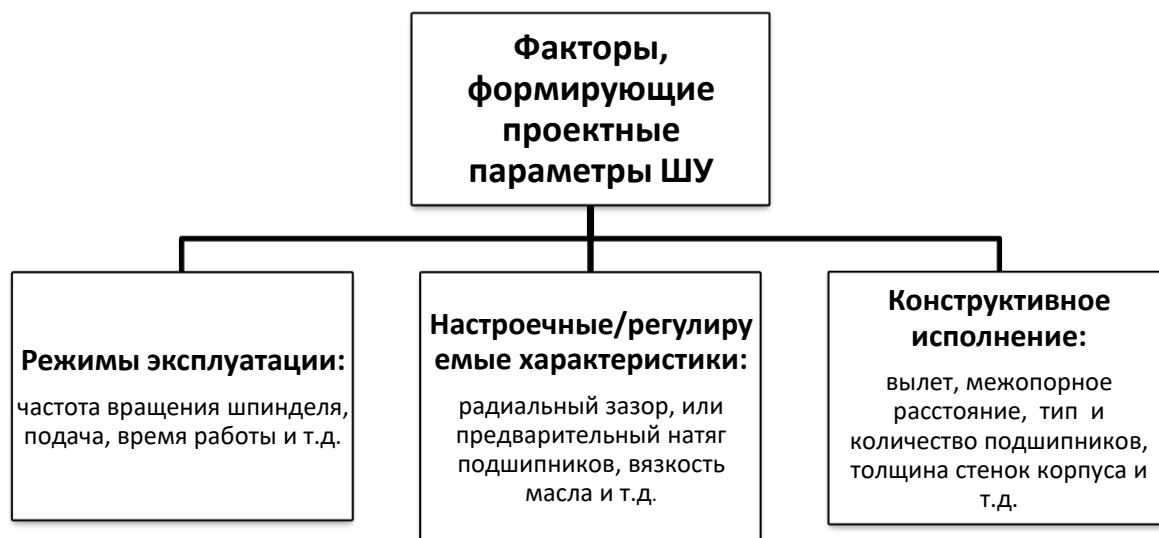


Рисунок 1.15. Факторы, формирующие проектные параметры ШУ

В соответствии с указанными действующими факторами ПП делятся на: эксплуатационные, настроечные и конструктивные

1.2. Методологические основы инженерного анализа при проектировании шпиндельных узлов

Проектирование и эксплуатация шпиндельных узлов сопряжены с необходимостью учета сложного взаимодействия комплекса силовых, тепловых и динамических факторов. Несмотря на длительную историю исследований, создание адекватной прогнозной модели, способной точно описать поведение узла в реальных условиях, по-прежнему представляет собой сложную задачу. Развитие методов исследования шпиндельных узлов отражает общий тренд в инженерных науках - переход от классических аналитических решений к комплексному компьютерно-экспериментальному анализу. Если первоначально проектирование опиралось преимущественно на аналитические методы, дающие ясные физические зависимости, то сегодня их недостаточность для моделирования сложных нелинейных процессов компенсируется мощными средствами CAE-моделирования. Экспериментальные же исследования остаются незаменимым инструментом для верификации расчетных моделей и получения натурных данных. В представленном обзоре прослеживается эта эволюция методологической базы, оценивается вклад и области эффективного применения аналитических, экспериментальных и компьютерных методов в задачах расчета и оптимизации ЭХ шпиндельных узлов.

1.2.1. Аналитические методы

Аналитические методы — это подходы к исследованию, основанные на применении законов теоретической механики, теории упругости, гидродинамики, термодинамики и других фундаментальных наук для составления и решения систем математических уравнений (алгебраических, дифференциальных, интегральных), описывающих поведение шпиндельного узла.

В большинстве работ используются детерминированные аналитические модели, основанные на методах сопротивления материалов и теории упругости. Популярными являются подходы, основанные на теории силовых смещений, в которой шпиндельный узел принимается как балка на упругом основании [80, 81, 79, 161, 70], и методе начальных параметров (МНП) [151, 120, 160, 31, 163], выраженных в матричной форме для оценки динамических характеристик ШУ.

Основной целью многих исследований является оценка и повышение жесткости узла [80, 154, 74, 81, 148, 147, 160, 161], которая рассматривается как ключевой фактор обеспечения точности обработки.

Работы Ломова М.В. [80, 79] и Фролова А.В. [148, 147] признают необходимость учета податливости подшипников качения, моделируя их как упругие опоры. При этом исследуется влияние предварительного натяга и контактной жесткости.

Обширный блок работ посвящен анализу тепловых деформаций, являющихся критическим фактором для прецизионных станков. Здесь используются как аналитические модели (для расчёта коэффициента теплостойкости и способов его повышения через увеличение площади теплоотдающих поверхностей, улучшение условий теплоотдачи) [68]; на основе критерия Био и мощности тепловыделения [28], так и полуэмпирические модели [50, 93].

В ряде работ [154, 28, 151, 160] создаются программные комплексы для автоматизации расчетов (SpinDyna, DYNAMO-S), что говорит о стремлении перевести теоретические наработки в практическую плоскость для инженеров-конструкторов.

Многие авторы подтверждают адекватность своих моделей экспериментальными данными [80, 147, 28, 151, 31, 81], что повышает достоверность исследований. Модель Луцук В.О. и Валиева Р.Р. к тому же имеет практическую значимость при регулировке натяга подшипников [81]. Эта работа показала, что динамическая жесткость может превышать статическую (на 9-12%), что связано с гироскопическим эффектом при вращении.

Несмотря на значительный объем исследований, в представленных работах наблюдается ряд ограничений.

Подавляющее большинство работ решает узкую, локальную задачу: жесткости, тепловых деформаций, или динамики. Моделей, одновременно учитывающих множественное взаимодействие, практически не представлено. Например, в динамических моделях [160, 151, 120, 31, 163] не учитываются тепловые эффекты, а в тепловых [68, 50, 93] - редко рассматривается изменение жесткости опор от температуры.

В динамических расчетах [151, 31, 163] модели демпфирования (вязкое, гистерезисное) носят оценочный характер и с большим трудом поддаются точному определению для конкретного узла. Системный учет трения в подшипниках и его влияния на нагрев и динамику отсутствует.

Объектом анализа в основном служат шпиндели и подшипники. Не в полной мере учитывается влияние корпуса шпиндельного узла (его тепловые и упругие деформации) и присоединяемых компонентов (патронов, оправок).

1.2.2. Экспериментальные методы

Экспериментальные методы - это подходы к исследованию, основанные на проведении натурных испытаний реальных физических образцов, макетов или готовых шпиндельных узлов с целью прямого измерения их характеристик в контролируемых или близких к реальным условиям.

Экспериментальные исследования в области шпиндельных узлов сконцентрированы на трех группах ЭХ, напрямую определяющих качество обработки: жесткости, тепловых деформациях и точности вращения шпинделя.

Жесткость (статическая, динамическая) рассматривается как основная характеристика, определяющая устойчивость ШУ к силам резания. Исследуется разными методами: от прямого статического нагружения с контролем перемещений [99, 146] до расчета через динамические характеристики, полученные импульсным возбуждением [127, 59].

В ходе экспериментов тепловые деформации признаются главным источником погрешностей при длительных циклах обработки [101, 50, 93, 25, 45]. Базовыми инструментами для многоканального контроля температуры в узлах станка в этих работах являются термопары, мультиметры и контактные термометры.

Тепловизоры используются для бесконтактного и наглядного анализа температурных полей, что особенно ярко продемонстрировано в работе по двухфазному охлаждению [44].

Работы Иванникова С.Н. [50, 93] сочетают теоретическую базу с результатами натурных испытаний, модели прогнозирования тепловых смещений, полученные на основе этих данных,

учитывают варьирование частоты вращения шпинделя.

Работа [25] показывает, что тепловые деформации, происходящие в шпиндельной головке, приводят к отклонению положения оси шпинделя до 13,5 мкм в радиальном направлении и до 35 мкм в осевом, снижая точность обработки до 10 квалитета.

В [15] предлагается сложный алгоритм для измерения биения и овальности ШУ в процессе работы с использованием данных с четырёх ортогонально расположенных ёмкостных датчиков расстояния, измеряющих отклонения поверхности вала. Метод включает аппроксимацию расстояний рядами Тейлора, анализ траектории центра вращения и статистическую обработку сигналов для выделения параметров овальности и биения. Исследования динамических характеристик Ханова А.М., Шафранова А.В. и Кобитянского А.Е. направлены на анализ и подавление вибраций, возникающих в рабочем диапазоне частот, результаты их расчетов верифицированы экспериментально с помощью вибрационного мониторинга [88] и разработан программный комплекс SpindelDinamic для анализа и оптимизации динамических характеристик [150].

Из опубликованных работ прослеживается отдельное изучение протекающих в ШУ процессов. Жесткость исследуется без учета ее изменения от нагрева (кроме [46]), тепловые модели строятся без учета изменения динамических характеристик от температурных смещений, а вибрации [127, 59] анализируются без глубокой привязки к вызвавшим их силам резания. В реальном станке все эти факторы действуют взаимно: нагрев меняет зазоры и натяги, влияя на жесткость и вибрации, которые, в свою очередь, влияют на тепловыделение. Существующие же работы, за редким исключением [45], рассматривают эту систему как набор независимых звеньев. Кроме того протекающие явления анализируются с учетом ограниченного количества конструктивных параметров ШУ (шпинделя, опор, корпуса).

1.2.3. Методы компьютерного моделирования

Современные исследования шпиндельных узлов металлорежущего оборудования демонстрируют выраженную тенденцию к переходу от классических расчетных и экспериментальных методов к комплексному компьютерному моделированию. Его суть заключается в создании цифровой модели шпиндельного узла и проведении на её основе виртуальных расчетов. Главные преимущества - возможность анализа до изготовления физического образца, изучения параметров, недоступных для прямого измерения, и проведения многовариантных расчетов. Однако растущая сложность моделей требует критического осмысления их возможностей и прин-

ципальных ограничений для дальнейшего прогресса в области проектирования и диагностики ШУ.

Абсолютное большинство работ, в которых проводится численное моделирование, опираются на метод конечных элементов (МКЭ), по сути ставший, де-факто основным инструментом современного инженерного анализа. Наблюдается четкое разделение на использование тяжелых специализированных CAE-пакетов (ANSYS [165, 55, 56], NASTRAN [77] и более интегрированных CAD-ориентированных сред (SolidWorks/COSMOS/Simulation [76, 21, 22, 75, 159, 24, 126], KOMPAS-3D [164, 62], T-Flex [135]). Это отражает два подхода: первый - для углубленного научного исследования, второй - для ускоренного проектирования в промышленности.

Проводимые в опубликованных работах исследования сконцентрированы на моделировании поведения ШУ при действии силовых (статических, динамических) и тепловых факторов. Так работы [76, 164, 133, 125, 159, 152, 62, 24, 135] посвящены определению статических и динамических деформаций ШУ под нагрузкой. В другом значительном блоке работ [21, 22, 75, 45, 55, 56, 24] исследуются тепловые поля и вызванные ими деформации, рассматриваются способы их компенсации.

Многие работы [125, 77, 159, 11, 152, 84] нацелены на определение собственных частот, форм колебаний и подавление вибраций.

Большинство авторов проводят верификацию своих моделей. Это достигается либо сопоставлением с экспериментальными данными (измерения температур [45], частотных характеристик [125, 152], упругих перемещений [76, 133]), либо сравнением с другими, признанными методами расчета, такими как метод Донкерли [77] или метод сосредоточенных параметров [159].

При компьютерном моделировании, как и при любом другом исследовании, важна глубина физического моделирования, от неё зависит точность модели.

Для расчета упругих деформаций в самых простых моделях шпиндель рассматривается как балка или сложная упругая система [165, 164, 133, 135]. В более сложных - дополнительно учитываются внутренние источники тепла (подшипники, двигатель), граничные условия теплообмена и теплового расширения [21, 22, 75, 45, 55, 56]. Наиболее сложные работы, пытаются объединить несколько физических явлений, например, силовое и тепловое воздействие [24] или создать комплексную модель [47].

При исследованиях ШУ объектами моделирования выступают:

- подшипники, по которым наблюдается наибольший разброс в разработке моделей - от простого задания жесткостных характеристик [11] до моделирования перекоса и несоосности колец [165], учета предварительного натяга методом "горячей посадки" [126] и расчета тепло-

выделения по моделям Пальмгрена [45];

- стыки и контакты. Опубликованные работы либо игнорируют их податливость, либо рассматривают соединения как абсолютно жесткие [133] (упрощенная схема), либо пытаются моделировать через контактные задачи или упругие прокладки [133, 126].

Несмотря на кажущееся разнообразие, просматривается ряд фундаментальных методологических ограничений, присущих большинству рассмотренных работ.

Практически все исследования решают узкую задачу. Это приводит к тому, что инженер, желающий получить полную картину, вынужден проводить несколько независимых анализов, результаты которых сложно сопоставить. Например, работа [24] учитывает силовые и тепловые факторы, но не проводит динамический анализ на получившейся деформированной и нагретой системе. В [11] выполняется модальный анализ, но без учета тепловых деформаций, которые кардинально меняют натяг в подшипниках и, следовательно, собственные частоты. Работа [47] является ярким, но редким исключением, предлагая комплексную модель, но и она не лишена недостатков. Здесь не учтено влияния конструкции корпуса ШУ, а биение переднего конца шпинделя оценивается на конструкции, использующей подшипники лишь какого-то одного класса точности.

1.3. Нейронные сети и их возможности при проектировании

Процесс проектирования ШУ базируется на решении задач анализа и оптимизации многомерных функций, которые успешно могут быть решены с использованием искусственных нейронных сетей (НС) [138, 63, 13, 52].

Искусственные нейронные сети (НС) - это одно из направлений компьютерной индустрии, в основе которого лежит идея программного и аппаратного воплощения принципов организации и функционирования человеческого мозга. В последние десятилетия наблюдается резкое возрастание интереса к нейронным сетям, которые находят успешное применение в самых различных областях, таких как промышленность, экономика, бизнес, финансы, политология, социология, криминалистика, медицина и т.д.

Отличительной особенностью нейронных сетей в сравнении с различными статистическими методами многомерного анализа является их параллелизм – способность к параллельной обработке информации и обучению, что позволяет НС обобщать информацию, получая обоснованный результат при оперировании данными, не встречавшимися в обучающей выборке.

К числу иных уникальных качеств искусственных нейронных сетей следует отнести гибкость их структуры, возможность решения задач в условиях неопределённости, устойчивость к

шумам во входных параметрах, адаптивность к изменениям внешней среды, потенциальная отказоустойчивость и т.д.

Всё перечисленное в совокупности открывает большие перспективы для построения интеллектуальных систем обработки информации в различных областях науки и техники.

Существующие нейронные сети подразделяются на следующие основные типы:

- свёрточные нейронные сети. Механизмы таких сетей находят свое применение в диагностике станков, получая данные непосредственно с датчиков [85, 117, 139, 155, 106, 121];
- рекуррентные нейронные сети. Их применение позволяет снизить трудоемкость работ по технической подготовке производства и найти оптимальные решения при разработке комплекта технической документации [131];
- генеративно-состязательные сети. Данные нейросети используются в задачах, связанных с синтезом данных и идентификационной экспертизой при контроле качества товаров [83];
- рекуррентные свёрточные нейронные сети. В машиностроении используются для проектирования и переоснащения производственных цехов [130].

Каждая из перечисленных типов нейронных сетей имеет свои уникальные преимущества и области применения. Выбор подходящей архитектуры зависит от конкретной задачи и характеристик данных.

Для задач регрессии и классификации широкое применение нашли сети на основе многослойного персептрона (MLP) и радиально-базисных функций (RBF) [13].

Теоретически для моделирования любой задачи достаточно многослойного персептрона с двумя промежуточными слоями (в точной формулировке этот результат известен как теорема Колмогорова [13]). Однако, для решения большинства практических задач достаточно всего одного промежуточного слоя, два слоя применяются как резерв в особых случаях, а сети с тремя слоями практически не применяются [13].

Таким образом, на сегодняшний день следует констатировать наличие огромного потенциала нейронных технологий, однако их эффективное и обоснованное применение требует определённого уровня знаний и глубокого понимания принципа функционирования различных моделей нейронных сетей.

1.3.1. Строение и принципы работы нейронных сетей

Биологический нейрон – это специальная клетка, предназначенная для обработки информации. Она состоит из тела, или сомы, и отростков нервных волокон двух типов – дендритов (входов), по которым принимаются электрические импульсы, и единственного аксона (вы-

хода), по которому нейрон может передавать импульс через специальные образования – синапсы, которые соединяются с дендритами других нейронов [82].

Модель искусственного нейрона (рисунок 1.16) копирует устройство биологического и содержит три основные части:

- сумматор с линейным или нелинейным преобразованием входного сигнала (имитирует функцию тела клетки - сома);
- синаптические связи с регулируемыми (настраиваемыми) «весами», передающие входные сигналы к сумматору (являются аналогами дендритов с синапсами). Веса (нейронов) — это числовые параметры, которые определяют силу и характер влияния входного сигнала (или сигнала от другого нейрона) на активацию данного нейрона;
- выход сумматора с разветвлением сигналов (служит эквивалентом аксона).

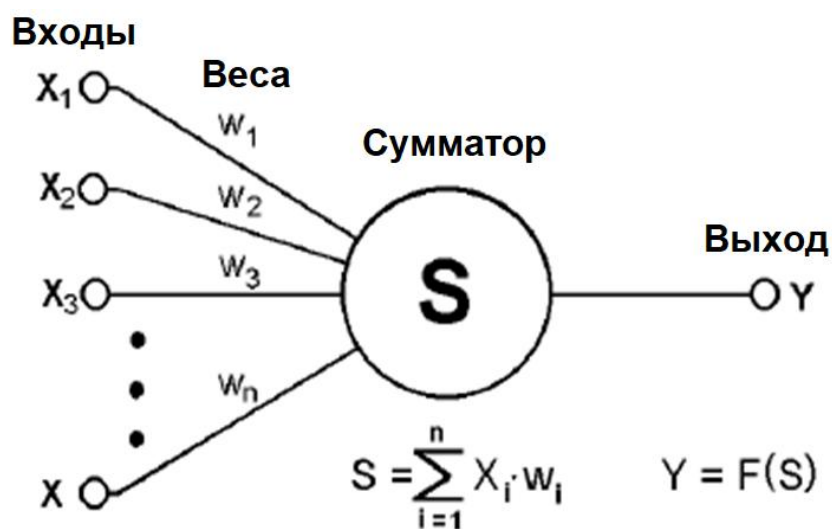


Рисунок 1.16. Составные части искусственного нейрона

Будучи соединенными определенным образом, нейроны образуют нейронную сеть, у которой должны быть входы (принимающие значения интересующих переменных из внешнего мира) и выходы (прогнозы или управляющие сигналы). Кроме этого, в сети может быть еще много промежуточных (скрытых) нейронов, выполняющих внутренние функции. Входные, скрытые и выходные нейроны должны быть связаны между собой.

Простейшая сеть имеет структуру прямой передачи сигнала. Сигналы проходят от входов через скрытые элементы и, в конце концов, приходят на выходные элементы. Такая структура оказалась наиболее эффективна при решении практических задач за счет устойчивого поведения [13, 173] в отличие от сетей с обратными связями, которые могут быть неустойчивыми и иметь очень сложную динамику поведения.

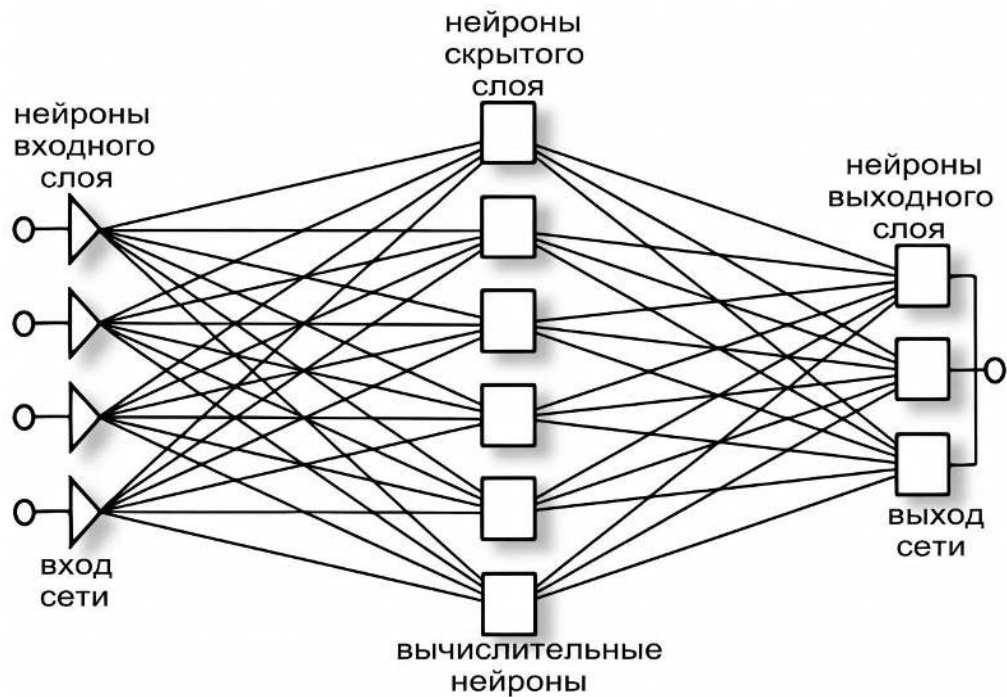


Рисунок 1.17. НС с прямой передачей сигнала

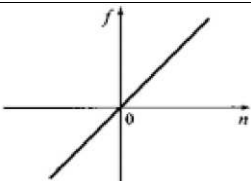
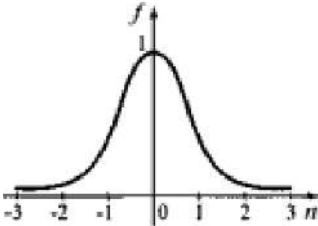
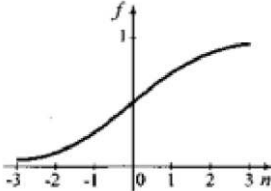
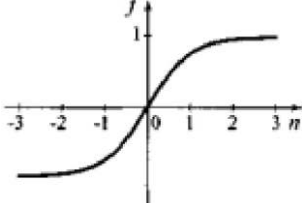
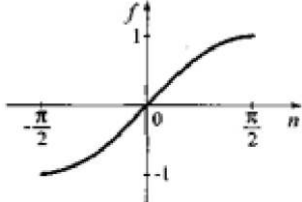
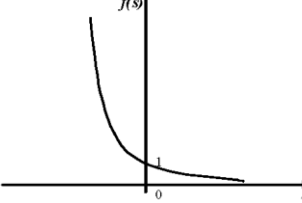
Типичный пример сети с прямой передачей сигнала показан на рисунке 1.17. Нейроны регулярным образом организованы в слои. Входной слой служит просто для ввода значений входных переменных. Каждый из скрытых и выходных нейронов соединен со всеми элементами предыдущего слоя. Выходной слой выступает как результат работы всей сети (конечный прогноз). Сети с такой архитектурой называются многослойными персептронами (MLP) [149].

Существуют также сети, в которых нейроны связаны только с некоторыми из нейронов предыдущего слоя. Однако для большинства типов задач регрессии (прогнозирование), которые решают с помощью НС, сети с полными связями (как у MLP) оказываются более подходящим и эффективным выбором [13, 173].

При работе (использовании) сети во входные элементы подаются значения входных переменных, затем последовательно отрабатывают нейроны промежуточного и выходного слоев [13]. После того, как вся сеть отработает, выходные значения элементов выходного слоя принимаются за выход всей сети в целом.

При прохождении сигнала по сети для каждого нейрона вычисляется свое значение активации, с учетом взвешенной суммы выходов элементов предыдущего слоя и вычетом из неё порогового значения. Затем значение активации преобразуются с помощью функции активации (ФА) (таблица 1.4), и в результате получается выход нейрона.

Таблица 1.4 - Распространенные функции активации нейронов

Название функции	Аналитическая запись	Графический вид
Линейная	$f(n) = n$	
Радиальная базисная (Гаусса)	$f(n) = e^{-n^2}$	
Логистическая (Сигмоидальная)	$f(n) = \frac{n}{1 + e^{-n}}$	
Гиперболическая (тангенциальная)	$f(n) = \frac{2}{1 + e^{-2n}} - 1$	
Синусоидальная	$f(n) = \sin n$	
Экспоненциальная	$f(s) = e^s$	

Активационные функции считаются неизменными при работе сети, а веса являются параметрами сети и корректируются на этапе её обучения (рисунок 1.18), на котором сигнал об ошибке распространяется в обратном направлении, аналогично тому, как отклик в нервной системе изменяет восприятие сигнала рецепторами.

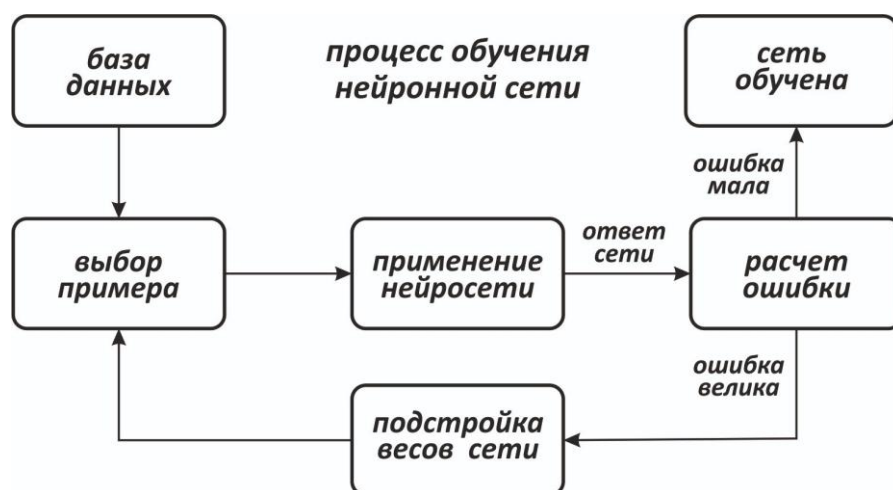


Рисунок 1.18. Процесс обучения нейронной сети

Процесс обучения носит итерационный характер и состоит из циклов (эпох). Количество циклов может быть десятки, сотни и даже тысячи. После каждого цикла изменяются значения весов, вследствие минимизации функции ошибок встроенными методами оптимизации [51], такими как:

- градиентный спуск (Gradient Descent);
- сопряженные градиенты (Conjugate Gradient);
- квазиньютоновский BFGS (Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno).

В качестве самой функции ошибок широко распространена средняя квадратичная ошибка (MSE).

Для правильного построения НС необходим большой набор данных. Этот набор может быть получен путем: проведения эксперимента, инженерного расчета или статистического исследования и должен быть разделен на репрезентативные части (выборки) [16, 162]:

- обучающую выборку - основной набор данных, по которым нейросеть непосредственно учится;
- тестовую выборку - отдельный набор данных, который не используется для обучения, а служит для проверки и настройки модели в процессе обучения;
- контрольную выборку - финальный, полностью изолированный набор данных, который используется только один раз после того, как обучение и вся настройка завершены.

Вопрос о том, сколько данных отбирать в обучающий и тестовый наборы (выборки), является дискуссионным, однако в сложившейся практике принято отбирать в обучающий набор ~75 % данных. Оставшиеся 25 % данных объявляются тестовым и контрольным набором (выборками). Сам отбор данных в выборки осуществляется случайным образом [16].

Необходимое количество циклов обучения для получения адекватно работающей НС - это всегда индивидуальный параметр, зависящий от сложности моделирования и требуемой точности. Но, в каждом случае процесс обучения необходимо ограничивать или прерывать в районе некой оптимальной точки (рисунок 1.19), за которой, если не остановить процесс обучения, происходит снижение точности сети (на этапе её контроля), при котором она уже не прогнозирует, а «запоминает». Такая сеть называется переобученной. В случае же раннего останова обучения (до достижения оптимальной точки) сеть будет недообученной и соответственно её точность будет тем ниже, чем раньше произошел останов.

Недообученную и переобученную сеть можно выявить при сравнении её ошибок в выборках. Так, у недообученной сети ошибки на всех трех выборках будут велики, а у переобученной будет значительная разница между ошибкой, полученной на обучающей выборке и на контрольной. Это приводит к тому, что недообученная сеть не способна прогнозировать в принципе, а переобученная делает это очень хорошо лишь на данных, на которых она обучалась, и не может адекватно работать вне их. Она научилась «запоминать», но не «мыслить».

У правильно же обученной сети ошибки на всех выборках будут минимальны и близки между собой. В идеальном случае ошибка должна незначительно возрастать от обучающей выборки к контрольной. Такая сеть будет способна прогнозировать вне известных ей данных.

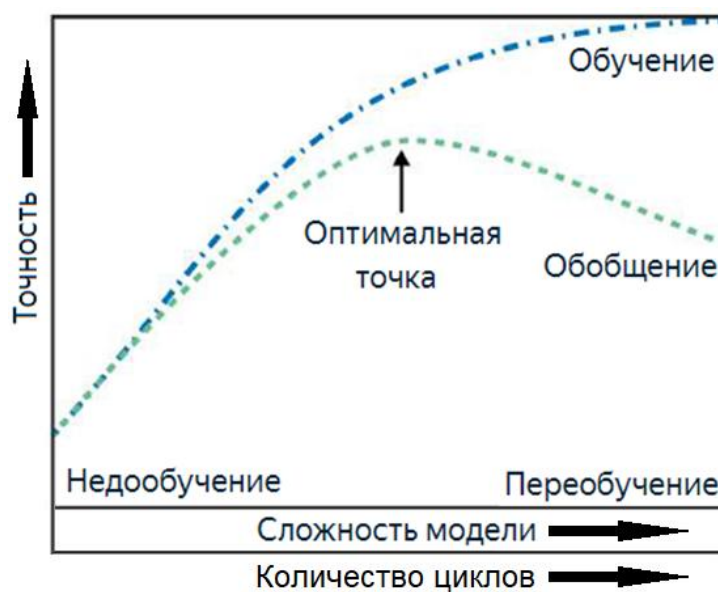


Рисунок 1.19. Влияние процесса обучения на качество получаемых сетей

НС обучается на данных, как правило, имеющих числовое выражение. Необходимый объем данных (наблюдений/результатов расчетов) при обучении в первом приближении принимается в десять раз больше, чем связей в системе, а количество вычислительных нейронов скрытого слоя - как полусумма входных и выходных нейронов (переменных) [13, 173].

1.3.2. Моделирование с помощью нейронных сетей

Построение нейронных сетей может быть осуществлено с использованием языков программирования и программ, имеющих интерфейс.

Процесс построения нейросетей с помощью языков программирования (Python, C/C++, java, R и др.) предполагает обладание навыками программирования – знание синтаксиса команд и последовательности их ввода, что резко ограничивает сферу их применения. Ведь даже для уверенных пользователей ПК, привыкших к оконному режиму, пользование командной строкой весьма затруднительно.

В сравнении с языками программирования программы с интерфейсом гораздо проще в освоении, поскольку весь их функционал (окна, вкладки, кнопки команд) находятся на дисплее прямо перед пользователем. Кроме того, в них имеется удобная справка по использованию программы либо руководство пользователя с наглядными примерами. К программам подобного вида относятся: Statistica, SPSS (IBM), JMP (SAS), NeuroSolutions, модуль Neural Excel для MSOffice, пакет Matlab и др. Применение этих программ позволяет создавать сети равнозначного качества с сетями, написанными на языках программирования.

В литературе имеются примеры успешного использования подобных программ при нейросетевом моделировании и проектировании сложных технических систем.

В работе [64] строилась модель станка, на основе принципа рационального сочетания математических и информационных компонентов. Математические компоненты, соответствующие элементам модели, описывались уравнениями, как при классическом моделировании, например нелинейными дифференциальными уравнениями. Информационные компоненты, отражающие связи между характерными параметрами элементов модели, представлялись в форме нейронных сетей, различающихся по типу решаемых задач. К примеру, слоистая сеть использовалась для статической задачи обоснования норм точности при конструировании многоцелевого шлифовального полуавтомата, а полносвязная - в динамической задаче моделирования конструкций сверхточных направляющих.

В статье [100] рассматривалась и была доказана эффективность применения нейросетей со структурой прямого распространения для прогнозирования температуры в опорах качения узлов станка и других элементов конструкции.

Кузнецов Д.И. [69] использовал нейронные сети кластеризации для решения задач увеличения срока эффективной эксплуатации и управляемости станков, прогнозирования обработки на них новых деталей, и создания процессов технологического производства.

Авторы [87] применяли нейронную сеть для решения задачи проектирования технологического процесса обработки типовой детали и небольших подзадач, таких как проектирование обработки отдельных отверстий или других элементов детали.

В работе [10] разработан подход к прогнозированию изменения параметров технологических систем в виде агентной системы с механизмом прогнозирования на основе нейросетей, в котором может быть получена не только информационная система, выполняющая определенные функции, но и динамическая по своей структуре и свойствам «модель реального времени», автоматически совершенствующая механизм своей работы.

В иностранной литературе с помощью искусственной нейронной сети прямого распространения была создана модель для прогнозирования глубины резания, что позволило определить оптимальную конфигурацию шпинделя при увеличенной её глубине [172].

В вышеперечисленных работах методами нейронных сетей производилась комплексная оценка параметров объектов и характеристик протекания процессов с учетом взаимного влияния факторов. Данный аспект является ключевым преимуществом нейросетевого моделирования по сравнению с классическими регрессионными линейными и нелинейными моделями.

В работе [122] демонстрируется высокая эффективность применения нейронной сети для оценки технического состояния передней опоры шпиндельного узла по частотам вращения шпинделя и соответствующим им температурным показателям наружного кольца подшипника качения. Но эта работа учитывает только температурные зависимости, возникающие при работе ШУ, без учета других факторов, влияющих на процесс теплообразования.

Приведенные примеры говорят о том, что применение нейронных сетей возможно и для проектирования шпиндельных узлов.

Нейронные сети могут работать с числовыми данными, лежащими в определенном ограниченном диапазоне. Это создает проблемы в случаях, когда данные имеют нестандартный масштаб, когда в них имеются пропущенные значения, и когда данные являются нечисловыми. Для исключения этих проблем числовые данные масштабируются (обычно по линейной шкале) в подходящий для сети диапазон, а пропущенные значения заменяются на среднее значение (или на другую статистику) этой переменной по всем имеющимся обучающим примерам [173].

Анализ работ по проектированию с применением искусственного интеллекта [54, 90, 89, 6, 53] показал, что при таком проектировании на разных этапах разработки возникает множество вариантов решений, из которых проектировщик выбирает наилучший. Такой процесс проектирования по определению называется генеративным.

Генеративное проектирование – это итеративный процесс, в котором человек передает компьютеру рутинные и вычислительно сложные задачи поиска и анализа решений, сохраняя за собой роль стратега, критика и лица, принимающего итоговые решения [89, 166].

Генеративное проектирование широко используется в продуктах таких компаний как Autodesk, Dassault Systemes, SolidWorks [6], а в ANSYS его использование выражено в оптимизации топологии конструкции деталей [94, 78, 113].

Схема процесса генеративного проектирования, представленная компанией Autodesk, приведена на рисунок 1.20, а пример её практического применения - на рисунок 1.21 [166].

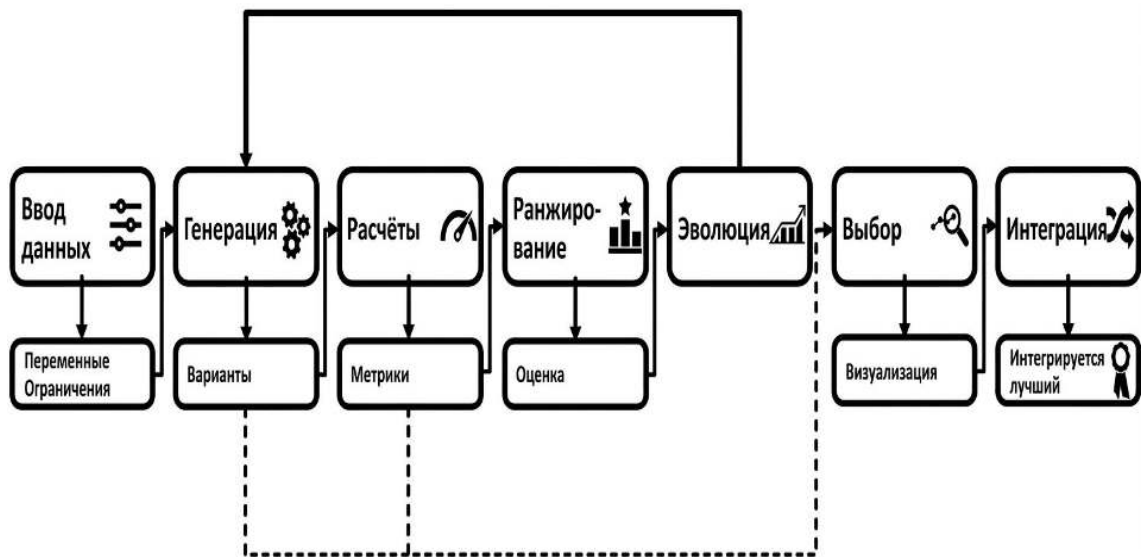


Рисунок 1.20. Схема процесса генеративного проектирования

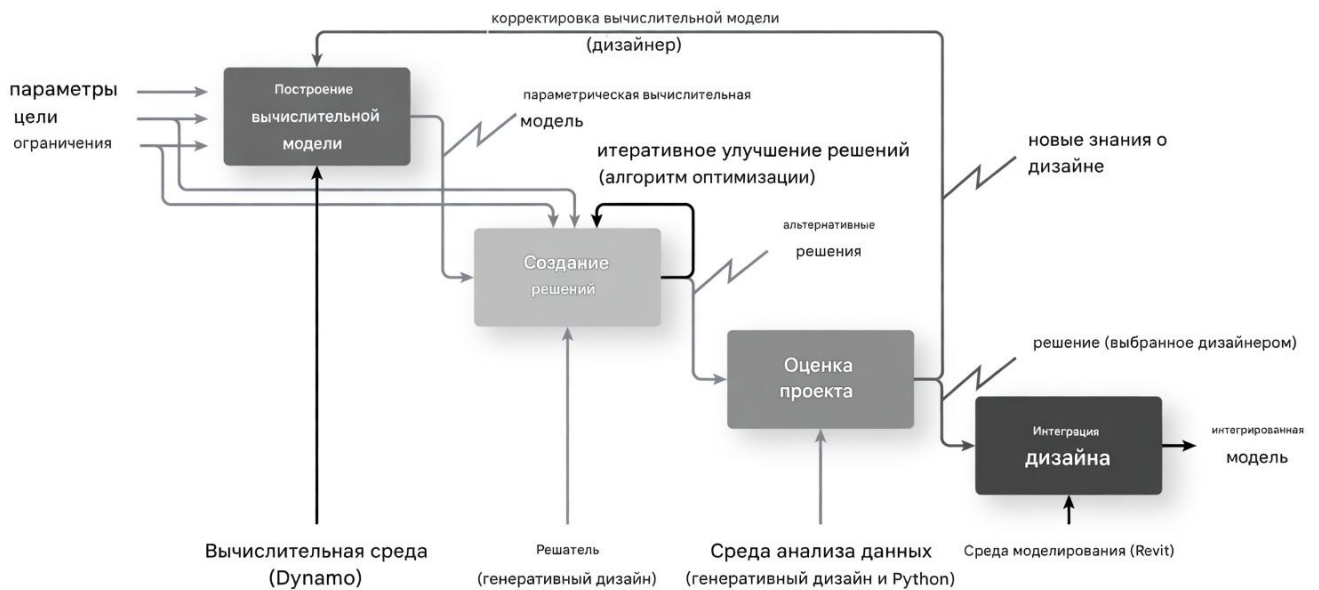


Рисунок 1.21. Реализация схемы генеративного проектирования

Схему, показанную на рисунке 1.21 можно принять в качестве прототипа при проектировании ШУ с применением нейронных сетей. При такой схеме взаимодействия и на всём её протяжении лицо, принимающее решение (ЛПР) неоднократно сравнивает свои результаты с результатами НС, при этом отвергая, смешивая или усредняя их, и в случае необходимости проводит повторный расчет по вновь скорректированным параметрам. То есть в процессе своего взаимодействия с НС ЛПР постоянно может «подсказывать» НС (либо наоборот) исходные данные, давшие на предыдущем шаге или варианте расчета наилучшие ЭХ, и тем самым постоянно сужать область принимаемых решений, получая тем самым все более достоверный и обоснованный результат – принятие решения о назначении ПП.

1.4. Выводы по главе 1

Анализ конструкций современных ШУ и исследований в области проектирования ШУ на опорах качения позволяет сделать следующие выводы.

1. Ключевая роль в формообразовании деталей на металлорежущих станках принадлежит шпиндельному узлу. В современном станкостроении качество ШУ определяют 2-а параметра – это точность и производительность. Точность зависит от точности вращения шпинделя и его упругого смещения, а производительность ограничивается допустимыми тепловыми деформациями и собственной частотой шпинделя.

2. Установлено, что эксплуатационные характеристики ШУ (точность вращения, жесткость, собственные частоты, быстроходность, теплостойкость, долговечность) находятся в сложной взаимозависимости между собой и с проектными параметрами (шпинделя, опор и корпуса), что требует комплексного подхода при проектировании.

3. Существующие методы проектирования (аналитические, экспериментальные, методы компьютерного моделирования (МКЭ)) в основном решают узкие, изолированные 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.

4. Показана перспективность применения нейросетевых моделей на основе нейронных сетей, обладающих значительным потенциалом для преодоления ограничений классических методов. Их способность к обучению на эмпирических и расчетных данных, обработке нелинейных зависимостей и работе в условиях неполной информации позволяет строить комплексные модели, адекватно описывающие поведение ШУ с учетом расширенного влияния множества факторов.

5. Эффективное применение НС для проектирования ШУ упирается в проблему формирования репрезентативных обучающих выборок. Требуется разработка специализированных методов планирования экспериментов и генерации данных, которые позволили бы охватить многомерное пространство конструктивных, настроечных и режимных параметров при разумных вычислительных затратах.

6. Анализ положительного опыта использования нейросетевого прогнозирования в машиностроении показал актуальность создания интегрированной системы проектирования, объединяющей преимущества нейросетевого прогнозирования с традиционными инструментами инженерного анализа (CAD/CAE). Такая система позволила бы конструктору на ранних этапах оценивать и корректировать различные варианты проектных решений, выбирая компромиссы между эксплуатационными характеристиками. В настоящее время подобные механизмы взаимодействия свойственны генеративному процессу проектирования.

ГЛАВА 2. Обоснование структуры нейросети для моделирования эксплуатационных характеристик ШУ на основе сформированной экспериментальной базы обучающих данных

2.1. Экспериментальное определение базы данных для обучения НС

2.1.1. Методика определения ЭХ ШУ станков токарной группы

В работах [48, 47] выделены основные эксплуатационные характеристики, определяющие качество ШУ:

- точность вращения шпинделя, зависящая от качества изготовления и сборки его деталей и от частоты вращения шпинделя [5];
- быстроходность – во многом характеризуемая тепловой нестабильностью подшипниковых опор, что является ключевой проблемой при проектировании ШУ с широким диапазоном регулирования скорости вращения шпинделя;
- жесткость, оценивающая влияние силы резания и частоты вращения шпинделя [4], определяющих его силовые смещения и точность получаемых деталей.

С учетом указанного экспериментальное формирование базы данных для обучения НС проводилось на основе измерения эксплуатационных характеристик ШУ (точности вращения шпинделя, температуры корпуса в зоне передней опоры и упругого смещения переднего конца шпинделя) в зависимости от ПП, определяемых режимом эксплуатации: частотой вращения шпинделя, силой в зоне резания и временем работы.

Расширение обучающей базы добавлением результатов аналитических расчетов и численного моделирования является альтернативой этапу апробации конструкции, который в связи с переходом к мелкосерийному и единичному производству станков утратил своё значение. НС обученная на таком наборе будет способна прогнозировать ЭХ ШУ в зависимости от изменения режимов эксплуатации.

2.1.1.1. Методика определения температуры в зоне передней опоры шпинделя

Температура корпуса ШУ в зоне передней опоры шпинделя измерялась пирометром DT-8833 (рисунок 2.1, а) при помощи комплектной термопары К-типа (хромель-алюмель) (рисунок 2.1, б) установленной в отверстие Ø 1,5 мм и глубиной 10 мм, просверленное на расстоянии 20 мм от наружного кольца подшипника (рисунок 2.2). Технические характеристики DT-8833 при-

ведены в таблице 2.1. Перед установкой термопары в отверстие его поверхность была очищена от пыли и стружки и обезжирена.



Рисунок 2.1. Общий вид прибора для измерения температуры:

а – пирометр DT-8833; б – комплектная термопара К-типа

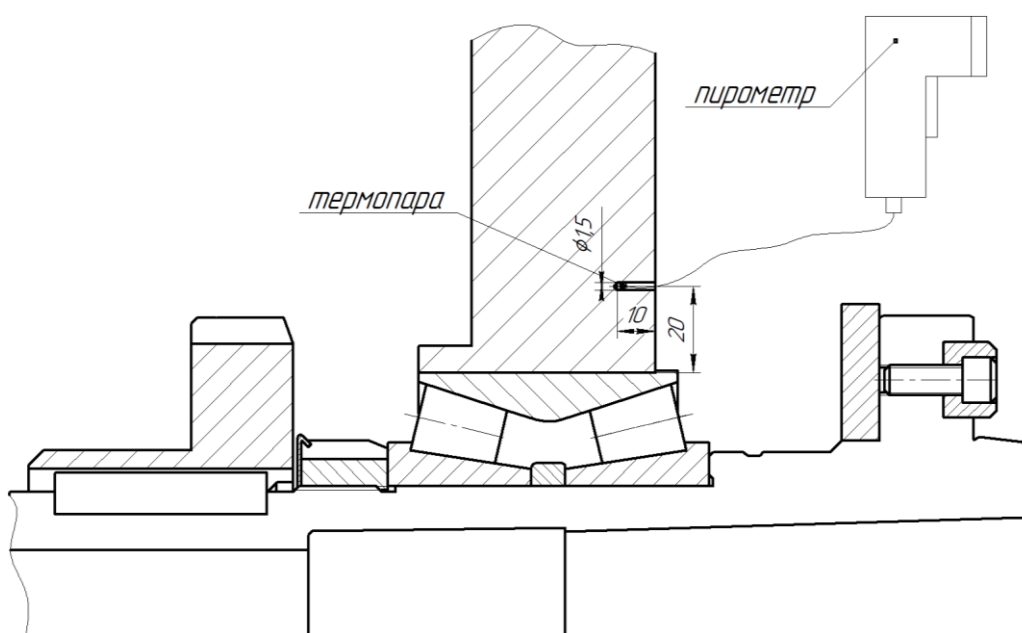


Рисунок 2.2. Схема установки термопары

Таблица. 2.1 - Технические характеристики DT-8833

Измерение при помощи термопары	
Диапазон температуры	-50 до 1370 °C
Разрешение	при -50 до 1370 °C 0,1 °C
Погрешность	при -50° до 1000 °C: $\pm(1,5 \pm 3 \text{ °C}/5 \text{ °F})$

Процесс измерения температуры пирометром DT-8833 сопровождался следующими действиями:

- заранее установленная в отверстие термопара типа-К подсоединялась к пирометру, затем он включался с помощью кнопки измерения (курка);
- нажатием кнопки MODE выбирался режим измерения температуры при помощи термопары типа-К. На дисплее появлялась индикация ТК, говорящая о том, что пирометр переведен из установленного по умолчанию бесконтактного режима измерения температуры в режим измерения термопарой;
- нажатием кнопки измерения (курка) запрашивались текущие показания термопары;
- результаты измерения температуры выводились на дисплей, и считывались в случае отсутствия индикаторов некорректной работы термопары, отображаемых на дисплее и вызванных слабым контактом или его отсутствием с измеряемой поверхностью. При появлении индикаторов некорректной работы термопара извлекалась из отверстия, отверстие повторно очищалось и обезжиривалось, затем термопара устанавливалась обратно.

Значения температуры фиксировались на временных отрезках, кратных 15 мин, в диапазоне 15...150 мин. Верхние значения (150 мин) этого диапазона соответствуют установившемуся тепловому режиму ШУ, при котором выделяемое в подшипниках тепло эффективно рассеивается его корпусом и телом шпинделя.

С целью сокращения времени проведения экспериментов по определению температуры в зоне передней опоры шпинделя при изменении времени работы станка на фиксированной частоте вращения шпинделя была оценена возможность проводить измерения на каждом следующем отрезке времени без полного остывания станка [36]. Для этого были выполнены предварительные прогоны работы станка по безостановочной (непрерывной) схеме работы и схеме с перерывами на измерения, подтвердившие практически тождественные значения температуры на конечном временном отрезке (рисунок 2.3).

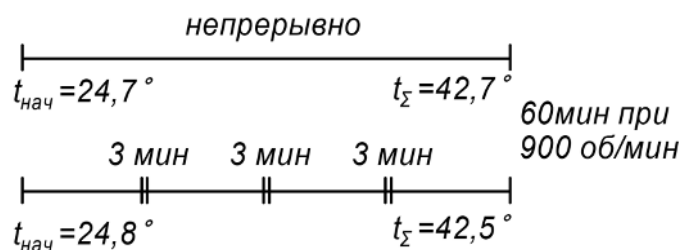


Рисунок 2.3. Схемы предварительных прогонов работы станка

Сокращение времени проведения экспериментов связано с тем, что введение перерывов (останов-измерение-пуск) в процессе вращения шпинделя не вызывает снижения температуры стенки корпуса настолько, чтобы это исказило (занизило) полученные результаты наблюдения

на отдельно взятом временном отрезке. В противном случае потребовалось бы остановить работу шпинделя и дать всему узлу остыть до температуры окружающей среды, затратив тем самым на это дополнительное время. Исключение же циклов остывания ШУ позволяет рассматривать отдельно взятое наблюдение как сумму временных срезов наблюдений меньшей продолжительности.

2.1.1.2. Методика определения биения шпинделя

Точность вращения шпинделя оценивалось по показателю радиального биения переднего конца при помощи индикаторов часового типа с ценой деления 1 мкм в соответствии с ГОСТ 18097-2024 "Станки токарно-винторезные и токарные. Основные размеры. Нормы точности" и ГОСТ 22267-76 "Станки металлорежущие. Схемы и способы измерений геометрических параметров".

При измерении радиального биения шпинделя, собранного на подшипниках качения, он поворачивался в направлении рабочего движения не менее чем на два последовательных оборота.

Схема измерения радиального биения наружных поверхностей указана на рисунок 2.4. Индикатор часового типа с ценой деления 1 мкм устанавливался на неподвижной части станка так, чтобы его измерительный наконечник касался проверяемой поверхности центрирующей шейки шпинделя под патрон и был перпендикулярен ей.

Поскольку отношение длины к диаметру проверяемой поверхности меньше 1, а также длина самой проверяемой поверхности (под установку патрона) меньше 50 мм, то измерения проводились в одном поперечном сечении.

Радиальное биение поверхности шпинделя определялось наибольшей алгебраической разностью показаний индикатора в соответствующей плоскости.

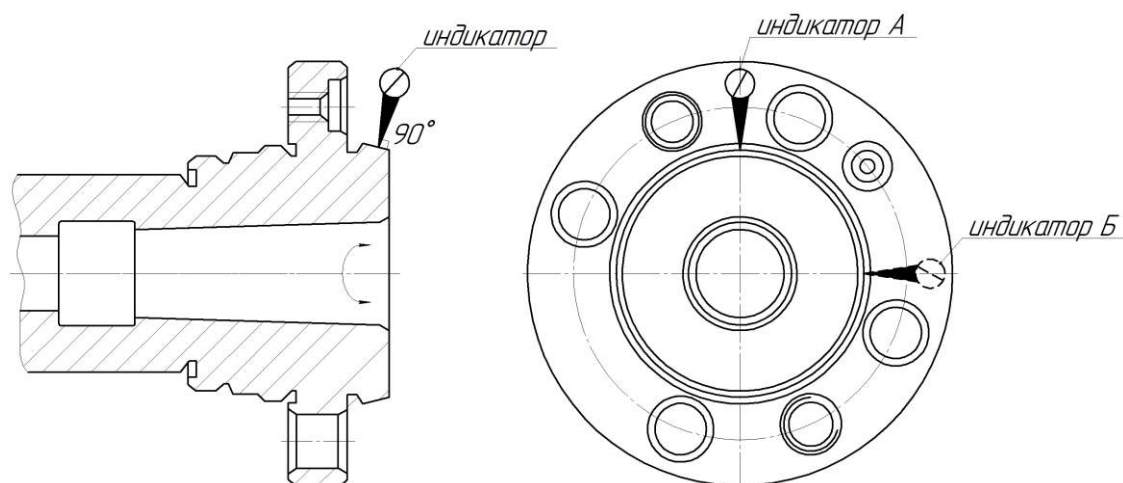


Рисунок 2.4. Схема измерения радиального биения шпинделя

2.1.1.3. Методика определения жесткости ШУ

Измерение жесткости ШУ производилось в соответствии с ГОСТ 18097-93 «Станки токарные и токарно-винторезные. Нормы точности и жесткости».

Сила на переднем конце шпинделя создавалась приложением статической нагрузки на короткую оправку с помощью предварительно протарированного (рисунок 2.5) нагружающего устройства ТЖ-1000 (рисунок 2.6), которое устанавливалось в левом пазу резцедержателя.

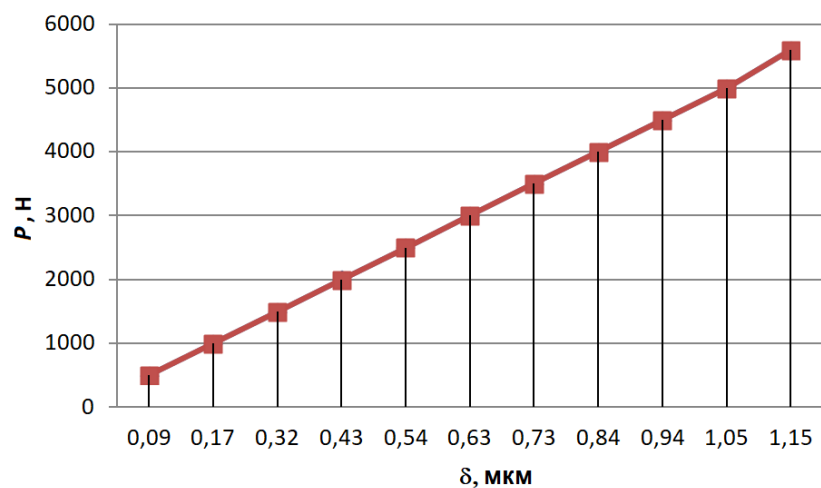


Рисунок 2.5. Тарировочный график ТЖ-1000

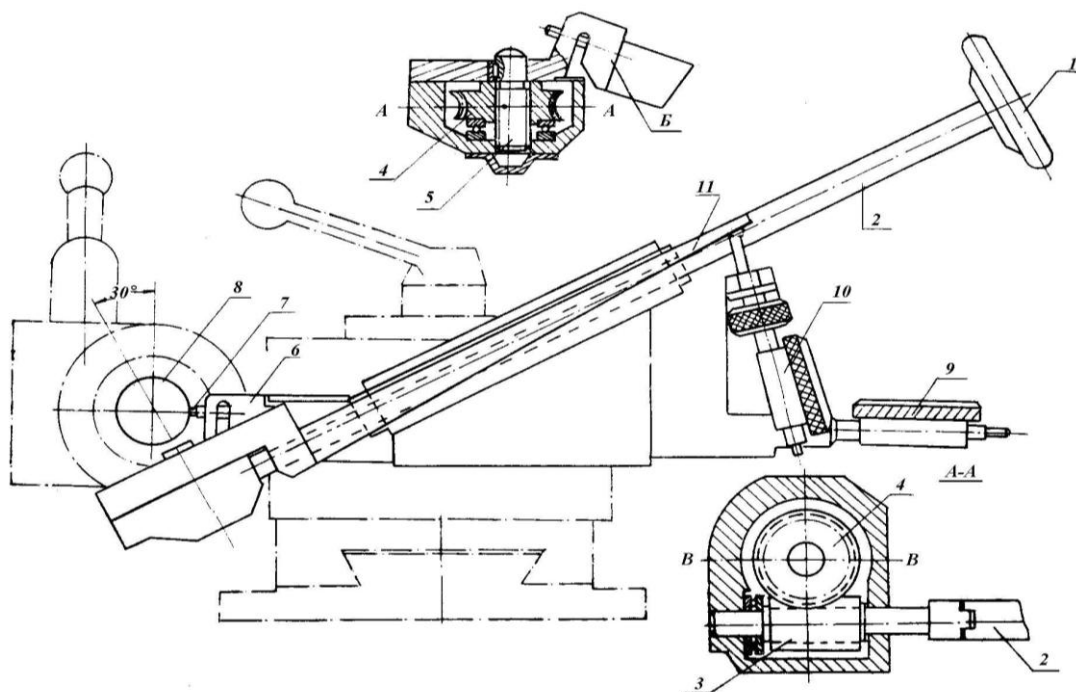


Рисунок 2.6. Прибор ТЖ-1000

Нагружение ШУ создавалось вращением рукоятки 1 по часовой стрелке. При этом вращались вал 2 и червяк 3, который, поворачивая червячное колесо 4, перемещал винт упора и

создавал через динамометр нагрузку на цилиндрической оправке 8 с конусным хвостовиком, плотно установленной в конусное отверстие шпинделя. Создаваемая сила контролировалась индикатором 10, на который воздействовал связанный с динамометром качающийся рычаг 11.

Упругие смещения переднего конца шпинделя при заданной нагрузке измерялись установкой индикатора в горизонтальной плоскости, т.е. в плоскости действия радиальной составляющей силы резания (P_y), оказывающей наибольшее влияние на точность обрабатываемых деталей [27] (Рисунок 2.7).

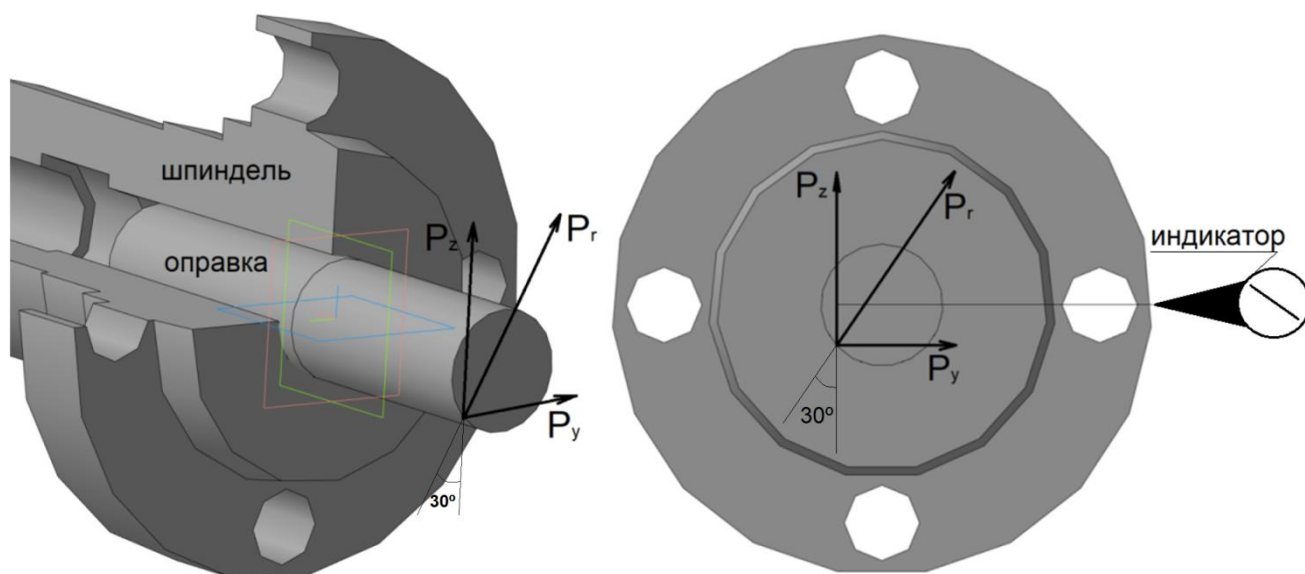


Рисунок 2.7. Схема составляющих сил резания

Положение узлов станка, точки приложения и направление действия нагружающей силы соответствовали показанному на рисунке 2.8 и определялись величинами, указанными в таблицах 2.2 и 2.3. Верхние салазки выравнивались по торцу А (рисунок 2.8). При этом салазки суппорта подводились в положение проверки перемещением их в направлении к линии центров станка.

Таблица 2.2 - Зависимость расстояния Х (рисунок 2.8) от типоразмера конуса при испытании на жесткость токарно-винторезных станков

	Обозначение конусного отверстия в шпинделе: Морзе №						
	0	1	2	3	4	5	6
Расстояние Х от точки приложения силы до торца шпинделя (переходной втулки) в мм	22	28	36	45	55	70	90

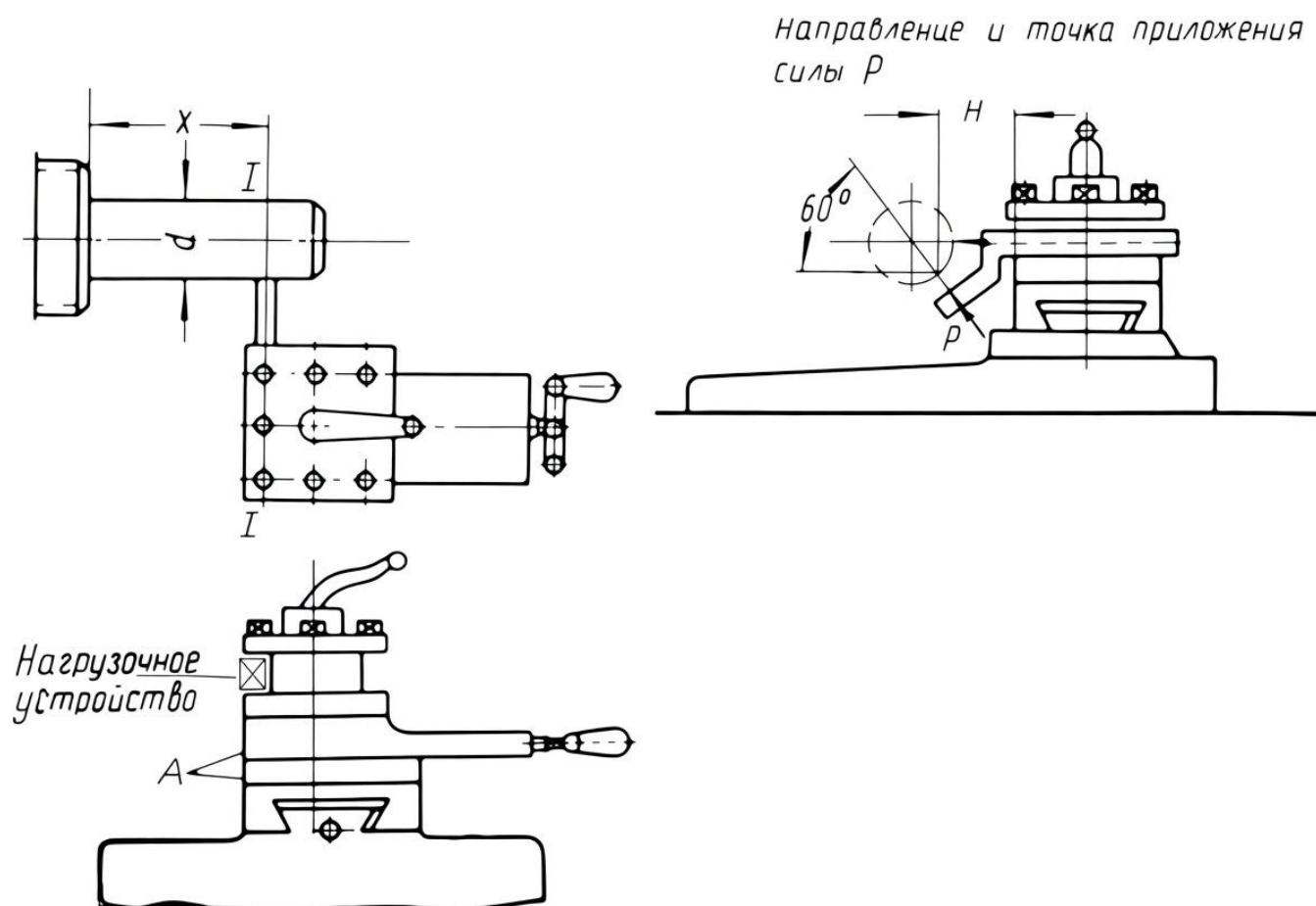


Рисунок 2.8. Положение узлов токарно-винторезного станка, точки приложения и направление действия нагружающей силы при измерении жесткости

Таблица 2.3 - Размеры, определяющие положение узлов токарно-винторезных станков различного типоразмера при испытании их на жесткость

Станки с наибольшим диаметром обрабатываемого изделия D в мм	Расстояние H от точки приложения силы до резцедержателя в мм	Диаметр оправки d в точке измерения перемещения в мм
200	38	30
250	38	35
320	50	40
400	50	40
500	67	40

Нагружающие силы определялись величинами, указанными в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Нагружающие силы для токарно-винторезных станков нормальной точности

Наибольший диаметр обрабатываемого изделия D , мм	Прилагаемая сила P , Н
200	2000
250	2800
320	4000
400	5600
500	8000

Вышеописанные методики определения эксплуатационных характеристик ШУ были апробированы путем проведения 108 наблюдений на экспериментальной установке, созданной на базе токарного станка 1А616 (рисунок 2.9).

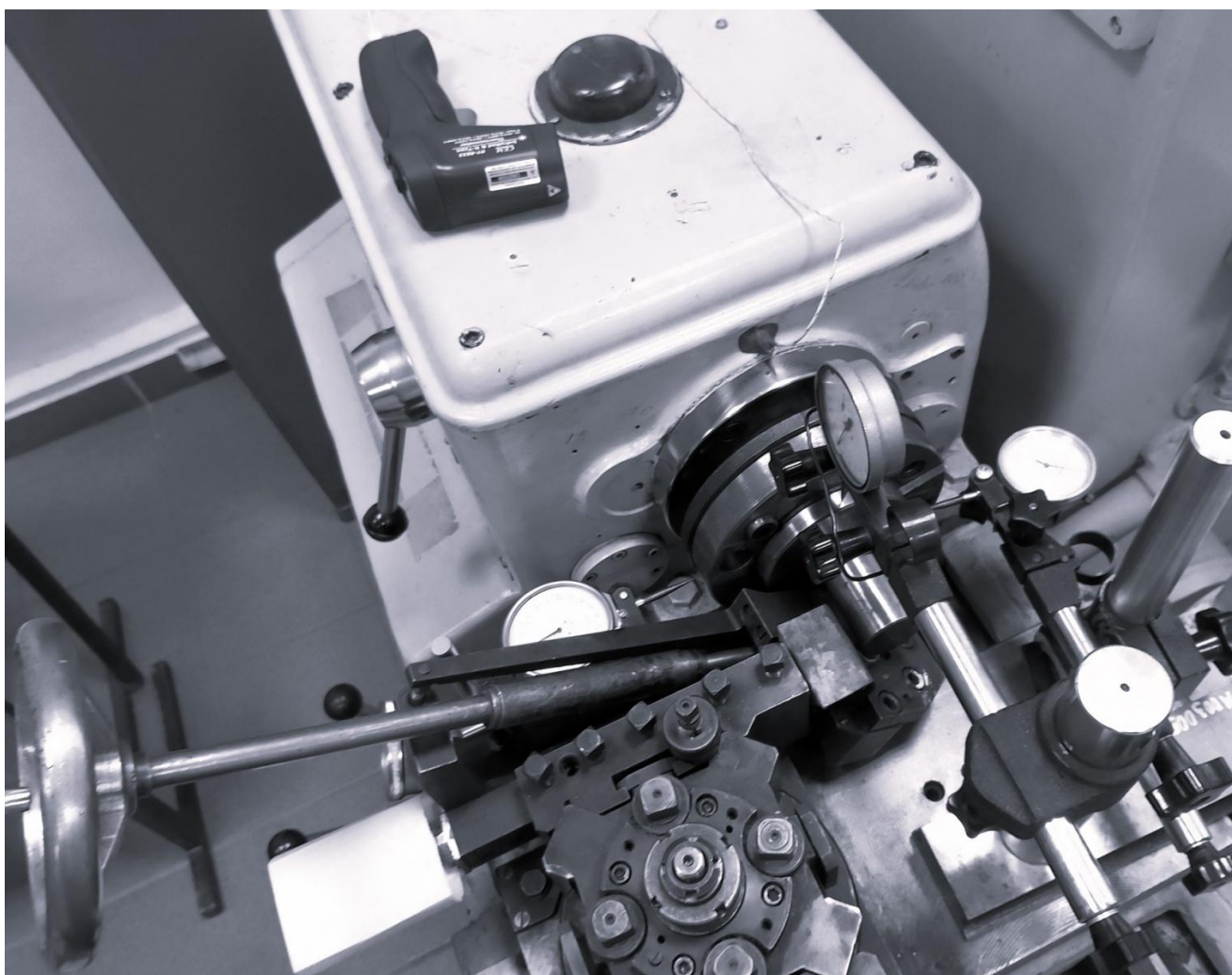


Рисунок 2.9. Общий вид экспериментальной установки на базе токарного станка 1А616

2.1.2. Применение генератора случайных чисел при планировании эксперимента с большим числом переменных

Одной из проблем при обучении НС моделирования характеристик ШУ является оптимизация времени сбора статистических данных, полученных в ходе натурного эксперимента, или путем расчета. Эта проблема не нова и присуща большинству решаемых при помощи НС задач, причина которой заключается в обоснованном выборе сочетаний комбинаций факторов. Рост числа факторов экспоненциально увеличивает трудоемкость экспериментов и сложность расчетов, что требует применения специализированных методов генерации данных.

Количественные значения входных переменных эксперимента:

- время работы – от 15 до 150 мин кратно 15 мин, что дает 10 значений;
- частота вращения шпинделя – от 280 до 1800 об/мин с шагом согласно паспорту станка 1A616, что дает 9 значений.
- прикладываемая сила – от 500 до 4000 Н, с шагом в 500 Н, что дает 8 значений.

С точки зрения полноты информации идеальным является метод полного перебора сочетаний входных переменных эксперимента, поскольку НС "увидит" функцию отклика во всех возможных состояниях, поймет все нюансы, изгибы, провалы и пики. Ошибка обучения будет минимальной, а способность к обобщению в пределах заданной области - абсолютной. Однако, в нашем случае для получения $10 \cdot 9 \cdot 8 = 720$ результатов он практически не может быть реализован в связи со значительными временными затратами.

Для решения проблемы снижения трудоемкости эксперимента широко используются методы планирования экспериментов [29]: полно-факторный эксперимент (ПФЭ) и дробно-факторный эксперимент (ДФЭ).

Расчет количества опытов для ПФЭ определяется в соответствии:

$$N = p^k, \quad (2.1)$$

где N – число опытов; p – число уровней факторов; k – число факторов.

Обычно встречаются планы эксперимента типа 2^k (два уровня варьирования факторов), реже 3^k и очень редко при $p > 3$ в связи с резким ростом числа независимых опытов [116]. Таким образом, для реализации плана 2^3 потребовалось бы 8 опытов, а для 3^3 – 27 опытов, если же принять 4^3 , то необходимо 64 опыта.

Нейросеть, обученная по плану 2^3 на 8 точках в вершинах куба, "увидит" только углы пространства (отклики в углах). Она сможет построить только самую примитивную линейную модель. Все, что происходит внутри интервалов (а это 99 % пространства), останется для нейросети "черным ящиком". Ее предсказания внутри области будут не более чем линейной интер-

поляцией между углами, что, скорее всего, будет далеко от реальности, если зависимость нелинейна.

План 3^3 при обучении нейросети будет давать больше информации (27 точек) по сравнению с планом 2^3 , что позволит: уловить нелинейность (так как есть точки не только на границах, но и в центре); понять общую форму поверхности отклика; обеспечить приемлемую точность предсказаний в любой точке области. Недостаток плана 3^3 в том, что функция так и неизвестна "идеально", как в варианте с 720 точками, то есть, нейросеть по прежнему не сможет хорошо моделировать зависимости.

В то же время при реализации разных репликДФЭ снижается трудоемкость эксперимента, но при этом и сужается диапазон полученных значений (размах) отдельных переменных, что в конечном итоге сказывается на качестве обучения НС. При обучении нейросеть попросту будет принимать ограниченный диапазон колебания значений входной и выходной переменной за полный, и при работе такой сети на новых данных, содержащих значения вне обучающего диапазона, уже активно использовать механизмы экстраполяции [35], дающие менее достоверные прогнозы (средняя относительная ошибка по отдельным переменным возрастает с 1,7 % [36] до 10,9 % [35], нежели интерполяция в границах диапазона известных данных).

Альтернативой для формирования комбинаций факторов является использование генератора псевдослучайных чисел (ГПСЧ). Преимущество такого подхода – гибкость, масштабируемость и беспристрастность в управлении объемом данных, что критично для обучения нейросетей. Здесь возможно получение данных лучшего качества (с точки зрения покрытия пространства) при значительно меньших затратах.

Для получения требуемого количества возможных сочетаний факторов при проведении натуральных экспериментов был выбран ГПСЧ Вихрь Мерсенна, поскольку он лишен многих недостатков, присущих другим ГПСЧ, таких как малый период, предсказуемость, легко выявляемая статистическая зависимость. Вихрь Мерсенна [170] был разработан в 1997 году японскими учёными Макото Мацумото и Такудзи Нисимура. Вихрь Мерсенна основывается на свойствах простых чисел Мерсенна и обеспечивает быструю генерацию высококачественных псевдослучайных чисел.

При проведении экспериментов алгоритм его применения реализован на языке Python [174]. Ниже приведен пример для случайного выбора заданного числа сочетаний из трех входных параметров:

Ввод:

$n = [280, 355, 450, 560, 710, 900, 1120, 1400, 1800]$

```
t = [15,30,45,60,75,90,105,120,135,150]
p = [500,1000,1500,2000, 2500,3000,3500,4000]
random.sample(set(itertools.product(n,t,p)), 100)
```

Out[1]:

```
[(1120, 75, 500),
 (710, 105, 1000),
 (1400, 15, 3500),
 (1800, 30, 4000),
 .....
 (710, 90, 1000),
 (280, 30, 2500),
 (280, 60, 4000),
 (280, 90, 500)],
```

где, n - частота вращения шпинделя (об/мин);

t_m – значение времени работы станка (мин);

P – сила воздействия на передний конец шпинделя (Н);

random.sample – вызов генератора для наборов данных и вывод требуемого числа сочетаний – 100;

out – вывод результатов генерации (представлена часть значений).

Таким образом ГПСЧ позволил получить репрезентативную выборку в 100 точек. ПФЭ потребовался бы план 5^3 для получения выборки сопоставимого качества, что привело бы к увеличению трудоемкости на $\sim 10...15$ %.

ГПСЧ Вихрь Мерсенна был также использован для получения значений на различных объемах выборки. Пример кода для отбора 50 % (54 наблюдения) значений без повторений из полученной ранее выборки [92] имеет следующую запись:

Ввод [1]: import random

UpdatedList = random.sample(range(1, 108), 54)

Ввод [2]: print(UpdatedList)

Вывод: [81, 21, 2, 26, 61, 70, 83, 90, 84, 106, 22, 30, 59, 63, 107, 40, 100,
88, 1, 29, 16, 91, 94, 44, 47, 53, 42, 14, 54, 27, 86, 9, 17, 33, 35, 71, 38, 103, 25, 50, 48,
46, 82, 77, 6, 80, 51, 23, 12, 87, 95, 93, 28, 101].

Установлено [92], что при помощи ГПСЧ объем репрезентативных данных для обучения НС прогнозирования ЭХ ШУ может быть уменьшен в 2 раза относительно рекомендованного п 1.3.1. Отсюда трудоемкость эксперимента сократится пропорционально.

В отличие от ПФЭ и ДФЭ преимущество ГПСЧ заключается в возможности выводить комбинации сочетаний для различного их количества, что в частности при обучении нейросетей является неоспоримым преимуществом, поскольку в каждом отдельном случае требуется выводить разный их объем (сочетаний).

2.2. Обоснование структуры НС для моделирования эксплуатационных характеристик ШУ в зависимости от режимов эксплуатации

2.2.1. Настройки и процесс построения нейросети прогнозирования эксплуатационных характеристик ШУ в зависимости от режимов эксплуатации

Как отмечалось в п. 1.3.2, наиболее удобным инструментом построения нейронных сетей являются программы с интерфейсом. Среди них наиболее мощной, удобной и практичной оказалась программа Statistica, которая и была использована для дальнейшего исследования НС. Statistica качественно выделяется способностью сохранять полученную НС одновременно:

- в формате PMML (Predictive Model Markup Language) — это XML-формат, который содержит в себе не только математическое ядро mining-модели (веса, коэффициенты, структуру), но и всю логику предобработки данных (трансформации). Это позволяет передавать готовый результат интеллектуального анализа (Data Mining) из одной аналитической среды в другую, обеспечивая одинаковое её функционирование. [96,86]. XML (eXtensible Markup Language) - расширяемый язык разметки, предназначенный для хранения и передачи данных в структурированном виде, где данные находятся внутри тегов, то есть, в логической иерархии, понятной человеку и компьютеру [91];

- в кодах на языках программирования C/C++, Java, SAS. и др, что позволяет импортировать её в обширные проекты, где НС - лишь часть большого алгоритма, в котором она решает какую-то узкую задачу.

Дополнительно в пакете Statistica присутствует самый большой перечень возможных функций активации и более современных и точных алгоритмов обучения, таких как BFGS. Так как модуль НС - это лишь часть этого мощного пакета статистического анализа, в нем присутствуют разнообразные инструменты для анализа построенной сети, что делает работу в этом пакете более удобным.

При первом построении и обучении НС проверялась принципиальная возможность их применения в области прогнозирования эксплуатационных характеристик ШУ [36, 33]. Для этого использовался набор экспериментальных данных (п. 2.1.1.1 - 2.1.1.3) с числом наблюдений 108. В качестве входных переменных (Continuous inputs) выступали (рисунок 2.10): частота вращения шпинделя (n), время работы (t_m), радиальная сила воздействия на передний конец шпинделя (P). Целевыми (выходными) переменными (Continuous targets) были: температура передней шпиндельной опоры (T), биение шпинделя (Δ), упругое смещение переднего конца шпинделя (δ). На рисунок 2.10 переменные Δ и δ обозначены соответственно как $_D_$ и d , это вызвано техническими ограничениями программы. Данный объем наблюдений (108) соответствует первоначальному рекомендованному объему, определяемому либо количеством связей в модели (увеличенному десятикратно произведению входных и выходных переменных [36, 33, 13]) или выражением [30].

$$Q = 7 \cdot N_x + 15, \quad (2.2)$$

где N_x — количество входных параметров НСМ.

Как отмечалось ранее (п. 1.3.2) числовые значения переменных должны быть приведены в масштаб, подходящий для сети. В пакете Statistica реализованы алгоритмы минимакса и среднего/стандартного отклонения, которые автоматически находят масштабирующие параметры для преобразования числовых значений в нужный диапазон [173].

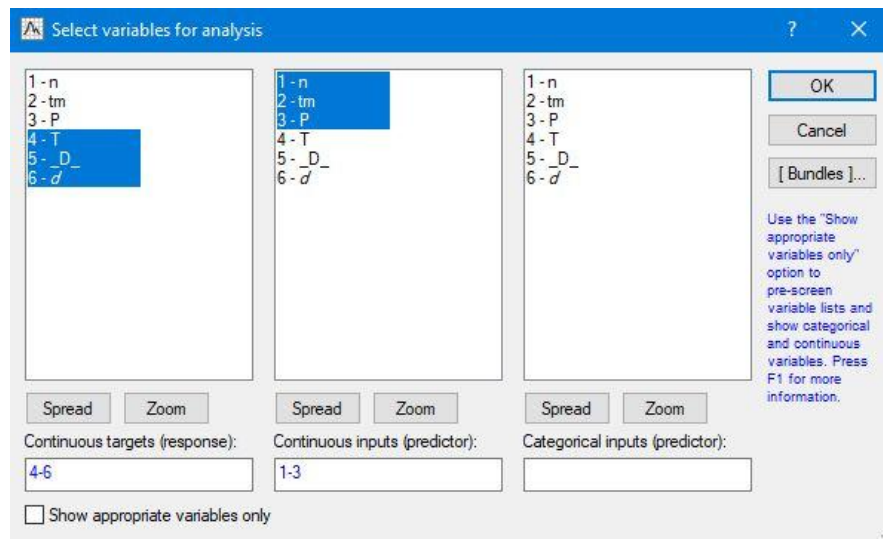


Рисунок 2.10. Окно выбора переменных

В пакете Statistica имеется встроенный модуль нейронных сетей (рисунок 2.11), позволяющий строить НС: регрессии; классификации и их зависимости от времени; кластеризации.

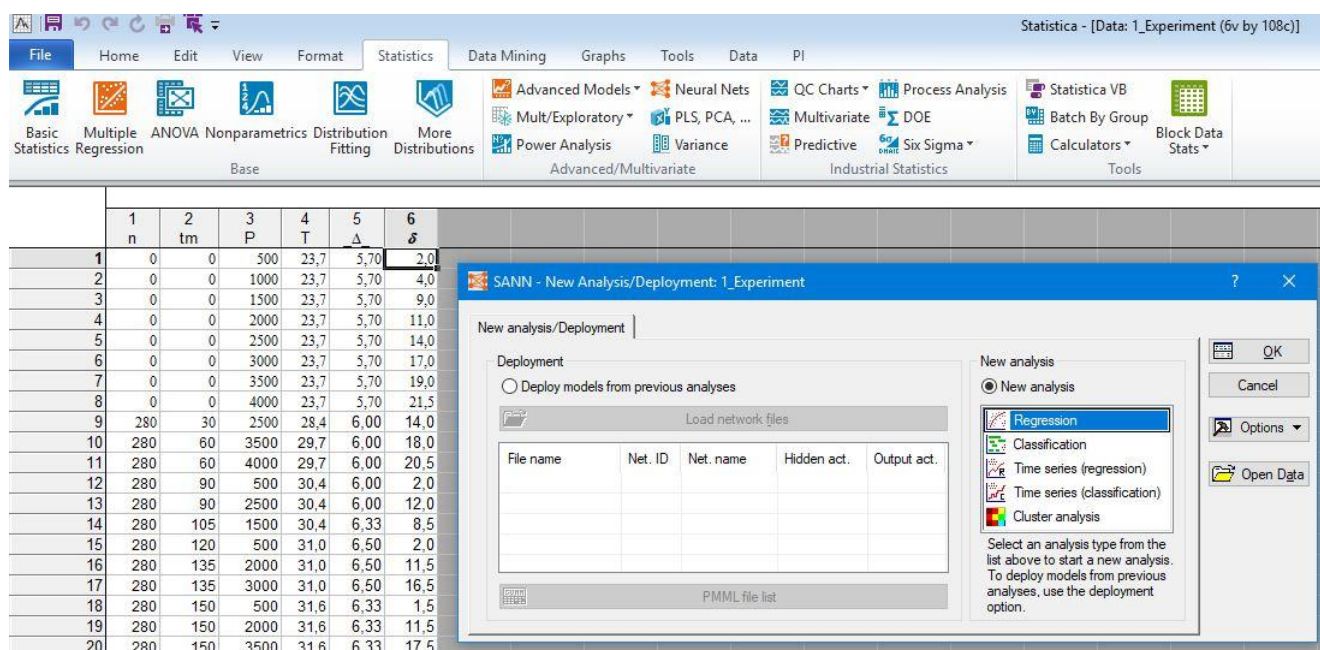


Рисунок 2.11. Фрагмент обучающего файла и стартовое окно модуля НС

То есть пакет Statistica может строить НС по алгоритмам:

- обучения с учителем (контролируемого обучения), где пользователь предоставляет алгоритму пары объект-ответ, а алгоритм находит способ получения ответа по объекту [16]. В частности, алгоритм способен выдать ответ для объекта, которого он никогда не видел раньше, без какой-либо помощи человека.

Суть обучения с учителем состоит в следующем:

- 1) после инициализации НС на ее вход подаются входные векторы $p(\mu)$, сеть генерирует выходной вектор $a(\mu)$ и находит разность между вектором цели $t(\mu)$ и полученным на выходе вектором $a(\mu)$, которую называют ошибкой обучения;

- 2) веса сети изменяются так, чтобы выходные векторы приближались к желаемым, то есть, чтобы уменьшалась ошибка обучения.

- без учителя (неконтролируемого обучения). В алгоритмах обучения без учителя известны только объекты, а ответов нет. Хотя есть много успешных сфер применения этих методов, их, как правило, труднее интерпретировать и оценить, поскольку в отличие от обучения с учителем для изменения весов и смещений нет возможности воспользоваться ошибкой обучения. НС должна самообучаться, обнаруживая закономерности во входной информации. Поэтому сети, настроенные без учителя, часто называют самоорганизующимися сетями (сети Кохонена), такие сети решают задачи кластеризации.

Тот и иной способ изменения параметров сети называют правилом настройки НС [82]. Цель обучения состоит в том, чтобы НС после настройки смогла генерировать правильные ответы на входные векторы, которые не принадлежат обучающему множеству, т.е. НС должна

решить задачи регрессии (множество входов и выходов) и классификации (множество входов и один выход).

Так как в реализации сформулированной в работе цели проводимых исследований известны входные и выходные параметры, говоря точнее, набор параметров, то для дальнейшего построения НС выбрана стратегия контролируемого обучения, позволяющая решить задачи регрессии.

Первый шаг в построении НС – это ее инициализация: задание начальных значений весов и смещений [82]. В пакете Statistica инициализация осуществляется самой программой и зависит от выбранной архитектуры сети, числа нейронов и функций активации [173].

В пакете Statistica возможно построение НС двумя режимами: автоматическое построение, и пользовательское построение. На каждом из этих режимов можно строить нейронные сети двух типов - это многослойный персептрон (MLP) и сети на основе радиально базисных функций (RBF) [13, 173].

Настройка построения и обучения, которая может осуществляться на каждом из указанных режимов, производится выбором по предварительно заданным параметрам.

В режиме автоматического построения архитектура НС с настройками её обучения предлагается программой по умолчанию (даются рекомендуемые интервалы настроек), что является рациональным начальным приближением для многих практических задач [13]. В пользовательском же режиме – пользователь уже самостоятельно может вносить изменения в параметры, заранее выставленные программой.

В качестве метода обучения использовался алгоритм второго порядка – BFGS, который показал свои преимущества в скорости сходимости и низких значениях ошибки выходных переменных [38].

Критерием останова процесса обучения НС являлось условие, заданное в настройках программы по умолчанию [13], при котором в течение 20 итераций ошибка обучения не изменялась на величину более 0,0000001, а само число эпох при этом не превышало ограничения. Ограничение количества эпох обучения (итераций) задавалась 2000, при достижении этого значения алгоритм обучения останавливался и переходил на обучение следующей сети. Необходимость задания ограничения количества эпох обучения связано с тем, что при его отсутствии обучение может «зациклиться» и значительно превысить разумное количество итераций, необходимое для получения качественно обученной сети, либо уйти в бесконечность. Оба варианта нецелесообразны поскольку кратно повышают затраты времени обучения НС.

В ходе самого же процесса обучения происходило изменение весов, т.е. корректировка модели под желаемый результат. Качественная картина процесса обучения приведена на рисунке 2.12.

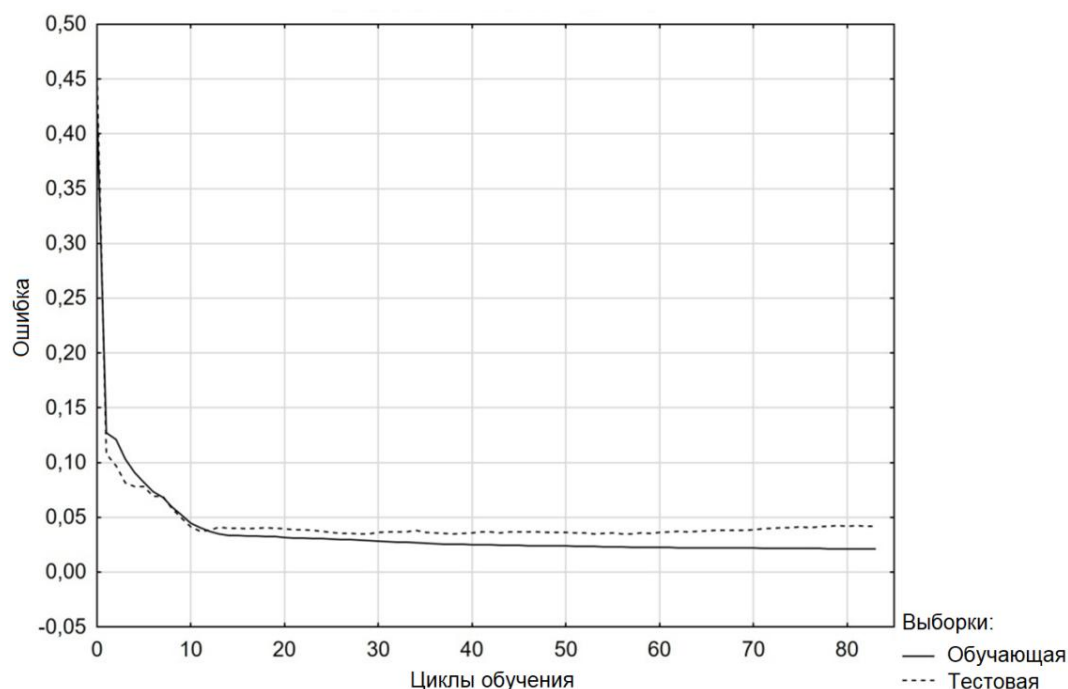


Рисунок 2.12. График процесса обучения НС

Из графика на рисунок 2.12 видно, что ошибка с увеличением количества циклов обучения стабильно уменьшается одновременно на обучающей и тестовой выборках и примерно после 30 циклов выходит на «ровную полку» (ошибка практически не изменяется).

Процесс обучения можно дополнительно наблюдать в специальном окне (рисунок 2.13).

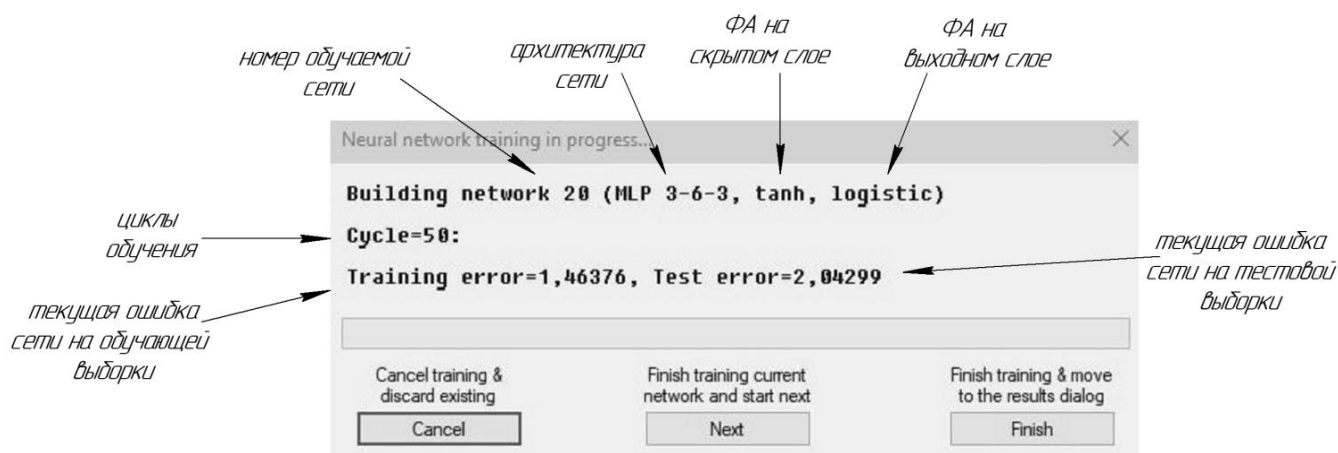


Рисунок 2.13. Процесс обучения нейросети

В первой строчке окна содержится информация об обучаемой сети. В скобках показана её архитектура и ФА (функция активации) на скрытом и выходном слоях. Во второй строчке текущее значение количества циклов обучения, а в третьей соответствующая ему ошибка на обучающей и тестовой выборке.

В процессе обучения исследовались следующие ФА на скрытом слое: линейная, Гаусса, гиперболический тангенс, сигмоидальная, экспоненциальная, синусоидальная. На выходном слое – линейная.

Выборка определялась самой программой Statistica случайным образом из пропорции 70 % - обучающая, 15 % - тестовая и 15 % - контрольная [13].

Оценка уровня (степени) обучения НС производилась с помощью функции ошибок, по значениям которой судят о том, насколько хорошо настроена сеть на решение поставленной задачи. Функцию ошибок называют также критерием качества обучения сети. Чаще всего применяются следующие критерии качества [82]:

1) сумма квадратов отклонений (невязок, ошибок)

$$I = \sum_{i=1}^N e_i^2 ;$$

2) средняя квадратическая ошибка

$$I = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2 ;$$

3) комбинированная ошибка

$$I = \frac{\gamma}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2 + \frac{1-\gamma}{n} \sum_{j=1}^n x_j^2 ;$$

4) средняя абсолютная ошибка

$$I = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |e_i| ,$$

где $N=S^M$ – число координат векторов выхода a и цели t ; $e_i = t_i - a_i$ – отклонение i -го элемента выхода от i -го элемента цели; γ – параметр регуляризации $\gamma \in (0,1)$; n – общее число настраиваемых параметров сети (весов и смещений); x_j – j -я координата вектора настраиваемых параметров, который объединяет в себе веса и смещения сети.

В качестве функции ошибок для всех способов построения НС была выбрана квадратичная функция (сумма квадратов отклонений SOS - sum of square).

Результаты обучения сохранялись в сводную таблицу 2.5. Для удобства сравнения результаты ранжированы по столбцу ошибка на контроле в порядке увеличения.

Таблица 2.5 - Сводная таблица построенных нейронных сетей

№	Архитектура сети	Производительность			Ошибка			Метод обучения	Функция ошибки	ФА на скрытом слое	ФА на выходном слое
		обучение	тест	контроль	обучение	тест	контроль				
55	MLP 3-9-3	0,856	0,855	0,852	1,030	1,982	0,894	BFGS 30	SOS	Tanh	Identity
54	MLP 3-9-3	0,869	0,817	0,892	0,943	0,624	0,932	BFGS 66	SOS	Tanh	Identity
53	MLP 3-9-3	0,868	0,864	0,813	0,970	1,226	1,245	BFGS 48	SOS	Tanh	Identity
58	MLP 3-7-3	0,877	0,863	0,831	0,664	0,989	1,319	BFGS 72	SOS	Tanh	Identity
4	MLP 3-9-3	0,909	0,783	0,849	1,588	1,978	1,443	BFGS 108	SOS	Logistic	Exponential
60	MLP 3-7-3	0,854	0,882	0,836	1,911	2,289	1,595	BFGS 28	SOS	Tanh	Identity
8	MLP 3-4-3	0,895	0,772	0,830	1,256	1,573	1,673	BFGS 84	SOS	Tanh	Identity
47	MLP 3-4-3	0,876	0,771	0,804	1,658	2,299	1,765	BFGS 48	SOS	Tanh	Identity
3	MLP 3-3-3	0,868	0,760	0,802	2,296	2,510	1,798	BFGS 27	SOS	Logistic	Identity
57	MLP 3-7-3	0,862	0,768	0,786	1,850	2,523	2,095	BFGS 23	SOS	Tanh	Identity
48	MLP 3-4-3	0,865	0,865	0,831	1,271	1,820	2,188	BFGS 88	SOS	Tanh	Identity
5	MLP 3-3-3	0,889	0,780	0,836	2,172	3,146	2,465	BFGS 74	SOS	Exponential	Logistic
50	MLP 3-4-3	0,838	0,883	0,872	3,033	3,758	2,591	BFGS 22	SOS	Tanh	Identity
46	MLP 3-4-3	0,852	0,909	0,788	1,469	1,195	2,903	BFGS 24	SOS	Tanh	Identity

56	MLP 3-7-3	0,830	0,897	0,718	2,625	1,816	3,134	BFGS 19	SOS	Tanh	Identity
2	MLP 3-5-3	0,880	0,744	0,801	1,941	3,506	3,145	BFGS 55	SOS	Logistic	Tanh
49	MLP 3-4-3	0,837	0,804	0,901	2,863	2,089	3,171	BFGS 25	SOS	Tanh	Identity
51	MLP 3-9-3	0,848	0,889	0,787	2,843	1,493	3,455	BFGS 20	SOS	Tanh	Identity
52	MLP 3-9-3	0,863	0,759	0,784	2,604	3,135	3,816	BFGS 22	SOS	Tanh	Identity
42	RBF 3- 14-3	0,885	0,714	0,788	3,657	3,396	4,005	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
59	MLP 3-7-3	0,832	0,791	0,894	3,355	2,577	4,223	BFGS 24	SOS	Tanh	Identity
37	RBF 3- 8-3	0,822	0,815	0,820	6,762	5,009	4,419	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
43	RBF 3- 19-3	0,885	0,713	0,779	3,346	7,109	4,634	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
61	RBF 3- 8-3	0,840	0,756	0,834	4,382	10,490	4,702	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
1	MLP 3-6-3	0,869	0,771	0,799	2,412	4,618	5,376	BFGS 67	SOS	Sine	Tanh
44	RBF 3- 17-3	0,851	0,619	0,838	8,241	13,094	5,614	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
45	RBF 3- 15-3	0,824	0,692	0,781	6,832	6,997	6,185	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
64	RBF 3- 8-3	0,790	0,746	0,880	10,490	7,386	7,296	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
62	RBF 3- 8-3	0,783	0,716	0,773	12,440	10,343	8,097	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
41	RBF 3- 15-3	0,830	0,712	0,782	8,441	6,921	8,306	RBFT	SOS	Gaussian	Identity

Продолжение таблицы 2.5

36	RBF 3-8-3	0,742	0,640	0,749	15,310	14,561	11,009	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
38	RBF 3-8-3	0,780	0,684	0,766	11,372	6,878	12,009	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
65	RBF 3-8-3	0,773	0,799	0,598	14,518	18,147	18,161	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
39	RBF 3-8-3	0,778	0,648	0,701	18,525	20,869	19,802	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
40	RBF 3-8-3	0,762	0,736	0,669	15,551	9,783	23,161	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
63	RBF 3-8-3	0,634	0,509	0,622	32,536	37,727	43,392	RBFT	SOS	Gaussian	Identity

Искомая НС выбиралась из сводного списка построенных нейросетей (таблица 2.5) по критериям производительности (коэффициенту детерминации R^2) на обучающей, тестовой и контрольной выборкам (подмножествам) и соответствующих им ошибках обучения. При выборе оптимальной сети необходимо придерживаться условий, приведённых в литературе [13, 173, 115], и рассматривать полученные сети по совокупности следующих критериев:

- чем выше производительность (R^2), тем лучше сеть предсказывает данные. Наилучшей сетью будет та, у которой эта величина ближе к 1;

- чем меньше ошибка сети, тем будет меньше величина расхождения между наблюдаемыми значениями и спрогнозированными сетью. Наилучшей сетью будет та, у которой эта величина ближе к 0;

- разброс значений производительности и ошибки обучения на подмножествах (обучающем, тестовом и контрольном) должен быть минимален. Наилучшей сетью будет та, у которой эта разница меньше, т.е. ближе к 0.

- если сети обладают практически одинаковыми ошибками, то наилучшей из них будет сеть с меньшим количеством скрытых элементов – количеством слоев и/или нейронов, т.е. более простой архитектурой. В этом случае у такой сети меньше вероятность стать переобученной (п. 1.3.1). Сеть же с большим количеством элементов целесообразно использовать в решении более сложных задач – задач с большим количеством переменных.

Предварительный анализ результатов обучения и таблицы 2.5 показал, что производительность сетей (RBF – 2 столбец – архитектура сети) полученных на основе ФА Гаусса на всех

трех выборках – обучение, тест, контроль сравнительно ниже, чем у MLP, а ошибка ощутимо выше. Ввиду этого сети на основе радиально-базисных функций (RBF) исключены из дальнейшего рассмотрения. В ФА у MLP ввиду низких результатов исключена синусоидальная на скрытом слое (сеть 1.MLP 3-6-3), а также линейная, результаты которой были столь низкие, что не позволили ей попасть в свод «лучших» сетей.

Руководствуясь вышеперечисленными условиями, для дальнейшего исследования из таблицы 2.5 была отобрана сеть с индексом 58 с архитектурой многослойного персептрона MLP 3-7-3.

Структура построенной сети с функциями активации показана на рисунке 2.14.

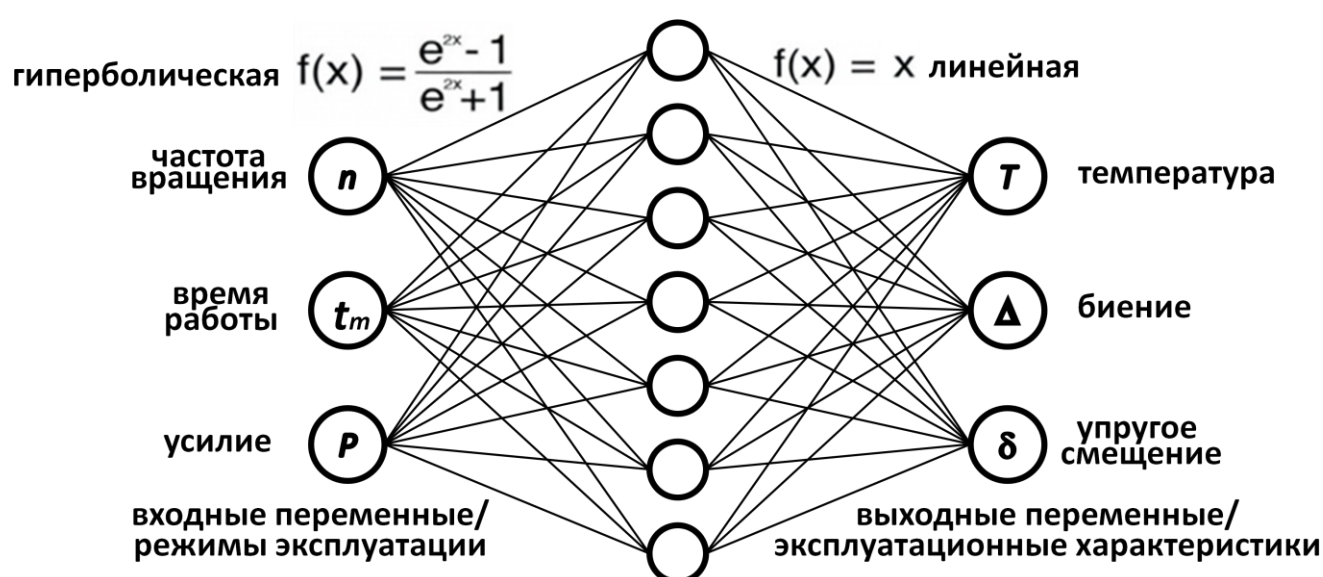


Рисунок 2.14. Вид построенной сети и функции активации на скрытом и выходном слоях: гиперболический тангенс и тождественная (линейная) соответственно

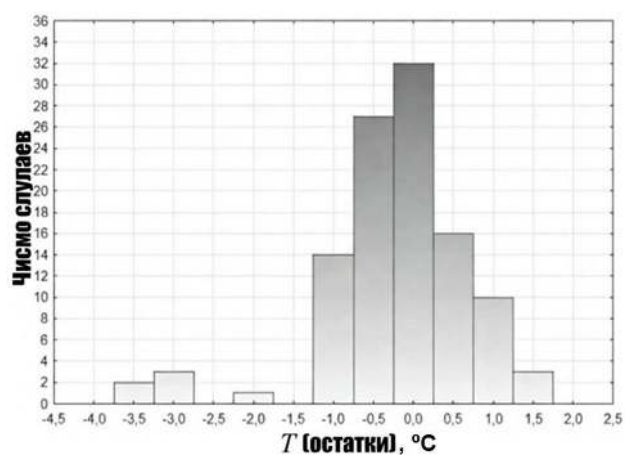
2.2.2. Анализ нейросети прогнозирования эксплуатационных характеристик ШУ

В процессе анализа выбранной сети MLP 3-7-3 по чувствительности переменных установлено, что наибольшее влияние на выходные переменные оказывает частота вращения шпинделя n , далее идёт - радиальная сила воздействия на оправку, установленную в конус шпинделя P , имитирующая силу резания, и наименьшее влияние оказывает время работы станка t_m , значение которого находится на уровне шума (таблица 2.6).

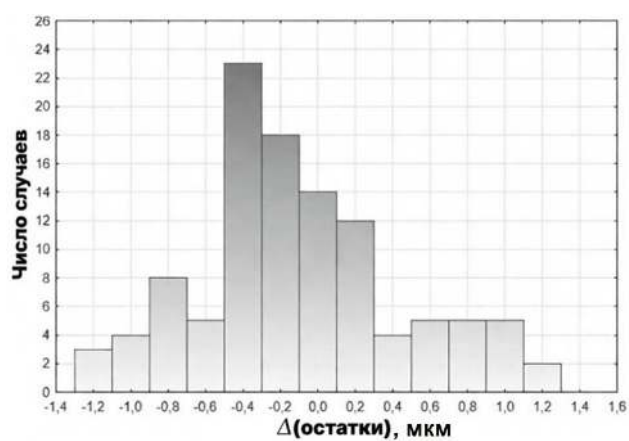
На рисунке 2.15 показано распределение остатков (разница между наблюдаемым значением зависимой переменной и предсказанным моделью) по трём переменным.

Таблица 2.6 - Анализ чувствительности переменных (Выборки: обучающая, тестовая, контрольная)

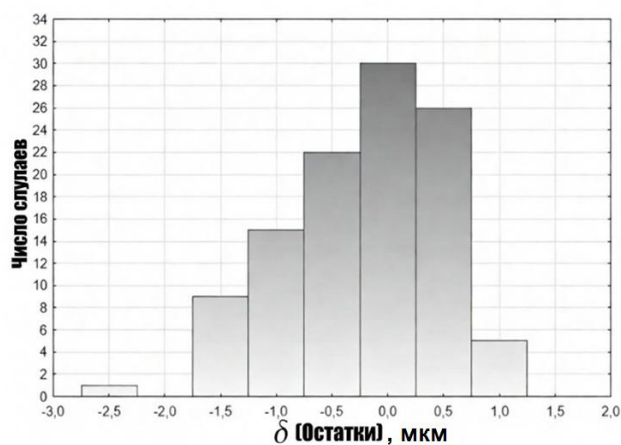
Сеть	Входные переменные		
	n	P	t_m
58.MLP 3-7-3	51,143	24,166	5,499



а



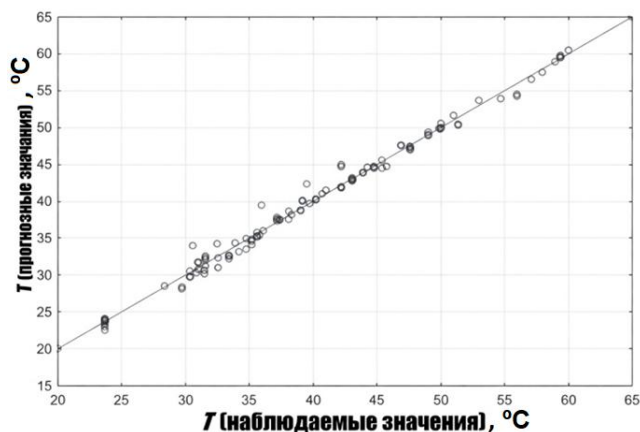
б



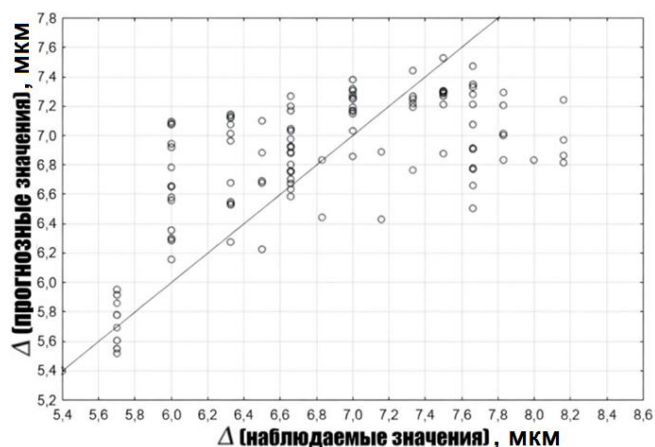
в

Рисунок 2.15. Распределение остатков

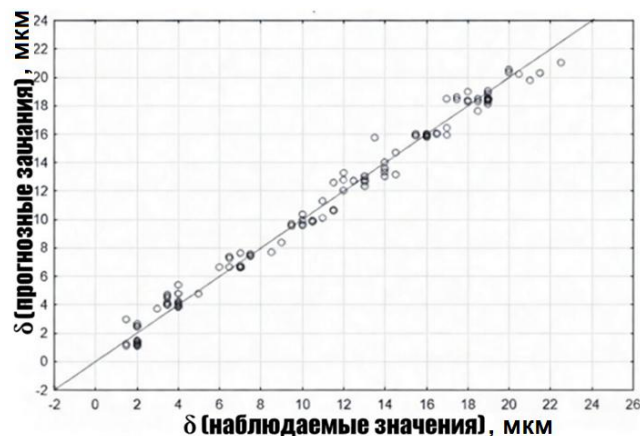
На диаграммах рассеяния по выходным переменным (рисунок 2.16) видно, что данные переменных "температура (T)" (рисунок 2.16, а) и "упругое смещение переднего конца шпинделя (δ)" (рисунок 2.16, в) расположены вдоль линии регрессии и наблюдается «очень сильная» корреляционная связь, а значения для переменной "биение (Δ)" (рисунок 2.16, б) имеют довольно большой разброс и «значительную» связь по шкале Чеддока [95].



а



б



в

Рисунок 2.16. Корреляционные зависимости для выходных переменных

В таблице 2.7 показаны коэффициенты корреляции для трёх переменных на обучении, тесте и контроле. Видно, что у переменных "температура" и "смещение переднего конца шпинделя" корреляционная связь «очень сильная» близкая к единице, а у переменной "биение" «значительная» около 0,6, т.е. изменение величин входных переменных оказывает более сильное влияние на выходы "температура" и "смещение переднего конца шпинделя", в то время как на "биение" такое изменение входным переменных оказывает влияние сравнительно ниже.

Таблица 2.7 - Коэффициенты корреляции

Сеть	T			Δ			δ		
	Обучение	Тест	Контроль	Обучение	Тест	Контроль	Обучение	Тест	Контроль
58. MLP 3×7×3	0.9964	0.9957	0.9893	0.6397	0.5986	0.5070	0.9937	0.9956	0.9962

В таблице 2.8 показана ошибка для переменной "температура T " относительно исходных (наблюдаемых) значений на тестовой выборке (подмножестве) для чего в таблицу с прогнозными значениями введена новая переменная - относительная ошибка ($MAPE$) (рисунок 2.17),

Рисунок 2.17. Окно ввода дополнительной переменной

Новая переменная определяется как отношение третьей переменной в таблице к абсолютному значению первой переменной (исходные данные):

$$MAPE = \frac{v_3}{|v_1|}, \quad (2.3)$$

где v_3 и v_1 - переменные из третьего и первого столбцов в таблице 2.8, т.е. из столбцов с заголовками « T абс. остатки. 58.MLP3×7×3» и « T наблюдаемое».

Аналогично (2.3) посчитаны ошибки по переменным биения и смещения переднего конца шпинделя (таблицы 2.9 и 2.10).

Таблица 2.8 - Таблица прогнозов и определение ошибки для переменной T (тестовая выборка)

Номер наблюдения	T наблюдаемое	T прогнозное 58.MLP 3-7-3	T абс. остатки 58.MLP 3-7-3	$MAPE(T)$ $=v_3/abs(v_1)$
1	23,70000	22,53832	1,161675	0,049015831
8	23,70000	24,02490	0,324905	0,01370906
13	30,40000	29,67285	0,727147	0,02391931
23	31,50000	30,20416	1,295841	0,04113781
26	33,40000	32,55037	0,849630	0,02543803
30	34,20000	33,13113	1,068872	0,03125357
33	35,20000	34,61582	0,584178	0,01659596
35	35,80000	35,43916	0,360837	0,01007924
43	36,10000	35,97291	0,127087	0,00352042
45	37,40000	37,50699	0,106993	0,00286076
50	37,20000	37,34908	0,149077	0,00400744
70	43,90000	43,92323	0,023233	0,00052923
81	47,60000	47,30835	0,291651	0,00612713
88	42,20000	44,72270	2,522702	0,05977967
91	50,00000	49,91837	0,081633	0,00163266
102	57,10000	56,50823	0,591774	0,01036382

Таблица 2.9 - Определение ошибки для переменной Δ (тестовая выборка)

Номер наблюдения	Δ наблюдаемое	Δ прогнозное 58.MLP 3-7-3	Δ абс. остатки 58.MLP 3-7-3	$MAPE(\Delta)$ $=v_3/abs(v_1)$
1	5,700	5,951	0,251	0,04403
8	5,700	5,517	0,183	0,03205
13	6,000	6,655	0,655	0,10912
23	6,000	6,655	0,655	0,10912
26	6,660	6,701	0,041	0,00623

Продолжение таблицы 2.9

30	7,660	6,768	0,892	0,11650
33	7,660	6,657	1,003	0,13097
35	8,160	6,812	1,348	0,16517
43	8,160	6,972	1,188	0,14560
45	7,000	6,856	0,144	0,02060
50	6,000	7,078	1,078	0,17963
70	7,000	7,166	0,166	0,02378
81	7,500	7,306	0,194	0,02591
88	7,660	7,209	0,451	0,05891
91	7,000	7,257	0,257	0,03666
102	7,660	7,349	0,311	0,04063

Таблица 2.10 - Определение ошибки для переменной δ (тестовая выборка)

Номер наблюдения	δ наблюдаемое	δ прогнозное 58.MLP 3-7-3	Δ абс. остатки 58.MLP 3-7-3	$MAPE(\delta)$ $=v3/abs(v1)$
1	2,000	2,502	0,502	0,25078
8	21,500	20,289	1,211	0,05632
13	12,000	13,290	1,290	0,10752
23	17,000	15,966	1,034	0,06082
26	19,000	18,495	0,505	0,02656
30	10,000	10,340	0,340	0,03398
33	3,5000	4,730	1,230	0,35149
35	14,000	13,311	0,689	0,04922
43	19,000	18,489	0,511	0,02689
45	6,5000	7,360	0,860	0,13234
50	16,000	15,826	0,174	0,01090
70	22,500	21,017	1,483	0,06591
81	3,0000	3,688	0,688	0,22938
88	13,000	12,362	0,638	0,04910
91	9,5000	9,525	0,025	0,00262
102	2,0000	1,471	0,529	0,26443

Средние относительные ошибки НС на тестовом множестве для трёх выходных переменных приведены в таблице 2.11, и составили: 1,87 % - для T ; 7,78 % - для Δ ; 10,7 % - для δ . Количество циклов обучения, которое потребовалось для получения сети с такими ошибками равно 72 (столбец «Метод обучения», таблица 2.5).

Таблица 2.11 - Средние относительные ошибки для переменных на тестовом множестве

Номер наблюдения	$MAPE (T)$	$MAPE (\Delta)$	$MAPE (\delta)$
Среднее для наблюдений 1-16	0,0187	0,0778	0,1073

Из приведенных значений видно, что рассматриваемая нейросеть хорошо описывает зависимости даже для переменной Δ с сравнительно низкой корреляционной связью («значительная» по шкале Чеддока).

С целью более объективной проверки работоспособности и достоверности прогноза построенной и обученной НС 58.MLP $3 \times 7 \times 3$ её исполнительный файл, сохраненный в формате PMML, был загружен в файл примера, который использовался при обучении (рисунок 2.18).

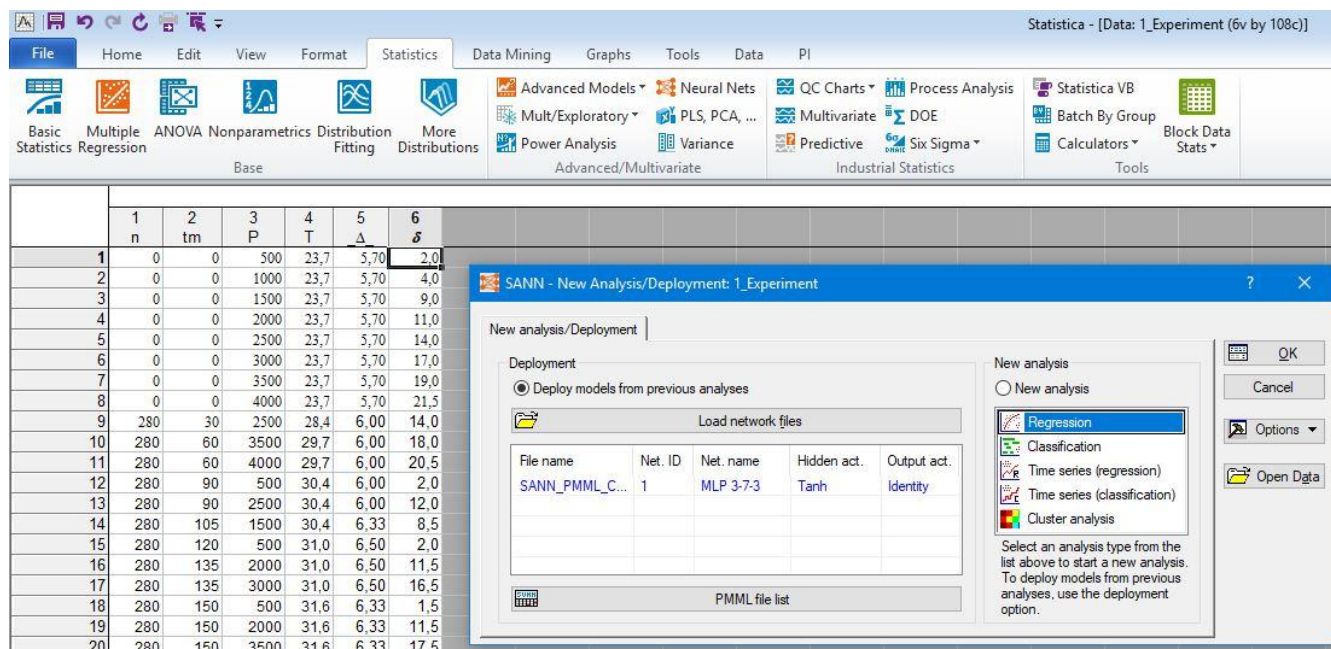


Рисунок 2.18. Фрагмент обучающего файла и стартовое окно модуля НС с загрузкой сети 58.MLP $3 \times 7 \times 3$

При таком подходе сеть оценивала уже весь объем наблюдений (70 % обучающая + 15 % тестовая + 15 % контрольная), а не только тестовую выборку (рисунок 2.19).

Таким образом, был смоделирован случай работы построенной для моделирования ЭХ ШУ сети.



Рисунок 2.19. Круговая диаграмма составляющих обучающего файла и файла для тестирования обученной сети

Далее была рассчитана относительная ошибка для предсказанных значений трех переменных на всех наблюдениях файла примера (1-108), аналогично тому, как это делалось выше (2.1) (в ходе обучения), при проверке сети только на тестовой выборке и выведена средняя относительная ошибка (среднее для наблюдений 1-108) (таблица 2.12).

Таблица 2.12 - Средние относительные ошибки для переменных на контрольном примере

Номер наблюдения	$MAPE(T)$	$MAPE(\Delta)$	$MAPE(\delta)$
Среднее для наблюдений 1-108	0,0167	0,0625	0,0972

Полученная НС 58.MLP $3 \times 7 \times 3$ показала довольно низкие средние относительные ошибки при прогнозе эксплуатационных характеристик ШУ для трёх выходных переменных. Ошибки составили: 1,67 % - для T ; 6,25 % - для Δ ; 9,72 % - для δ .

2.3. Выводы по главе 2

1. Экспериментально апробирована комплексная методика определения эксплуатационных характеристик шпиндельного узла (ШУ), включающая измерение температуры стенки корпуса в зоне передней опоры, радиального биения шпинделя и жесткости ШУ. Методика основана на стандартах и нормативных документах, что обеспечивает достоверность формируемой базы данных для обучения нейронных сетей. Нейросеть, обученная на таком массиве данных, будет альтернативой дорогостоящему этапу апробации ШУ и позволит уже на этапе проектирования учесть влияние режимов его эксплуатации.

2. При планировании эксперимента с большим числом переменных эффективно применен генератор псевдослучайных чисел (ГПСЧ) «Вихрь Мерсенна». Это позволило сократить объем требуемых экспериментальных данных для качественного обучения нейронной сети на 15 % по сравнению с ПФЭ, тем самым снизить трудоемкость проведения исследований, причем сделать это удалось без потери качества прогноза, присущей моделям на основе ДФЭ, что в свою очередь повысило достоверность нейросетевого прогнозирования.

3. Для моделирования зависимостей эксплуатационных характеристик ШУ от режимов эксплуатации оптимальной оказалась архитектура многослойного персептрона (MLP) 3-7-3 с функцией активации гиперболический тангенс на скрытом слое и линейной функцией на выходном слое. Сети на основе радиальных базисных функций (RBF) показали значительно худшие результаты.

4. Проведенный анализ чувствительности входных переменных показал, что наибольшее влияние на выходные параметры оказывает частота вращения шпинделя (n), затем радиальная сила (P), а время работы (t_m) имеет наименьшее влияние, сопоставимое с уровнем шума. Это подтверждает адекватность модели физическим процессам в ШУ.

5. Обученная нейронная сеть MLP 3-7-3 продемонстрировала высокую точность прогнозирования эксплуатационных характеристик ШУ и достоверность с коэффициентами корреляции 0,996 по отдельным переменным (T и δ). Анализ переменной Δ (коэффициент корреляции 0,6) показал, что она определяет малую долю дисперсии. Это свидетельствует о наличии других важных факторов, неучтенных в модели. Средние относительные ошибки ($MAPE$) по всему массиву данных составили (цифры в скобках даны для тестовой выборки): для температуры - 1,67 % (1,87 %), для биения - 6,25 % (7,78 %), для упругого смещения - 9,72 % (10,7 %), что подтверждает практическую применимость модели для инженерных расчетов и проектирования.

ГЛАВА 3. Формирование интегрированного обучающего массива данных для моделирования эксплуатационных характеристик ШУ с учетом расширенного количества проектных параметров

3.1. Методология получения интегрированной обучающей выборки

В современных реалиях производства станков и его перехода от массового к мелкосерийному и единичному выпуску резко возросло значение этапа проектирования. Теперь нет возможности изготовить опытный образец и проверить его в условиях реальной эксплуатации и скорректировать проектные параметры, если получены значения ЭХ не соответствующие требованиям стандартов или заказчика. Таким образом, учет всего многообразия возможных факторов от режимов эксплуатации, настроечных параметров и конструктивного исполнения разрабатываемого ШУ должен быть осуществлён уже на стадии проектирования. Реализация такого учета возможна благодаря получению статистических данных от нескольких взаимодополняющих источников (эксперимент, аналитические вычисления, численные модели), которые будучи объединенными в один набор, будут обучать НС прогнозировать ЭХ.

Интегрированная обучающая выборка в рамках данной работы представляет собой целостный, верифицируемый и гармонизированный массив данных, сформированный путем объединения информации из трёх взаимодополняющих источников: натурных экспериментов, аналитических расчётов и численного моделирования. Каждый источник будет вносить уникальный вклад в качество и объём данных:

- натурные эксперименты обеспечат реальные, объективные сведения об поведении шпиндельного узла в конкретных условиях эксплуатации. Однако они ограничены по объёму и диапазону варьирования параметров из-за высокой стоимости и длительности испытаний;
- аналитические модели позволят быстро синтезировать большой объём данных в широком диапазоне проектных параметров, опираясь на физические закономерности. При этом возможны упрощения и пренебрежение определёнными нелинейностями и сложными эффектами;
- численное моделирование (например, метод конечных элементов) обеспечит детализированную пространственную картину напряжённо-деформированного состояния ШУ, приближаясь к экспериментальным результатам валидированных моделей, что позволит исследовать многообразие вариантов решений. Это требует значительных вычислительных ресурсов и задания корректных граничных условий.

Необходимость создания интегрированной обучающей выборки обусловлена следующими ключевыми факторами:

- преодоление ограничений отдельных методов. Ни один источник данных не способен сам по себе обеспечить достаточный объём и разнообразие информации, необходимой для надёжного обучения нейронной сети;

- верификация и валидация. Сопоставление данных из разных источников служит двуфазной проверкой - верификацией моделей (проверки корректности расчётов) и их валидацией реально протекающим явлениям. Совместная оценка позволяет выявлять выбросы и повышать общую достоверность выборки;

- полнота и репрезентативность. Объединение эксперимента, аналитики и численного моделирования расширяет диапазоны пространства параметров и формирует репрезентативную обучающую выборку;

- трудоемкость. Формирование базовой части данных целесообразно осуществлять с помощью вычислительных методов, а затем калибровать и валидировать её на ограниченном объёме натурных тестов. Это обеспечивает баланс между точностью, охватом параметров и экономией времени и средств.

Подводя итог можно сказать, что интегрированная обучающая выборка, являясь альтернативой дорогостоящему этапу апробации, обеспечивает более надёжное и универсальное обучение нейросетей за счёт синергии точности экспериментов, масштабируемости аналитических подходов и глубины численного моделирования.

3.1.1. Методика экспериментального определения радиального зазора подшипников передней опоры ШУ

Как отмечалось в разделе 1.1.2.8. "Проектные параметры шпиндельных узлов" среди ПП следует выделить настроечные/регулируемые, важнейшим из которых применительно к ШУ следует считать величину предварительного зазора/натяга в опорах шпинделя. Существуют достаточно четкие рекомендации по необходимым величинам предварительного зазора/натяга в опорах качения [107]. Известны также и практические методы обеспечения этих величин в реальных конструкциях. Для этого применяют заранее подобранные по размерам и фиксируемые гайкой дистанционные кольца или используют подпружиненные подшипники [107, 112]. Основной недостаток этих методов состоит в том, что методы по непосредственному контролю перемещений колец подшипников, в результате чего создается предварительный зазор/натяг, далеко не всегда могут быть использованы в реальных конструкциях из-за невозможности доступа к кольцам подшипника. Поэтому чаще всего используются методы косвенного контроля,

когда регламентируется угол поворота регулировочной гайки или величина крутящего момента, приложенного к ней.

Поскольку для обучения НС по прогнозированию эксплуатационных характеристик ШУ требуется многократное изменение величины зазора/натяга в шпиндельных подшипниках, то необходима апробированная методика выполнения этих работ.

В качестве объекта, на котором апробировалась методика экспериментального определения величины радиального зазора при многократном изменении его значений с целью получения нейросетевых термо-упругих зависимостей ШУ, использовался станок 1А616 с двухрядным радиальным роликоподшипником 3182116 в передней опоре [32].

Измерение выставленной величины зазора осуществлялось следующим образом. Во внутренний конус шпинделя устанавливалась оправка длиной 300 мм. К концу оправки прикладывалось усилие от руки в двух противоположных направлениях в горизонтальной плоскости и по индикатору с ценой деления 1 мкм контролировалось перемещение переднего конца шпинделя в обоих направлениях (при этом перемещение в одном направлении не должно превышать 10 мкм). После чего определялась полусумма показаний, которая принималась за величину радиального зазора.

В качестве фиксированных значений радиального зазора, используемых для обучения нейросети, были определены величины: 0,25 мкм; 1,5 мкм; 3,0 мкм и 5,5 мкм.

Сам процесс выставления величины радиального зазора заключался в изменении положения регулировочной гайки 1, упирающейся в подшипник через дистанционное кольцо (рисунок 3.1) и гайки 2, ограничивающей перемещение внутреннего кольца подшипника.

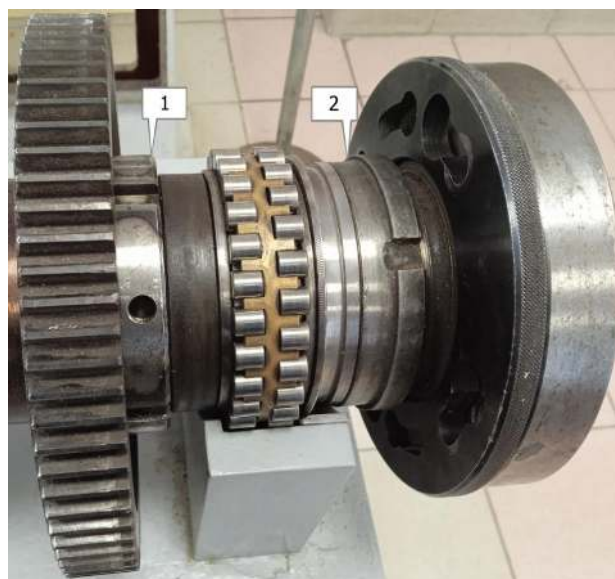


Рисунок 3.1. Макет шпинделя станка 1А616

Вращение регулировочной гайки 1 (при ослабленной гайке 2) по часовой стрелке вызывает натяжение внутреннего кольца подшипника на конусную поверхность шпинделя, заставляя увеличиваться диаметр дорожки качения внутреннего кольца и тем самым уменьшать радиальный зазор в подшипнике. Движение гайки 1 против часовой стрелки создает зазор между дистанционными кольцами и кольцом подшипника, а последующее вращение гайки 2 приводит к сползанию внутреннего кольца подшипника с конуса и тем самым к увеличению зазора в подшипнике.

После выставления желаемого зазора сначала затягивается гайка 2, ограничивающая перемещение, затем стопор на регулировочной гайке 1.

Для выставления выбранных радиальных зазоров (0,25 мкм; 1,5 мкм; 3,0 мкм и 5,5 мкм) были зафиксированы положения регулировочной гайки с помощью меток.

Всего в эксперименте были нанесены четыре метки на регулировочную гайку, которые были перенесены на наклеенную малярную ленту (рисунок 3.2, а). Затем лента располагалась на ровной плоской поверхности, и измерялись расстояния между метками (рисунок 3.2, б).

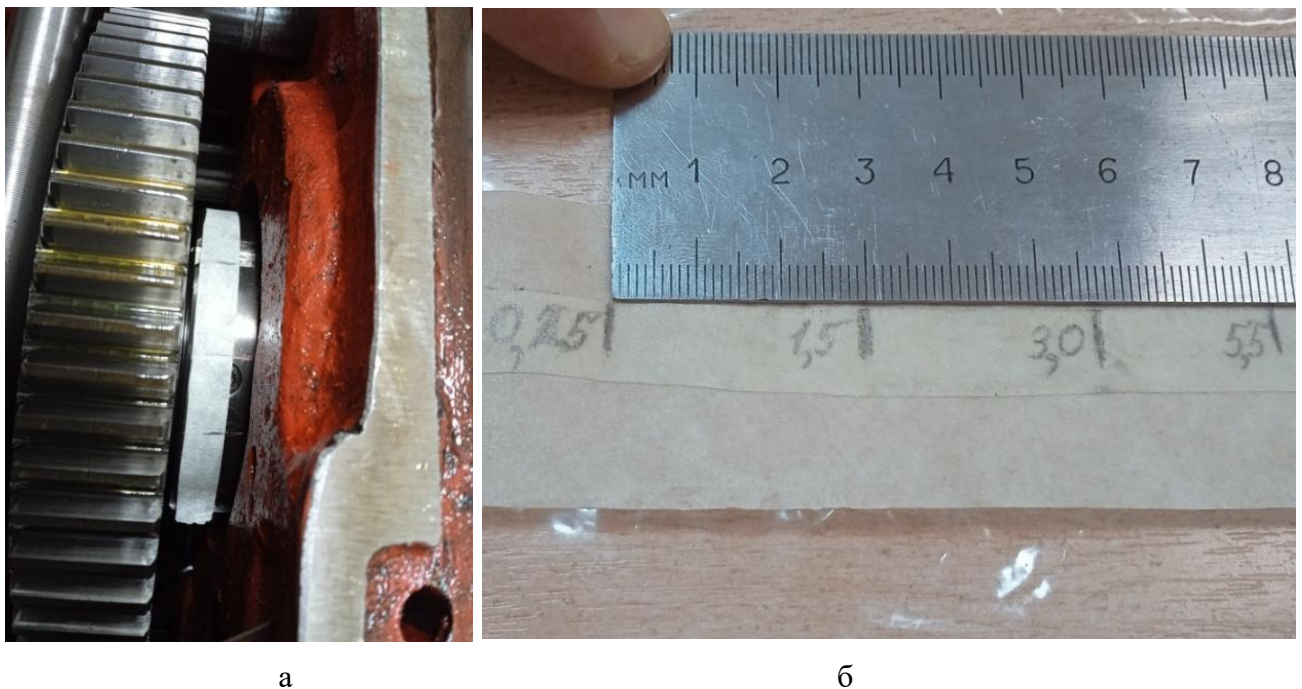


Рисунок 3.2. Работа с метками: а – съем меток; б - измерение

По известным значениям размеров гайки (наружный диаметр 110 мм, внутренний диаметр выполнен по резьбе М76) она была построена в КОМПАС 2D (рисунок 3.3).

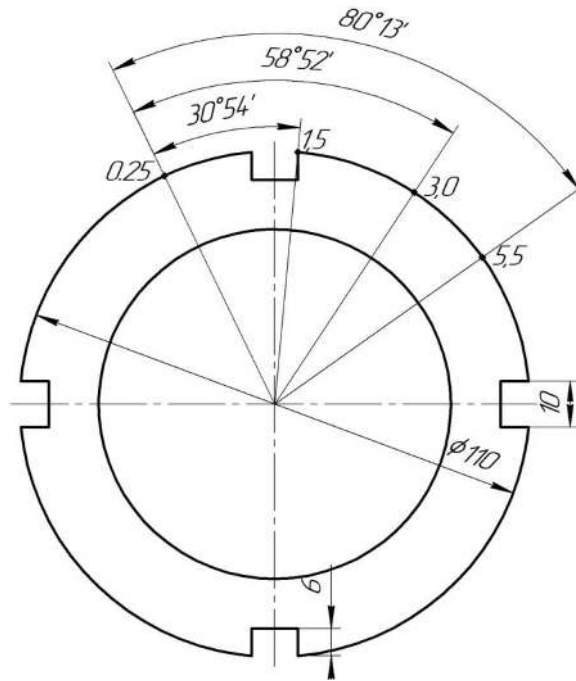


Рисунок 3.3. Измерение угловых величин между разными уровнями зазора

На наружной поверхности гайки по снятым меткам были отложены точки, соответствующие разным величинам зазоров в подшипнике. Измерение угловых величин и осевого перемещения гайки осуществлялось от точки, соответствующей радиальному зазору в 0,25 мкм, которая была выбрана в качестве отсчётной. С помощью инструментов Компас 2D были измерены угловые величины между точками, соответствующими 1,5 мкм; 3,0 мкм и 5,5 мкм, и рассчитаны осевые перемещения гайки по формуле:

$$S_o = \frac{\alpha \cdot P}{360^\circ}, \quad (3.1)$$

где α – угол поворота гайки, град; P – шаг резьбы (2 мм).

Отсюда осевые перемещения гайки для выбранных зазоров составили: $S_{1.5}=0,166$ мм; $S_{3.0}=0,322$ мм; $S_{5.5}=0,444$ мм.

Кроме вышеописанной экспериментальной установки на базе токарного станка 1A616 для сбора экспериментальных данных так же использовались установки других конструкций и типоразмеров на базе станков токарной группы: 1K62 (аналог СТ16К20), 16Б16КП, 400ХС «Вектор», 1И250В (аналог 250ИТВМ) и ЕМУ250 (производство Венгрии). Таким образом, эксперименты были проведены на 6-и станках.

3.2. Методология определения обучающих данных для НС на основе аналитических расчетов

3.2.1. Определение избыточной температуры переднего подшипника шпинделя

Образующееся в подшипниках тепло отводится шпинделем и корпусом узла за счет теплопроводности, конвекции и лучеиспускания с наружных поверхностей деталей.

Теплоотвод от подшипника качения может быть определен, если стенку, несущую подшипник, рассматривать как круглое ребро с внутренним диаметром, равным диаметру отверстия под наружное кольцо подшипника, и наружным диаметром – окружности, описанной из центра подшипника через наиболее удаленный угол стенки [134].

Избыточная температура θ колец и тел качения подшипника качения, °С, определяется выражением [134]:

$$\theta = \frac{0,86 \cdot Q}{K_1 + K_2}, \quad (3.2)$$

где Q - тепловыделение в подшипниках качения передней опоры, Вт (в случае использования в опоре нескольких подшипников тепловыделение в них суммируется); K_1 - коэффициент, учитывающий теплоотвод стенкой корпуса коробки, в которой размещен подшипник; K_2 - коэффициент, учитывающий теплоотвод в шпиндель, определяемый для условия, что консольная часть шпинделя, принимается конечной диаметром d_2 , а межопорная - бесконечной диаметром d_1 [134].

Мощность тепловыделения Q , Вт, в шпиндельных подшипниках качения станка рассчитывается из предположения, что вся работа трения превращается в теплоту [107, 108].

3.2.2. Определение упругого смещения переднего конца шпинделя

Оценка радиальной жесткости шпинделя проводится по величине прогиба его переднего конца δ как комплексного показателя [112], возникающего за счет упругой деформации при изгибе консольной и межопорной части собственно шпинделя и упругой деформации (податливости) его опор.

При определении упругих деформаций шпинделя он рассматривается как балка на двух опорах [124, 23, 158].

В эксперименте сила прикладывалась статически, при этом все станки кроме мод. 1К62 имели разгруженный от сил привода шпиндель. Привод шпинделя мод. 1К62 осуществляется с

помощью шестерни, расположенной между опорами, и при приложении статической нагрузки к его переднему концу в зубчатом зацеплении привода не будет возникать реакции, так как в зацеплении имеется боковой зазор, величина которого значительно больше, чем потенциально возможное смещение. Поэтому шпиндель мод.1К62 можно также рассматривать как разгруженный от сил привода.

В таком случае, на шпиндель от приводного элемента действует только крутящий момент T , и расчетная схема может составляться в одной плоскости с приложением общей силы резания P (рисунок 3.4).

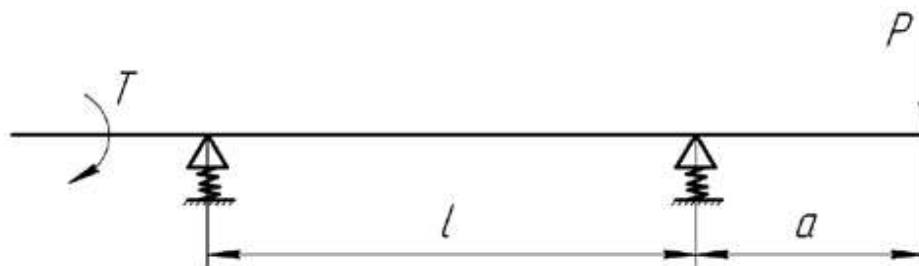


Рисунок 3.4. Расчетная схема шпиндельного узла с разгруженным шпинделем от действия сил приводного элемента

Для расчетной схемы (см. рисунок 3.4) формула для определения прогиба δ имеет вид [23]:

$$\delta = P \cdot \left(\frac{a^3}{3E \cdot J_1} + \frac{a^2 \cdot l \cdot (1 - \varepsilon)}{3E \cdot J_2} + \frac{j_A \cdot a^2 \cdot (1 - \varepsilon) + j_B \cdot (l + a \cdot (1 - \varepsilon))^2}{j_A \cdot j_B \cdot l^2} + \frac{a}{G \cdot S_1} + \frac{a^2 \cdot (1 - \varepsilon)}{G \cdot l \cdot S_2} \right) \quad (3.3)$$

где P – сила резания от составляющих сил резания P_y, 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; $E = 2,1 \cdot 10^6$ МПа;

G – модуль сдвига материала шпинделя, МПа; $G = 0,8 \cdot 10^4$ Н/мм².

Радиальная жесткость опор качения рассчитывается с учетом типа применяемых подшипников – с роликовыми и/или шариковыми телами качения.

Ввиду высокой жесткости подшипников с роликовыми телами качения в опорах применяют по одному такому подшипнику. В случае, если используются подшипники с шариковыми телами качения, то в опоре применяют до 4-х таких подшипников (п. 1.1.1)

Радиальная жесткость опоры качения с одним подшипником (Н/мкм,) определяется по формуле [98]:

$$j_{A(B)} = \frac{F_r}{\delta_r}, \quad (3.4)$$

где F_r - радиальная нагрузка на опору, Н; δ_r - упругая радиальная деформация подшипника под нагрузкой, мкм, определяемая согласно [144].

Радиальную податливость пары радиально-упорных шарикоподшипников, установленных с предварительным натягом, можно ориентировочно определить [98], найдя предварительно следующие коэффициенты и величины:

- коэффициент осевой податливости K_a в зависимости от отношения усилия осевого предварительного натяга (A_0 , Н) к статической грузоподъемности подшипника (C_0 , Н);
- коэффициент радиальной податливости K_r в зависимости от отношения F_r/C_0 и K_a .

Радиальную податливость опоры из нескольких радиально-упорных шарикоподшипников, установленных с предварительным натягом можно определить расчетом, предложенным З.М. Левиной [108].

3.2.3. Определение биения переднего конца шпинделя

Радиальное биение Δ шейки под патрон у двухопорных шпинделей металлорежущих станков определяется из уравнения [98]:

$$\Delta = 1,5 \cdot \left[\frac{\Delta_1}{\sqrt{m_1}} \pm \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{\Delta_1}{\sqrt{m_1}} + \frac{\Delta_2}{\sqrt{m_2}} \right) \right], \quad (3.5)$$

где Δ_1 и Δ_2 — радиальные биения передней и задней опор соответственно, мм; m_1 и m_2 — число подшипников, воспринимающих радиальную нагрузку в передней и задней опорах соответственно; $k = l/a$ — отношение расстояния между опорами l к расстоянию от передней опоры до плоскости измерения a , мм.

Радиальное биение Δ при таком расположении Δ_1 и Δ_2 , как показано на рисунке 3.5, а, является максимальным. Уменьшить Δ можно, установив внутреннее кольцо так, чтобы Δ_1 и Δ_2 были направлены в одну сторону (рисунок 3.5, б). Поэтому на торцах внутренних колец подшипников при их изготовлении в особых случаях отмечают места наибольшего биения.

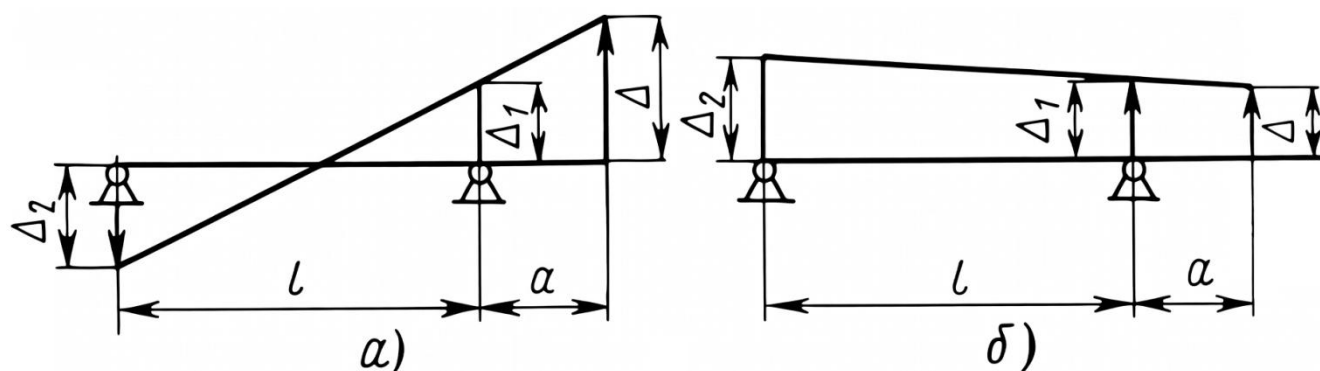


Рисунок 3.5. Расположение мест с наибольшим радиальным биением внутренних колец подшипников двухопорного шпинделя в одной плоскости и направленных:

а — в противоположные стороны; б — в одну сторону

3.2.4. Методика определения динамических характеристик ШУ

Если шпиндель рассматривается деформируемым, то в этом случае при определении собственных частот участвуют изгибные колебания, и формы колебаний шпинделя (1-я, 2-я, ... гармоники) зависят от распределения масс и жесткостей.

В практике анализа колебаний валов широкое применение нашел метод, основанный на использовании коэффициентов влияния и приведения распределенных и сосредоточенных масс [7, 97], позволяющий определить две собственные частоты. Однако адаптация указанного метода для проектирования ШУ имеет весьма ограниченное упоминание, например, в работах [158, 12], в которых отсутствует общая методика определения коэффициентов влияния и приведения масс.

Под коэффициентом влияния δ_{ij} понимается перемещение в точке i от единичной силы, приложенной в точке j . При этом в соответствии с теоремой Максвелла $\delta_{ij} = \delta_{ji}$.

Знание коэффициентов влияния позволяет привести любую сосредоточенную массу системы к какой-либо точке системы по следующему правилу: масса m_k умножается на квадрат отношения ее перемещения от единичной силы к перемещению точки приведения [7] то есть

$$m_{прив,i} = m_k \cdot \left(\frac{\delta_{ik}}{\delta_{ii}} \right)^2, \quad (3.6)$$

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: 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 (патрона, борштанги и т.д.)) - на конце консоли.

Поскольку отсутствуют четкие рекомендации по выбору точки приведения на консольной части, то необходимо рассмотреть оба случая для оценки влияния выбора точки приведения на консольной части на собственную частоту шпинделя.

Предварительно рассмотрим коэффициенты приведения для моделирования шпинделя на жестких опорах.

Рассмотрим расчетную модель собственных частот колебаний шпинделя [40] для следующего общего случая: шпиндель приводится к двухопорной балке с наружным диаметром D , выбираемым по минимальному значению диаметра ступени, и диаметром отверстия d с пролетом длиной l и одной консолью длиной a (передний конец шпинделя). Масса балки между опорами m_1 сосредоточена посередине пролета, а масса консольной части m_2 сосредоточена посередине консоли или на ее конце (рисунок 3.6). В качестве сосредоточенных масс могут выступать не только расположенные на шпинделе зубчатые колеса, внутренние кольца подшипников, приспособления для закрепления заготовки или инструмента, но и геометрические особенности в виде участков при изменении наружного диаметра шпинделя. В последнем случае сосредоточенной массой будет масса кольца с наружным диаметром D_i ($D_i > D$), виртуально смонтированного на балке диаметром D .

Рассмотрим случай, когда на шпинделе имеется несколько сосредоточенных масс [40], например, две сосредоточенные массы m_{011} и m_{012} на расстоянии соответственно l_{01} и l_{02} от опоры, разделяющий пролетную и консольную части и три сосредоточенных массы m_{021} , m_{022} и m_{03} на консоли, расположенных соответственно на расстоянии L_{01} , L_{02} и L_{03} от опоры (рисунок 3.6).

Распределение масс (начало отсчета координат x - левая опора (опора А):

1) Пролетная часть ($0 < x < l$):

- сосредоточенная масса m_1 (эквивалент распределенной массы балки) в середине пролета ($x_1 = l/2$);

- две дополнительные массы m_{011} и m_{012} с координатами $x_{01} = l - l_{01}$ и $x_{02} = l - l_{02}$ соответственно:

2) Консольная часть ($l < x < l + a$):

- сосредоточенная масса m_2 (эквивалент распределенной массы консоли) в середине консоли ($x_2 = l + a/2$) или на конце консоли ($x_2 = l + a$);

- три дополнительные массы m_{021} , m_{022} и m_{03} с координатами $x_{021} = l + L_{01}$; $x_{022} = l + L_{02}$ и $x_{023} = l + L_{03}$.

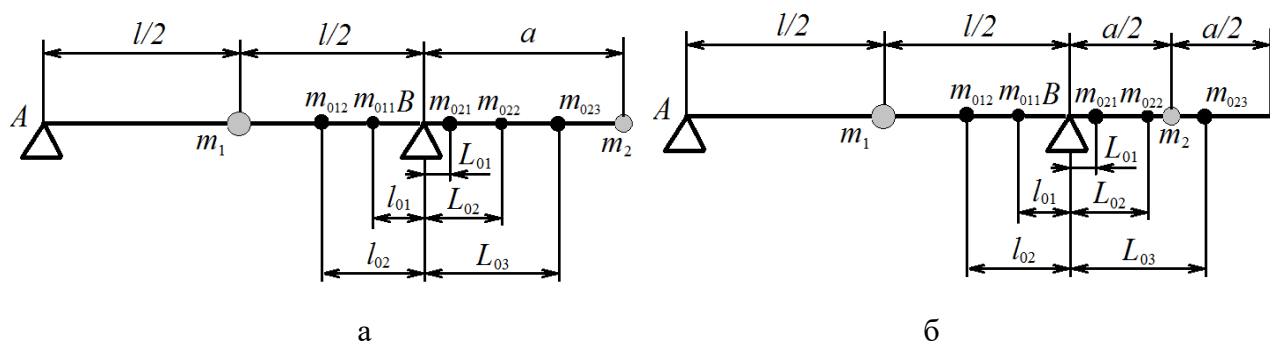


Рисунок 3.6. Расчетная схема для приведения распределенных и сосредоточенных масс: а - точка приведения на конце консоли; б - точка приведения в середине консольной части

Найдем коэффициенты влияния $\delta_{x,\xi}$ (прогиб в точке x от единичной силы в точке ξ) для сосредоточенных масс (m_1 и m_2) расчетной модели рисунок 3.6, а. В качестве точек приложения силы рассматриваются точки $\xi = 0,5l$; $\xi = l + a$, а точек наблюдения прогиба - точки $x = 0,5l$ и $x = l + a$ (начало отсчета координат x и ξ - левая опора (опора A)). В связи с этим возможны следующие случаи.

$$\text{Случай 1: } \xi = 0,5l; x = 0,5l: \delta_{x,\xi} = \delta_{11} = \frac{l^3}{48EI}.$$

$$\text{Случай 2: } \xi = 0,5l; x = l + a: \delta_{x,\xi} = \delta_{21} = \frac{al^2}{16EI}.$$

$$\text{Случай 3: } \xi = l + a; x = 0,5l: \delta_{x,\xi} = \delta_{12} = \frac{al^2}{16EI}.$$

$$\text{Случай 4: } \xi = l + a; x = l + a: \delta_{x,\xi} = \delta_{22} = \frac{a^2(l+a)}{3EI}.$$

Определим коэффициенты влияния для дополнительных сосредоточенных масс в межопорной части (m_{011} и m_{012}).

$$\text{Случай 1: } \xi = l - l_{0k}, \text{ где } k=1; 2; x = 0,5l: \delta_{1101k} = \frac{l_{0k}(3l^2 - 4l_{0k}^2)}{48EI}.$$

$$\text{Случай 2: } \xi = l - l_{0k}, \text{ где } k=1; 2; x = l + a: \delta_{2101k} = \frac{(l - l_{0k})(2l - l_{0k})l_{0k}a}{6EI}.$$

Определим коэффициенты влияния для дополнительных сосредоточенных масс на консольной части (m_{021} ; m_{022} и m_{023}).

$$\text{Случай 1: } \xi = l + L_{0k}, \text{ где } k=1; 2; 3; x = 0,5l: \delta_{1202k} = \frac{L_{0k}l^2}{16EI}.$$

$$\text{Случай 2: } \xi = l + L_{0k}, \text{ где } k=1; 2; 3; x = l + a:$$

$$\delta_{2202k} = \frac{L_{0k}}{3EI} \left[L_{0k}(l + L_{0k}) + \frac{(3L_{0k} + 2l)(a - L_{0k})}{2} \right].$$

Для расчетной модели рисунок 3.6, б при определении коэффициентов влияния для сосредоточенных масс m_1 и m_2 в качестве точек приложения силы рассматриваются точки $\xi = 0,5l$; $\xi = l + 0,5a$, а точек наблюдения прогиба - точки $x = 0,5l$ и $x = l + 0,5a$. Возможны следующие случаи.

$$\text{Случай 1: } \xi = 0,5l; x = 0,5l: \delta_{x,\xi} = \delta_{11} = \frac{l^3}{48EI}.$$

$$\text{Случай 2: } \xi = 0,5l; x = l + 0,5a: \delta_{x,\xi} = \delta_{21} = \frac{al^2}{32EI}.$$

$$\text{Случай 3: } \xi = l + 0,5a; x = 0,5l: \delta_{x,\xi} = \delta_{12} = \frac{al^2}{32EI}.$$

$$\text{Случай 4: } \xi = l + 0,5a; x = l + 0,5a: \delta_{x,\xi} = \delta_{22} = \frac{a^2(2l + a)}{24EI}.$$

Рассмотрим коэффициенты влияния для дополнительных сосредоточенных масс в межопорной части (m_{011} и m_{012}).

$$\text{Случай 1: } \xi = l - l_{0k}, \text{ где } k=1; 2; x = 0,5l: \delta_{1101k} = \frac{l_{0k}(3l^2 - 4l_{0k}^2)}{48EI}.$$

$$\text{Случай 2: } \xi = l - l_{0k}, \text{ где } k=1; 2; x = l + 0,5a:$$

$$\delta_{2101k} = \frac{(l - l_{0k})(2l - l_{0k})l_{0k}a}{12EI}.$$

Рассмотрим коэффициенты влияния для дополнительных сосредоточенных масс на консольной части (m_{021} ; m_{022} и m_{023}).

$$\text{Случай 1: } \xi = l + L_{0k}, \text{ где } k=1; 2; 3; x = 0,5l: \delta_{1202k} = \frac{L_{0k}l^2}{16EI}.$$

$$\text{Случай 2: } \xi = l + L_{0k}, \text{ где } k=1; 2; 3; x = l + 0,5a:$$

$$\delta_{2202k} = \frac{L_{0k}}{3EI} \left[L_{0k}(l + L_{0k}) + \frac{(3L_{0k} + 2l)(0,5a - L_{0k})}{2} \right]$$

Для каждой формы колебаний вычисляется приведенная масса.

Первая форма колебаний (изгиб пролета):

- точка приведения - середина пролета ($x = l/2$).

- приведенная масса:

$$m_{прив,1} = m_1 + \sum_{k=1}^2 m_{01k} \left(\frac{\delta_{1101k}}{\delta_{11}} \right)^2 + m_2 \left(\frac{\delta_{12}}{\delta_{11}} \right)^2 + \sum_{k=1}^3 m_{02k} \left(\frac{\delta_{1202k}}{\delta_{11}} \right)^2.$$

- собственная частота: $f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_{прив,1} \delta_{11}}}$.

Вторая форма колебаний (изгиб консоли):

- точка приведения - середина ($x = l + 0,5a$) или конец консоли ($x = l + a$).

- приведенная масса:

$$m_{прив,2} = m_2 + \sum_{k=1}^2 m_{01k} \left(\frac{\delta_{2101k}}{\delta_{22}} \right)^2 + m_1 \left(\frac{\delta_{21}}{\delta_{22}} \right)^2 + \sum_{k=1}^3 m_{02k} \left(\frac{\delta_{2202k}}{\delta_{22}} \right)^2.$$

- собственная частота: $f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_{прив,2} \delta_{22}}}$.

При учете упругости опор (жесткость левой (задней) опоры - j_A , Н/м, и жесткость правой (передней) опоры - j_B , Н/м) необходимо ввести поправку на податливость опор в расчет коэффициентов влияния.

Поправка может быть найдена из условия, что коэффициент влияния определяется как сумма двух слагаемых, вычисляемых для деформируемого вала на жестких опорах $\delta_{x,\xi}$, и для жесткого вала, установленного на упругих опорах $\delta_{опор,x,\xi}$: $\delta_{x,\xi}^{ynp} = \delta_{x,\xi} + \delta_{опор,x,\xi}$.

Коэффициенты влияния для распределенных масс, приведенных к сосредоточенным (в середине пролета и на конце консоли):

$$\delta_{опор,11} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{j_A} + \frac{1}{j_B} \right); \quad \delta_{11}^{ynp} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{j_A} + \frac{1}{j_B} + \frac{l^3}{12EI} \right);$$

$$\delta_{опор,12} = \delta_{опор,21} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{j_B} - \frac{a}{l} \left(\frac{1}{j_A} - \frac{1}{j_B} \right) \right]; \quad \delta_{12}^{ynp} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{l} \left(\frac{a}{j_A} + \frac{l+a}{j_B} \right) + \frac{al^2}{8EI} \right];$$

$$\delta_{21}^{ynp} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{l} \left(\frac{l+a}{j_B} - \frac{a}{j_A} \right) - \frac{al^2}{8EI} \right];$$

$$\delta_{опор,22} = \frac{1}{l} \left[\frac{a^2}{j_A l} + \frac{a(l+a)}{j_B l} + \frac{l+a}{j_B} \right]; \quad \delta_{22}^{ynp} = \frac{a^2}{j_A l^2} + \frac{a(l+a)}{j_B l^2} + \frac{l+a}{j_B l} + \frac{a^2(l+a)}{3EI}.$$

Коэффициенты влияния $\delta'_{опор,x,\xi}$ для дополнительных масс в межопорной части (m_{011} и m_{012}) (точки приведения в середине пролета и на конце консоли):

$$\delta'_{опор,11} = \frac{\delta_B l + (l_k - a)(\delta_A - \delta_B)}{l - a(\delta_A - \delta_B)}; \quad \delta'_{опор,21} = \delta_B \left[1 - \frac{a(\delta_A - \delta_B)}{\delta_B l - a(\delta_A - \delta_B)} \right], \text{ где } \delta_A = \frac{1}{2j_A};$$

$$\delta_B = \frac{1}{2j_B};$$

$k = 01$ - для массы m_{011} ; $k = 02$ - для массы m_{012} .

Коэффициенты влияния $\delta_{опор,x,\xi}$ для дополнительных масс на консольной части (m_{021} ; m_{022} и m_{023}) (точки приведения в середине пролета и на конце консоли):

$$\delta''_{опор,12} = \frac{\delta_B - \delta_A}{2}; \delta''_{опор,22} = \delta_B + \frac{a(\delta_A + \delta_B)}{l}, \text{ где } \delta_A = \frac{a}{j_A l}; \delta_B = \frac{l+a}{j_B l}.$$

Коэффициенты влияния для распределенных масс, приведенных к сосредоточенным (в середине пролета и в середине консоли):

$$\begin{aligned} \delta_{опор,11} &= \frac{1}{4} \left(\frac{1}{j_A} + \frac{1}{j_B} \right); \delta_{11}^{ynp} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{j_A} + \frac{1}{j_B} + \frac{l^3}{12EI} \right); \\ \delta_{опор,12} &= \delta_{опор,21} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{j_B} - \frac{0,5a}{l} \left(\frac{1}{j_A} - \frac{1}{j_B} \right) \right]; \delta_{12}^{ynp} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{l} \left(\frac{0,5a}{j_A} + \frac{l+0,5a}{j_B} \right) + \frac{0,5al^2}{8EI} \right]; \\ \delta_{21}^{ynp} &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{l} \left(\frac{l+0,5a}{j_B} - \frac{0,5a}{j_A} \right) - \frac{0,5al^2}{8EI} \right]; \delta_{опор,22} = \frac{1}{l} \left[\frac{0,25a^2}{j_A l} + \frac{0,5a(l+0,5a)}{j_B l} + \frac{l+0,5a}{j_B} \right]; \\ \delta_{22}^{ynp} &= \frac{0,25a^2}{j_A l^2} + \frac{0,5a(l+0,5a)}{j_B l^2} + \frac{l+0,5a}{j_B l} + \frac{0,25a^2(l+0,5a)}{3EI}. \end{aligned}$$

Коэффициенты влияния $\delta_{опор,x,\xi}$ для дополнительных масс в межопорной части (m_{011} и m_{012}) (точки приведения в середине пролета и в середине консоли):

$$\delta'_{опор,11} = \frac{\delta_B l + (l_k - 0,5a)(\delta_A - \delta_B)}{l - 0,5a(\delta_A - \delta_B)}; \delta'_{опор,21} = \delta_B \left[1 - \frac{0,5a(\delta_A - \delta_B)}{\delta_B l - 0,5a(\delta_A - \delta_B)} \right], \text{ где } \delta_A = \frac{1}{2j_A};$$

$$\delta_B = \frac{1}{2j_B};$$

$k = 01$ - для массы m_{011} ; $k = 02$ - для массы m_{012} .

Коэффициенты влияния $\delta_{опор,x,\xi}$ для дополнительных масс на консольной части (m_{021} ; m_{022} и m_{023}) (точки приведения в середине пролета и в середине консоли): $\delta'_{опор,12} = \frac{\delta_B - \delta_A}{2};$

$$\delta''_{опор,22} = \delta_B + \frac{0,5a(\delta_A + \delta_B)}{l}, \text{ где } \delta_A = \frac{0,5a}{j_A l}; \delta_B = \frac{l+0,5a}{j_B l}.$$

Формулы расчета приведенных масс сохраняют вид, но с учетом модифицированных коэффициентов влияния: $m_{прив,i}^{ynp} = m_k \cdot \left(\frac{\delta_{ik}^{ynp}}{\delta_{ii}^{ynp}} \right)^2.$

Частоты рассчитываются по стандартной формуле, но с новыми коэффициентами:

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_{прив,i}^{ynp} \delta_{ii}^{ynp}}}. \quad (3.7)$$

3.3. Применение численного моделирования при формировании набора обучающих данных

3.3.1. Обоснование выбора направления действия нагружающей силы

Для обеспечения точности обработки необходимо учитывать упругие деформации корпуса ШУ, возникающие под действием сил резания. При моделировании МКЭ (ANSYS) достоверность результатов существенно зависит от правильного задания вектора нагрузки. Направление составляющих P_z и P_y определяется множеством факторов и может значительно изменяться в зависимости от условий обработки. В связи с этим необходим подробный анализ и обоснованный выбор угла направления нагружающей силы, который впоследствии будет использован при конечно-элементном расчете деформаций ШУ.

Направление нагружающей силы выбирается на основе анализа величин углов действия силы резания в координатах станка для наиболее типичных условий обработки.

Для этого на основании зависимостей и таблиц, приведенных в работе [114] были определены составляющие P_z и P_y (рисунок 3.7):

$$P_z = C_4 \cdot K_{15z} \cdot K_{16z} \cdot K_{17z} \cdot K_{18z} \cdot K_{19z} \cdot t^{x_1} \cdot S^{y_1} \cdot HB^{n_1};$$

$$P_y = C_5 \cdot K_{15y} \cdot K_{16y} \cdot K_{17y} \cdot K_{18y} \cdot K_{19y} \cdot t^{x_2} \cdot S^{y_2} \cdot HB^{n_2},$$

где C_4 и C_5 - коэффициенты, зависящие от типа резцов (проходные, прорезные и отрезные), обрабатываемого материала и диапазона твердости заготовки ($HB \leq 170$ кГ/мм² или $HB > 170$ кГ/мм²); t - глубина резания, мм; S - подача, мм/об; HB - твердость по Бринеллю обрабатываемой заготовки, кГ/мм²; $x_1, x_2, y_1, y_2, n_1, n_2$ - показатели степени; $K_{15}, K_{16}, K_{17}, K_{18}, K_{19}$ - поправочные коэффициенты, учитывающие изменение условий резания:

K_{15} - учитывает свойства обрабатываемого материала;

K_{16} - учитывает влияние главного угла в плане ϕ ;

K_{17} - учитывает влияние радиуса при вершине резца;

K_{18} - учитывает влияние переднего угла γ ;

K_{19} - учитывает влияние допустимого износа резцов.

Поскольку лимитирующей эксплуатационной характеристикой ШУ является деформация шпинделя в радиальном направлении, то составляющая P_x не рассматривалась.

Показатели степени n_1, n_2 для всех типов резцов при обработке стали и стального литья: $n_1 = 0,35$ при твердости $HB \leq 170$, $n_1 = 0,75$ при $HB > 170$; $n_2 = 2,0$. При обработке чугуна - $n_1 = 0,55$; $n_2 = 1,3$.

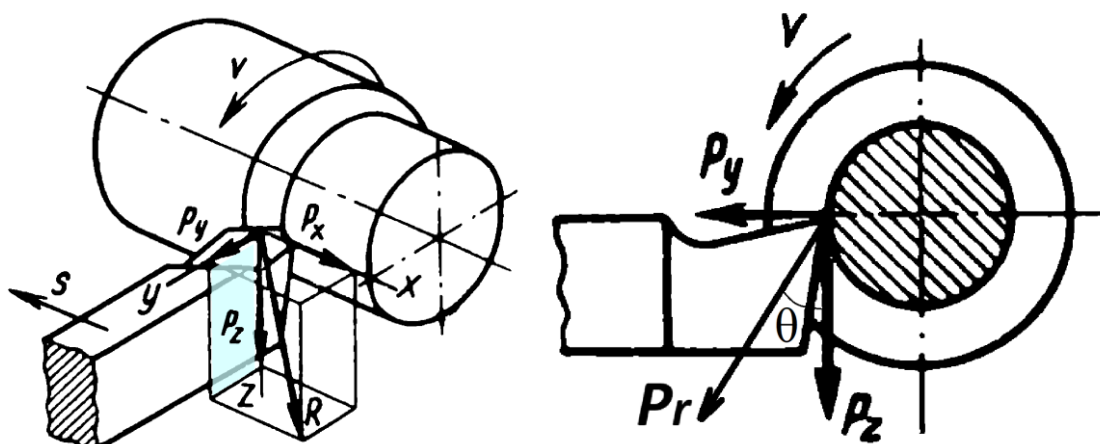


Рисунок 3.7. Схема расположения составляющих сил резания

Направление вектора, составляющими которого являются силы P_z и P_y , может быть оценено углом θ , определяющим это направление от плоскости резания при свободном резании:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{P_y}{P_z} = \frac{C_5}{C_4} \cdot \frac{K_{15y}}{K_{15z}} \cdot \frac{K_{16y}}{K_{16z}} \cdot \frac{K_{17y}}{K_{17z}} \cdot \frac{K_{18y}}{K_{18z}} \cdot \frac{K_{19y}}{K_{19z}} \cdot t^{x_2 - x_1} \cdot S^{y_2 - y_1} \cdot HB^{n_2 - n_1}. \quad (3.8)$$

Если рассматривать только работу проходными резцами, при работе которыми должна обеспечиваться диаметральная точность обработки, то при обработке стали, алюминиевых и магниевых сплавов $C_5/C_4 = (0,968 \dots 7,563) \cdot 10^{-4}$, а при обработке чугуна и медных сплавов $C_5/C_4 = (87,55 \dots 200) \cdot 10^{-4}$. Указанные значения получены при работе резцами с углами α, γ, λ и φ_1 по ГОСТ 2320, $\varphi = 45^\circ$, радиусе при вершине 2 мм, при допустимом износе $\delta = 2$ мм для быстрорежущей стали и $\delta = 0$ мм для твердосплавных резцов.

На основании данных, приведенных в таблицах 3.1 и 3.2, имеем

- для стали, алюминиевых и магниевых сплавов

$$\operatorname{tg} \theta_1 = 0,968 \cdot 10^{-4} \cdot (0,174 \dots 1,918) \cdot t^{-0,1} \cdot HB^{1,65} \quad (\text{для } HB \leq 170);$$

$$\operatorname{tg} \theta_2 = 7,563 \cdot 10^{-4} \cdot (0,174 \dots 1,918) \cdot t^{-0,1} \cdot HB^{1,25} \quad (\text{для } HB > 170);$$

- чугуна и медных сплавов

$$\operatorname{tg} \theta_1 = 200 \cdot 10^{-4} \cdot (0,208 \dots 1,486) \cdot t^{-0,1} \cdot HB^{1,65} \quad (\text{для } HB \leq 170);$$

$$\operatorname{tg} \theta_2 = 87,55 \cdot 10^{-4} \cdot (0,208 \dots 1,486) \cdot t^{-0,1} \cdot HB^{1,25} \quad (\text{для } HB > 170).$$

Таблица 3.1 - Значения показателей степени $x_1, x_2, y_1, y_2, n_1, n_2$ в зависимости от обрабатываемого материала

Обрабатываемый материал							
сталь, алюминиевые и магниевые сплавы				чугун и медные сплавы			
x_1	y_1	x_2	y_2	x_1	y_1	x_2	y_2
1,00	0,75	0,90	0,75	1,00	0,75	0,90	0,75

Таблица 3.2 - Значения поправочных коэффициентов, учитывающих изменение условий резания

Коэффициенты	Обрабатываемый материал	
	сталь, алюминиевые и магниевые сплавы	чугун и медные сплавы
K_{15y}/K_{15z}	1,0	1,0
K_{16y}/K_{16z}	0,41...1,51	0,76...1,17
K_{17y}/K_{17z}	0,758...1,0	0,835...1,0
K_{18y}/K_{18z}	0,80...1,27	0,80...1,27
K_{19y}/K_{19z}	0,70...1,0	0,41...1,0
$\prod_{i=15}^{19} \frac{K_{iy}}{K_{iz}}$	0,174...1,918	0,208...1,486

Учитывая, что для сталей, в том числе легированных $HB = 130...270$, а для серого чугуна $HB = 143...285$, а также то, что деформация корпуса ШУ важна при выполнении чистовых операций при которых $0,1 < t < 0,5$ получим

- для стали

$$tg\theta_{1c} = 0,968 \cdot 10^{-4} \cdot 0,174 \cdot 0,5^{-0,1} \cdot 130^{1,65} = 0,056;$$

$$tg\theta_{2c} = 7,563 \cdot 10^{-4} \cdot 0,174 \cdot 0,5^{-0,1} \cdot 171^{1,65} = 0,087;$$

$$tg\theta_{3c} = 0,968 \cdot 10^{-4} \cdot 1,918 \cdot 0,1^{-0,1} \cdot 170^{1,65} = 1,119;$$

$$tg\theta_{4c} = 7,563 \cdot 10^{-4} \cdot 1,918 \cdot 0,1^{-0,1} \cdot 270^{1,65} = 1,999;$$

- для серого чугуна

$$tg\theta_{1ч} = 200 \cdot 10^{-4} \cdot 0,208 \cdot 0,5^{-0,1} \cdot 143^{1,65} = 16,051;$$

$$\operatorname{tg}\theta_{2c} = 87,55 \cdot 10^{-4} \cdot 0,208 \cdot 0,5^{-0,1} \cdot 171^{1,25} = 1,207;$$

$$\operatorname{tg}\theta_{3c} = 200 \cdot 10^{-4} \cdot 1,486 \cdot 0,1^{-0,1} \cdot 170^{1,65} = 179,18;$$

$$\operatorname{tg}\theta_{4c} = 87,55 \cdot 10^{-4} \cdot 1,486 \cdot 0,1^{-0,1} \cdot 285^{1,25} = 19,179.$$

Полученным значениям соответствуют углы θ , приведенные в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Значения углов θ в зависимости от обрабатываемого материала

Обрабатываемый материал							
сталь				серый чугун			
θ_{1c}	θ_{2c}	θ_{3c}	θ_{4c}	$\theta_{1ч}$	$\theta_{2ч}$	$\theta_{3ч}$	$\theta_{4ч}$
3,2°	5,0°	48,2°	63,4°	86,5°	50,4°	89,7°	87,0°

Результаты, приведенные в таблице 3.3, говорят о значительном разбросе возможных направлений вектора, составляющими которого являются силы P_z и P_y в зависимости от условий обработки.

Однако при выборе угла θ для составления расчетной модели необходимо иметь в виду следующее.

Результаты численного моделирования предполагается использовать для дополнительного обучения нейронной сети, построенной на основании экспериментальных данных. Поскольку экспериментальные данные по деформации ШУ были получены с использованием нагружающего устройства, в котором по рекомендациям ЭНИМС, угол $\theta = 30^\circ$, указанное значение было принято за центр группирования с разбросом возможных значений $\pm 25^\circ$, что практически соответствует возможному изменению угла θ при обработке стали (таблица 3.3).

3.3.2. Численное моделирование деформации корпуса ШУ под действием нагружающей силы

Обеспечение стабильности положения шпинделя, влияющего на формирование диаметральных размеров при обработке, требует оценки деформаций корпуса под нагрузками, действующими в плоскости стенок, в которых располагаются опоры шпинделя. Наличие множества расточек под подшипники, валы и механизмы управления делает аналитический расчет жесткости корпуса крайне сложным или требующим значительных упрощений, снижающих достоверность результатов.

В связи с этим перспективным направлением стало применение численного моделирова-

ния методом конечных элементов (МКЭ) для анализа деформаций под нагрузкой. Результаты исследований [132, 65, 58, 102, 3, 103] подтверждают эффективность этого подхода. МКЭ особенно успешно применяется для моделирования упругих деформаций крупногабаритных деталей сложной формы, включая корпусные элементы станков [137, 153].

Численное моделирование проводилось с использованием пакета Ansys Workbench.

В качестве базового варианта для оценки деформации корпуса ШУ при приложении силы, имитирующей силу резания, был выбран шпиндельный узел станка среднего типоразмера мод. 16Б16П с максимальным диаметром обработки 320 мм. Конструкция ШУ предусматривает двухопорный шпиндель, передняя опора которого располагается в правой стенке, а задняя - во внутренней перегородке (рисунок 3.8). Корпус имеет сплошное дно толщиной 20 мм. В базовом варианте диаметр основной расточки (под шпиндель) составляет 130 мм, а вспомогательных расточек (под валы приводных зубчатых колес и механизмы управления) - 70 мм.

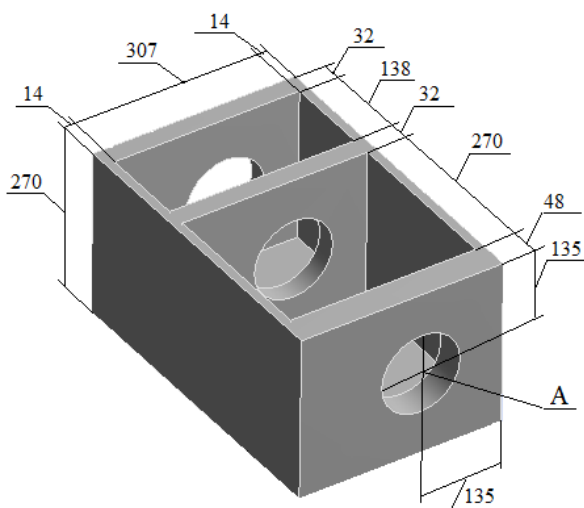


Рисунок 3.8. Модель корпуса 16Б16П

Деформация корпуса определялась при максимальной силе, используемой для станков такого типоразмера при испытаниях на статическую жесткость. Указанная сила равнялась 4000 Н и учитывала только радиальную и тангенциальную составляющие (без учета осевой, т.к. в натурных экспериментах оценивалась только радиальная деформация шпинделя, как наиболее существенно влияющая на точность обработки). Соотношение радиальной и тангенциальной составляющих было таким, что их результирующий вектор был направлен под углом 60° к горизонтальной плоскости. Плоскость, перпендикулярная оси шпинделя, в которой действовали указанные силы, располагалась на расстоянии 94 мм от наружной поверхности правой стенки корпуса (как в натурном эксперименте). Действие указанной силы пересчитывалось в действия сил в расточках правой стенки и во внутренней перегородке, которые для базового варианта корпуса составили соответственно +5522,6 Н и -1522,6 Н. Знак (+) свидетельствует о том, что

направление силы в расточке корпуса совпадает с направлением действия силы 4000 Н, а знак (-) - что это направление противоположно (рисунок 3.9).

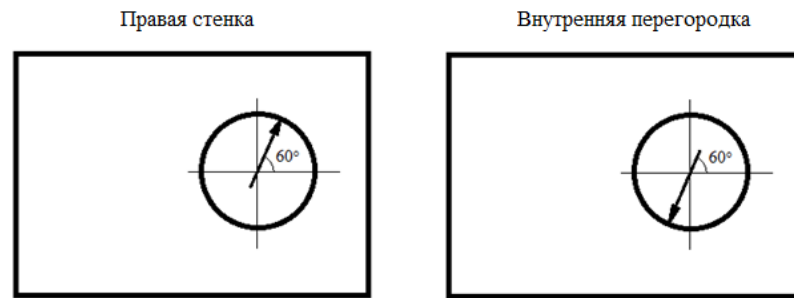


Рисунок 3.9. Схема действия сил

Критерием оценки деформаций корпуса являлось суммарное перемещение точки А, соответствующей центру окружности расточки в правой стенке корпуса в плоскости наружной поверхности (рисунок 3.8).

В качестве материала корпуса выбран серый чугун.

Основание корпуса (опорная поверхность) была ограничена от всех перемещений опцией Fixed Support.

Для создания сетки использовалась автоматическая генерация с параметрами по умолчанию.

В цилиндрических расточках корпуса с помощью опции Mapped Face Meshing (Генерация сетки по разметке) была генерирована регулярная сетка, которая за счет большей однородности обеспечивает большую точность решения.

Точка А задавалась путем использования опции Remote Point (рисунок 3.10).

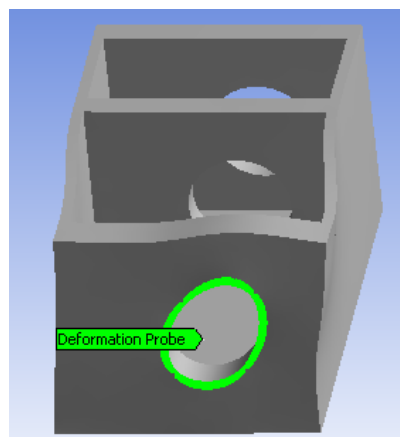


Рисунок 3.10. Определение положения мнимой оси шпинделя при помощи Remote Point

Действие внешней силы в цилиндрических расточках корпуса обеспечивалось опцией Bearing Load. В этом случае действующая сила задается вектором или компонентами вектора в

любой системе координат. Радиальная компонента распределена по указанной поверхности неравномерно и максимальна в зоне направления вектора (рисунок 3.11). Осовая компонента распределена по цилиндру расточки равномерно.

Картина деформаций корпуса (рисунок 3.12) показала, что при приложении вышеуказанной нагрузки деформации подвергаются правая стенка с расточкой и части передней и задней стенок, прилегающие к передней. Деформации внутренней перегородки незначительны. Приведенная картина деформаций позволила наметить конструктивные и геометрические параметры корпуса, могущие оказывать влияние на его упругие деформации:

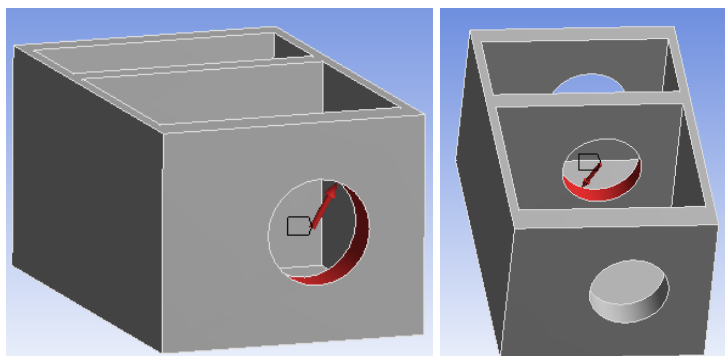


Рисунок 3.11. Распределение нагрузки по расточкам под опоры шпинделя

1. Размеры, число и расположение расточек в правой стенке и во внутренней перегородке;
2. Высота центров;
3. Толщина правой, передней и задней стенок;
4. Величина сил, действующих в расточках, которые при постоянстве внешней действующей силы будут изменяться в зависимости от межопорного расстояния шпинделя (расстояние между правой стенкой и внутренней перегородкой).

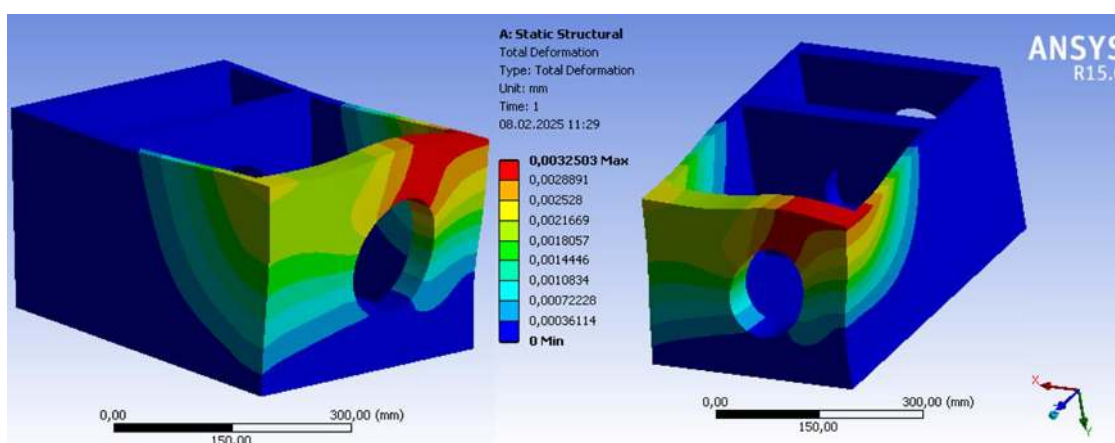


Рисунок 3.12. Эпюры перемещений корпуса

Проведенное численное моделирование при изменении указанных параметров дало следующие результаты.

Влияние числа и расположения вспомогательных расточек в правой стенке и во внутренней перегородке показано на рисунке 3.13.

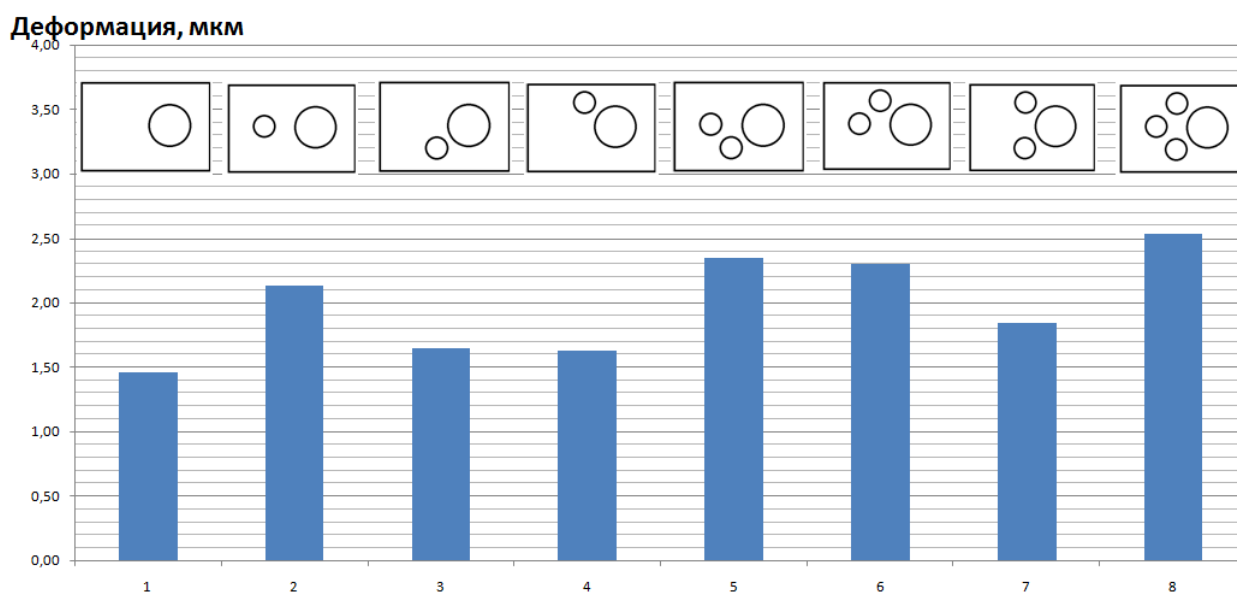


Рисунок 3.13. Упругие смещения центра основной расточки в правой стенке корпуса (точка А) в зависимости от варианта корпуса

Анализ снижения жесткости корпуса от количества и расположения вспомогательных расточек (таблица 3.4) показывает, что существенно снижает жесткость корпуса (до 50 %) вспомогательная расточка, расположенная на высоте центров. Расточки расположенные ниже или выше высоты центров снижают жесткость на (12...13)%.

Таблица 3.4 - Снижение жесткости корпуса от количества и расположения вспомогательных расточек

Вариант корпуса	1	2	3	4	5	6	7	8
Деформация в точке А, %	100	146	113	112	161	158	126	173

Деформация корпуса в точке А (рисунок 3.14) нелинейно зависит от диаметра основной расточки. Для варианта корпуса №1 (без вспомогательных расточек) уменьшение диаметра до 110 мм (по сравнению с базовым вариантом, имеющим 130 мм) дает снижение деформации ~ на 10 %, а увеличение до 150 мм - рост на 18,5 %.

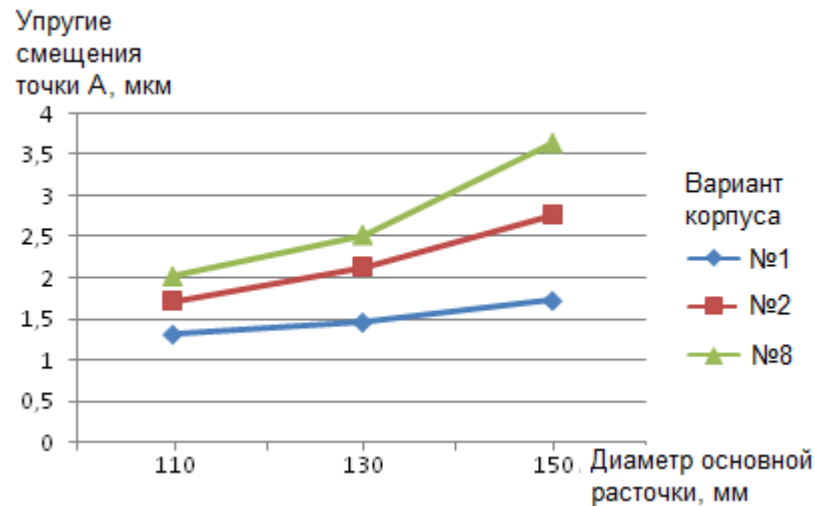


Рисунок 3.14. Зависимость упругих смещений точки А от диаметра основной расточки корпуса

Кривые, приведенные на графике (рисунок 3.15), свидетельствуют о том, что деформация корпуса в точке А нелинейно зависит от диаметра вспомогательной расточки, расположенной на одном уровне с основной. Для варианта корпуса №2 (с одной вспомогательной расточкой, расположенной на одном уровне с основной) уменьшение диаметра до 50 мм (по сравнению с базовым вариантом, имеющим 70 мм) дает снижение деформации ~ на 19 %, а увеличение до 90 мм - рост на 30 %.

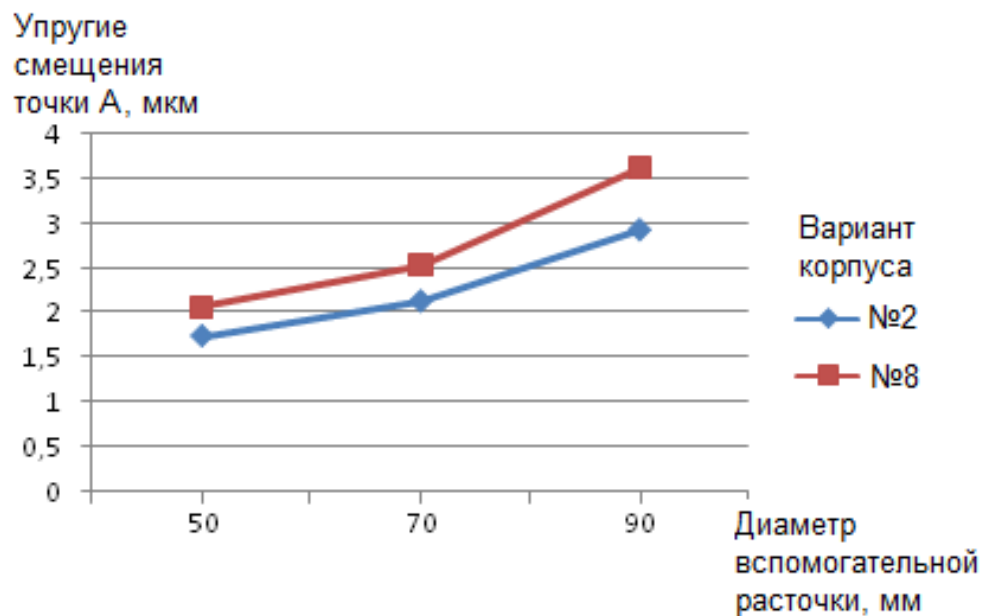


Рисунок 3.15. Зависимость деформации в точке А от диаметра вспомогательной расточки корпуса

Деформация в точке А практически линейно зависит от высоты центров станка (рисунок 3.16), за исключением вариантов № 4, 6 и 8, где наблюдается некоторое снижение интенсивности увеличения деформации по мере роста высоты центров станка. Для варианта №1 увеличение высоты центров на 20 мм приводит к росту деформации на (10...11)%.

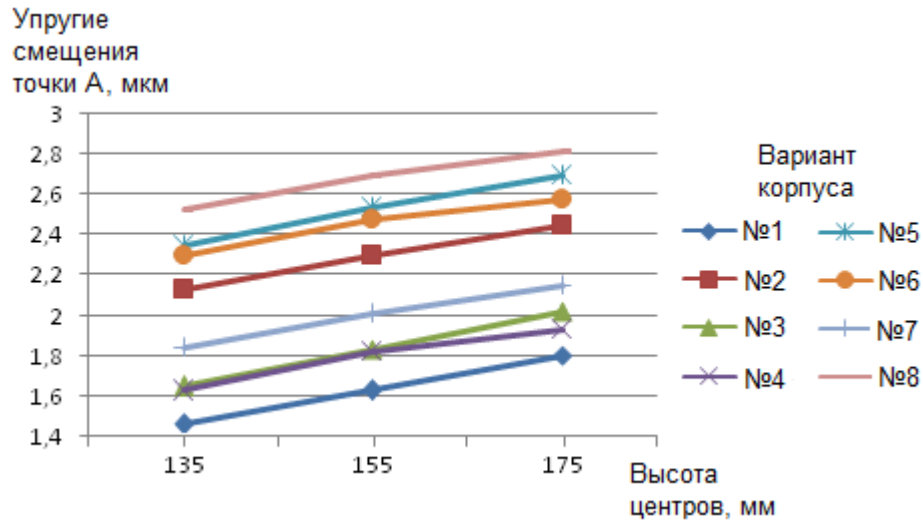


Рисунок 3.16. Зависимость деформации в точке А от высоты центров станка

Увеличение толщины правой стенки, где размещается передняя опора шпинделя, дает значительное повышение жесткости корпуса ШУ (рисунок 3.17): примерно на 14...17 % для всех вариантов корпуса.

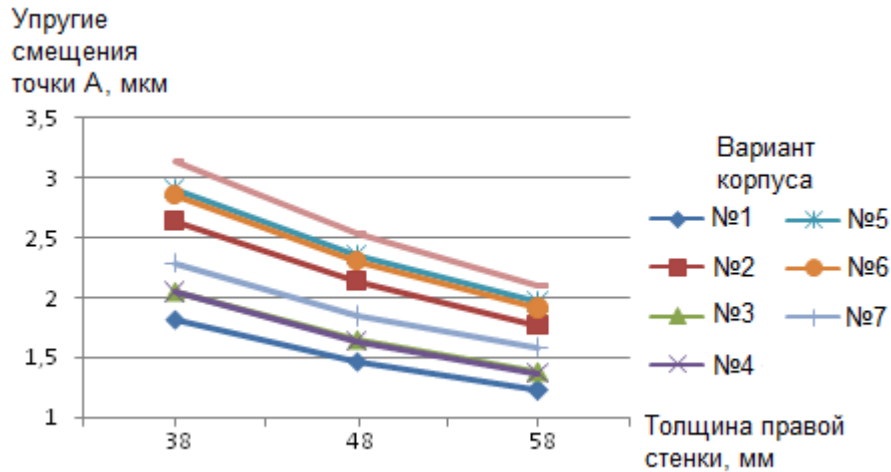


Рисунок 3.17. Зависимость деформации в точке А от толщины правой стенки

Увеличение толщины как передней, так и задней стенки до 20 мм по сравнению с базовым вариантом, где толщина стенки составляла 14 мм, практически не влияет на снижение деформации в точке А и составляет в зависимости от варианта корпуса 1...1,5 %.

Как было показано в разделе 3.3.1 угол θ , определяющий направление действия результирующей составляющих силы резания P_z и P_y , может в зависимости от условий обработки варьироваться в диапазоне $(5...55)^\circ$. Как показало численное моделирование угол θ является значимым фактором влияния на упругие деформации корпуса (таблица 3.5): 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 раз, а для варианта №2 - в 1,6 раза. Указанное обстоятельство объясняет значительный разброс точности обработки вследствие невозможности обеспечения постоянства условий процесса резания.

Таблица 3.5 - Смещение оси расточки под передний подшипник, мкм, при изменении угла действия результирующей составляющих силы резания P_z и P_y

Вариант корпуса	Угол θ , град		
	5	30	55
№1	1,12	1,46	2,09
№2	1,94	2,53	3,19

3.4. Получение интегрированного обучающего массива данных

3.4.1. Результаты экспериментальных исследований

В экспериментальных данных отражено влияние на ЭХ ПП (факторов) в зависимости от: режимов эксплуатации; настройки; конструктивного исполнения. Значения параметров конструктивного исполнения (вылет, межопорное расстояние, высота ширина и толщина передней стенки коробки и др.) получены путём их измерения мерительным инструментом.

Анализ экспериментальных данных проводится сразу для всех 3-х разновидностей факторов влияющих на ПП ШУ. При этом, ввиду большого получающегося количества обусловленных ими переменных (30 переменных), легенда и размах которых представлена в Приложении А и Б соответственно, результаты экспериментов приведены только для переменных, имеющих наибольшую значимость для НСМ (таблица В.2 - Приложение В).

Показатели на графике (рисунок 3.18) получены после наработки ШУ в течение 120 мин.

Из графика видно, что значения температуры правой стенки корпуса увеличиваются с увеличением частоты вращения шпинделя, это является следствием возрастания момента трения и тепловыделения в подшипниковых опорах. Полученные зависимости близки к линейным. У станка мод. 400ХС Вектор на частоте 2500 об/мин зафиксировано некоторое снижение тем-

пературы на ~ 2.5 °C относительно его предыдущей фиксированной частоты в 2000 об/мин, что обусловлено выходом ШУ на устоявшийся тепловой режим, при котором тепловыделение в подшипниках уравнивается интенсивной теплоотдачей стенками шпиндельной коробки.

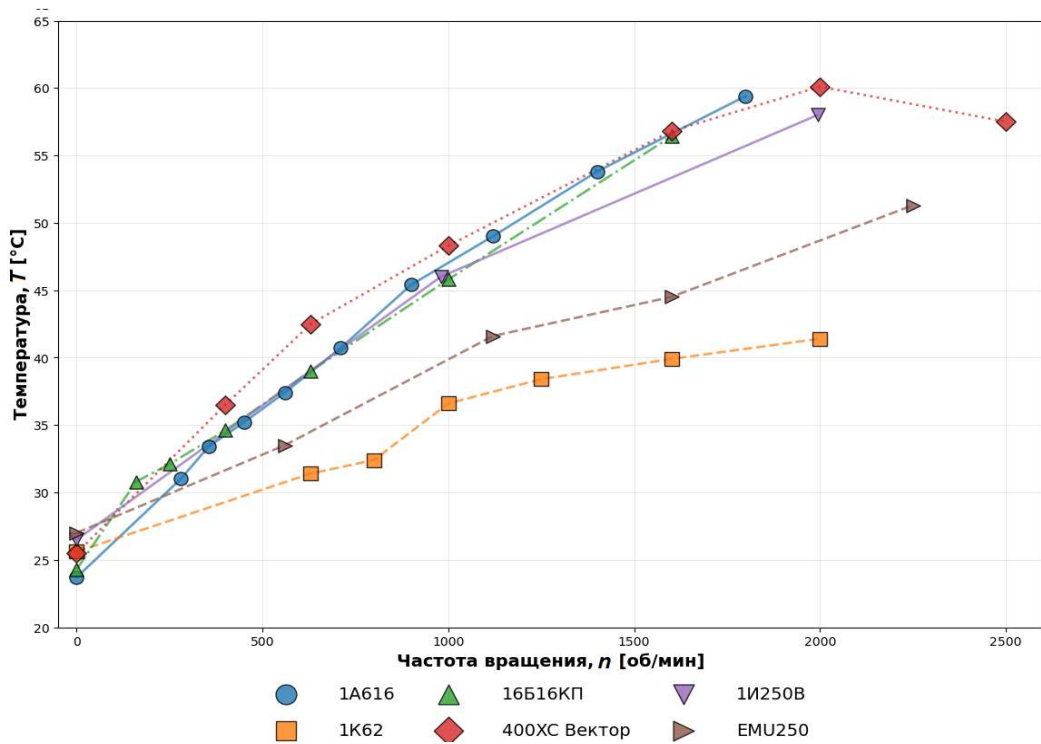


Рисунок 3.18. Зависимость температуры правой стенки от частоты вращения шпинделя для различных конструкций ШУ

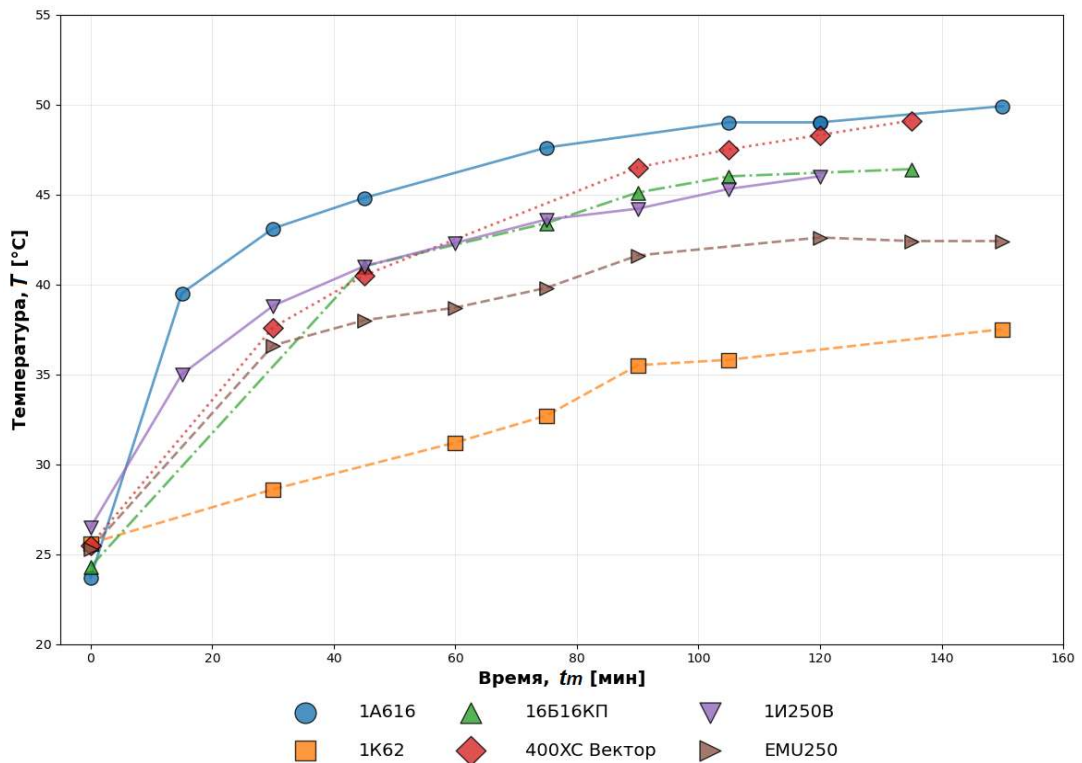


Рисунок 3.19. Зависимость температуры от времени работы для различных конструкций ШУ

Показатели на графике (рисунок 3.19) даны при частоте вращения шпинделя 1000 об/мин. График показывает, что значения температуры передней стенки корпуса увеличиваются с увеличением времени работы ШУ. Зависимости для 5-ти из 6-ти исследованных станков нелинейны. Стабилизация температуры происходит после 2...2,5 часов работы. Линейная зависимость у станка мод. 1K62 может быть объяснена малым тепловыделением в передней опоре шпинделя ввиду сравнительно большего значения радиального зазора в опоре (4,75 мкм против 0,5...3 мкм у остальных станков) и большими размерами теплоотдающей поверхности корпуса.

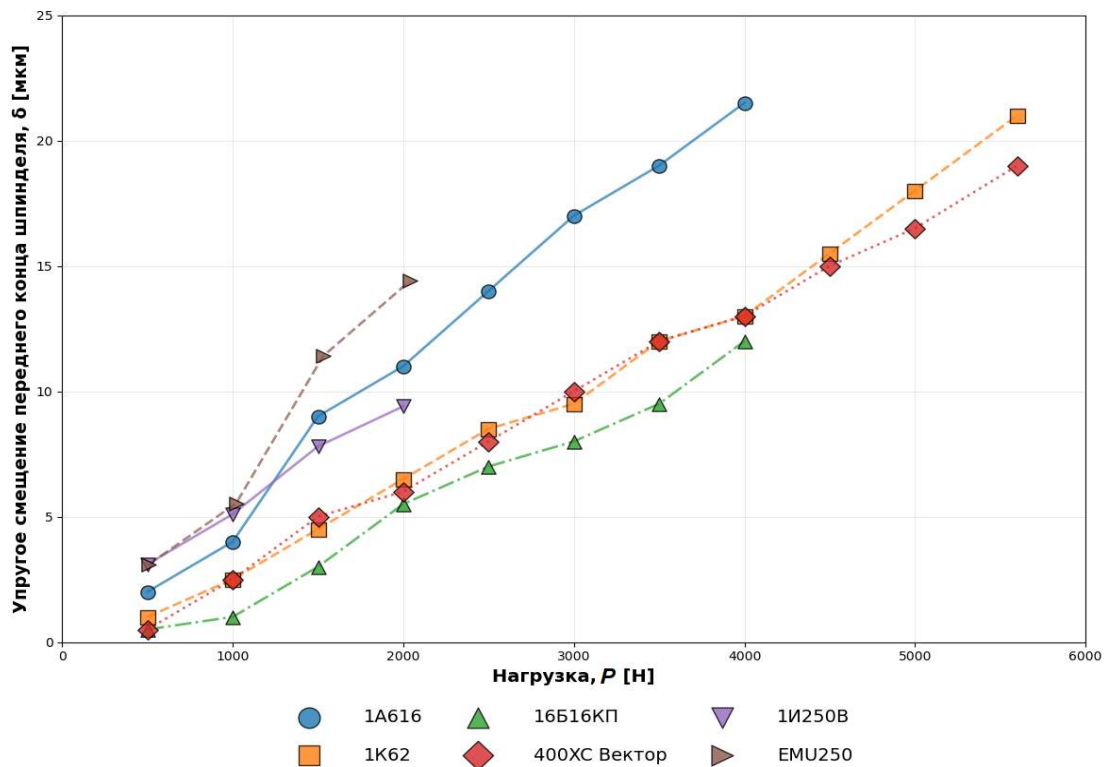


Рисунок 3.20. Зависимость упругого смещения переднего конца шпинделя от нагрузки для различных конструкций ШУ в горизонтальной плоскости

Показатели на графике (рисунок 3.20) даны для ШУ станка находящегося в простое перед моментом его пуска. Как видно зависимости практически линейны.

Из диаграммы на рисунке 3.21 прослеживается, что при уменьшении диаметра шпинделя в передней опоре от 100 мм до 50 мм, являющегося определяющим показателем не только для его габаритов (диаметральные и линейные размеры), но и для всего ШУ в целом и одновременном увеличении класса точности подшипников от 5-го до 2-го, биение шпинделя уменьшается. В частности, о значительном влиянии межопорного расстояния (МР) на биение шпинделя свидетельствует диаграмма на рисунке 3.22, из которой следует, что с уменьшением МР уменьшается и биение шпинделя.

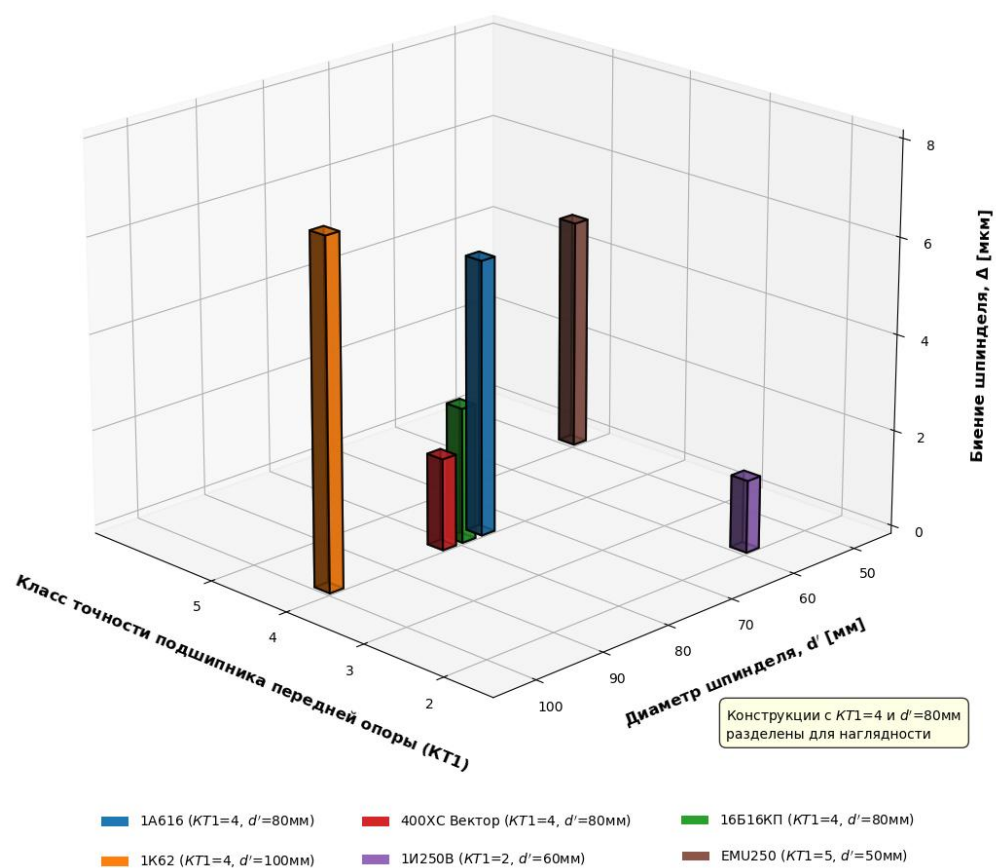


Рисунок 3.21. Зависимость биения шпинделя от его диаметра и классов точности подшипников передней опоры

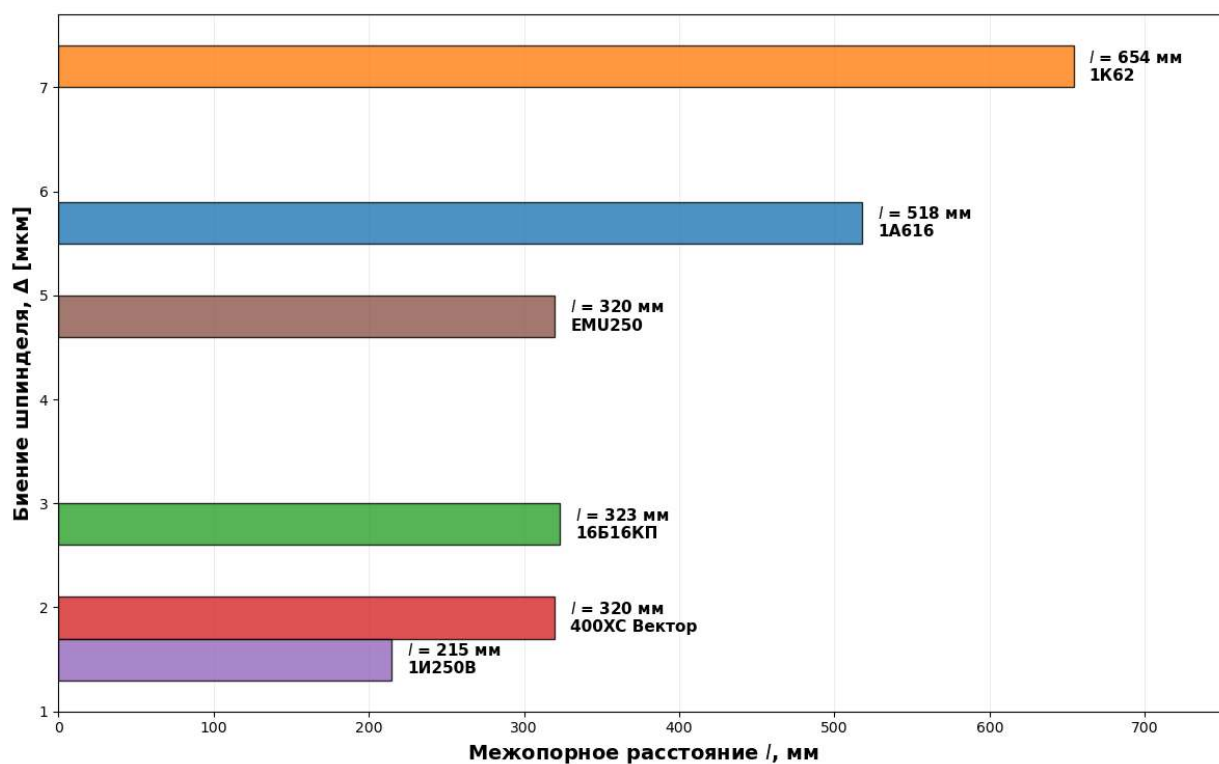


Рисунок 3.22. Зависимость биения шпинделя от межопорного расстояния шпинделя

3.4.2. Результаты аналитических расчетов и численного моделирования

Результаты применения рассмотренной методики (п. 3.2.1) определения избыточной температуры переднего подшипника шпинделя приведены для группы токарных станков на рисунке 3.23. В расчётах начальная температура принята 25,5 °С, что является средним арифметическим значением, полученным при проведении натурных экспериментов. Время работы – 150 мин, что соответствует максимальному значению времени работы при проведении эксперимента.

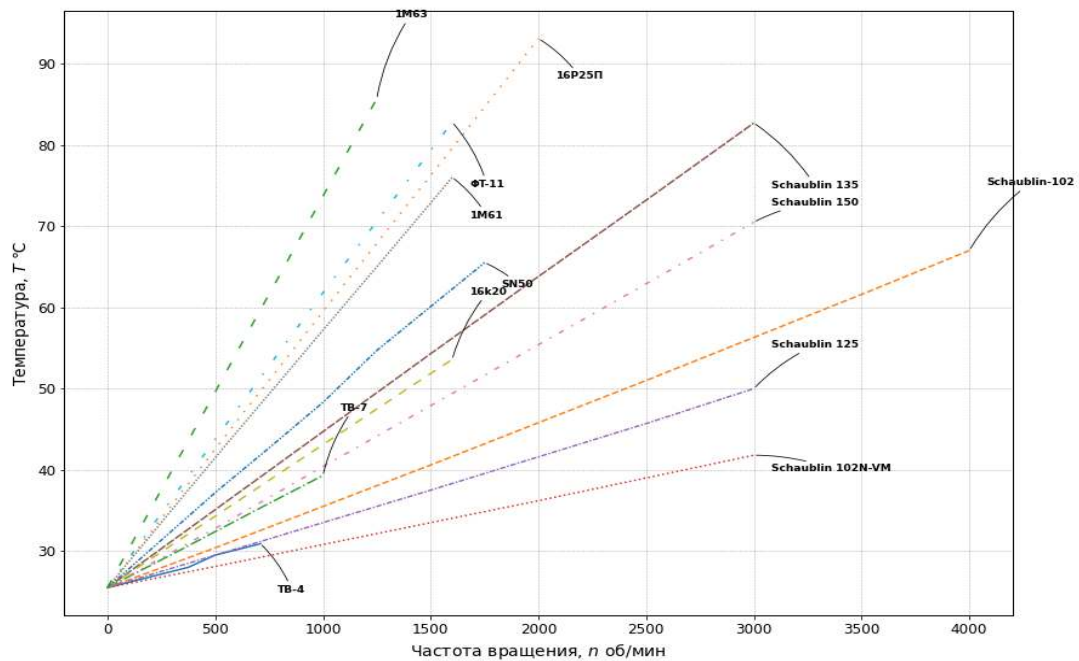


Рисунок 3.23. Зависимость температуры подшипника от частоты вращения шпинделя

На рисунке 3.24 приведено сравнение значений температур подшипников передней опоры, полученных расчетным путём, с результатами эксперимента.

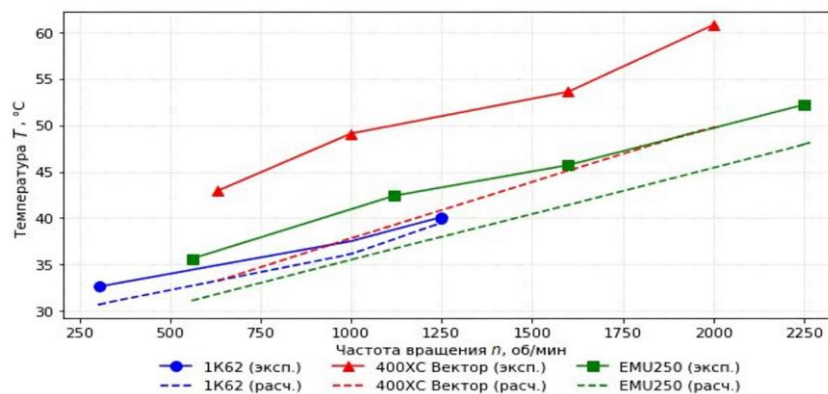


Рисунок 3.24. Сравнение значений температур, полученных расчетным путем, с данными натурного эксперимента

Результаты применения рассмотренной методики определения упругого смещения переднего конца шпинделя, учитывающей податливость опор, приведены для группы токарных станков на рисунке 3.25. Величина смещения определялась в направлении действия радиальной составляющей силы резания P_y .

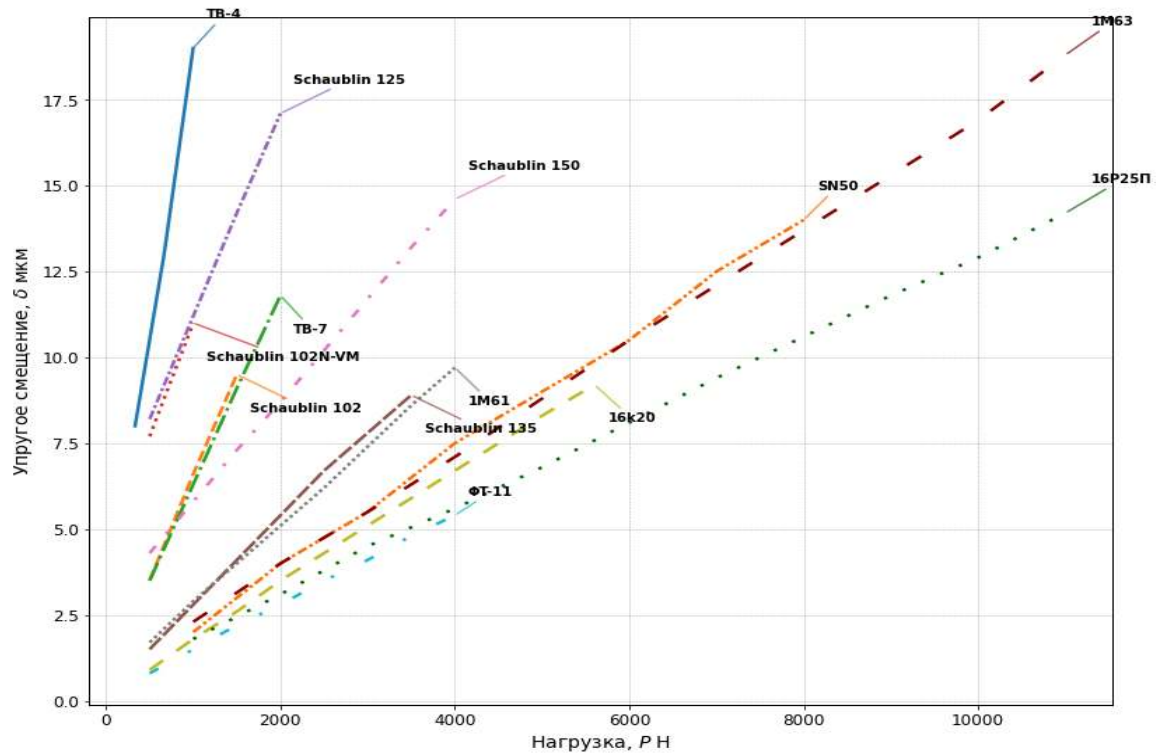


Рисунок 3.25. Зависимость упругого смещения переднего конца шпинделя от нагрузки

На рисунке 3.26 приведено сравнение значений смещений переднего конца шпинделя, полученных расчетным путем, с данными натурального эксперимента.

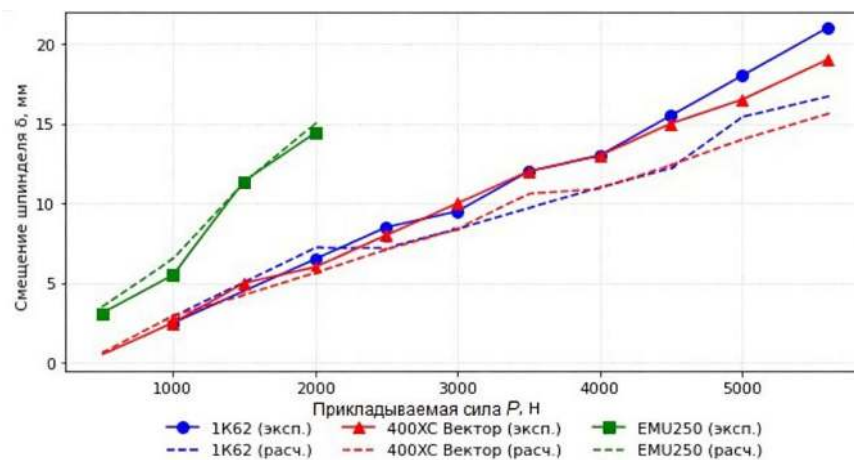


Рисунок 3.26. Сравнение значений смещений переднего конца шпинделя, полученных расчетным путём, с данными натурального эксперимента

Сравнение расчетных (схемы а и б рисунок 3.5, п. 3.2.3) и экспериментально полученных значений биения шпинделя показало, что результаты экспериментальных данных лежат в расчетных границах изменения этого параметра, приближаясь к значениям по схеме б (таблица 3.6).

Таблица 3.6 - Сравнения расчетных и экспериментально полученных значений биения шпинделя

Станок	Биение переднего конца шпинделя Δ , мкм		
	расчет, схема а	эксперимент	расчет, схема б
1A616	8,7	>5,7 >	3,3
1K62	9,5	>7,2 >	5,5
16Б16КП	10,7	>2,3 >	1,3
400ХС Вектор	10,7	>1,9 >	1,3
1И250В	5,8	>1,2 >	0,5
ЕМУ250	10,4	>4,8 >	4,6

Из рисунков 3.24 и 3.26, и таблицы 3.6 видно, что результаты аналитических расчетов хорошо согласуются с данными натурного эксперимента.

Результаты применения предложенной методики определения динамических характеристик ШУ с учетом податливости опор при действии максимальной нагрузки приведены для группы токарных станков на рисунке 3.27.

По графику (рисунок 3.27) видно, что при отношении $l/a > 4,5$ частоты не достигают и 400 Гц, а при $l/a < 3$ значительно превышают планку в 500 Гц.

Численное моделирование проводилось для токарных станков различного типоразмера с диаметром обработки от 200 до 630 мм, для которых предварительно были разработаны 3D модели корпусов (рисунок 1.12, п. 1.1.1). Величины наиболее значимых параметров – габаритов правой стенки (месторасположение передней опоры), координаты и диаметр основной расточки под передний подшипник шпинделя приведены в таблице 1.1. (п. 1.1.1). В ходе расчета получены линейные зависимости упругого смещения центра основной расточки от действующей нагрузки (рисунок 3.28).

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

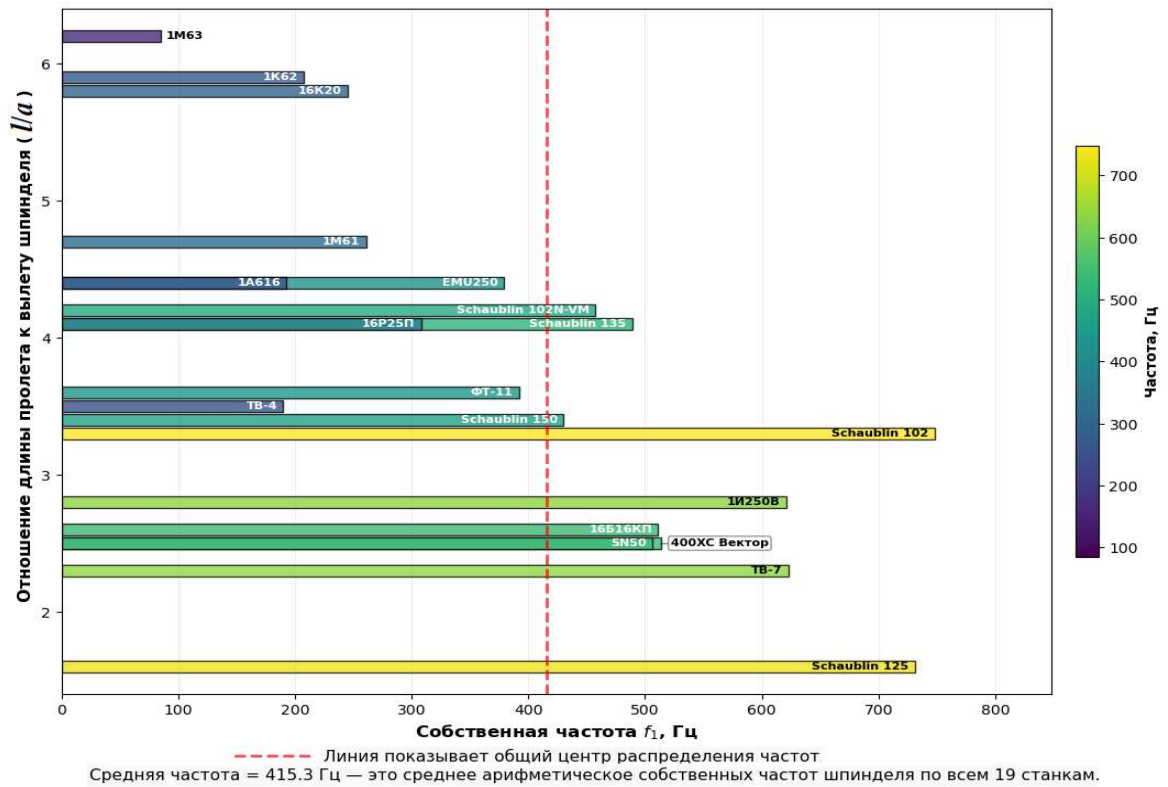


Рисунок 3.27. Собственная частота шпинделей

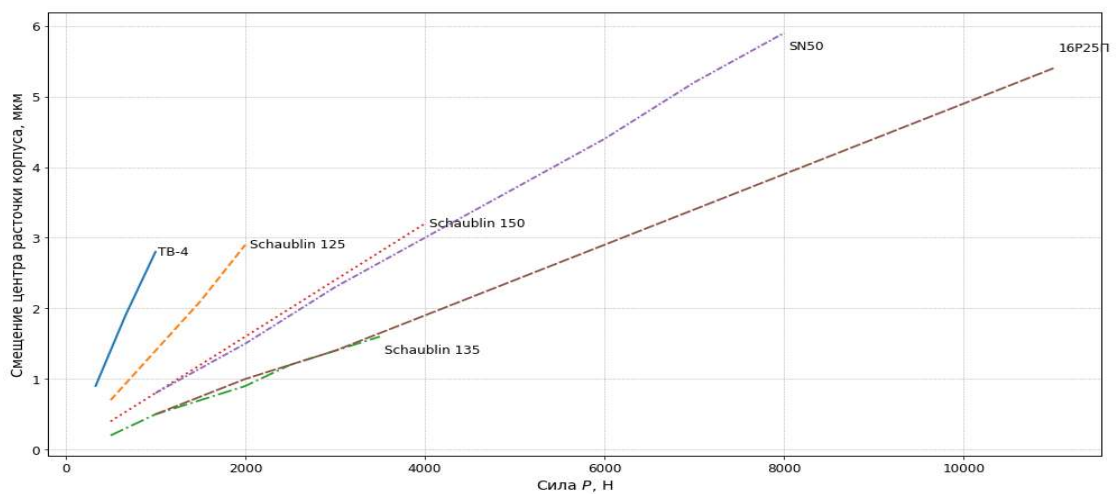


Рисунок 3.28. Зависимость смещений центра расточки правой стенки корпуса от нагрузки для различных типоразмеров станков

3.4.3. Валидация экспериментальным данным результатов аналитических расчетов

Для получения сведений о достоверности данных, полученных путём проведения аналитических расчетов, произведен корреляционный анализ целевых переменных для двух вариантов обучающего массива данных:

- только экспериментальные данные (таблица В.1, Приложение В);

- совместно экспериментальные данные и данные аналитических расчетов (таблица В.2, Приложение В).

В корреляционном анализе экспериментальных данных были исключены переменные, не имеющие размаха: n_1 и N . Причина исключения обусловлена тем, что эксперименты проходили на станках, имеющих в передней опоре только один ($n_1=1$) радиальный роликовый подшипник, отсюда удалён и связанный с этой переменной параметр предварительного натяга радиально-упорных шариковых подшипников (N), ввиду отсутствия таких подшипников в опоре.

Поскольку распределения выходных переменных НСМ статистически значительно отличались от нормального ($p < 0,05$ по критериям Колмогорова–Смирнова и Шапиро–Уилка), а переменные T и δ демонстрировали признаки распределения с тяжелыми хвостами, корреляционный анализ был выполнен с использованием как параметрического коэффициента Пирсона (r), так и непараметрического коэффициента ранговой корреляции Спирмена (ρ). Полученные значения оказались близкими (расхождения составили 0,01 – 0,19, Приложение В), что свидетельствует об отсутствии существенного влияния выбросов и нелинейных искажений. Исходя из вышеизложенного в качестве коэффициентов корреляции приняты коэффициенты Спирмена.

По результатам корреляционного анализа (таблица В.1 и таблица В.2, Приложение В) можно выделить входные переменные с наибольшей корреляцией с целевыми параметрами (T , Δ , δ).

Для экспериментальных данных ($N = 541$) (таблица В.1, Приложение В):

- скорость вращения шпинделя (n) сильно (коэффициент корреляции равен 0,82) влияет на температуру T подшипника передней опоры, а время работы (t_m) умеренно положительно (0,442):

- межопорное расстояние шпинделя (l) оказывает сильное влияние (0,859) на величину биения его переднего конца (Δ), а диаметр шпинделя в передней опоре (d') - умеренно положительное (0,584);

- величина прикладываемой нагрузки (P) оказывает подавляющее (0,9) влияние на упругое смещение переднего конца шпинделя (δ).

Другие заметные связи:

- максимальная частота вращения шпинделя (n_{max}) отрицательно (-0,589) влияет на биение его переднего конца (Δ), а радиальный зазор (S) – положительно (0,556).

Для совместных данных ($N = 1063$) (таблица В.2, Приложение В):

n и T : (0,845) - скорость вращения по-прежнему сильно коррелирует с температурой.

l и Δ : (0,645) - связь остаётся сильной, но меньше, чем только в экспериментальных данных.

n_{max} и Δ : (-0,583) - также сохраняется сильная отрицательная связь.

P и δ : (0,671) – подавляющее влияние на δ величины прикладываемой силы сохраняется.

Из проведенного анализа видно, что включение в обучающий набор данных аналитических расчетов не изменило его достоверность. Одновременно использование аналитических зависимостей позволило быстро получить значения ПП для широкого разнообразия конструкций ШУ, отсутствующих в эксперименте. В то время как с помощью экспериментальных данных получено многообразие значений режимных параметров только на ограниченном числе конструкций. Таким образом, необходимость получения ПП методами аналитических расчетов обусловлена трудоемкостью проведения экспериментальных исследований, либо отсутствием возможности их проведения (апробации) и может использоваться для количественного (объем наблюдений) и качественного (количество переменных) насыщения обучающего массива данных.

3.4.4. Верификация результатов аналитических расчетов динамических характеристик результатам численного моделирования

Апробация приведенных выше методик расчета собственных частот осуществлялась для шпинделя, показанного на рисунке 3.29 [40]. Опоры шпинделя комплектовались радиально-упорными подшипниками.

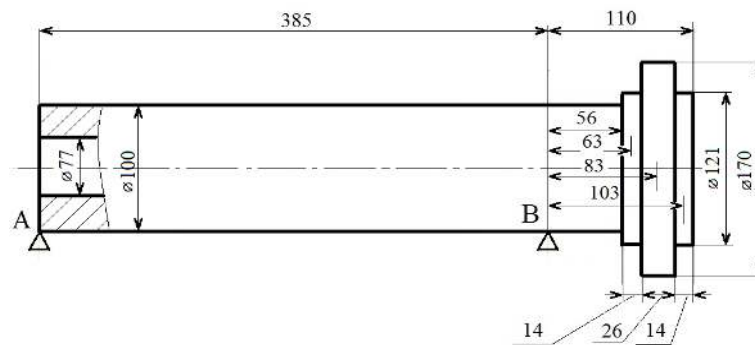


Рисунок 3.29. Эскиз шпинделя

Поскольку в соответствии с зависимостями, приведенными в [107], радиальная жесткость подшипника нелинейно зависит от нагрузки, то она определялась только от действия веса шпинделя при его работе на холостом ходу (без учета сил резания). Жесткость задней опоры (дуплекс радиально-упорных подшипников) составляла $j_A = 90,9 \cdot 10^6$ Н/м. Для передней опоры рассматривалось два варианта комплектации опоры: 3 и 4 радиально-упорных подшипника. Соответственно жесткость опор составляла $j_{B3} = 192,3 \cdot 10^6$ Н/м и $j_{B4} = 222,2 \cdot 10^6$ Н/м.

Результаты расчета по приведенным выше зависимостям приведены в таблицах 3.7 и 3.8.

Таблица 3.7 - Собственные частоты шпинделя на жестких опорах

Расчетная схема	f_1 , Гц	f_2 , Гц
	1009	1048
	1073	1216

Таблица 3.8 - 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

Сравнение данных таблиц 3.7 и 3.8 показывает, что учет упругости опор снижает собственные частоты почти в 2 раза.

Особенности конструкции шпинделя (сосредоточение значительных масс на конце короткой консольной части) приводит к тому, что первая и вторая собственные частоты отличаются только на 6,3...13,8 % (в зависимости от компоновки передней опоры и расчетной схемы). Причем отличие первой и второй частот снижается с уменьшением жесткости передней опоры. Разница в значениях первой и второй собственных частот более существенна для расчетной схемы с точкой приведения в середине консольной части.

Уменьшение радиальной жесткости передней опоры за счет уменьшения числа подшипников в опоре с 4-х до 3-х приводит к снижению собственных частот: для расчетной схемы с точкой приведения на конце консоли частоты f_1 на 4,3 % и частоты f_2 на 7,1 %, а для расчетной схемы с точкой приведения в середине консоли соответственно на 4,2 % и 8,4 %.

Верификация расчетных собственных частот проводилась путем их сравнения со значениями, полученными при модальном анализе методом конечных элементов (МКЭ) в среде ANSYS Workbench, результатами которого были собственные частоты и формы колебаний шпинделя (таблица 3.9 и рисунки 3.30, 3.31).

Упругость опор задавалась указанием объемной жесткости (Elastic Support): для задней опоры - $18425 \cdot 10^6$ Н/м³, для передней опоры из четырех подшипников - $44413 \cdot 10^6$ Н/м³, из трех подшипников - $36666 \cdot 10^6$ Н/м³. Жесткие опоры обеспечивались многократным увеличением объемной жесткости - до 10^{12} Н/м³: $18425 \cdot 10^{12}$ Н/м³; $44413 \cdot 10^{12}$ Н/м³; $36666 \cdot 10^{12}$ Н/м³.

Численное моделирование МКЭ шпинделя на жестких опорах показало существенное превышение полученных собственных частот над расчетными: для частоты f_1 примерно на 30 %, а для частоты f_2 почти в два раза. Из чего следует, что для полноты картины действующих факторов, необходимо принимать во внимание упругость опор.

Таблица 3.9 - Собственные частоты шпинделя, полученные при модельном анализе методом конечных элементов

Расчетная схема	Компоновка опор	f_1 , Гц	f_2 , Гц
Жесткие опоры		1368,4	2222,2
Упругие опоры		581,81	619,38
		531,82	619,27

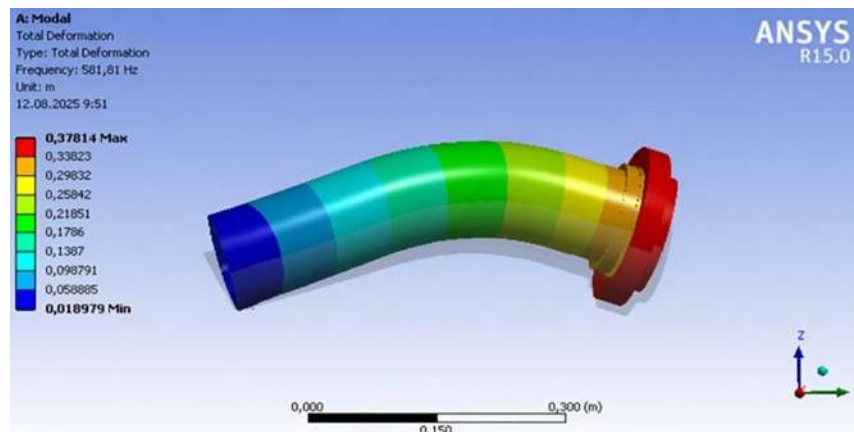


Рисунок 3.30. Форма колебаний шпинделя с 4-мя подшипниками в передней опоре на частоте 581,81 Гц

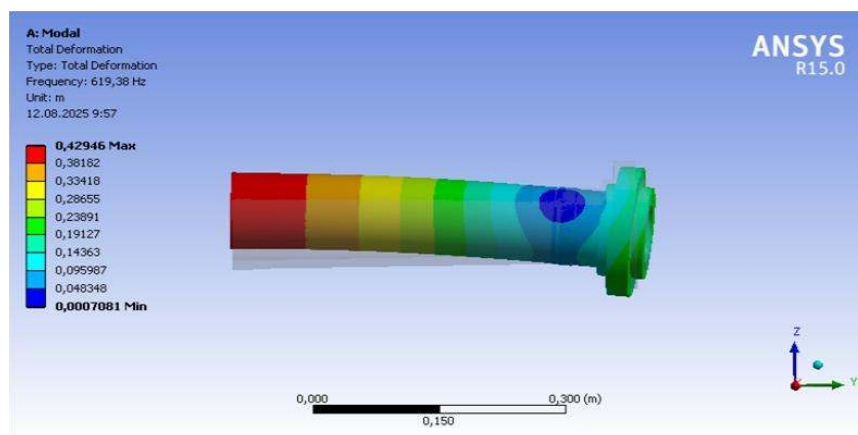


Рисунок 3.31. Форма колебаний шпинделя с 4-мя подшипниками в передней опоре на частоте 619,38 Гц

Сравнение значений, приведенных в таблице 3.9, со значениями, полученными по 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 %.

3.5. Выводы по главе 3

1. Объединение экспериментальных, аналитических и численных методов взаимодополняют друг друга следующими преимуществами: экспериментальные данные обеспечивают достоверность, аналитические расчёты — масштабируемость и широту охвата параметров, численное моделирование — детализацию и учёт сложных конструктивных особенностей.

2. Разработана и апробирована методика экспериментального определения радиального зазора подшипников передней опоры ШУ. Методика позволяет точно устанавливать и контролировать радиальный зазор в диапазоне от 0,25 до 5,5 мкм с помощью регулировочной гайки, что обеспечивает возможность многократного изменения параметра для формирования обучающей выборки.

3. Рассмотрены аналитические методики расчёта ключевых эксплуатационных характеристик ШУ, включающие расчёт избыточной температуры подшипника, упругого смещения переднего конца шпинделя, биения и собственных частот колебаний с учётом податливости опор. Методики основаны на физических моделях и позволяют быстро рассчитывать данные для широкого спектра конструкций.

4. Численное моделирование методом конечных элементов выявило ключевые конструктивные параметры, влияющие на жёсткость корпуса ШУ. Наибольшее влияние на деформации оказывают:

- толщина правой стенки (передней опоры): увеличение на 20 мм снижает деформацию на 16–25 %;
- наличие и расположение вспомогательных расточек: расточка на уровне центров снижает жёсткость до 50 %;
- диаметр основной расточки: увеличение с 130 до 150 мм повышает деформацию на 18,5 %.

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

5. Направление силы резания существенно варьируется в зависимости от условий обработки. Угол θ между составляющими силами P_y и P_z может изменяться от $3,2^\circ$ до $89,7^\circ$, что необходимо учитывать при моделировании. Для обучения нейросети принят угол 30° (от плоскости резания, при свободном резании) соответствующий типичным условиям обработки стали.

6. Объединение экспериментальных данных с результатами аналитических расчётов и численного моделирования позволило расширить объём обучающей выборки почти вдвое (с 541 до 1063 строк). Это сделало возможным обучение нейросети на данных, охватывающих широкий спектр конструктивных, настроечных и режимных параметров.

ГЛАВА 4. Моделирование эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов с учетом расширенного количества проектных параметров на основе интегрированного обучающего массива данных и оценка модели

4.1. Обоснование архитектуры нейросети для моделирования эксплуатационных характеристик ШУ с учетом расширенного количества проектных параметров

4.1.1. Настройки процесса построения нейросети моделирования эксплуатационных характеристик ШУ при расширенном количестве проектных параметров

4.1.1.1. Влияние количества нейронов скрытого слоя на прогнозирование эксплуатационных характеристик ШУ с учетом интегральных показателей проектных параметров

Полученный интегрированный обучающий набор данных значительно расширил количество переменных, которое увеличилось с 6-ти (п. 2.2.1) до 30-ти, т.е. в 5 раз. Такое увеличение переменных сразу подразумевает и возрастающую сложность построения будущей НС модели, для которой понадобится увеличить число вычислительных нейронов скрытого слоя.

Для построения НСМ, содержащей увеличившееся количество проектных параметров ШУ, проводилось исследование по влиянию настроек такого построения на качество получаемой модели, которое требовало изменений первоначально используемой архитектуры нейросети MLP 3-7-3.

Для этого во входной набор обучающих данных НС, используемый ранее (п. 2.2.1), были добавлены интегральные показатели проектных параметров ШУ.

Использование интегральных показателей ПП ШУ изменило входной слой НС, который стал состоять из 11-ти переменных, учитывающих влияние не только режимов эксплуатации, но и настроечных и конструктивных проектных параметров:

- максимальный диаметр обрабатываемой детали (укрупненный показатель, характеризующий габаритные размеры ШУ в целом);
- динамическая и статическая грузоподъемности подшипников передней опоры;
- номер конуса Морзе;
- межопорное расстояние и вылет шпинделя;
- координата расположения приводного элемента, отсчитываемая от положения передней опоры;

- радиальный зазор подшипника передней опоры;
- частота вращения шпинделя;
- сила, прикладываемая к переднему концу шпинделя;
- время работы.

Переменными выходного слоя, как и ранее, были: температура корпуса в зоне наружного кольца передней опоры (T); биение шпинделя (Δ); упругое смещение переднего конца шпинделя (δ).

Ввиду появления новых переменных, потребовалось проведение дополнительных исследований по влиянию количества нейронов скрытого слоя на качество прогнозирования ЭХ ШУ такой модели. С этой целью изучался диапазон варьирования количества нейронов скрытого слоя от 5 до 50 с шагом в 5 нейронов. Процесс обучения проводился в режиме автоматического и пользовательского построения. В режиме пользовательского построения на скрытом слое НС применялись функции активации (ФА), давшие наилучшие результаты в ходе построения ранее полученной сети (п. 2.2.1) (гиперболический тангенс, сигмоидальная, экспоненциальная), на выходном слое использовалась линейная ФА. Настройки в режиме автоматического построения предлагались программой.

В ходе исследования влияния количества нейронов скрытого слоя на качество прогнозирования ЭХ в зависимости от количества проектных параметров ШУ было построено 60 НС с архитектурой MLP [38].

В таблице 4.1 представлены 3-и лучших НС, отобранных по критериям производительности (R^2) и ошибки процесса их обучения.

Таблица 4.1 - Характеристики выбранных НС

№	Архитектура сети	Производительность			Ошибка			Метод обучения	Функция ошибок	ФА на скрытом слое	ФА на выходном слое
		обучение	тест	контроль	обучение	тест	контроль				
56	MLP 11-50-3	0,993	0,99	0,986	0,426	0,668	0,633	BFGS 278	SOS	Tanh	Identity
14	MLP 11-15-3	0,992	0,99	0,984	0,572	0,745	0,860	BFGS 356	SOS	Tanh	Logistic
19	MLP 11-20-3	0,989	0,99	0,99	0,58	0,774	0,964	BFGS 152	SOS	Tanh	Logistic

Из таблицы 4.1 видно, что для качественного моделирования ЭХ ШУ в зависимости от эксплуатационных, настроечных и конструктивных проектных параметров необходимо увеличивать количество эпох обучения многослойного персептрона до $\sim 200 \dots 400$ и использовать больше нейронов скрытого слоя ($>15 \dots 20$) по сравнению с сетью MLP 3-7-3 (п. 2.2.1) с 7-ю скрытыми нейронами, показатели которой были достигнуты за 72 итерации, а показатели остальных сетей (п. 2.2.1, таблица 2.5) при количестве итераций до ~ 100 . Одновременно нет необходимости чрезмерного увеличения скрытых нейронов, поскольку сеть 56. MLP 11-50-3, имеющая более сложную архитектуру с 50-тью нейронами, показывает сопоставимые показатели с другими более простыми сетями – 14. MLP 11-15-3 и 19. MLP 11-20-3. Кроме того сеть 56. MLP 11-50-3 потенциально может являться переобученной и не способной прогнозировать результат вне известных ей данных (п. 1.3.1). Оптимизация числа скрытых нейронов для сетей 14. MLP 11-15-3 и 19. MLP 11-20-3, построенных в режиме автоматического построения, стала возможной благодаря применению на выходном слое логистической ФА, позволяющей эффективно моделировать более сложные взаимодействия факторов ШУ и получать тем самым более достоверный результат прогноза.

Исследование показало, что включение 11 проектных параметров в модель потребовало усложнения архитектуры НС. Оптимальное количество нейронов скрытого слоя для качественного прогнозирования составило 15–20. Дальнейшее увеличение числа нейронов до 50 не приводит к значимому улучшению показателей, но несет риск переобучения модели.

4.1.1.2. Влияние ФА нейронов выходного слоя на качество моделирования эксплуатационных характеристик ШУ

На точность прогнозирования эксплуатационных характеристик ШУ с учетом расширенного количества ПП оказывает влияние не только количество нейронов скрытого слоя (п. 4.2.1.1), но и применяемые функции активации.

Для исследования картины получающихся прогнозов при использовании различных ФА выходного слоя НС, было проведено исследование способностей таких сетей к экстраполяции, т.е. при работе вне известных им данных (обучающих данных). Для чего использовался заранее ограниченный диапазон значений разброса входной переменной (малый размах), при этом полный известный диапазон её разброса (полный размах) использовался в качестве инструмента для оценки экстраполяции исследуемой переменной (в качестве значений «истины»).

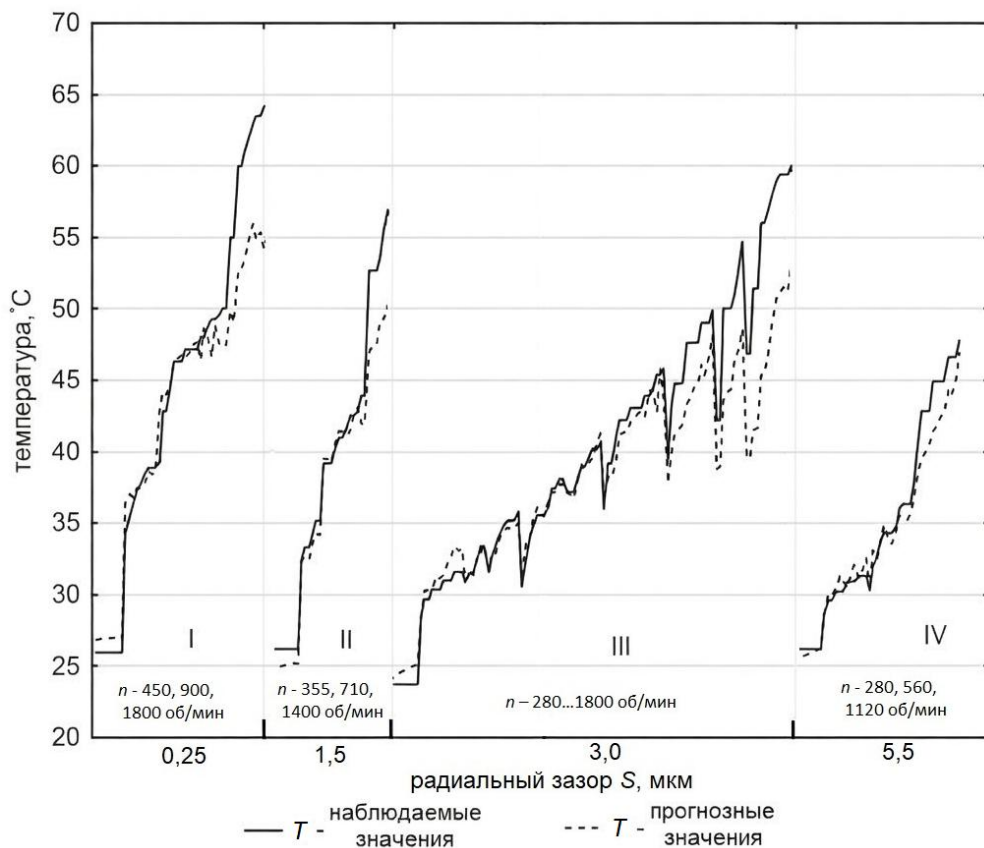
Для этого проводилось исследование качества прогноза для одной из значимых переменных (значение корреляции Спирмена - 0,82 таблица В.1, Приложение В) переменной (T) в

зависимости от изменения частоты вращения шпинделя (n). Известный частотный диапазон, которой составлял от 0 до 1800 об/мин и его данные использовались при обучении НС MLP 3-7-3 (п. 2.2.1). Далее этот диапазон был урезан вдвое и размах переменной (n) теперь ограничивался значениями от 0 до 900 об/мин. Теперь этот ограниченный диапазон послужил обучающим массивом на основе которого была получена НС MLP 4-10-3 [35].

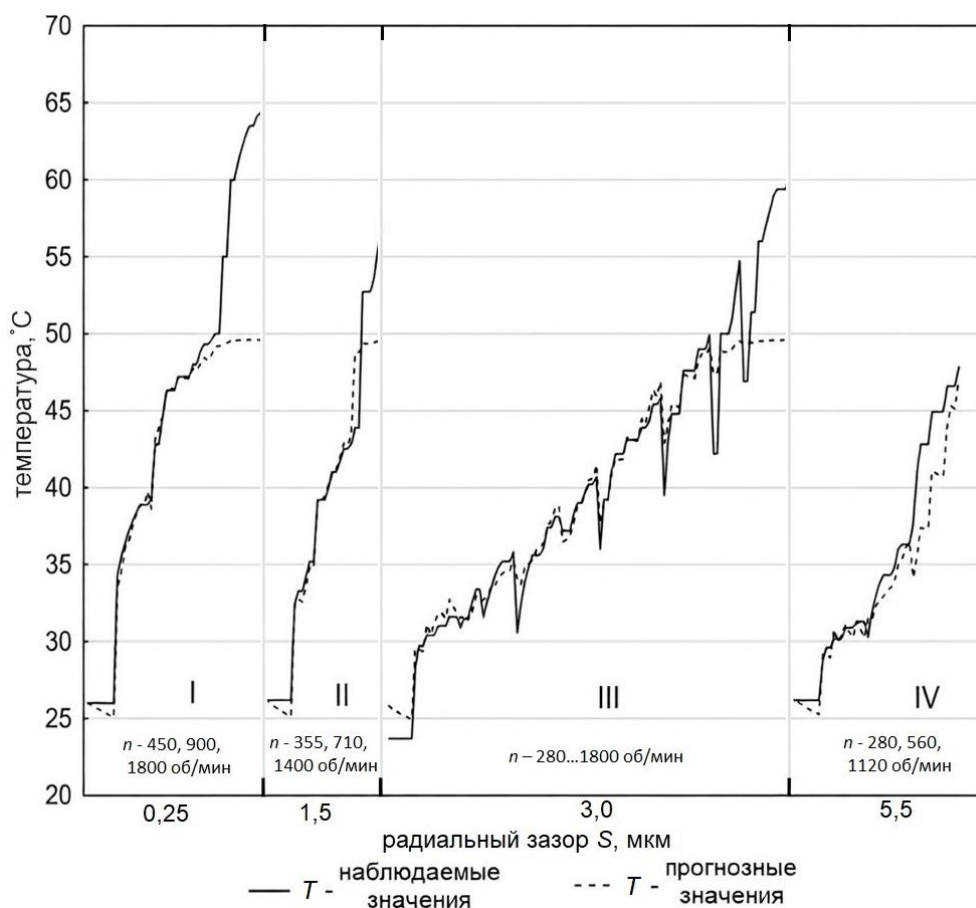
Для проверки прогнозных возможностей НС MLP 4-10-3 её прогноз осуществлялся на данных, содержащих известный частотный диапазон от 0 до 1800 об/мин. Исследование показало снижение значения средней относительной ошибки с 4,2 % до 3,9 % в прогнозировании переменной T при использовании логистической ФА (рисунок 4.1, б) вместо линейной (рисунок 4.1, а). На рисунке 4.1 показаны графики сравнения наблюдаемых (сплошная линия) и предсказанных (штриховая линия) значений для линейной – а, и логистической – б ФА НС MLP 4-10-3.

Из графиков можно оценить качество экстраполяции НС модели на 4-х интервалах наблюдений [34]:

- I – для зазора $S = 0,25$ мкм и n - 450, 900, 1800 об/мин;
- II – для зазора $S = 1,5$ мкм и n - 355, 710, 1400 об/мин;
- III – для зазора $S = 3,0$ мкм и n - 280...1800 об/мин;
- IV – для зазора $S = 5,5$ мкм и n - 280, 560, 1120 об/мин.



а



б

Рисунок 4.1. Графики сравнения наблюдаемых и предсказанных значений для различных ФА нейронов выходного слоя НС MLP 4-10-3 в неизвестном интервале входной переменной n - 1120...1800 об/мин : а – линейная, б – логистическая

В первом варианте при использовании линейной ФА график прогнозных значений «заваливается» относительно наблюдаемых значений температуры при этом по сути эквидистантно повторяя его кривую в неизвестном интервале входной переменной (1120...1800 об/мин). Во втором варианте при использовании логистической ФА кривая прогнозных значений дольше следует за кривой наблюдаемых значений, а при входе в неизвестный интервал (1120...1800 об/мин) резко срезается, при этом заметно усреднение значений. Иначе про второй вариант можно сказать, что такая сеть сможет выполнять экстраполяцию в определенных пределах, а затем будет насыщаться. То есть экстраполяция допустима в определенных границах, а вне их она будет пресекаться [173].

Исследование показало, что выбор функции активации выходного слоя критически влияет на способность НС к экстраполяции. По сравнению с линейной логистическая ФА обеспечивает более высокую точность и ведет себя адекватнее, что позволяет избежать выдачи недостоверных результатов вне области применимости модели.

4.1.2. Анализ результатов нейросетевого моделирования эксплуатационных характеристик ШУ с учетом расширенного количества проектных параметров

Построение НС для прогнозирования эксплуатационных характеристик ШУ с учетом расширенного числа проектных параметров было проведено с учетом настроек п. 2.2.1 и 4.1.1

Обучающим здесь служил интегрированный набор данных, полученный экспериментально в п. 2.1 и 3.1.1, аналитическими методами (п. 3.2) и методом конечных элементов (п. 3.3). Данные содержали при расширенном количестве проектных параметров близкий к рекомендуемому ($26 \text{ входов} \times 4 \text{ выходы} \times 10 = 1040$) объем - 1063 строки с входными значениями переменных (26 переменных) и соответствующих им откликам (4 переменных). Легенда переменных приведена в Приложении А, а их размах в Приложении Б.

Для более достоверной и объективной картины процесса построения НС, содержащей данные интегрированного набора, построение проводилось двухэтапно.

Вначале в режиме автоматического построения строилось 1500 сетей. В этом режиме (по сравнению с ручным) значительно облегчается получение такого объема сетей. Поскольку при его использовании нет надобности в постоянном ручном переборе настроек построения (изменения количества скрытых нейронов и функции активации), их перебор происходит автоматически. Исключение ручного перебора настроек занимающего дополнительно $\sim 5 \dots 7$ секунд на каждую сеть позволило снизить общую трудоемкость построения такого объема сетей на ~ 5 часов, которая лишь машинного времени вычисления составляет $\sim 1,5$ часа при использовании многоядерного процессора современной линейки (Intel, AMD).

На скрытом слое применялись ФА, хорошо себя показавшие на предыдущих этапах исследования: логистическая (сигмоидальная), гиперболический тангенс, экспоненциальная. На выходном слое к используемой ранее линейной ФА добавились: логистическая (сигмоидальная), гиперболический тангенс, экспоненциальная, применение которых способствовало упрощению архитектуры сети (п. 4.1.1.2).

После окончания процесса обучения 1500 сетей из построенного множества программой автоматически отбирались 30 наилучших сетей, информация по которым приведена в таблице 4.2. Следует отметить, что для всех сетей на всех выборках (обучающая, тестовая, контрольная) производительность (R^2) равна 0,99. По этому параметру сети различаются лишь с 3-го знака после запятой. Далее из полученного списка в порядке возрастания значений ранжировался столбец «Ошибка на контроле» и, ориентируясь на несколько первых его значений, отбирались сети с минимальным количеством скрытых нейронов для различных ФА на выходном слое. Таким образом, из таблицы были выбраны 1-я, 9-я и 16-я сети.

Далее по ним выведена информация о коэффициентах корреляции (таблица 4.3), значения которых увеличились благодаря введению новых переменных, описывающих работу ШУ, и рассчитана средняя относительная ошибка на контрольном примере (аналогично п. 2.2.2), результаты занесены в таблицу 4.4.

Из таблиц 4.3 и 4.4 видно, что сети имеют весьма близкие параметры. Ввиду использования логистической ФА на выходном слое у сети 16. MLP 26-20-4 результат достигнут всего 20-ю нейронами скрытого слоя. Это говорит о том, что ФА, отличные от линейной, способны лучше распространять сигнал по сети, моделируя сложные зависимости ограниченным количеством нейронов, в отличие, к примеру, от сети 1. MLP 26-24-4 с 24-я нейронами скрытого слоя.

По итогам предварительного сравнения для дальнейшего анализа выбрана НС 16. MLP 26-20-4 (рисунок 4.2) имеющая средние относительные ошибки на контрольном примере: для T - 1,65 %; для Δ - 6,04 %; для δ - 6,65 % и для f_1 - 1,55 %. Средние относительные ошибки НС на тестовом множестве (159 строк данных) составили: для T - 1,7 %; для Δ - 6,05 %; для δ - 7,1 % и для f_1 - 1,6 %. Количество циклов обучения, которое потребовалось для получения сети, равно 462 (столбец «Метод обучения» таблица 4.2).

Таблица 4.2 - Свод построенных сетей

№	Архитектура сети	Производительность			Ошибка			Метод обучения	Функция ошибок	ФА на скрытом слое	ФА на выходном слое
		обучение	тест	контроль	обучение	тест	контроль				
1	MLP 26-24-4	0,997	0,996	0,995	6,663	7,827	8,290	BFGS 536	SOS	Tanh	Identity
16	MLP 26-20-4	0,996	0,996	0,995	9,119	10,747	10,914	BFGS 462	SOS	Tanh	Logistic
9	MLP 26-21-4	0,997	0,996	0,995	11,155	11,271	10,937	BFGS 358	SOS	Tanh	Logistic
17	MLP 26-20-4	0,996	0,996	0,995	10,999	12,393	11,838	BFGS 460	SOS	Tanh	Logistic
19	MLP 26-20-4	0,997	0,997	0,995	8,651	10,699	11,980	BFGS 816	SOS	Exponential	Exponential
3	MLP 26-25-4	0,997	0,996	0,995	7,586	12,433	12,180	BFGS 538	SOS	Tanh	Identity

Продолжение таблицы 4.2

12	MLP 26-25-4	0,996	0,996	0,995	9,640	11,963	12,355	BFGS 535	SOS	Tanh	Tanh
18	MLP 26-24-4	0,996	0,996	0,995	11,567	14,613	12,386	BFGS 420	SOS	Logistic	Logistic
25	MLP 26-24-4	0,996	0,996	0,995	12,365	26,713	12,451	BFGS 273	SOS	Tanh	Logistic
20	MLP 26-25-4	0,997	0,996	0,995	9,317	11,374	13,094	BFGS 377	SOS	Tanh	Logistic
30	MLP 26-24-4	0,997	0,996	0,995	8,592	14,093	13,90	BFGS 527	SOS	Logistic	Logistic
22	MLP 26-14-4	0,996	0,996	0,995	13,072	15,522	14,949	BFGS 546	SOS	Exponential	Exponential
15	MLP 26-21-4	0,996	0,996	0,995	12,452	16,075	15,102	BFGS 654	SOS	Logistic	Logistic
11	MLP 26-25-4	0,996	0,996	0,995	13,046	13,847	15,112	BFGS 373	SOS	Tanh	Logistic
2	MLP 26-21-4	0,997	0,996	0,995	11,137	15,325	15,163	BFGS 537	SOS	Exponential	Exponential
8	MLP 26-22-4	0,996	0,996	0,995	15,710	15,919	15,472	BFGS 389	SOS	Logistic	Exponential
27	MLP 26-21-4	0,996	0,996	0,996	13,628	20,968	15,850	BFGS 474	SOS	Exponential	Exponential
6	MLP 26-23-4	0,996	0,996	0,995	13,056	12,958	15,976	BFGS 581	SOS	Logistic	Logistic
7	MLP 26-23-4	0,996	0,996	0,995	13,931	14,407	16,716	BFGS 451	SOS	Tanh	Logistic
21	MLP 26-17-4	0,996	0,996	0,995	15,959	18,946	18,872	BFGS 718	SOS	Logistic	Logistic
10	MLP 26-17-4	0,996	0,997	0,995	16,441	23,685	19,746	BFGS 504	SOS	Exponential	Exponential
5	MLP 26-25-4	0,996	0,996	0,995	13,187	20,493	21,247	BFGS 342	SOS	Tanh	Logistic

Продолжение таблицы 4.2

24	MLP 26-15-4	0,996	0,996	0,995	19,763	19,486	21,615	BFGS 810	SOS	Exponential	Exponential
26	MLP 26-18-4	0,996	0,996	0,995	20,847	21,742	22,694	BFGS 445	SOS	Logistic	Logistic
4	MLP 26-25-4	0,997	0,996	0,995	14,467	20,019	23,310	BFGS 401	SOS	Tanh	Logistic
14	MLP 26-22-4	0,997	0,996	0,995	20,998	26,731	29,766	BFGS 426	SOS	Tanh	Exponential
28	MLP 26-22-4	0,996	0,996	0,995	24,782	29,151	30,238	BFGS 380	SOS	Logistic	Exponential
23	MLP 26-16-4	0,996	0,996	0,995	26,533	38,709	30,785	BFGS 462	SOS	Tanh	Exponential
29	MLP 26-23-4	0,997	0,996	0,995	22,504	38,967	32,608	BFGS 463	SOS	Logistic	Exponential
13	MLP 26-23-4	0,996	0,996	0,995	24,532	35,853	34,083	BFGS 462	SOS	Exponential	Exponential

Таблица 4.3 - Коэффициенты корреляции для выходных переменных

№ сети	T			Δ			δ			$f1$		
	Обучение	Тест	Контроль	Обучение	Тест	Контроль	Обучение	Тест	Контроль	Обучение	Тест	Контроль
1	0,999	0,999	0,998	0,993	0,992	0,991	0,995	0,996	0,993	0,999	0,999	0,999
9	0,997	0,997	0,997	0,992	0,991	0,991	0,995	0,994	0,993	0,999	0,999	0,999
16	0,998	0,998	0,997	0,992	0,992	0,991	0,995	0,996	0,994	0,999	0,999	0,999

Таблица 4.4 - Средние относительные ошибки (MAPE) на контрольном примере

№ сети	Архитектура сети	T	Δ	δ	$f1$
1	MLP 26-24-4	0,01368	0,06	0,0736	0,0105
9	MLP 26-21-4	0,0161	0,0594	0,0742	0,0123
16	MLP 26-20-4	0,0165	0,0604	0,0665	0,0155

Архитектура выбранной сети с составляющими входного и выходного слоев представлена на рисунке 4.2.

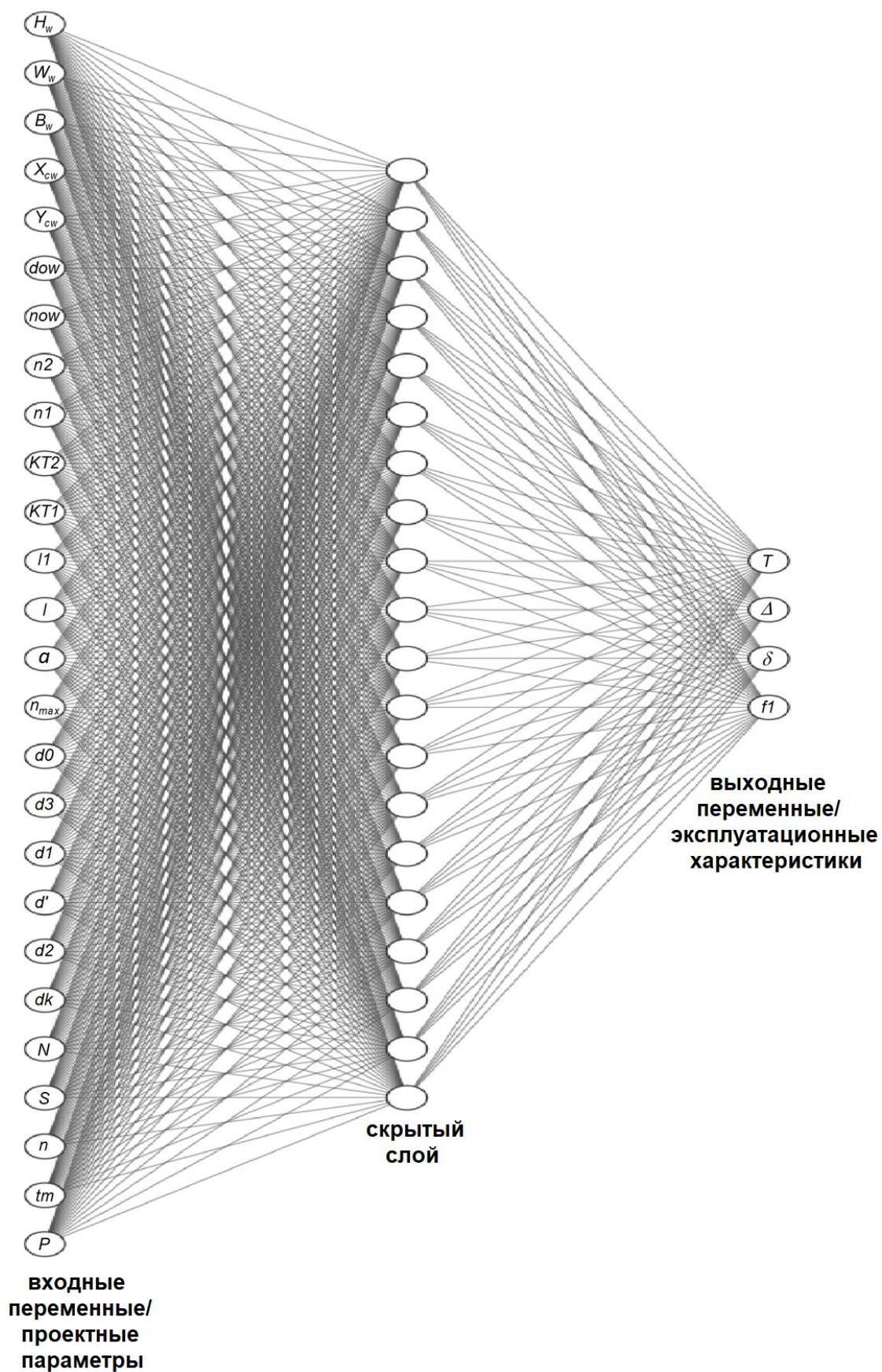


Рисунок 4.2. Архитектура НС 16. MLP 26-20-4

По графику обучения (рисунок 4.3) можно наблюдать практически полное совпадение кривых в процессе обучения и теста. Кривые едва различимы при значениях шкалы «Ошибка», равных 0,08...0,12. Такое слияние кривых говорит о качестве построенной модели, которая одинаково хорошо и стабильно функционирует на разных выборках.

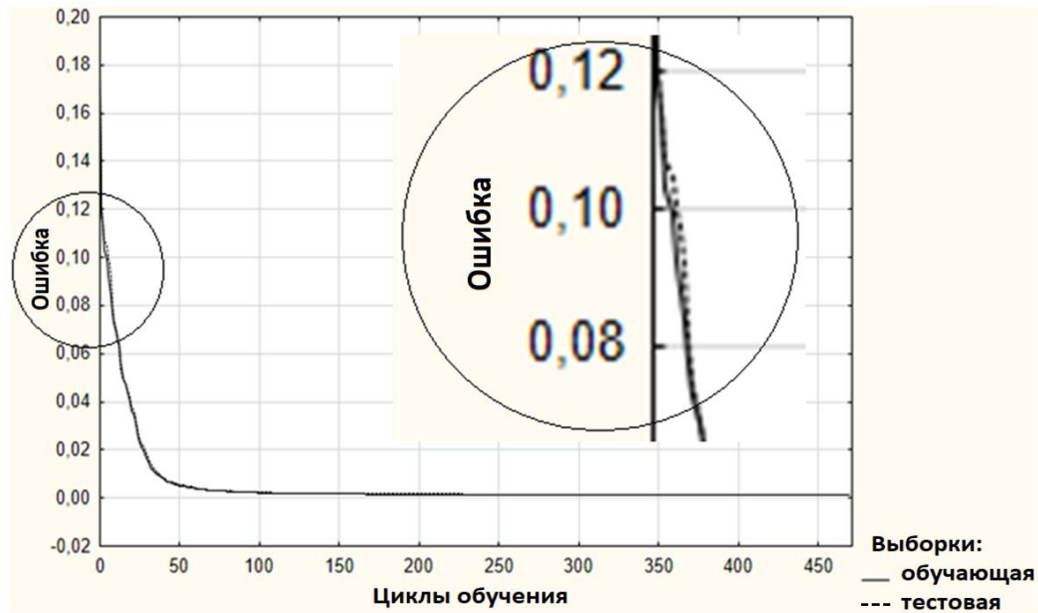
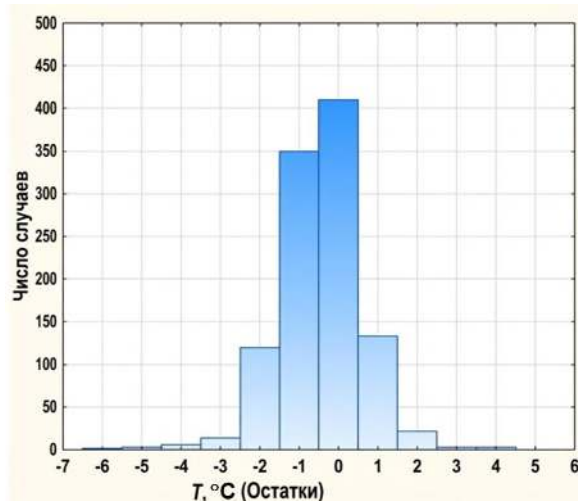
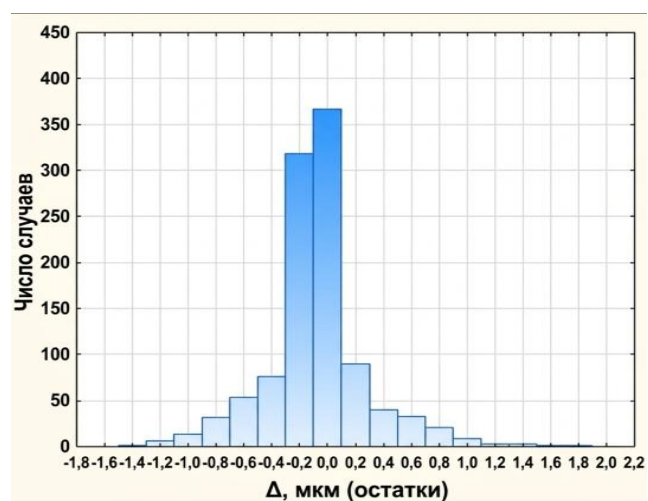


Рисунок 4.3. График обучения НС 16. MLP 26-20-4

По гистограммам остатков (разница между прогнозируемыми и наблюдаемыми значениями) модели (рисунок 4.4) можно отметить, что НС 16. MLP 26-20-4 с разным от наихудшего $f1$ (рисунок 4.4, г) до наилучшего (колоколообразная форма) Δ (рисунок 4.4, б) результатам соответствует нормальному закону распределения, что подчеркивает достоверность полученных с помощью неё прогнозов, выражаемых практически полным совпадением со значениями выходной переменной на квантиль-квантиль графиках (Q-Q) (рисунок 4.5).



а



б

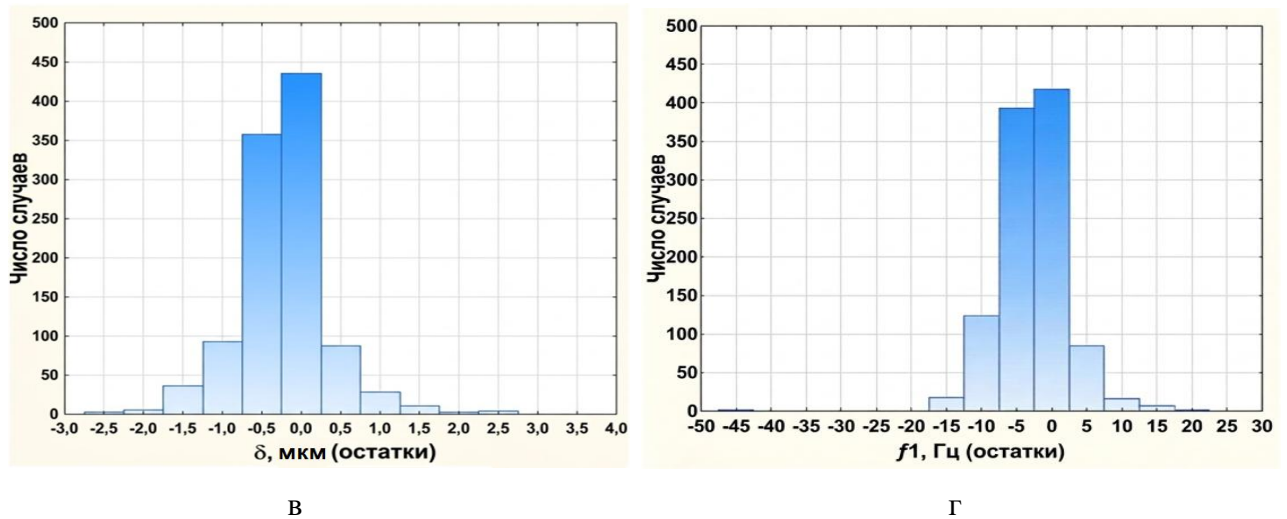


Рисунок 4.4. Гистограмма остатков НС 16. MLP 26-20-4

а – температура (T), б – биение шпинделя (Δ), в – упругое смещение переднего конца шпинделя (δ), г – собственная частота шпинделя (f_1)

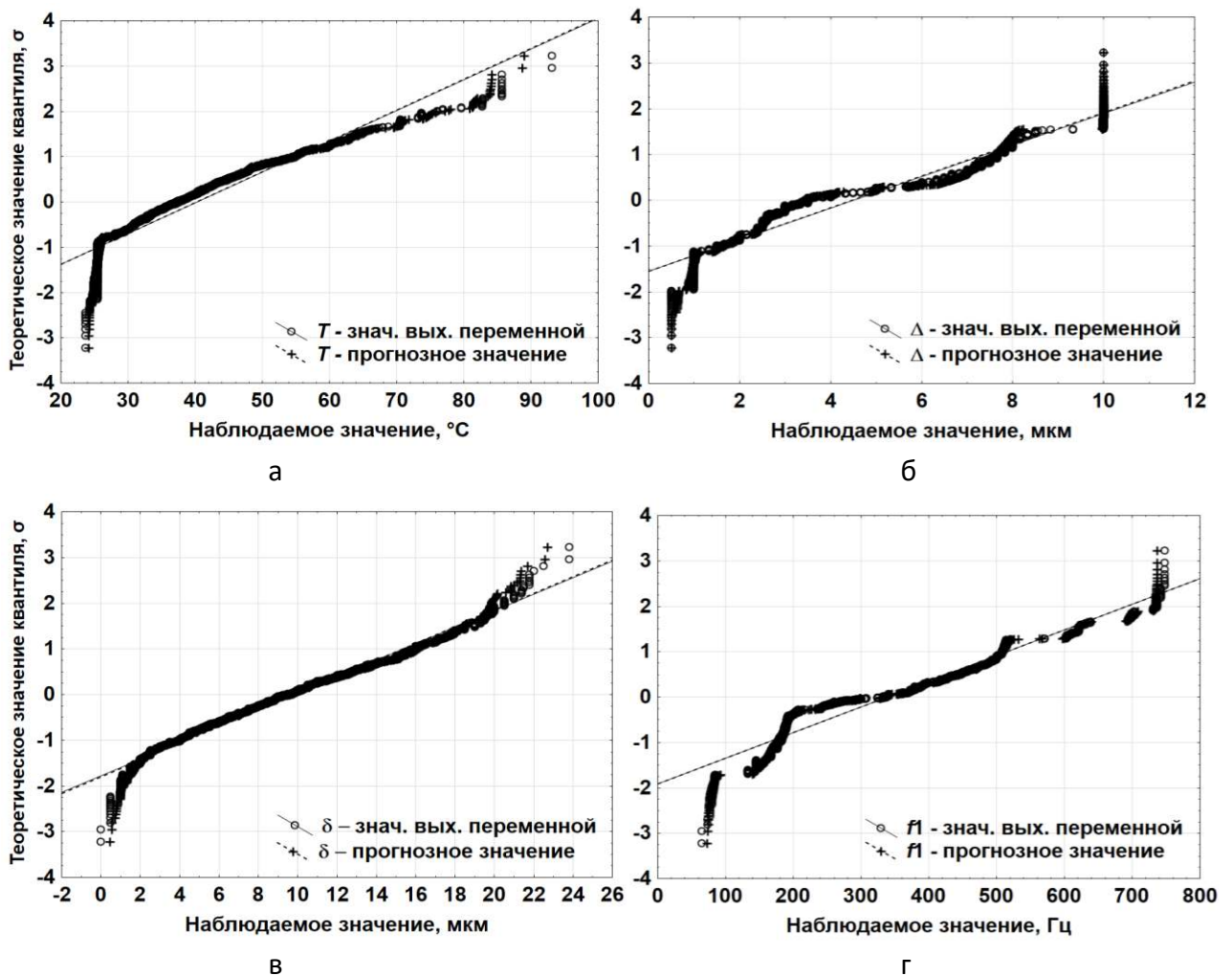


Рисунок 4.5. Квантиль-квантиль графики для НС MLP 26-20-4 для:

а – температура (T), б – биение шпинделя (Δ), в – упругое смещение переднего конца шпинделя (δ), г – собственная частота шпинделя (f_1)

По результатам анализа НС 16. MLP 26-20-4 обученной на интегрированном массиве данных и отражающим влияние режимных и настроечных параметров и конструктивного исполнения для переменных T , Δ , δ наблюдается качественная картина, подобная результатам, полученным для НС 58. MLP 3-7-3 в п. 2.2.2, учитывающей только режимные параметры. Это говорит о том, что внедрение такого обучающего массива, основанного не только на экспериментальных данных, но и на данных аналитических зависимостей и численного моделирования позволяет получать достоверные данные для различных конструктивных исполнениях и разных типоразмеров ШУ, определяемых размерами станка.

Проведенные исследования позволили получить границы обоснованных настроек для получения сети надлежащего качества:

- архитектура в виде многослойного персептрона (MLP);
- количество нейронов на скрытом слое от 15...16 до 24...25;
- ФА в виде гиперболического тангенса или логистической на скрытом слое, и гиперболического тангенса, логистической или линейной на выходном;
- метод обучения – BFGS;
- число эпох обучения – 300...700;
- число обучающих данных ~ 1000 наблюдений (строчек с входными переменными и соответствующими им откликами).

4.2. Оценка использования нейросетевой модели для прогнозирования эксплуатационных характеристик ШУ

Проектирование шпиндельных узлов (ШУ), вносящих наибольшую погрешность в обрабатываемые детали, зачастую основано на использовании классических аналитических моделей. Такие модели не способны на должном уровне реализовать, в частности, зависимости эксплуатационных характеристик ШУ от его конструктивных и режимных ПП, поскольку в таких моделях сложно учитывать взаимное влияние факторов. Целью данного этапа работы является сравнение качества классических моделей прогнозирования и моделей на основе нейронных сетей, относительно данных, полученных в ходе натурного эксперимента.

С целью оценки ошибки прогнозирования, вносимой рассмотренными аналитическими зависимостями (в п. 3.2.1 – 3.2.3) и НСМ, построенной на интегрированном обучающем наборе, было произведено сравнение значений полученных с помощью них, с результатами натурного эксперимента на идентичных режимах. Сравнение выполнено по стационарным режимам эксплуатации станка (режимам, предназначенным/используемым для расчета по аналитическим

зависимостям) и всем режимам (совокупности стационарных и режимов, зависящих от времени работы). В стационарных режимах оценивалось упругое смещение и биение переднего конца шпинделя для станка, находящегося в простое, с температурой подшипника, равной температуре окружающей среды, а для оценки температуры подшипника использовались значения установившегося теплового режима (режима при котором выделяющаяся в нём температура эффективно рассеивается стенками шпиндельной коробки и телом шпинделя). Подробное сравнение приведено в Приложении Г и показало, что значения, спрогнозированные НСМ в стационарных режимах для переменной: T – точнее на 9,7 %; Δ – точнее на 20,5 %; δ – точнее на 16 % . Сравнение для всех режимов (таблица 4.5) показало, что модель на основе НС точнее в прогнозировании ЭХ для переменной: T – на 9,5 %; Δ – на 30,2 %; δ – на 21,6 %.

Отдельным исследованием установлено, что отличие в прогнозировании значений натурального эксперимента между моделью, обученной только на экспериментальных данных и моделью обученной на интегрированном наборе, менее 1% (таблица 4.5). Это лишний раз свидетельствует о том, что включение в обучающий набор данных аналитических расчетов и численного моделирования не изменило его достоверность. Одновременно использование результатов расчетов позволило быстро получить значения ПП для широкого разнообразия конструкций ШУ, отсутствующих в эксперименте, то есть качественно и количественно расширить обучающий массив данных.

Таблица 4.5 - Ошибки методов прогнозирования ЭХ относительно данных натурального эксперимента

Метод прогнозирования	Средняя относительная ошибка прогнозирования ЭХ, %		
	T	Δ	δ
расчетные зависимости	11,6	39	32,4
линейная модель	7,2	13,6	29,2
нелинейная модель	8,3	31,8	34,1
НСМ обученная на данных натурального эксперимента	1,7	8,2	10,4
НСМ обученная на данных интегрированного набора	2,1	8,8	10,8

Низкие результаты расчетных зависимостей (таблица 4.5) обусловлены их ограниченностью – неспособностью прогнозировать ЭХ в зависимости от времени эксплуатации ШУ (для Δ и δ) и его настроечных параметров (для T).

Оценка НС выполнялась также в сравнении с регрессионными линейными (ЛМ) и нелинейными моделями (НМ) (таблица 4.5), построение которых осуществлялось в программе Statistica [37] на основе собранных экспериментальных данных (п. 2.1.1). Каждый тип моделей строился на 3-х наборах данных: 108, 232 и 481 наблюдений и различался составом (числом) переменных.

В первом наборе данных содержалось 108 наблюдений по 6-ти переменным (п. 2.1.1) режимных ПП: частота вращения шпинделя (n); сила (P), имитирующая нагрузку в процессе резания от сил P_z и P_y ; время работы (t_m) – входные переменные; температура в зоне наружного кольца подшипника передней опоры (T); биение переднего конца шпинделя (Δ); упругое смещение переднего конца шпинделя (δ) – выходные переменные.

Во втором наборе данных содержалось дополнительно к первому 124 наблюдения, что в сумме дало 232. Здесь добавилась переменная отражающая влияние настроечных ПП – влияние радиального зазора подшипника передней опоры (S).

В третьем наборе данных добавилось ещё 249 наблюдений. Общий объём набора стал равен 481 наблюдению. Здесь добавились интегральные переменные, отражающие влияние конструктивных проектных параметров ШУ: максимальный диаметр обрабатываемой детали (D_{max}); динамическая (C) и статическая (C_0) грузоподъемности подшипников передней опоры; номер конуса Морзе (kM); межопорное расстояние (l) и вылет (a) шпинделя; координата расположения приводного элемента ($l1$), принятая от положения передней опоры.

Выходные переменные 2-го и 3-го набора данных - согласно первому набору [36, 33].

Линейные и нелинейные модели способны реализовать зависимости от множества факторов (ПП) только для одного отклика (ЭХ), в то время как нейронные сети строят зависимости для множества откликов. Из-за возможностей программы в нелинейных моделях использованы 4 переменные [37], что полностью соответствует условиям только для 1-го набора данных, а для 2-го и 3-го был проведен отбор только значимых переменных.

Так, например, для прогнозирования T и Δ использованы входные переменные - S , n , t_m , а для δ - переменные S , n , P (таблица 4.6). Отмеченные в таблице 4.6 (полужирным) корреляции значимы при $p < 0,01$.

Таблица 4.6 - Определение значимых переменных

Переменная	Корреляции		
	T	Δ	δ
S	-0,292	0,107	0,227
n	0,95	0,643	-0,174

t_m	0,394	0,334	-0,087
P	-0,19	-0,037	0,956

В программе Statistica возможно построение нелинейных моделей следующих видов:

- квадратичная функция (x^2);
- кубическая функция (x^3);
- полиномиальная функция 4-й степени (x^4);
- полиномиальная функция 5-й степени (x^5);
- функция квадратного корня ($\sqrt{x}$);
- натуральный логарифм ($\ln x$);
- десятичный логарифм ($\log_{10} x$);
- экспоненциальная функция (e^x , диапазон $-40 \leq x \leq 40$);
- экспоненциальная функция (e^x , диапазон $-18 \leq x \leq 18$);
- обратная (гиперболическая) функция ($1/x$, $x \neq 0$).

Нелинейные модели для прогнозирования T строились с использованием натурального логарифма $\ln x$, они имеют вид:

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_1' \ln(x_1) + b_2' \ln(x_2) + b_3' \ln(x_3); \quad (4.1)$$

для прогнозирования Δ и δ использованы полиномы различной степени – $x^2 \dots x^5$, к примеру, для Δ на 108 и 232 наблюдениях формула такой модели следующая:

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_1' x_1^2 + b_2' x_2^2 + b_3' x_3^2; \quad (4.2)$$

для переменной δ при 481-м наблюдении:

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_1' x_1^3 + b_1'' x_1^5 + b_2' x_2^3 + b_2'' x_2^5 + b_3' x_3^3 + b_3'' x_3^5. \quad (4.3)$$

Линейные модели строились согласно формуле:

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \dots + b_n x_n. \quad (4.4)$$

В таблицах 4.7...4.9 представлены формулы полученных моделей для каждого отклика при различном объеме набора наблюдений и составе входных переменных [37].

Нейронные сети имеют три нейрона на выходном слое и поэтому прогнозируют сразу три выходных переменных. Для каждой модели в таблицах 4.7...4.9 также приведен коэффициент детерминации R^2 , характеризующий качество построенных моделей и показывающий насколько они объясняют изменчивость соответствующих переменных. Чем он ближе к 1, тем лучше модель объясняет зависимые переменные. Для нейросетей этим показателем является

параметр «производительность» на тестовом множестве, который записывается одним значением сразу для всех выходных переменных.

Таблица 4.7 - Сравнение моделей на 108 наблюдениях

Вид модели	R^2	Формула модели
ЛМ	0,88	$T = 24,72718 + 0,01518n + 0,0465t_m - 0,00029P$
	0,174	$\Delta = 6,18123 + 0,000489n + 0,002362t_m + 0,000045P$
	0,899	$\delta = 0,520701 - 0,000654n - 0,000672t_m + 0,005091P$
НМ	0,992	$T = -27,5236 + 0,0111n - 0,0316t_m - 0,0001P + 5,5623\ln(n) + 6,2082\ln(t_m) - 0,1831\ln(P)$
	0,339	$\Delta = 5,572131 + 0,001968S + 0,007488n + 0,000139t_m - 0,000001S^2 - 0,00004n^2$
	0,989	$\delta = 0,336734 + 0,000029n - 0,024647t_m + 0,003662P - 0,000001n^2 + 0,000314t_m^2 - 0,000001t_m^3 + 0,000001P^2$
НС	0,863	$T\Delta\delta = \text{MLP 3-7-3}; f(x) = \frac{e^{2x}-1}{e^{2x}+1}$ (скрытый слой); $f(x) = x$ (выходной слой)

Таблица 4.8 - Сравнение моделей на 232 наблюдениях

Вид модели	R^2	Формула модели
ЛМ	0,884	$T = 28,53123 - 0,90474S + 0,01473n + 0,0447t_m - 0,0003P$
	0,427	$\Delta = 5,722491 + 0,053751S + 0,000895n + 0,003333t_m - 0,000001P$
	0,869	$\delta = -1,78149 + 0,62463S - 0,00012n + 0,00193t_m + 0,00466P$
НМ	0,989	$T = -21,9147 - 0,3218S + 0,0121n - 0,0325t_m - 1,1395\ln(S) + 4,6039\ln(n) + 6,3716\ln(t_m)$
	0,54	$\Delta = 5,539082 - 0,14935S + 0,001768n + 0,010255t_m + 0,036089S^2 - 0,000054t_m^2$
	0,97	$\delta = -2,46489 - 1,71458S + 0,0012n + 0,0043P + 1,40207S^2 - 0,18092S^3$

НС	0,916	$T\Delta\delta = \text{MLP } 4-14-3; f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ (скрытый слой); $f(x) = x$ (выходной слой)
----	-------	--

Таблица 4.9 - Сравнение моделей на 481 наблюдении

Вид модели	R^2	Формула модели
ЛМ	0,81	$T = 32,56431 + 0,00214D_{\max} - 3,85035K_M - 0,00864C - 0,00104C_0 - 0,00577l_1 + 0,20942a - 0,01054l - 1,0922S + 0,01135n + 0,05204t_m - 0,00019P$
	0,873	$\Delta = -2,11233 - 0,00778D_{\max} + 0,69295K_M - 0,00382C - 0,00279C_0 - 0,00592l_1 + 0,04052a + 0,0088l + 0,09394S + 0,00028n + 0,00235t_m - 0,00003P$
	0,84	$\delta = 11,66764 - 0,0013D_{\max} - 1,94521K_M - 0,00679C - 0,00164C_0 - 0,00309l_1 + 0,02802a - 0,00465l + 0,51119S - 0,00027n - 0,001t_m + 0,00373P$
НМ	0,803	$T = -33,3976 - 2,5415S + 0,0039n - 0,0299t_m + 0,9211\ln(S) + 7,7584\ln(n) + 6,2192\ln(t_m)$
	0,619	$\Delta = 4,83574 - 3,95849S + 0,00171n - 0,00267t_m + 2,28296S^2 - 0,27908S^3 + 0,00009t_m^2$
	0,881	$\delta = -5,31895 + 4,1876S + 0,00004n + 0,00497P - 0,31766S^3 + 0,00718S^5$
НС	0,986	$T\Delta\delta = \text{MLP } 11-22-3; f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ (скрытый слой); $f(x) = e^{-ax}$ (выходной слой)

В нелинейных моделях для прогнозирования T наилучшие результаты показали модели на основе натурального логарифма $\ln x$ (4.1), а для прогнозирования Δ и δ более подходящими оказались полиномиальные модели разных степеней $x^2 \dots x^5$ (4.2) (4.3).

Зависимость, прогнозируемая нейронной сетью, не имеет простой записи, как линейные или полиномиальные модели. Вместо этого её запись отражает архитектуру сети и процесс преобразования данных через слои. Например, для многослойного персептрона (MLP) с одним скрытым слоем это можно схематично представить так:

Продолжение таблицы 4.10

n --> hn5	0,647	ib--> hn5	0,010	hn5 --> T	-0,077	hn5 --> Δ	-0,808	hn5 --> δ	-1,006
tm --> hn5	0,085								
P --> hn5	-0,941								
n --> hn6	0,493	ib--> hn6	-0,455	hn6 --> T	-0,175	hn6 --> Δ	-1,409	hn6 --> δ	0,627
tm --> hn6	-0,421								
P --> hn6	0,973								
n --> hn7	-0,532	ib--> hn7	0,330	hn7 --> T	1,55	hn7 --> Δ	0,47961	hn7 --> δ	-1,03069
tm --> hn7	-0,487								
P --> hn7	0,309								
				hb--> T	0,217	hb--> Δ	0,343	hb--> δ	0,657

По таблице весов можно определить:

- влияние входных переменных. Так частота вращения шпинделя (n) оказывает разнонаправленное воздействие на скрытые нейроны: от сильного отрицательного (hn2: -1,344) до положительного (hn3: 1,285). Это указывает на её комплексную роль в модели;
- вклад скрытых нейронов в выходы. Скрытые нейроны по-разному влияют на выходные переменные. Например: hn4 сильно коррелирует с температурой (T : 1,679), но подавляет биение (Δ : -0,792); hn1 и hn6 оказывают противоположное влияние на упругое смещение (δ): -0,382 и 0,627 соответственно; нейроны с малыми весами (hn5 -> T : -0,077) играют второстепенную роль;
- нелинейность модели. Знаки и величины весов (например, hn3 -> Δ : 1,351 и hn6 -> Δ : -1,409) подчеркивают способность сети моделировать сложные взаимодействия факторов.

На рисунках 4.6 и 4.7 показаны квантиль-квантиль графики. Они используются для проверки соответствия значений выходных переменных и значений прогноза нормальному распределению.

Если точки на графике близки к прямой линии, то это свидетельствует о нормальном распределении данных. Отклонения от линии указывают на отклонение от нормального распределения.

В данной работе график анализирует остатки модели (разницу между прогнозируемыми и наблюдаемыми значениями), чтобы проверить их нормальность — важное условие для многих статистических моделей.

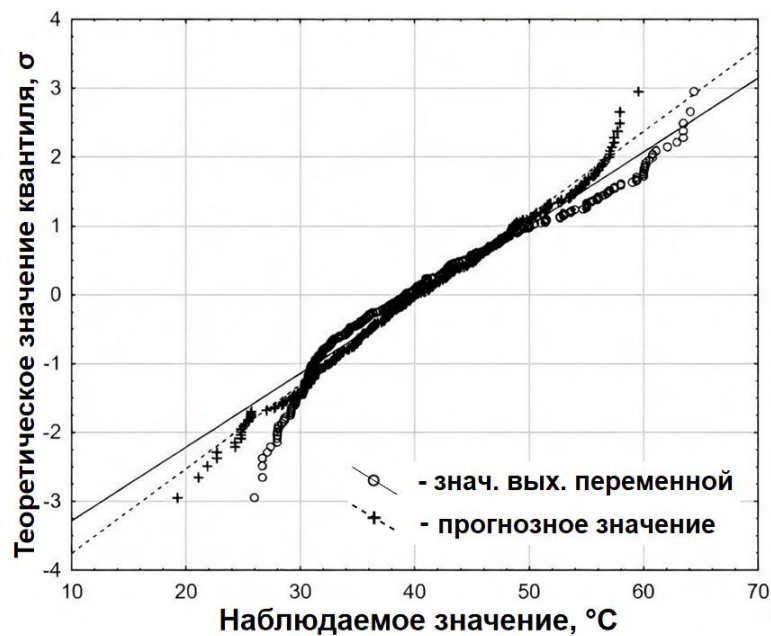
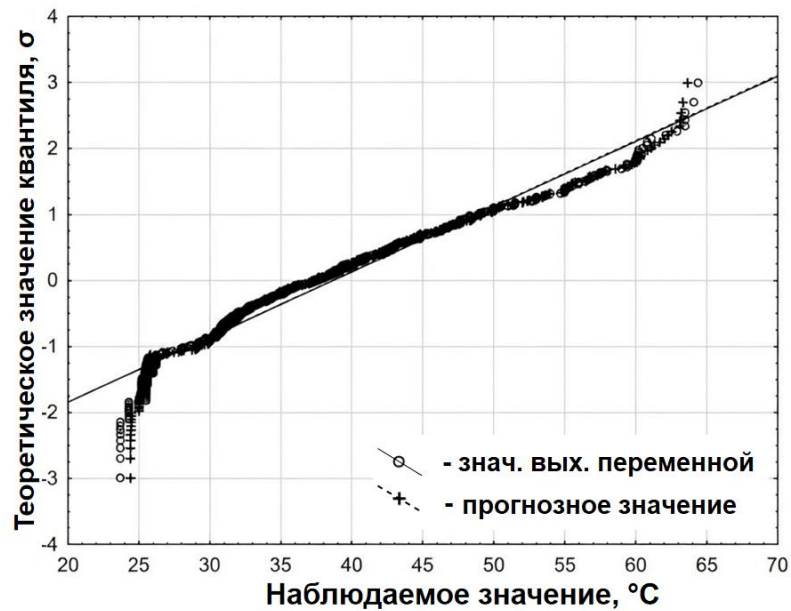


Рисунок 4.6. Квантиль-квантиль графики для переменной T на 481 наблюдении, спрогнозированные: а — нейросетью; б — нелинейной моделью

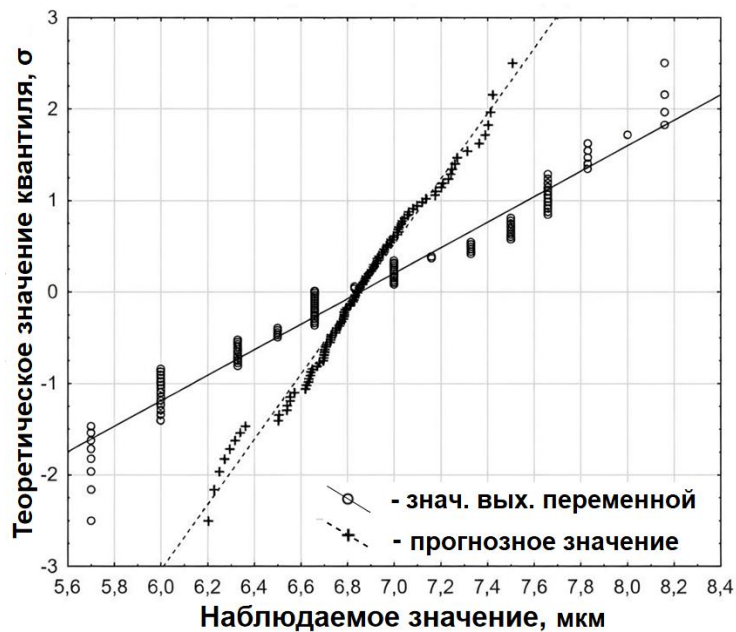


Рисунок 4.7. Квантиль-квантиль график для переменной Δ на 108 наблюдениях, спрогнозированный линейной моделью

У нейросетей на квантиль-квантиль графике прогнозные значения во многом совпадают с целевыми на всех размерах наблюдений 108-481 и по всем переменным. Данную качественную картину можно наблюдать в частности на рисунке 4.6, а, в то время как у других моделей этот показатель хуже (рисунок 4.6, б) либо прогнозные значения сильно отличаются (рисунок 4.7), но при этом остатки модели соответствуют нормальному распределению.

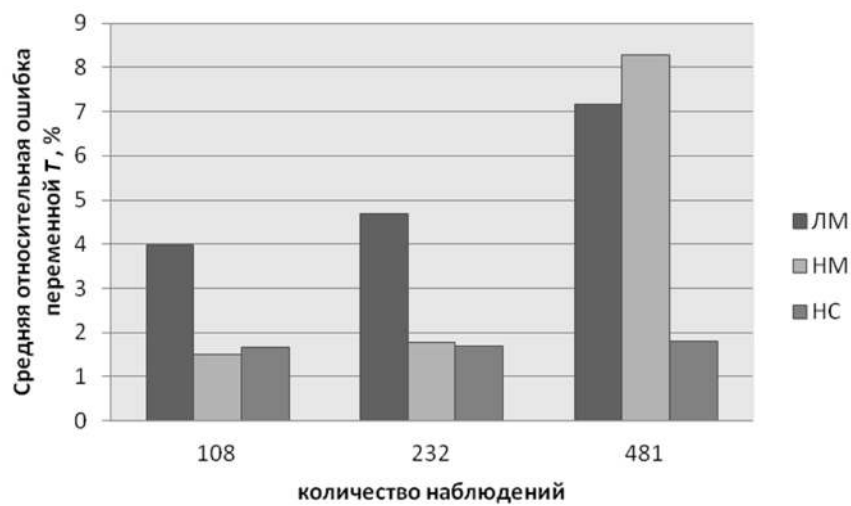
Качество полученных регрессионных моделей и нейронных сетей дополнительно оценено по критерию средней относительной ошибки [37]. Результаты представлены в таблице 4.11.

Ошибки ЛМ и НМ в сравнении с данными 481-го наблюдения отображены в сводной таблице методов прогнозирования ЭХ (таблица 4.5).

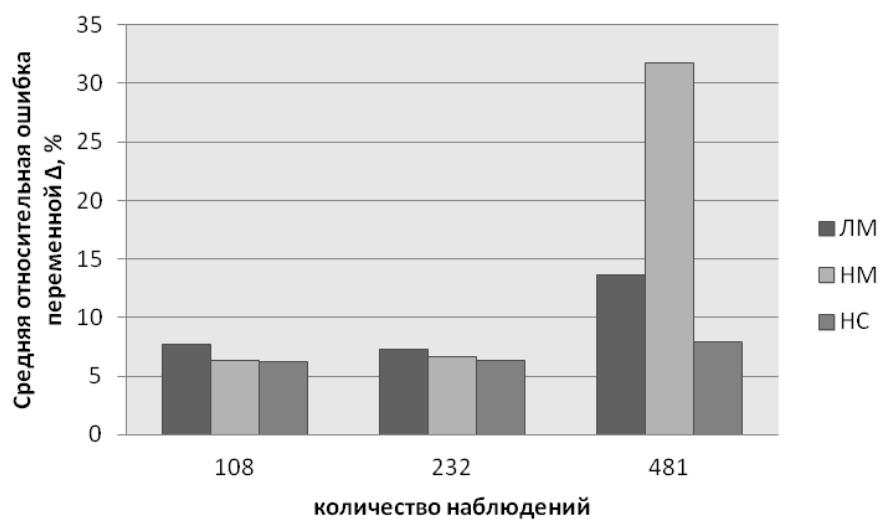
Таблица 4.11 - Сравнение математических моделей и нейронных сетей

Число набл.	Средняя относительная ошибка прогнозируемых переменных								
	$T, \%$			$\Delta, \%$			$\delta, \%$		
	ЛМ	НМ	НС	ЛМ	НМ	НС	ЛМ	НМ	НС
108	3,97	1,51	1,67	7,71	6,35	6,25	12,74	7,7	9,72
232	4,69	1,78	1,69	7,27	6,69	6,34	19,4	17,94	13,02
481	7,16	8,29	1,8	13,59	31,79	7,91	29,22	34,08	10,88

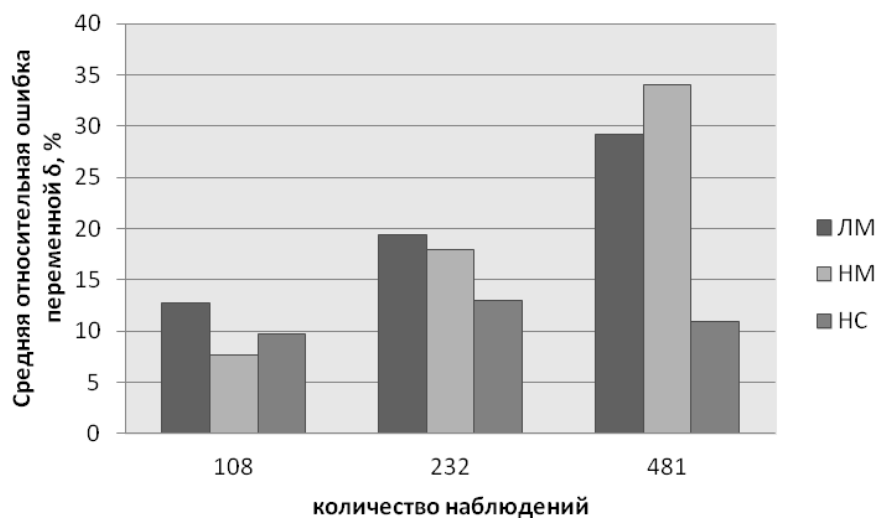
Для удобства восприятия по данным таблицы 4.11 построены гистограммы (рисунок 4.8) параллельного сравнения моделей по выходным переменным для разного числа наблюдений.



а



б



в

Рисунок 4.8. Сравнение средней относительной ошибки моделей по переменным:

а – T ; б – Δ ; в – δ

Из анализа таблиц 4.7...4.9, 4.11 и гистограмм (рисунок 4.8) можно сделать несколько выводов:

- линейные модели имеют стабильно невысокое качество. Особенно это наглядно видно при прогнозировании T ;
- нелинейные модели, полученные на малом объеме экспериментальных данных, для отдельных переменных дают точность даже выше чем у нейронных сетей и могут с ними конкурировать. При бóльшем составе переменных их качество заметно снижается, что, возможно, обусловлено отсутствием сведений от неучтенных переменных;
- модели на основе нейронных сетей отличаются стабильно низкой ошибкой, которая не зависит ни от размеров наблюдений (набора данных), ни от состава переменных. Причем низкую ошибку они способны давать и при малом числе переменных, где они уязвимы ввиду отсутствия или ограниченного количества возникающих скрытых корреляций, в учете которых заключается одно из главных их преимуществ.

Проведенный сравнительный математический анализ показывает, что нейронные сети качественно отличаются от линейных и нелинейных моделей, обеспечивая бóльшую независимость от условия получения значений входных переменных. Это подтверждается тем, что у нейросетей меньше средняя относительная ошибка, преимущественно больше коэффициент детерминации, который лишь увеличивается с ростом количества наблюдений и расширением состава переменных, лучшее соответствие спрогнозированных значений выходных переменных нормальному закону распределения. Все это свидетельствует, что применение нейросетей в качестве инструмента для комплексного (многофакторного) прогнозирования эксплуатационных свойств ШУ предпочтительнее. Линейные и нелинейные же модели могут применяться для решения локальных задач с малым количеством факторов.

4.3. Выводы по главе 4

1. В результате автоматического построения 1500 сетей и проведения двухэтапного отбора получена архитектура MLP 26-20-4 с 20 нейронами в скрытом слое. Использование логистической функции активации на выходном слое позволило сократить количество нейронов в скрытом слое (по сравнению с линейной активацией), при этом повысить качество прогноза для отдельных переменных Δ и δ , на 1,8 % и 4 % соответственно.

2. Нейросеть MLP 26-20-4 демонстрирует высокую точность прогноза на тестовой выборке со средней относительной ошибкой для: температуры (T) — 1,7 %; биения (Δ) — 6,05 %; упругого смещения (δ) — 7,1 %; собственной частоты (f_1) — 1,6 %. Это подтверждает, что

введение интегрированного обучающего набора данных позволяет получать качественные НСМ. При этом расширяются диапазоны варьирования переменных отражающих конструктивные исполнения и типоразмеры ШУ и снижаются затраты получения интегрированного набора.

3. Высокая точность НС модели достигнута путем применения следующих настроек обучения:

- использование архитектуры многослойного персептрона (MLP) с числом нейронов скрытого слоя от 15 до 25;
- применение функций активации: гиперболический тангенс или логистическая на скрытом слое; гиперболический тангенс, логистическая или линейная — на выходном;
- обучение методом BFGS с числом эпох 300–700;
- объём обучающей выборки — около 1000 наблюдений.

4. Сравнение линейной и логистической функций активации показало, что логистическая позволяет нейросети лучше моделировать поведение в неизвестных интервалах входных параметров, но с более «осторожной» ограниченной экстраполяцией.

5. Нейронные сети обеспечивают более высокое качество прогнозирования ЭХ ШУ по сравнению с аналитическими моделями. Значения, спрогнозированные нейросетевой моделью, точнее для переменной: T — на 9,5 %; Δ — на 30,2 %; δ — 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.

ГЛАВА 5. Реализация генеративного проектирования шпиндельных узлов путем применения программного обеспечения на основе нейронных сетей

5.1. Моделирование проектных параметров ШУ с помощью нейронных сетей

На основе НС прогнозирования ЭХ ШУ с учетом расширенного количества параметров (п. 4.1.2) создана программа Neural SpU [128] (Приложение Д). Для работы этой программе требуются значения входных переменных – ПП ШУ. Обоснованием этих ПП занимается ЛПР на основе своего опыта, накопленного опыта предшественников и конструкций аналогов. Зачастую на этот этап требуется значительная трудоемкость выражаемая, в том числе в затрачиваемом времени. Поэтому в данном разделе будет рассмотрен вопрос снижения времени обоснования ПП путём применения нейросетей, для чего потребуется создать новую сеть – сеть генерации ПП.

Для построения НС моделирования (генерации) ПП (ШУ) требуется набор обучающих данных, содержащий в выходных переменных значения обоснуемых ПП, входными же переменными при этом могут выступать отдельные значащие параметры, характеризующие ШУ в целом, которые, как правило отражены в техническом задании (ТЗ).

Из вышесказанного можно сделать вывод, что для обучения НС моделирования/генерации ПП требуется поменять местами входной и выходной слою ранее обученной НС MLP 26-20-4 с содержащимися в нём переменными, тем самым решить как бы обратную задачу определения ПП по каким-то интегральным показателям. Подобная задача решалась в работе [71] для определения конструктивных параметров ШУ в зависимости от вида обработки (черновая, получистовая, чистовая). Работа показала, что ПП ШУ действительно можно определить/назначить по интегральным параметрам.

При проектировании ШУ металлорежущих станков зачастую требуется обеспечить все три режима обработки в одной конструкции, в таком случае интегральные ПП можно взять из ТЗ, где, как правило, указывается максимальный диаметр обработки и связанный с ним максимальный диаметр шпинделя [14, 26], а также задается требуемая точность вращения шпинделя (биение), определяющая принадлежность станка к определенному классу точности. Для токарно-винторезных станков по ГОСТ 18097-2024 допуск на биение шпинделя для станков классов точности Н составляет для $D_a \leq 800$ мм 10 мкм, для $D_a > 800$ мм - 15 мкм; для станков классов точности П, В и А - 7 мкм; 5 мкм и 3 мкм соответственно.

Обучение НС моделирования/генерации ПП происходило в соответствии с настройками п. 2.2.1 и п. 4.1.2. Настройки процесса обучения НС генерации ПП включали 17...26 нейронов

скрытого слоя, но отличались тем, что входной слой состоял из 2-х нейронов – это переменные: максимальный диаметр шпинделя (определял размерные характеристики) и биение (определял точностные характеристики), выходной слой содержал 21 нейрон – переменными которых были ПП, зависящие только от конструктивного исполнения ШУ. ФА на скрытом и выходном слое были хорошо себя зарекомендовавшие – логистическая и гиперболический тангенс. НС строились в автоматическом режиме в количестве 500-та сетей, из которых программой отбиралось 10 наилучших. Алгоритм обучения - BFGS. Список наилучших сетей приведен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Сводная таблица автоматически отобранных сетей

№ сети	Архитектура сети	Производительность			Ошибка			Метод обучения	Функция ошибок	ФА на скрытом слое	ФА на выходном слое
		обучение	тест	контроль	обучение	тест	контроль				
1	MLP 2-22-21	0,9433	0,9233	0,9264	50549	61362	76059	BFGS 1325	SOS	Tanh	Tanh
2	MLP 2-25-21	0,9485	0,9357	0,9334	45512	53510	68184	BFGS 2208	SOS	Logistic	Tanh
3	MLP 2-20-21	0,9443	0,9278	0,9263	45694	54054	79117	BFGS 9999	SOS	Logistic	Tanh
4	MLP 2-24-21	0,9443	0,9258	0,9281	57656	79811	82337	BFGS 860	SOS	Logistic	Tanh
5	MLP 2-25-21	0,9455	0,9284	0,9298	48400	59560	68707	BFGS 1285	SOS	Logistic	Tanh
6	MLP 2-23-21	0,9432	0,9201	0,9237	49957	56974	75922	BFGS 4601	SOS	Tanh	Tanh
7	MLP 2-25-21	0,9424	0,9277	0,9265	48100	58045	86739	BFGS 1046	SOS	Logistic	Tanh
8	MLP 2-22-21	0,9437	0,9265	0,9294	56009	52800	78574	BFGS 1167	SOS	Logistic	Tanh
9	MLP 2-26-21	0,9418	0,9231	0,9270	71416	81420	72737	BFGS 1223	SOS	Tanh	Tanh
10	MLP 2-26-21	0,9425	0,9260	0,9253	47124	55635	69148	BFGS 1084	SOS	Logistic	Tanh

По полученной таблице можно наблюдать, что моделирование такой задачи несколько усложнилось, о чем красноречиво свидетельствует снизившееся значение коэффициента детерминации с $R^2 = 0,99$ для НС таблица 4.7 (п. 4.2.2) до $R^2 \approx 0,94$ для НС текущего анализа. Число вычислительных нейронов скрытого слоя выросло относительно НС MLP 26-20-4 п. 4.2.2 с 20-ти до 25-ти, а число эпох обучения превысило 1000, в то время как для НС моделирования ЭХ было достаточно до 700, т.е. трудоемкость вычислений на подгонку весов НСМ выросла более чем на 30...40 %.

Из таблицы 5.1 по критериям наибольшей производительности и наименьшей ошибки обучения на обучающей, тестовой и контрольной выборки была отобрана НС с номером 2 и архитектурой MLP 2-25-21 (рисунок 5.1). Коэффициенты корреляции выходных переменных этой НС преимущественно $> 0,9$, лишь для отдельных параметров опор и расположения приводного элемента имеют значения, равные 0,84...0,88 (таблица 5.2).

Качество НС 2.MLP 2-25-21 дополнительно оценено по критерию средней относительной ошибки, которая несколько увеличилась по сравнению с НС 16.MLP 26-20-4 в целом находясь на уровне до 10 %, но для 3-х переменных (таблица 5.2) превысила этот порог на 4 %. При этом ошибка продолжает оставаться приемлемой для проведения инженерных расчетов.

Таблица.5.2 - Результаты анализа НС 2. MLP 2-25-21 при генерации ПП ШУ

сеть	Коэффициенты корреляции										
	H_w	W_w	B_w	X_{cw}	Y_{cw}	dow	now	$n2$	$n1$	$KT2$	$KT1$
	0,93	0,93	0,98	0,91	0,93	0,97	0,95	0,84	0,99	0,88	0,85
2.MLP	Средняя относительная ошибка, %										
2-25-21	5,52	7,0	3,1	7,52	5,8	3,23	14,0	10,5	2,37	4,91	5,75

Продолжение таблицы 5.2

сеть	Коэффициенты корреляции									
	$l1$	l	a	n_{max}	$d0$	$d3$	$d1$	d	$d2$	$sbt1$
	0,87	0,91	0,99	0,93	0,97	0,95	0,94	0,96	0,97	0,98
2.MLP	Средняя относительная ошибка, %									
2-25-21	12,0	8,0	2,0	6,04	5,34	6,03	6,88	4,28	4,2	3,03

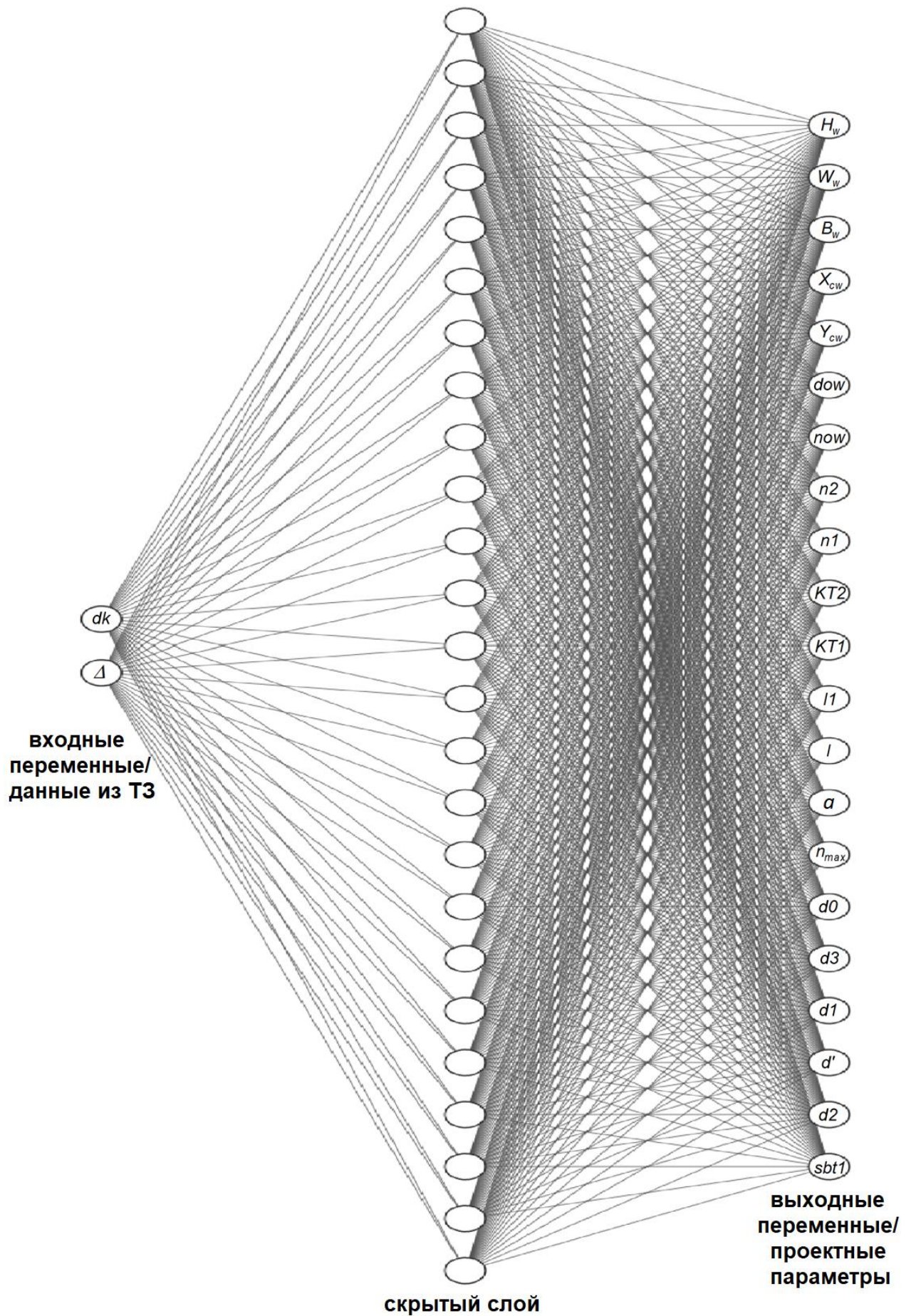


Рисунок 5.1. Архитектура НС MLP 2-25-21

5.2. Методика генеративного проектирования ШУ на основе нейронных сетей

Процесс классического проектирования (ШУ) при совместном применении разработанных программ Neural SpU (Приложение Д) - нейросетевого моделирования ЭХ ШУ и Neural GenSpU (Приложение Е) – генерации ПП ШУ эволюционирует до генеративного [39].

Основные особенности классического и генеративного проектирования по различным критериям приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Особенности классического и генеративного проектирования

Критерий	Рациональное проектирование	Генеративное проектирование
Основная цель	Найти логичное, работоспособное решение	Исследовать множество нетривиальных решений, созданных ИИ
Процесс	Линейный, этапный	Эволюционный, алгоритмический поиск в облаке
Роль человека	Конструктор - главный создатель и эксперт	Конструктор - "куратор", задающий цели и выбирающий из вариантов
Результат	Одно или несколько явных решений	Множество альтернативных, часто неочевидных концепций
Математическая основа	Логика, эвристики, расчеты	Эволюционные алгоритмы, машинное обучение, топологическая оптимизация

Тогда схема генеративного проектирования, взятая в качестве прототипа – рисунок 1.21 п. 1.3.2 применительно к проектированию ШУ примет вид – рисунок 5.2.

Рассмотрим предлагаемую методологию генеративного проектирования ШУ (рисунок 5.2) [39]. Проектирование начинается с технического задания (ТЗ) и оканчивается техническим проектом.

- проектирование без участия компьютерных программ генерации данных (средняя ветвь). Это классическое проектирование, где от ТЗ до технического проекта ведутся расчеты лицом, принимающим решение (ЛПР), по апробированным методикам (аналитические расчеты и численное моделирование) и накопленному опыту предшественников;

- проектирование с использованием программы нейросетевого прогнозирования ЭХ ШУ (Neural SpU - программы поддержки инженерных решений). При таком подходе расчет выходных показателей (ЭХ) ведется параллельно ЛПР (средняя ветвь) и программой Neural SpU (ле-

вая ветвь). Здесь у ЛПР появляется возможность сравнивать результаты своего расчета с расчетами программы, в которой можно их быстро пересчитывать, меняя проектные параметры. Таким образом, ЛПР получает сводную таблицу вариантов ЭХ ШУ и соответствующих им проектных параметров (ПП), откуда, выберет подходящий и сравнит со своим вариантом расчета. В случае, если ЛПР устроит полученный результат, он переходит к составлению технического проекта. В противном случае возвращает его на уточнение и доработку;

- генеративное проектирование ШУ на основе требуемых ЭХ в зависимости от сгенерированных ПП. При таком проектировании к уже рассмотренным ветвям добавляется правая ветвь – программа нейросетевого назначения (генерации) ПП (Neural GenSpU). Она позволяет ЛПР исключить или взаимодополнить этап обоснования ПП путем их генерации по интегральным параметрам, приведенным в ТЗ (точность вращения шпинделя и размеры его переднего конца). В случае ввода нескольких предполагаемых интегральных параметров будет получена сводная таблица ПП, аналогично тому, как это осуществляется при использовании Neural SpU в левой ветви. То есть у ЛПР снова возникает возможность выбора из нескольких вариантов. После назначения ЛПР (либо программой Neural GenSpU) варианта ПП для них производится детальный расчет ЭХ, который как было указано выше, ведётся ЛПР и программой Neural SpU параллельно.

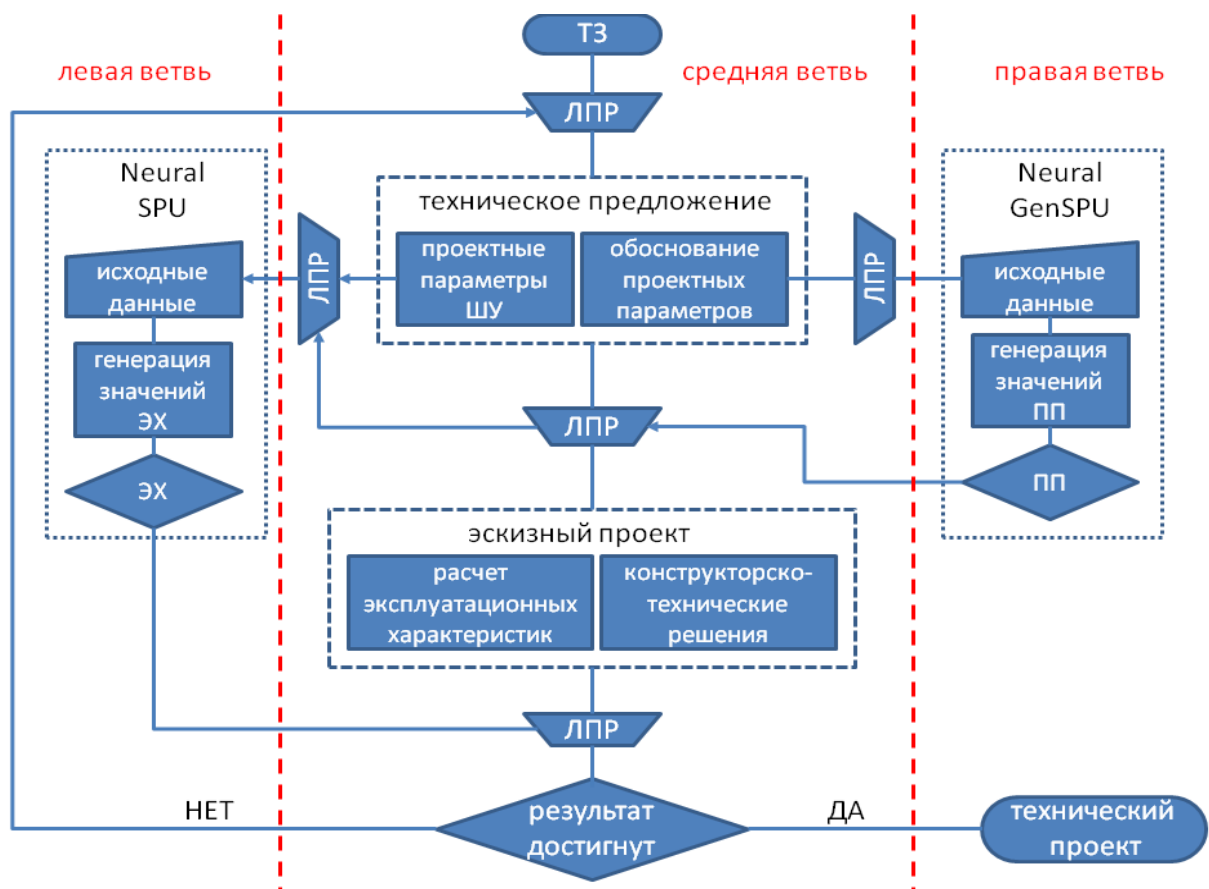


Рисунок 5.2. Схема генеративного проектирования ШУ

Из схемы на рисунке 5.2 видно, что на протяжении всего расчета ЛПР несколько раз сравнивает свои результаты с результатами программ нейросетевой генерации данных (ПП и ЭХ), отвергает, смешивает или усредняет их. И, проводя повторный расчет ЭХ по вновь скорректированным ПП, уточняет ЭХ. То есть в процессе своего взаимодействия программы Neural SpU, Neural GenSpU и ЛПР постоянно будут «подсказывать» друг другу исходные данные, давшие в предыдущем варианте расчета наилучшие ЭХ, и тем самым постоянно сужать область принимаемых решений, получая все более обоснованные значения ПП. Для реализации схемы такого итеративного процесса необходимо после каждого нового (отличного от предыдущих) результата, полученного при совместной работе ЛПР и программ генерации ПП и ЭХ, повторно обучать каждую из сетей. В случае же исключения обучения сетей новыми полученными результатами, необходимость использования программы Neural GenSpU (назначения ПП), возникает лишь единожды – при предварительной оценке ПП.

Основная идея предложенной методологии проектирования заключается в «сотрудничестве» между проектировщиком и компьютерными программами на основе НС, которые взаимодополняют друг друга определенными возможностями. С одной стороны, сортировка больших объемов данных, генерация и анализ большого количества результатов, поиск наилучших решений и итеративное улучшение решения. С другой стороны, реальный опыт, глубокие знания, понимание проблематики данной области. Алгоритм (НС), получив четко сформулированную задачу, может перебрать десятки и сотни вариантов решений, которые человек физически не мог бы рассмотреть, и предложить более эффективные и зачастую неочевидные конструкции.

5.3. Реализация генеративного проектирования ШУ

ТЗ: необходимо спроектировать ШУ металлорежущего станка:

1) Исполнение А - с классом точности П (по ГОСТ 8, биение шпинделя до 7 мкм) для черновой и чистовой обработки деталей из стали, чугуна и алюминия с максимальным диаметром до 160мм;

2) Исполнение Б - с классом точности В (по ГОСТ 8, биение шпинделя до 5 мкм) для получистовой и чистовой обработки деталей из стали, чугуна и алюминия с максимальным диаметром до 160 мм.

Обоснование ПП:

При проектировании ШУ необходимо обеспечить различные режимы обработки от черновой до чистовой, тогда согласно справочникам рекомендуемые значения для них будут (таблица 5.4):

Таблица 5.4 - Рекомендуемые режимы резания

Параметр режима резания	Стадия обработки		
	Черновая	Получистовая	Чистовая
Глубина резания, мм	4,4	1	0.6
Табличная подача, мм/об	0,35	0,27	0.14
Скорректированная подача, мм/об	0,21	0,16	0,09
Табличная скорость резания, м/мин	197	241	430
Скорректированная скорость резания, м/мин	67	96	137
Фактическая частота вращения шпинделя, об/мин	400	630	800
Фактическая скорость резания, м/мин	64,8	100	125,6

Мощность электродвигателя, который следует установить на станке, определяется по формуле

$$N_{эл.дв} = \frac{N_{эф}}{\eta \cdot K}, \quad (5.1)$$

где, $N_{эф}$ – эффективная мощность резания, определяемая с учетом таблица 10;

η - КПД цепи главного движения, который для станков токарной группы можно принять $\eta = 0,7 \dots 0,85$;

K - коэффициент перегрузки двигателя, который для универсальных станков принимается в среднем $K = 1,25$.

Откуда следует $N_{эф} = 5,5$ кВт.

Тогда согласно (5.1) $N_{эл.дв.} = 5,8$ кВт.

Выбираем по каталогу электродвигателей – асинхронный двигатель 4A132S4Y3, $N = 7,5$ кВт, $n = 1500$ об/мин.

Назначение ПП:

Назначение ПП ШУ проведено с учетом мощности выбранного электродвигателя $N_{эл} = 7,5$ кВт. На первом этапе согласно п. 1.1.2.8 производится выбор основных размеров шпинделя с учетом рекомендуемых диапазонов. От этого этапа будет зависеть идентификация конструкции узла в целом. Для получения объективной конструкции узла необходимо задаться какими

то начальными параметрами ими могут быть средние значения из диапазонов. Дальнейшей вариацией которых уже обеспечиваются, требуемые ЭХ по какому то одному или нескольким параметрам.

Начальные/стартовые значения могут назначаться ЛПП или/и программой Neural GenSpU, т.е. тут могут быть получены два варианта ПП, каждый из которых может быть проверен по критериям ЭХ. Такую проверку на основе расчета может провести как ЛПП – подтвердив тем самым правильность предложенных значений ПП или же отвергнуть их, или/и за него это сделает программа Neural SpU. И на каждый из двух первоначальных вариантов ПП будет получено ещё по два (скорректированных, уточненных) расположенных на схеме рисунок 5.2 (п. 5.2) в блоках «ЛПП» после технического предложения и эскизного проекта. Таким образом, получится 4-е варианта, по которым уже можно судить о влиянии факторов на ЭХ ШУ и проводить корректировку ПП. Подобная корректировка параметров может привести к серьезному пересмотру ранее назначенных значений ПП.

Вариант для исполнения А

Вариант 1

Диаметр в передней опоре $d' = P/(0,1...0,35)/2$,

где P - мощность электродвигателя $d' = 7,5/0,23 = 35$ мм (округлено под наибольший ближайший размер подшипника из стандартного ряда).

Диаметр в задней опоре $d_3 = (0,8...0,9)d' = 0,85 \cdot 35 = 30$ мм (округлено под наибольший ближайший размер подшипника из стандартного ряда)

Диаметр между опорами $d_1 = (0,8...1,0)d = 0,9 \cdot 35 = 31,5$ мм

Диаметр консольной части $d_2 = (1,0...1,2)d = 1,1 \cdot 35 = 38,5$ мм

Диаметр сквозного отверстия $d_0 = (0,5...0,7)d = 0,6 \cdot 35 = 21$ мм

Вылет консольной части $a = d = 35$ мм.

Длина межопорного участка $l = (2,5...3,5)a = 3 \cdot 35 = 105$ мм. Отношением $l = (2,5...3,5)a$ обеспечивается условие расположения первой собственной частоты шпинделя в диапазоне $f_1 \approx 250...500$ Гц.

Значения частотного диапазона определяются исходя из обеспечения табличных скоростей резания для соответствующих материалов заготовки и размера обрабатываемых деталей. Поскольку диаметр обработки над суппортом $D_{max} = 160$ мм, то значение минимальный диаметра обработки составляет $D_{min} = 0,25 \cdot D_{max} = 40$ мм.

Для обработки алюминия резцами из твердого сплава табличные значения скорости резания достигают 400 м/мин и более. Для обеспечения таких скоростей потребуется частота вращения шпинделя

$$n_{\max} = \frac{1000 \cdot v_{\max}}{\pi \cdot D_{\min}} = \frac{1000 \cdot 400}{3,14 \cdot 40} = 3183 \text{ об/мин} \quad (5.2)$$

округляя до ближайшего значения по ОСТ Н11-1-72 получим $n_{\max} = 3150$ об/мин.

Отсюда параметр быстроходности $d' \cdot n_{\max} = 35 \cdot 3150 = 1,1 \cdot 10^5 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$, что соответствует конструктивной схеме №1 (таблица 1.2, п. 1.1.1) (рисунок 5.3).

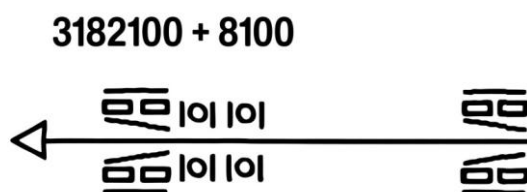


Рисунок 5.3. Конструктивная схема ШУ

Обе опоры выполнены на радиальных двухрядных роликовых подшипниках - 3182107 (размеры - 35×62×20 мм) в передней, 3182107 (30×55×19 мм) в задней.

Тогда скорректированный вылет консольной части с учетом применяемого подшипника (ширина 20 мм), уплотнительных устройств (ширина 14 мм), поворотной шайбы (толщиной 9 мм), крепежных элементов (толщина гайки 9 мм) и стандартных размеров конца шпинделя (параметры $F = 25$ мм $E = 14$ мм по ГОСТ12593—93) для обеспечения размера замыкающего звена $\Delta_3 \approx 2$ мм должен быть $a = 10 + 14 + 2 + 9 + 9 + 25 + 14 = 83$ мм.

Отсюда скорректированная длина межопорного участка $l = 3 \cdot a = 3 \cdot 83 = 249$ мм.

Внесём полученные ПП в ранее рассмотренные зависимости и произведем расчет ЭХ.

Для температуры наружного кольца при $n_{\max} = 3150$ об/мин (при времени работы 150 мин) при температуре окружающей среды 25,5 °С согласно формуле 3.2 (п. 3.2.1) получим 53 °С, что не превышает допустимые значения температуры, которая для станков класса точности П < 55 °С (класс точности токарно-винторезных станков по ГОСТ 18097-2024);

В соответствии с формулой 3.3 (п. 3.2.2) для прогиба переднего конца шпинделя при максимальной нагрузки в 4000 Н (для станков такого типа) получим $\delta = 0,15$ мм. Что в плоскости действия радиальной составляющей силы резания даст $\delta/2 = 0,074$ мм.

Расчетное значение биения шпинделя при использовании подшипников 5 кл. точности будет находиться в пределах (формула 3.5, п. 3.2.3) $\Delta = 2,5 \dots 12,5$ мкм. При условии расположения максимального биения подшипников в одном направлении имеем $\Delta = 2,5$ мкм.

Собственная частота шпинделя с учетом упругости опор (формула 3.7, п. 3.2.4) равна $f_1 = 192$ Гц, для обеспечения расположения первой собственной частоты шпинделя в дорезонансной зоне для станков повышенной точности требуют $f_1 \geq 500$ Гц, поэтому параметры такого шпинделя требуют корректировки.

Занесем результаты расчета ЭХ в таблицу вариантов (таблица 5.5).

Таблица 5.5 - Варианты ЭХ

Вар. ПП	Значения ЭХ			
	Т, °С	Δ , мкм	δ , мм	f_1 , Гц
Вар.1	53	2,5	0,074	192
Вар. 2	63	2	0,01	411
Вар. 3	68,5	9,9	0,0183	391
Вар.4	75,5	5,5	0,0141	433

Вышеописанный вариант исключим из дальнейшего рассмотрения как заведомо неподходящий, он имеет крайне низкие значения статической и динамической жесткости, определяемых соответственно прогибом переднего конца и собственной частотой шпинделя.

Вариант 2

Скорректируем полученные ранее значения, для этого назначим размеры шпинделя по соотношениям дающим максимальные размеры его тела (рисунок 1.14, п. 1.1.2.8): $d^* = P/0,1 = 75$ мм; $d_3 = 0,9 \cdot d^* = 65$ мм (округлено под наибольший ближайший размер подшипника из стандартного ряда); $d_1 = 0,96 \cdot d^* = 72$ мм; $d_2 = 1,2 \cdot d^* = 90$ мм; $d_0 = 0,6 \cdot d^* = 45$ мм; $a = d^* = 75$ мм; $l = 3 \cdot a = 225$ мм.

$$D_{max} = 160 \text{ мм}, D_{min} = 0,25 \cdot D_{max} = 40 \text{ мм}.$$

$$n_{max} = 3150 \text{ об/мин}.$$

$d^* \cdot n_{max} = 2,36 \cdot 10^5 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$, что соответствует конструктивной схеме №2 (таблица 1.2, п.1.1.1) (рисунок 5.4).

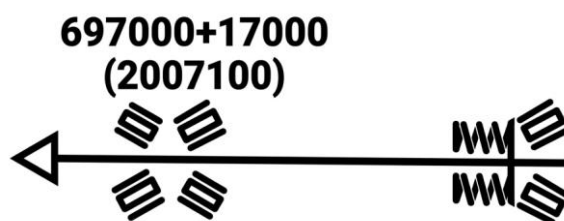


Рисунок 5.4. Конструктивная схема ШУ

Передняя опора выполнена на двухрядном коническом роликоподшипнике 97515 (размеры - 75×130×75 мм), задняя на однорядном коническом роликоподшипнике 2007113 (65×100×23 мм)

Тогда скорректированный вылет консольной части с учетом применяемого подшипника (ширина 75 мм), уплотнительных устройств (ширина 16 мм), поворотной шайбы (толщиной 10 мм), крепежных элементов (толщина гайки 9 мм) и стандартных размеров конца шпинделя (параметры $F = 25$ мм $E = 14$ мм по ГОСТ12593—93) для обеспечения размера замыкающего звена $\Delta_3 \approx 2$ мм должен быть $a = 37,5 + 16 + 2 + 9 + 10 + 25 + 14 = 114$ мм (рисунок 5.5).

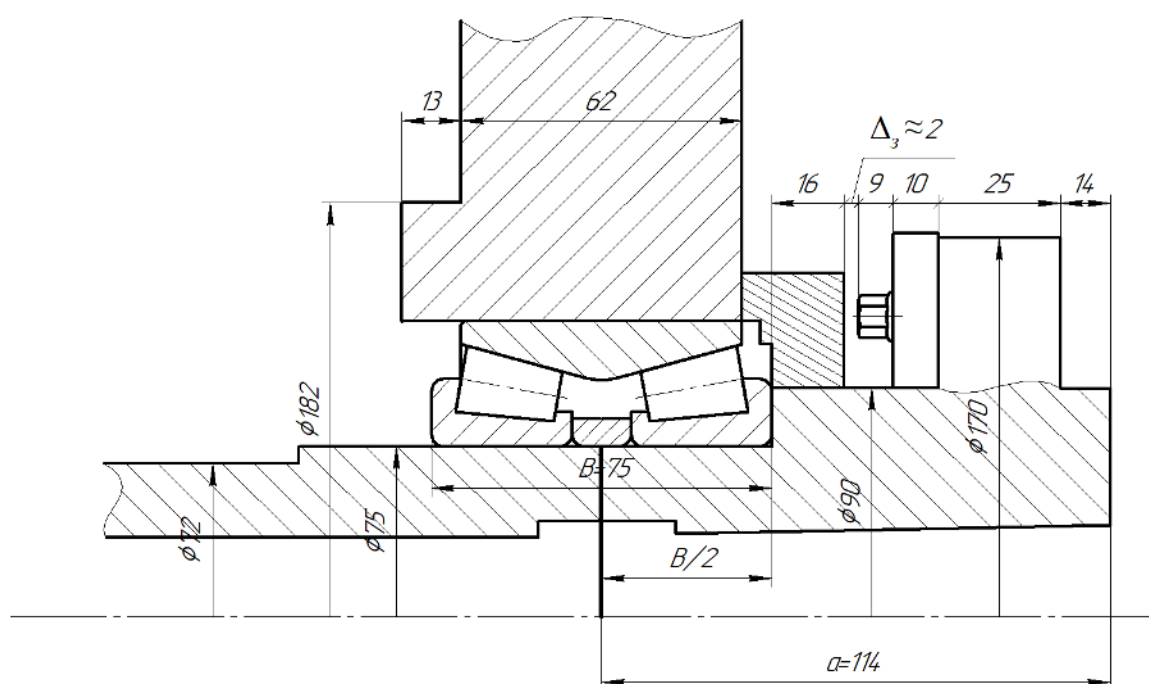


Рисунок 5.5. Эскиз переднего конца шпинделя исполнения А в сборе с корпусом

Отсюда скорректированная длина межопорного участка $l = 3 \cdot a = 3 \cdot 114 = 342$ мм.

Внесём полученные ПП в ранее рассмотренные зависимости и произведем расчет ЭХ:

Для температуры наружного кольца подшипника (3.2) при $n_{max} = 3150$ об/мин (при времени работы 150 мин) при температуре окружающей среды 25,5 °С получим 63 °С, что превышает допустимые значения температуры, которая для станков класса точности П > 55 °С;

Для прогиба переднего конца шпинделя (3.3) при максимальной нагрузки в 4000 Н (для станков такого типа) получим $\delta = 0,0175$ мм, что в плоскости действия радиальной составляющей силы резания даст $\delta/2 = 0,0088$ мм.

Расчетное значение биения шпинделя при использовании подшипников 4 кл точности будет находиться в пределах (3.5) $\Delta = 2 \dots 10$ мкм. При условии расположения максимального

биения подшипников в одном направлении имеем $\Delta = 2$ мкм.

Собственная частота шпинделя с учетом упругости опор (3.7) равна $f_1 = 411$ Гц, для обеспечения расположения первой собственной частоты шпинделя в дорезонансной зоне требуется $f_1 \geq 500$ Гц, поэтому нужна корректировка.

Данный вариант уже даёт приемлимые значения ЭХ, поэтому можно вести расчет дальше и рассматривать уже сам корпус.

Зададимся параметрами правой стенки корпуса ШУ. Для обеспечения возможности обработки максимального диаметра над суппортом 160 мм, примем координату расположения центра расточки под подшипник ($\varnothing 130$ мм) на высоте 160 мм относительно нижней стенки коробки установленной на плоские направляющие станины (рисунок 5.6), а для обеспечения изотропности свойств правой стенки отложим расстояние 160 мм в оставшиеся стороны, чтобы центр расточки точно лежал на осях симметрии проекции правой стенки (рисунок 5.7, а)

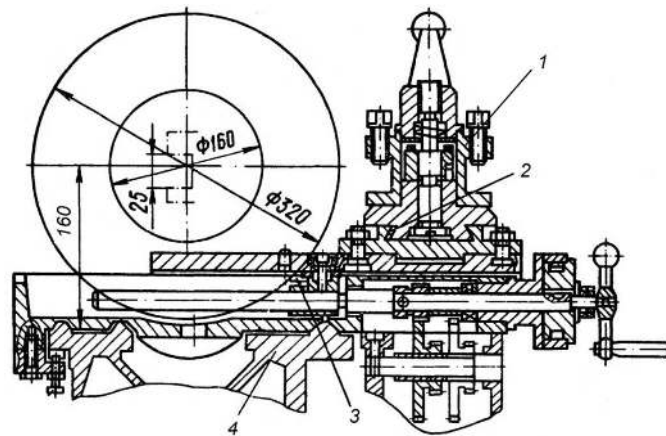


Рисунок 5.6. Схема расположения заготовки

1-резцедержатель; 2 – направляющие каретки; 3 – стол; 4 – станина.

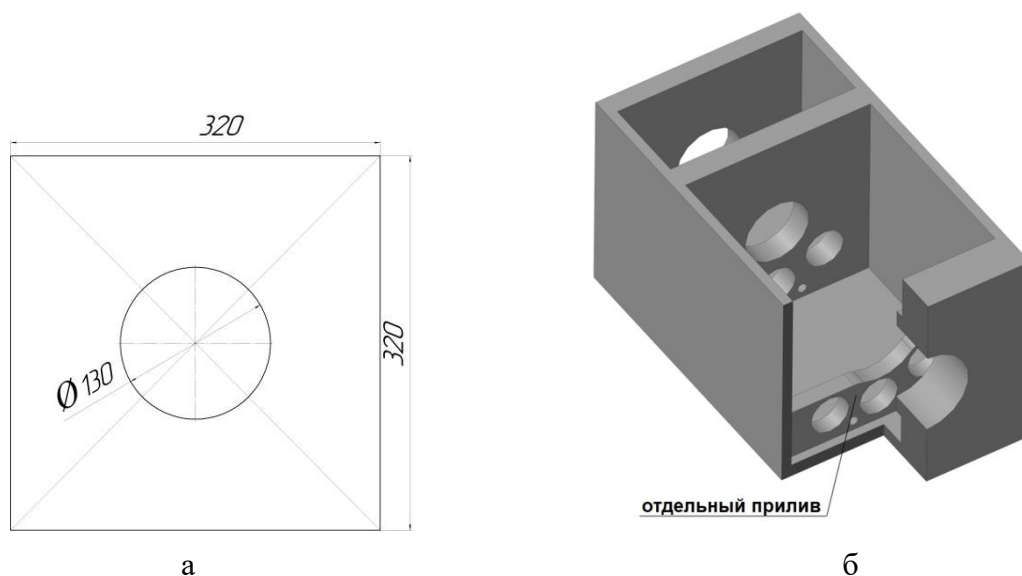
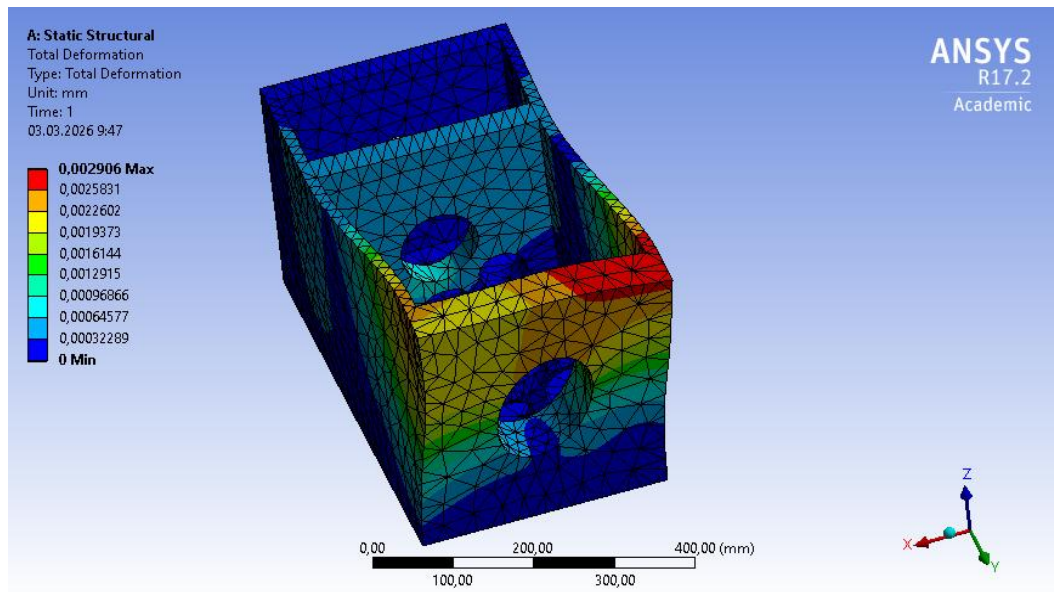


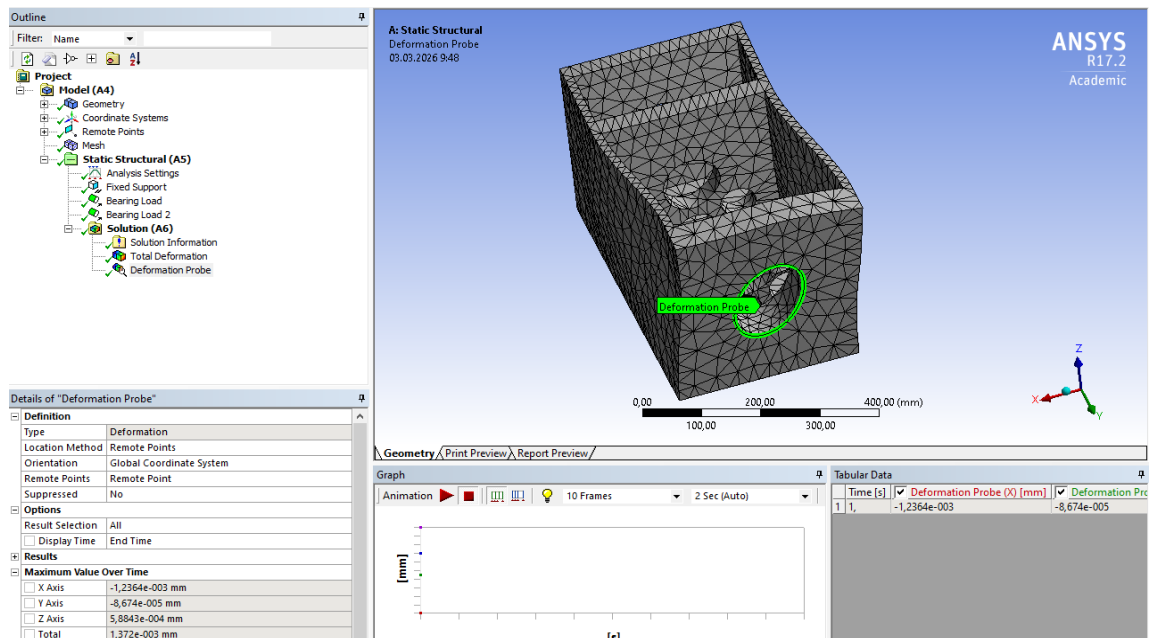
Рисунок 5.7. Конструктивное исполнение шпиндельной коробки

а – параметры передней стенки, б – модель корпуса с местным разрезом

В правой стенке исключим дополнительные расточки под валы переборной группы и механизмы их управления, их наличие оказывает негативное влияние на смещения переднего конца шпинделя. Переборную группу можно исключить путём применения электродвигателя с частотным регулированием. В случае же необходимости её наличия, следует выполнить отверстия под подшипники её валов не в правой стенке, а в отдельном приливе корпуса (рисунок 5.7, б) Дополнительно предусмотрим наличие бобышки с рекомендуемыми размерами, диаметром - 1,4 от диаметра отверстия и высотой $\approx 20\%$ от толщины стенки [119].



а



б

Рисунок 5.8. Расчет МКЭ предлагаемой конструкции корпуса: а – полное смещение отдельных частей правой стенки $\approx 2,9$ мкм; б – смещение оси отверстия правой стенки в направлении составляющей силы $P_y \approx 1,25$ мкм

Толщину правой стенки примем исходя из ширины наружного кольца подшипника 97515 – 62 мм (параметр C по ГОСТ 6364-78). Проведем расчет предлагаемой конструкции корпуса МКЭ (рисунок 5.8).

Полное смещение отдельных частей правой стенки $\approx 2,9$ мкм, смещение оси отверстия правой стенки (точка А, п. 3.3.2) в направлении составляющей силы $P_y \approx 1,25$ мкм, что соответственно на 0,35 и 0,2 мкм меньше наилучшего варианта корпуса рассмотренного в п. 3.3.2 (с максимальным диаметром обработки над станиной 320 мм).

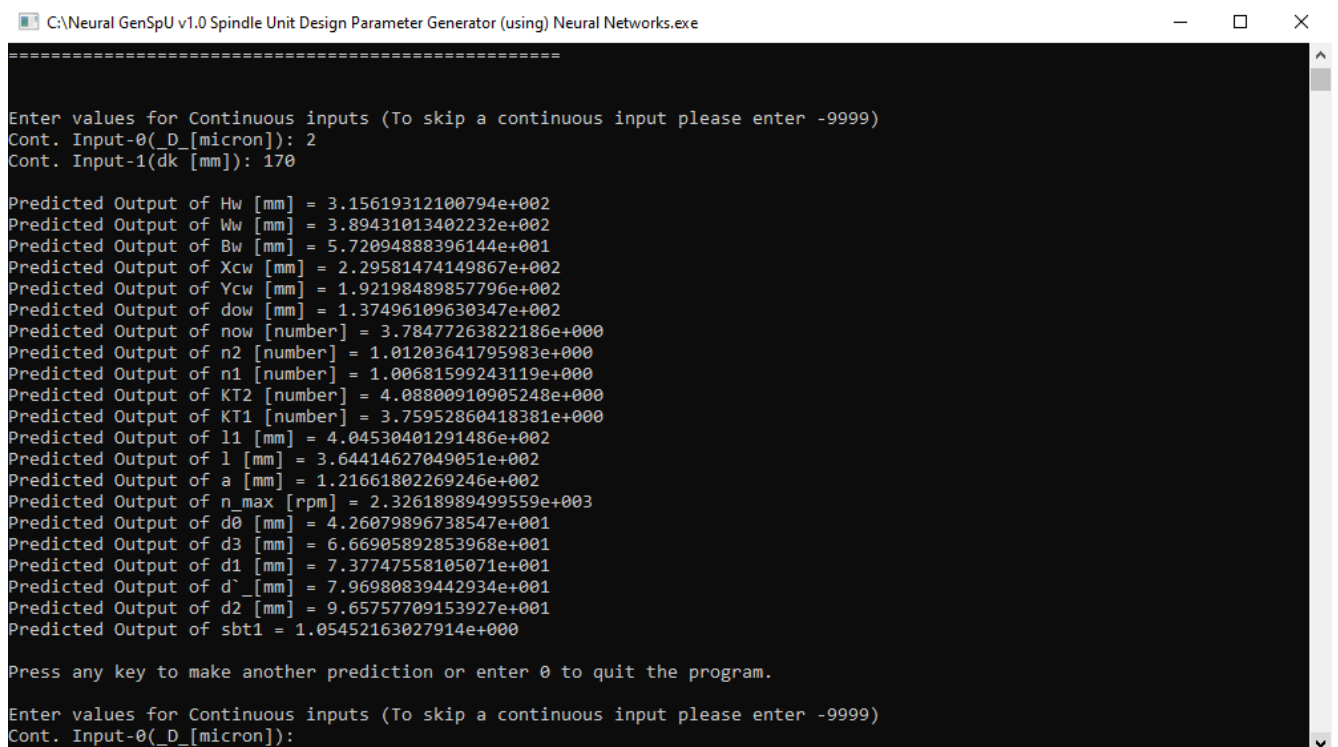
Значение $P_y \approx 1,25$ мкм прибавим к ранее полученному значению прогиба переднего конца шпинделя рассчитанного с помощью аналитических зависимостей учитывающих размер тела шпинделя и параметров его опор

$$\delta = 0,0088 + 0,00125 = 0,001 \text{ мм.}$$

Занесем результаты расчета ЭХ в таблицу вариантов (таблица 5.5).

Вариант 3

Теперь упростим этап обоснования ПП, задав требуемые значения из ТЗ в программу Neural GenSpU, после чего сверимся со сгенерированными ею значениями.



```

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)
Cont. Input-0(D_[micron]): 2
Cont. Input-1(dk [mm]): 170

Predicted Output of Hw [mm] = 3.15619312100794e+002
Predicted Output of Ww [mm] = 3.89431013402232e+002
Predicted Output of Bw [mm] = 5.72094888396144e+001
Predicted Output of Xcw [mm] = 2.29581474149867e+002
Predicted Output of Ycw [mm] = 1.92198489857796e+002
Predicted Output of dow [mm] = 1.37496109630347e+002
Predicted Output of now [number] = 3.78477263822186e+000
Predicted Output of n2 [number] = 1.01203641795983e+000
Predicted Output of n1 [number] = 1.00681599243119e+000
Predicted Output of KT2 [number] = 4.08800910905248e+000
Predicted Output of KT1 [number] = 3.75952860418381e+000
Predicted Output of l1 [mm] = 4.04530401291486e+002
Predicted Output of l [mm] = 3.64414627049051e+002
Predicted Output of a [mm] = 1.21661802269246e+002
Predicted Output of n_max [rpm] = 2.32618989499559e+003
Predicted Output of d0 [mm] = 4.26079896738547e+001
Predicted Output of d3 [mm] = 6.66905892853968e+001
Predicted Output of d1 [mm] = 7.37747558105071e+001
Predicted Output of d'_ [mm] = 7.96980839442934e+001
Predicted Output of d2 [mm] = 9.65757709153927e+001
Predicted Output of sbt1 = 1.05452163027914e+000

Press any key to make another prediction or enter 0 to quit the program.

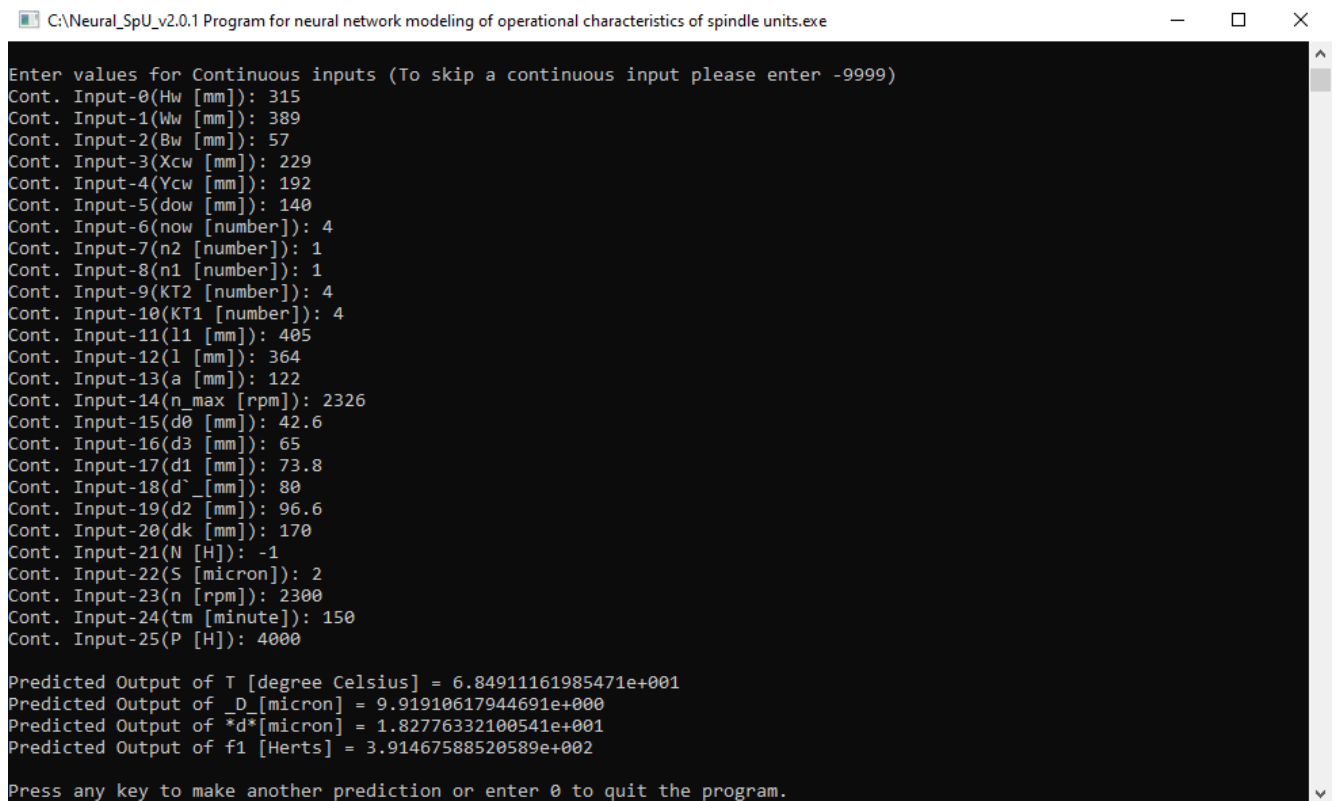
Enter values for Continuous inputs (To skip a continuous input please enter -9999)
Cont. Input-0(D_[micron]):
  
```

Рисунок 5.9. Генерация ПП ШУ

Получены следующие значения параметров (строки «Predicted Output of»): координата по оси Y основной расточки передней стенки корпуса шпиндельной коробки $Y_{cw} = 192$ мм, что

обеспечивает наибольший диаметр обработки 320 мм; количество подшипников $n1 = n2 = 1$ (округлено до целого), с радиальным $sbt1 = 1$ (округлено до целого) подшипником в передней опоре; межопорное расстояние $l = 364$ мм с координатой расположения приводного элемента за задней опорой $l1 = 405$ мм; диаметр шпинделя $d' = 80$ мм (округлено до целого). Остальные значения из рисунка 5.9.

Теперь подставим сгенерированные значения ПП, предварительно округлив некоторые из них до целых (now , $n1$, $n2$, $sbt1$) либо стандартных (dow , $KT1$, $KT2$, d') в программу Neural SpU для получения значений ЭХ.



```

C:\Neural_SpU_v2.0.1 Program for neural network modeling of operational characteristics of spindle units.exe
Enter values for Continuous inputs (To skip a continuous input please enter -9999)
Cont. Input-0(Hw [mm]): 315
Cont. Input-1(Ww [mm]): 389
Cont. Input-2(Bw [mm]): 57
Cont. Input-3(Xcw [mm]): 229
Cont. Input-4(Ycw [mm]): 192
Cont. Input-5(dow [mm]): 140
Cont. Input-6(now [number]): 4
Cont. Input-7(n2 [number]): 1
Cont. Input-8(n1 [number]): 1
Cont. Input-9(KT2 [number]): 4
Cont. Input-10(KT1 [number]): 4
Cont. Input-11(l1 [mm]): 405
Cont. Input-12(l [mm]): 364
Cont. Input-13(a [mm]): 122
Cont. Input-14(n_max [rpm]): 2326
Cont. Input-15(d0 [mm]): 42.6
Cont. Input-16(d3 [mm]): 65
Cont. Input-17(d1 [mm]): 73.8
Cont. Input-18(d' [mm]): 80
Cont. Input-19(d2 [mm]): 96.6
Cont. Input-20(dk [mm]): 170
Cont. Input-21(N [H]): -1
Cont. Input-22(S [micron]): 2
Cont. Input-23(n [rpm]): 2300
Cont. Input-24(tm [minute]): 150
Cont. Input-25(P [H]): 4000

Predicted Output of T [degree Celsius] = 6.84911161985471e+001
Predicted Output of _D_[micron] = 9.91910617944691e+000
Predicted Output of *d*[micron] = 1.82776332100541e+001
Predicted Output of f1 [Hertz] = 3.91467588520589e+002

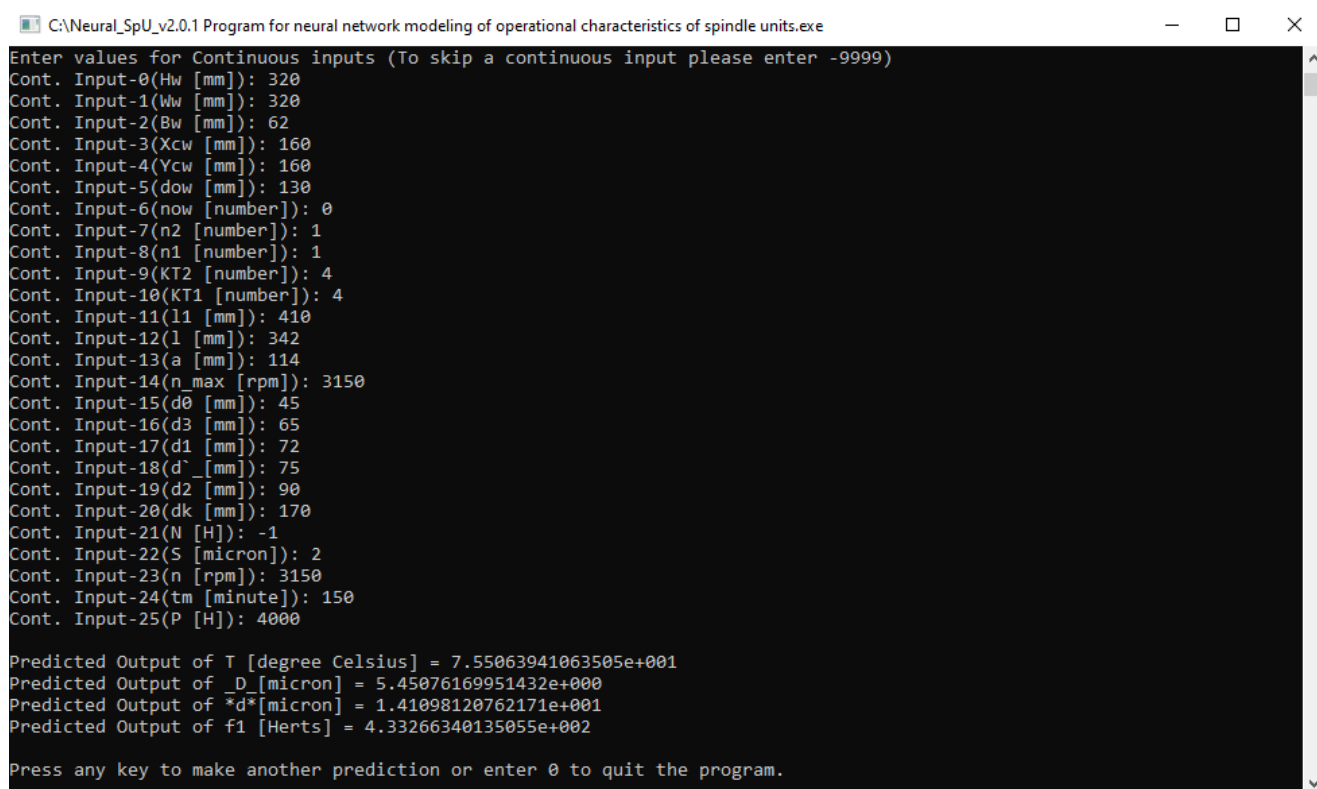
Press any key to make another prediction or enter 0 to quit the program.
  
```

Рисунок 5.10. Прогнозирование ЭХ по сгенерированным ПП

Из окна программы (рисунок 5.10) видно, что спрогнозированы следующие значения: T – 68,5 °С; Δ – 9,9 мкм; δ – 18,3 мкм, $f1$ – 391 Гц. Занесем результаты расчета ЭХ в таблицу вариантов (таблица 5.5).

Вариант 4

Теперь введем в Neural SpU ПП полученные ЛПП в варианте №2 и спрогнозируем значения ЭХ (рисунок 5.11).



```

C:\Neural_SpU_v2.0.1 Program for neural network modeling of operational characteristics of spindle units.exe
Enter values for Continuous inputs (To skip a continuous input please enter -9999)
Cont. Input-0(Hw [mm]): 320
Cont. Input-1(Ww [mm]): 320
Cont. Input-2(Bw [mm]): 62
Cont. Input-3(Xcw [mm]): 160
Cont. Input-4(Ycw [mm]): 160
Cont. Input-5(dow [mm]): 130
Cont. Input-6(now [number]): 0
Cont. Input-7(n2 [number]): 1
Cont. Input-8(n1 [number]): 1
Cont. Input-9(KT2 [number]): 4
Cont. Input-10(KT1 [number]): 4
Cont. Input-11(l1 [mm]): 410
Cont. Input-12(l [mm]): 342
Cont. Input-13(a [mm]): 114
Cont. Input-14(n_max [rpm]): 3150
Cont. Input-15(d0 [mm]): 45
Cont. Input-16(d3 [mm]): 65
Cont. Input-17(d1 [mm]): 72
Cont. Input-18(d` [mm]): 75
Cont. Input-19(d2 [mm]): 90
Cont. Input-20(dk [mm]): 170
Cont. Input-21(N [H]): -1
Cont. Input-22(S [micron]): 2
Cont. Input-23(n [rpm]): 3150
Cont. Input-24(tm [minute]): 150
Cont. Input-25(P [H]): 4000

Predicted Output of T [degree Celsius] = 7.55063941063505e+001
Predicted Output of D [micron] = 5.45076169951432e+000
Predicted Output of *d*[micron] = 1.41098120762171e+001
Predicted Output of f1 [Hertz] = 4.33266340135055e+002

Press any key to make another prediction or enter 0 to quit the program.

```

Рисунок 5.11. Прогнозирование ЭХ по расчетным ПП

Из окна программы (рисунок 5.11) видно, что спрогнозированы следующие значения: T – 75,5 °C; Δ – 5,5 мкм; δ – 14,1 мкм, f_1 – 433 Гц. Занесем результаты расчета ЭХ в таблицу вариантов (таблица 5.5).

Примем варианты 2 и 4 в качестве основных. Произведем корректировку ПП с целью улучшить показатели ЭХ. Уменьшим соотношение межопорного расстояния ($l = 342$ мм) к вылету ($a = 114$ мм) с 3 до минимального значения из рекомендуемого диапазона (2,5...3,5). Отсюда получим $l = 2,5 \cdot a = 285$ мм. И, поскольку, уменьшилась длина шпинделя, соответственно изменим и расстояние до места расположения приводного элемента, что с учетом нового $l = 285$ мм при исходной разнице в 68 мм ($l_1 - l = 410 - 342 = 68$ мм) даст $l_1 = 285 + 68 = 353$ мм.

Введем значения в программу Neural SpU (рисунок 5.12).

Из окна программы (рисунок 5.12) видно, что T снизилась с 75,5 °C до 70,8 °C, на это повлияло снижение массы шпинделя. Уменьшилось Δ с 5,5 мкм до 4,5 мкм, на что повлияло снижение межопорного расстояния, которое наряду с классами точности применяемых подшипников в значительной мере определяет биение переднего конца шпинделя. Изменилась пропорция между статической и динамической жесткостью, статическая жесткость снизилась на 17 % до значения прогиба переднего конца шпинделя 16,5 мкм, а динамическая возросла на 10 % до значения собственной частоты шпинделя в 477 Гц.

```

C:\Neural_SpU_v2.0.1 Program for neural network modeling of operational characteristics of spindle units.exe
Enter values for Continuous inputs (To skip a continuous input please enter -9999)
Cont. Input-0(Hw [mm]): 320
Cont. Input-1(Ww [mm]): 320
Cont. Input-2(Bw [mm]): 62
Cont. Input-3(Xcw [mm]): 160
Cont. Input-4(Ycw [mm]): 160
Cont. Input-5(dow [mm]): 130
Cont. Input-6(now [number]): 0
Cont. Input-7(n2 [number]): 1
Cont. Input-8(n1 [number]): 1
Cont. Input-9(KT2 [number]): 4
Cont. Input-10(KT1 [number]): 4
Cont. Input-11(l1 [mm]): 353
Cont. Input-12(l [mm]): 285
Cont. Input-13(a [mm]): 114
Cont. Input-14(n_max [rpm]): 3150
Cont. Input-15(d0 [mm]): 45
Cont. Input-16(d3 [mm]): 65
Cont. Input-17(d1 [mm]): 72
Cont. Input-18(d` [mm]): 75
Cont. Input-19(d2 [mm]): 90
Cont. Input-20(dk [mm]): 170
Cont. Input-21(N [H]): -1
Cont. Input-22(S [micron]): 2
Cont. Input-23(n [rpm]): 3150
Cont. Input-24(tm [minute]): 150
Cont. Input-25(P [H]): 4000

Predicted Output of T [degree Celsius] = 7.08313187528039e+001
Predicted Output of D [micron] = 4.50973238113707e+000
Predicted Output of *d[micron] = 1.65440490575362e+001
Predicted Output of f1 [Hertz] = 4.76837659468005e+002

Press any key to make another prediction or enter 0 to quit the program.

```

Рисунок 5.12. ЭХ с пиковыми значениями режимных параметров

Выше проанализировано значения ЭХ на пиковых режимных параметрах. Теперь спроектируем ЭХ со средними значениями этих параметров (рисунок 5.13).

```

C:\Neural_SpU_v2.0.1 Program for neural network modeling of operational characteristics of spindle units.exe
Enter values for Continuous inputs (To skip a continuous input please enter -9999)
Cont. Input-0(Hw [mm]): 320
Cont. Input-1(Ww [mm]): 320
Cont. Input-2(Bw [mm]): 62
Cont. Input-3(Xcw [mm]): 160
Cont. Input-4(Ycw [mm]): 160
Cont. Input-5(dow [mm]): 130
Cont. Input-6(now [number]): 0
Cont. Input-7(n2 [number]): 1
Cont. Input-8(n1 [number]): 1
Cont. Input-9(KT2 [number]): 4
Cont. Input-10(KT1 [number]): 4
Cont. Input-11(l1 [mm]): 353
Cont. Input-12(l [mm]): 285
Cont. Input-13(a [mm]): 114
Cont. Input-14(n_max [rpm]): 3150
Cont. Input-15(d0 [mm]): 45
Cont. Input-16(d3 [mm]): 65
Cont. Input-17(d1 [mm]): 72
Cont. Input-18(d` [mm]): 75
Cont. Input-19(d2 [mm]): 90
Cont. Input-20(dk [mm]): 170
Cont. Input-21(N [H]): -1
Cont. Input-22(S [micron]): 2
Cont. Input-23(n [rpm]): 1600
Cont. Input-24(tm [minute]): 30
Cont. Input-25(P [H]): 2000

Predicted Output of T [degree Celsius] = 4.61171699844772e+001
Predicted Output of D [micron] = 4.74663058943869e+000
Predicted Output of *d[micron] = 7.74754870027120e+000
Predicted Output of f1 [Hertz] = 4.88789021199329e+002

Press any key to make another prediction or enter 0 to quit the program.

```

Рисунок 5.13. ЭХ со средними значениями режимных параметров

Спрогнозированные значения ЭХ (рисунок 5.13) имеют значения свойственные для обычной/повседневной эксплуатации станка ($T - 46,1$ °С, $\Delta - 4,7$ мкм, $\delta - 7,75$ мкм, $f_1 - 489$ Гц.).

Вариант для исполнения Б

Для заданного ТЗ ШУ исполнения «Б» с целью унификации конструкции примем ПП из скорректированного 4 варианта за прототип. Для обеспечения чистовых операций при обработке алюминия со скоростями резания 500 м/мин и более, необходимо пересмотреть параметр быстроходности и зависящую от него конструктивную схему ШУ. Максимальная частота шпинделя для обработки деталей минимального диаметра составит: $n_{\max} = 3979$ об/мин. После округления получим $n_{\max} = 4000$ об/мин. Конструктивная схема ШУ №5 ($d \cdot n_{\max} = 3,0 \cdot 10^5$ мм/мин) (таблица 1.2, п. 1.1.1) (рисунок 5.14).

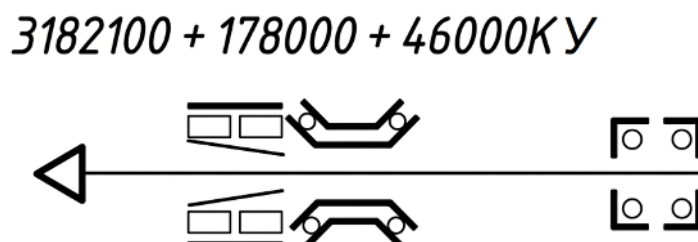


Рисунок 5.14. Конструктивная схема ШУ

Поскольку для такой схемы нет аналогичных стандартных размеров (75×130 мм) одновременно для внутреннего и наружного колец подшипника, то с целью унификации корпуса ШУ произведем расчет его ЭХ при использовании подшипников 3182117 (размеры 85×130×34 мм) и 178817 (размеры 85×130×54 мм) передней опоры и подшипнике 246113е (размеры 65×100×36 мм) задней опоры.

С применением новых подшипников изменится диаметр шпинделя в передней опоре и связанный с ним параметр быстроходности станет $d \cdot n_{\max} = 3,4 \cdot 10^5$ мм/мин (схема ШУ №5), поменяются также значения вылета и межопорного расстояния (рисунок 5.15) В новом исполнении вылет уменьшился на 21 мм до $a = 93$ мм, а межопорное расстояние увеличилось на 21 мм до 306 мм. Отсюда координата привода $l_1 = 306 + 68 = 374$ мм. Для получения большей жесткости межопорной части шпинделя примем диаметр $d_1 = 78$ мм. Для компенсации возросшего тепловыделения увеличим значение радиального зазора (S) с 2 до 3 мкм.

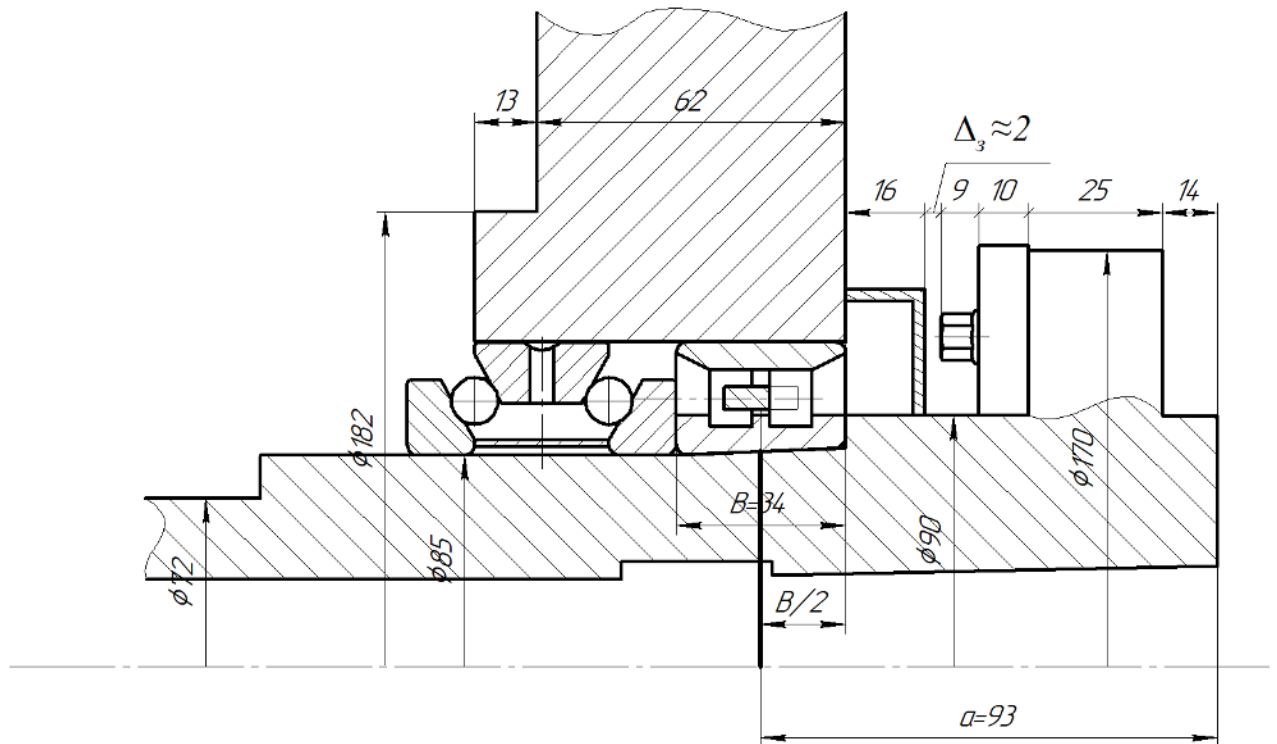


Рисунок 5.15. Эскиз переднего конца шпинделя исполнения Б в сборе с корпусом

Зададим измененные параметры программе и спрогнозируем ЭХ.

```

C:\Neural_SpU_v2.0.1 Program for neural network modeling of operational characteristics of spindle units.exe
Enter values for Continuous inputs (To skip a continuous input please enter -9999)
Cont. Input-0(Hw [mm]): 320
Cont. Input-1(Ww [mm]): 320
Cont. Input-2(Bw [mm]): 62
Cont. Input-3(Xcw [mm]): 160
Cont. Input-4(Ycw [mm]): 160
Cont. Input-5(dow [mm]): 130
Cont. Input-6(now [number]): 0
Cont. Input-7(n2 [number]): 1
Cont. Input-8(n1 [number]): 2
Cont. Input-9(KT2 [number]): 4
Cont. Input-10(KT1 [number]): 4
Cont. Input-11(l1 [mm]): 374
Cont. Input-12(l [mm]): 306
Cont. Input-13(a [mm]): 93
Cont. Input-14(n_max [rpm]): 4000
Cont. Input-15(d0 [mm]): 45
Cont. Input-16(d3 [mm]): 65
Cont. Input-17(d1 [mm]): 78
Cont. Input-18(d` [mm]): 85
Cont. Input-19(d2 [mm]): 90
Cont. Input-20(dk [mm]): 170
Cont. Input-21(N [H]): -1
Cont. Input-22(S [micron]): 3
Cont. Input-23(n [rpm]): 4000
Cont. Input-24(tm [minute]): 150
Cont. Input-25(P [H]): 4000

Predicted Output of T [degree Celsius] = 7.54809916338849e+001
Predicted Output of _D [micron] = 4.07220803851262e+000
Predicted Output of *d*[micron] = 1.74392401873048e+001
Predicted Output of f1 [Hertz] = 4.65644252194792e+002

Press any key to make another prediction or enter 0 to quit the program.
  
```

Рисунок 5.16. ЭХ ШУ исполнения Б с пиковыми значениями режимных параметров

Из окна программы (рисунок 5.16) видно, что на пиковых режимах относительно ШУ исполнения «А» T возросла с 70,8 °C до 75,5 °C, что связано со значительным увеличением частоты вращения шпинделя (3150 об/мин у исполнения «А» и 4000 об/мин у исполнения «Б»). Уменьшилось Δ с 4,5 мкм до 4,0 мкм, на что повлияло использование в передней опоре 2-х подшипников, поскольку при использовании в опоре нескольких подшипников биение снижается в корень из числа подшипников. Собственная частота шпинделя осталась на уровне ≈ 470 Гц поскольку увеличение длины пролета было компенсировано увеличением d_1 . При этом прогиб переднего конца за счет уменьшенного вылета остался на прежних значениях $\approx 17,0$ мкм.

Видно, что увеличенного до 3 мкм значения радиального зазора оказалось недостаточно и тепловыделение в передней опоре велико. Отсюда дополнительно увеличим значение радиального зазора с 3 до 4 мкм и спрогнозируем значения ЭХ на средних/повседневных режимных параметрах.

Из окна программы (рисунок 5.17) видно, что увеличение S до 4 мкм позволило снизить температуру передней опоры при средних значениях режимных параметров до 52,5 °C.

```

C:\Neural_SpU_v2.0.1 Program for neural network modeling of operational characteristics of spindle units.exe
Enter values for Continuous inputs (To skip a continuous input please enter -9999)
Cont. Input-0(Hw [mm]): 320
Cont. Input-1(Ww [mm]): 320
Cont. Input-2(Bw [mm]): 62
Cont. Input-3(Xcw [mm]): 160
Cont. Input-4(Ycw [mm]): 160
Cont. Input-5(dow [mm]): 130
Cont. Input-6(now [number]): 0
Cont. Input-7(n2 [number]): 1
Cont. Input-8(n1 [number]): 2
Cont. Input-9(KT2 [number]): 4
Cont. Input-10(KT1 [number]): 4
Cont. Input-11(l1 [mm]): 374
Cont. Input-12(l [mm]): 306
Cont. Input-13(a [mm]): 93
Cont. Input-14(n_max [rpm]): 4000
Cont. Input-15(d0 [mm]): 45
Cont. Input-16(d3 [mm]): 65
Cont. Input-17(d1 [mm]): 78
Cont. Input-18(d' [mm]): 85
Cont. Input-19(d2 [mm]): 90
Cont. Input-20(dk [mm]): 170
Cont. Input-21(N [H]): -1
Cont. Input-22(S [micron]): 4
Cont. Input-23(n [rpm]): 2000
Cont. Input-24(tm [minute]): 30
Cont. Input-25(P [H]): 1500

Predicted Output of T [degree Celsius] = 5.25244079518192e+001
Predicted Output of D [micron] = 2.53609940861716e+000
Predicted Output of Ra [micron] = 4.86697979341504e+000
Predicted Output of f1 [Hertz] = 4.52253420704876e+002

Press any key to make another prediction or enter 0 to quit the program.
  
```

Рисунок 5.17. Корректировка радиального зазора

Таким образом, для обоих исполнений ШУ назначаются ПП, на основе которых получены предпочтительные ЭХ (таблица 5.6).

Назначаемые проектные параметры ШУ

Параметр	Конструктивное исполнение ШУ	
	А	Б
H_w , мм	320	320
W_w , мм	320	320
B_w , мм	62	62
X_{cw} , мм	160	160
Y_{cw} , мм	160	160
d_{ow} , мм	130	130
n_{ow} , количество	0	0
n_2 , количество	1	1
n_1 , количество	1	2
KT_2 , класс	4	4
KT_1 , класс	4	4
l_1 , мм	353	374
l , мм	285	306
a , мм	114	93
n_{max} , об/мин	3150	4000
d_0 , мм	45	45
d_3 , мм	65	65
d_1 , мм	72	78
d , мм	75	85
d_2 , мм	90	90
d_k , мм	170	170
S , мкм	2	4

По проведенному проектированию ШУ видно, что оно может быть выполнено с использованием программ на основе НС способных как генерировать его ПП, так и прогнозировать значения ЭХ с точностью приемлемой для решения инженерных задач. ЛПР при использовании таких программ может быстро получить множество вариантов значений конструктивных, настоечных и режимных ПП в зависимости от требуемых ЭХ и, сравнивая с результатами своих расчетов и конструкций аналогов, комбинирую значения отдельных параметров получать на их основе предпочтительные ЭХ и назначать ПП. С подобным взаимодействием ЛПР и искусст-

венного интеллекта повышается обоснованность принятых решений, и изменяется сам принцип проектирования, от классического он эволюционирует до генеративного, когда ЛПР не стремится получить какой то единственно верный результат, а достигает его анализом множества сгенерированных вариантов. ПП спроектированных таким образом ШУ могут быть использованы в качестве новых обучающих данных нейросети, которая, будучи обученной с их учетом, способна ещё точнее прогнозировать ЭХ, поскольку в ней появляются дополнительные известные локальные минимумы на поверхности отклика многомерной функции. А при неоднократном обучении нейросети с включением новых локальных минимумом, будет реализовываться итеративное улучшение прогноза ЭХ ШУ в процессе их генеративного проектирования.

Проектирование ШУ по вышеописанному примеру использовано на предприятии ООО «Средневолжский Станкозавод» при обновлении модельного ряда SAMAT 400. Это позволило проводить комплексное проектирование ШУ, осуществлять более точный прогноз его ЭХ и отказаться от использования дорогостоящих прототипов для отработки разрабатываемой конструкции ШУ.

5.4. Выводы по главе 5

1. На основе обученной нейросети (MLP 26-20-4) разработана и получила государственную регистрацию программа Neural SpU. Эта программа позволяет лицу, принимающему решение, оперативно прогнозировать комплекс ключевых ЭХ ШУ (температуру, биение, упругое смещение, собственную частоту) по заданным конструктивным, настроечным и режимным проектным параметрам.

2. Подтверждена возможность решения обратной задачи проектирования: по минимальным входным данным из технического задания (требуемая точность вращения и максимальный диаметр шпинделя) обученная нейросеть (MLP 2-25-21) способна генерировать значения конструктивных ПП. Это реализовано в программе Neural GenSpU, что позволяет автоматизировать начальный этап обоснования конструкции.

3. Предложена и обоснована схема генеративного проектирования ШУ, основанная на «сотрудничестве» ЛПР и двух нейросетевых программ (Neural GenSpU для генерации вариантов и Neural SpU для их тонкой корректировки). Человек выступает в роли «куратора», задающего цели и выбирающего вариант конструктивного исполнения из множества сгенерированных компьютером нетривиальных вариантов, что кардинально отличается от классического подхода.

4. Работоспособность 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обоснована ключевая роль ШУ в формообразовании деталей на металлорежущих станках. Показано, что ЭХ ШУ находятся в сложной взаимозависимости между собой и режимными, настроечными и конструктивными ПП, что требует комплексного подхода при проектировании. Такой подход может быть реализован применением НСМ, 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 репрезентативных (интегрированных) обучающих выборок, в которых 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 переменной: 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 ЛПП, 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 %; Δ – 6,05 %; δ – 7,1 %; f_1 – 1,6 %.

6. Разработана и обоснована методология генеративного проектирования ШУ, основанная на взаимодействии ЛПП 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 ЛПП 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов, В.И. Температурные поля, деформации и температуроустойчивость систем СПИД и металлорежущих станков. Продолжение: Справочник. / В.И. Алферов // Инженерный журнал. – 2006. – №10. – С.11–15.
2. Алферов, В.И. Теплостойкость металлорежущих станков. / В.И. Алферов // СТИН. – 2004 – №7. – С. 16–19.
3. Атапин, В.Г. Выбор конструктивных параметров базовых деталей многоцелевого станка на этапе проектирования/ В.Г. Атапин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2011. № 1 (50). С. 15–19.
4. Бальмонт, В.Б. Влияние частоты вращения на упругодеформационные свойства шпиндельных шарикоподшипников / В.Б. Бальмонт, И.Г. Горелик, А.М. Левин // СТИН. 1986. № 7. С. 15–17.
5. Бальмонт, В.Б. Математическое моделирование точности вращения шпиндельных узлов / В.Б. Бальмонт, И.А. Зверев, Ю.М. Данильченко // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1987. № 11. С. 154–159.
6. Берсанов, М. Д. А. Генеративное проектирование в машиностроении / М. Д. А. Берсанов, З. А. Джабраилов, И. А. Магомедов // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 98–11. – С. 184–185.
7. Бидерман, В.Л. Прикладная теория механических колебаний / В.Л. Бидерман. — М.: Высш. школа, 1972. —416 с.
8. Блохин, Д. А. Методика определения температуры станка с минимальным влиянием тепловых деформаций на точность перемещений / Д. А. Блохин, Ю. А. Блохина, М. М. Лакман // Ученые Омска – региону: Материалы V Региональной научно-технической конференции, Омск, 13–14 октября 2020 года / Под общей редакцией Л. О. Штриплинга. – Омск: Омский государственный технический университет, 2020. – С. 27-30.
9. Блохин, Д. А. Оценка влияния остаточных температурных деформаций на точность размерной обработки / Д. А. Блохин, Ю. А. Блохина, М. М. Лакман // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сборник научных статей по итогам двенадцатой международной научной конференции, Казань, 30–31 декабря 2020 года. Том Часть 1. – Казань: ООО «Конверт», 2020. – С. 26–31.
10. Богатилов, В.Н. Распределенная адаптивная модель прогнозирования изменения параметров технологических систем / Богатилов В.Н., Кириллов И.Е., Морозов И.Н. // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. № 6 (13). С. 158–168.

11. Бойко, И. А. Разработка математической модели и модальный анализ шпиндельного узла высокоскоростного обрабатывающего центра / И. А. Бойко // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2016. – № 4(67). – С. 13–20.
12. Бондарь, С.Е. Шпиндельные узлы прецизионных станков / С.Е. Бондарь, И.С. Вергелис. – М.: НИИМАШ, 1975. – 120 с.
13. Боровиков, В.П. Нейронные сети. *STATISTICA Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных* / В.П. Боровиков. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. 392 с.
14. Бушуев, В.В. Практика конструирования машин: справочник / В.В. Бушуев. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.: ил.
15. Валеев, Б. М. Алгоритм измерения биений и овальности вращающегося шпиндельного узла / Б. М. Валеев, Ю. К. Евдокимов // Методы моделирования – VII : Труды Республиканского научного семинара «Методы моделирования», Казань, 01 сентября 2016 года – 30 мая 2019 года / Под редакцией В.А. Райхлина. Том Вып. 7. – Казань: Издательство "Фэн" Академии наук Республики Татарстан, 2019. – С. 75–83.
16. Введение в машинное обучение с помощью Python. Руководство для специалистов по работе с данными Мюллер Андреас П., Гвидо Сара. Москва 2016–2017гг. – 393с.
17. Ведомости. Режим доступа https://www.vedomosti.ru/business/articles/2025/04/22/1105798-rossiiskie-predpriyatiya-zanyali?from=copy_text.
18. Ветров, С.И. Технические характеристики современных токарных станков / С.И. Ветров, В. Г. Дауге, П.М. Чернянский // Технология машиностроения. 2009. №6, с 20–23.
19. Влияние температурных деформаций на технологическую точность станков / А.М. Альмохаммад, М.В. Брунгардт, Е.А. Сорокин, И.А. Хорош, А.В. Брунгардт // Технология машиностроения. – 2022. – № 5. – С. 29–31.
20. Гжиров, Р.И. Краткий справочник конструктора / Р.И. Гжиров. – Ленинград: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1984. – 320 с.
21. Гиловой, Л. Я. Исследование теплового состояния и температурных деформаций шпиндельного узла на комбинированных опорах методами имитационного моделирования / Л. Я. Гиловой, В. В. Молодцов, Г. В. Чернусь // СТИН. – 2009. – № 6. – С. 2–8.
22. Гиловой, Л. Я. Тепловые явления в шпиндельных узлах современных станков / Л. Я. Гиловой, В. В. Молодцов, В. П. Вороненко // Наука сегодня: вызовы и перспективы развития : Материалы международной научно-практической конференции, Вологда, 14 сентября 2016 года. – Вологда: Общество с ограниченной ответственностью "Маркер", 2016. – С. 14–17.

23. Глубокий, В.И. Расчет главных приводов станков с ЧПУ: методическое пособие по дисциплине «Конструирование и расчет станков» для студентов машиностроительных специальностей / В.И. Глубокий, В.И. Туромша. – Минск: БНТУ, 2010. – 176 с.
24. Горбунов, В. П. Моделирование смещения оси шпинделя горизонтально-фрезерного станка под воздействием силовых и тепловых факторов / В. П. Горбунов, Л. В. Касьян // Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. – 2012. – № 4(76). – С. 69–72.
25. Горохов, А. А. Температурные деформации шпиндельного узла горизонтально-фрезерного станка / А. А. Горохов // Современные материалы, техника и технология : материалы 2-й Международной научно-практической конференции, Курск, 25 декабря 2012 года / Ответственный редактор: Горохов А.А.. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2012. – С. 92–93.
26. ГОСТ 18097-2024 Станки токарно-винторезные и токарные. Основные размеры. Нормы точности.
27. Грановский, Г. И. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. — М.: Высш. шк., 1985.— 304 е., ил.
28. Григорьев, В.Ф. Исследование тепловых процессов в шпиндельном узле фрезерного станка / Григорьев В.Ф., Горбунов В.П., Архутик С.В. // Вестник Брестского государственного технического университета. 2010. №4 с. 80–84.
29. Гришелёнок, Д.А. Использование результатов математического планирования эксперимента при формировании обучающей выборки нейросети / Д.А. Гришелёнок, А.А. Ковель // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 4. С. 51–54.
30. Дайитбегов, Д.М. Компьютерные технологии анализа данных в эконометрике / Д. М. Дайитбегов. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Инфра-М : Вузовский учебник, 2010. — 578 с.
31. Данильченко, Ю. М. Исследование динамических характеристик механической системы "шпиндельный узел" / Ю. М. Данильченко, А. О. Дорожко, А. И. Петришин // Вестник МГТУ "Станкин". – 2014. – № 1(28). – С. 81–91.
32. 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, 10 ноября 2024 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2024. – С. 231–236.
33. Денисенко, А. Ф. Настройки процесса построения и обучения нейросетей при решении задач по прогнозированию эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов / А. Ф. Дени-

- сенко, Р. В. Ладягин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2025. – № 6. – С. 116–129.
34. 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.
35. Денисенко, А. Ф. Нейросетевое прогнозирование эксплуатационных свойств шпиндельных узлов / А. Ф. Денисенко, Р. В. Ладягин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2024. – № 2(101). – С. 37–44.
36. Денисенко, А. Ф. Применение нейронных сетей для моделирования эксплуатационных характеристик шпиндельного узла / А. Ф. Денисенко, Р. В. Ладягин, М. В. Якимов // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – № 2(62). – С. 78–86.
37. Денисенко, А. Ф. Сравнение математического и нейросетевого моделирования эксплуатационных свойств шпиндельного узла / А. Ф. Денисенко, Р. В. Ладягин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27, № 3-2(125). – С. 221–230.
38. 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.
39. 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, 08–09 апреля 2026 года. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2026. – С. 16–19.
40. Денисенко, А.Ф. Определение собственных частот шпинделя металлорежущего станка с использованием приведения масс и коэффициентов влияния / А.Ф. Денисенко, Р.В. Ладягин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. №1 (173). С. 15–25.
41. Денисенко, А.Ф. Расчет и конструирование шпиндельных узлов на подшипниках качения: Учеб. пособ. / А.Ф. Денисенко, М.В. Якимов. – Самара: Самар. госуд. техн. ун-т, 2017. – 101 с.
42. Динамика развития станкостроения / И.С. Лола, Д.Г. Асосков, Н. А. Усов [и др]. (2025) Режим доступа: <https://issek.hse.ru/news/1050640826.html>.
43. Дмитриев, Б. М. Взаимное влияние источников термических воздействий в станке на его работоспособность / Б. М. Дмитриев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2013. – № 11. – С. 12–14.
44. Дубров, Д. Ю. Способ повышения точности обработки путем двухфазного охлаждения шпиндельного узла металлорежущего станка / Д. Ю. Дубров, Ю. С. Дубров, Д. А. Сыромятников // Качество и жизнь. – 2018. – № 4(20). – С. 51–56.

45. Зверев, И. А. Исследование тепловых характеристик шпиндельных узлов на опорах качения / И. А. Зверев, А. Р. Маслов // Вестник машиностроения. – 2017. – № 1. – С. 36–39.
46. Зверев, И. А. Исследование упруго-деформационных свойств высокоскоростных шпинделей на радиально-упорных шарикоподшипниках / И. А. Зверев // Вестник МГТУ "Станкин". – 2015. – № 2(33). – С. 30–38.
47. Зверев, И. А. Комплексное моделирование при проектировании шпиндельных узлов на опорах качения / И. А. Зверев, Ю. М. Данильченко // Вісник СевНТУ. – 2014. – № 150. – С. 75–80.
48. Зверев, И. А. Современное состояние и перспективы развития высокоскоростных шпиндельных узлов металлорежущих станков / И. А. Зверев // Станкоинструмент. – 2016. – № 4(5). – С. 62–69.
49. Зверев, И.А. Автоматизированные расчеты шпиндельных узлов / И.А. Зверев, Е.И. Самохвалов, З.М. Левина // СТИН, 1984, №2 – с.11–14.
50. Иванников, С. Н. Модели для расчета тепловых смещений шпиндельных узлов / С. Н. Иванников, И. В. Манаенков // Известия МГТУ МАМИ. – 2012. – Т. 2, № 2(14). – С. 83–86.
51. Измаилов, А.Ф. Численные методы оптимизации: Учеб. пособие. / А.Ф. Измаилов, М.В. Солодов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 304 с.
52. Искусственные нейронные сети: базовые принципы и возможные реализации / М. И. Скуратов, Н. Г. Пугач, Е. Г. Екомасов, Б. Г. Львов // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2022. – № 4. – С. 5–11.
53. Исламов, А. Р. Применение нейросетевых технологий в машиностроении / А. Р. Исламов, М. Т. Колесников, А. Р. Мубараков // Наука молодых - наука будущего: Сборник статей X Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 04 июня 2024 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2024. – С. 92–98.
54. Использование генеративного искусственного интеллекта для инженерного концептуального проектирования / Т. Г. Коржнева, С. Б. Туранов, К. П. Толкачева, Е. Ф. Полисадова // Интеллектуальная энергетика : Сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 12–14 ноября 2024 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. – С. 294–296.
55. Каменев, С. В. Методика автоматизированного построения тепловой модели шпиндельного узла с использованием CAE-системы / С. В. Каменев, К. В. Марусич // Интернет-журнал Науковедение. – 2017. – Т. 9, № 6. – С. 16.

56. Каменев, С. В. Современные методы компьютерного моделирования и инженерного анализа тепловых характеристик шпиндельных узлов / С. В. Каменев, К. В. Марусич // Интернет-журнал Науковедение. – 2017. – Т. 9, № 5. – С. 26.
57. Каминская, В.В. Станины и корпусные детали металлорежущих станков (расчет и конструирование) / В.В. Каминская, З.М. Левина, Д.Н. Решетов. – М.: Машгиз. 1960. 363с.
58. Кирилин, Ю.В. Моделирование базовых деталей металлорежущего станка методом конечных элементов / Ю.В. Кирилин // Наука - производству. 2007. № 3. С. 54–57.
59. Козочкин, М. П. Измерение пространственных вибраций для диагностики качества сборки шпиндельных узлов / М. П. Козочкин, Ф. С. Сабилов // Измерительная техника. – 2016. – № 12. – С. 49–52.
60. Колебания в системе шпиндель-подшипники у металлорежущих станков. Экспресс-информация ВИНТИ. – М.- №46. – 1989. – 20 с.
61. Кочергин, А.И. Шпиндельные узлы с опорами качения: учебно-методическое пособие по курсовому проектированию металлорежущих станков для студентов машиностроительных специальностей / А.И. Кочергин, Т.В. Василенко. – Мн.: БНТУ, 2007. – 124 с.
62. Кроль, О. С. Трехмерное моделирование многооперационного станка модели СВМ1Ф4 в среде компас 3D / О. С. Кроль, И. А. Сухорутченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 4, № 7(70). – С. 13–18.
63. Круглов, В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.
64. Кудинов, А.В. Особенности нейросетевого моделирования станков / Кудинов А.В. // СТИН, 2001, №1, с. 13–18.
65. Кудояров, Р.Г. Методы определения и повышения технологической жесткости токарных станков / Р.Г. Кудояров, Р.Р. Башаров, О.Д. Пыркова// Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2014. Т. 18. № 3 (64). С. 87–92.
66. Кузнецов, А. П. Вероятностные методы оценки и управления точностной надежностью металлорежущих станков при тепловых воздействиях / А. П. Кузнецов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2015. – № 4. – С. 72–81.
67. Кузнецов, А. П. Структурный теплофизический анализ металлорежущих станков / А. П. Кузнецов, М. Г. Косов // СТИН. – 2011. – № 3. – С. 13–20.
68. Кузнецов, А. П. Теплостойкость и быстроходность шпиндельных узлов металлорежущих станков / А. П. Кузнецов, М. Г. Косов // Вестник МГТУ "Станкин". – 2011. – № 2(14). – С. 22–24.

69. Кузнецов, Д.И. Обоснование технических характеристик гибких производственных модулей нейросетевыми методами: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.03.01 / Комсомольск-на-Амуре гос. техн. ун-т. — Комсомольск-на-Амуре, 2004. — 21 с.
70. Куц, В. В. Проектирование шпиндельного узла токарного станка на основе подхода "сверху вниз" / В. В. Куц, П. Н. Учаев, Е. Ю. Попрушко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. — 2012. — № 2–3. — С. 33–38.
71. 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, 09–11 апреля 2025 года. — Самара: Самарский государственный технический университет, 2025. — С. 44–48.
72. Левина, З.М. Автоматизированные статические и динамические расчеты шпиндельных узлов. В сб.: Динамика станков. Тезисы докладов 2-й всесоюзной конференции / З.М. Левина, И.А. Зверев. — Куйбышев: КПИ, 1984. — с. 116–117.
73. Левина, З.М. Расчетный анализ деформационных, динамических и температурных характеристик шпиндельных узлов при проектировании / З.М. Левина, И.Г. Горелик, И.А. Зверев, А.П. Сегида. — М.: ЭНИМС, 1989. — 64 с.
74. Лизогуб, В. А. Уточнённый расчёт деформаций шпиндельного узла с заготовкой, установленной в патроне и заднем центре и их влияние на точность обработки с разным расположением привода вращения шпинделя / В. А. Лизогуб // Научные труды IV Международной научной конференции "Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении", Москва, 24–25 ноября 2015 года. — Москва: Издательский дом "Спектр", 2015. — С. 147–151.
75. Липов, А. В. Модель тепловых деформаций шпиндельного узла сверлильного станка / А. В. Липов, Г. С. Большаков, В. В. Панчурин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. — 2014. — № 4(12). — С. 124–128.
76. Липов, А. В. Пути повышения точности токарно-винторезных станков, на примере модели СТ16К20 / А. В. Липов, Н. И. Мальков, Г. С. Большаков // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса: Сборник статей XVIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 11–12 ноября 2024 года. — Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2024. — С. 86–89.
77. Литвинов, А. Н. Динамический расчёт шпиндельных узлов станков / А. Н. Литвинов, А. И. Тимошина // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". — 2008. — Т. 1. — С. 390.

78. Ложкин, Д. В. Топологическая оптимизация кронштейна в *ANSYS* / Д. В. Ложкин, П. В. Максимов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 11. – С. 107–110.
79. Ломов, М. В. Замечания к расчету шпиндельных узлов на опорах качения / М. В. Ломов // Студенческая научная весна 2010: Машиностроительные технологии: Сборник статей Третьей Всероссийской научно-технической конференции студентов, Москва, 22–25 марта 2010 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2010. – С. 25–31.
80. Ломов, М. В. Повышение точности расчета многоопорных шпиндельных узлов / М. В. Ломов, П. М. Чернянский // СТИН. – 2012. – № 10. – С. 5–8.
81. Луцук, В. О. Выбор оптимального предварительного натяга подшипниковых опор шпиндельного узла / В. О. Луцук, Р. Р. Валиев // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 13–19 ноября 2017 года. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2017. – С. 69–71.
82. Макартичян, С. В. Нейронные системы обработки информации : учеб.-метод. пособие / С. В. Макартичян, Н. С. Кузнецова, С. С. Дементьев ; ВолГТУ. – Волгоград, 2020. – 108 с.
83. Максимова, А.Ю. Применение генеративно-состязательной сети для решения задачи идентификационной экспертизы / Максимова А.Ю. // Проблемы искусственного интеллекта. – 2018. – № 4 (11). – С. 42–50.
84. Макухин, А. Г. Исследование корпуса шпиндельного узла из композитного материала / А. Г. Макухин, Г. В. Сыровой, Е. В. Синдеева // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2021. – № 3(45). – С. 134–138.
85. Масалимов, К. А. Интеллектуальные модели на основе нейронных сетей с долгой кратковременной памятью для диагностики состояния станков в машиностроении / К. А. Масалимов, Р. А. Мунасыпов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 2(80). – С. 138–145.
86. Методы и модели анализа данных: *OLAP* и *Data Mining* / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко, И. И. Холод. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 336 с.: ил.
87. Михалев, О. Н. Применение нейронной сети для автоматизации проектирования / О. Н. Михалев, А. С. Янюшкин // Высокие технологии в машиностроении: Материалы XVIII всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 24–25 ноября 2021 года / Отв. редактор Р.Г. Гришин. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2021. – С. 93–96.

88. Моделирование динамики и натурные испытания шпиндельного узла / А. М. Ханов, А. В. Шафранов, А. Е. Кобитянский, А. В. Пепелышев // СТИН. – 2009. – № 12. – С. 2–5.
89. Морозов, С. А. Анализ существующего опыта генеративного проектирования / С. А. Морозов, О. А. Тарасова // Наука и технологии – 2024: Сборник статей III Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 06 мая 2024 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2024. – С. 105–113.
90. Нугуманов, Р. А. Алгоритмы генеративного проектирования, применяемые в современных работах / Р. А. Нугуманов // Инженерные кадры - будущее инновационной экономики России. – 2024. – № 1. – С. 586–589.
91. Одиночкина, С.В. Основы технологий *XML* / С.В. Одиночкина. — СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 56 с.
92. 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, 10–12 апреля 2024 года. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2024. – С. 151–155.
93. Определение тепловых смещений формообразующих узлов технологического оборудования / С. Н. Иванников, И. В. Манаенков, М. В. Крутякова, А. Н. Шурпо // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 7(80). – С. 30–34.
94. Оптимизации топологии конструкций с использованием ПК *ANSYS* / Н. И. Марчук, А. В. Максимов, Е. В. Прасоленко, Т. Т. Шириев // Тенденции развития науки и образования. – 2019. – № 47-6. – С. 58–61.
95. Орлов, А. А. Коэффициенты корреляции: шкала Чеддока и значимость / А. А. Орлов, А. И. Орлов // Контроллинг. – 2024. – № 4(94). – С. 28–37.
96. Пальмов, С. В. *PMML* – инструмент интеллектуальной обработки данных / С. В. Пальмов, Е. С. Артюшкина // Форум молодых ученых. – 2020. – № 2(42). – С. 251–255.
97. Пановко, Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
98. Перель, Л. Я. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор: Справочник / Л. Я. Перель. — М.: Машиностроение, 1983.— 543 с., ил.
99. Пименов, Д. Ю. Экспериментальное определение податливостей элементов технологической системы фрезерного станка ГФ2171С5 / Д. Ю. Пименов // Металлообработка. – 2009. – № 6(54). – С. 54–57.

100. Позевалкин, В.В. Исследование эффективности тепловых моделей станка на основе нейронных сетей прямого распространения / В.В. Позевалкин, А.Н. Поляков // СТИН. 2021. № 10. С. 29–32.
101. Поляков, А. Н. Экспериментальное исследование термодинамического состояния токарного станка с ЧПУ / А. Н. Поляков, А. А. Терентьев // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2000. – № 3. – С. 78–82.
102. Поляков, А.Н. Методика выбора твердотельных конечно-элементных моделей несущих систем станков при проведении их инженерного анализа/ А.Н. Поляков, А.И. Додоров // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 6. С. 102–116.
103. Поляков, А.Н. Реализация параметрических моделей в инженерном анализе металлорежущих станков/ А.Н. Поляков, С.В. Каменев, В.Н. Михайлов // Технология машиностроения. 2007. №3.С. 20–23.
104. Потапов, В.А. Современное оборудование для сверхскоростной обработки / В.А. Потапов // Станки и инструмент. 1993. – №5. – С. 36 – 39.-105. Потапов, В.А. Высокоскоростная обработка / В.А. Потапов, Г.И. Айзеншток. – М.: ВНИИТЭМР. Сер. 1. Металлорежущее оборудование. 1986. Вып. 9. –60 с.
106. Потапов, К. Г. Перспективы использования нейронных сетей в фазохронометрии / К. Г. Потапов, А. С. Комшин, А. Б. Сырицкий // Станкоинструмент. – 2021. – № 1(22). – С. 60–63.
107. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник-учебник. В 3-х т. Т. I: Проектирование станков / А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Аполлонов [и др].; Под общ. ред. А.С. Проникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение, 1994. – 444 с.: ил.
108. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник-учебник. В 3-х т. Т. 2. Ч. I. Расчет и конструирование узлов и элементов станков / А. С. Проников, Е. И. Борисов, В. В. Бушуев и др.; Под общ. ред. А. С. Проникова.— М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана: Машиностроение, 1995. — 371 с.: ил.
109. Пуш, А.В. Шпиндельные узлы: качество и надежность при проектировании / А.В. Пуш, И.А. Зверев. — М.: СТАНКИН, 2000. — 132 с.
110. Пуш, А.В. Шпиндельные узлы: Качество и надежность. / А.В. Пуш. – М.: Машиностроение, 1992. – 288 с.
111. Пуш, В. Э. Конструирование металлорежущих станков / В.Э. Пуш. — Москва : Машиностроение, 1977. — 392 с.: ил.

112. Пуш, В. Э. Металлорежущие станки: Учебник для машиностроительных втузов / Под ред. В. Э. Пуша. — М.: Машиностроение, 1985. — 256 с., ил.
113. Разработка экономичной конструкции коленчатого вала механического прессы с С-образной станиной на основании результатов анализа топологии / Д.К. Тратия, М.В. Шеладия, Г.Д. Ачарья, Ш.Г. Ачарья // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). — 2023. — Т. 25, № 3. — С. 50–62.
114. Расчет режимов резания / В.В. Марков [и др]. Орел, ОрелГТУ, 2010. —112с.
115. Рашид, Тарик. Создаем нейронную сеть.: Пер. с англ. — СПб. : ООО “Альфа-книга”, 2017. — 272 с.
116. Реброва, И.А. Планирование эксперимента: учебное пособие / И.А. Реброва. — Омск: СиБАДИ, 2010. —105 с.
117. Ремизов, Э. В. Интеллектуальный мониторинг шпиндельного узла на базе нечеткой логики / Э. В. Ремизов, Е. А. Лукьянов // Вестник Донского государственного технического университета. — 2008. — Т. 8, № 3(38). — С. 221–225.
118. Решетов, Д.Н. Детали и механизмы металлорежущих станков / под ред. Д.Н. Решетова. — М.: Машиностроение, 1972. — Т. 2. — 520 с.
119. Решетов, Д.Н. Детали и механизмы металлорежущих станков / Под ред. Д.Н. Решетова, т.1.: М. Машиностроение. 1972. — 664с.
120. Ровный, Р. Г. Моделирование шпиндельного узла токарного станка и идентификация параметров модели / Р. Г. Ровный, Ф. С. Сабиров // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: Материалы VII Всероссийской научно-технической, Уфа, 23–24 марта 2017 года. — Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2017. — С. 233–238.
121. Рожков, С. В. Мониторинг технического состояния шпиндельных узлов металлорежущих станков / С. В. Рожков, Н. Н. Трушин, Г. В. Шадский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2016. — № 8–2. — С. 188–193.
122. Рожков, С.В. Оценка технического состояния передней опоры шпиндельного узла металлорежущего станка / С.В. Рожков, Г.В. Шадский, В.Г. Шадский // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. Вып. 8. Ч. 2, с. 251–257.
123. Российская газета. Режим доступа <https://rg.ru/2023/04/12/reg-urfo/zapustit-zavod-zavodov.html?ysclid=misf0ozfbk954616881>.
124. Рохин, В. Л. Проектирование шпиндельных узлов на опорах качения. Методические указания / В. Л. Рохин, Курганский государственный университет. Курган, 2003. —27с.

125. Сабиров, Ф. С. Моделирование и расчет "многослойных" шпиндельных узлов металлорежущих станков / Ф. С. Сабиров, Р. Г. Ровный // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста : Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Уфа : ГОУ ВПО "Уфимский государственный авиационный технический университет", 2018. – С. 285–290.
126. Сабиров, Ф. С. Моделирование шпиндельных узлов с учетом натяга в подшипниках качения / Ф. С. Сабиров, Л. Я. Гиловой, А. Н. Боган // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста: Материалы Всероссийской научно-технической конференции, Уфа, 26–28 февраля 2019 года. – Уфа: ГОУ ВПО "Уфимский государственный авиационный технический университет", 2019. – С. 230–236.
127. Сабиров, Ф. С. Оценка статической жесткости шпиндельного узла токарного станка в производственных условиях по динамическим характеристикам, полученным импульсным методом / Ф. С. Сабиров, С. С. Шемякин // Инновационное и цифровое машиностроение : Материалы Всероссийских научно-технических конференций, Уфа, 07–09 апреля 2021 года. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2021. – С. 259–262.
128. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025684072 Российская Федерация. *Neural SpU* Программа нейросетевого моделирования эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов : заявл. 16.07.2025 : опубл. 11.09.2025 / А. Ф. Денисенко, Р. В. Ладыгин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет».
129. Селезнева, В.В. Связь параметров траектории оси шпинделя с показателями качества детали // СТИН. 1985. № 1. С. 8–10.
130. Селиванов, С.Г. Вероятностно-рекуррентный метод оптимизации технологических процессов в авиадвигателестроении с использованием методов «мягких» вычислений / С.Г. Селиванов, О.А Гаврилова // Вестник УГАТУ. – 2014. – № 1 (62). – С. 53–59.
131. Селиванов, С.Г. Методы использования рекуррентных нейронных сетей для структурной оптимизации проектных технологических процессов в машиностроении / С.Г. Селиванов, С.Н. Поезжалова, Е.А. Федорова // Экономика и социум. – 2018. – № 1 (44). – С. 1336–1345.
132. Сергейкин, О. А. Влияние силовых смещений корпусных деталей на точность станков автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н., специальность 05.03.01 / Сергейкин Олег Анатольевич; [Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана]. — М. : Б.и., 2004. — 16 с. ил.; 21.

133. Сергейкин, О.А. Расчет силовых смещений корпуса шпиндельной бабки токарного станка с помощью программы *DesignSpace* // Сборник трудов 1-ой международной конференции пользователей программного обеспечения *CAD-FEM Gmb H. M.*, 2002. – С. 269–274.
134. Соколов, Ю.Н. Термические расчеты в станкостроении / Ю.Н. Соколов. – М.: Машиностроение, 1968, –77с.
135. Стреляная, Ю. О. Конечно-элементный анализ шпиндельного вала на стадии проектирования / Ю. О. Стреляная, А. Ю. Тараховский // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. – 2021. – № 26. – С. 70–72.
136. Таллиан, Т. Поправочные коэффициенты, учитывающие влияние толщины масляной пленки, микрогеометрии поверхностей и трения на долговечность подшипников качения / Т. Таллиан // В сб.: Проблемы трения и смазки. – М.: Мир. 1981. Т. 103. № 4. С. 37–51.
137. Типушков Ю.А. Определение жесткости несущих систем металлорежущих станков / Ю.А. Типушков, П.Г. Мазеин // Прогрессивные технологии в машиностроении. Челябинск: ЮУрГУ, 2005. С. 104–108.
138. Уоссерман, Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика / Ф. Уоссерман. – М.: Мир, 1990. – 320 с.
139. Устинов, Н. С. Диагностика технического состояния шпиндельного узла мехатронных станков с использованием искусственных нейронных сетей / Н. С. Устинов, Ю. В. Идрисова, С. И. Фецак // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*. – 2016. – Т. 1. – С. 172-175.
140. Фигатнер, А. М. Шпиндельные опоры качения высокоточных станков / А.М. Фигатнер. – М.: ЦИНТИАМ, 1964. – 75 с.
141. Фигатнер, А.М. Конструирование быстроходных шпиндельных узлов. По материалам журнала фирмы *FAG “Walzlager technik DA”*. М.: ЭНИМС, 1990. –88 с.
142. Фигатнер, А.М. Конструкции, расчет и методы проверки шпиндельных узлов с опорами качения: Методические указания. / А.М. Фигатнер, Е.А. Фискин, С.Е. Бондарь. – М.: ЭНИМС, 1970. – 152 с.
143. Фигатнер, А.М. Обеспечение высокой быстроходности шпиндельных узлов на подшипниках качения / А.М. Фигатнер, А.Г. Коршиков, В.Г. Баклыков // *СТИН*. 1983. № 4. С. 15–17.
144. Фигатнер, А.М. Расчет и конструирование шпиндельных узлов с подшипниками качения металлорежущих станков / А.М. Фигатнер. — М.: НИИМАШ, 1971, –196 с.
145. Фигатнер, А.М. Шпиндельные узлы современных металлорежущих станков. Обзор. М.: НИИмаш, 1983. – 60 с.

146. Фомин, А. А. Жесткость шпиндельного узла станка для фрезерования заготовок с неоднородными свойствами / А. А. Фомин, В. Г. Гусев // СТИН. – 2013. – № 4. – С. 3–6.
147. Фролов, А. В. Особенности применения теории силовых смещений к расчету контактной жесткости опоры шпиндельного радиально-упорного шарикоподшипника / А. В. Фролов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2022. – № 3(142). – С. 100–128.
148. Фролов, А. В. Расчет жесткости шпиндельного узла на двух радиально-упорных шарикоподшипниках / А. В. Фролов // СТИН. – 2006. – № 8. – С. 17–22.
149. Хайкин, Саймон. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание.: Пер. с англ. – М.:Издательский дом «Вильямс», 2006. –1104с.
150. Ханов, А. М. Исследование динамики шпиндельных узлов станков на основе математического моделирования / А. М. Ханов, А. Е. Кобитянский, А. В. Шафранов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 1-2. – С. 439–447.
151. Хомяков, В. С. Экспериментальное и расчетное исследование динамических характеристик шпиндельных узлов / В. С. Хомяков, Н. А. Кочинев, Ф. С. Сабилов // СТИН. – 2009. – № 3. – С. 5–9.
152. Хомяков, В. С. Экспериментальное исследование и моделирование гильзовой конструкции шпиндельного узла шлифовального станка / В. С. Хомяков, Ф. С. Сабилов // СТИН. – 2012. – № 5. – С. 10–15.
153. Хусаинов, Р. М. Применение CAD/CAE-систем для исследования характеристик жесткости несущих систем металлорежущих станков / Р.М. Хусаинов, Д.Р. Ахкиямов // Материалы XXVII междунар. науч.-практ. конф. "Технические науки – от теории к практике". Часть I. Новосибирск: СибАК.2013. Режим доступа: <https://sibac.info/conf/tech/xxvii/34591>.
154. Цибизов, П. Н. Автоматизация точностных расчетов шпиндельных узлов металлорежущих станков / П. Н. Цибизов, А. Г. Николаев // Аллея науки. – 2018. – Т. 1, № 6(22). – С. 902–907.
155. Цысь, А. С. Система контроля технического состояния технологических мехатронных объектов с использованием нейронной сети анализа состояний / А. С. Цысь, Р. Р. Пашкевич // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 9(60). – С. 16.
156. Чернянский, П. М. Опыт проектирования и эксплуатации станков с циклоидальной схемой обработки / П. М. Чернянский // ВНИТЕРМ. 1991. Вып. 11 — 12.
157. Чернянский, П. М. Основы проектирования точных станков: Теория и расчет / П. М. Чернянский. – М.: КноРус, 2010, – 239с.

158. Чернянский, П.М. Проектирование и ремонт шпиндельных узлов / П.М. Чернянский, А.Г. Схиртладзе. — М.: ИНФРА-М, 2018. — 272 с.
159. Чуприна, В. М. Динамические расчеты станков и их узлов методом конечных элементов в САПР / В. М. Чуприна // Вестник Черниговского государственного технологического университета. Серия: Технические науки. — 2013. — № 2(65). — С. 81–91.
160. Чуприна, В. М. Исследование влияния базовых компоновочных параметров шпиндельных узлов на динамические характеристики при проектировании в САПР / В. М. Чуприна, А. Н. Говоруха // Вестник Черниговского государственного технологического университета. Серия: Технические науки. — 2011. — № 4(53). — С. 67–78.
161. Шитов, А. М. Использование моделей для нормирования диагностических параметров шпиндельных узлов / А. М. Шитов, А. К. Алешин // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2012. — № 3. — С. 53–57.
162. Ын Анналин, Су Кеннет. Теоретический минимум по *Big Data*. Всё, что нужно знать о больших данных. — СПб.: Питер, 2019. — 208 с.: ил. — (Серия «Библиотека программиста»).
163. Яхшиев, Ш. Н. Методика расчета динамических характеристик Шпиндельных узлов / Ш. Н. Яхшиев // Инновационный дискурс развития современной науки и технологий: сборник статей V Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 15 августа 2022 года. — Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2022. — С. 26–31.
164. Яцун, Е. И. Исследование жесткости шпиндельного узла средствами твердотельного моделирования / Е. И. Яцун, Н. Родионов, П. Бурый // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении : Сборник научных статей Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 13–14 апреля 2023 года / Отв. редактор Е.В. Смоленцев. — Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2023. — С. 442–447.
165. Bogutskiy, V. Estimation of the influence of skewing and noncoaxiality of the bearing rings on the axis vibrations of the spindle of a metal-cutting machine / V. Bogutskiy, L. Shron // *Theoretical & Applied Science*. — 2021. — No. 5(97). — P. 201-207.
166. Gradišar, L.; Klinc, R.; Turk, Ž.; Dolenc, M. Generative Design Methodology and Framework Exploiting Designer-Algorithm Synergies. *Buildings* 2022, 12, 2194. <https://doi.org/10.3390/buildings12122194>.
167. Huang Z., Liu Y., Du L. et al. Thermal error analysis, modeling and compensation of five-axis machine tools. *J. Mech. Sci. Technol.* 2020. №34, P.4295–4305.

168. Kuznetsov A. P. *Probability methods of evaluation and control of precision reliability of metal-cutting machine tools under thermal effects* / A. P. Kuznetsov // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2015. – Vol. 44, No. 4. – P. 363–371.
169. Kuznetsov A. P. *Structural Thermophysical Analysis of Metal-Cutting Machines* / A. P. Kuznetsov, M. G. Kosov // *Russian Engineering Research*. – 2011. – Vol. 31, No. 6. – P. 599-606.
170. M. Matsumoto, T. Nishimura. *Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator* // *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulations : journal*. — 1998. — Vol. 8, no. 1. — P. 3—30.
171. Mares M., Horejs O., Havlik L. *Thermal error compensation of a 5-axis machine tool using indigenous temperature sensors and CNC integrated Python code validated with a machined test piece*. *Precis. Eng.* 2021. №66. P.21–30.
172. *Optimization of design for the high precision end mill spindles to improve stability of effective cutting process*. Jeevan Raju Boddu1, K. Rama Kotaiah, P. Venkata Chalapathi, Jakeer Hussain Shaik.
173. StatSoft, Inc. (2012). *Электронный учебник по статистике*. Москва, StatSoft. Режим доступа: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>.
174. *Twisted из первых рук* / Задка М., Уильямс М., Бенфилд К., Уорнер Б., Митчелл Д., Сэмюэл К., Тарди П. пер. с англ. А. Н. Киселева. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 338 с.: ил.
175. Wei X., Ye H., Miao E., Pan Q. *Thermal error modeling and compensation based on Gaussian process regression for CNC machine tools*. *Precision Engineering*. 2022. № 77. P. 65–76.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Состав переменных нейросети прогнозирования ЭХ

Входные переменные:

H_w - высота правой стенки корпуса ШУ, мм.

W_w - ширина правой стенки корпуса ШУ, мм.

B_w - толщина правой стенки корпуса ШУ, мм.

X_{cw} - координата по оси X основной расточки правой стенки корпуса от её левого нижнего габарита, мм.

Y_{cw} - координата по оси Y основной расточки правой стенки корпуса от её левого нижнего габарита, мм.

d_{ow} - диаметр основной расточки правой стенки корпуса, мм.

n_{ow} - число дополнительных отверстий в правой стенки корпуса, шт.

n_2 - число подшипников воспринимающих радиальную нагрузку в задней опоре, шт.

n_1 - число подшипников воспринимающих радиальную нагрузку в передней опоре, шт.

KT_2 - класс точности подшипников задней опоры, класс.

KT_1 - класс точности подшипников передней опоры, класс.

l_1 - координата расположения приводного элемента относительно передней опоры, мм.

l - межопорное расстояние, мм.

a – вылет, мм.

n_{max} - максимальная частота вращения шпинделя, об/мин.

d_0 - диаметр сквозного отверстия шпинделя, мм.

d_3 - диаметр шпинделя в задней опоре, мм.

d_1 - диаметр шпинделя между опорами, мм.

d^* - диаметр шпинделя в передней опоре, мм.

d_2 - диаметр консольной части шпинделя, мм.

dk - диаметр конца шпинделя, мм.

N - предварительный натяг в подшипнике передней опоры (если параметр отсутствует ввести значение ="-1"), Н.

S - радиальный зазор в подшипнике передней опоры (если параметр отсутствует ввести значение ="-1"), мкм.

n - частота вращения шпинделя, об/мин.

t_m - время работы на заданной частоте вращения шпинделя, мин.

P - сила прикладываемая (статически) к переднему концу шпинделя (в плоскости главной и радиальной составляющих сил резания) в момент времени t_m , Н.

Выходные переменные:

T - температура в зоне наружного кольца подшипника передней опоры в момент времени t_m , °C.

Δ - биение переднего конца шпинделя, мкм ($_D_*$).

δ - упругое смещение (в плоскости радиальной составляющей силы резания - P_y) переднего конца шпинделя от силы P , мкм (d^*).

f_1 - собственная частота шпинделя, Гц.

ПРИМЕЧАНИЕ:

* - переменные, имеют альтернативное обозначение в разработанных программах. Это вызвано техническими ограничениями на использование греческих символов при компиляции кода программ написанных на языке C.

Таблица Б.1 - Статистика данных. Размах переменных интегрированного обучающего набора данных

	Входные переменные																				
	H_w	W_w	B_w	X_{cw}	Y_{cw}	dow	now	$n2$	$n1$	$KT2$	$KT1$	$l1$	l	a	n_{max}	$d0$	$d3$	$d1$	$d^{\wedge}$	$d2$	d_k
Мин.	164,0	112,0	30,0	56,0	108,0	72,0	0,0	1,0	1,0	2,0	2,0	66,0	128,0	50,0	710,0	16,0	30,0	30,0	35,0	46,0	92,0
Макс.	555,0	700,0	90,0	308,0	314,0	210,0	5,0	2,0	3,0	5,0	5,0	608,0	833,0	159,0	6000,0	95,0	120,0	133,0	140,0	157,0	290,0
Среднее	293,9	352,9	54,0	164,8	177,5	128,2	2,7	1,3	1,3	4,0	3,8	265,1	425,2	104,2	2166,1	41,3	64,0	69,0	80,8	85,2	158,4
Стандарт. отклонение	83,3	140,7	17,5	61,4	47,1	34,9	1,9	0,5	0,7	0,8	0,8	118,5	177,7	25,1	795,5	16,6	21,2	24,0	25,4	26,9	40,1

Продолжение таблицы Б.1

	Входные переменные					Выходные переменные			
	N	S	n	t_m	P	T	Δ	δ	$f1$
Мин.	-1,0	-1,0	0,0	0,0	333,0	23,7	0,5	0,0	65,2
Макс.	1450,0	5,5	5000,0	150,0	11200,0	93,1	10,0	23,8	747,8
Среднее	139,8	1,6	925,2	85,3	2492,0	40,3	4,5	9,9	339,2
Стандарт. отклонение	329,1	1,9	828,3	59,4	1883,7	14,0	2,8	5,5	170,3

Таблица В.1 - Корреляции Спирмена (ρ) и Пирсона (r) для экспериментальных данных (541 наблюдение)

Переменная	Коэффициенты корреляций					
	Отмеченные корреляции значимы при $p < 0,05$					
	T		Δ		δ	
ВЫХ. ВХ.	ρ	r	ρ	r	ρ	r
Hw	-0,191	-0,124	0,178	0,134	0,008	0,060
Ww	-0,170	-0,211	0,822	0,555	0,173	0,121
Bw	0,050	0,030	-0,364	-0,406	-0,113	-0,119
Xcw	0,117	0,130	-0,549	-0,540	-0,141	-0,143
Ycw	-0,191	-0,160	0,178	0,123	0,008	0,066
dow	-0,207	-0,153	0,194	0,247	-0,013	0,041
now	-0,217	-0,142	0,584	0,505	0,091	0,114
$n2$	-0,125	-0,155	0,173	0,106	0,038	0,034
$KT2$	0,022	-0,015	-0,251	-0,268	-0,061	-0,079
$KT1$	-0,051	-0,121	-0,083	0,055	-0,058	-0,045
$l1$	-0,073	0,026	-0,328	-0,583	-0,126	-0,140
l	-0,200	-0,180	0,859	0,907	0,143	0,201
a	0,074	0,000	-0,386	0,108	-0,089	0,015
n_{max}	0,038	0,135	-0,589	-0,759	-0,088	-0,064
$d0$	-0,212	-0,162	0,199	0,056	-0,015	-0,008
$d3$	-0,208	-0,145	0,194	0,074	-0,014	0,008
$d1$	-0,192	-0,169	0,144	0,085	-0,016	0,014
d	-0,217	-0,171	0,584	0,535	0,091	0,117
$d2$	-0,171	-0,118	0,005	0,046	-0,059	-0,003
d_k	-0,090	-0,056	0,362	0,385	0,050	0,076
S	-0,226	-0,271	0,556	0,660	0,250	0,256
n	0,820	0,790	0,139	0,017	-0,060	-0,057
t_m	0,442	0,428	0,104	0,077	-0,068	-0,069
P	-0,092	-0,103	0,030	0,031	0,900	0,877

Таблица В.2 - Корреляции Спирмена (ρ) и Пирсона (r) для совокупности экспериментальных данных и данных аналитических расчетов (1063 строки данных)

Переменная	Коэффициенты корреляций							
	Отмеченные корреляции значимы при $p < 0,05$							
	T		Δ		δ		$f1$	
ВЫХ. ВХ.	ρ	r	ρ	r	ρ	r	ρ	r
Hw	0,077	0,178	0,239	0,177	-0,100	-0,024	-0,349	-0,379
Ww	0,063	0,104	0,553	0,508	-0,088	-0,021	-0,670	-0,649
Bw	0,130	0,212	-0,302	-0,350	-0,079	-0,078	0,112	0,110
Xcw	0,124	0,073	0,222	0,225	-0,157	-0,166	-0,283	-0,330
Ycw	0,063	0,198	0,124	0,227	-0,082	0,003	-0,248	-0,374
dow	0,074	0,190	0,274	0,255	-0,113	-0,042	-0,343	-0,422
now	0,007	-0,034	0,599	0,591	-0,047	-0,044	-0,611	-0,621
$n2$	-0,038	-0,097	0,049	0,054	0,088	0,084	0,279	0,328
$n1$	-0,068	0,023	-0,480	-0,436	0,099	0,058	0,160	0,140
$KT2$	-0,053	-0,085	0,109	0,169	0,105	0,119	0,166	0,149
$KT1$	-0,061	-0,101	0,335	0,350	0,066	0,080	0,007	0,020
$l1$	0,068	0,109	-0,124	-0,128	-0,172	-0,221	0,190	0,155
l	0,045	0,096	0,645	0,621	-0,079	0,001	-0,776	-0,834
a	0,124	0,131	0,183	0,271	-0,117	-0,093	-0,301	-0,492
n_{max}	0,037	0,076	-0,583	-0,537	0,031	0,025	0,569	0,621
$d0$	0,064	0,193	0,029	0,002	-0,093	-0,012	-0,161	-0,211
$d3$	0,063	0,204	0,025	0,071	-0,066	-0,010	-0,117	-0,192
$d1$	0,067	0,192	0,065	0,143	-0,094	-0,021	-0,132	-0,248
d	0,082	0,196	0,382	0,304	-0,080	-0,020	-0,468	-0,455
$d2$	0,092	0,184	0,251	0,166	-0,112	-0,031	-0,272	-0,299
d_k	0,090	0,157	0,420	0,330	-0,073	-0,037	-0,439	-0,436
N	-0,096	0,011	-0,497	-0,324	0,086	-0,047	0,208	0,163
S	0,033	-0,029	0,594	0,597	0,059	0,056	-0,368	-0,359
n	0,845	0,733	-0,046	-0,120	0,011	0,030	0,099	0,216
t_m	0,629	0,579	-0,041	-0,034	0,099	0,070	0,063	0,093
P	0,101	0,179	0,076	0,128	0,671	0,643	-0,016	-0,168

Таблица Г. 1 - Сравнение ошибок прогнозирования ЭХ аналитическими моделями и моделью на основе нейронной сети со значениями натурального эксперимента

Режимы эксплуатации			Значения натурального эксперимента			Аналитическая + численная модель						Нейросетевая модель					
						Результаты расчетов			Отн. ошибка расчетов (ε)			Результаты прогнозов			Отн. ошибка прогнозов (ε)		
n , об/мин	t_m , мин	P , Н	T	Δ	δ	T	Δ	δ	T	Δ	δ	T	Δ	δ	T	Δ	δ
Для станка мод. 1А616																	
0	0	500	23,7	5,70	2,00	25,5	3,3	2,8	7,6	42,1	40,0	25,4	5,7	2,2	7,0	0,2	10,1
0	0	1000	23,7	5,70	4,00	25,5	3,3	5,3	7,6	42,1	32,5	25,3	5,8	4,6	7,0	1,4	14,4
0	0	1500	23,7	5,70	9,00	25,5	3,3	7,7	7,6	42,1	14,4	25,3	5,8	7,7	6,9	2,1	14,5
0	0	2000	23,7	5,70	11,00	25,5	3,3	10,2	7,6	42,1	7,3	25,3	5,8	11,1	6,8	2,3	0,6
0	0	2500	23,7	5,70	14,00	25,5	3,3	12,6	7,6	42,1	10,0	25,3	5,8	14,2	6,6	1,9	1,7
0	0	3000	23,7	5,70	17,00	25,5	3,3	15	7,6	42,1	11,8	25,2	5,8	16,9	6,4	1,1	0,7
0	0	3500	23,7	5,70	19,00	25,5	3,3	17,5	7,6	42,1	7,9	25,2	5,7	18,8	6,3	0,2	0,9
0	0	4000	23,7	5,70	21,50	25,5	3,3	20	7,6	42,1	7,0	25,1	5,7	20,1	6,1	0,4	6,4
280	30	2500	28,4	6,00	14,00	31,2	3,3	12,6	9,9	45,0	10,0	28,8	6,4	14,0	1,3	5,9	0,3
280	60	3500	29,7	6,00	18,00	31,2	3,3	17,5	5,1	45,0	2,8	30,2	6,4	18,7	1,7	6,3	3,9
280	60	4000	29,7	6,00	20,50	31,2	3,3	20	5,1	45,0	2,4	30,2	6,4	20,0	1,5	5,9	2,3
280	90	500	30,4	6,00	2,00	31,2	3,3	2,8	2,6	45,0	40,0	31,3	6,4	2,2	3,1	6,3	10,4
280	90	2500	30,4	6,00	12,00	31,2	3,3	12,6	2,6	45,0	5,0	31,5	6,5	14,0	3,7	8,8	16,9
280	105	1500	30,4	6,33	8,50	31,2	3,3	7,7	2,6	47,9	9,4	32,1	6,5	7,6	5,5	3,5	10,6
280	120	500	31,0	6,50	2,00	31,2	3,3	2,8	0,6	49,2	40,0	32,4	6,4	2,2	4,5	0,8	11,3
280	135	2000	31,0	6,50	11,50	31,2	3,3	10,2	0,6	49,2	11,3	33,2	6,6	10,9	7,0	2,3	5,6

Продолжение таблицы Г.1

280	135	3000	31,0	6,50	16,50	31,2	3,3	15	0,6	49,2	9,1	33,2	6,6	16,6	7,0	1,8	0,7
280	150	500	31,6	6,33	1,50	31,2	3,3	2,8	1,3	47,9	86,7	33,4	6,5	2,2	5,8	3,0	49,7
280	150	2000	31,6	6,33	11,50	31,2	3,3	10,2	1,3	47,9	11,3	33,7	6,7	10,8	6,8	5,6	5,8
280	150	3500	31,6	6,33	17,50	31,2	3,3	17,5	1,3	47,9	0,0	33,7	6,6	18,6	6,6	4,6	6,3
355	45	1000	30,9	6,00	5,00	32,7	3,3	5,3	5,8	45,0	6,0	30,7	6,5	4,4	0,6	8,3	12,1
355	60	1000	31,5	6,00	4,00	32,7	3,3	5,3	3,8	45,0	32,5	31,5	6,5	4,4	0,0	8,9	10,4
355	60	3000	31,5	6,00	17,00	32,7	3,3	15	3,8	45,0	11,8	31,5	6,6	16,6	0,1	9,4	2,2
355	90	3500	32,6	6,66	19,00	32,7	3,3	17,5	0,3	50,5	7,9	32,8	6,6	18,6	0,5	0,8	2,1
355	120	1500	33,4	6,66	7,00	32,7	3,3	7,7	2,1	50,5	10,0	34,1	6,7	7,5	2,0	1,1	6,7
355	120	3500	33,4	6,66	19,00	32,7	3,3	17,5	2,1	50,5	7,9	34,0	6,7	18,6	1,7	0,3	2,3
450	30	1500	31,6	6,83	7,50	34,7	3,3	7,7	9,8	51,7	2,7	31,2	6,7	7,2	1,2	2,1	3,8
450	45	1000	32,6	7,16	3,50	34,7	3,3	5,3	6,4	53,9	51,4	32,3	6,7	4,3	0,9	6,6	22,2
450	60	3500	33,4	6,83	18,50	34,7	3,3	17,5	3,9	51,7	5,4	33,1	6,7	18,5	0,9	1,9	0,1
450	75	2000	34,2	7,66	10,00	34,7	3,3	10,2	1,5	56,9	2,0	34,1	6,8	10,6	0,4	11,0	5,9
450	90	3000	34,8	7,50	16,00	34,7	3,3	15	0,3	56,0	6,3	34,7	6,8	16,5	0,4	9,3	2,9
450	105	3000	35,2	8,16	16,00	34,7	3,3	15	1,4	59,6	6,3	35,3	6,8	16,4	0,4	16,3	2,7
450	120	1000	35,2	7,66	3,50	34,7	3,3	5,3	1,4	56,9	51,4	35,9	6,8	4,4	2,1	10,7	24,5
450	120	1500	35,2	7,66	7,50	34,7	3,3	7,7	1,4	56,9	2,7	36,0	6,9	7,3	2,3	10,1	2,4
450	135	2500	35,8	8,16	14,00	34,7	3,3	12,6	3,1	59,6	10,0	36,6	6,9	13,7	2,3	15,2	2,2
560	15	3500	30,6	6,66	19,00	36,9	3,3	17,5	20,6	50,5	7,9	31,0	6,8	18,3	1,2	1,4	3,7
560	30	1000	32,5	7,66	3,50	36,9	3,3	5,3	13,5	56,9	51,4	33,0	6,8	4,1	1,7	10,7	17,4
560	45	3000	33,9	6,66	16,00	36,9	3,3	15	8,8	50,5	6,3	34,2	6,9	16,3	0,9	3,1	2,1
560	60	2500	34,8	7,66	14,50	36,9	3,3	12,6	6,0	56,9	13,1	35,4	6,9	13,6	1,6	9,5	6,1
560	75	1500	35,6	7,83	6,50	36,9	3,3	7,7	3,7	57,9	18,5	36,3	7,0	7,1	1,9	11,1	9,8
560	75	3500	35,6	7,83	17,50	36,9	3,3	17,5	3,7	57,9	0,0	36,0	6,9	18,4	1,2	12,1	5,1

Продолжение таблицы Г.1

560	75	4000	35,6	7,83	20,00	36,9	3,3	20	3,7	57,9	0,0	35,9	6,9	19,8	0,8	12,4	1,2
560	90	3500	36,1	8,16	19,00	36,9	3,3	17,5	2,2	59,6	7,9	36,8	6,9	18,4	1,9	15,3	3,3
560	120	3000	37,4	7,16	16,50	36,9	3,3	15	1,3	53,9	9,1	38,2	7,0	16,3	2,2	2,4	1,3
560	135	1500	37,4	7,00	6,50	36,9	3,3	7,7	1,3	52,9	18,5	38,9	7,0	7,2	4,1	0,6	10,2
560	150	1500	38,1	6,66	7,50	36,9	3,3	7,7	3,1	50,5	2,7	39,5	7,1	7,2	3,7	6,0	4,4
560	150	3500	38,1	6,66	19,00	36,9	3,3	17,5	3,1	50,5	7,9	39,3	7,0	18,3	3,1	4,9	3,6
710	45	1000	37,2	6,00	4,00	39,9	3,3	5,3	7,3	45,0	32,5	37,3	7,1	4,0	0,2	17,5	0,1
710	45	2000	37,2	6,00	11,00	39,9	3,3	10,2	7,3	45,0	7,3	37,2	7,1	10,2	0,1	18,0	7,6
710	45	3000	37,2	6,00	16,00	39,9	3,3	15	7,3	45,0	6,3	37,0	7,0	16,2	0,6	17,0	1,0
710	60	2500	38,3	6,33	13,00	39,9	3,3	12,6	4,2	47,9	3,1	38,3	7,1	13,4	0,0	11,8	3,1
710	75	3000	39,0	6,33	15,50	39,9	3,3	15	2,3	47,9	3,2	39,1	7,1	16,2	0,2	11,4	4,3
710	75	3500	39,0	6,33	19,00	39,9	3,3	17,5	2,3	47,9	7,9	38,9	7,0	18,2	0,2	10,8	4,0
710	90	1000	39,7	6,33	3,50	39,9	3,3	5,3	0,5	47,9	51,4	40,0	7,1	4,1	0,8	12,1	16,3
710	105	1000	40,2	6,66	4,00	39,9	3,3	5,3	0,7	50,5	32,5	40,7	7,1	4,1	1,2	6,7	2,1
710	105	3000	40,2	6,66	15,50	39,9	3,3	15	0,7	50,5	3,2	40,5	7,1	16,1	0,7	6,3	4,2
710	120	3500	40,7	6,66	19,00	39,9	3,3	17,5	2,0	50,5	7,9	41,0	7,0	18,2	0,6	5,8	4,1
900	15	1000	36,0	7,33	4,00	43,6	3,3	5,3	21,1	55,0	32,5	36,5	7,1	3,7	1,4	2,6	6,9
900	30	2000	39,2	7,00	10,50	43,6	3,3	10,2	11,2	52,9	2,9	38,9	7,2	9,9	0,9	2,4	6,0
900	30	3500	39,2	7,00	19,00	43,6	3,3	17,5	11,2	52,9	7,9	38,3	7,1	18,0	2,3	0,7	5,1
900	45	500	41,0	6,66	2,00	43,6	3,3	2,8	6,3	50,5	40,0	40,7	7,1	1,8	0,8	6,9	9,1
900	60	2000	42,2	7,00	10,50	43,6	3,3	10,2	3,3	52,9	2,9	41,9	7,2	10,0	0,7	2,7	5,2
900	60	3000	42,2	7,00	13,50	43,6	3,3	15	3,3	52,9	11,1	41,6	7,1	16,0	1,5	1,6	18,4
900	60	3500	42,2	7,00	18,00	43,6	3,3	17,5	3,3	52,9	2,8	41,4	7,1	18,1	2,0	1,0	0,5
900	75	1500	43,1	7,33	7,00	43,6	3,3	7,7	1,2	55,0	10,0	42,9	7,2	6,7	0,5	1,8	3,9
900	75	2000	43,1	7,33	10,50	43,6	3,3	10,2	1,2	55,0	2,9	42,8	7,2	10,0	0,7	1,9	5,0

Продолжение таблицы Г.1

900	75	3000	43,1	7,33	16,00	43,6	3,3	15	1,2	55,0	6,3	42,5	7,1	16,0	1,4	2,8	0,1
900	75	3500	43,1	7,33	18,50	43,6	3,3	17,5	1,2	55,0	5,4	42,3	7,1	18,1	1,9	3,4	2,2
900	90	1000	43,9	7,00	4,00	43,6	3,3	5,3	0,7	52,9	32,5	43,6	7,2	3,9	0,7	2,5	2,0
900	90	4000	43,9	7,00	22,50	43,6	3,3	20	0,7	52,9	11,1	42,8	7,1	19,5	2,4	0,8	13,3
900	105	2500	44,3	7,00	14,00	43,6	3,3	12,6	1,6	52,9	10,0	44,0	7,2	13,2	0,6	2,5	5,8
900	120	500	45,4	6,00	2,00	43,6	3,3	2,8	4,0	45,0	40,0	44,6	7,1	1,9	1,7	18,8	5,3
900	120	3500	45,4	6,00	18,00	43,6	3,3	17,5	4,0	45,0	2,8	44,2	7,1	18,1	2,5	18,1	0,4
900	135	1000	45,8	6,00	4,00	43,6	3,3	5,3	4,8	45,0	32,5	45,2	7,2	4,0	1,2	19,6	0,7
1120	15	1000	39,5	6,66	4,00	48,5	3,3	5,3	22,8	50,5	32,5	39,5	7,2	3,6	0,1	7,8	10,6
1120	30	2500	43,1	8,16	13,00	48,5	3,3	12,6	12,5	59,6	3,1	42,0	7,2	12,9	2,5	12,3	0,7
1120	45	1500	44,8	7,50	6,00	48,5	3,3	7,7	8,3	56,0	28,3	44,4	7,2	6,5	1,0	3,9	7,8
1120	45	2500	44,8	7,50	12,50	48,5	3,3	12,6	8,3	56,0	0,8	44,0	7,2	13,0	1,7	4,5	3,7
1120	45	4000	44,8	7,50	20,00	48,5	3,3	20	8,3	56,0	0,0	43,3	7,0	19,3	3,4	6,1	3,4
1120	75	500	47,6	7,50	1,50	48,5	3,3	2,8	1,9	56,0	86,7	46,5	7,1	1,8	2,3	4,7	18,6
1120	75	1000	47,6	7,50	3,00	48,5	3,3	5,3	1,9	56,0	76,7	46,6	7,2	3,8	2,1	4,1	25,3
1120	75	2000	47,6	7,50	9,50	48,5	3,3	10,2	1,9	56,0	7,4	46,5	7,2	9,8	2,3	4,0	2,7
1120	75	2500	47,6	7,50	12,00	48,5	3,3	12,6	1,9	56,0	5,0	46,3	7,2	13,0	2,7	4,5	8,3
1120	105	1500	49,0	7,50	7,00	48,5	3,3	7,7	1,0	56,0	10,0	47,9	7,2	6,6	2,3	4,0	6,3
1120	120	500	49,0	7,83	1,50	48,5	3,3	2,8	1,0	57,9	86,7	48,3	7,1	1,8	1,5	8,9	21,2
1120	120	1500	49,0	7,83	6,50	48,5	3,3	7,7	1,0	57,9	18,5	48,4	7,2	6,6	1,2	8,1	1,1
1120	150	2000	49,9	7,66	10,00	48,5	3,3	10,2	2,8	56,9	2,0	49,2	7,2	9,8	1,4	6,2	2,3
1400	15	2500	42,2	7,66	13,00	54	3,3	12,6	28,0	56,9	3,1	42,5	7,1	12,5	0,8	7,5	3,6
1400	15	3500	42,2	7,66	18,50	54	3,3	17,5	28,0	56,9	5,4	41,9	7,0	17,5	0,8	8,7	5,3
1400	60	500	50,0	7,00	2,00	54	3,3	2,8	8,0	52,9	40,0	50,1	7,1	1,7	0,3	1,7	16,0
1400	60	2000	50,0	7,00	9,50	54	3,3	10,2	8,0	52,9	7,4	50,0	7,1	9,5	0,1	2,1	0,1

Продолжение таблицы Г.1

1400	60	2500	50,0	7,00	11,50	54	3,3	12,6	8,0	52,9	9,6	49,8	7,1	12,8	0,3	1,5	10,9
1400	75	3500	51,0	6,66	17,00	54	3,3	17,5	5,9	50,5	2,9	50,3	7,0	17,7	1,3	5,2	4,3
1400	105	500	53,0	7,33	2,00	54	3,3	2,8	1,9	55,0	40,0	52,3	7,1	1,7	1,3	3,2	13,9
1400	150	500	54,7	6,66	2,00	54	3,3	2,8	1,3	50,5	40,0	53,6	7,1	1,8	2,0	6,2	12,1
1800	15	2500	46,9	6,33	12,00	61,9	3,3	12,6	32,0	47,9	5,0	47,9	7,0	12,2	2,2	10,0	1,7
1800	15	3000	46,9	6,33	14,50	61,9	3,3	15	32,0	47,9	3,4	47,6	6,9	15,1	1,4	9,2	3,8
1800	30	1000	51,4	7,66	3,50	61,9	3,3	5,3	20,4	56,9	51,4	52,9	7,1	3,3	3,0	7,8	5,4
1800	30	4000	51,4	7,66	21,00	61,9	3,3	20	20,4	56,9	4,8	51,2	6,9	18,8	0,4	10,5	10,7
1800	60	1000	56,0	6,66	3,50	61,9	3,3	5,3	10,5	50,5	51,4	57,1	7,1	3,4	1,9	6,0	3,1
1800	60	1500	56,0	6,66	7,00	61,9	3,3	7,7	10,5	50,5	10,0	57,0	7,1	6,0	1,8	6,0	14,0
1800	75	500	57,1	7,66	2,00	61,9	3,3	2,8	8,4	56,9	40,0	58,0	7,0	1,6	1,6	8,2	20,0
1800	90	2000	58,0	8,00	10,00	61,9	3,3	10,2	6,7	58,8	2,0	58,7	7,0	9,2	1,1	12,1	7,8
1800	105	2500	59,0	6,66	13,00	61,9	3,3	12,6	4,9	50,5	3,1	59,1	7,0	12,5	0,1	4,8	4,1
1800	120	1000	59,4	6,50	4,00	61,9	3,3	5,3	4,2	49,2	32,5	59,9	7,0	3,5	0,8	8,3	13,4
1800	120	1500	59,4	6,50	7,00	61,9	3,3	7,7	4,2	49,2	10,0	59,9	7,0	6,1	0,8	8,4	13,1
1800	135	500	59,4	7,66	2,00	61,9	3,3	2,8	4,2	56,9	40,0	60,2	7,0	1,6	1,4	8,7	17,7
1800	150	2000	60,0	6,33	10,00	61,9	3,3	10,2	3,2	47,9	2,0	60,6	7,0	9,2	1,0	10,8	7,8
Для станка мод. 1К62																	
Режимы эксплуатации			Значения натурного эксперимента			Аналитическая + численная модель						Нейросетевая модель					
						Результаты расчетов			Отн. ошибка расчетов (ε)			Результаты прогнозов			Отн. ошибка прогнозов (ε)		
n , об/мин	t_m , мин	P , Н	T	Δ	δ	T	Δ	δ	T	Δ	δ	T	Δ	δ	T	Δ	δ
0	0	500	25,6	7,20	1,00	25,5	5,5	1,8	0,4	23,6	80,0	24,2	7,2	1,0	5,5	0,6	2,1
0	0	1000	25,6	7,20	2,50	25,5	5,5	3	0,4	23,6	20,0	24,2	7,2	2,3	5,4	0,6	7,5

Продолжение таблицы Г.1

0	0	1500	25,6	7,20	4,50	25,5	5,5	4,3	0,4	23,6	4,4	24,2	7,2	4,3	5,4	0,6	4,9
0	0	2000	25,6	7,20	6,50	25,5	5,5	5,5	0,4	23,6	15,4	24,2	7,2	6,5	5,4	0,5	0,4
0	0	2500	25,6	7,20	8,50	25,5	5,5	6,7	0,4	23,6	21,2	24,2	7,2	8,5	5,4	0,4	0,5
0	0	3000	25,6	7,20	9,50	25,5	5,5	7,8	0,4	23,6	17,9	24,2	7,2	10,4	5,4	0,2	9,4
0	0	3500	25,6	7,20	12,00	25,5	5,5	8,9	0,4	23,6	25,8	24,2	7,2	12,1	5,4	0,1	1,1
0	0	4000	25,6	7,20	13,00	25,5	5,5	10,1	0,4	23,6	22,3	24,2	7,2	13,9	5,4	0,0	6,9
0	0	4500	25,6	7,20	15,50	25,5	5,5	11,3	0,4	23,6	27,1	24,2	7,2	15,8	5,4	0,0	1,6
0	0	5000	25,6	7,20	18,00	25,5	5,5	12,3	0,4	23,6	31,7	24,2	7,2	17,7	5,4	0,1	1,8
0	0	5600	25,6	7,20	21,00	25,5	5,5	13,7	0,4	23,6	34,8	24,2	7,2	19,8	5,4	0,6	5,5
630	15	1000	26,7	7,33	2,50	26,2	5,5	3	1,9	25,0	20,0	26,7	8,0	2,3	0,1	8,5	7,3
630	15	2500	26,7	7,33	8,50	26,2	5,5	6,7	1,9	25,0	21,2	26,7	7,9	8,5	0,1	8,3	0,1
630	15	5600	26,7	7,33	20,50	26,2	5,5	13,7	1,9	25,0	33,2	26,6	7,8	20,1	0,2	6,9	1,8
630	30	500	27,1	7,50	1,50	26,2	5,5	1,8	3,3	26,7	20,0	27,6	7,9	1,0	1,7	6,0	33,3
630	45	4500	27,4	8,00	16,00	26,2	5,5	11,3	4,4	31,3	29,4	28,4	7,9	15,9	3,6	1,8	0,7
630	60	3500	28,1	7,66	11,00	26,2	5,5	8,9	6,8	28,2	19,1	29,0	7,9	12,1	3,3	2,5	9,6
630	90	1500	29,7	7,66	4,50	26,2	5,5	4,3	11,8	28,2	4,4	30,0	7,8	4,2	1,2	1,9	6,9
630	105	500	30,7	8,50	1,50	26,2	5,5	1,8	14,7	35,3	20,0	30,3	7,8	1,0	1,2	8,2	35,1
630	105	1000	30,7	8,50	2,50	26,2	5,5	3	14,7	35,3	20,0	30,5	7,8	2,3	0,8	8,4	9,3
630	120	500	31,4	7,83	2,00	26,2	5,5	1,8	16,6	29,8	10,0	30,8	7,8	1,0	1,9	0,8	51,8
630	120	3500	31,4	7,83	12,00	26,2	5,5	8,9	16,6	29,8	25,8	31,1	7,7	11,6	1,0	1,8	3,3
630	135	3000	32,0	7,83	10,50	26,2	5,5	7,8	18,1	29,8	25,7	31,6	7,7	9,8	1,3	2,2	6,6
630	135	4000	32,0	7,83	14,00	26,2	5,5	10,1	18,1	29,8	27,9	31,6	7,6	13,2	1,3	2,5	5,6
630	135	5000	32,0	7,83	18,00	26,2	5,5	12,3	18,1	29,8	31,7	31,6	7,6	17,1	1,1	3,2	4,9
630	150	2500	32,6	7,66	8,50	26,2	5,5	6,7	19,6	28,2	21,2	32,1	7,6	8,0	1,7	0,4	6,4

Продолжение таблицы Г.1

630	150	5000	32,6	7,66	17,50	26,2	5,5	12,3	19,6	28,2	29,7	32,1	7,5	17,0	1,4	1,7	3,0
800	30	3500	28,0	8,50	11,50	26,5	5,5	8,9	5,4	35,3	22,6	28,7	7,9	12,3	2,3	6,7	6,9
800	30	4000	28,0	8,50	13,50	26,5	5,5	10,1	5,4	35,3	25,2	28,6	7,9	14,1	2,3	6,8	4,8
800	45	1500	28,0	8,33	4,50	26,5	5,5	4,3	5,4	34,0	4,4	29,6	7,9	4,3	5,7	4,8	3,9
800	45	2500	28,0	8,33	8,50	26,5	5,5	6,7	5,4	34,0	21,2	29,6	7,9	8,6	5,8	5,0	0,7
800	60	5600	29,6	7,33	21,00	26,5	5,5	13,7	10,5	25,0	34,8	30,4	7,7	20,1	2,7	5,6	4,3
800	75	2000	30,3	8,16	6,50	26,5	5,5	5,5	12,5	32,6	15,4	31,0	7,8	6,4	2,3	3,9	1,4
800	90	500	30,7	8,16	0,50	26,5	5,5	1,8	13,7	32,6	260,0	31,3	7,8	1,0	2,0	3,8	99,8
800	90	5600	30,7	8,16	21,00	26,5	5,5	13,7	13,7	32,6	34,8	31,7	7,6	19,9	3,1	6,3	5,2
800	105	500	31,9	7,66	0,50	26,5	5,5	1,8	16,9	28,2	260,0	31,8	7,8	1,0	0,2	2,0	98,1
800	105	2500	31,9	7,66	8,50	26,5	5,5	6,7	16,9	28,2	21,2	32,1	7,8	8,3	0,7	1,2	2,6
800	135	1500	33,0	7,00	4,50	26,5	5,5	4,3	19,7	21,4	4,4	33,1	7,7	4,1	0,2	9,9	8,8
800	135	3000	33,0	7,00	9,50	26,5	5,5	7,8	19,7	21,4	17,9	33,2	7,6	9,9	0,6	9,3	4,1
800	135	4000	33,0	7,00	13,50	26,5	5,5	10,1	19,7	21,4	25,2	33,2	7,6	13,4	0,7	8,9	1,1
800	150	1000	34,0	8,00	2,50	26,5	5,5	3	22,1	31,3	20,0	33,5	7,7	2,2	1,5	4,2	10,9
800	150	2000	34,0	8,00	6,50	26,5	5,5	5,5	22,1	31,3	15,4	33,7	7,6	6,1	1,0	4,6	6,3
800	150	2500	34,0	8,00	8,50	26,5	5,5	6,7	22,1	31,3	21,2	33,7	7,6	8,0	0,9	4,8	5,6
800	150	3500	34,0	8,00	11,50	26,5	5,5	8,9	22,1	31,3	22,6	33,7	7,6	11,5	0,8	5,2	0,3
1000	30	4500	28,6	8,83	14,50	27	5,5	11,3	5,6	37,7	22,1	29,9	7,9	16,3	4,5	10,8	12,4
1000	60	1000	31,2	7,50	2,50	27	5,5	3	13,5	26,7	20,0	31,9	7,9	2,4	2,1	5,2	4,1
1000	60	5000	31,2	7,50	17,50	27	5,5	12,3	13,5	26,7	29,7	32,0	7,8	18,1	2,7	3,5	3,6
1000	75	1500	32,7	7,50	4,50	27	5,5	4,3	17,4	26,7	4,4	32,6	7,8	4,3	0,2	4,5	3,8
1000	75	2000	32,7	7,50	6,50	27	5,5	5,5	17,4	26,7	15,4	32,7	7,8	6,5	0,0	4,3	0,2
1000	90	2000	35,5	7,33	6,50	27	5,5	5,5	23,9	25,0	15,4	33,3	7,8	6,4	6,1	6,1	1,1

Продолжение таблицы Г.1

1000	105	3000	35,8	8,00	9,50	27	5,5	7,8	24,6	31,3	17,9	34,0	7,7	10,2	5,1	3,6	7,5
1000	105	3500	35,8	8,00	10,50	27	5,5	8,9	24,6	31,3	15,2	34,0	7,7	12,0	5,0	3,8	14,1
1000	105	4000	35,8	8,00	12,50	27	5,5	10,1	24,6	31,3	19,2	34,0	7,7	13,8	5,0	4,0	10,4
1000	150	2500	37,5	7,66	8,50	27	5,5	6,7	28,0	28,2	21,2	35,6	7,6	8,1	5,0	1,1	4,6
1000	150	3500	37,5	7,66	10,00	27	5,5	8,9	28,0	28,2	11,0	35,7	7,5	11,6	4,8	1,5	16,1
1250	15	500	30,9	8,50	1,00	27,6	5,5	1,8	10,7	35,3	80,0	29,7	8,0	1,1	3,8	6,3	5,0
1250	15	3000	30,9	8,50	10,00	27,6	5,5	7,8	10,7	35,3	22,0	29,7	7,9	10,7	3,7	7,0	6,9
1250	30	2000	30,4	8,16	6,50	27,6	5,5	5,5	9,2	32,6	15,4	31,6	7,9	6,7	4,0	3,3	2,8
1250	30	4000	30,4	8,16	13,50	27,6	5,5	10,1	9,2	32,6	25,2	31,6	7,8	14,5	4,0	3,9	7,7
1250	30	5600	30,4	8,16	20,50	27,6	5,5	13,7	9,2	32,6	33,2	31,6	7,7	20,6	3,9	5,4	0,3
1250	60	4000	34,4	7,66	13,50	27,6	5,5	10,1	19,8	28,2	25,2	34,2	7,8	14,4	0,7	1,3	6,6
1250	60	4500	34,4	7,66	16,00	27,6	5,5	11,3	19,8	28,2	29,4	34,2	7,7	16,4	0,6	1,0	2,4
1250	75	1500	35,4	7,66	4,50	27,6	5,5	4,3	22,0	28,2	4,4	34,8	7,8	4,4	1,6	1,7	1,8
1250	90	2500	36,7	8,16	6,50	27,6	5,5	6,7	24,8	32,6	3,1	35,7	7,7	8,6	2,8	5,5	32,1
1250	150	1000	40,1	7,00	2,50	27,6	5,5	3	31,2	21,4	20,0	37,6	7,6	2,3	6,2	8,3	7,0
1250	150	1500	40,1	7,00	4,50	27,6	5,5	4,3	31,2	21,4	4,4	37,8	7,6	4,2	5,7	8,0	6,6
1250	150	3500	40,1	7,00	13,00	27,6	5,5	8,9	31,2	21,4	31,5	38,2	7,5	11,8	4,8	6,9	9,3
1250	150	4500	40,1	7,00	16,00	27,6	5,5	11,3	31,2	21,4	29,4	38,3	7,4	15,6	4,4	6,2	2,7
1250	150	5600	40,1	7,00	20,50	27,6	5,5	13,7	31,2	21,4	33,2	38,6	7,3	19,9	3,9	4,5	3,1
1600	15	500	31,9	7,50	1,00	28,6	5,5	1,8	10,3	26,7	80,0	31,5	7,9	1,1	1,2	5,2	9,2
1600	15	5600	31,9	7,50	21,00	28,6	5,5	13,7	10,3	26,7	34,8	31,5	7,6	20,8	1,1	2,0	0,8
1600	45	1500	36,0	7,83	4,50	28,6	5,5	4,3	20,6	29,8	4,4	35,7	7,8	4,6	0,7	0,5	2,1
1600	45	4500	36,0	7,83	16,50	28,6	5,5	11,3	20,6	29,8	31,5	36,1	7,7	16,8	0,2	1,8	2,1
1600	60	4000	37,8	7,16	14,00	28,6	5,5	10,1	24,3	23,2	27,9	37,4	7,7	14,7	1,1	7,2	5,2

Продолжение таблицы Г.1

1600	90	3000	38,4	8,00	12,00	28,6	5,5	7,8	25,5	31,3	35,0	39,0	7,6	10,7	1,6	4,8	10,8
1600	105	5000	39,7	8,33	20,00	28,6	5,5	12,3	28,0	34,0	38,5	40,1	7,4	18,4	1,1	10,6	8,1
1600	120	1000	39,9	7,33	2,50	28,6	5,5	3	28,3	25,0	20,0	39,6	7,6	2,5	0,7	3,6	1,7
1600	120	4500	39,9	7,33	17,00	28,6	5,5	11,3	28,3	25,0	33,5	40,6	7,4	16,2	1,9	1,5	4,6
1600	135	2500	39,3	7,00	8,50	28,6	5,5	6,7	27,2	21,4	21,2	40,7	7,5	8,5	3,6	6,9	0,1
1600	135	4500	39,3	7,00	18,00	28,6	5,5	11,3	27,2	21,4	37,2	41,2	7,4	16,1	4,9	5,5	10,7
1600	150	5600	38,6	8,66	22,00	28,6	5,5	13,7	25,9	36,5	37,7	42,2	7,2	20,2	9,2	16,8	8,4
2000	45	1000	38,6	8,00	2,50	30	5,5	3	22,3	31,3	20,0	38,6	7,7	2,7	0,1	3,4	6,1
2000	45	2000	38,6	8,00	6,50	30	5,5	5,5	22,3	31,3	15,4	38,9	7,7	7,0	0,9	3,8	8,1
2000	60	4500	39,8	7,66	17,00	30	5,5	11,3	24,6	28,2	33,5	41,1	7,5	17,2	3,3	1,6	0,9
2000	60	5000	39,8	7,66	18,50	30	5,5	12,3	24,6	28,2	33,5	41,3	7,5	19,1	3,7	2,2	3,3
2000	75	3500	40,9	7,16	12,00	30	5,5	8,9	26,7	23,2	25,8	41,9	7,6	13,0	2,5	5,5	8,4
2000	90	500	40,3	8,33	0,50	30	5,5	1,8	25,6	34,0	260,0	41,4	7,6	1,2	2,6	8,5	130,2
2000	90	1500	40,3	8,33	4,50	30	5,5	4,3	25,6	34,0	4,4	42,0	7,6	4,7	4,2	9,0	3,4
2000	90	4000	40,3	8,33	16,00	30	5,5	10,1	25,6	34,0	36,9	42,9	7,5	14,9	6,5	10,2	7,1
2000	105	500	41,0	7,33	0,50	30	5,5	1,8	26,8	25,0	260,0	41,9	7,6	1,1	2,3	3,4	128,2
2000	105	2000	41,0	7,33	6,50	30	5,5	5,5	26,8	25,0	15,4	42,8	7,5	6,8	4,5	2,5	4,8
2000	105	4000	41,0	7,33	15,00	30	5,5	10,1	26,8	25,0	32,7	43,6	7,4	14,7	6,3	1,4	1,8
2000	120	500	41,4	6,16	0,50	30	5,5	1,8	27,5	10,7	260,0	42,4	7,5	1,1	2,5	22,3	126,0
2000	135	5000	42,5	6,83	18,50	30	5,5	12,3	29,4	19,5	33,5	45,2	7,2	18,5	6,2	5,8	0,1
2000	150	1000	43,3	7,83	2,50	30	5,5	3	30,7	29,8	20,0	43,7	7,4	2,5	0,9	5,3	0,0
2000	150	5000	43,3	7,83	21,50	30	5,5	12,3	30,7	29,8	42,8	45,7	7,2	18,4	5,4	8,4	14,5

Для станков мод. 16Б16КП и 400ХС Вектор																	
Режимы эксплуатации			Значения натурального эксперимента			Аналитическая + численная модель						Нейросетевая модель					
						Результаты расчетов			Отн. ошибка расчетов (ε)			Результаты прогнозов			Отн. ошибка прогнозов (ε)		
n , об/мин	t_m , мин	P , Н	T	Δ	δ	T	Δ	δ	T	Δ	δ	T	Δ	δ	T	Δ	δ
0	0	500	25,5	1,89	0,50	25,5	1,3	1,3	0,0	31,2	160,0	25,0	1,8	0,8	1,8	7,2	58,2
0	0	1000	25,5	1,89	2,50	25,5	1,3	2,6	0,0	31,2	4,0	25,0	1,8	2,0	1,8	7,1	18,7
0	0	1500	25,5	1,89	5,00	25,5	1,3	3,8	0,0	31,2	24,0	25,0	1,8	4,1	1,9	6,9	19,0
0	0	2000	25,5	1,89	6,00	25,5	1,3	4,9	0,0	31,2	18,3	25,0	1,8	6,5	2,0	6,5	8,1
0	0	2500	25,5	1,89	8,00	25,5	1,3	6	0,0	31,2	25,0	25,0	1,8	8,9	2,0	6,0	11,1
0	0	3000	25,5	1,89	10,00	25,5	1,3	7,1	0,0	31,2	29,0	25,0	1,8	11,0	2,1	5,3	10,3
0	0	3500	25,5	1,89	12,00	25,5	1,3	8,2	0,0	31,2	31,7	24,9	1,8	12,9	2,2	4,5	7,4
0	0	4000	25,5	1,89	13,00	25,5	1,3	9,3	0,0	31,2	28,5	24,9	1,8	14,5	2,3	3,5	11,7
0	0	4500	25,5	1,89	15,00	25,5	1,3	10,4	0,0	31,2	30,7	24,9	1,8	16,0	2,3	2,4	6,4
0	0	5000	25,5	1,89	16,50	25,5	1,3	12,3	0,0	31,2	25,5	24,9	1,9	17,2	2,4	1,3	4,3
0	0	5600	25,5	1,89	19,00	25,5	1,3	14,1	0,0	31,2	25,8	24,9	1,9	18,5	2,5	0,1	2,8
400	30	4500	31,2	2,66	18,00	35,1	1,3	10,4	12,5	51,1	42,2	31,0	2,0	15,8	0,7	24,6	12,3
400	45	2500	32,4	2,33	10,00	35,1	1,3	6	8,3	44,2	40,0	33,2	1,9	8,7	2,4	16,7	13,0
400	45	5600	32,4	2,33	17,00	35,1	1,3	14,1	8,3	44,2	17,1	32,9	2,0	18,4	1,6	12,0	8,4
400	60	3000	34,0	2,33	12,00	35,1	1,3	7,1	3,2	44,2	40,8	34,6	1,9	10,9	1,8	16,4	9,5
400	75	3500	35,1	2,66	13,00	35,1	1,3	8,2	0,0	51,1	36,9	35,7	2,0	12,7	1,8	26,5	2,2
400	105	5000	37,0	2,16	18,00	35,1	1,3	12,3	5,1	39,8	31,7	37,5	2,0	17,0	1,3	7,9	5,5
400	105	5600	37,0	2,16	17,50	35,1	1,3	14,1	5,1	39,8	19,4	37,5	2,0	18,3	1,4	6,8	4,8

Продолжение таблицы Г.1

400	135	2000	38,5	1,50	8,00	35,1	1,3	4,9	8,8	13,3	38,8	39,0	1,9	6,3	1,4	27,1	21,1
630	15	4000	29,2	2,00	16,00	40,5	1,3	9,3	38,7	35,0	41,9	30,2	2,0	13,8	3,4	2,0	13,7
630	15	4500	29,2	2,00	14,50	40,5	1,3	10,4	38,7	35,0	28,3	30,1	2,0	15,3	3,1	0,9	5,7
630	15	5600	29,2	2,00	17,50	40,5	1,3	14,1	38,7	35,0	19,4	29,9	2,0	18,0	2,5	1,5	3,0
630	45	4500	36,0	2,00	15,50	40,5	1,3	10,4	12,5	35,0	32,9	35,9	2,0	15,6	0,3	1,1	0,5
630	60	500	38,1	1,50	0,50	40,5	1,3	1,3	6,3	13,3	160,0	37,9	1,9	0,7	0,4	26,2	48,7
630	75	1000	39,0	1,66	1,00	40,5	1,3	2,6	3,8	21,7	160,0	39,3	1,9	1,9	0,7	13,6	90,8
630	105	1500	41,1	1,50	4,00	40,5	1,3	3,8	1,5	13,3	5,0	41,2	1,9	3,8	0,2	24,9	5,2
630	120	3000	42,5	1,50	9,50	40,5	1,3	7,1	4,7	13,3	25,3	41,9	1,9	10,4	1,4	25,6	9,6
630	120	5600	42,5	1,50	17,50	40,5	1,3	14,1	4,7	13,3	19,4	42,0	2,0	18,1	1,2	31,6	3,4
630	135	3500	42,9	2,00	11,50	40,5	1,3	8,2	5,6	35,0	28,7	42,6	1,9	12,2	0,7	5,6	6,2
630	135	4500	42,9	2,00	14,00	40,5	1,3	10,4	5,6	35,0	25,7	42,6	1,9	15,4	0,6	3,9	9,7
1000	30	2000	37,6	1,50	6,00	49,1	1,3	4,9	30,6	13,3	18,3	37,7	1,8	5,5	0,2	21,2	7,6
1000	45	5000	40,5	1,33	16,00	49,1	1,3	12,3	21,2	2,3	23,1	40,8	1,9	16,5	0,6	45,1	3,2
1000	90	4000	46,5	2,00	13,00	49,1	1,3	9,3	5,6	35,0	28,5	46,0	1,9	13,6	1,2	7,2	4,3
1000	105	1500	47,5	1,83	3,00	49,1	1,3	3,8	3,4	29,0	26,7	46,7	1,8	3,5	1,7	2,5	16,9
1000	105	3500	47,5	1,83	10,50	49,1	1,3	8,2	3,4	29,0	21,9	46,8	1,8	11,8	1,4	0,1	12,5
1000	105	5000	47,5	1,83	16,00	49,1	1,3	12,3	3,4	29,0	23,1	47,0	1,9	16,4	1,0	3,5	2,7
1000	120	1000	48,3	1,50	1,00	49,1	1,3	2,6	1,7	13,3	160,0	47,3	1,8	1,8	2,0	18,5	76,3
1000	120	2500	48,3	1,50	8,00	49,1	1,3	6	1,7	13,3	25,0	47,5	1,8	7,8	1,6	19,6	1,9
1000	135	3000	49,1	1,66	9,50	49,1	1,3	7,1	0,0	21,7	25,3	48,2	1,8	9,9	1,8	8,4	3,8
1600	15	2500	37,7	1,83	7,00	63,4	1,3	6	68,2	29,0	14,3	37,4	1,7	6,8	0,7	7,0	3,5
1600	30	2500	44,5	1,83	7,00	63,4	1,3	6	42,5	29,0	14,3	43,9	1,7	7,0	1,3	6,6	0,4
1600	30	3000	44,5	1,83	8,50	63,4	1,3	7,1	42,5	29,0	16,5	43,9	1,7	9,0	1,4	5,5	5,8

Продолжение таблицы Г.1

1600	45	2000	48,3	2,00	5,00	63,4	1,3	4,9	31,3	35,0	2,0	48,4	1,7	5,0	0,2	15,2	0,1
1600	60	1000	51,5	1,33	0,50	63,4	1,3	2,6	23,1	2,3	420,0	50,9	1,7	1,5	1,1	25,9	206,6
1600	60	1500	51,5	1,33	2,50	63,4	1,3	3,8	23,1	2,3	52,0	51,1	1,7	3,1	0,8	26,5	23,0
1600	60	3500	51,5	1,33	9,50	63,4	1,3	8,2	23,1	2,3	13,7	51,5	1,7	11,0	0,1	31,6	16,3
1600	75	5000	53,6	1,66	17,00	63,4	1,3	12,3	18,3	21,7	27,6	53,7	1,8	15,8	0,2	10,1	6,8
1600	105	4500	56,0	1,66	15,00	63,4	1,3	10,4	13,2	21,7	30,7	55,7	1,8	14,3	0,6	7,7	4,5
1600	120	2500	56,8	2,16	8,50	63,4	1,3	6	11,6	39,8	29,4	55,7	1,7	7,1	2,0	21,6	16,8
2000	45	1500	51,5	1,33	2,50	72,6	1,3	3,8	41,0	2,3	52,0	52,6	1,6	2,8	2,2	23,3	11,8
2000	60	500	55,0	1,66	0,50	72,6	1,3	1,3	32,0	21,7	160,0	55,1	1,6	0,6	0,2	2,2	10,9
2000	60	2500	55,0	1,66	6,00	72,6	1,3	6	32,0	21,7	0,0	56,0	1,7	6,6	1,8	0,7	10,6
2000	75	2000	57,0	2,16	3,50	72,6	1,3	4,9	27,4	39,8	40,0	57,7	1,7	4,7	1,1	23,5	33,3
2000	105	1500	60,2	2,00	3,00	72,6	1,3	3,8	20,6	35,0	26,7	59,3	1,6	2,8	1,5	18,2	5,5
2000	105	2000	60,2	2,00	4,50	72,6	1,3	4,9	20,6	35,0	8,9	59,5	1,6	4,7	1,1	17,6	3,4
2000	120	2000	60,1	2,00	4,50	72,6	1,3	4,9	20,8	35,0	8,9	60,0	1,6	4,6	0,1	17,7	3,1
2000	120	3500	60,1	2,00	9,50	72,6	1,3	8,2	20,8	35,0	13,7	60,7	1,7	10,4	1,0	14,6	9,1
2000	135	5000	60,5	2,16	15,00	72,6	1,3	12,3	20,0	39,8	18,0	61,8	1,8	15,2	2,2	16,8	1,1
2000	150	500	60,8	1,33	0,50	72,6	1,3	1,3	19,4	2,3	160,0	59,9	1,6	0,6	1,5	21,7	12,4
2000	150	4500	60,8	1,33	13,50	72,6	1,3	10,4	19,4	2,3	23,0	61,9	1,8	13,6	1,9	32,7	0,9
2500	15	500	43,0	1,50	0,50	84	1,3	1,3	95,3	13,3	160,0	42,2	1,6	0,5	1,9	6,2	9,3
2500	30	5600	53,7	2,00	15,50	84	1,3	14,1	56,4	35,0	9,0	52,0	1,9	16,0	3,2	6,3	3,4
2500	45	5600	57,5	1,83	17,00	84	1,3	14,1	46,1	29,0	17,1	58,6	1,9	16,2	1,8	3,0	4,8
2500	75	2500	63,5	2,33	7,00	84	1,3	6	32,3	44,2	14,3	62,9	1,7	6,1	0,9	27,9	13,0

Для станка мод. 1И250В																	
Режимы эксплуатации			Значения натурного эксперимента			Аналитическая + численная модель						Нейросетевая модель					
						Результаты расчетов			Отн. ошибка расчетов (ε)			Результаты прогнозов			Отн. ошибка прогнозов (ε)		
n , об/мин	t_m , мин	P , Н	T	Δ	δ	T	Δ	δ	T	Δ	δ	T	Δ	δ	T	Δ	δ
0	0	1800	26,5	1,50	8,80	25,5	0,5	7,7	3,8	66,7	12,5	26,7	1,5	8,5	0,6	0,3	3,0
980	15	1800	35,0	2,00	8,80	40,3	0,5	7,7	15,1	75,0	12,5	35,6	1,5	8,7	1,8	24,0	1,2
980	30	1800	38,8	1,33	8,80	40,3	0,5	7,7	3,9	62,4	12,5	38,6	1,5	8,8	0,6	14,0	0,1
980	45	1800	41,0	1,83	8,80	40,3	0,5	7,7	1,7	72,7	12,5	40,7	1,5	8,9	0,7	17,6	0,7
980	60	1800	42,3	1,16	8,80	40,3	0,5	7,7	4,7	56,9	12,5	42,2	1,5	8,9	0,1	29,3	0,9
980	75	1800	43,6	1,00	8,80	40,3	0,5	7,7	7,6	50,0	12,5	43,4	1,5	8,9	0,4	49,0	0,9
980	90	1800	44,2	1,50	8,80	40,3	0,5	7,7	8,8	66,7	12,5	44,4	1,5	8,9	0,5	1,4	0,7
980	105	1800	45,3	1,50	8,80	40,3	0,5	7,7	11,0	66,7	12,5	45,3	1,5	8,8	0,0	2,0	0,6
980	120	1800	46,0	1,66	8,80	40,3	0,5	7,7	12,4	69,9	12,5	46,1	1,5	8,8	0,2	12,1	0,3
1994	15	1800	45,0	2,00	8,80	55,2	0,5	7,7	22,7	75,0	12,5	45,4	1,6	8,7	0,9	21,9	1,5
1994	30	1800	50,5	1,66	8,80	55,2	0,5	7,7	9,3	69,9	12,5	50,3	1,6	8,8	0,3	5,9	0,3
1994	45	1800	54,0	1,83	8,80	55,2	0,5	7,7	2,2	72,7	12,5	53,4	1,6	8,9	1,1	14,9	1,1
1994	60	1800	55,6	1,33	8,80	55,2	0,5	7,7	0,7	62,4	12,5	55,3	1,6	8,9	0,5	16,7	1,5
1994	75	1800	56,6	1,00	8,80	55,2	0,5	7,7	2,5	50,0	12,5	56,6	1,5	8,9	0,1	54,4	1,6
1994	90	1800	57,5	1,50	8,80	55,2	0,5	7,7	4,0	66,7	12,5	57,4	1,5	8,9	0,1	2,4	1,5
1994	105	1800	58,0	1,16	8,80	55,2	0,5	7,7	4,8	56,9	12,5	58,1	1,5	8,9	0,1	31,8	1,3

Для станка мод. EMU 250																	
Режимы эксплуатации			Значения натурального эксперимента			Аналитическая + численная модель						Нейросетевая модель					
						Результаты расчетов			Отн. ошибка расчетов (ε)			Результаты прогнозов			Отн. ошибка прогнозов (ε)		
<i>n</i> , об/мин	<i>tm</i> , мин	<i>P</i> , Н	<i>T</i>	Δ	δ	<i>T</i>	Δ	δ	<i>T</i>	Δ	δ	<i>T</i>	Δ	δ	<i>T</i>	Δ	δ
0	0	500	27,0	4,82	3,00	25,5	4,6	4,3	5,6	4,6	43,3	25,5	5,0	3,2	5,4	3,1	6,3
0	0	1000	27,0	4,82	5,50	25,5	4,6	7,9	5,6	4,6	43,6	25,5	5,0	7,0	5,5	3,4	27,3
0	0	1500	27,0	4,82	11,50	25,5	4,6	11,3	5,6	4,6	1,7	25,5	5,0	11,2	5,6	3,9	2,8
0	0	2000	27,0	4,82	14,00	25,5	4,6	14,5	5,6	4,6	3,6	25,4	5,0	14,4	5,8	4,6	3,0
560	15	2000	29,6	4,33	13,00	31,1	4,6	14,5	5,1	6,2	11,5	28,4	4,1	12,7	4,0	5,2	2,5
560	30	500	30,8	4,00	2,00	31,1	4,6	4,3	1,0	15,0	115,0	30,1	4,1	2,8	2,1	3,6	38,1
560	30	1500	30,8	4,00	10,00	31,1	4,6	11,3	1,0	15,0	13,0	30,0	4,1	9,9	2,5	2,7	1,2
560	45	500	31,7	4,00	3,50	31,1	4,6	4,3	1,9	15,0	22,9	31,3	4,1	2,9	1,2	3,2	18,2
560	60	500	32,1	5,00	2,50	31,1	4,6	4,3	3,1	8,0	72,0	32,3	4,1	3,0	0,5	17,6	18,3
560	75	2000	32,9	5,66	14,00	31,1	4,6	14,5	5,5	18,7	3,6	32,9	4,1	13,8	0,1	27,3	1,7
560	90	1000	33,7	4,33	7,00	31,1	4,6	7,9	7,7	6,2	12,9	33,8	4,1	7,0	0,2	5,0	0,3
560	90	2000	33,7	4,33	14,00	31,1	4,6	14,5	7,7	6,2	3,6	33,6	4,1	14,1	0,3	4,5	0,9
560	105	500	34,4	4,66	3,50	31,1	4,6	4,3	9,6	1,3	22,9	34,4	4,1	3,3	0,1	11,4	6,0
560	105	1000	34,4	4,66	6,50	31,1	4,6	7,9	9,6	1,3	21,5	34,4	4,1	7,1	0,1	11,4	9,0
560	105	1500	34,4	4,66	10,00	31,1	4,6	11,3	9,6	1,3	13,0	34,4	4,1	11,2	0,0	11,1	11,7
560	135	500	35,2	3,66	4,00	31,1	4,6	4,3	11,6	25,7	7,5	35,8	4,2	3,6	1,6	14,4	10,5
560	150	1500	35,6	4,00	10,00	31,1	4,6	11,3	12,6	15,0	13,0	36,4	4,3	12,2	2,3	7,3	22,0
1120	30	2000	35,3	3,33	13,50	36,7	4,6	14,5	4,0	38,1	7,4	34,0	3,5	11,5	3,8	4,5	14,7

Продолжение таблицы Г.1

1120	45	500	36,6	3,33	3,00	36,7	4,6	4,3	0,3	38,1	43,3	36,1	3,6	2,4	1,5	6,9	19,2
1120	45	1500	36,6	3,33	10,00	36,7	4,6	11,3	0,3	38,1	13,0	36,0	3,5	8,8	1,7	4,3	12,4
1120	60	500	38,0	3,33	1,50	36,7	4,6	4,3	3,4	38,1	186,7	37,4	3,5	2,5	1,6	5,4	64,6
1120	60	1500	38,0	3,33	10,00	36,7	4,6	11,3	3,4	38,1	13,0	37,4	3,4	8,9	1,7	3,0	11,2
1120	75	1500	38,7	4,33	8,50	36,7	4,6	11,3	5,2	6,2	32,9	38,4	3,4	9,2	0,7	21,8	8,2
1120	75	2000	38,7	4,33	13,00	36,7	4,6	14,5	5,2	6,2	11,5	38,3	3,4	11,9	1,0	22,4	8,1
1120	90	1000	39,8	4,00	6,00	36,7	4,6	7,9	7,8	15,0	31,7	39,3	3,4	5,6	1,2	15,4	6,8
1120	90	2040	39,8	4,00	12,00	36,7	4,6	14,5	7,8	15,0	20,8	39,2	3,3	12,1	1,5	16,8	0,6
1120	120	1500	41,6	4,00	9,00	36,7	4,6	11,3	11,8	15,0	25,6	40,8	3,3	9,4	1,9	17,6	4,2
1120	135	1000	42,6	3,33	6,50	36,7	4,6	7,9	13,8	38,1	21,5	41,5	3,3	6,5	2,6	1,0	0,4
1120	135	1500	42,6	3,33	6,50	36,7	4,6	11,3	13,8	38,1	73,8	41,5	3,3	9,5	2,6	1,5	46,7
1120	150	500	42,4	3,00	2,00	36,7	4,6	4,3	13,4	53,3	115,0	42,0	3,3	2,8	0,8	10,4	38,9
1120	150	2000	42,4	3,00	11,50	36,7	4,6	14,5	13,4	53,3	26,1	42,1	3,3	12,7	0,7	8,6	10,7
1600	15	1000	33,4	3,00	5,50	41,7	4,6	7,9	24,9	53,3	43,6	34,7	3,3	4,7	3,7	10,8	14,6
1600	15	2000	33,4	3,00	10,00	41,7	4,6	14,5	24,9	53,3	45,0	34,4	3,2	10,5	3,0	7,2	5,2
1600	30	2000	36,2	2,66	10,00	41,7	4,6	14,5	15,2	72,9	45,0	37,9	3,2	10,7	4,6	19,1	7,2
1600	45	2000	38,6	3,33	11,00	41,7	4,6	14,5	8,0	38,1	31,8	40,3	3,1	10,8	4,4	6,5	1,4
1600	60	500	40,5	2,50	2,50	41,7	4,6	4,3	3,0	84,0	72,0	42,0	3,2	2,3	3,7	28,5	9,3
1600	75	1500	41,8	2,00	8,00	41,7	4,6	11,3	0,2	130,0	41,3	43,3	3,0	8,2	3,5	52,3	2,6
1600	75	2000	41,8	2,00	12,50	41,7	4,6	14,5	0,2	130,0	16,0	43,2	3,0	11,0	3,4	50,1	12,1
1600	90	1000	42,8	3,33	5,00	41,7	4,6	7,9	2,6	38,1	58,0	44,2	3,0	5,0	3,2	8,7	0,6
1600	105	1000	44,0	2,33	5,00	41,7	4,6	7,9	5,2	97,4	58,0	44,9	3,0	5,1	2,1	28,1	1,3
1600	105	1500	44,0	2,33	7,50	41,7	4,6	11,3	5,2	97,4	50,7	44,9	2,9	8,3	2,1	26,2	10,7
1600	120	500	44,5	2,50	1,50	41,7	4,6	4,3	6,3	84,0	186,7	45,4	3,0	2,3	2,0	19,4	56,1

Продолжение таблицы Г.1

1600	135	2000	45,4	2,33	11,00	41,7	4,6	14,5	8,1	97,4	31,8	46,2	2,8	11,2	1,7	20,7	2,2	
1600	150	1500	45,7	2,66	8,50	41,7	4,6	11,3	8,8	72,9	32,9	46,8	2,8	8,5	2,3	5,6	0,0	
2250	15	1000	38,8	3,00	4,00	48,5	4,6	7,9	25,0	53,3	97,5	37,9	3,1	4,4	2,2	3,5	10,4	
2250	15	1500	38,8	3,00	7,50	48,5	4,6	11,3	25,0	53,3	50,7	37,9	3,0	7,3	2,4	1,2	2,8	
2250	30	1500	42,9	4,00	5,50	48,5	4,6	11,3	13,1	15,0	105,5	42,5	3,0	7,5	0,9	25,4	35,6	
2250	30	2000	42,9	4,00	8,00	48,5	4,6	14,5	13,1	15,0	81,3	42,4	2,9	10,0	1,1	26,9	25,6	
2250	45	1500	45,1	3,00	6,50	48,5	4,6	11,3	7,5	53,3	73,8	45,6	2,9	7,5	1,1	2,6	16,1	
2250	45	2000	45,1	3,00	8,50	48,5	4,6	14,5	7,5	53,3	70,6	45,6	2,9	10,1	1,0	4,6	19,3	
2250	60	500	47,1	4,50	2,50	48,5	4,6	4,3	3,0	2,2	72,0	47,3	3,0	2,1	0,5	33,6	14,4	
2250	120	500	51,3	2,33	3,00	48,5	4,6	4,3	5,5	97,4	43,3	50,5	2,7	2,2	1,5	16,8	28,3	
2250	150	1500	52,2	2,33	8,00	48,5	4,6	11,3	7,1	97,4	41,3	51,7	2,5	7,6	0,9	6,9	4,9	
2250	150	2000	52,2	2,33	10,50	48,5	4,6	14,5	7,1	97,4	38,1	51,8	2,4	10,2	0,8	4,8	2,7	
ИТОГО:			среднее, %=							11,6	39,0	32,4				2,1	8,8	10,8
			среднее для стационар. режимов, %=							11,8	29,3	26,8				2,2	2,3	8,3

Примечание. Ячейки, выделенные тоном, соответствуют стационарным режимам эксплуатации

Разработка программы для моделирования эксплуатационных характеристик ШУ на основе нейронных сетей

Как отмечалось ранее (п. 2.2.1) используемая при обучении нейросетей программа Statistica позволяет сохранять полученную сеть в формат XML и транслировать код НС на языки программирования, в частности на язык С для последующего использования в личных проектах/целях (своих задачах). Поэтому НС прогнозирования ЭХ ШУ MLP 26-20-4 полученная в п. 4.1.2, и была транслирована на язык С. Код состоит из 185 строк.

Фрагменты кода НС MLP 26-20-4 представлены ниже:

```
//Analysis Type - Regression
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>

double
last_check_1063_1_MLP_26_20_4_input_hidden_weights[20][26]=
{
    {-1.92972466859415e+000,          -1.32541324445833e+000,
3.03124505833835e+000,          4.72976387530247e+000,          -
3.00813830477582e+000,          -1.87731963066945e+000,
4.22218603460805e+000,          1.29753778458329e+000,          -
2.38457501032383e+000,          3.38218129219983e+000,          -
4.31272426017041e+000,          4.05052923542474e+000,          -
3.37327516451208e+000,          1.61304463009679e+000,
5.39317378643911e-001,          -1.49179213768485e+000,          -
1.71976340817527e-001,          -1.36802493915889e+000,          -
2.02899692555786e+000,          5.59512092200217e-002,          -
5.03011476430961e-001,          -2.91335397257466e+000,          -
4.33341421270495e+000,          -1.88017221141810e+000,          -
6.35407372961509e-002, -2.34158288427240e-001 },
.....
scanf("%lg",&last_check_1063_1_MLP_26_20_4_input[23]);
```

```

printf("%s","Cont. Input-24(tm [minute]): ");
scanf("%lg",&last_check_1063_1_MLP_26_20_4_input[24]);
printf("%s","Cont. Input-25(P [H]): ");
scanf("%lg",&last_check_1063_1_MLP_26_20_4_input[25]);
for(cont_inps=0;cont_inps<26;cont_inps++)
{
//Substitution of missing continuous variables
if(last_check_1063_1_MLP_26_20_4_input[cont_inps] == -9999)

last_check_1063_1_MLP_26_20_4_input[cont_inps]=last_check_1063_1_
_MLP_26_20_4_MeanInputs[cont_inps];
}

last_check_1063_1_MLP_26_20_4_ScaleInputs(last_check_1063_1_MLP_
26_20_4_input,0,1,26);
last_check_1063_1_MLP_26_20_4_RunNeuralNet_Regression();
last_check_1063_1_MLP_26_20_4_UnscaleTargets(last_check_1063_
1_MLP_26_20_4_output,0,1,4);
printf("\n%s%.14e","Predicted Output of T [degree Celsius] =
",last_check_1063_1_MLP_26_20_4_output[0]);
printf("\n%s%.14e","Predicted Output of _D_[micron] =
",last_check_1063_1_MLP_26_20_4_output[1]);
printf("\n%s%.14e","Predicted Output of *d*[micron] =
",last_check_1063_1_MLP_26_20_4_output[2]);
printf("\n%s%.14e","Predicted Output of f1 [Hertz] =
",last_check_1063_1_MLP_26_20_4_output[3]);
printf("\n\n%s\n","Press any key to make another prediction
or enter 0 to quit the program.");
keyin=getch();
if(keyin==48)break;
}

return 0;
}

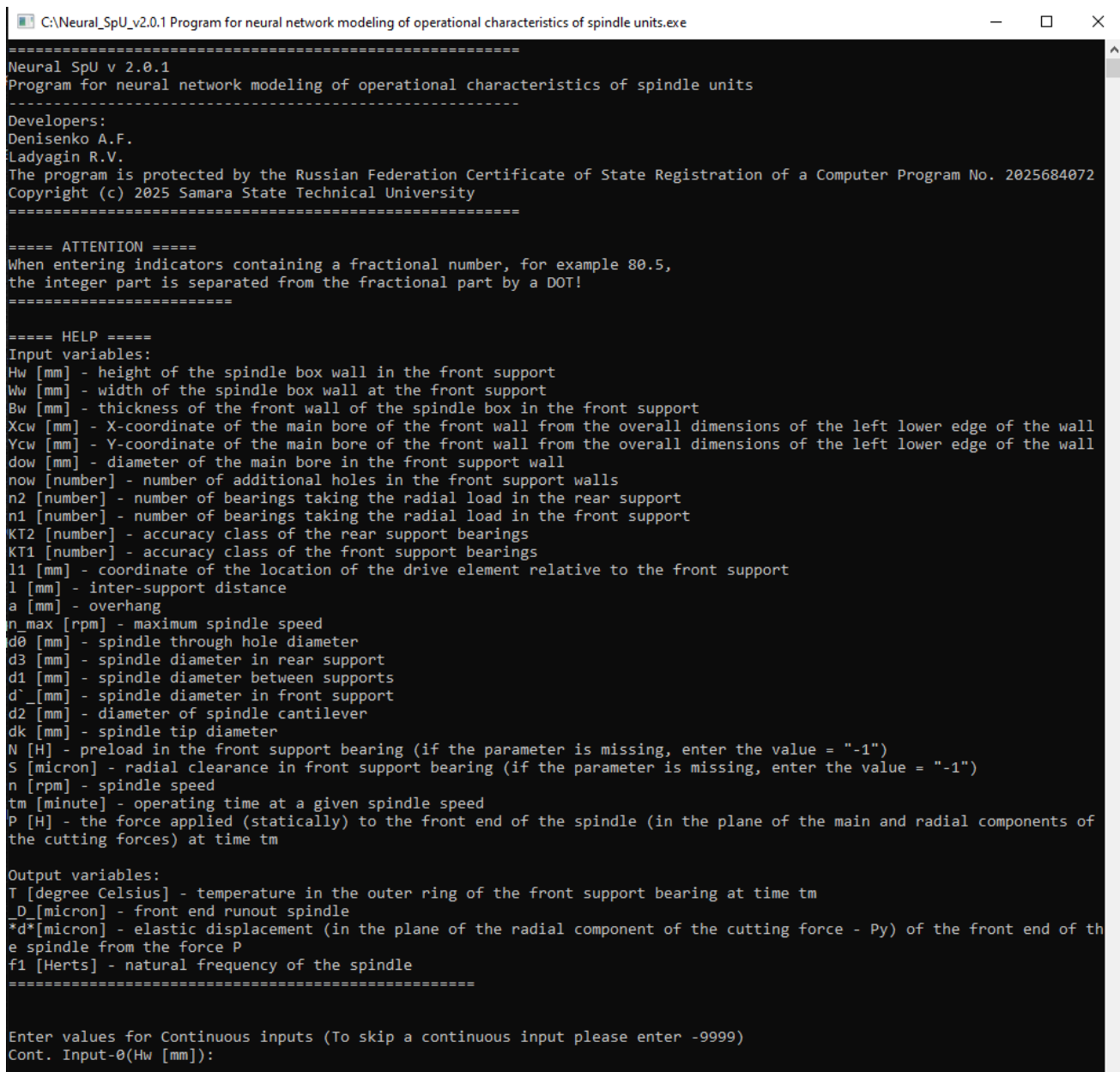
```

Для обеспечения корректной компиляции и внесения справочных данных код НС MLP 26-20-4 на языке C был отредактирован, а затем загружен в программу компилятор

gcc.exe набора библиотек для создания приложений под Windows – MinGW [Прохоренок Н. А. Язык С. Самое необходимое. — СПб.: БХВ-Петербург, 2020. — 480 с.: ил].

После компиляции отредактированного кода была получена программа в виде консольного приложения для Windows - Neural SpU. На неё получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025684072.

Область применения программы – шпиндельные узлы на двух опорах качения с диаметром шпинделя в передней опоре до 150 мм.



```

C:\Neural_SpU_v2.0.1 Program for neural network modeling of operational characteristics of spindle units.exe
=====
Neural SpU v 2.0.1
Program for neural network modeling of operational characteristics of spindle units
=====
Developers:
Denisenko A.F.
Ladyagin R.V.
The program is protected by the Russian Federation Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2025684072
Copyright (c) 2025 Samara State Technical University
=====

===== ATTENTION =====
When entering indicators containing a fractional number, for example 80.5,
the integer part is separated from the fractional part by a DOT!
=====

===== HELP =====
Input variables:
Hw [mm] - height of the spindle box wall in the front support
Ww [mm] - width of the spindle box wall at the front support
Bw [mm] - thickness of the front wall of the spindle box in the front support
Xcw [mm] - X-coordinate of the main bore of the front wall from the overall dimensions of the left lower edge of the wall
Ycw [mm] - Y-coordinate of the main bore of the front wall from the overall dimensions of the left lower edge of the wall
dow [mm] - diameter of the main bore in the front support wall
now [number] - number of additional holes in the front support walls
n2 [number] - number of bearings taking the radial load in the rear support
n1 [number] - number of bearings taking the radial load in the front support
KT2 [number] - accuracy class of the rear support bearings
KT1 [number] - accuracy class of the front support bearings
l1 [mm] - coordinate of the location of the drive element relative to the front support
l [mm] - inter-support distance
a [mm] - overhang
n_max [rpm] - maximum spindle speed
d0 [mm] - spindle through hole diameter
d3 [mm] - spindle diameter in rear support
d1 [mm] - spindle diameter between supports
d' [mm] - spindle diameter in front support
d2 [mm] - diameter of spindle cantilever
dk [mm] - spindle tip diameter
N [H] - preload in the front support bearing (if the parameter is missing, enter the value = "-1")
S [micron] - radial clearance in front support bearing (if the parameter is missing, enter the value = "-1")
n [rpm] - spindle speed
tm [minute] - operating time at a given spindle speed
P [H] - the force applied (statically) to the front end of the spindle (in the plane of the main and radial components of
the cutting forces) at time tm

Output variables:
T [degree Celsius] - temperature in the outer ring of the front support bearing at time tm
D [micron] - front end runout spindle
*d* [micron] - elastic displacement (in the plane of the radial component of the cutting force - Py) of the front end of th
e spindle from the force P
f1 [Hertz] - natural frequency of the spindle
=====

Enter values for Continuous inputs (To skip a continuous input please enter -9999)
Cont. Input-0(Hw [mm]):
  
```

Рисунок Д.1. Вид программы Neural SpU

На рисунке Д.1 показан вид программы. В первых строчках (Developers, ATTENTION) содержится информация о программе и справка (HELP) с легендой входных

и выходных переменных. После обозначения для каждой переменной следом в скобках [] указана её размерность.

Для того, чтобы программа Neural SpU выдала прогнозные значения ЭХ ШУ, необходимо в строки «Cont. Input» (0...25) последовательно внести ПП:

- в строки «Cont. Input-0»...«Cont. Input-20» вводятся значения параметров в зависимости от конструктивного исполнения: диаметральный размеры ступеней Ш и основные линейные размеры (длина пролета и вылет); размеры шпиндельной коробки с количеством и расположением расточек; параметры опор – количество подшипников в каждой из них и их класс точности;

- в строки «Cont. Input-21»...«Cont. Input-22» вводятся значения настроечных параметров – предварительного натяга для радиально упорных шарикоподшипников и радиального зазора для радиальных цилиндрических, конических или шариковых подшипников передней опоры. Здесь важно отметить, что при использовании в опоре только радиально упорных шарикоподшипников в строку значения предварительного натяга "Cont. Input-21(N [H]):" вносится определенное для него значение с размерностью в ньютонах, а в параметр "Cont. Input-22(S [micron]):" при этом вносится фиктивное значение равное «-1». И наоборот, если в опоре используются только радиальные цилиндрические, конические или шариковые подшипники, то вносится определенное значение радиального зазора с размерностью в микрометрах "Cont. Input-22(S [micron]):", при этом в строку "Cont. Input-21(N [H]):" проставляется значение «-1». Необходимость значения «-1» в строках с неиспользуемым параметром обусловлено тем, что строку невозможно оставить пустой – программа не будет работать, и будет требовать ввода значения параметра. Само же числовое значение пропущенного (неиспользуемого) параметра равное «-1», принято таким, поскольку в интегрированном наборе обучающих данных НС, как для предварительного натяга, так и для радиального зазора отсутствовали отрицательные значения. Поэтому значение «-1» здесь выполняет своего рода роль бинарного разделителя.

- в строки «Cont. Input-23»...«Cont. Input-25» вводятся значения режимных параметров: частоты вращения Ш и времени работы на ней; нагрузки от сил резания.

После ввода значения последнего входного параметра программа выдает прогнозные значения ЭХ (строки «Predicted Output of»).

При нажатии правой кнопкой мыши в строке заголовка (title bar) на выпадающей строке «Свойства» становятся доступны опции по изменению параметров буфера обмена, типа и размера шрифта, цвета и прозрачности фона окна программы и т.д.

```

C:\Neural_SpU_v2.0.1 Program for neural network modeling of operational characteristics of spindle units.exe
=====
Enter values for Continuous inputs (To skip a continuous input please enter -9999)
Cont. Input-0(Hw [mm]): 396
Cont. Input-1(Ww [mm]): 304
Cont. Input-2(Bw [mm]): 71
Cont. Input-3(Xcw [mm]): 160
Cont. Input-4(Ycw [mm]): 250
Cont. Input-5(dow [mm]): 180
Cont. Input-6(now [number]): 0
Cont. Input-7(n2 [number]): 2
Cont. Input-8(n1 [number]): 1
Cont. Input-9(KT2 [number]): 4
Cont. Input-10(KT1 [number]): 4
Cont. Input-11(l1 [mm]): 345
Cont. Input-12(l [mm]): 291
Cont. Input-13(a [mm]): 117
Cont. Input-14(n_max [rpm]): 1750
Cont. Input-15(d0 [mm]): 81
Cont. Input-16(d3 [mm]): 105
Cont. Input-17(d1 [mm]): 105
Cont. Input-18(d` [mm]): 120
Cont. Input-19(d2 [mm]): 138
Cont. Input-20(dk [mm]): 220
Cont. Input-21(N [H]): -1
Cont. Input-22(S [micron]): 2
Cont. Input-23(n [rpm]): 1750
Cont. Input-24(tm [minute]): 150
Cont. Input-25(P [H]): 4000

Predicted Output of T [degree Celsius] = 6.75817189766867e+001
Predicted Output of _D [micron] = 2.51740185637364e+000
Predicted Output of *d [micron] = 1.02889762541282e+001
Predicted Output of f1 [Hertz] = 4.54908764553633e+002

Press any key to make another prediction or enter 0 to quit the program.

Enter values for Continuous inputs (To skip a continuous input please enter -9999)
Cont. Input-0(Hw [mm]):

```

Рисунок Д.2. Пример работы программы Neural SpU

На рисунке Д.2 показан пример работы программы (прогноз) для ШУ с диаметром в передней опоре $d = 120$ мм, с радиальным цилиндрическим подшипником в передней опоре ($n1 = 1$) и двумя радиально упорными шариковыми в задней опоре ($n2 = 2$), статически приложенной нагрузкой $P = 4000$ Н после времени работы $t_m = 150$ минут на частоте вращения $rpm = 1750$ об/мин (остальные входные значения см. рисунок Д.2).

Из рисунка Д.2 видно, что программа Neural SpU в строках «Predicted Output of» спрогнозировала значения эксплуатационных характеристик ШУ: 67,6 °С - температура в зоне наружного кольца подшипника передней опоры; 2,5 мкм – биение шпинделя; 10,3 мкм – упругое смещение переднего конца шпинделя; 455 Гц – собственная частота шпинделя. Запись выходных значений программы представлена в виде экспоненциальной нотации. В ситуациях получения вариантов выдач (1 выдача = 21 параметр) программы Neural SpU, в которых присутствуют отрицательные значения, ЛПР такие выдачи следует исключить из дальнейшего рассмотрения.

После получения прогнозных значений ЭХ для одного варианта ПП в программу можно вносить следующий вариант ПП – программа выдаст прогноз по новым данным и опять предложит ввод следующего варианта и т.д. Таким образом, после многократного

перебора вариантов ПП и сохранения результатов каждого, будет получена сводная таблица, по которой можно наглядно проводить сравнение. Сохранение результатов возможно при их копировании из окна программы в другое приложение, к примеру, в блокнот, текстовый редактор и др.

Разработанная программа интегрируется в процесс проектирования ШУ в качестве поддержки принятия решений. С помощью неё ЛПР может просчитать множество возможных комбинаций ПП и назначить те, при которых получены требуемые значения ЭХ.

Разработка программы для генерации проектных параметров ШУ на основе нейронных сетей

Полученная в п. 5.1.1 НС 2. MLP 2-25-21 генерации ПП, как и при разработке программы Neural SpU - моделирования ЭХ ШУ (Приложение Д) была транслирована в код на языке С (содержит 175 строк), фрагменты которого представлены ниже:

```
//Analysis Type - Regression
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>

double
last_check_1006_gen_1_MLP_2_25_21_input_hidden_weights[25][2]=
{
    {-1.20677351242606e+001, 1.33663574051617e+001 },
    {5.66016884496267e+000, -6.86802323931335e-002 },
    {-1.19687452923485e+001, 1.63085821202679e+001 },
    {1.24324291134971e+000, 5.99720979157587e+000 },
    {-2.17769887557324e+001, 1.42677761357565e+001 },
    {6.41051037267756e+000, 3.33490470586282e+000 },
    {-2.44307121692901e-001, 4.73461841700571e+000 },
    {-2.53861903578165e+000, 2.97870689729654e+001 },
    {-2.21911333113602e+000, 1.10140166958811e+002 },
    {5.88976117890376e+000, 2.20678859813740e+000 },
    {1.21824255347177e+001, 6.51195746461890e+000 },
    {8.73097507847777e+000, 6.46727969177734e+000 },
    {1.09194397050371e+001, 1.27503423698417e-001 },
    {1.88545805068993e+000, 2.34193064214986e+001 },
    {3.75651549010313e-001, 7.06300160964428e-001 },
    {4.26896347554645e+000, 8.89903153532205e+000 },
    {1.76994010610707e+001, 5.70505281625441e+001 },
    {-2.20944341683450e+000, 1.20222564987742e+001 },
    {-3.53743471398039e+000, 4.36115416929370e+001 },
    {2.93024507200179e-002, 4.97342728360375e-001 },
```

```

{-6.48495036388938e-001, 3.68395503853232e+000 },
{8.72907233516160e+000, 6.85800301821952e+000 },
{-6.70221354402062e+000, -6.60487526076108e+000 },
{1.74287307697324e+000, 1.53422360163621e+001 },
{-1.15709496567238e+000, 2.46182494952065e+001 }
};

.....

printf("\n%s%.14e", "Predicted Output of a [mm] =
",last_check_1006_gen_1_MLP_2_25_21_output[13]);
printf("\n%s%.14e", "Predicted Output of n_max [rpm] =
",last_check_1006_gen_1_MLP_2_25_21_output[14]);
printf("\n%s%.14e", "Predicted Output of d0 [mm] =
",last_check_1006_gen_1_MLP_2_25_21_output[15]);
printf("\n%s%.14e", "Predicted Output of d3 [mm] =
",last_check_1006_gen_1_MLP_2_25_21_output[16]);
printf("\n%s%.14e", "Predicted Output of d1 [mm] =
",last_check_1006_gen_1_MLP_2_25_21_output[17]);
printf("\n%s%.14e", "Predicted Output of d`_[mm] =
",last_check_1006_gen_1_MLP_2_25_21_output[18]);
printf("\n%s%.14e", "Predicted Output of d2 [mm] =
",last_check_1006_gen_1_MLP_2_25_21_output[19]);
printf("\n%s%.14e", "Predicted Output of sbt1 =
",last_check_1006_gen_1_MLP_2_25_21_output[20]);
printf("\n\n%s\n", "Press any key to make another prediction
or enter 0 to quit the program.");
keyin=getch();
if(keyin==48)break;
}

return 0;
}

```

Для обеспечения корректной компиляции и внесения справочных данных код НС 2. MLP 2-25-21 на языке С был также отредактирован, а затем загружен в программу компилятор gcc.exe набора библиотек MinGW.

После компиляции отредактированного кода была получена программа генерации ПП ШУ в виде консольного приложения для Windows - Neural GenSpU. Программа имеет

аналогичный с Neural SpU вид и обозначение проектных параметров (рисунок Е.1). Поэтому далее будет рассмотрены лишь её главные отличительные черты.

```

C:\Neural GenSpU v1.0 Spindle Unit Design Parameter Generator (using) Neural Networks.exe

=====
Neural GenSpU v1.0
Spindle Unit Design Parameter Generator (using) Neural Networks
=====
Developers:
Denisenko A.F.
Ladyagin R.V.
Certain parts of the program code are protected by the Russian Federation Certificate of State Registration of Computer Programs No. 2025684072
Copyright (c) 2025 Authors
=====

==== ATTENTION ====
When entering indicators containing a fractional number, for example 80.5,
the integer part is separated from the fractional part by a DOT!
=====

==== HELP ====
Input variables:
D [micron] - front end runout spindle
dk [mm] - spindle tip diameter

Output variables:
Hw [mm] - height of the spindle box wall in the front support
Ww [mm] - width of the spindle box wall at the front support
Bw [mm] - thickness of the front wall of the spindle box in the front support
Xcw [mm] - X-coordinate of the main bore of the front wall from the overall dimensions of the left lower edge of the wall
Ycw [mm] - Y-coordinate of the main bore of the front wall from the overall dimensions of the left lower edge of the wall
dow [mm] - diameter of the main bore in the front support wall
now [number] - number of additional holes in the front support walls
n2 [number] - number of bearings taking the radial load in the rear support
n1 [number] - number of bearings taking the radial load in the front support
KT2 [number] - accuracy class of the rear support bearings
KT1 [number] - accuracy class of the front support bearings
l1 [mm] - coordinate of the location of the drive element relative to the front support
l [mm] - inter-support distance
a [mm] - overhang
n_max [rpm] - maximum spindle speed
d0 [mm] - spindle through hole diameter
d3 [mm] - spindle diameter in rear support
d1 [mm] - spindle diameter between supports
d [mm] - spindle diameter in front support
d2 [mm] - diameter of spindle cantilever
sbt1 [number] - type of bearing support (for radial roller bearings "1", for angular-contact thrust bearings "2", for combined supports "3")
=====

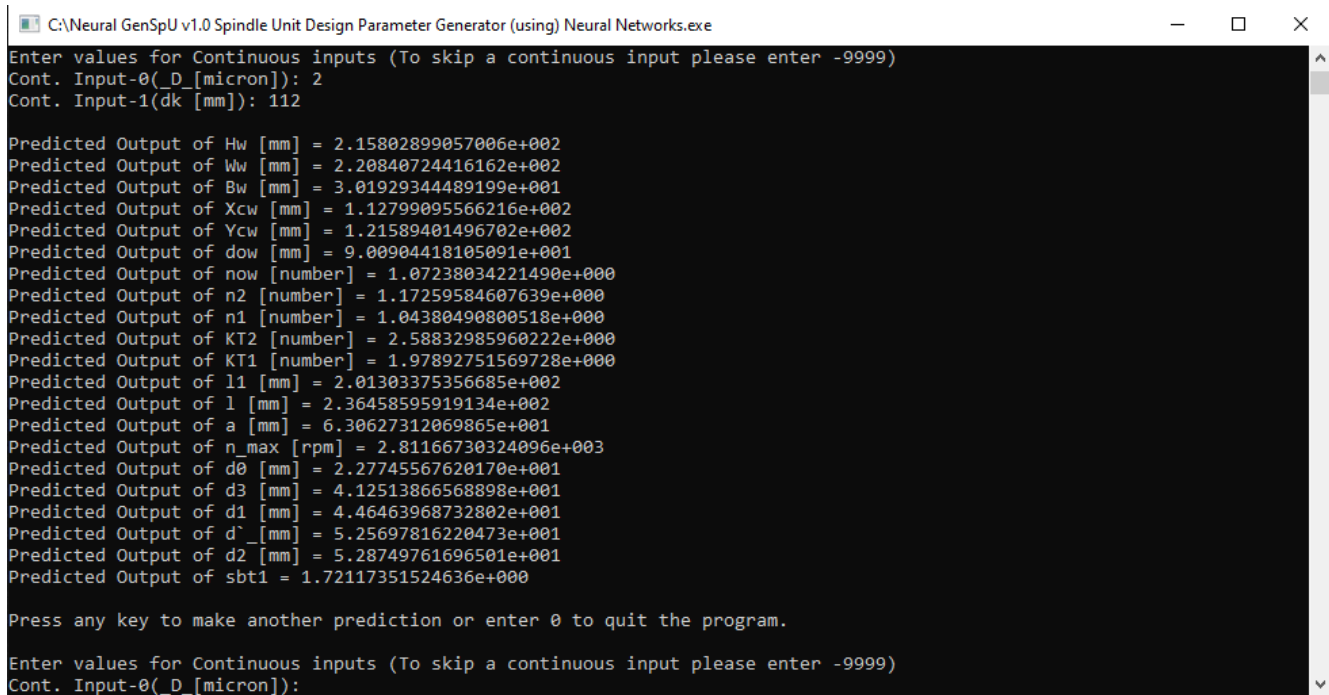
Enter values for Continuous inputs (To skip a continuous input please enter -9999)
Cont. Input-0(D [micron]):

```

Рисунок Е.1. Вид начальных строк программы генерации ПП Neural GenSpU

В строках справки (HELP) легенда входных и выходных переменных «перевернута» местами по сравнению с Neural SpU (Приложение Д). Для прогнозируемых параметров конструктивного исполнения (размеров коробки, параметров опор, размеров шпинделя) добавилась переменная *sbt1* – тип применяемых в передней опоре подшипников. Из окна программы (рисунок Е.1) видно, что эта переменная принимает 3-и значения (кодированных значения): 1 - радиальные роликоподшипники; 2 - радиально-упорные подшипники; 3 – опора на комбинированных подшипниках.

После ввода значений требуемого ТЗ биения и максимального диаметра конца шпинделя программа генерирует параметры конструктивного исполнения (рисунок Е.2).



```

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)
Cont. Input-0(_D_[micron]): 2
Cont. Input-1(dk [mm]): 112

Predicted Output of Hw [mm] = 2.15802899057006e+002
Predicted Output of Ww [mm] = 2.20840724416162e+002
Predicted Output of Bw [mm] = 3.01929344489199e+001
Predicted Output of Xcw [mm] = 1.12799095566216e+002
Predicted Output of Ycw [mm] = 1.21589401496702e+002
Predicted Output of dow [mm] = 9.00904418105091e+001
Predicted Output of now [number] = 1.07238034221490e+000
Predicted Output of n2 [number] = 1.17259584607639e+000
Predicted Output of n1 [number] = 1.04380490800518e+000
Predicted Output of KT2 [number] = 2.58832985960222e+000
Predicted Output of KT1 [number] = 1.97892751569728e+000
Predicted Output of l1 [mm] = 2.01303375356685e+002
Predicted Output of l [mm] = 2.36458595919134e+002
Predicted Output of a [mm] = 6.30627312069865e+001
Predicted Output of n_max [rpm] = 2.81166730324096e+003
Predicted Output of d0 [mm] = 2.27745567620170e+001
Predicted Output of d3 [mm] = 4.12513866568898e+001
Predicted Output of d1 [mm] = 4.46463968732802e+001
Predicted Output of d_[mm] = 5.25697816220473e+001
Predicted Output of d2 [mm] = 5.28749761696501e+001
Predicted Output of sbt1 = 1.72117351524636e+000

Press any key to make another prediction or enter 0 to quit the program.

Enter values for Continuous inputs (To skip a continuous input please enter -9999)
Cont. Input-0(_D_[micron]):

```

Рисунок Е.2. Пример работы программы Neural GenSpU

В окне программы (рисунок Е.2) показан пример её работы для генерации конструктивных ПП при проектировании ШУ станка высокого класса точности («В» - допуск биения 5 мкм по ГОСТ 18097-2024) с параметром биения 2 мкм, при максимальном диаметре конца шпинделя 112 мм (строки «Cont. Input»). Получены следующие значения параметров (строки «Predicted Output of»): координата по оси Y основной расточки передней стенки корпуса шпиндельной коробки $Y_{cw} = 122$ мм, что коррелирует с наибольшим диаметром обработки 250 мм; количество подшипников $n1 = n2 = 1$ (округлено до целого) 2 класса точности (округлено до ближайшего класса - 2, 4 или 5), с радиальным упорным $sbt1 = 2$ (округлено до целого) подшипником в передней опоре; межопорное расстояние $l = 236$ мм с координатой расположения приводного элемента между опорами $l1 = 201$ мм; диаметр шпинделя в передней опоре $d = 50$ мм (округлено до целого). Поскольку генерация параметров выполнялась нейросетью регрессии, то отдельные параметры требуют округления до целого (now , $n1$, $n2$, $sbt1$), а другие, отвечающие за размеры и точность подшипника - до стандартного значения из ряда (dow , $KT1$, $KT2$, d).

Кроме того ЛПП необходимо исключить из дальнейшего рассмотрения варианты выдач (1 выдача = 21 параметр) программы Neural GenSpU в которых:

- наличествуют отрицательные значения;
- не выполняется условие, где при $sbt1 = 1$ то $n1 = 1$;

После получения одного варианта выдачи в программу можно вводить следующие исходные данные, которые можно менять с произвольным шагом для биения, а для мак-

симального диаметра конца шпинделя выбором другого стандартного его значения. Сменой исходных данных обеспечивается вариативность конструктивного исполнения ШУ и корректность значений параметров в выдачах.

Таким образом, после многократного перебора значений исходных данных ТЗ и сохранением результатов корректных выдач каждого варианта будет получена сводная таблица, по которой можно наглядно проводить сравнение параметров и дальнейший детальный расчет ЭХ ШУ.

Разработанная программа Neural GenSpU интегрируется в процесс проектирования ШУ в качестве инструмента генеративного проектирования. С её помощью ЛПР может быстро сгенерировать множество конструктивных исполнений ШУ, тем самым сократить время на этап обоснования ПП.

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ



УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «Средневолжский Станкозавод»

Чижов С.Г.

07.04.2026 г.

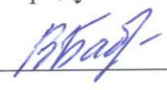
АКТ

использования результатов диссертационной работы Ладягина Романа Владимировича на соискание ученой степени кандидата технических наук

Результаты диссертационной работы Ладягина Романа Владимировича в виде методики проектирования на основе применения нейронных сетей использованы при разработке конструкций шпиндельных узлов станков токарной группы, в частности при обновлении модельного ряда SAMAT 400.

Разработанная методика проектирования позволяет создавать и оценивать одновременно множество вариантов конструктивного исполнения шпиндельных узлов по основным выходным эксплуатационным характеристикам. Вариативность достигается за счет использования обоснованных комбинаций проектных параметров, определяемых конструкцией тела шпинделя и корпуса, а также компоновкой опор. Применение нейронных сетей позволяет производить, с одной стороны, структурный синтез узла, с другой - параметрическую оптимизацию его параметров по отдельным критериям эксплуатационных характеристик. Приведенные рекомендации по использованию нейронных сетей обеспечивают возможность быстрого нахождения наилучших проектных параметров и исключения из рассмотрения заведомо неподходящих вариантов.

Представленная методика содержит полноту данных в объеме, необходимом специалистам отдела главного конструктора, как для обоснования принятия решений, так и для назначения проектных параметров разрабатываемой конструкции шпиндельного узла. Полученные нейросетевые зависимости дают возможность прогнозировать влияние эксплуатационных характеристик в процессе работы/эксплуатации станка, что позволяет отказаться от дорогостоящих прототипов для отработки разрабатываемой конструкции и использования сложных программных продуктов.

Главный конструктор  Бабич В.А.

Россия, 443036, г. Самара, ул. Набережная реки Самары, д. 1.

e-mail: office@svsz.ru

(846)207-37-31, 207-37-32

www.svsz.ru

« _____ » _____ 20__ г.

No _____



Первый проректор-проректор
по учебной работе д.э.н., профессор
Д.Е. Овчинников

Результаты диссертационной работы по тематике проектирования шпиндельных узлов металлорежущих станков, выполненной аспирантом кафедры «Технология машиностроения станки и инструменты» Ладыгиным Романом Владимировичем, на основании решения кафедры от 05.03.2026г. протокол №5 приняты для использования в учебном процессе при подготовке:

- бакалавров по направлению 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в дисциплине «Расчет и конструирование станков и станочных комплексов»;

- магистров по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в дисциплине «Расчет, моделирование и конструирование оборудования с компьютерным управлением».

При подготовке лекционных курсов и практических занятий были использованы следующие материалы диссертации:

1. Генеративное проектирование шпиндельных узлов путём создания множества обоснованных вариантов конструктивного исполнения и последующего их рассмотрения с выбором наиболее подходящего варианта.
2. Получение исходных значений проектных параметров для нейросетевого синтеза конструкций разрабатываемого шпиндельного узла.

СОГЛАСОВАНО:

Начальник учебного управления (УУ)

Е.А. Алонцева

Начальник управления научных исследований
(УНИ)

А.Н. ДАВЫДОВ

И.о. зав. кафедрой Технологии машиностроения,
станки и инструменты

А.Р. Галлямов