

На правах рукописи



ЯНОВ Евгений Сергеевич

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО
КОСВЕННОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность:

2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Тула – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

Научный консультант: Воротилин Михаил Сергеевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Алчинов Виктор Иванович,
доктор технических наук, профессор,
филиал Военной академии материально-техни-
ческого обеспечения имени генерала армии
А.В. Хрулева, г. Пенза,
профессор

Богатиков Валерий Николаевич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Тверской государственный
технический университет», г. Тверь,
профессор

Грибков Алексей Николаевич
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», г. Тамбов,
заведующий кафедрой

Ведущая организация: Национальный исследовательский университет
«МИЭТ», г. Москва, г. Зеленоград

Защита состоится «15» апреля 2025 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.417.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, ауд. 9-101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте:

<https://tulsu.ru/science/dissertation/diss-24-2-417-03/yanov-evgeniy-sergeevich-24-2-417-03>

Автореферат разослан «21» января 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Маслова Анна Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В условиях санкционного давления на Российскую Федерацию и ухода с отечественного рынка иностранных производителей и поставщиков машиностроительной продукции стратегически важной задачей является повышение эффективности отечественных машиностроительных производств, то есть возможности максимально полно использовать имеющиеся ресурсы с целью обеспечения технологической независимости.

Эффективность отечественных машиностроительных производств достигается за счет выполнения следующих критериев эффективности:

- снижение простоев оборудования;
- сокращение продолжительности и количества переналадок оборудования;
- сокращение длительности производственного цикла;
- сокращение количества бракованной продукции;
- увеличение стойкости инструмента;
- сокращение цикла обработки продукции на оборудовании.

Сдерживающими факторами, влияющими на эффективность технологических систем машиностроительных производств, являются:

- низкая технологическая дисциплина (соблюдение технологии изготовления продукта производства и ритмичности работы);
- нерациональные режимы резания (стойкость инструмента и время цикла обработки продукции на оборудовании);
- высокие издержки при производстве продукции.

Соблюдение технологической дисциплины также влияет на качество производимой продукции.

Для обеспечения соблюдения технологической дисциплины необходимо осуществлять оперативный контроль работы технологической системы, то есть совокупности функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов или операций (ГОСТ 27.004-85).

При отсутствии оперативной и достоверной информации о состоянии технологической системы нет возможности контролировать соблюдение технологической дисциплины, влияющей на эффективность ее использования. Оперативный контроль состояния технологических систем возможно осуществлять различными способами, но наиболее перспективным является внедрение в производство информационно-измерительных систем (ИИС).

Анализ тенденций развития современного машиностроительного производства показал, что рост в составе технологических переделов доли аппаратно-программных комплексов (АПК) и ИИС, интегрированных в технологические системы, положительно сказывается на конкурентоспособности и эффективности отечественных машиностроительных производств в условиях формирования технологического суверенитета Российской Федерации.

На рынке в настоящее время присутствуют как отечественные, так и зарубежные ИИС, обеспечивающие прямой контроль состояния технологических систем,

имеющие различные подходы к организации интерфейсов, ценообразованию и политике лицензирования, но в большинстве случаев, основным условием работы таких систем является необходимость подключения к системе числового программного управления (СЧПУ) технологического оборудования.

При этом в соответствии с Федеральным законом «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 № 187-ФЗ установлены нормы регулирования отношений в области обеспечения безопасности критической информационной инфраструктуры (КИИ) Российской Федерации. Соответственно, при производстве продукции двойного и специального назначения в настоящее время технологическое оборудование машиностроительных производств является объектом КИИ – автоматизированными системами управления и другими значимыми системами, функционирование которых критически важно для жизнедеятельности государства. Подключение ИИС к СЧПУ объектов КИИ требует повышения категории объекта КИИ, что ведет к увеличению издержек или становится неприемлемым из-за невозможности соблюдения требований, предъявляемых к КИИ при повышении категории.

Альтернативой повышению категории объекта КИИ при внедрении ИИС, требующей подключения к СЧПУ, может быть разработка принципиально новой ИИС, на основе методов косвенного контроля соблюдения технологической дисциплины в процессе работы технологических систем на основе методов и средств обеспечения оперативного контроля, сбора и обработки информации о технологических процессах.

Указанная особенность также позволит применять предложенную ИИС для контроля универсального оборудования, так как не требуется подключение к СЧПУ.

При этом в настоящее время научное обоснование ИИС косвенного контроля оборудования, основанных на определении структурных параметров технического состояния оборудования одновременно по уровню информационного вибрационного сигнала и уровню электропотребления, отсутствует.

Таким образом, можно утверждать, что отсутствие научного обоснования методов и средств обеспечения оперативного косвенного контроля, сбора и обработки информации о протекающих технологических процессах и прогнозирования состояния технологических систем, в том числе с помощью применения искусственных нейронных сетей (ИНС), в условиях возросших объемов выпуска продукции двойного и специального назначения с учетом сложности применения существующих на рынке известных ИИС, требующих подключения к СЧПУ технологического оборудования, являющегося объектами КИИ промышленных производств для контроля технологической дисциплины – **актуальная научная проблема**, имеющая важное хозяйственное значение и требующая системного научно-обоснованного решения.

Степень разработанности темы. Еще в начале XX века инженеры-промышленники и ученые, такие как Ф. Тейлор, Фрэнк и Лилиан Гилбрет, Г. Форд, У. Шухарт, Э. Деминг занимались вопросами повышения эффективности производства и заложили основы теории научной организации труда. К отечественным ученым, занимавшимся фундаментальными вопросами повышением эффективности труда, можно отнести В.А. Ковалева и В.Н. Новикова.

Значительный вклад в развитие рассматриваемого направления внесли Т.Т. Allan, Н. Fujiwara, М. Guida, С. Kime, К. Kinoshita, S. Mallela, G.M. Masson, N. Packard, A. Perelson, J. Russel, S. Tolda, A.J. Truelove, А. Авиженис, А.Е. Акин-деев, Д.В. Александров, Г.А. Александров, Ю.П. Анискин, Е.Ю. Барзилович, Р. Барлоу, А.И. Берг, И.А. Биргер, В.Н. Богатиков, Г.Б. Бурдо, В.Н. Бурков, С.Н. Васильев, В.А. Ведешенков, В.Г. Воробьёв, Э. Вошни, А.Л. Гапоненко, И.Б. Герасимова, И.Н. Герчигова, С.Ю. Глазьев, В.В. Глухов, В.М. Глушков, Б.В. Гнеденко, А.Н. Грибков, Н.Н. Горбатенко, В.А. Горшков, В.А. Зеленский, Б.Г. Ильясов, А.Л. Истомина, А.А. Ицкович, А.П. Карпенко, В.В. Кашковский, В.Д. Константинов, С.В. Крауз, М. Краус, В.В. Кульба, В.М. Курейчик, В.В. Курейчик, В.И. Лачин, Б. Мандельброт, В.В. Мартынов, Г.Ф. Мингалеев, Ю.Ф. Мухопад, А.П. Науменко, О.Н. Новоселов, В.В. Петрухин, С.В. Петрухин, Р.М. Петухов, Г.Ф. Пешков, Ю.В. Полянсков, Ф. Прошан, К. Райншке, Н.И. Россеев, Е.А. Румянцев, Н.З. Сафиуллин, Н.П. Сергеев, И.М. Синдеев, Р.Т. Сиразетдинов, Н.Н. Смирнов, Е.С. Согомонян, С.В. Тархов, А.Н. Ткачев, Р.А. Фатхутдинов, А. Фрейзер, Е.Б. Фролов, Г. Хакен, Д. Холланд, А.Д. Чандлер, Р.Б. Чейз, В.И. Шаманов, Ю.И. Шокин, В.Ю. Шокин.

Объект исследования – ИИС контроля технологических систем машиностроительных производств.

Предмет исследования – средства, методы и алгоритмы работы ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств.

Цель работы – повышение эффективности эксплуатации технологических систем на основе контроля технологической дисциплины за счет разработки ИИС оперативного косвенного контроля.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

- анализ способов косвенного контроля состояния и повышения эффективности технологических систем;
- разработка средств косвенного контроля состояния технологических систем;
- исследование вибрационного сигнала технологических систем;
- разработка способа выбора места установки средств косвенного контроля состояния технологических систем;
- разработка математической модели ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств;
- разработка архитектуры и алгоритмов ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств;
- разработка метода контроля технологической дисциплины с применением ИИС для ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств;
- разработка метода предиктивной аналитики состояния технологических систем с применением ИИС для ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств;
- разработка метода назначения рациональных режимов обработки на основе контроля состояния технологических систем по данным косвенного контроля вибрации;

– апробация разработанной ИИС на основе косвенного контроля состояния технологической системы.

Соответствие паспорту специальности – содержание диссертации соответствует Паспорту научной специальности 2.2.11. «Информационно-измерительные и управляющие системы»:

– п. 1 «Научное обоснование перспективных информационно-измерительных и управляющих систем, систем их контроля, испытаний и метрологического обеспечения, повышение эффективности существующих систем».

Научная новизна заключается в том, что:

– впервые разработана математическая модель ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств с использованием метода пространства состояний, отличающаяся от известных тем, что позволяет не только осуществлять оперативный контроль, сбор и обработку информации о технологических процессах, но и оценивать динамику состояния и работы технологической системы (износ инструмента, износ оборудования, накапливающиеся изменения в работе оборудования);

– предложена архитектура и алгоритм ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем, отличающиеся от известных тем, что за счет использования методов косвенного контроля не требуется подключение к СЧПУ станка, что позволяет применять такую ИИС для контроля оборудования, не имеющего СЧПУ, а также не повышает категорию значимости объекта КИИ оборудования, имеющего СЧПУ;

– впервые разработан метод контроля технологической дисциплины с применением ИИС для ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств;

– разработан метод предиктивной аналитики состояния технологических систем с применением ИИС для ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств, отличающийся от известных тем, что из уровня вибрации в процессе обработки выделяются: постоянная составляющая, характеризующая параметры технологического процесса, высокочастотная составляющая, характеризующая состояние быстро изнашиваемой оснастки (инструмента), и низкочастотная составляющая, характеризующая изменение состояния оборудования, что позволяет построить ИИС, которая на основе одного датчика вибрации, расположенного в определенной точке оборудования, позволяет контролировать состояние технологической системы, производственную дисциплину и износ инструмента;

– впервые разработан метод назначения рациональных режимов обработки на основе контроля состояния технологических систем по данным косвенного контроля вибрации.

Теоретическая значимость работы заключается:

– в дальнейшем развитии методического подхода для усовершенствования перспективных информационно-измерительных и управляющих систем в области повышения эффективности эксплуатации технологических систем на основе оперативного косвенного контроля технологической дисциплины;

– в синтезе новой математической модели ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств.

Практическая значимость результатов работы определяется:

- их использованием в виде средств косвенного контроля и способа их установки при синтезе архитектуры ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств, что позволит осуществлять проектирование как системы в целом, так и ее отдельных блоков;

- применением предложенного метода обработки информации для ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств, что позволяет повысить эффективность их эксплуатации.

Реализация работы. Результаты работы внедрены: в АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева», г. Тула (акт б/н от 21.12.2021, акт №1/4075 от 20.02.2022, акт №30 от 05.02.2022, акт б/н от 15.12.2023), использовались ООО «Видис Групп» (акт б/н от 11.09.2024) и ООО «Вебер Комеханикс» (акт б/н от 30.04.2024) при внедрении инструмента и оборудования.

Методология и методы диссертационного исследования. Теоретические исследования базируются на теории математического моделирования, методов машинного обучения, выполнены с использованием научных основ технологии машиностроения, принципов системного подхода, математического программирования и теории исследования операций. Экспериментальные исследования проводились в действующем производстве на металлообрабатывающем оборудовании. При разработке программного обеспечения были применены подходы структурного проектирования программных систем и объектно-ориентированного программирования.

Положения, выносимые на защиту:

- средства косвенного контроля состояния технологических систем;
- результаты исследования вибрационного сигнала технологических систем;
- способ выбора места установки средств косвенного контроля состояния технологических систем;

- математическая модель ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств;

- архитектура и алгоритмы ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств;

- метод контроля технологической дисциплины с применением ИИС для ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств;

- метод предиктивной аналитики состояния технологических систем с применением ИИС для ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств;

- метод назначения рациональных режимов обработки на основе контроля состояния технологических систем по данным косвенного контроля вибрации;

- результаты апробация разработанной ИИС на основе косвенного контроля состояния технологической системы.

Степень достоверности результатов обеспечивается и подтверждается результатами апробации разработанных методов при решении практических задач создания и внедрения ИИС на предприятии для контроля состояния технологических систем.

Полученные в работе результаты и выводы характеризуются воспроизводимостью, обоснованы теоретическими положениями обработки информации, методами алгоритмического обеспечения функционирования систем мониторинга оборудования, которые согласуются с результатами известных отечественных и зарубежных исследований.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались на следующих конференциях: XXV Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, 2018 г.); XI Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2018 г.); Proceedings of 2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (Хо Ши Мин, Вьетнам, 2018 г.); III Международной научно-технической конференции «Mechanical science and technology update» (Проблемы машиноведения) (г. Омск, 2019 г.); Национальной заочной научно-технической конференции с международным участием «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» (г. Тула, 2019 г.); Международной научно-технической конференции «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники» (г. Брянск, 2020 г.); Международном научном симпозиуме технологов-машиностроителей «Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий» (п. Дивноморское, Краснодарский край, 2022 г.); ежегодном Международном молодежном промышленном форуме «Инженеры будущего» (г. Тула, 2022 и 2023 гг.); Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения лауреата Государственной премии СССР, доктора технических наук, профессора Дмитриева Льва Борисовича (г. Тула, 2023 г.); круглом столе в рамках выставки «Тульское качество»: «Перспективы развития Центра цифровых решений при инженерном центре Тульской торгово-промышленной палаты» (г. Тула, 2024 г.), XVI Международной научно-технической конференции «Наукоёмкие технологии машиностроения, авиации и транспорта» (г. Ростов-на-Дону и пос. Дивноморское, Краснодарский край, 2024 г.).

ИИС экспонировалась на III Конгрессе молодых ученых на стенде научных достижений Тульской области (федеральная территория «Сириус», 2023 г.).

За результаты, полученные в ходе диссертационного исследования соискатель удостоен премии им. С.И. Мосина в области научно-технических исследований и разработок в интересах обороны и безопасности страны за 2021 год (2022 г.) и премии В.А. Ревунова за значительные достижения в области радиоэлектроники по разработке и производству новых и модернизации находящихся в эксплуатации сложных конструкторских изделий специального назначения, а также за разработку и производство принципиально новых изделий гражданского назначения (2022 г.), награжден благодарностями: Губернатора Тульской области; генерального директора ГК «Ростех»; генерального директора АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева».

Работа выполнена в рамках акселератора ГК «Ростех» для технологических лидеров (2020 г.); гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук МД-4372.2022.4 «Интеллектуальная система эффективной эксплуатации лезвийных режущих инструментов

с учетом вариабельности процесса резания» (2022 – 2023 гг.); НИР шифр «Вибрация» (2020 – 2021 гг.), НИР шифр «Система» (2022 – 2023 гг.) АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева».

Личный вклад соискателя. Все основные результаты диссертационной работы получены автором лично. Автор диссертации принимал непосредственное участие в формулировании цели и задач исследования, в проведении теоретических и экспериментальных исследований. Соискатель, проанализировал существующие на рынке системы мониторинга оборудования с последующим формированием проблематики исследования; разработаны средства косвенного контроля состояния технологических систем, способ их установки, математическая модель ИИС, архитектура и алгоритм работы ИИС, методы обработки информации ИИС, сформированы предложения в части перспектив дальнейшего использования ИИС; разработаны алгоритм обработки экспериментальных данных. Принял непосредственное участие в экспериментах и внедрении результатов исследований.

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 27 научных работ, из них основных – 22 (2 единолично, остальные – в соавторстве), в том числе 8 статей в периодических изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 2 статьи в изданиях, индексируемых в информационно-аналитических системах научного цитирования Web of Science и Scopus, 1 монография, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и 1 патент на полезную модель.

В работах в соавторстве автору принадлежит не менее 80 % результатов.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения, списка литературы и приложений. Содержит 296 страниц машинописного текста, 50 таблиц, 157 рисунков, список литературы из 239 наименований и приложения на 121 странице. Общий объём диссертации – 417 страниц.

Автор выражает благодарность доктору технических наук Анцеву Александру Витальевичу за совместную многолетнюю продуктивную работу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены актуальность избранной темы, степень ее разработанности, цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первом разделе рассмотрены способы повышения эффективности технологических систем машиностроительных производств и проведен анализ ИИС (программных и аппаратно-программных комплексов) контроля состояния технологических систем.

Повышение эффективности эксплуатации технологических систем и эффективное управление машиностроительными производственными предприятиями – сложный процесс, требующий системного подхода и комплексных решений. При этом четко можно выделить следующие уровни контроля и управления: стратегический (стратегического планирования), тактический (управления ресурсами), оперативный (управления производственными процессами) и технологический

(управления технологическими процессами).

Для повышения эффективности эксплуатации технологических систем на машиностроительных производствах внедряют автоматизированные системы процессов контроля и управления различного уровня: OLAP (англ. OnLine Analytical Processing, интерактивная аналитическая обработка); CRM (англ. Customer Relationship Management, система управления взаимоотношениями с клиентами); ERP (англ. Enterprise Resource Planning, планирование ресурсов предприятия); MES (англ. Manufacturing Execution System, система управления производственными процессами); АСУТП (Автоматизированная система управления технологическим процессом).

В диссертационной работе рассмотрен уровень контроля и управления технологическими процессами – АСУТП, с формированием исходных данных для MES или ERP – систем, так как разрабатываемая интеллектуальная ИИС является системой класса MDC/MDA.

Под ИИС понимается совокупность функционально связанных устройств и программного обеспечения, которая реализует необходимое информационное обслуживание контролируемого объекта.

Проведен анализ и рассмотрены такие представленные на рынке ИИС, как АИС «Диспетчер», Foreman, Winnum CNC и другие. Отдельно оценено развитие ИИС иностранных компаний: Asset Monitor, CIMCO MDC-Max, Cybermonitor, Fadector, easyOEE, UltiMonitor, FactoryWiz Monitoring, IQMS, Kiwiplan, MachineMetrics Inc., Scytec, Multi-DNC, Predator MDC, FACTORYMINER, SkyMars, Shoplogix, NCSIMUL MONITOR, Shop Floor Data Collection. Для диагностики процесса резания и адаптивного управления режущим инструментом рассмотрены следующие ИИС: Omative, Montronix, Marposs, Prometec, SKF.

Проведенный анализ современных подходов и методов контроля состояния технологических систем, а также используемых для этого решений, позволил выделить их недостатки:

- аналоги, осуществляющие контроль состояния технологических систем в целом, не обеспечивают косвенный контроль состояния используемого инструмента;
- необходимость подключения ИИС к СЧПУ объектов КИИ требует повышения категории объекта КИИ и увеличения издержек предприятия;
- отсутствуют универсальные решения прогнозирования состояния технологической системы, в том числе с помощью применения методов ИНС;
- недостаточно проработан инструментарий контроля и управления технологических процессов в режиме реального времени;
- высокая стоимость внедрения.

Исходя из выявленных недостатков существующих на данный момент решений были сформулированы требования к разрабатываемой ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем:

- отображение состояния технологической системы в процессе обработки оператору в режиме реального времени;
- возможность подключения оборудования к ИИС без изменения категории объекта КИИ;
- возможность трансформации ИИС как в систему адаптивного управления,

так и в платформу IoT;

– малозатратная и быстроисполнимая масштабируемость решения на однотипное станочное оборудование предприятия (или группы предприятий), не оснащенное модулями сбора информации, за счет построения единого информационного пространства, позволяющего распространять полученные рекомендации по оптимизации технологических процессов технологических систем на аналогичное оборудование участка или цеха;

– возможность подключения дополнительных модулей сбора информации, контролирующих различные параметры процесса обработки.

На основании вышеизложенного подтверждена актуальность диссертационного исследования, определена цель работы и сформулированы задачи исследования.

Второй раздел посвящен разработке устройств сбора информации на основе вибросигнала, включающей в себя анализ вибрационного сигнала, создаваемого работой технологического оборудования, разработку датчиков вибрации, датчика тока, способа установки разработанных датчиков.

Были разработаны два варианта датчиков вибрации: беспроводной и проводной, при этом во время работы было предложено несколько поколений датчиков, учитывающих опыт эксплуатации в реальных производственных условиях.

Беспроводные датчики (рисунок 1) предназначены для размещения на обрабатываемых заготовках или подвижных частях технологической системы; проводные датчики (рисунок 2) размещаются на неподвижных частях технологической системы.

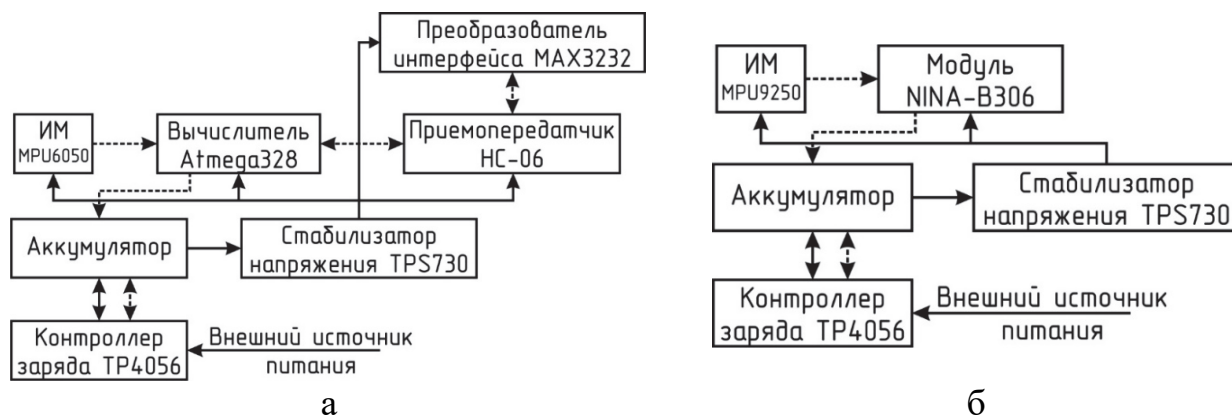


Рисунок 1 – Варианты беспроводного датчика:

а – структурная схема датчика вибрации первого поколения;

б – структурная схема датчика вибрации второго поколения

Состав вычислительного узла беспроводного датчика (рисунок 2, а) можно разделить на две основные части: первая – преобразование энергии осуществляется контроллером заряда, аккумулятором, стабилизатором напряжения; вторая – преобразование информации осуществляется измерительным модулем MPU6050, вычислителем, приемопередатчиком, преобразователем интерфейса.

Состав вычислительного узла беспроводного датчика вибрации второго поколения представлен в виде структурной схемы на рисунке 1, б.

Третье поколение датчика вибрации (рисунок 2, а) устанавливается на непо-

движные части станка и не имеет в своем составе контроллера заряда и аккумуляторной батареи, так как питание подводится с помощью проводов, а модуль беспроводной связи заменяется на интерфейсный модуль, обеспечивающий передачу данных по стандарту RS-232. В остальном принцип работы аналогичен рассмотренным ранее беспроводным датчикам.



Рисунок 2 – Проводные датчики:

а – структурная схема датчика вибрации третьего поколения;

б – структурная схема датчика тока

Также разработан и предложен для использования в ИИС вариант исполнения датчика для контроля тока (рисунок 2, б).

В диссертационном исследовании разработан способ установки датчиков вибрации и тока. Стоит отметить, что вопросы размещения датчиков вибрации при токарной обработке ранее рассматривались в работах А.В. Анцева и Ч. Данга.

Проведены исследования по определению мест установки датчиков вибрации ИИС и работы по изучению с их помощью вибродинамических характеристик фрезерных и раскатно-деформирующих станков для подтверждения достоверности полученных данных о состоянии технологических систем.

Разработанный способ выбора места установки датчика вибрации и оценки вибродинамических характеристик фрезерного оборудования рассмотрен на примере фрезерного станка BRIDGEPORT модель Hardinge GX 600.

Измерение вибрации проводилось анализатором вибрации «АГАТ-М». Использовался вариант вибродиагностики по нескольким уровням: диагностика по общему уровню параметров вибрации; спектральный анализ.

Акселерометр AC-102 (канал А) анализатора вибрации «АГАТ-М» располагался в ключевых точках станка (рисунок 3) путем поочередной установки датчика на магните в вертикальном, горизонтальном и осевом направлениях в соответствии с действующей нормативной базой (ГОСТ ИСО 10816-3-99), а именно: т.1п – двигатель в поперечном направлении; т.2в – задняя опора шпинделя в вертикальном направлении; т.3в – шпиндель в вертикальном направлении; т.3п – шпиндель в продольном направлении; т.4о – суппорт в осевом направлении; т.4в – суппорт в вертикальном направлении; т.4п – суппорт в продольном направлении.

В процессе исследования измерялись следующие представления вибрационного сигнала:

- спектры виброскорости в диапазоне от 2 до 5 000 Гц;
- спектры виброускорения в диапазоне от 2 до 10 000 Гц.

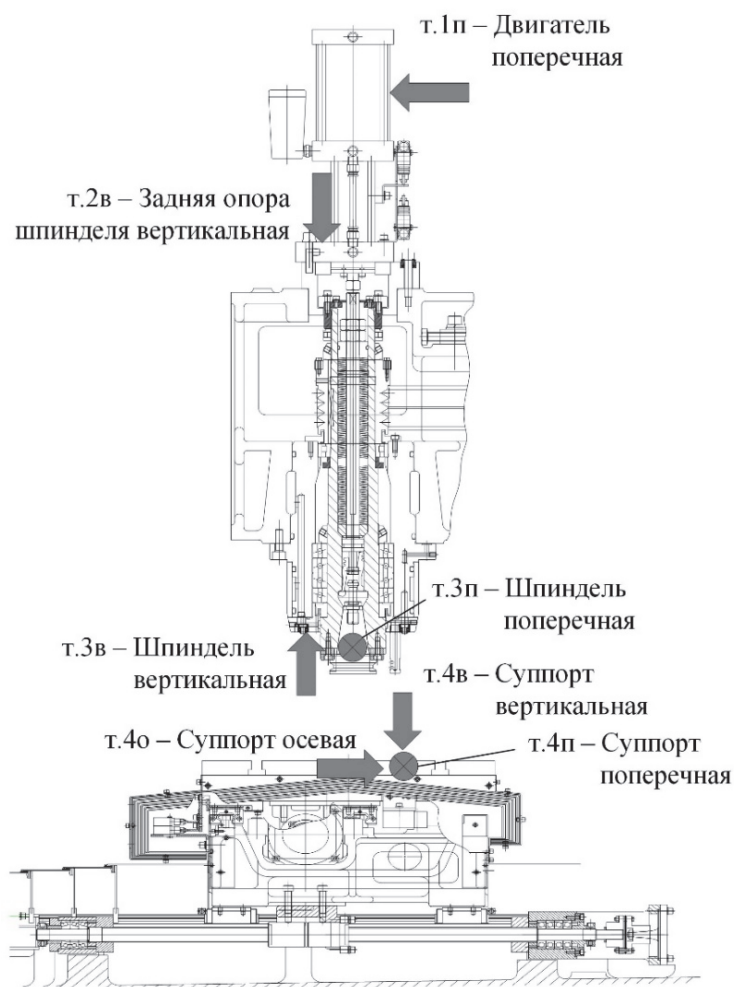


Рисунок 3 – Схема размещения акселерометра AC-102 на фрезерном станке Hardinge GX 600

Собранная информация о вибрации технологических систем с целью хранения истории технического состояния технических систем и их отдельных элементов, а также получения этой информации за необходимый период времени записывается в информационный объект – вибропаспорт. В данной работе под вибропаспортом системы СПИЗ понимается информационный объект, содержащий информацию об уровне вибрации системы СПИЗ в процессе обработки за исследуемый период времени на разных уровнях анализа (диагностика по общему уровню параметров вибрации; спектральный анализ).

В случае диагностики по общему уровню параметров вибрации критерии работы оборудования полностью ориентированы на нормативные уровни вибрации, соответствующие определенному элементу. При этом превышение принятой нормы уровня вибрации

может свидетельствовать о дефекте соответствующего элемента.

Результаты измерения виброскорости в полосе от 2 до 5 000 Гц в процессе обработки представлены в таблице 1, а результаты измерения виброускорения в полосе от 10 до 10 000 Гц – в таблице 2.

Таблица 1 – Результаты измерения виброскорости в полосе от 2 до 5 000 Гц

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	Нормы вибрации, мм/сек
Вертикальная	—	0,2	0,2	0,1	Зона А – до 2,3 мм/сек
Поперечная	0,4	—	0,1	0,1	Зона В – до 4,5 мм/сек
					Зона С – до 7,1 мм/сек
Осевая	—	—	—	2,7	Зона D – свыше 7,1 мм/сек

Анализ измеренных значений виброскорости в выбранных точках замера показывает, что данный параметр не может использоваться в качестве устойчивого диагностического признака в процессе работы технологического оборудования, так как обладает низкой чувствительностью и способен зарегистрировать лишь последнюю стадию развития дефектов рассматриваемых узлов и не дает возможности достовер-

ной оценки места установки датчика вибрации диагностического модуля. Спектрограммы виброскорости используются при мониторинге развитых повреждений.

Таблица 2 – Результаты измерения виброускорения в полосе от 10 до 10 000 Гц

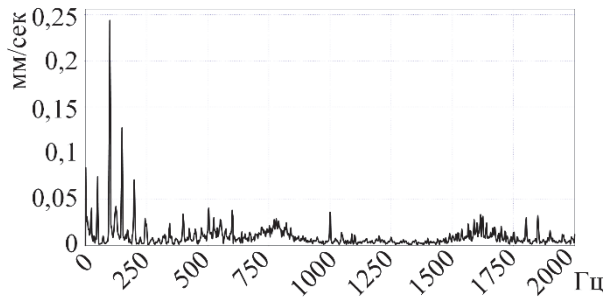
Режим работы	Точка замера / направление замера	1	2	3	4	Нормы вибрации, м/с ²	
На холостом ходу	вертикальное	—	1,8	1,1	0,1	10	20
	поперечное	3,1	—	1,5	0,1		
	осевое	—	—	—	0,1		
Под нагрузкой	вертикальное	—	2,0	2,3	0,1		
	поперечное	3,2	—	2,0	0,1		
	осевое	—	—	—	0,2		

Анализ измеренных значений виброускорения в выбранных точках замера показывает, что данный параметр информативней виброскорости и может использоваться в качестве устойчивого диагностического признака в процессе работы технологического оборудования. Увеличение уровня виброускорения под нагрузкой (в процессе обработки) также позволяет косвенно контролировать силу резания для оценки состояния режущего инструмента.

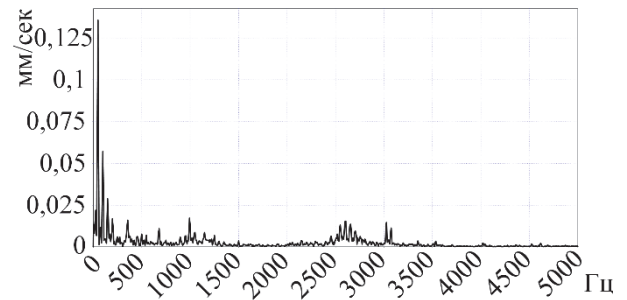
Из таблицы 2 видно, что максимальный уровень вибрации наблюдается в точке 1п. Но в этой точке происходит наложение вибраций из разных источников (процесс резания, работа электродвигателя, помехи различного вида и т. д.), поэтому сложнее выделить составляющую вибрационного сигнала, характеризующую работу оборудования непосредственно в процессе обработки. При этом распространение вибросигнала от инструмента по узлам станка достаточно хорошо локализуется по всей сцепке двигателя и шпинделя. Вибросигнал без затухания хорошо регистрируется в точке 2в. Уровни вибрации в процессе обработки в точках 2в и 3 находятся на одном уровне, но размещение датчика вибрации в точке 2в является более предпочтительным, так как обеспечивает защиту датчика от воздействий со стороны стружки, СОЖ или оператора. При прохождении через упругие элементы станка уровень вибрации сильно ослабляется, поэтому расположение датчика в точке 4 нецелесообразно.

Информация с датчика, установленного в соответствии с разработанным способом, может, кроме диагностики по общему уровню, позволять проводить анализ состояния узлов оборудования. Для уточнения состояния узлов оборудования и процесса обработки использован спектральный анализ вибрационных параметров. На рисунке 4 по рассматриваемому фрезерному станку представлены спектры виброскорости, а на рисунке 5 – виброускорения.

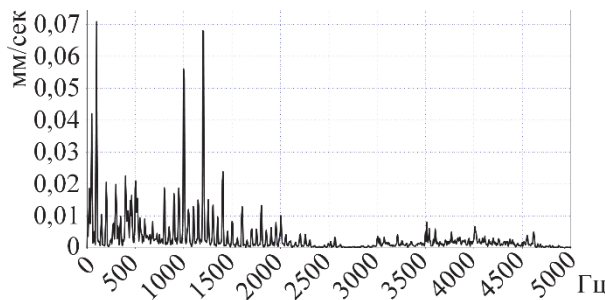
Анализ спектрограмм виброускорения позволяет идентифицировать нестабильность работы оборудования на ранней стадии. При спектральном анализе кроме частоты колебаний учитывают значение амплитуды на данной частоте. Для анализа вибрационного спектра выделяют основные составляющие спектрального сигнала: оборотная частота, субгармоники, резонансные частоты, негармонические колебания, зубцовые частоты, боковые полосы, вибрации электрического происхождения и шумовые составляющие, возникающие при заеданиях, механических контактах.



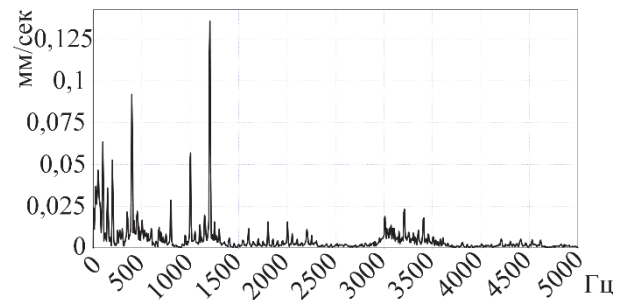
а



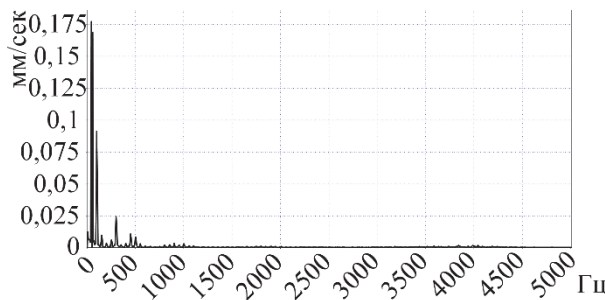
б



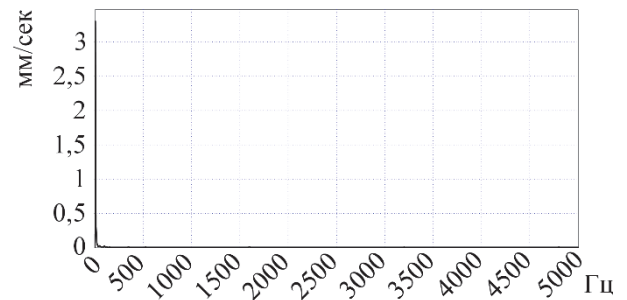
в



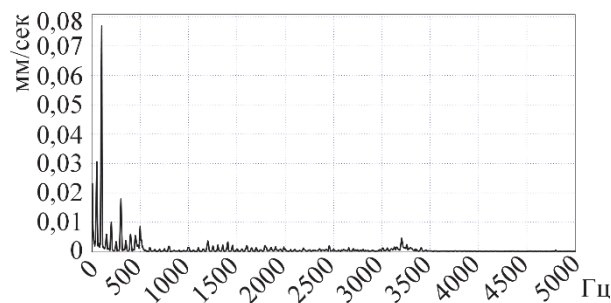
г



д



е



ж

Рисунок 4 – Спектр виброскорости в ключевых точках станка:
а – 1п, б – 2в; в – 3п; г – 3в; д – 4п; е – 4о; ж – 4в

Видно, что диагностика по спектрам вибросигналов позволяет выявить большое количество дефектов оборудования. Во многих случаях методом можно диагностировать дефекты агрегатов с середины второго этапа развития, когда уровень энергии резонансных колебаний заметен в общей картине частотного распределения всей мощности вибросигнала. Анализ спектра виброускорения в ключевых точках станка подтвердил, что размещение датчика вибрации в точке 2 является более предпочтительным.

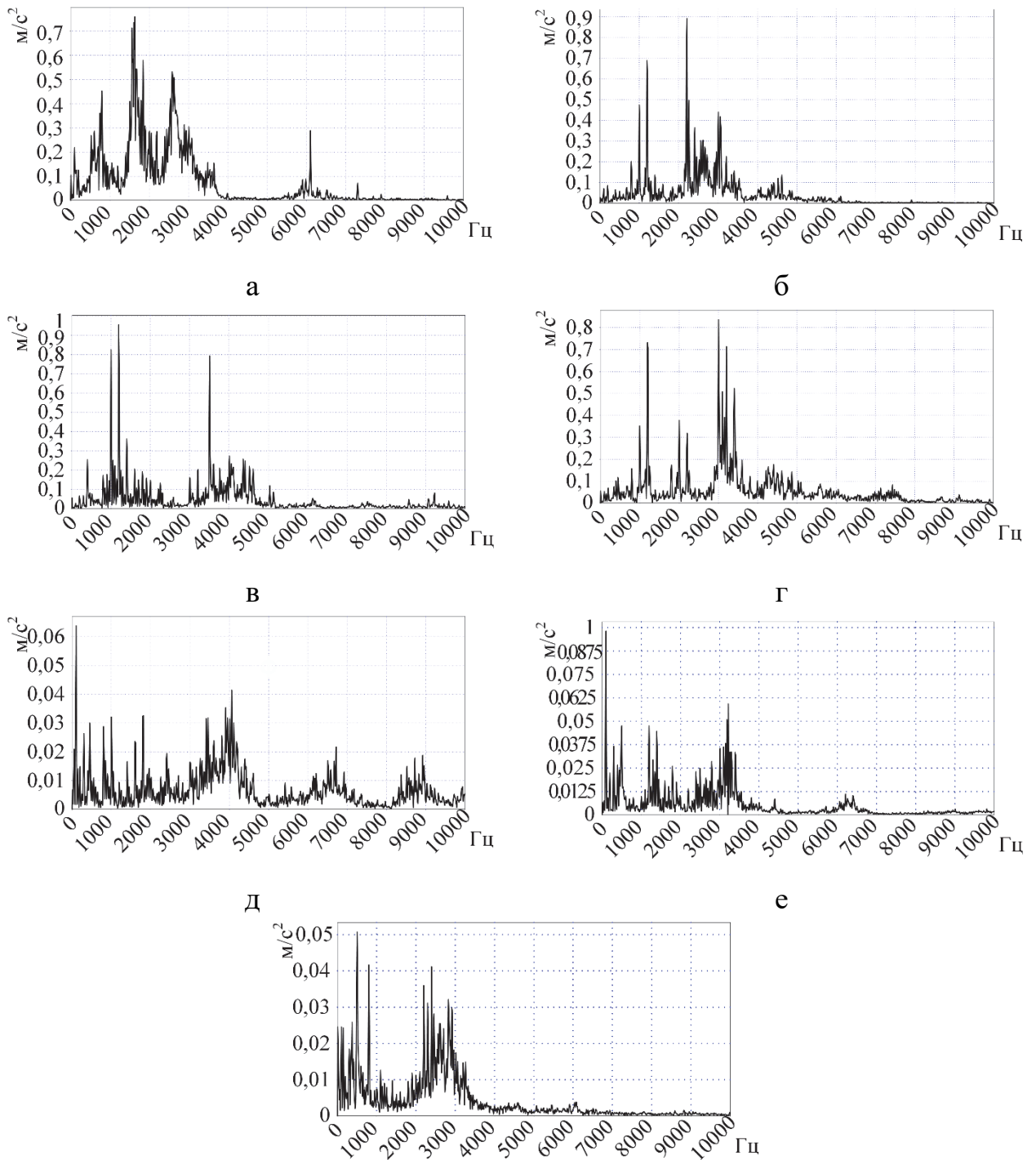


Рисунок 5 – Спектр виброускорения в ключевых точках станка:
а – 1п, б – 2в; в – 3п; г – 3в; д – 4п; е – 4о; ж – 4в

Частотный диапазон до 100 Гц позволяет вести контроль загрузки станков и в диагностических целях определять дисбалансы (диагностический признак – доминирующая оборотная частота) и механические ослабления суппорта (диагностический признак – гармоники, кратные оборотной частоте). Датчики на основе МЭМС–акселерометра не позволяют в полной мере контролировать дефекты подшипников качения (необходимый диапазон от 8 000 до 16 000 Гц), дефекты подшипников качения приводного двигателя (необходимый диапазон от 20 до 400 Гц)

и дефекты электромагнитной системы электродвигателей (необходимый диапазон от 800 до 3 000 Гц).

Аналогичные работы были проведены для раскатно-деформирующего оборудования.

В работе предложен вариант объединения различных датчиков, используемых в разрабатываемой ИИС для сбора информации о состоянии технологической системы (рисунок 6) в систему сбора информации (диагностический модуль), в которую входят: панель оператора, датчик вибрации, датчик тока, датчик температуры и влажности (опционально), датчик углекислого газа (опционально).



Рисунок 6 – Структура диагностического модуля

Разработанный датчик вибрации позволяет вести контроль состояния технологических систем и в диагностических целях определять дисбалансы (диагностический признак – доминирующая оборотная частота) и механические ослабления суппорта (диагностический признак – гармоники, кратные оборотной частоте), фиксировать нарушения в нормальном функционировании технологической системы, а также сигнализировать о необходимости детального обследования оборудования.

Собранные с помощью MEMS-акселерометра сигналы проходят ряд обработок для их преобразования в удобный для анализа вид:

- 1) удаление влияния ускорения свободного падения;
- 2) компенсация смещения нуля акселерометра;
- 3) перевод «сырых» данных акселерометра в виброускорение;
- 4) выделение части сигнала, соответствующего работе оборудования.

Первоначальная обработка исходного сигнала состоит в удалении из него ускорения свободного падения g , постоянно влияющего на MEMS-акселерометры. В простейшем случае датчик расположен неподвижно и одна из его осей (например, ось Z) расположена параллельно вектору ускорения свобод-

ного падения. Такое размещение датчика возможно на державке резца в револьверной головке, на задней бабке и на станине станка. В этом случае колебания технологической системы с учетом ускорения свободного падения могут быть пересчитаны из показаний датчика следующим образом:

$$a_x' = a_x; a_y' = a_y; a_z' = a_z - g,$$

где a_x, a_y, a_z – показания акселерометра по соответствующим осям, a_x', a_y', a_z' – колебания технологической системы.

Смещение нуля акселерометра в зависимости от условий можно разложить на составляющие по следующей модели, рассмотренной в работе Н.К. Нгуена:

$$\Delta a_{\text{см}} = \Delta a_{\text{Т.сист}} + \Delta a_{\text{хр}} + \Delta a_{\text{т}} + \Delta a_{\text{нестаб}},$$

где $\Delta a_{\text{Т.сист}}$ – систематическая составляющая смещения нуля, зависящая от температуры; $\Delta a_{\text{хр}}$ – изменяющаяся от времени хранения систематическая составляющая смещения нуля; $\Delta a_{\text{т}}$ – систематическая составляющая смещения нуля, зависящая от времени с момента включения при неизменных внешних условиях; $\Delta a_{\text{нестаб}}$ – нестабильность смещения нуля от включения к включению.

В условиях рассматриваемой задачи всеми составляющими смещения нуля можно пренебречь, кроме $\Delta a_{\text{Т.сист}}$, поэтому колебания технологической системы по всем осям с учетом смещения нуля могут быть пересчитаны из показаний датчика следующим образом:

$$a'' = a' - \Delta a_{\text{Т.сист}},$$

где a' – колебание технологической системы, полученное после учета ускорения свободного падения.

MEMS-акселерометр MPU6050 позволяет получить значение виброускорения в диапазонах $\pm 2 g, \pm 4 g, \pm 8 g$ и $\pm 16 g$ в зависимости от настройки после включения. По каждой оси вне зависимости от диапазона измерения датчик выдает 16-битное знаковое значение от -32768 до 32767. Перевод «сырых» данных в величину СИ (м/с^2) осуществляется следующим образом:

$$a''' = \frac{a'' \cdot a_{\text{max}} \cdot g}{2^{15}},$$

где a_{max} – максимальное значение виброускорения в g в зависимости от диапазона измерения; g – ускорение свободного падения, $9,80665 \text{ м/с}^2$.

Из преобразованных таким образом данных можно выделить часть сигнала, соответствующую работе оборудования. Для этого назначается пороговый уровень виброускорения $a_{\text{порог}}$, превышение которого соответствует эксплуатации технологического оборудования по назначению. В результате все значения виброускорения, превышающие пороговый уровень из всего множества записанных сигналов \mathbf{A} , $\forall a \in \mathbf{A}, a \geq a_{\text{порог}}$, соответствуют работе оборудования.

Полученная со всех датчиков информация хранится на сервере и может быть визуализирована как последовательность рисунков, характеризующих состояние технологической системы за отчетный или рассматриваемый период времени.

Также вышеуказанная информация является источником для определения:
– коэффициента загрузки оборудования:

$$k_{\text{загр}} = \frac{|\{a \in \mathbf{A} \mid a \geq a_{\text{порог}}\}|}{|\mathbf{A}|}, \quad (1)$$

где $|\mathbf{A}|$ – мощность множества записанных сигналов \mathbf{A} , т. е. число элементов множества, $|\{a \in \mathbf{A} \mid a \geq a_{\text{порог}}\}|$ – число элементов множества \mathbf{A} , соответствующих работе оборудования;

– количества обработанных заготовок (подсчитывается визуально по сформированным отчетам);

– номенклатуры обработанных заготовок (оценивается визуально по сформированным отчетам);

– ритмичности работы оборудования, которая в условиях поточного производства измеряется средним линейным или квадратическим отклонением от расчётного темпа работы оборудования или коэффициентом вариации темпа:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n}}; \theta = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})}{n}; V = \frac{\sigma}{\bar{t}},$$

где $t = 1/r$ – фактический темп работы оборудования, $r = \Phi_{\text{п}} / Q$ – такт работы оборудования, мин/шт., $\Phi_{\text{п}}$ – полезный фонд времени работы оборудования за определенный период, мин, Q – производственная программа линии за этот же период, шт., \bar{t} – расчетный темп работы оборудования, n – число наблюдений, θ – среднее линейное отклонение темпа, V – коэффициент вариации темпа, σ – среднее квадратическое отклонение темпа.

В условиях серийного и индивидуального выпуска продукции, где объект изготовления меняется, ритмичность работы оборудования означает выполнение одинакового объема хотя и разных по содержанию работ в равные промежутки времени и измеряется степенью соответствия фактического выпуска установленному графику изготовления продукции:

$$K_p = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n \Pi_i}, \quad (2)$$

где K_p – коэффициент ритмичности, O_i – отрицательные отклонения фактического выпуска от планового в i -м периоде (недовыполнение плана по периоду), Π_i – плановые задания на i -й период, n – количество анализируемых периодов.

Третий раздел посвящен принципам построения ИИС косвенного контроля, включающим в себя разработку математической модели ИИС, архитектуры ИИС и алгоритма ее функционирования.

Разработанная ИИС представляет собой сложную ИИС, в описание которой, в общем случае, включен объект исследования (ОИ) с учётом влияющих на него

управляющих воздействий, а также возмущений. Способ математического описания таких систем – метод пространства состояний, подразумевающий представление совокупности сигналов на выходе ОИ в виде набора координат точки в пространстве с размерностью, равной числу этих сигналов (фазовом пространстве). Такое представление позволяет не только работать с набором значений выходных сигналов ОИ на заданный момент времени, но и оценить динамику состояния и работы системы, в том числе устойчивости работы системы в различных режимах и при различных видах и комбинациях управляющих воздействий.

По траекториям в фазовом пространстве и их постепенному изменению можно также судить о накапливающихся изменениях в работе, износе оборудования и других показателях, характеризующих функционирование системы в течении достаточно долгого времени.

Формально структура разработанной ИИС представлена на рисунке 7.

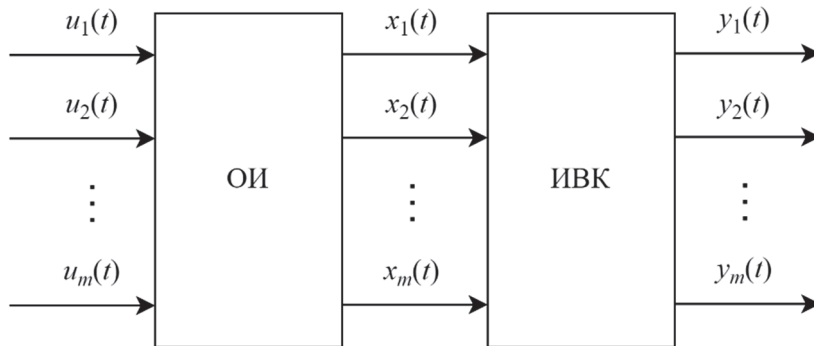


Рисунок 7 – Формальная структура ИИС

Элементами ИИС являются ОИ и измерительно-вычислительный комплекс (ИВК), где входные управляющие воздействия и возмущения описываются функциями времени $u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)$. Выходные сигналы ИИС описываются функциями $y_1(t), y_2(t), \dots, y_l(t)$.

Для описания траектории ОИ в фазовом пространстве использовано линейное приближение. Матричная форма системы уравнений имеет вид:

$$\dot{X} = AX + BU, \quad (3)$$

где $X = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix}$ – вектор состояний ОИ, $U = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ \vdots \\ u_m(t) \end{bmatrix}$ – вектор входных воздействий

и возмущений, $A = [a_{ik}]$ – матрица связей между фазовыми координатами (квадратная, размера $n \times n$), $B = [b_{ik}]$ – матрица входных воздействий и возмущений (прямоугольная, размера $n \times m$).

Далее для завершения описания ИИС составлены уравнения связи фазовых координат ОИ и выходных сигналов ИИС. В рамках линейного приближения запишем эти уравнения в матричном виде:

$$Y = CX, \quad (4)$$

где $Y = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ \vdots \\ y_l(t) \end{bmatrix}$ – вектор выходных сигналов системы.

Решение неоднородного векторно-матричного дифференциального уравнения (3) в общем случае можно получить, используя метод Лапласа. При этом решение получается в виде:

$$X(t) = e^{At} X(t_0) + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)} BU(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где $X(t_0)$ – вектор состояния ОИ в начальный момент времени t_0 .

При отсутствии внешних воздействий и возмущений или при абстрагировании от них ($u_i(t) \equiv 0, i=1, \dots, m$) уравнение (3) становится однородным, в этом случае оно описывает собственные свойства ОИ. Его общее решение:

$$X_h(t) = e^{At} X(t_0) = \Phi(t) X(t_0), \quad (6)$$

где $X_h(t) = e^{At} X(t_0) = \Phi(t) X(t_0)$, здесь $\Phi(t)$ – фундаментальная матрица ОИ. В явной форме уравнение (6) записывается в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} x_1^{(h)}(t, t_0) \\ \vdots \\ x_n^{(h)}(t, t_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{11}(t) & \cdots & \varphi_{1n}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{n1}(t) & \cdots & \varphi_{nn}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t_0) \\ \vdots \\ x_n(t_0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

или

$$x_i^{(h)}(t, t_0) = \sum_{k=1}^n \varphi_{ik}(t) x_k(t_0), \quad i=1, \dots, n. \quad (8)$$

Элементы фундаментальной матрицы $\varphi_{ik}(t)$ описывают реакцию i -й фазовой координаты при $x_i(t_0) = 1, x_j(t_0) = 0, j \neq i$.

Структура ИИС косвенного контроля состояния технологической системы, разработанная на основе формальной структуры ИИС, представлена на рисунке 8.

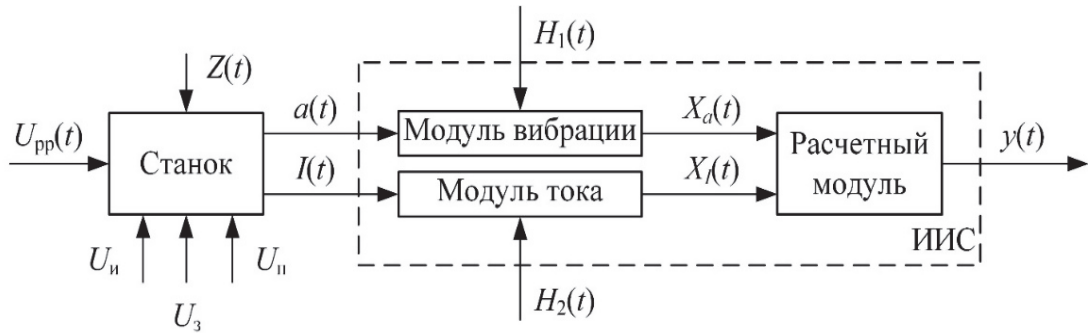


Рисунок 8 – Структура ИИС косвенного контроля состояния технологической системы

На рисунке 8 приняты следующие обозначения: $U_{И}$ – вектор параметров инструмента; U_3 – вектор параметров заготовки; $U_{П}$ – вектор параметров приспособления; $U_{рр}(t)$ – векторная функция времени режимов резания; $Z(t)$ – различные возмущающие факторы; $a(t) = f_1(U_{рр}(t), U_{И}, U_3, U_{П}, Z(t))$ – уровень вибрации в зоне

обработки; $I(t) = f_2(U_{pp}(t), U_{и}, U_3, U_{п}, Z(t))$ – уровень потребления оборудованием электрического тока; $X_a(t) = \frac{(a_a(t) - g - \Delta a_{см}) \cdot a_{max} \cdot g}{2^{d-1}} + H_1(t)$ – сигнал виброускорения, где $a_a(t)$ – «сырые» значения уровня вибрации, g – ускорение свободного падения, $\Delta a_{см}$ – смещение нуля акселерометра, a_{max} – диапазон измерения акселерометра, d – разрядность АЦП акселерометра, $H_1(t)$ – вектор внешних и внутренних помех измерения; $X_I(t) = k \cdot \frac{U_{изм}(t) - U_{см}}{R} + H_2(t)$ – сигнал тока, где k – коэффициент трансформации трансформатора тока, $U_{изм}(t)$ – напряжение, измеренное на АЦП модуля тока, $U_{см}$ – величина постоянного напряжения, добавляемого к напряжению $U_{изм}(t)$ на АЦП, R – сопротивление нагрузочного резистора, $H_2(t)$ – вектор внешних и внутренних помех измерения; $y(t) = f(X_a(t), X_I(t))$ – выходной сигнал ИИС.

Архитектура типовых ИИС контроля работы оборудования представлена на рисунке 9, а. Такие ИИС требуют подключения к СЧПУ, что повышает категоричность объектов КИИ.

Архитектура разработанной ИИС представлена на рисунке 9, б. В разработанной ИИС применяется косвенный контроль состояния технологических систем на основе анализа уровня вибрации оборудования, не требующий подключения к СЧПУ.

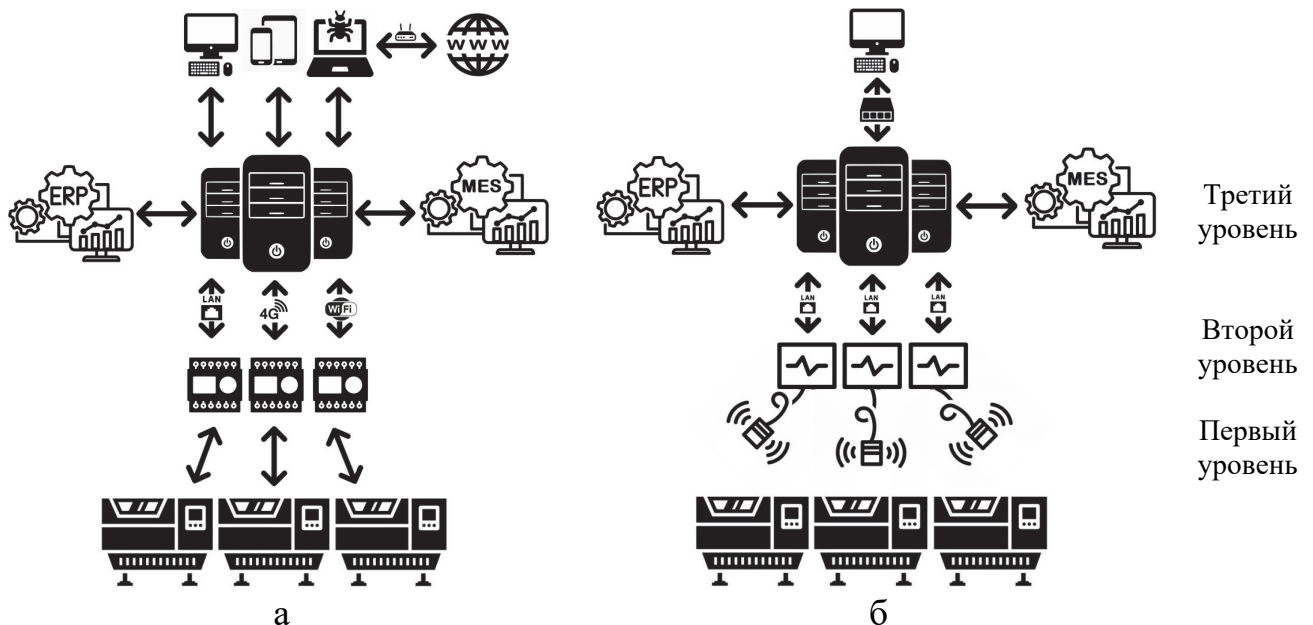


Рисунок 9 – Архитектура ИИС:
а – типовая ИИС; б – разработанная ИИС

Разработанная ИИС с централизованным управлением представляет собой многофункциональную многоуровневую структуру, включающую в себя:

- первый уровень – различные датчики;
- второй уровень – устройство сбора и передачи данных, технические средства

приёма-передачи данных, каналы связи;

– третий уровень – сервер сбора и хранения баз данных, устройство синхронизации системного времени, автоматизированные рабочие места, каналообразующую аппаратуру, средства связи и приёма-передачи данных.

Структурная схема разработанной ИИС приведена на рисунке 10. В состав ИИС входят сервер, панель оператора и диагностические модули сбора информации различных поколений. К одному серверу может быть подключено несколько диагностических модулей.

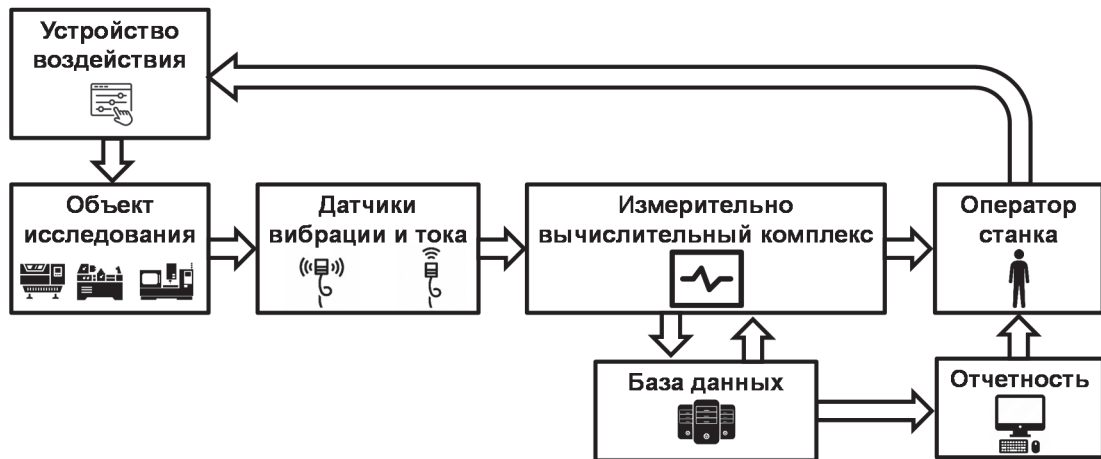


Рисунок 10 – Схема ИИС

Сервер предназначен для сбора, хранения и обработки информации, собираемой и передаваемой с помощью диагностических модулей. На сервере ИИС установлено следующее программное обеспечение: система управления базами данных PostgreSQL (стандартная); программа сбора данных диагностических модулей SPKServer (разработанная); программа взаимодействия с оператором TCPServer (разработанная); программа генерации отчетов SPK-Python (разработанная); веб-сервер IIS (стандартная); веб-интерфейс для просмотра отчетов (разработанный); сторожевой таймер ServerApp (разработанный).

Панель оператора организует сбор данных о фактическом состоянии технологической системы и представляет собой интерфейс для управления диагностическим модулем, просмотра собранных данных в режиме реального времени, отображения прогнозируемого ресурса режущего инструмента и рекомендуемых режимов резания. Также она может использоваться без подключения диагностического модуля, в этом случае можно просматривать ранее записанные данные и получать рекомендуемые режимы резания на основе предыдущей эксплуатации диагностического модуля либо информации, собираемой на других станках цеха при производстве аналогичной продукции.

Панели оператора подключаются к серверу с помощью проводной локальной сети. Один сервер может обслуживать панели оператора целого цеха или всего предприятия. Для организации локальной сети использованы маршрутизаторы, не входящие в состав ИИС, а также витая пара категории «5е» при организации проводной локальной сети.

Для разработанной ИИС был предложен алгоритм функционирования, представленный на рисунке 11.

Данные (блок 2) косвенного контроля работы технологического оборудования собираются диагностическим модулем (вибрация, ток, температура, влажность и концентрация углекислого газа) и передаются на панель оператора для визуализации и передачи на сервер (блок 3, блок 4, блок 5). Для передачи данных от диагностического модуля используются протоколы через интерфейс RS-232 и Modbus RTU через интерфейс RS-485. Собранные данные телеметрии передаются панелью оператора с помощью разработанного текстового протокола с использованием транспортного протокола UDP по сети Ethernet на сервер. На сервере данные принимаются написанным на языке C# программным модулем SPKServer, проходят предварительную обработку и сохраняются в СУБД PostgreSQL по протоколу PostgreSQL версии 3.0 через соединения по TCP/IP с использованием TCP-порта 5432.

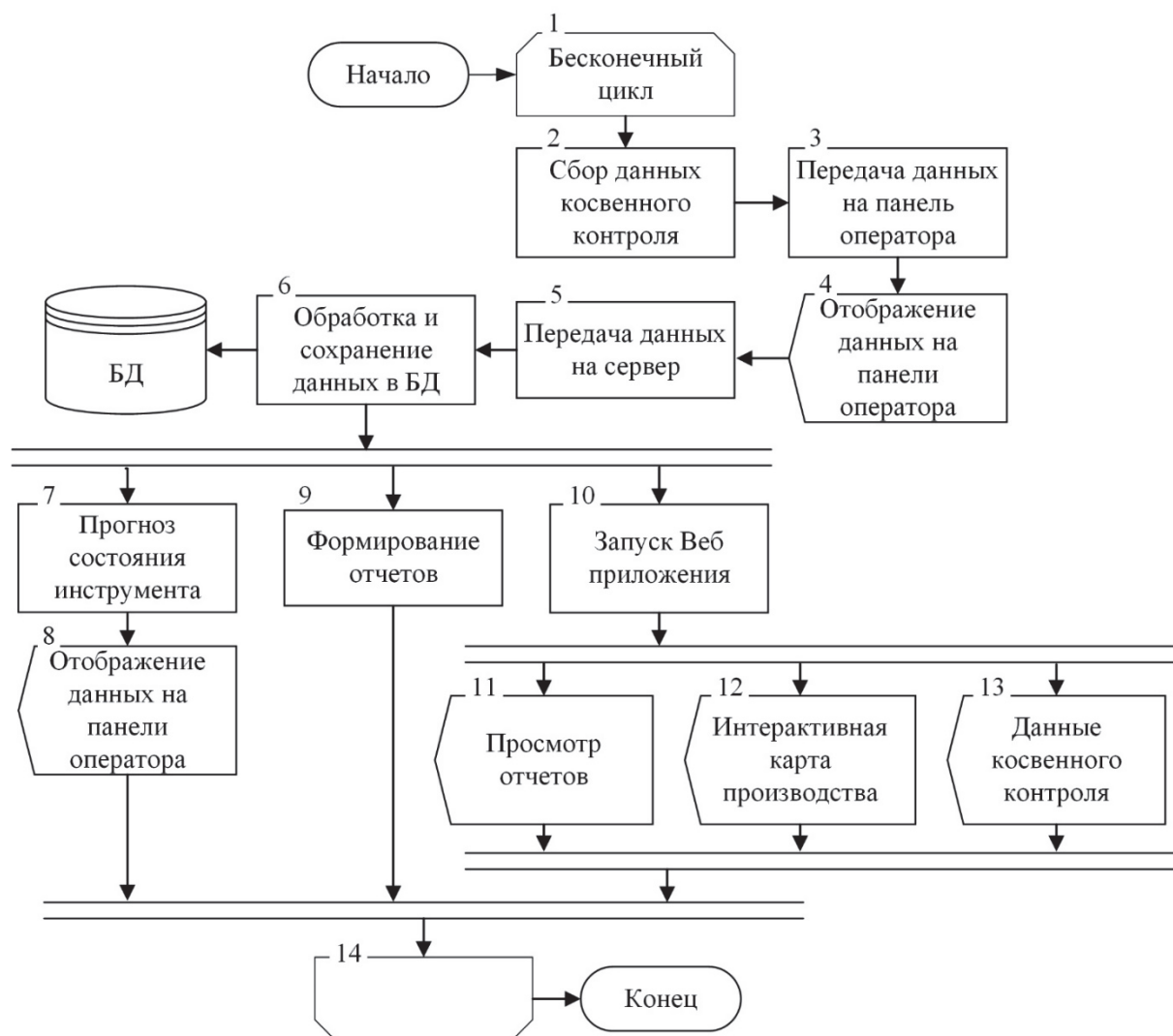


Рисунок 11 – Укрупненный алгоритм ИИС

Данные на сервере обрабатываются (блок 6) и используются для решения задачи формирования прогноза состояния инструмента (блок 7) с последующим его отображением на панели оператора (блок 8).

С помощью программного модуля SPK-Python, написанного на языке Python, проводится анализ сохраненных в СУБД PostgreSQL данных косвенного контроля работы оборудования и формируются суточные, недельные и месячные отчеты о

работе оборудования (Блок 9). Сформированные отчеты сохраняются в специальную локальную папку Reports на сервере, а также данные из отчетов сохраняются в СУБД PostgreSQL.

С помощью веб-сервера IIS (блок 10) пользователям предоставляется возможность взаимодействия с веб-приложением MachineControl, написанным на языке C# и обеспечивающим просмотр интерактивной карты производства, отчетов о работе оборудования, данных о вибрации в режиме реального времени, регистрацию пользователей системы, с автоматизированных рабочих мест пользователей ИИС (блоки 11-13). Веб-сервер IIS для своей работы использует протокол HTTPS. Вспомогательный веб-сервер http.server, написанный на языке Python, предназначен для передачи отчетов из локальной папки Reports по запросам пользователей веб-приложения MachineControl по протоколу HTTP.

Кроме данных телеметрии на панели оператора реализована возможность взаимодействия с оператором станка для указания причин простоя оборудования и просмотра прогноза износа режущего инструмента. Для этого панель оператора обменивается данными с сервером с помощью разработанного текстового протокола с использованием транспортного протокола TCP по сети Ethernet. На сервере данные принимаются написанным на языке C# программным модулем TCPServer и сохраняются и читаются из СУБД.

Разработанная интеллектуальная ИИС является сложной системой, в которой периодически могут возникать различные неисправности вследствие ошибок, зависаний и других сбоев (в том числе аппаратных). При этом ИИС обладает высокой восстанавливаемостью, то есть способностью восстанавливаться после отказа без ремонта (ГОСТ Р 27.102-2021). Для этого часто достаточно просто перезапустить отказавший компонент. WatchDog осуществляет своевременный перезапуск зависшей части ИИС с целью восстановления ее работоспособности. Применение такого решения позволило существенно повысить наработку ИИС путем обеспечения ее самовосстановления.

В четвертом разделе разработаны методы обработки информационного сигнала в ИИС, включающие в себя: разработку метода контроля технологической дисциплины на основе отчетов о работе оборудования по анализу их вибросигнала с использованием ИНС и метода предиктивной аналитики состояния технологической системы.

Разработанная ИИС предоставляет возможность пользователю получить информацию о работе интересующей его технологической системы, формируя суточные, недельные и месячные отчеты. При этом пользователь может просмотреть отчет за любой день с момента подключения оборудования к ИИС, так как формирование отчетов происходит в автоматическом режиме каждые 24 часа (рисунок 12).

Для соблюдения требований информационной безопасности реальная планировка участка, подключенного к ИИС, заменена схематичным отображением оборудования, при этом функционал веб-приложения сохранен в полном объеме.

Сформированный отчет открывается в соседней вкладке веб-браузера, с которого осуществляется работа с веб-предложением, имеет формат .pdf, и может быть сохранен на компьютере пользователя.

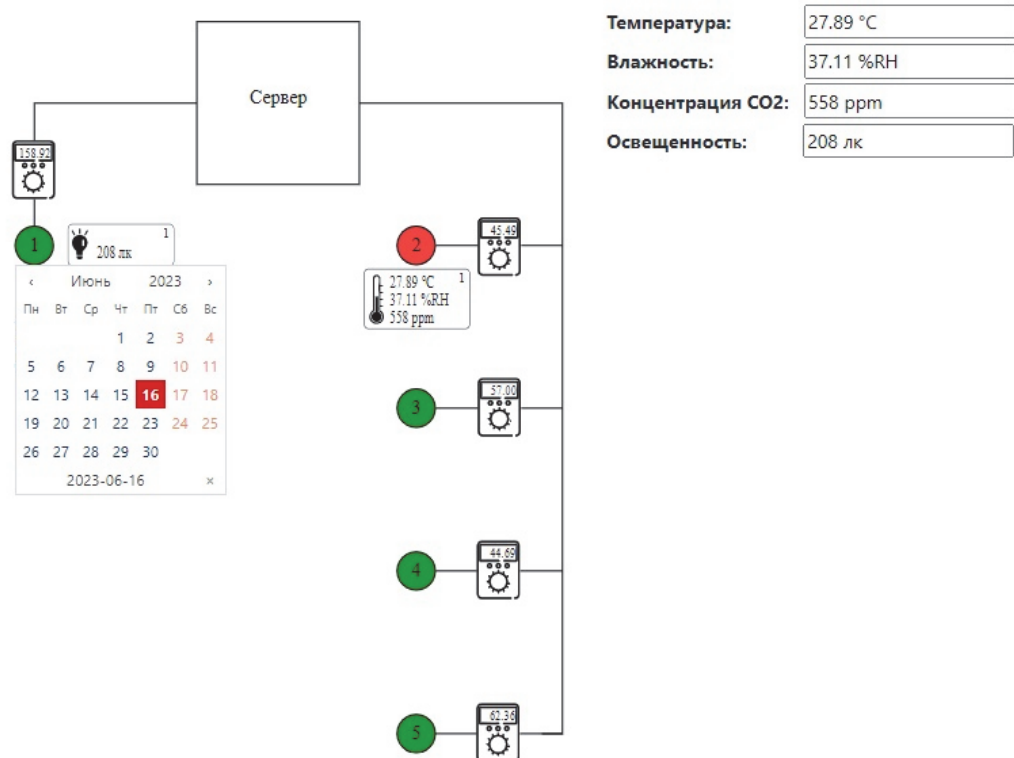


Рисунок 12 – Фрагмент веб-интерфейса, открытого на вкладке «Карта производства» во время запроса суточного отчета за 16.06.2023 г.

Суточный отчет, генерируемый разработанной ИИС, в общем виде представляет собой набор статистических данных и состоит из таблицы (рисунок 13, а) и визуализированной схемы работы оборудования за сутки в целом (рисунок 13, б) и по каждому часу (рисунок 13, в) и позволяет определить время работы оборудования, эффективность его использования (коэффициент загрузки), оценить расход режущего инструмента и номенклатуру изготовленных деталей.

Табличная часть отображает общее время работы оборудования, процент работы оборудования (машинное время), процент работы оборудования с учетом подготовительно-заключительного времени, общую потребленную электроэнергию, количество обработанных деталей и израсходованных инструментов в сутки в целом и за каждый час работы.

Визуализированная схема работы оборудования за сутки отображает уровень вибрации и энергопотребления оборудования с 00:00:00 до 23:59:59 и позволяет оценить картину работы оборудования в целом, например, ритмичность работы, количество перерывов, пики вибрации или пиковые мощности и т. д.

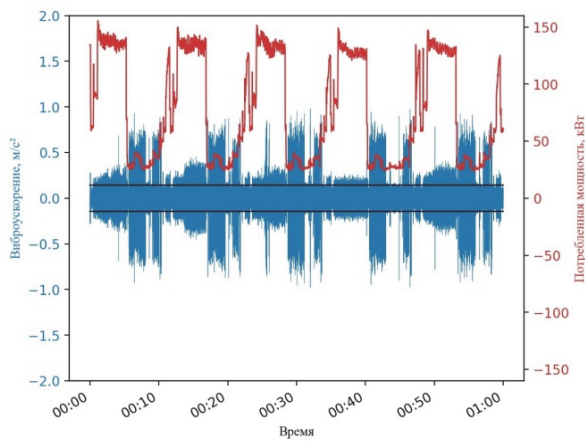
Недельный отчет (рисунок 13, г) представляет собой схематичное отображение времени работы оборудования, где зеленым обозначено выполнение операций, а оранжевым – простой. Также в отчете представлен процент загрузки оборудования в течение суток рассматриваемой недели.

Месячный отчет аналогичен недельному по структуре и визуальной составляющей и использовался для предоставления объективной информации высшему руководству предприятия.

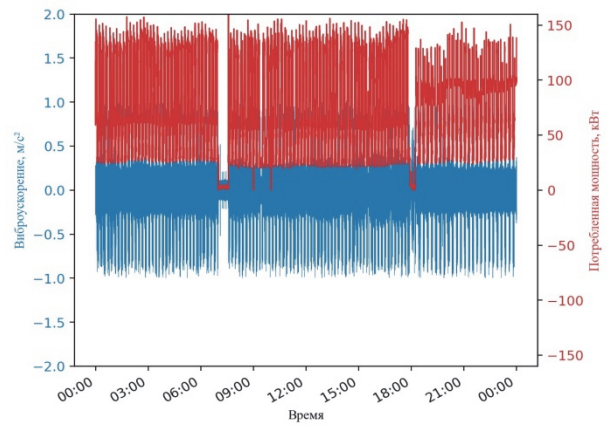
Отчёт 2023-08-01 - СПК1

Секунд всего	Секунд работы	Процент работы в сутки, %	Процент работы в рабочем время, %	Потребленная мощность, кВт*ч	Деталей	Инструментов	Период формирования
86400	69712	80.69	86.06	1706.19	92	0	0:00:00 - 23:59:59
3600	2969	82.47	82.47	76.17	5	0	0:00:00 - 1:00:00
3600	3052	84.78	84.78	78.31	5	0	1:00:00 - 2:00:00
3600	3057	84.92	84.92	83.17	5	0	2:00:00 - 3:00:00
3600	3060	85.0	85.0	76.39	5	0	3:00:00 - 4:00:00
3600	3066	85.17	85.17	74.85	5	0	4:00:00 - 5:00:00
3600	2999	83.31	83.31	77.58	5	0	5:00:00 - 6:00:00
3600	2976	82.67	82.67	77.18	5	0	6:00:00 - 7:00:00
3600	1169	32.47	32.47	31.05	2	0	7:00:00 - 8:00:00

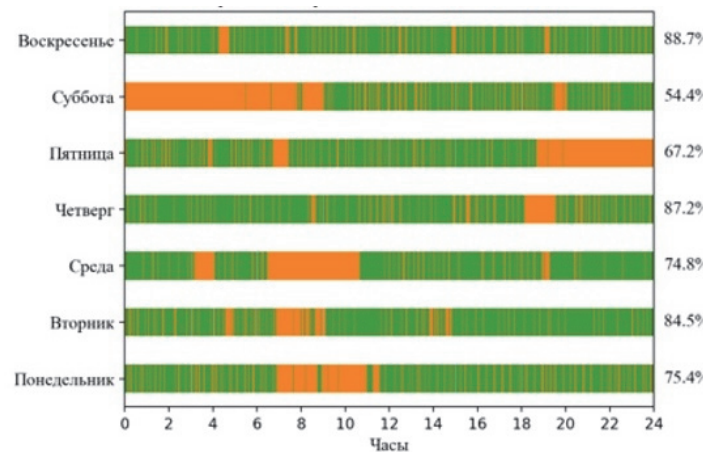
а



в



б



г

Рисунок 13 – Пример отчета о работе оборудования:

- а – статистические данные;
- б – визуальная схема работы за сутки;
- в – почасовая визуализация образов обработанных деталей;
- г – фрагмент еженедельного отчета

Анализ отчетов о протекании технологического процесса с целью контроля соблюдения технологической дисциплины и подсчета количества обработанных деталей можно выполнять вручную или автоматизированно.

Для повышения эффективности и оперативности принятия корректных управленческих решений предложен метод контроля технологической дисциплины на основе отчетов о работе оборудования по анализу их вибросигнала с использованием ИНС.

Для обработки временных рядов уровня вибрации и потребляемого тока, которые являются исходными данными для построения отчетов, использована рекуррентная нейронная сеть (RNN) с долговременной и кратковременной памятью (LSTM) и управляемый рекуррентный блок (GRU).

Из временного ряда сигнала вибрации по каждой из осей выбираются максимальные и минимальные значения. Максимальные значения и отдельно минимальные значения подвергались медианной фильтрации с шириной окна фильтра в 101 секунду с целью удаления выбросов. Затем для каждого временного интервала вычислялся размах путем вычитания минимального значения из максимального, что позволило компенсировать температурный дрейф показаний MEMS-

акселерометра. Далее вычислялась евклидова норма значений трех осей. Далее к данным применялось дискретно-временное преобразование Фурье.

При преобразовании применялась весовая функция Хэмминга. Далее амплитудные спектры представлялись в логарифмической шкале.

Для автоматической классификации обработанных деталей использована сверточная ИНС, входящая в состав технологий глубокого обучения.

Что касается вопроса алгоритмов выборки и обучения, то использованы простой кластерный сэмплинг и последовательный сэмплинг, а в качестве алгоритма обучения – обучение с учителем и обучение с подкреплением.

В случае отсутствия разметки исходных данных по производимым на оборудовании операциям, для разделения данных на фрагменты, соответствующие различным операциям, применяется метод распознавания без учителя, а именно кластеризация на основе глубокого погружения – Deep Embedded Clustering (DEC).

Предложенная ИНС показала хороший результат. Разделение на два класса позволяет отделить элементы обработки изделия от простоя.

Далее использована нейросетевая классификация этапов обработки внутри класса с использованием информации о количестве этапов обработки изделия (технологическом процессе). С использованием возможных этапов обработки составлялся алфавит операций, который позволяет анализировать последовательности и представлять информацию об изменениях в обработке изделия (появления новых букв алфавита), а также автоматически разделять сигнал на виды обработанных деталей продукции (рисунок 14, а). На рисунках 14, б и 14, в представлены фрагменты отчета, который сгенерирован с использованием обученной искусственной нейронной сети. В отчет добавлен раздел с информацией о номенклатуре изготовленных деталей и времени их изготовления. На графиках появился контур обводки сигнала, указывающий, что ИНС посчитала исследуемую деталь соответствующей технологическому процессу изготовления и внесла в раздел «Обработанные детали».

Как видно из приведенных примеров, на основе интеллектуального анализа с использованием ИНС реализована классификация выполняемых технологических процессов, по результатам которой проведен анализ состояния технологических систем.

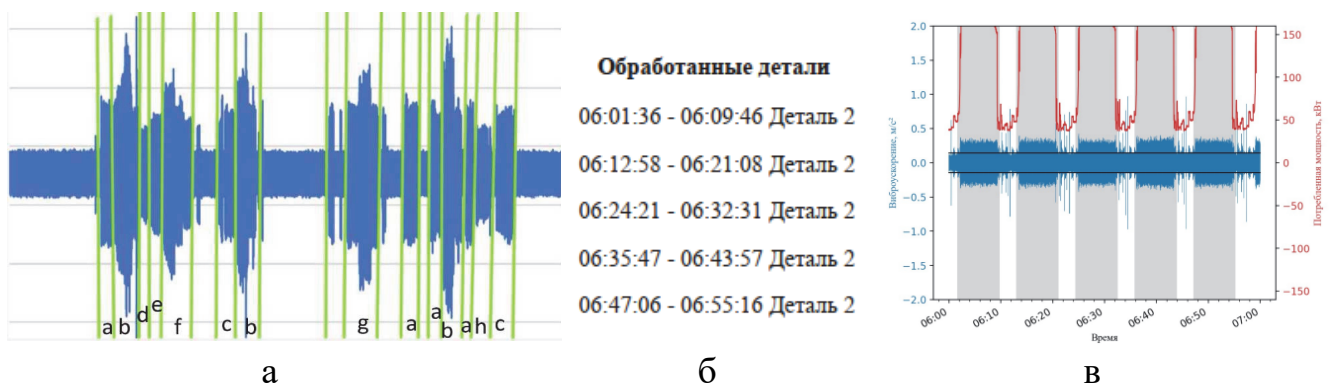


Рисунок 14 – Фрагмент отчета о работе оборудования:

- а – пример финального этапа анализа временного ряда с использованием ИНС;
- б – информация о номенклатуре изготовленных деталей;
- в – почасовая визуализация образов обработанных деталей, обработанная ИНС

Исходя из вышеизложенного метод контроля технологической дисциплины на основе отчетов о работе оборудования по анализу их вибросигнала с использованием ИНС, можно свести по циклу развития DMAIC к следующим шагам:

1. Планирование и выдача исполнителю задания на работу.
2. Оперативный контроль за состоянием технологической системы через веб-приложение.
3. Выработка корректирующих воздействий на исполнителя (при необходимости).
4. Выдача исполнителю обратной связи по результатам работы для улучшения технологической дисциплины.
5. Контроль исполнения задания через анализ отчетов о работе оборудования.

Что касается модели предиктивной аналитики, то из собранных данных можно выделить постоянную составляющую, характеризующую параметры технологического процесса, высокочастотную составляющую, характеризующую состояние быстро изнашиваемой оснастки (инструмента), и низкочастотную составляющую, характеризующую изменение состояния оборудования (рисунок 15).

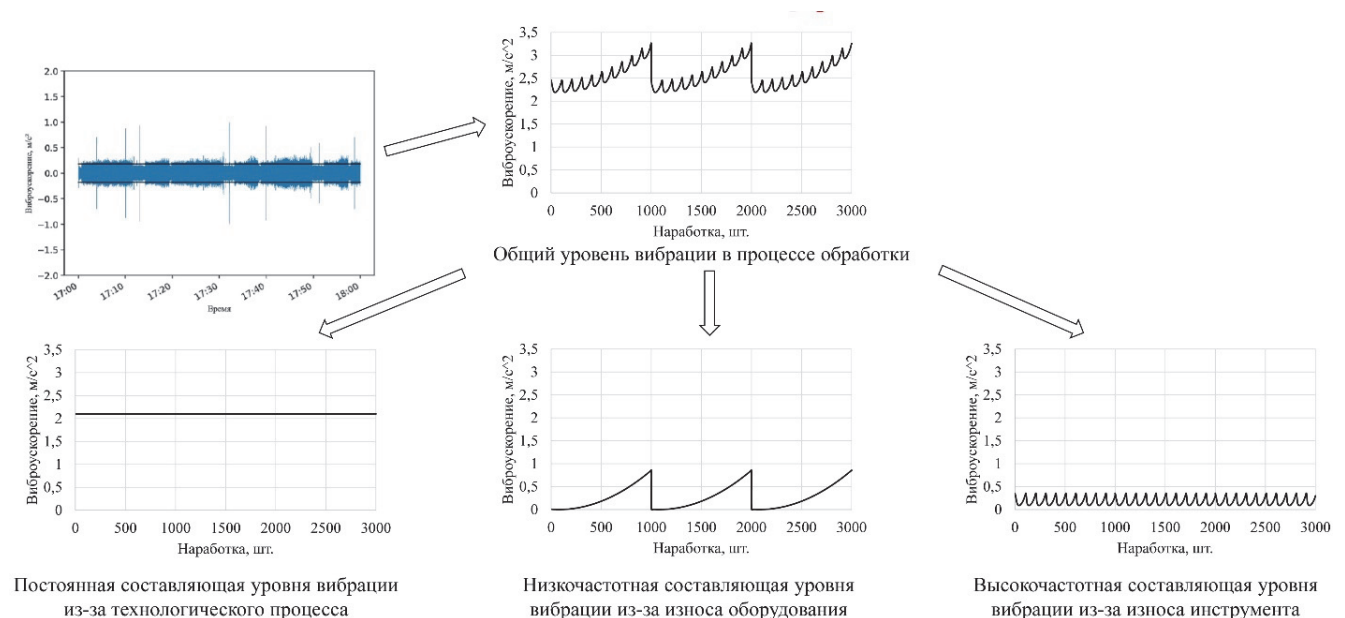


Рисунок 15 – Прогнозирующая модель работы системы предиктивной аналитики

Анализ постоянной составляющей позволил учитывать в процессе оперативно-производственного планирования машиностроительного производства соблюдение технологической дисциплины, высокочастотной составляющей – износ инструмента, а низкочастотной – предиктивное состояние технологического оборудования.

Для каждой единицы технологического оборудования по результатам вибродиагностики может быть установлено критическое значение вибрационного сигнала, по достижении которого необходимо профилактическое обслуживание оборудования для предотвращения аварийных ситуаций.

Метод предиктивной аналитики при этом следующий:

1. Оборудование оснащается диагностическим модулем.
2. Собранный сигнал вибрации передается на сервер.

3. Сигнал вибрации фильтруется (см. раздел 2).

4. С помощью ИНС в сигнале вибрации выделяются периоды работы оборудования и производится классификация обрабатываемых изделий путем сравнения с заранее определенными шаблонами сигнала вибрации.

5. Из полученных сигналов обработки формируется новый сигнал (рисунок 14), описывающий изменение сигнала вибрации при обработке аналогичных изделий:

$$y_t = f(y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-n}, y_{t-s-1}, y_{t-s-2}, \dots, y_{t-s-n}, \dots, y_{t-ms-1}, y_{t-ms-2}, \dots, y_{t-ms-n}, u_t),$$

где $n = \max(p, q)$, $m = \max(P_s, Q_s)$, s – период стойкости инструмента, u_t – номер инструмента, вычисляемый на основе исходного временного ряда по формуле

$u_t = \frac{Y_{st}}{Y_{s0}}$, где $Y_{st} = \frac{\sum_{i=1}^k Y_{it}}{k}$ – средняя по каждой обработанной детали t для всех k инструментов, $Y_{s0} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{t=1}^p Y_{it}}{kp}$ – общая средняя по всем инструментам (k) и обработанным деталям (p), Y_{it} – значение временного ряда для обработанной детали t и для текущего инструмента i .

Параметры p , q , P_s , Q_s определяются на основании автокорреляционных и частных автокорреляционных функций сигнала y_t , преобразованного к стационарному временному ряду методом конечных разностей соответственно для текущих значений временного ряда и для его сезонных составляющих.

6. В сигнале $y_t = S(t) + T(t) + R(t)$ выделяется постоянная составляющая $R(t)$, характеризующая параметры технологического процесса, высокочастотная составляющая $S(t)$, характеризующая износ инструмента, и низкочастотная составляющая $T(t)$, характеризующая износ оборудования. Для этого оценивается низкочастотная составляющая $T(t)$ через скользящее среднее, считается $S(t)$ как среднее без низкочастотной составляющей $y_t - T(t)$ для каждого инструмента, а постоянная составляющая считается как остаток: $R(t) = y_t - S(t) - T(t)$.

7. Проводится анализ полученных сигналов для контроля соблюдения технологической дисциплины при изготовлении изделий $R(t) = R_{\text{норм}}(t)$ и прогнозирования отказа инструмента $S(t) < S_{\text{крит}}(t)$ или оборудования $T(t) < T_{\text{крит}}(t)$ с выдачей соответствующих рекомендаций. Уровни сигнала обработки на нормативных режимах резания $R_{\text{норм}}(t)$, сигнала при критическом износе инструмента $S_{\text{крит}}(t)$ и оборудования $T_{\text{крит}}(t)$ определяются при внедрении ИИС.

Предложенные методы позволяют в режиме реального времени обеспечить оперативный автоматизированный косвенный контроль состояния технологических систем и сбор статистических данных о протекании технологических процессов и соблюдения технологической дисциплины.

В пятом разделе предложен метод назначения рациональных режимов обработки на основе контроля состояния технологических систем по данным косвенного контроля вибрации.

Назначение режимов резания влияет на эффективность работы технологических систем: повышение качества обработки; увеличение производительности; увеличение срока службы инструмента; экономия материалов и ресурсов; повышение безопасности операторов и окружающих.

В диссертационной работе А.В. Анцева «Повышение эффективности эксплуатации лезвийного инструмента при неопределенности условий обработки» предложена методика назначения оптимальных режимов резания с учетом вариабельности периода стойкости лезвийного инструмента, разработанная на основе обобщенной стохастической модели отказов режущего инструмента и стойкостной зависимости на ее основе:

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} \exp[-(\frac{t}{r})^{\beta}] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_a} \int_0^{\infty} \frac{1}{a} \exp[-\frac{(\ln a - \ln \hat{a})^2}{2\delta_a^2}] \cdot \Phi^* (\frac{L - at}{\sigma_{\Delta Y} \sqrt{t}}) da dt,$$

где \bar{T} – математическое ожидание периода стойкости, a – средняя интенсивность изнашивания инструмента, $\Phi^*(x)$ – функция распределения нормированной нормальной случайной величины, L – предельно допустимый уровень износа режущего инструмента. Указанная зависимость имеет 5 параметров: среднегеометрическое значение средних интенсивностей изнашивания по режущим инструментам \hat{a} , среднеквадратическое отклонение приращения износа на единицу наработки $\sigma_{\Delta Y}$, среднеквадратическое отклонение логарифма среднегеометрического значения средних интенсивностей изнашивания по режущим инструментам одной партии δ_a , наработка режущего инструмента до разрушения r и вариабельность наработки режущего инструмента до разрушения β .

Чтобы получить зависимость указанных параметров от режимов резания в конкретных условиях обработки, необходимо иметь статистические данные о наработке и износе инструмента. Для сбора необходимых статистических данных предложено использовать разработанную ИИС.

В качестве примера рассмотрена деталь «Корпус», представляющая собой тонкостенную трубу. Типовой технологический процесс изготовления указанной детали состоит из 7 операций, в том числе черновой и чистовой расточки, точения канавки и нарезания резьбы. На разных режимах резания было обработано 60 заготовок детали «Корпус» и по результатам проведенных испытаний были построены зависимости уровня вибрации от режимов резания (скорость резания v , подача S и глубина резания h) для операций технологического процесса обработки в виде $A = f(v, S, h)$. Пример полученной зависимости уровня вибрации от скорости резания v и глубины резания h при подаче $S = 2$ мм/об для операции «Резьба» представлен на рисунке 16.

С помощью полученных зависимостей на основе методики определения стадии износа инструмента с использованием вибропаспорта системы СПИЗ на основе модели Кэптейна разработанной ИИС были собраны необходимые статистические

данные, и с применением методики оптимизации технологического процесса на основе стохастической модели отказов режущего инструмента были разработаны рекомендации по оптимизации режимов резания технологического процесса обработки детали «Корпус». Для применения методики оптимизации технологического процесса на основе стохастической модели отказов режущего инструмента на типовом оборудовании предприятия без проведения дополнительных стойкостных испытаний предложена методика априорной оценки параметров обобщенной стохастической модели отказов режущего инструмента на основе данных об уровне вибрации в процессе резания.

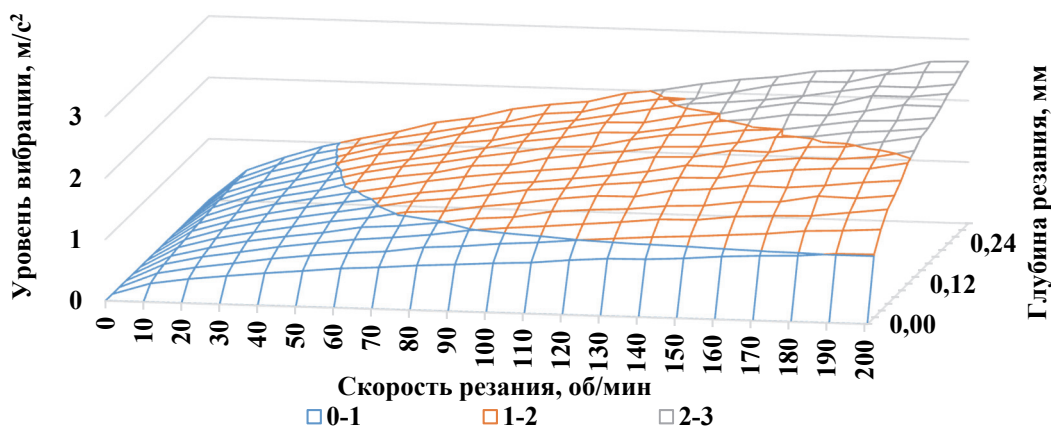


Рисунок 16 – Зависимость уровня вибрации от скорости резания и глубины резания на примере операции «Резьба»

Априорное назначение параметров стохастической модели отказов режущего инструмента проводится с помощью собранных разработанной ИИС опытных данных по результатам предыдущей эксплуатации металлорежущих станков с использованием ИНС.

В качестве архитектуры ИНС использован многослойный персептрон. Так как зависимость пяти выходных параметров (параметров обобщенной стохастической модели отказов режущего инструмента) от пятнадцати входных (параметры металлорежущего станка и приспособлений, инструмента и обрабатываемой заготовки, а также режимы резания) является нелинейной, предложенная ИНС содержит входной слой, два скрытых слоя и выходной слой. Таким образом, ИНС для априорного назначения параметров стохастической модели отказов режущего инструмента имеет 15 нейронов во входном слое, 5 нейронов в выходном слое, а число нейронов в первом и втором скрытых слоях будет соответственно равно 10 и 7.

Таким образом, разработанный метод априорного назначения параметров стохастической модели отказов режущего инструмента на основе ИНС включает в себя следующие этапы:

1. Сбор и обработку статистических данных о наработке и износе режущего инструмента с использованием разработанной ИИС.
2. Обучение предложенной ИНС для априорного назначения параметров стохастической модели отказов режущего инструмента на собранном массиве статистических данных.
3. Применение предложенной ИНС для априорного назначения параметров стохастической модели отказов режущего инструмента.

4. Дообучение ИНС по результатам фактической работы технологических систем, контролируемых с помощью разработанной ИИС.

Априорная оценка параметров обобщенной стохастической модели отказов режущего инструмента с использованием ИНС, обученной в автоматизированном режиме с помощью статистических данных, полученных с помощью разработанной ИИС, позволила применять стохастическую модель отказов режущего инструмента в условиях многономенклатурного, часто переналаживаемого производства, в том числе при использовании различных комбинация новых инструментальных и конструкционных материалов, для которых отсутствуют стойкостные зависимости, полученные в ходе экспериментов.

В шестом разделе представлена апробация разработанных средств, методов и алгоритмов.

Стоит пояснить, что ранее была сделана сноска о возможности идентификации номенклатуры обработанных заготовок. Это становится возможно при системном анализе работы оборудования, на котором осуществляется один и тот же технологический процесс с обработкой типовых деталей.

На основе разработанного способа установки датчиков вибрации и тока на рисунке 17 представлен диагностический модуль и пример его монтажа на технологическом оборудовании.

Результаты апробации разработанной ИИС с использованием предложенных методов и алгоритмов представлены ниже.

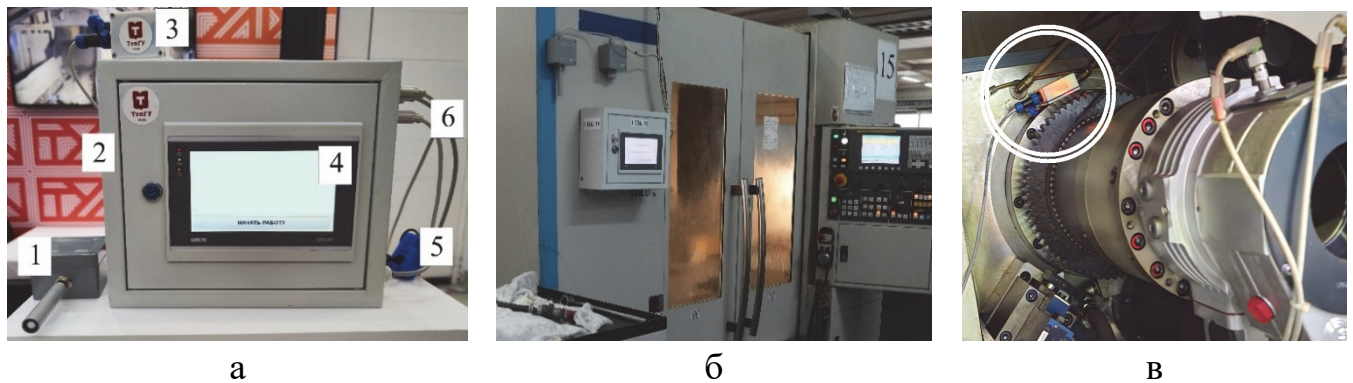


Рисунок 17 – Диагностический модуль ИИС:

а – выставочный образец;

1 – датчик температуры и влажности; 2 – защитный корпус панели оператора;

3 – датчик вибрации; 4 – панель оператора; 5 – датчик тока/трансформатор тока;

6 – разъемы проводного подключения;

б – образец, установленный на производстве;

в – датчик вибрации, установленный на корпус подшипника шпинделя станка

В ходе проведенных исследований были выявлены нарушения технологической дисциплины при изготовлении различных деталей на технологическом оборудовании. На рисунке 18 представлена регистрация факта работы оборудования на холостом ходу для имитации работы.

На рисунке 19 представлен вариант использования программы, имитирующей работу станка по управляющей программе. Видно, что график начинается с

хорошо визуализированных образов деталей, характерных для этого оборудования, однако далее ИИС регистрирует повторяющиеся холостые ходы суппорта и вращение револьверной головки, что свидетельствует о регистрации факта нарушения технологической дисциплины.

Кроме того, к нарушению технологической дисциплины относится аспект самовольного изменения рабочими режимов резания или фактов отклонения от технологического процесса.

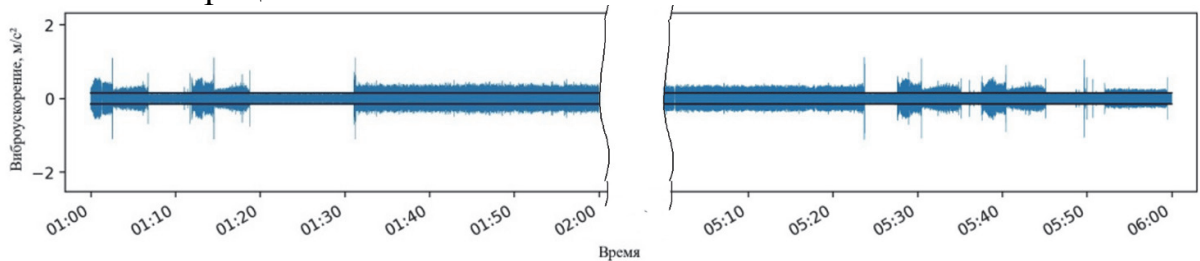


Рисунок 18 – Картина работы станка с 01:00 до 06:00

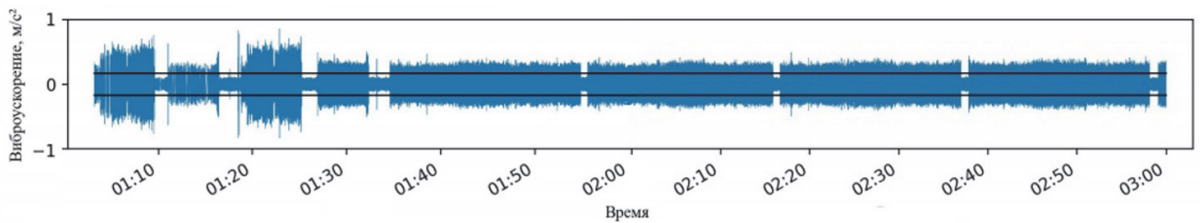
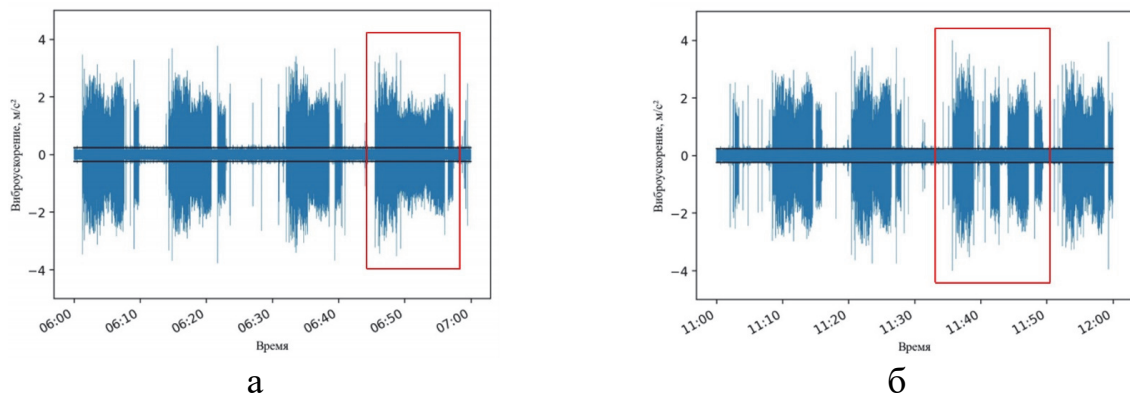


Рисунок 19 – Картина работы станка с 01:00 до 03:00

Так, на рисунке 20, а видно, что на одном из переходов были уменьшены режимы резания, вследствие чего рисунок детали приобрел более вытянутые очертания, а время изготовления детали увеличилось. На рисунке 20, б представлено прерывание технологического процесса обработки детали и переделки (повтора) некоторых переходов.



а

б

Рисунок 20 – Картина работы станка:

а – при изменении режимов резания;

б – при прерывании процесса обработки при повторе переходов

Как видно из анализа рисунка 21, сигнал на графиках можно четко интерпретировать как последовательность обработки одинаковых деталей, что подтверждено записями в журнале исследуемого станка (эта же деталь рассматривалась в предыдущем примере об изменениях режимов резания).

В зависимости от смены и оператора меняется ритмичность и производительность работы – выпуск готовых деталей увеличился от 3 до 6 готовых деталей в час, коэффициент загрузки оборудования (1) увеличился с 0,395 до 0,789, а коэффициент ритмичности (2) увеличился с 0,5 до 1. Анализ такой информации позволяет оценить фактическую производительность каждого оператора, что позволяет и помогает более точно планировать производственный процесс.

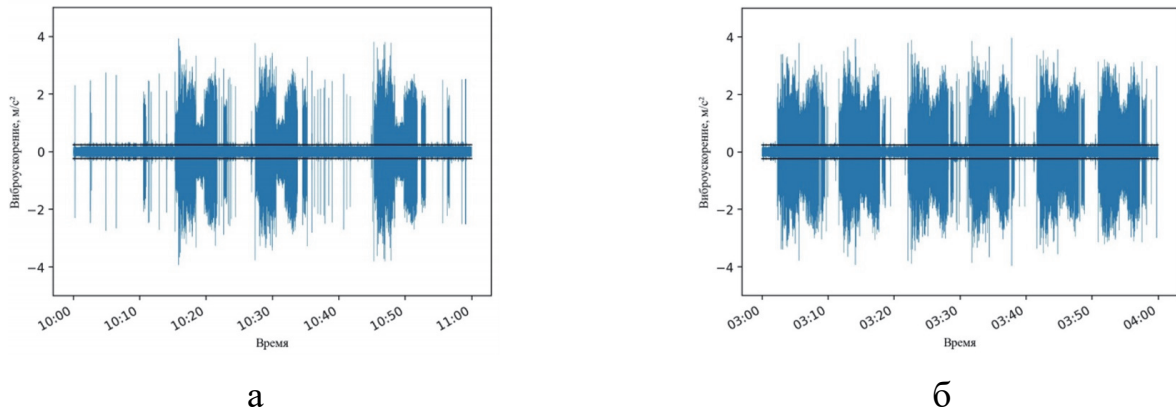


Рисунок 21 – Картина работы станка в разные смены:
а – первая (дневная) смена; б – третья (ночная) смена

Нарушение технологической дисциплины, на примере несоблюдения сменно-суточного задания показан на рисунке 22. На рисунке 22, а представлен фрагмент записанного сигнала вибрации, соответствующий сменно-суточному заданию по обработке в период с 21:30 до 00:30 семи деталей номер 1 с затратой 14 минут на каждую. Анализ фрагмента записанных сигналов вибрации за соответствующий промежуток времени показал, что сменно-суточное задание было выполнено полностью.

На рисунке 22, б представлен фрагмент записанного сигнала вибрации, соответствующий сменно-суточному заданию по обработке в период с 14:00 до 20:30 шестнадцати деталей номер 2 с затратой 25 минут на каждую.

Анализ записанного сигнала вибрации за соответствующий промежуток времени показал, что перед выполнением сменно-суточного задания была обработана одна единица детали 1, что является нарушением технологической дисциплины и этот инцидент должен быть рассмотрен мастером участка.

После получения операторами обратной связи о выявленных фактах несоблюдения технологической дисциплины нарушения прекратились.

Применение разработанной ИИС повышает эффективность машиностроительных предприятий на основе обеспечения рационального использования оборудования, инструмента, производственных и человеческих ресурсов за счет контроля соблюдения технологической дисциплины путем: регистрации факта работы оборудования на холостом ходу для имитации работы; регистрации факта работы оборудования, имитирующей работу станка по управляющей программе; выявления фактов изменения режимов резания; фиксации прерывания технологического процесса и переделки некоторых переходов; анализа ритмичности производства и фактической производительности каждого оператора; обнаружения несоблюдения

сменно-суточного задания, а также позволяет своевременно принимать управленческие решения, основанные на достоверных данных.

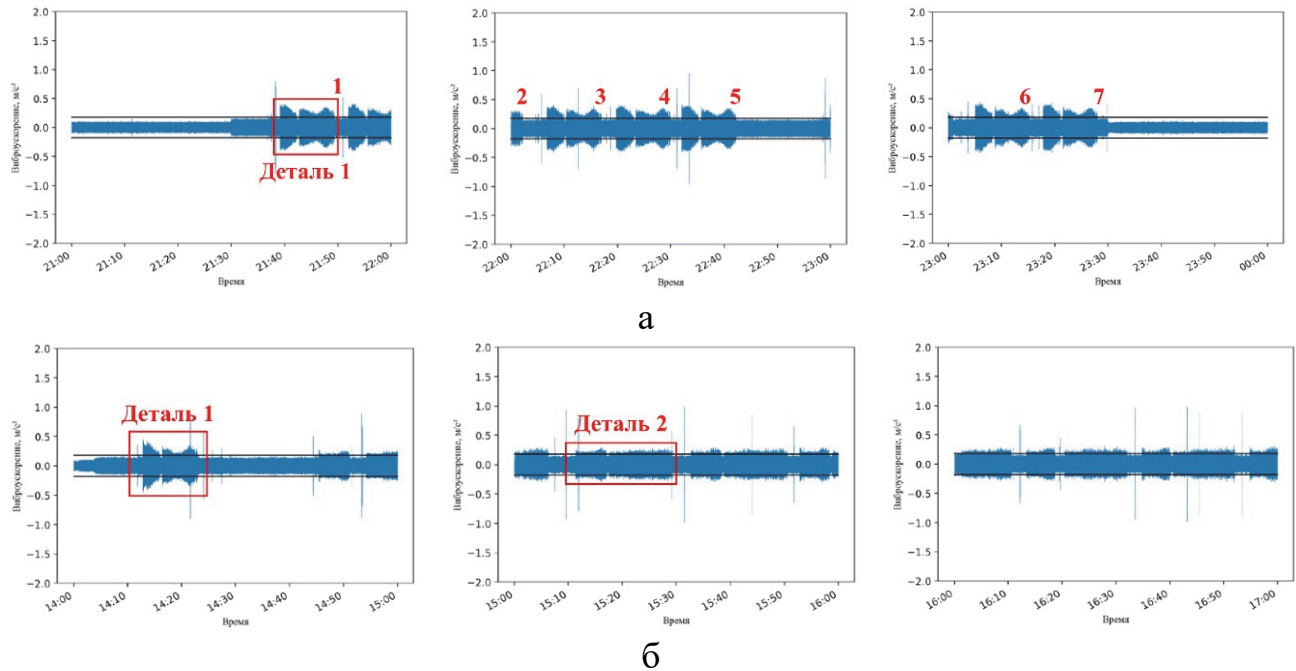


Рисунок 22 – Пример несоблюдения технологической дисциплины:
а – обработка детали, тип 1; б – обработка детали, тип 2

Внедрение разработанной ИИС позволило существенно повысить эффективность использования технологических систем, рассчитанную в соответствии с «Методикой оценки экономического эффекта при реализации мероприятий по оптимизации производства», утвержденной Приказом АО «Технодинамика» от 05.04.2021 № 52-О, и составила в ценах 2023 г. 52 250 687,33 руб. (100 % из них далее) в год за счет:

- снижения затрат на простои оборудования (10,5 %);
- снижения потерь от сокращения продолжительности и количества переналадок оборудования (9,8 %);
- снижение затрат на сокращение длительности производственного цикла (4,7 %);
- снижения затрат от сокращения брака продукции (28,5 %);
- снижения затрат от увеличения стойкости инструмента (40,9 %);
- снижения затрат от сокращения цикла обработки на оборудовании (5,6 %).

В заключении изложены итоги выполненного исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложении представлены акт калибровки датчика, пример суточного отчета, расчет экономической эффективности от внедрения разработанной ИИС, копии документов о внедрении результатов диссертационного исследования в реальном секторе экономики, копии свидетельств на программы для ЭВМ и полезную модель Роспатента РФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе разработанной и внедренной в производство ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем решена актуальная научная проблема обоснования методов и средств обеспечения оперативного косвенного контроля, сбора и обработки информации о протекающих технологических процессах и прогнозирования состояния технологических систем, в том числе с помощью применения искусственных нейронных сетей (ИНС), в условиях возросших объемов выпуска продукции двойного и специального назначения с учетом сложности применения существующих на рынке известных ИИС, требующих подключения к СЧПУ технологического оборудования, являющегося объектами КИИ промышленных производств для контроля технологической дисциплины.

Основные научные и практические результаты работы, которые получены автором самостоятельно и могут быть использованы при создании перспективных ИИС, состоят в следующем:

1. Проведен анализ современных подходов и методов оценки состояния технологических систем, а также используемых для этого АПК отечественного и зарубежного производства, который позволил определить их достоинства и недостатки, а также обосновать необходимость совершенствования методов и средств обеспечения оперативного косвенного контроля, сбора и обработки информации о происходящих технологических процессах, и прогнозирования состояния технологических систем и сформулировать требования к разрабатываемой информационно-измерительной системе оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств.

2. Разработаны средства косвенного контроля состояния технологических систем, включающие в себя датчики вибрации и датчик тока, позволившие обеспечить контроль в том числе оборудования с пониженной вибронагруженностью без подключения к СЧПУ станка.

3. Проведено исследование вибрационного сигнала технологических систем, которое показало, что частотный диапазон до 100 Гц позволяет вести контроль загрузки станков и в диагностических целях определять дисбалансы и механические ослабления суппорта, диапазон 20–400 Гц позволяет контролировать дефекты подшипников качения приводного двигателя, диапазон 800–3 000 Гц позволяет контролировать дефекты электромагнитной системы электродвигателей; диапазон 8 000–16 000 Гц позволяет контролировать дефекты подшипников качения коробки скоростей.

4. Разработан способ выбора места установки средств косвенного контроля состояния технологических систем, позволяющий построить ИИС, которая на основе одного датчика вибрации, расположенного в определенной точке оборудования, сможет контролировать состояние технологической системы, дисциплины и износ инструмента.

5. Разработана математическая модель ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств, которая позволяет не только осуществлять оперативный контроль, сбор и обработку информации о технологических процессах, но и оценивать динамику состояния и работы технологической системы (износ инструмента, износ рабочих устройств, накапливающиеся изменения в работе оборудования).

6. Предложены архитектура и алгоритм ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем, отличающиеся тем, что за счет использования методов косвенного контроля не требуется подключение к СЧПУ станка, что позволяет применять такую ИИС для контроля оборудования, не имеющего СЧПУ, а также не повышает категорию значимости объекта КИИ оборудования, имеющего СЧПУ.

7. Впервые разработан метод контроля технологической дисциплины с применением ИИС для ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств, который позволил повысить скорость анализа отчетов о работе технологических систем на 91,4 %.

8. Разработан метод предиктивной аналитики состояния технологических систем с применением ИИС для ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств, отличающийся тем, что из уровня вибрации в процессе обработки выделяется постоянная составляющая, характеризующая параметры технологического процесса, высокочастотная составляющая, характеризующая состояние быстро изнашиваемой оснастки (инструмента), и низкочастотная составляющая, характеризующая изменение состояния оборудования.

9. Впервые разработан метод-назначения рациональных режимов обработки на основе контроля состояния технологических систем по данным косвенного контроля вибрации с использованием ИИС в виде многослойного персептрона, имеющего 15 нейронов во входном слое, 5 нейронов в выходном слое и число нейронов в первом и втором скрытых слоях, соответственно равное 10 и 7, с использованием ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств.

10. Реализованная и внедренная в реальном секторе экономики ИИС на основе косвенного контроля состояния технологической системы подтвердила свою эффективность с экономическим эффектом от внедрения на АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева» в размере 52 250 687,33 руб. в год за счет использования в производстве разработанной ИИС.

Основные научные и практические результаты работы рекомендуется применять на машиностроительных предприятиях для повышения эффективности эксплуатации технологических систем.

Перспективой дальнейшей разработки темы диссертации является применение разработанного в рамках диссертационного исследования подхода к контролю состояния технологических систем, реализующих другие способы металлообработки, например, кузнечно-прессового оборудования.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Научные работы в рецензируемых научных журналах и изданиях.

1. Датчик вибрации как основа системы мониторинга оборудования / Е.С. Янов [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2024. – Т. 22. – № 3. – С. 23-30.

2. Янов, Е.С. Автоматизированный контроль технологической дисциплины современного машиностроительного производства / Е.С. Янов, А.В. Анцев // Вестник РГРТУ. – 2024. – №88. – С. 86-95.

3. Янов Е.С., Антонычев С.В., Анцев А.В., Воротилин М.С., Минаков Е.И. Исследование способов контроля состояния фрезерных станков на основе анализа вибрационных характеристик // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024.С. 157-166.

4. Янов, Е.С. Применение технологий машинного обучения и искусственного интеллекта для анализа технологических процессов / Е.С. Янов, А.В. Анцев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. – 2024. – №3. – С. 33-40.

5. Янов, Е.С. О проблемах интеграции информационно-измерительных систем в условиях противодействия компьютерным атакам / Янов, Е.С. // Электроника НТБ. – 2024. – №6. – С. 60-63.

6. Янов, Е.С. Построение цифрового двойника производственного процесса на основе информационно-измерительной системы косвенного контроля вибрации / Е.С. Янов // Электроника НТБ. – 2024. – №7. – С. 168-174.

7. Янов Е.С. Математическая модель информационно-измерительной системы косвенного контроля состояния технологических систем / А.В. Анцев, Е.С. Янов // Электроника – НТБ. – 2024. – №9. – С. 120-122.

8. Данные о потребляемой оборудованной мощностью как дополнительный источник информации для информационно-измерительной системы / А.В. Анцев, Д.П. Барсуков, М.С. Воротилин, А.П. Цивенкова, Е.С. Янов // Электроника НТБ. – 2024. – №9. – С.124-127.

Научные работы в изданиях, индексируемых в информационно-аналитических системах научного цитирования Web of Science и Scopus.

9. Pas'ko N.I. Stochastic model of cutting-tool failure based on the level of vibration / N.I. Pas'ko, A.V. Antsev, E.S Yanov // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41. – №. 3. P. 240-245.

10. New system for indirect tool monitoring in industrial systems and processes / E.S. Yanov, A.V. Antsev, M.S. Vorotilin, E.I. Minakov // Russian Engineering Research. – 2024. – Vol. 44. – No. 6. – P. 868-870.

Монографии.

11. Янов, Е.С. Исследование влияния износа режущего инструмента на вибрацию тонкостенных заготовок при точении / Е.С. Янов, А.В. Анцев, М.С. Воротилин. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2024. – 173 с.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

12. Управляющая программа панели оператора на базе Raspberry Pi аппаратно-программного комплекса оптимизации точения тонкостенных заготовок [Текст]: свид-во о регистрации программы для ЭВМ № 2022612735/ Анцев А.В., Воротилин М.С., Янов Е.С.; заявитель и правообладатель АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева». – Заявка № 2022611961; дата поступления 14.02.2022; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 28.02.2022.

13. Управляющая программа модуля сбора информации аппаратно-программного комплекса оптимизации точения тонкостенных заготовок [Текст]: свид-во о регистрации программы для ЭВМ № 2022612744/ Анцев А.В., Воротилин М.С., Янов Е.С.; заявитель и правообладатель АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева». – Заявка № 2022611965; дата поступления 14.02.2022; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 28.02.2022.

14. Беспроводная система измерения механических колебаний вращающихся заготовок [Текст]: патент на полезную модель RU 216025 U1 / Анцев А.В., Воротилин

М.С., Янов Е.С.; заявитель и правообладатель АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева». – Заявка № 2022103334; дата поступления 09.02.2022.

15. Интеллектуальная система эффективной эксплуатации лезвийных инструментов с учетом вариабельности процессов резания // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2024611002, 17.01.2024. / Анцев А.В., Янов Е.С., Арсеньева А.А., Сальников С.В.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «ТулГУ». Заявка № 2023689736 от 27.12.2023.

Научные работы в других изданиях.

16. Янов, Е.С. Априорная оценка параметров обобщенной стохастической модели отказов режущего инструмента на основе данных об уровне вибрации в процессе резания / А.В. Анцев, А.А. Арсеньева, Е.С. Янов. – Текст: электронный // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий: сборник трудов международного научного симпозиума технологов-машиностроителей / под редакцией В.А. Лебедева; Донской государственной технической университет. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2022. – С. 150-155

17. Янов, Е.С. Методика назначения рациональных режимов резания и периодичности восстановления режущего инструмента с учетом вариабельности процессов резания / А.В. Анцев, Е.С. Янов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 12. – С. 595-600. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-12-595-600.

18. Янов, Е.С. Автоматизация восстановления интеллектуальной системы эффективной эксплуатации лезвийных инструментов / А.В. Анцев, Е.С. Янов // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения. Сборник научных трудов Национальной научно-технической конференции с международным участием. – 2023. – С. 181-187.

19. Устройство для обновления кода микроконтроллеров датчиков интеллектуальной системы эффективной эксплуатации режущих инструментов / А.В. Анцев, Е.С. Янов, Н.В. Анцева, А.А. Арсеньева // В сборнике: Проблемы и перспективы развития автоматизации технологических процессов. Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения лауреата Государственной премии СССР, доктора технических наук, профессора Дмитриева Льва Борисовича. Сер. «Вестник Тульского государственного университета». – Тула, Изд-во ТулГУ, 2023. – С. 67-71.

20. Янов, Е.С. Информационно-измерительные системы мониторинга работы станочного парка предприятия / А.В. Анцев, Е.С. Янов, М.С. Воротилин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 9. – С. 495-498.

21. Янов Е.С. Интеллектуальная система эффективной эксплуатации режущих инструментов с учетом вариабельности процесса резания / А.В. Анцев, Е.С. Янов, Г.В. Шадский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – №12. – С. 13-18.

22. Анализ тенденций развития систем мониторинга технологического оборудования / А.В. Анцев, М.С. Воротилин, Л.А. Каравдин, Е.С. Янов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – №7. – С. 584-586.