

Меняйло Илья Евгеньевич

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ТКАЦКИХ СТАНКОВ С
ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**

Специальность 2.5.21. – Машины, агрегаты и технологические процессы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна».

Научный руководитель:

Сигачева Валентина Васильевна

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», профессор кафедры автоматизации производственных процессов

Официальные оппоненты:

Рымкевич Павел Павлович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования "Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского" Министерства обороны РФ, профессор кафедры физики

Волков Владимир Васильевич

кандидат технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный технологический университет», профессор кафедры «Автоматизация и управление»

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет», г. Иваново

Защита диссертации состоится 12 декабря 2023 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.385.04 на базе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», по адресу 191186, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.18, ауд. 437.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 190068, Санкт-Петербург, Вознесенский пр., д. 46, <http://www.sutd.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.385.04
к.т.н., доцент

Антонова Ирина Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие новых технологий и материалов текстильной промышленности в соответствии со Сводной стратегией развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2024 года и на период до 2035 года обуславливает необходимость изучения направлений форм организации производства, проектирования сложных текстильных систем, совершенствования методов оценивания их параметров.

На ткацких фабриках наряду с новым закупаемым оборудованием используются ткацкие станки с большим сроком эксплуатации. При этом возрастает количество отклонений технического состояния от нормативов, заданных технической документацией. Это приводит к нарушению работоспособности оборудования и остановам производственного процесса, что увеличивается с каждым годом непрерывной работы станков и негативно сказывается как на качестве выпускаемой продукции, так и на экономической составляющей компании.

В связи с этим, появляется необходимость усовершенствования методики ремонта ткацких станков в целом, решения задачи ремонта «по потребности» на основе своевременного диагностирования технического состояния на работающем станке. Одним из способов усовершенствования ткацких станков, является разработка встроенной диагностической системы технического состояния ткацкого станка, выполняющей контроль и мониторинг работоспособности станка.

Модернизация основного, эксплуатируемого оборудования с помощью внедрения в ткацкий станок диагностической системы позволит вовремя устранить технические неполадки в работе и стабилизировать технологический процесс производства, что значительно дешевле, чем закупка нового, дорогостоящего оборудования. Также большим преимуществом является то, что модернизация ткацких станков осуществляется без длительного перерыва в работе оборудования, что является экономически выгодным для всего производства.

Осуществлять полный контроль состояния каждого элемента ткацкого станка является целесообразным, в связи с тем, что это потребует полного изменения конструкции оборудования из-за внедрения дополнительных средств диагностики. Целесообразно контролировать параметры вибрации только основных элементов ткацкого станка (валов, подшипниковых узлов, рычажных приводных механизмов рабочих органов), так как возникающая дополнительная вибрация и изменение виброускорения именно этих устройств, оказывает большое влияние на дальнейшую работу ткацкого станка в целом.

Степень разработанности темы исследования. Обзор и анализ решений диагностирования технического состояния ткацких станков, в технологических процессах производства, использующих ткацкие станки, показал, что основной критерий работоспособности ткацкого станка при диагностике его технического состояния определяется путем сравнения его текущих параметров с нормативными.

Общие вопросы разработки методики, средств диагностирования, а также опыт разработки диагностических процедур, выбора диагностических параметров, анализа результатов контроля для различных механических систем отражены в работах Биргера И.А., Нахапетяна Е.Г., Худых М.И.

В промышленности используются методы автоматизированных диагностических стендов, использующих ЭВМ, которые в совокупности с объектом – технологической машиной – образуют информационную диагностическую систему с алгоритмическим, программным, информационным и техническим обеспечением, например, авторами Сигачевой В.В., Маежовым Е.Г., и Ивановым В.Ю., в работах, описывался малогабаритный микропроцессорный прибор, на современной электронной базе с датчиками типа ADXL (Analog Device). Основой автоматизированного диагностирования являются алгоритмы, в математическом обеспечении которых заложены компонентные и спектральные методы анализа информации. Авторами Лукичевым С.И., Маежовым Е.Г., Сигачевой В.В. была разработана программа оценки и прогноза работоспособности цикловых механизмов.

Диагностические задачи решаются выделением из реального колебательного процесса периодических составляющих и определением конкретных диагностических показателей, характеризующих техническое состояние.

Создание методик диагностирования связано в первую очередь с определением диагностических точек и диагностических параметров. При этом требуется выбрать методику обработки экспериментальных данных из существующих или разработать специальную методику, которая являлась бы теоретической основой разрабатываемых методик диагностирования.

Цель работы состоит в разработке методов и средств автоматизированного встроенного диагностирования и оценки технического состояния механизмов ткацкого станка с прогнозированием потребности в ремонте и установлением сроков ремонта.

Основными задачами исследования являются:

1. Анализ и систематизация научно-технической информации по конструктивным особенностям и дефектам основных тканеобразующих механизмов, существующим методам и средствам технического диагностирования механизмов ткацких станков.

2. Разработка структурного и схемного решения диагностического комплекса с использованием блочной комплектации на современной технической базе, реализующего съем сигналов виброускорения с узлов оборудования и передачу получаемых сигналов в ЭВМ для последующего анализа.

3. Разработка алгоритмического и программного обеспечения аппаратно-программного комплекса системы диагностирования и прогнозирования технического состояния механизмов ткацких станков.

4. Разработка методики экспресс анализа общего технического состояния ткацкого станка с обработкой информационных сигналов статистическими методами.

5. Определение диагностических параметров тканеобразующих механизмов на основе дискретного преобразования Фурье и вейвлет-анализа.

6. Разработка методики прогнозирования изменения технического состояния тканеобразующих механизмов с рекомендациями по срокам остановки оборудования на ремонт на основе методов нечеткой логики и уточнение параметра дефектности на основе нейро-нечеткого моделирования.

7. Апробация разработанного аппаратно-программного комплекса и методик диагностирования и прогнозирования на работающем ткацком станке Техо HF.

Методы исследования. В работе использовались методы математического моделирования, вычислительной математики (анализ Фурье, вейвлет-анализ), методы статистического анализа данных, методы теории нечеткой логики, искусственных нейронных сетей.

Объект исследования. Диагностирование технического состояния ткацких станков.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработке методики трехмерного измерения информационных сигналов, с использованием 3D акселерометра, установленного в диагностической точке, характеризующей общее техническое состояние тканеобразующих механизмов ткацкого станка Техо HF;

2. Определении структуры и состава технической базы аппаратно-программного комплекса системы диагностирования технического состояния ткацкого станка;

3. Разработке алгоритма методики осуществляющую сбор, фильтрацию и обработку данных с 3D акселерометра, с последующей передачей параметров вибрации на ЭВМ;

4. Разработке методики экспресс анализа общего технического состояния ткацкого станка с обработкой информационных сигналов статистическими методами;

5. Разработке методики автоматизации определения диагностических параметров тканеобразующих механизмов на основе дискретного преобразования Фурье и вейвлет-анализа;

6. Разработке методики прогнозирования изменения технического состояния тканеобразующих механизмов с рекомендациями по срокам остановки оборудования на ремонт на основе методов нечеткой логики и уточнение параметра дефектности на основе нейро-нечеткого моделирования.

Теоретическая и практическая значимость работы.

— Разработан автоматизированный алгоритм диагностирования механизмов ткацкого станка с прогнозированием развития технического состояния и определением сроков проведения следующего ремонта механизмов ткацкого станка, с использованием 3D акселерометра, осуществляющего измерение параметров вибрации по трем осям X, Y и Z, модуля связи, осуществляющего сбор и предварительную обработку данных вибрации и информационного блока для проведения анализа полученных данных вибрации.

— Разработан аппаратно-программный комплекс, позволяющий проводить диагностирование механизмов работающих ткацких станков и прогнозировать развитие технического состояния.

— Разработано программное обеспечение «Программа модуля связи трехосевого акселерометра с информационным блоком» (свидетельство № 2022664065, зарегистрировано: 25.07.2022, опубликовано: 04.08.2022), которое позволяет проводить измерение, сбор и обработку данных вибрации с помощью 3D акселерометра и передачу показаний в информационный блок для дальнейшего анализа.

— Разработано программное обеспечение «Программа информационного блока» (свидетельство № 2023618838, зарегистрировано: 03.05.2023, опубликовано: 23.05.2023), которое позволяет проводить статистический амплитудно-частотный анализ данных, спектральный анализ и вейвлет-анализ вибрационного сигнала. Также программное обеспечение позволяет проводить диагностику технического состояния ткацких станков, определение дефектности оборудования и сроков проведения следующего ремонта ткацких станков, основанного на нечетком моделировании.

— Получены результаты, свидетельствующие о зависимости наличия повышенной вибрации на техническое состояние узлов ткацких станков, степени износа (дефектности) оборудования и времени работы механизмов станков без останова для проведения обслуживания и ремонта.

Теоретическая и практическая значимость работы подтверждена результатами натурного эксперимента.

Результаты работы получили практическое применение в организации ООО «Нево-Клос» в 2020-2021 годах и способствовали в значительной мере повышению эффективности производственно-хозяйственной деятельности.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности.

Диссертационная работа выполнена в рамках Паспорта научной специальности 2.5.21 Машины, агрегаты и технологические процессы ВАК Министерства науки высшего образования РФ и соответствует следующим его пунктам:

4. Исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций с использованием моделирования, численных и физических экспериментов.

6. Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов и технологических процессов и оценки их экономической и энергетической эффективности и ресурса.

8. Разработка и повышение эффективности методов предиктивного анализа, технического обслуживания, диагностики, ремонтпригодности и технологии ремонта машин и агрегатов в целях обеспечения надежной и безопасной эксплуатации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика трехмерного измерения информационных сигналов, с использованием 3D акселерометра, установленного в диагностической точке, характеризующей общее техническое состояние тканеобразующих механизмов ткацкого станка Техо HF;

2. Методика, осуществляющая сбор, фильтрацию и обработку данных с 3D акселерометра, с последующей передачей параметров вибрации на ЭВМ;

3. Методика экспресс анализа общего технического состояния ткацкого станка с обработкой информационных сигналов статистическими методами;

4. Методика автоматизации определения диагностических параметров тканеобразующих механизмов на основе дискретного преобразования Фурье и вейвлет-анализа;

5. Методика прогнозирования изменения технического состояния тканеобразующих механизмов с рекомендациями по срокам остановки оборудования на ремонт на основе методов нечеткой логики и уточнение дефектности на основе нейро-нечеткого моделирования.

Достоверность полученных результатов обусловлена обоснованностью и применением исходных теоретических положений, содержащихся в теории диагностирования, математического анализа, программирования и компьютерного моделирования.

Для подтверждения результатов теоретических предпосылок выполнялись экспериментальные исследования, позволившие апробировать разработанный опытный образец аппаратно-программного комплекса системы диагностирования технического состояния ткацкого станка, содержащие результаты оценки технического состояния исследуемых ткацких станков и прогнозирование развития дефектов оборудования.

Личный вклад автора. На всех этапах выполнения работы автор под руководством научного руководителя принимал личное участие в разработке стратегии исследований, формулировании и выполнении экспериментов, обсуждении полученных результатов, формулировании и проверке гипотез и выводов, подготовке материалов для публикаций совместно с соавторами.

Апробация работы. Основные результаты работы прошли положительную апробацию на Всероссийских и международных научно-технических конференциях: «Международная научная конференция, посвященная 110-летию со дня рождения профессора А. Г. Севостьянова.» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.), «Всероссийской научной конференции молодых ученых» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.), «Международная научно-техническая конференция, посвященная инновационному развитию текстильной и легкой промышленности» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.), «Международный научно-технический симпозиум, посвященный 110-летию А.Н. Плановского, в рамках Третьего Международного Косыгинского форума "Современные задачи инженерных наук"» (г. Москва, 2021г.), «Международная научная конференция, посвященная 135-летию со дня рождения профессора В.Е. Зотикова» (г. Москва, 2022 г.), 10-я Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Техническое регулирование в едином экономическом пространстве» (г. Екатеринбург, 2023 г.), Всероссийский круглый стол с международным участием «Технический текстиль – основа научно-технического развития России» (г. Москва, 2023 г.).

Публикации. По материалам работы опубликовано 15 публикаций, в том числе 8 статей из перечня изданий, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ при защите диссертации на соискание ученых степеней кандидата и доктора технических наук, среди которых 3 статьи в журнале из перечня журналов, индексируемых в базе данных Scopus, а также получено 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы и приложений. Основной текст диссертации изложен на 144 страницах, содержит 59 рисунков, 27 таблиц, библиографический список литературы из 77 наименований и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая характеристика диссертационной работы, обоснована её актуальность, показаны научная новизна и практическая значимость.

В первой главе рассмотрены известные методы диагностирования технологического оборудования. Проведен анализ актуальности разработки системы диагностирования технического состояния ткацких станков. Выявлены основные методы и средства контроля технического состояния механизмов, определены технологические параметры, характеризующие техническое состояние оборудования. Проведен обзор конструкций основных механизмов ткацкого станка и определены факторы, влияющие на техническое состояние механизмов. Проведен обзор методов анализа и обработки информации, необходимых для определения технического состояния оборудования. Определены сроки проведения ремонта ткацких станков, перечислены виды и

характер ремонта. На основании проведенных обзоров обоснована необходимость разработки системы диагностирования технического состояния механизмов ткацких станков с прогнозированием его развития.

Во второй главе приведено описание аппаратно-программного комплекса системы диагностирования технического состояния ткацкого станка. Разработана структурная схема диагностической системы. Определены диагностические точки ткацкого станка. Выбран датчик вибрации – 3D акселерометр. Определена техническая база аппаратно-программного комплекса. Разработана структура программного обеспечения модуля связи и информационного блока, показанная на рисунке 1.

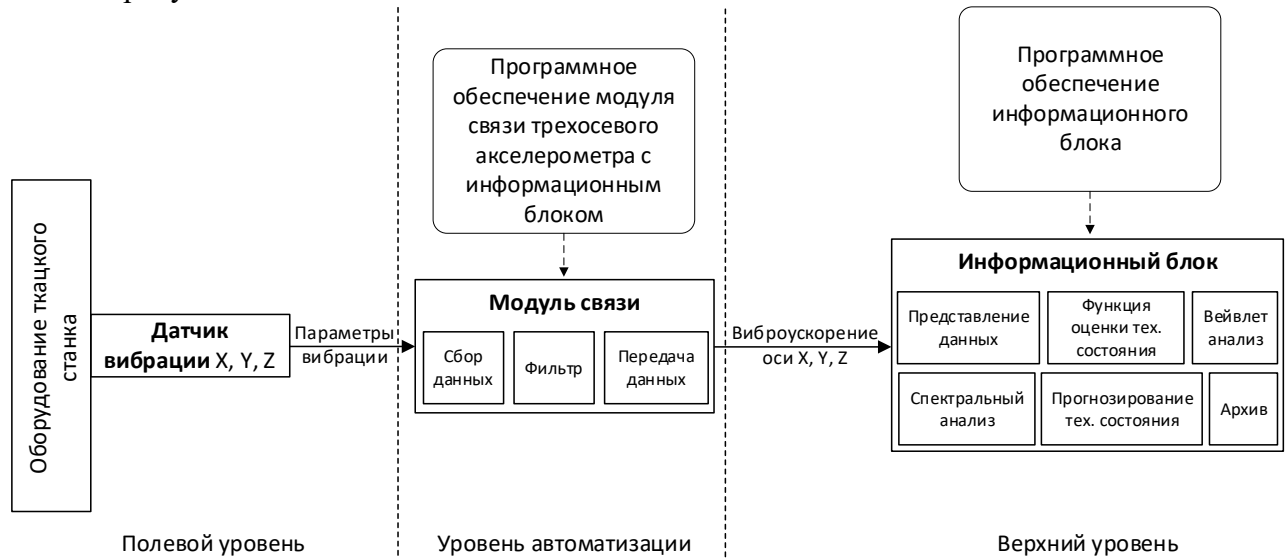


Рисунок 1 – Упрощенная структурная схема диагностической системы

Разработано программное обеспечение «Программа модуля связи трехосевого акселерометра с информационным блоком» (Свидетельство № 2022664794), выполняющего сбор параметров вибрации с 3D-акселерометра, обработку данных, сигнализацию и передачу данных на информационный блок. Структура программного обеспечения представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Структура ПО модуля связи трехосевого акселерометра с информационным блоком

Разработано программное обеспечение «Программа информационного блока» (Свидетельство № 2023660680), выполняющего коммуникацию с модулем связи; сбор и обработку параметров вибрации; представление сигналов виброускорения в табличной и графической форме, по каждой из осей измерения; реализуется обработка массивов данных: статистический амплитудно-частотный анализ, спектральный анализ, вейвлет анализ, определяются диагностические параметры технического состояния механических узлов ткацкого станка. Программное

обеспечение выполняет прогнозирование технического состояния ткацкого станка и определяет сроки проведения следующего ремонта на основе нечеткого моделирования. Структура программного обеспечения представлена на рисунке 3.

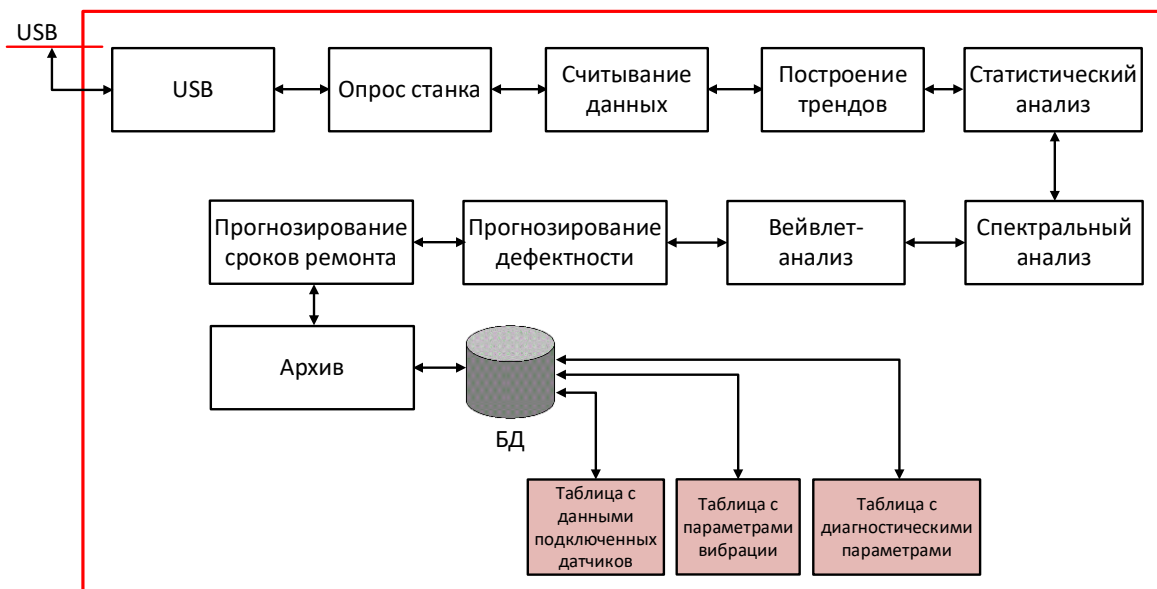


Рисунок 3 – Структурная схема программного обеспечения информационного блока

В третьей главе приведены методики и описание эксперимента по диагностированию ткацкого станка с использованием разработанной портативной системы диагностирования технического состояния. Получены информационные сигналы ускорений. Проведена обработка полученных сигналов статистическим амплитудно-частотным анализом, спектральным анализом, основанном на преобразовании Фурье и вейвлет-анализом. Определены диагностические параметры. Выявлены ткацкие станки, имеющие нормативное техническое состояние и станки, имеющие повышенную вибрацию, вызванную дефектами основных механизмов. Также определены ткацкие станки, имеющие скрытые дефекты.

Проведение эксперимента по диагностике технического состояния ткацких станков осуществлялось на технологическом оборудовании компании «Нево-Клос» в городе Санкт-Петербурге. Компания «Нево-Клос» имеет ткацкие станки для производства сушильных сеток для бумагоделательных машин.

Апробирование технического решения системы диагностирования и методик диагностирования реализовано на опытном образце системы, включающем акселерометр, выполненный в виде модуля Grove – 6 axis, модуль связи, выполненный в виде отладочной платы Nucleo-F410RB с установленным программным обеспечением (Свидетельство № 2022664794) и информационный блок, представляющий собой ноутбук Acer Aspire ES1-531 с установленным программным обеспечением (Свидетельство № 2023660680).

Измерение вибрации проводилось для всех станков производства, но для исследования с применением разработанных методик диагноза и прогноза были отобраны пять ткацких станков с различным техническим состоянием под номерами № 6, № 10, № 11, № 12, № 15. Выбор исследуемых ткацких станков был согласован с директором и инженерами производства «Нево-Клос». На этих станках проводилась проверка и обработка методик диагностирования.

На рисунке 4 представлен исходный сигнал и спектральный сигнал станка № 6, имеющего нормативное техническое состояние.

Для более точного анализа проведен расчёт диагностических параметров исследуемых ткацких станков. Для этого рассчитаны среднеинтегральная оценка уровня ординат периодической составляющей (по формуле 1) и дисперсионный низкочастотный показатель (по формуле 2) по каждой из осей X, Y и Z.

$$A_{\text{кн}} = \frac{\sum_{i=1}^N (\ddot{y}_{\text{кн}}^i)}{N}, \quad (1)$$

где $A_{\text{кн}}$ – математические ожидания абсолютных величин ординат вынужденных частотных (низкочастотных) и собственных колебаний для составляющих (компонент), принятых за диагностические. А также значения $\ddot{y}_{\text{кн}}, i, \ddot{y}_{\text{кн}i}$ – ординаты ускорений, вынужденных и сопровождающих колебаний (i – текущий номер ординаты); N – число учитываемых ординат за цикл или на анализируемом участке.

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_j} (\ddot{y}_{\text{кн}i} - \ddot{y}_i)^2, \quad (2)$$

где \ddot{y}_i – кинематическое эталонное ускорение в i -й точке процесса.

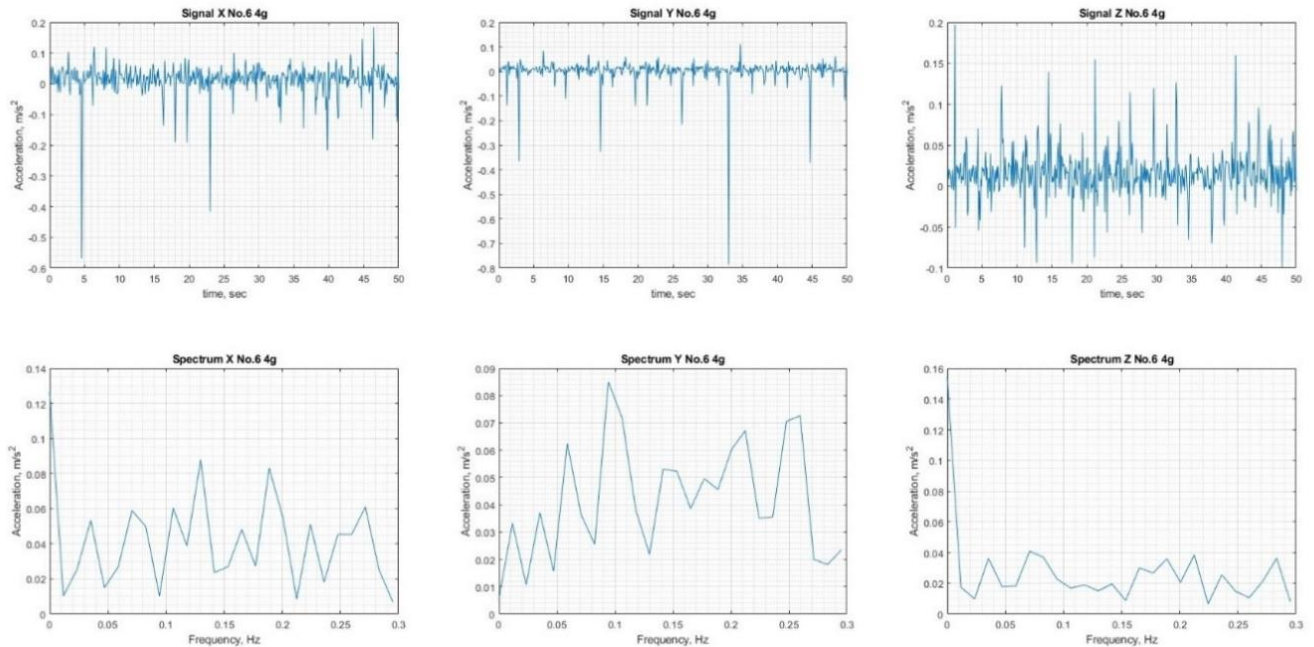


Рисунок 4 – Исходный сигнал и спектральный анализ виброускорения станка № 6
На рисунке 5 представлен исходный сигнал и спектральный сигнал станка № 11, имеющего повышенную вибрацию, обусловленную наличием дефектов механических узлов.

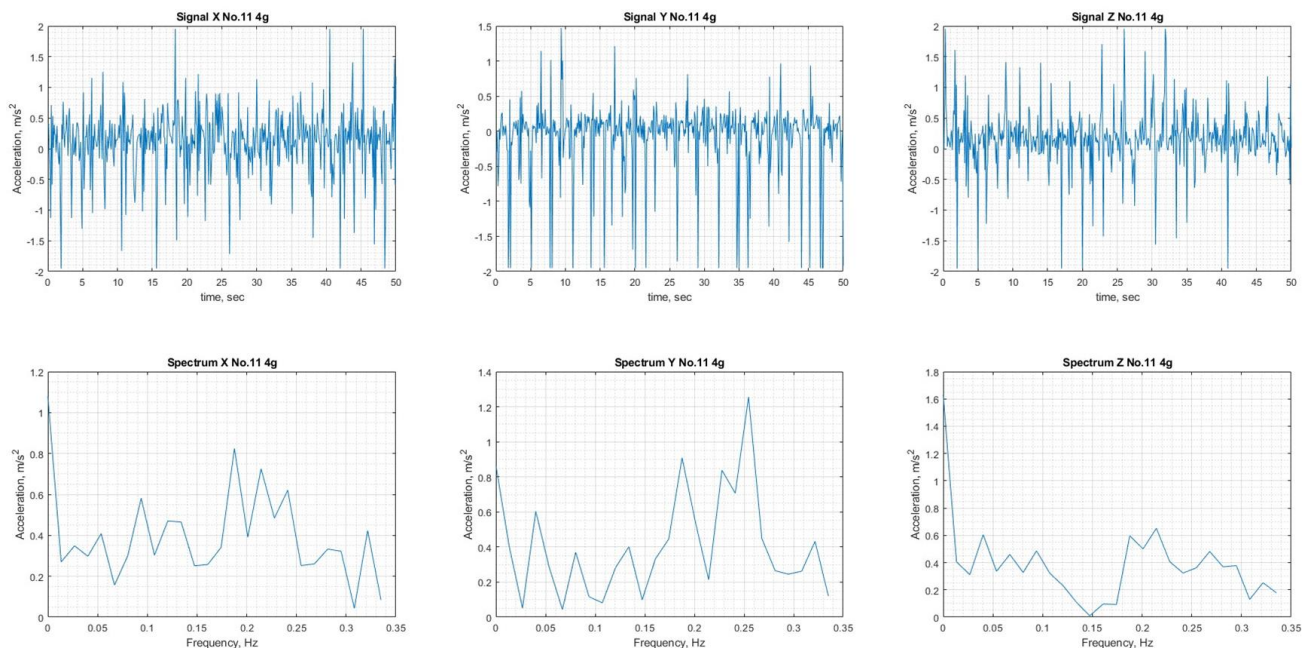


Рисунок 5 – Исходный сигнал и спектральный анализ виброускорения станка № 11
В таблице 1 приведены итоговые дисперсионные показатели по всем исследуемым ткацким станкам.

Таблица 1 – Дисперсионный показатель станков № 6, № 10, № 11, № 12, № 15

D показатель	№ 6	№ 10	№ 11	№ 12	№ 15
D по X *10 ⁻⁴	1,95	71,66	288,71	34,52	18
D по Y *10 ⁻⁴	2,63	54,88	521,35	33,69	4,89
D по Z *10 ⁻⁴	0,59	38,52	112,72	11,08	0,57
D среднее *10 ⁻⁴	1,72	50,02	307,59	26,43	7,82

Проанализировав получившиеся значения дисперсионного показателя, можно сделать вывод, что станок № 11 имеет наибольшее среднее значение дисперсионного показателя по осям X, Y и Z ($307,59 \cdot 10^{-4}$), что свидетельствует о его неудовлетворительном состоянии.

Сравнивая средние значения дисперсионного показателя исследуемых станков, видно, что станок № 6 имеет наименьшее среднее значение и наименьшие значения по осям X, Y и Z, что может являться показателем нормального технического состояния и низкой вибрации работающих механизмов, что также свидетельствует об его исправном техническом состоянии.

Станки № 10 и № 12 имеют завышенные средние показатели дисперсионного значения, что говорит о наличии небольших дефектов, приводящих к повышению вибрации в процессе работы станков. Станок № 15 имеет сравнительно низкий дисперсионный показатель по трем осям, однако присутствует повышенная вибрация по оси X, что может являться показателем наличия дефекта в боевом механизме (прокладчике нити) или наличием скрытых дефектов механизмов.

Анализируя значения дисперсионного показателя по осям измерения можно судить, что чем выше вибрационный показатель по определенной оси, тем более вероятно неисправность или наличие дефекта в этой области. Например, ось X может характеризовать неисправность боевого механизма ткацкого станка, ось Y указывает на дефекты опор станка или батанного механизма, если повышено ускорение по оси Z. Ось Z описывает неисправность батанного механизма.

Таким образом, можно сделать вывод, что для станков № 10, № 11, № 12 и № 15 необходимо провести дополнительную диагностику состояния узлов и механизмов на наличие неисправностей или образования дефектов оборудования. Так для станка № 11 (имеющего наибольшее среднее значение дисперсионного показателя) наиболее неисправным узлом может являться батанный механизм ткацкого станка. Станок № 10 имеет повышенную вибрацию боевого механизма, что может объясняться наличием дефекта в этом узле. Также дополнительная диагностика требуется для батанного механизма и опор станка. Станок № 12 имеет сравнительно равную вибрацию по оси X и по оси Y, и имеет завышенное значение по этим двум осям, что может говорить о наличии дефектов в батанном механизме и прокладчика нити. Однако, одинаковые значения по оси X и Y также могут характеризовать наличие скрытых дефектов в оборудовании, которые не могут быть явно продиагностированы текущим методом.

Проведение диагностики технического состояния ткацких станков методом вейвлет-анализа сигналов является последним этапом. Разработанное программное обеспечение позволяет выявлять станки с нарушенной работоспособностью, эксплуатация которых в дальнейшем, требует или дополнительного диагностирования или рекомендаций по ремонту.

Кроме изложенной методики определения технического состояния ткацкого станка, вейвлет-анализ ускорений позволяет определить скрытые дефекты механических узлов.

На рисунке 6 отображены графики компонент, восстановленных по аппроксимирующим (слева) и детализирующим (справа) коэффициентам четвертого уровня разложения. Статистические характеристики аппроксимирующих коэффициентов четвертого уровня разложения ускорений представлены в таблице 2. Из таблицы 2 видно, что значения среднеквадратичного отклонения выше у станка № 11, чем у остальных исследуемых станков. Ткацкие станки № 6 и № 15 также имеют наименьшие показатели среднеквадратичного отклонения, что подтверждает их исправное состояние. Станки № 10 и № 12 требуют дополнительной диагностики, так же как и станок № 11, в связи с кратно отличающимися значениями среднеквадратичного отклонения сигнала со значениями «исправных» ткацких станков. Данный анализ позволяет определить, что станки № 10, № 11 и № 12 имеют повышенную вибрацию, вызванную наличием дефектов в оборудовании.

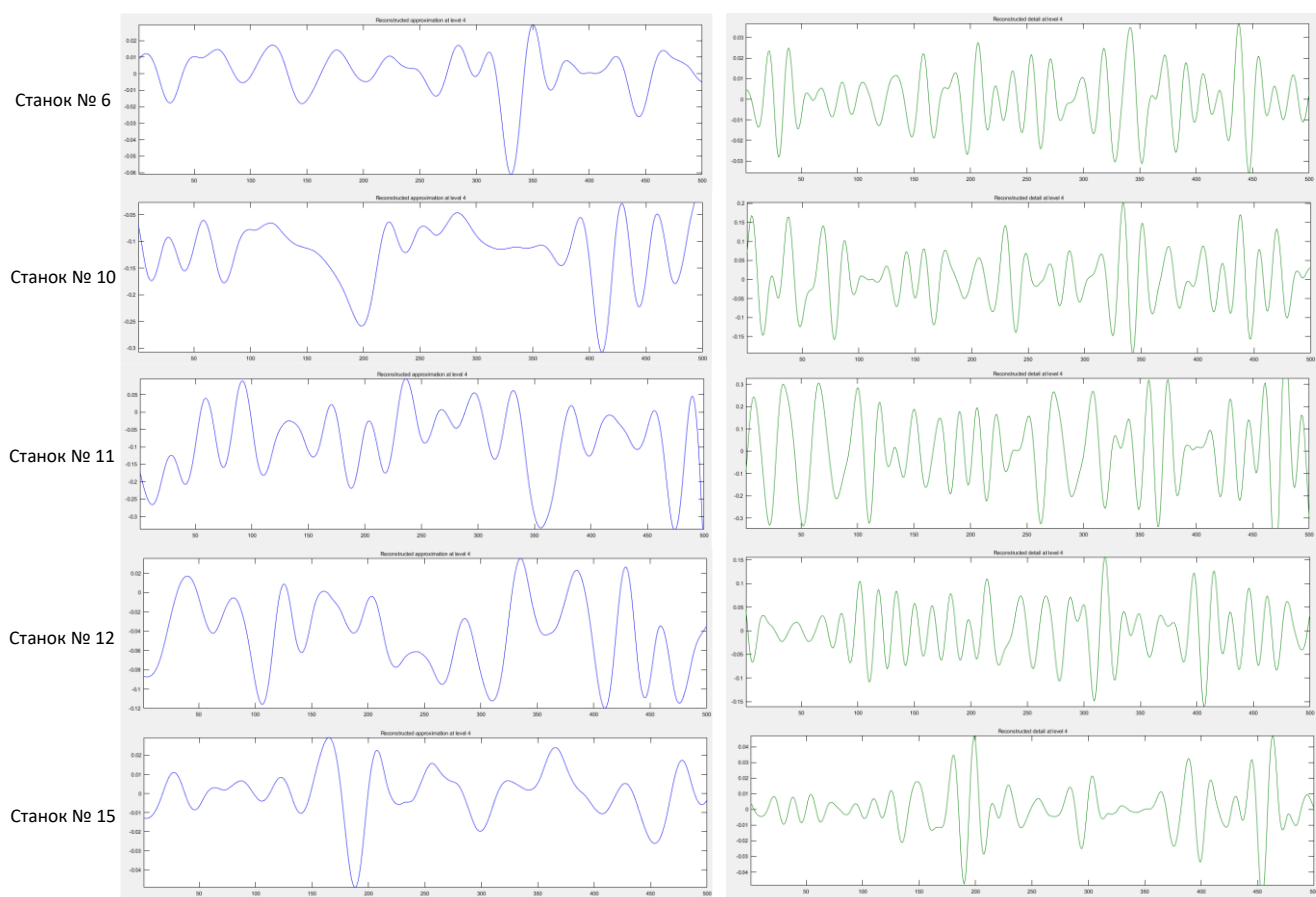


Рисунок 6 – Графики компонент, восстановленных по аппроксимирующим (слева) и детализирующим (справа) коэффициентам четвертого уровня разложения

Таблица 2 – Статистические характеристики аппроксимирующих коэффициентов 4 уровня

№ станка	Среднее	Max	Min	Диапазон	Среднеквадратичное отклонение
№ 6	0,0006772	0,02983	-0,06115	0,09098	0,0138
№ 10	-0,1181	0,01822	-0,308	0,3262	0,0557
№ 11	-0,0869	0,09643	-0,4461	0,5425	0,0997
№ 12	-0,0438	0,03561	-0,12	0,1556	0,0387
№ 15	0,0001651	0,02933	-0,0492	0,07853	0,0131

Для сравнения со статистическими характеристиками аппроксимирующих коэффициентов использовалось восстановление детализирующих коэффициентов 4-го уровня разложения.

Статистические характеристики детализирующих коэффициентов четвертого уровня разложения ускорений представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Статистические характеристики детализирующих коэффициентов 4 уровня

№ станка	Среднее	Max	Min	Диапазон	Среднеквадратичное отклонение
№ 6	$-7,115 \cdot 10^{-5}$	0,03684	-0,03587	0,0727	0,0134
№ 10	0,0009793	0,2027	-0,194	0,3967	0,0726
№ 11	-0,00165	0,4853	-0,55	1,035	0,1732
№ 12	-0,0004111	0,1561	-0,1611	0,3173	0,0545
№ 15	$3,142 \cdot 10^{-5}$	0,04725	-0,05652	0,1038	0,0144

Из таблицы 3 видно, что значения среднеквадратичного отклонения также выше у станка № 11, чем у остальных исследуемых станков. Такие станки № 6 и № 15 также имеют наименьшие показатели среднеквадратичного отклонения, что подтверждает их исправное состояние.

Станки № 10 и № 12 требуют дополнительной диагностики, также как и станок № 11, в связи с кратно отличающимися значениями среднеквадратичного отклонения сигнала со

значениями «исправных» ткацких станков. Однако, станок № 12 имеет среди «дефектных» станков наименьшее значение. Также, сравнивая графики компонент, восстановленных по детализирующим коэффициентам четвертого уровня разложения станок № 12 имеет частоту колебаний сравнительную с частотой колебаний «дефектного» станка № 11. Такое явление может характеризовать наличие скрытых дефектов в оборудовании ткацкого станка № 12.

Вейвлет-анализ виброускорений с разложением колебательного процесса на аппроксимирующие и детализирующие уровни позволил определить статистические характеристики, подтверждающие наличие величин по диапазону и среднеквадратичному отклонению сравнимых с дефектным станком.

В результате проведенного анализа необходимо проверить оборудование ткацких станков № 10, № 11 и № 12 и провести соответствующий ремонт неисправных узлов, которые вызывают дополнительную вибрацию ткацких станков.

Данные анализа технического состояния исследуемых ткацких станков были переданы инженерам и механикам предприятия «Нево-Клосс», которые оценили техническое состояние станков и подтвердили результаты исследования. Это подтверждается наличием справки о введении.

В четвертой главе представлено использование методов для определения дефектности и сроков проведения следующего ремонта «по потребности», основанных на нечетком моделировании. Определена степень дефектности механических узлов ткацких станков, методами нечеткой логики, а также гибридным методом, основанным на нейро-нечетком моделировании. Произведено сравнение двух методов определения степени дефектности ткацких станков, рассчитан статистический критерий. Выявлены ткацкие станки, имеющие наибольший и наименьший процент дефектности механизмов. Определены сроки проведения следующего ремонта ткацких станков на основе методов нечеткого моделирования.

В таблице 4 представлены показатели дефектности исследуемых ткацких станков.

Таблица 4 – Показатели дефектности исследуемых станков

Номер станка	Средний показатель процента дефектности, %
Станок № 6	10,7
Станок № 10	26,03
Станок № 11	37,76
Станок № 12	21,05
Станок № 15	11,72

Из таблицы 4 видно, что самый низкий процент дефектности механических узлов имеет станок № 6. Примерно такой же процент дефектности имеет станок № 15 (11,72%). Среди исследуемых ткацких станков самым изношенным является станок № 11 с показателем 37,78% дефектности. Ткацкие станки № 10 и № 12 имеют промежуточное состояние, их процент дефектности составляет 26,03% и 21,05%, соответственно.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что ткацкие станки № 6 и № 15 находятся в нормальном техническом состоянии и не требуют проведения срочного ремонта. Ткацкий станок № 11 имеет завышенный показатель дефектности, что может говорить о неисправности некоторых механизмов, однако, данный ткацкий станок, в общем, находится в исправном состоянии и не требует проведения срочного ремонта, но проведение ремонта необходимо запланировать. Ткацкие станки № 10 и № 12 также находятся в рабочем состоянии, но их механизмы имеют либо незначительные дефекты, либо скрытые дефекты, которые требуют проведения дополнительной диагностики, что подтверждается предыдущими методами.

Метод определения дефектности не позволяет точно определить через какое время необходимо провести техническое обслуживание или ремонт. Для этого, было решено определять общий показатель, определяющий техническое состояние ткацкого станка. Например, одним из таких показателей может являться среднеквадратичное отклонение значений вибрации. Было определено среднеквадратичное отклонение параметров вибрации и построено соответствие каждого из значений среднеквадратичного отклонения к срокам проведения ремонта ткацкого станка, указанному в месяцах.

В таблице 5 представлены значения среднеквадратичного отклонения виброускорения исследуемых станков и сроки, через которые необходимо произвести ремонт оборудования.

Таблица 5 – Определение сроков проведения ремонта ткацких станков

Номер станка	Среднеквадратичное отклонение	Ремонт через, месяц
№ 6	0,0448	32
№ 10	0,3037	20,8
№ 11	0,3984	13,1
№ 12	0,2285	24,8
№ 15	0,0486	32

Из таблицы 5 видно, что наименьшие значения среднеквадратичного отклонения имеют ткацкие станки № 6, 15 и, следовательно, наибольший срок работоспособности оборудования без проведения ремонтных работ составляет 32 месяца. Ткацкие станки № 10 и № 12 имеют сроки проведения следующего ремонта 20,8 и 24,8 месяцев, соответственно. Станок № 11 имеет срок проведения следующего ремонта около 13 месяцев, что говорит о том, что проведение капитального ремонта ткацкого станка необходимо провести чуть более чем через один год.

Таким образом, разработанный метод прогнозирования проведения следующего ремонта ткацких станков позволяет проводить диагностику и планирование организации технического обслуживания оборудования производства. Определены ткацкие станки, имеющие максимальный и минимальный срок службы.

Для проведения технической диагностики механизмов станка, также возможно использование обученных нейронных сетей для определения текущего состояния, дефектности механизмов и сроков проведения ремонта станков.

Так, при получении большого объема данных с помощью 3D акселерометра, нейронные сети позволяют определять зависимости изменения виброускорения, определяющие характер поведения станка. В связи с этим, появляется возможность построить систему диагностирования, используя алгоритмы нейронных сетей. Полученные результаты нейронной сети также могут быть использованы для сравнения с результатами методов оценки и функций прогнозирования технического состояния ткацкого станка, описанные выше.

В таблице 6 представлены значения процента дефектности исследуемых станков.

Таблица 6 – Сравнение показателей дефектности исследуемых станков

Номер станка	Средний показатель процента дефектности нечеткая модель, %	Средний показатель процента дефектности гибридная модель, %
Станок № 6	10,7	14,3
Станок № 10	26,03	27,09
Станок № 11	37,76	36,58
Станок № 12	21,05	22,15
Станок № 15	11,72	15,17

В результате проведенного сравнения показателей между двумя методами оценки технического состояния ткацких станков, можно сделать вывод, что оба метода позволяют определять текущее состояние ткацких станков и позволяют определить изношенность оборудования. Сравнивая полученные данные, видно, что показатели дефектности, полученные гибридным методом, основанным на нейро-нечетком выводе, имеют слегка завышенные показатели, чем показатели метода, основанного только на нечетком моделировании (кроме станка № 11). Это связано с малым количеством тренировочных данных системы, так как оценка производится на основе известных данных, неизвестные данные могут быть приближены к реальным и их точность зависит от количества тренировочных данных нейронной сети. Использование большего количества тренировочных значений виброускорения и известных значений дефектности повысит точность гибридной нейро-нечеткой системы.

Таким образом, использование нейронных сетей для диагностики технического состояния ткацких станков по параметрам вибрации является эффективным и перспективным подходом в

области промышленной диагностики, который может значительно повысить эффективность и надежность работы производственного оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных в диссертационной работе исследований, направленных на создание методов диагностирования механизмов ткацких станков с прогнозированием развития технического состояния, можно сделать следующие выводы.

В процессе эксплуатации ткацких станков, узлы и механизмы подвержены дополнительной вибрации в связи с образованием дефектов в механизмах ткацких станков. Для предотвращения ненормативного состояния механизмов ткацких станков необходимо разработать и установить диагностическую систему, позволяющую производить оценку технического состояния и прогнозировать образование дефектов в оборудовании.

На основании анализа литературных источников выявлены различные способы диагностирования механизмов ткацких станков, применение которых позволяет проводить диагностику отдельных узлов оборудования, но без быстрого комплексного анализа на работающем оборудовании.

В данной работе путем разработки программно-диагностического комплекса вибрации и подбора диагностических точек, позволяющих одновременно определять работу разных узлов ткацкого станка, а также разработки методик диагностирования, алгоритмов прогнозирования технического состояния повышена скорость и точность определения технического состояния ткацких станков. В процессе решения задач исследования получены следующие результаты:

1. разработан аппаратно-программный комплекс для диагностики технического состояния ткацкого станка;
2. разработана портативная система диагностирования технического состояния ткацкого станка, собран диагностический стенд;
3. разработано программное обеспечение: «Программа модуля связи трехосевого акселерометра с информационным блоком» (а.с.№ 2022664794). Программа позволяет проводить измерение вибрационных параметров ткацкого станка с помощью трехосевого (3D) акселерометра по трем осям измерения X, Y и Z. Программа выполняет сбор, обработку и передачу информационных данных в информационный блок. Представление данных возможно в графическом и табличном виде по каждой из осей измерения;
4. разработана методика автоматизации определения диагностических параметров на основе известных методов обработки вибрационных сигналов в том числе на: статистическом амплитудно-частотном анализе данных, спектральном анализе и вейвлет-анализе;
5. разработана методика прогнозирования развития дефектов и определения сроков проведения следующего ремонта ткацких станков с применением методов нечеткого моделирования;
6. разработана методика определения дефектности ткацкого станка, основанная на гибридной системе нейро-нечеткого вывода;
7. разработано программное обеспечение: «Программа информационного блока» (а.с.№ 2023660680). Программа разработана в среде MATLAB и позволяет работать со встроенными программными пакетами “Wavelet Toolbox”, “Fuzzy Logic Toolbox” и “ANFIS”. Программное обеспечение позволяет проводить диагностирование технического состояния основных тканеобразующих механизмов ткацких станков по полученным от модуля связи данным вибрации, а также определять дефектность и прогнозировать техническое состояние ткацких станков;
8. проведено экспериментальное исследование по диагностированию технического состояния ткацких станков, определению дефектности и сроков проведения следующего ремонта. Эксперимент проводился на действующем предприятии ООО «Нево-Клос» по производству сушильных сеток для бумагоделательных машин. Определены разные технические состояния ткацких станков, выявлены ткацкие станки, имеющие нормативное техническое состояние и ткацкие станки, имеющие повышенную вибрацию механизмов, вызванную наличием дефектов. Определен ткацкий станок, имеющий скрытые дефекты.

9. результаты исследования были подтверждены и внедрены предприятием. Получен акт внедрения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ Статьи в рецензируемых журналах, входящих в «Перечень ...» ВАК РФ и Scopus

1. Меняйло, И. Е. Разработка технического обеспечения мониторинга работоспособности ткацкого станка / И. Е. Меняйло, В. В. Сигачева // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2021. – № 1. – С. 123-126.

2. Сигачева, В. В. Разработка встроенной системы мониторинга технического состояния ткацкого станка СТБ / В. В. Сигачева, И. Е. Меняйло // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2021. – № 2. – С. 130-133.

3. Сигачева, В. В. Диагностирование и разработка системы эксплуатационного мониторинга ткацкого станка для производства сушильных сеток / В. В. Сигачева, И. Е. Меняйло // Известия высших учебных заведений. технология текстильной промышленности. Иваново. – 2022. – № 2. – С. 237-242.

4. Меняйло, И. Е. Информационное устройство диагностики технического состояния ткацкого станка со спектральным анализом 3-D ускорений / И. Е. Меняйло, В. В. Сигачева, М. В. Андреев // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2022. – № 3. – С. 45-48.

5. Сигачева, В. В. Система диагностирования ткацкого станка для бумагоделательных сеток с определением диагностических параметров вейвлет-анализом 3-D ускорений / В. В. Сигачева, И. Е. Меняйло // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. Иваново. – 2022. – № 6. – С. 160-165.

6. Меняйло, И. Е. Определение диагностических параметров технического состояния ткацкого станка методами нечеткого моделирования / И. Е. Меняйло // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2023. – № 2. – С. 33-36.

7. Сигачева, В. В. Нечеткое моделирование прогноза сроков ремонта ткацких станков при эксплуатационном диагностическом контроле / В. В. Сигачева, И. Е. Меняйло // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. Иваново. – 2023. – № 3. – С. 196-200.

8. Меняйло, И. Е. Применение нейронных сетей для диагностики технического состояния ткацкого станка / И. Е. Меняйло // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2023. – № 3. – С. 53-59.

Материалы конференций

9. Сигачева, В. В. Исследование дефектов текстильных изделий с использованием двумерного вейвлет-анализа / В. В. Сигачева, И. Е. Меняйло // Сборник научных трудов международной научной конференции, посвященной 110-летию со дня рождения профессора А. Г. Севостьянова. Часть 1. – 2020. – С. 265-268.

10. Меняйло, И. Е. Исследование дефектов текстильных изделий с использованием глубокого обучения нейронной сети / И. Е. Меняйло, В. В. Сигачева // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых. – Санкт-Петербург. – 2020. – С. 7-8.

11. Сигачева, В. В. Разработка встроенной системы мониторинга технического состояния ткацкого станка СТБ / В. В. Сигачева, И. Е. Меняйло // Наука – технологии – производство. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции, посвященной инновационному развитию текстильной и легкой промышленности. – Санкт-Петербург. – 2021. – С. 24.

12. Сигачева, В. В. Эксплуатационный контроль и диагностирование ткацкого станка для производства бумагоделательных сушильных сеток / В. В. Сигачева, И. Е. Меняйло // Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ISTS "EESTE-2021"). Сборник научных трудов «Международного научно-технического симпозиума, посвященного 110-летию А.Н. Плановского, в рамках Третьего Международного Косыгинского форума "Современные задачи инженерных наук"». – Москва. – 2021. – Том 1. – С. 357-359.

13. Меняйло, И. Е. Разработка программного обеспечения встроенной системы диагностирования ткацкого станка / И. Е. Меняйло, В. В. Сигачева // Сборник научных трудов по итогам «Международной научной конференции, посвященной 135-летию со дня рождения профессора В.Е. Зотикова». – Москва. – 2022. – С. 38-43.

14. Сигачева, В. В. Определение дефектности ткацких станков методами нечеткой логики / В. В. Сигачева, И. Е. Меняйло // Всероссийский круглый стол с международным участием «Технический текстиль – основа научно-технического развития России». – Москва. – 2023. – С. 177-179.

15. Меняйло, И. Е. Использование нечеткого моделирования для диагностики технического состояния ткацкого станка / И. Е. Меняйло // 10-я Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Техническое регулирование в едином экономическом пространстве». – Екатеринбург. – 2023. – С. 109-114.

Свидетельства регистрации программы для ЭВМ

16. Свидетельство № 2022664794. Программа модуля связи трехосевого акселерометра с информационным блоком : программа для ЭВМ / И. Е. Меняйло, В. В. Сигачева (RU) ; правообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» (RU) № 2022664065 ; заявл. 25.07.2022 ; опубл. 04.08.2022 Бюл. № 8, 20 КБ.

17. Свидетельство № 2023660680. Программа информационного блока : программа для ЭВМ / И. Е. Меняйло, В. В. Сигачева (RU) ; правообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» (RU) № 2023618838 ; заявл. 03.05.2023 ; опубл. 23.05.2023 Бюл. № 6, 22 КБ.