ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук Зверева Игоря Алексеевича на диссертационную работу Ладягина Романа Владимировича на тему «Прогнозирование эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов токарных станков с применением нейросетевого моделирования», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)

1. Актуальность темы диссертации

Повышение конкурентоспособности отечественного станкостроения предполагает создание металлорежущих станков с улучшенными эксплуатационными характеристиками, полученными путём комплексного проектирования. Шпиндельный узел (ШУ) вносит 50-80 % погрешностей в общую точность станка, определяя его производительность и качество обработки. Традиционные аналитические и конечно-элементные методы проектирования решают локальные задачи, не учитывая комплексного взаимовлияния силовых, тепловых и динамических факторов. Для преодоления этих ограничений на ранних стадиях проектирования автор предлагает использовать нейросетевые модели, способные прогнозировать эксплуатационные характеристики ШУ с учётом расширенного количества проектных параметров. Поэтому актуальность темы диссертации Ладягина Р.В., направленной на прогнозирование эксплуатационных характеристик ШУ токарных станков с использованием нейронных сетей, учитывающих расширенное количеством проектных параметров не вызывает сомнений.

2. Общая характеристика работы и соответствие темы диссертации паспорту научной специальности

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, содержит 96 рисунков и 43 таблицы. Общий объем диссертации 214 страниц, включая библиографический список из 175 наименований на 16 страницах и шесть приложений на 33 страницах, в которых приведены экспериментальные данные и результаты расчета температуры переднего подшипника, биения и упругого смещения переднего конца шпинделя, а также копии документов, подтверждающих внедрение результатов работы.

По теме диссертации опубликовано 15 работ (по автореферату), из них четыре статьи в изданиях, входящих в перечень, утвержденный ВАК РФ, также имеется свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

Все опубликованные работы соответствуют теме диссертации и раскрывают ее основное содержание.

Структура диссертации общепринятая.

Во введении автором сформулирована актуальность темы исследования, обоснована ее теоретическая и практическая значимость, представлены структурная схема реализации задач исследования.

В первой главе рассматриваются конструкция и эксплуатационные характеристики шпиндельных узлов (ШУ) металлорежущих станков: точность, жесткость, быстроходность, теплостойкость. Анализируются проектные параметры и методы инженерного анализа (аналитические, экспериментальные, численные). Обосновывается перспективность применения нейронных сетей для комплексного прогнозирования и генеративного проектирования ШУ, позволяющего учитывать взаимовлияние множества факторов.

Во второй главе представлена экспериментальная методика определения эксплуатационных характеристик (ЭХ) шпиндельных узлов (температура, биение, жесткость). Для сокращения объема экспериментов применен генератор псевдослучайных чисел «Вихрь Мерсенна». Обоснована оптимальная архитектура нейросети прогнозирования ЭХ — многослойный персептрон 3-7-3 с функциями активации в виде гиперболического тангенса на скрытом слое и линейной на выходном. Обученная сеть показала высокую точность прогнозирования (ошибка прогноза нейросети: 1,7 % для температуры в зоне наружного кольца подшипника; 6,3 % для биения и 9,7 % для смещения переднего конца шпинделя).

В третьей главе представлена методология формирования интегрированной обучающей выборки для нейросетевого моделирования ЭХ ШУ путём объединения экспериментальных, аналитических и численных данных. Разработаны методики определения радиального зазора подшипника, использованы простые и понятные зависимости для расчёта температуры подшипника, упругого смещения, биения шпинделя и предложена методика для определения собственных частот колебаний шпинделя с учётом податливости опор. Численное моделирование МКЭ выявило ключевые конструктивные параметры корпуса, влияющие на

жёсткость. Объединение данных из 3-х источников расширило выборку вдвое (с 541 до 1063 строк обучающих данных), обеспечив полноту и репрезентативность обучающего массива с охватом широкого набора параметров.

В четвертой главе обоснована архитектура нейросети MLP 26-20-4 для прогнозирования эксплуатационных характеристик ШУ с учетом 26 проектных параметров. Нейросеть обучена на интегрированном обучающем массиве данных (1063 строк). Ошибка прогноза нейросети: температура — 1,7 %, биение — 6,05 %, смещение — 7,1 %, собственная частота — 1,6 %.. Прогнозирование ЭХ через нейросеть стабильно точнее (до 30 %) аналитических и регрессионных моделей.

В пятой главе представлена реализация генеративного проектирования ШУ. Обучена НС MLP 2-25-21 для генерации конструктивных параметров по данным из технического задания. Разработаны программы Neural SpU (прогнозирование ЭХ на основе нейросети MLP 26-20-4 полученной в пятой главе) и Neural GenSpU (генерации проектных параметров). Предложена схема взаимодействия сотрудников конструкторского отдела и разработанных программ. Работоспособность предложенной методики подтверждена примером генеративного проектирования ШУ для металлорежущих станков классов точности П и В.

Приложения содержат материалы, позволяющие более подробно раскрыть некоторые разделы диссертации.

В целом по объему и структуре диссертация соответствует установленным требованиям.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Автореферат раскрывает основные положения диссертации, а тема диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 2.5.5 -«Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» в части следующих пунктов:

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

2. Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и комбинированных воздействий.

3. Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки.

3. Научная новизна диссертации и значимость основных выводов и результатов работы

Диссертация Ладягина Р.В. представляет собой комплекс научных исследований, направленных на повышение достоверности и обоснованности прогнозирования эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов токарных металлорежущих станков за счет использования нейросетевых моделей с расширенным количеством проектных параметров.

В результате исследований автор получил следующие важные научные результаты:

- разработана и экспериментально апробирована комплексная методика определения ЭХ ШУ, включающая измерение температуры стенки корпуса, радиального биения шпинделя и его жесткости;
- разработана методика объединения экспериментальных, аналитических и численных методов для формирования репрезентативной (интегрированной) обучающей выборки;
- доказано преимущество нейросетей при прогнозировании ЭХ ШУ перед аналитическими и регрессионными моделями;
- создана программа Neural SpU на основе обученной нейросети, позволяющая сотрудникам конструкторского отдела, оперативно прогнозировать комплекс ЭХ ШУ (температуру, биение, упругое смещение, собственную частоту) в зависимости от конструктивных, настроечных и режимных параметров;
- разработана и обоснована методология генеративного проектирования ШУ, основанная на взаимодействии человека и двух программ, в основе функционирования которых лежат механизмы нейронных

сетей.

Самостоятельную научную ценность имеют методика экспериментального определения радиального зазора подшипника передней опоры ШУ и методика определения динамических характеристик ШУ.

4. Анализ и достоверность основных выводов

Исходные положения, использованный в работе математический аппарат, применение апробированных методик, современного оборудования и приборов убеждают в корректности полученных результатов.

Выводы по главам и по работе в целом отражают содержание и ценность работы.

В то же время следует отметить следующее.

Вывод 1 представляет собой констатацию проведенного в работе анализа литературы и предлагает использовать для решения задач новый инструмент – нейронные сети.

Вывод 2 является новым, в нем отражены результаты экспериментальных исследований по определению основных ЭХ (температуры стенки корпуса ШУ, радиального биения шпинделя и его жесткости) в зависимости от режимов эксплуатации.

Вывод 3 является новым и подтверждает возможность создания интегрированной обучающей выборки для нейронной сети за счет объединения экспериментальных, аналитических и численных данных.

Вывод 4 достоверен, является новым и доказывает превосходство нейросетей в прогнозировании ЭХ перед аналитическими и регрессионными моделями, что подтверждается сравнительно низкими ошибками при моделировании экспериментальных данных.

Вывод 5 прямо следует из вывода 4 и имеет важное значение для практической реализации механизмов функционирования нейронных сетей при прогнозировании ЭХ ШУ.

Вывод 6 является новым, отражает концепцию методологии генеративного проектирования ШУ.

Вывод 7 следует из вывода 6 и является его практическим подтверждением в виде генеративного проектирования ШУ двух исполнений, где автор наглядно показывает новое мышление, структуру процесса и переходы от привычных методов анализа к методам генерации

данных.

5. Практическая ценность работы

Практическая ценность полученных в работе результатов состоит:

- в сокращение времени и затрат на проектирование за счет исключения этапа изготовления и испытаний опытных образцов благодаря достоверному нейросетевому прогнозированию, что особенно важно в условиях мелкосерийного и единичного производства станков;

- в использовании методики проектирования ШУ с помощью нейронных сетей на предприятии ООО «Средневолжский Станкозавод» при обновлении модельного ряда токарных станков;

- в возможности многовариантного анализа на основе предложенной методологии генеративного проектирования, позволяющей сотрудникам конструкторского отдела быстро генерировать и сравнивать множество вариантов конструкции ШУ по точности, жесткости, теплостойкости и динамическим характеристикам;

- в снижении трудоёмкости инженерных расчётов на ранних этапах проектирования путём замены сложных и ресурсоёмких аналитических и конечно-элементных расчётов быстрым нейросетевым прогнозом с точностью, подтверждённой экспериментально (ошибка прогнозов менее 11%).

- во внедрении результатов исследований в учебный процесс путем постановки новых лабораторных работ и использовании для подготовки выпускных квалификационных работ бакалавров по направлению 15.03.05 и магистерских диссертаций по направлению 15.04.05.

6. Недостатки и замечания по работе

К недостаткам диссертации следует отнести следующие замечания.

1. В п. 1.1.2 рассматривается широкое разнообразие эксплуатационных характеристик ШУ – 7 характеристик, но для дальнейшего анализа выбраны только 4 из них: температура подшипника, биение и упругое смещение переднего конца шпинделя и собственная частота шпинделя. Не совсем понятно, чем обоснован такой выбор.

2. Не понятно, почему характер полученных в ходе эксперимента (глава

2) зависимостей показан в главе 3 (п. 3.4.1), а модель уже построена в главе 2. Т.е. на момент построения модели, невозможно понять какие же зависимости возникли в ходе проведения эксперимента, и оценить их.

3. В таблицах 2.8, 2.9, 2.10 (п. 2.2.2), 4.7, 4.8, 4.9 (п. 4.2) диссертации имеются числовые значения с 5 – ю и даже с 8 – ю знаками после запятой. Не понятно для чего нужна такая точность в машиностроении.

4. В п. 3.1.1 описана методика измерения радиального зазора подшипника путем создания на оправке, установленной в отверстие шпинделя усилия от руки. Такое усилие субъективно и имеется вероятность подвергнуть упругой деформации сам шпиндель или его опоры, что может привести к завышенным значениям измеряемого зазора.

5. В п. 3.1.1 указывается, что в эксперименте участвовало 6 станков, но при этом ничего не говорится об их техническом состоянии и времени наработки. А это может иметь важное значение, поскольку эксперименты на станках одних и тех же моделей, имеющих при этом разную наработку, будут давать не одинаковые результаты.

7. Форма изложения и оформления материалов диссертации

Диссертация имеет целостную структуру и единый стиль изложения материала. Написана технически грамотным языком, логично изложена и аргументирована, что позволило раскрыть как частные аспекты рассматриваемых задач, так и всей работы в целом. Рисунки выполнены качественно. Материалы приложений содержат необходимую информацию и документацию.

В целом работа оформлена достаточно хорошо, а отдельные замечания, отмеченные выше, не снижают высокой оценки работы.

8. Заключение

В целом диссертация Ладягина Р.В. представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу, которая вносит существенный вклад в решение актуальной научно-технической задачи по повышению достоверности и обоснованности прогнозирования эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов.

По актуальности, объему, научно-техническому уровню и

практическому значению диссертационная работа отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и соответствует п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Ладягин Роман Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки).

Официальный оппонент,
Зверев Игорь Алексеевич,
доктор технических наук (2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки),
профессор кафедры «Высокоэффективные технологии обработки»
федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
Адрес: 127055, г. Москва, переулок Вадковский, дом 3А
Телефон: 8-499-972-95-39 (доб. 5-39)
e-mail: i.a.zverev@stankin.ru

_____И.А. Зверев
06.11.2026г.

Я, Зверев Игорь Алексеевич, даю согласие на включение своих персональных данных, содержащихся в настоящем отзыве, в документы, связанные с защитой диссертации Ладягина Романа Владимировича, и их дальнейшую обработку.

_____И.А. Зверев
06.11.2026г.

Зверева И.А. удостоверяю
ОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
Главный специалист
Корначева М.В.